

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ  
ЦЕНТР ДОСЛІДЖЕНЬ НАУКОВО-ТЕХНІЧНОГО ПОТЕНЦІАЛУ ТА  
ІСТОРІЇ НАУКИ ІМ.Г.М.ДОБРОВА

на правах рукопису

**ЛИТВИНКО АЛЛА СТЕПАНІВНА**

УДК 53(477)(091)

**СТАНОВЛЕННЯ ТА РОЗВИТОК СТАТИСТИЧНОЇ ФІЗИКИ В  
УКРАЇНІ  
(30–60 рр. ХХ ст.)**

спеціальність – 07.00.07 – Історія науки і техніки

**ДИСЕРТАЦІЯ**

на здобуття наукового ступеня  
доктора історичних наук

Науковий консультант  
Храмов Юрій Олексійович,  
доктор фізико-математичних наук, професор

Київ–2009

**СТАНОВЛЕННЯ ТА РОЗВИТОК СТАТИСТИЧНОЇ ФІЗИКИ В  
УКРАЇНІ (30–60 рр. ХХ ст.)**

<b>ВСТУП</b> -----	<b>5</b>
<b>РОЗДІЛ 1. ІСТОРИОГРАФІЯ ТА ДЖЕРЕЛЬНА БАЗА ДОСЛІДЖЕННЯ</b> -----	<b>18</b>
<b>ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1</b> -----	<b>51</b>
<b>РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ ПРЕДМЕТУ, ЗАДАЧ ТА МЕТОДОЛОГІЇ СТАТИСТИЧНОЇ ФІЗИКИ</b>	
2.1. Предмет та задачі статистичної фізики-----	<b>52</b>
2.2. Аналіз підходів до визначення статистичної фізики як предметної галузі науки-----	<b>59</b>
2.3. Методологія статистичної фізики-----	<b>62</b>
2.4. Статистична фізика та наукова картина світу-----	<b>72</b>
<b>ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2</b> -----	<b>80</b>
<b>РОЗДІЛ 3. ПЕРЕДІСТОРІЯ СТАТИСТИЧНОЇ ФІЗИКИ В УКРАЇНІ (XIX–20-ті рр. ХХ ст.)</b>	
3.1. Стан статистичної фізики на початок 30-х рр. ХХ ст. (світовий контекст)	
3.1.1. Зародження статистичної механіки у 50-х рр. XIX ст. (А. Крьоніг, Р.Клаузіус, Дж.Максвелл)-----	<b>81</b>
3.1.2. Формування рівноважної статистичної фізики як синтез молекулярно-кінетичних і термодинамічних уявлень (кінець XIX – 20-ті рр. ХХ ст.) (Дж.Максвелл, Л.Больцман, Дж.Гіббс)-----	<b>90</b>
3.1.3. Проникнення квантових уявлень у статистичну фізику ( 1900–1932 рр.) -----	<b>96</b>
3.2. Передісторія статистичної фізики в Україні (XIX–20-ті рр. ХХ ст.)	
3.2.1. Експериментальні передумови сприйняття статистичної фізики в Україні (М.П.Авенаріус, М.О.Умов, М.Д.Пильчиков, Ф.Н. Шведов)-----	<b>103</b>
3.2.2. Перші теоретичні узагальнення ймовірнісних уявлень (М.М. Пирогов, М.Смолуховський, М.М.Шиллер, Т.О.Афанасьєва- Еренфест)-----	<b>118</b>
<b>ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3</b> -----	<b>130</b>
<b>РОЗДІЛ 4. СТАНОВЛЕННЯ СТАТИСТИЧНОЇ ФІЗИКИ В УКРАЇНІ (30–40-і рр. ХХ ст.)</b>	
4.1. Формування нерівноважної статистичної фізики (світовий контекст) ( 30–40-і рр. ХХ ст.)-----	<b>131</b>
4.2. Л.Д.Ландау і початок систематичних досліджень в галузі статистичної фізики в Україні (30-ті рр. ХХ ст.)-----	<b>135</b>
4.3. Розгортання широкомасштабних досліджень зі статистичної фізики в Україні-----	<b>148</b>
4.4. Побудова М.М.Боголюбовим мікроскопічної теорії надплинності ( 1947 р.)-----	<b>158</b>

4.5. Створення теорії кристалізації та теорії будови рідин (В.І.Данилов, 30-ті рр. ХХ ст.)-----	164
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 4-----	176
<b>РОЗДІЛ 5. РОЗВИТОК СТАТИСТИЧНОЇ ФІЗИКИ В УКРАЇНІ (50–60-ті рр. ХХ ст.)</b>	
5.1. Розвиток методів статистичної фізики в Україні	
5.1.1. Започаткування теорії неупорядкованих систем та теорії флуктуаційних рівнів (І.М.Ліфшиць, 1964—1967 рр.)-----	178
5.1.2. Створення методу колективних змінних у класичному та квантовому випадках (І.Р.Юхновський, 1958—1964 рр.)-----	182
5.1.3. Розвиток статистичної теорії фазових переходів (І.Р. Юхновський, кінець 60-х рр. ХХ ст.)-----	186
5.1.4. Поширення методу скороченого опису на широкий клас динамічних систем. Побудова нерівноважної крупноструктурної ентропії системи взаємодіючих частинок (С.В.Пелетмінський, 60-ті — початок 70-х рр. ХХ ст.)-----	190
5.1.5. Обґрунтування нерівноважної статистичної механіки нескінченних систем. Еволюційний підхід до кінетичних рівнянь для квантової статистики (Д.Я.Петрина, кінець 60-х рр. ХХ ст.)-----	194
5.1.6. Застосування методів статистичної фізики у квантовій теорії поля та теорії елементарних частинок (М.М.Боголюбов, 1951—1965 рр.)-----	198
5.2. Застосування математичного апарату статистичної фізики до конкретних фізичних задач	
5.2.1. Побудова мікроскопічної теорії надпровідності (М.М. Боголюбов, 1957 р.)-----	210
5.2.2. Створення електронної теорії металів (І.М.Ліфшиць, друга половина 50-х–60-ті рр. ХХ ст.)-----	224
5.2.3. Вивчення фазових переходів у магнетиках (О.І.Ахієзер, В.Г. Бар'яхтар, С.В.Пелетмінський, 60-ті рр. ХХ ст.)-----	227
5.2.4. Створення ймовірнісного підходу в теорії плазми (О.Г. Ситенко, 60-ті рр. ХХ ст.)-----	230

5.2.5. Створення мікроскопічної теорії розчинів електролітів (М.Ф. Головка, кінець 60-х — початок 70-х рр. ХХ ст.)-----	<b>234</b>
5.2.6. Застосування методів статистичної фізики у проблемах фізики металів та сплавів (Г.В.Курдюмов, В.М.Свечніков, А.А.Смирнов, М. О.Кривоглаз, А.Г.Лесник, С.Д.Герцрікен, 50—60-ті рр. ХХ ст.)-----	<b>238</b>
5.2.7. Створення теорії критичних явищ в індивідуальних рідинах та розчинах (О.З.Голик, 50—70-ті рр. ХХ ст.)-----	<b>250</b>
5.2.8. Розробка статистичної теорії рідин (Й.З.Фішер, 60-ті рр. ХХ ст.)-----	<b>253</b>

<b>ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 5</b> -----	<b>256</b>
------------------------------------	------------

## **РОЗДІЛ 6. НАУКОВІ ЦЕНТРИ ЗІ СТАТИСТИЧНОЇ ФІЗИКИ В УКРАЇНІ**

6.1. Розвиток статистичної фізики в наукових інститутах України ( Національний науковий центр “Харківський фізико-технічний інститут”, Інститут фізики, Інститут теоретичної фізики, Інститут фізики конденсованих систем, Інститут математики, Донецький та Дніпропетровський фізико-технічні інститути, Фізико-технічний інститут низьких температур, Інститут радіофізики та електроніки, Інститут металофізики, Інститут фізики напівпровідників, Інститут проблем матеріалознавства, Український науково-дослідний гідрометеорологічний інститут)-----	<b>258</b>
6.2. Статистична фізика в університетах України (Харківський, Київський, Львівський, Одеський та Донецький університети)-----	<b>281</b>
6.3. Розвиток ідей і методів статистичної фізики в теоретичних школах в Україні — наукових школах академіків О.І.Ахієзера, І.М.Ліфшиця, М.М. Боголюбова, В.Г.Бар’яхтара, О.Г.Ситенка-----	<b>305</b>
6.4. Формування та розвиток наукової школи статистичної фізики І.Р. Юхновського-----	<b>321</b>
6.5. Формування та розвиток наукової школи статистичної фізики С.В. Пелетмінського-----	<b>364</b>
<b>ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 6</b> -----	<b>388</b>
<b>ВИСНОВКИ</b> -----	<b>389</b>
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ</b> -----	<b>393</b>

## ВСТУП

### **Актуальність теми.**

Історико-фізичні дослідження відіграють важливу методологічну роль у сучасній науці та теорії пізнання. Знайомство з історією фізики – фундаментальної науки сучасного природознавства, яка визначає його розвиток, дає змогу комплексно побачити місце предмету дослідження в науковій картині світу, обумовлює формування механізмів логічного мислення та наукового світогляду, сприяє поглибленню розуміння фундаментальних наук та збільшенню інтересу щодо їх вивчення, формує синтез природничо-наукової, технічної та гуманітарної культур.

Еволюція та світоглядне значення фундаментальних фізичних теорій завжди були та є предметом гострих і плідних дискусій. Серед таких ключових теорій сучасної теоретичної фізики є статистична фізика, яка описує закономірності поведінки багаточастинкових систем у природі, тобто досліджує практично всі види матерії – тверді тіла, рідини та полімери, рідкокристалічні та міцелярні системи, електроліти, гази, плазму, макромолекули, важкі ядра. Методи статистичної фізики застосовуються в молекулярній фізиці, фізиці твердого тіла, ядерній фізиці, радіофізиці, астрофізиці, оптиці, біофізиці, техніці. Діапазон явищ, які вивчає статистична фізика, надзвичайно широкий і визначає поведінку речовини при низьких температурах у рідкому гелії, властивості високотемпературної плазми, агрегатні стани речовини, фазові переходи, електропровідність, теплоємність тіл, флуктуації, рух електронів у металах.

Статистична фізика як мікроскопічна теорія вивчає специфічні закономірності макроскопічних систем, що складаються з дуже великого, практично незліченного числа однакових частинок (атомів, молекул, електронів, фотонів, квазічастинок), виходячи з властивостей цих частинок та взаємодії між ними. Саме величезна кількість частинок обумовлює появу характерних закономірностей поведінки таких систем — статистичних законів, яким притаманний ймовірнісний характер. Ці закони неможливо звести до динамічних законів, оскільки вони стають беззмстовними при переході до систем з малою кількістю частинок.

Головна задача статистичної фізики як мікроскопічної теорії полягає у визначенні макроскопічних характеристик системи через властивості частинок та взаємодій між ними, тобто вона надає метод дослідження співвідношень між мікроскопічним та макроскопічним рівнями опису дійсності. Для розв'язання задач статистичної фізики як теорії багаточастинкових систем використовуються методи теорії ймовірностей та опис елементів системи в рамках гамільтонова формалізму в  $6N$ -вимірному фазовому просторі. Важливими поняттями статистичної фізики є ймовірність, фазовий простір, функція розподілу ймовірностей, інтеграл станів, статистична вага.

До побудови статистичної механіки у 60-х рр. ХХ ст. фізична картина світу була заснована на класичній механіці та понятті причинності, відповідно до якого можна, використовуючи формалізм диференціальних рівнянь, однозначно обчислити стан ізольованої системи в будь-який момент часу, якщо відомі початкові

умови (лапласівський детермінізм). У статистичній фізиці поняття причинності набуло іншого тлумачення, оскільки явища природи розглядаються в ній як колективний процес — синтез множини елементарних явищ. Крім того, статистична фізика запровадила у фізику розуміння того, що необоротні процеси відіграють фундаментальну та конструктивну роль у фізичному світі. З часом виявилось, що ймовірнісна концепція, яка виникла при створенні статистичної механіки, є фундаментальною і характеризує саму природу речей. Це з'ясувалось після побудови квантової механіки, закони якої передбачають принципову статистичність у поведінці мікрооб'єктів.

В останні роки коло застосувань статистичної фізики продовжує розширюватись. Наприкінці ХХ століття як її далекосяжне узагальнення сформувався нова міждисциплінарна галузь науки — синергетика (започаткована Г.Хакеном та І.Пригожиним), що вивчає самоорганізацію складних систем та перетворення хаосу на порядок, розглядає виникнення та еволюцію Всесвіту, обґрунтовує необоротність нелінійного світу. Головними ідеями синергетики, на основі яких формується тенденція щодо побудови глобального еволюційного синтезу в природознавстві, є рівноправність процесів еволюції та деградації; творча роль хаосу на шляху до порядку незалежно від характеру систем; розвиток через нестійкість системи; нелінійний характер еволюції більшості складних систем та наявність кількох варіантів їх розвитку; закономірність виникнення структур зростаючої складності; включення випадковості у механізм еволюції. До ключових результатів тут слід віднести дослідження динамічного хаосу, які бурхливо розвиваються в останні десятиріччя та набувають застосувань у багатьох розділах науки і техніки, наприклад, в теорії хімічних реакцій, радіотехніці, фізиці плазми, теорії прискорювачів заряджених частинок тощо.

Значуща роль статистичної фізики для розвитку наукових знань визначила увагу істориків науки та вчених-фізиків до процесів її формування та розвитку. Проте, незважаючи на широке коло висвітлених питань, на сьогодні не існує комплексного дослідження становлення статистичної фізики в Україні, яке б містило у собі її передісторію і розглядало ці дослідження в Україні як органічну складову розвитку світової науки. Ключова роль статистичної фізики в системі наук, а також те, що в цій галузі вченими України одержані фундаментальні результати, які не знайшли належного відображення в історико-науковій літературі, визначає безумовну **актуальність** історико-наукового дослідження становлення та розвитку даної галузі фізики в Україні. Саме таке дослідження вперше проводиться в дисертаційній роботі.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами й темами.** Тема дисертації є складовою тематичного плану відділу історії науки і техніки Центру досліджень науково-технічного потенціалу та історії науки імені Г.М.Доброва НАН України, а саме тем: “Розробка методологічних та методичних основ створення “Біографічного словника діячів природознавства і техніки України” (номер державної реєстрації 0101U002614), “Фундаментальні ідеї та теорії сучасного природознавства (історико-культурний та світоглядний контекст)” (номер державної реєстрації 0104U006358), „Історія НАН України у суспільно-політичному контексті” (номер державної реєстрації 0107U001830). Напрямок – вивчення генезису та еволюції

фундаментальних ідей та теорії сучасного природознавства, побудова повної та об'єктивної історії фізики в Україні в контексті світової науки.

**Метою дослідження** є історико-фізичне вивчення процесів становлення та розвитку в Україні в контексті логіки розвитку світової науки в 30-60-ті рр. ХХ ст. одного з розділів сучасної теоретичної фізики — статистичної фізики.

Для досягнення мети в роботі були поставлені та розв'язані такі основні **завдання**: 1. Виявити стан розробки проблеми у вітчизняній і зарубіжній історіографії.

2. Провести аналіз предмету, задач та методології статистичної фізики як наукової галузі.
3. З'ясувати місце статистичної фізики в структурі сучасної наукової картини світу.
4. Увести до наукового обігу маловідомі імена та факти з історії статистичної фізики.
5. Розкрити та обґрунтувати передумови виникнення статистичної фізики, встановити основні етапи та пріоритетні результати, що визначають ці етапи.
6. Побудувати періодизаційну схему передісторії, становлення та розвитку статистичної фізики.
7. Розглянути передісторію статистичної фізики в Україні. Проаналізувати експериментальні результати та перші теоретичні узагальнення ймовірнісних уявлень, одержані в Україні до 30-х рр. ХХ ст., які сприяли становленню та розвитку досліджень у галузі статистичної фізики в Україні.
8. Здійснити послідовну історико-фізичну реконструкцію становлення та розвитку статистичної фізики в Україні в 30-60-ті рр. ХХ ст. в контексті еволюції світової науки.
9. Вивчити діяльність та проаналізувати внесок українських вчених у формування уявлень сучасної статистичної фізики, її теоретичних методів та застосувань.
10. Виявити наукові центри – інститути, університети та наукові школи, де проводилися дослідження в галузі статистичної фізики в Україні у 30–60-ті рр. ХХ ст.
11. Провести ідентифікацію ряду неформальних творчих колективів в Україні з науковими школами в галузі статистичної фізики.

**Об'єктом** даного дослідження виступає процес генезису та еволюції статистичної фізики. Предмет дослідження — становлення та розвиток статистичної фізики в Україні.

Робота ґрунтується на комплексному використанні принципів історизму та об'єктивності, які обумовлюють **методи дослідження**: порівняльно-історичний, предметно-логічний, системно-функціональний. Так, порівняльно-історичний метод дає можливість дослідити виникнення, формування та розвиток процесів і подій у хронологічній послідовності з метою виявлення внутрішніх та зовнішніх зв'язків, закономірностей та протиріч.

Предметно-логічний метод передбачає фізичний аналіз змісту оригінальних монографій та статей з точки зору сучасної науки, історико-науковий аналіз зіставлення різних джерел одне з одним та з загальною ситуацією в науці в певні хронологічні періоди, а також порівняльний аналіз праць українських та зарубіжних вчених з метою визначення внеску вітчизняних фізиків у світову науку,

встановлення пріоритетів та порівняння основних результатів з наявними відомостями в сучасній довідковій, біографічній та історико-науковій літературі.

Системно-функціональний підхід полягає у комплексному дослідженні великих і складних об'єктів (систем) (зокрема, такими системами виступають фізична наука в цілому, її галузі, наукові напрями, ідеї та теорії, процес інституціоналізації науки, наукові школи, особистість у науці тощо) та вивченні їх як єдиного цілого з узгодженням функціонування всіх елементів і частин системи. Такий підхід передбачає дослідження кожного елементу системи в його зв'язку та взаємодії з іншими елементами, виявлення впливу властивостей окремих частин системи на її поведінку в цілому, встановлення оптимальних та граничних умов функціонування системи.

Поєднання декількох із розглянутих методів дослідження дозволяє, не обмежуючись тільки систематизацією численного фактологічного матеріалу, максимально повно та всебічно вивчити предмет дослідження та вийти на рівень узагальнень.

**Хронологічні рамки** визначаються 30–60-ми рр. ХХ ст. Нижня межа пов'язана з періодом роботи у Харківському Фізико-технічному інституті Л.Д.Ландау, працями якого були започатковані систематичні дослідження в галузі статистичної фізики в Україні. Верхня межа визначається формуванням наукових шкіл статистичної фізики в Україні.

**Наукова новизна** полягає насамперед у тому, що вперше в історіографії проводиться комплексне дослідження становлення та розвитку статистичної фізики в Україні у 30-60-ті рр. ХХ ст. як органічної складової розвитку світової науки, з урахуванням її передісторії; здійснено порівняльний аналіз означень предмету статистичної фізики та виявлено найбільш загальні з них за глибиною тлумачення предмету дослідження та за відображенням принципового для цієї галузі взаємозв'язку між мікрорівнем та макрорівнем опису дійсності; запропоновано методологічний критерій виявлення фундаментальних ідей і теорій сучасного природознавства, а саме: вважати фундаментальними ті ідеї та теорії, з появою яких пов'язана зміна наукових картин світу та оновлення категоріальних структур наукового знання; побудовано періодизаційну схему розвитку статистичної фізики; вперше з широким урахуванням контексту світової науки показано передісторію статистичної фізики в Україні; вперше створено наукові біографії фізиків-теоретиків Т.О.Афанасьєвої – Еренфест та М.М.Пирогова, показано результати в галузі розбудови методів статистичної фізики та їх застосувань, одержані у ряді наукових центрів (Харківський, Дніпропетровський та Донецький фізико-технічні інститути, Інститут математики, Інститут фізики, Інститут теоретичної фізики, Інститут металофізики, Інститут фізики конденсованих систем, Інститут проблем матеріалознавства, Інститут фізики напівпровідників, Фізико-технічний інститут низьких температур, Харківський, Київський, Одеський та Львівський університети), де працювали такі вчені, як В.І.Данилов, Л.Д.Ландау, О.І.Ахієзер, І.М.Ліфшиць, М.М.Боголюбов, О.Г.Ситенко, В.Г.Бар'яхтар А.А.Смирнов, І.Р.Юхновський, Д.Я.Петрина, С.В.Пелетмінський, О.З.Голик, С.Д.Герцрікен, А.Ю.Глауберман, А.В.Свідзинський, Г.М.Зинов'єв, Б.В.Струминський та інші; висвітлено результати теоретичних наукових шкіл: О.І.Ахієзера, І.М.Ліфшиця, М.М.Боголюбова, В.Г.



Бар'яхтара, О.Г.Ситенка в галузі розбудови методів статистичної фізики та їх застосування; вперше ідентифіковано неформальні творчі колективи, керовані академіками НАН України І.Р.Юхновським та С.В.Пелетмінським, з науковими школами в галузі статистичної фізики. Встановлено персональний склад, характерні риси, стиль та методи, а також внесок в науку даних наукових шкіл; переважна більшість архівних документів до наукового обігу вводиться вперше.

**Наукове та практичне значення одержаних результатів** полягає в тому, що положення та висновки дисертації сприятимуть подальшому історико-науковому дослідженню генезису та еволюції фізичної науки в цілому, зокрема, фізики твердого тіла, ядерної фізики, фізики плазми. Широке застосування матеріалів роботи доцільне при викладенні курсів загальної фізики та історико-фізичних дисциплін в університетах, технічних та педагогічних вузах, а також у шкільних курсах фізики. Матеріали дослідження з 2003 р. використовуються при викладанні курсу “Історія розвитку основних фізичних уявлень” на фізико-математичному факультеті Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут”. Литвинко А.С. видано в співавторстві методичний посібник з даного курсу, а також науково-методичну працю “Поради щодо підготовки кандидатських і докторських дисертацій з історії фізики”.

**Апробація роботи.** Основні положення та результати дисертації обговорювалися та отримали позитивну оцінку на засіданнях відділу історії науки і техніки Центру досліджень науково-технічного потенціалу та історії науки ім. Г.М.Доброва НАН України, у доповідях на понад 20 наукових міжнародних і вітчизняних форумах: Конгресах Міжнародної спілки з історії технології (Санкт-Петербург 2003, Бохум (Німеччина) 2004, Лестер (Великобританія) 2006, Копенгаген (Данія) 2007), Міжнародній школі з історії науки (Уппсала (Швеція) червень 2006), Конгресі Європейської фізичної освітньої мережі (Варна (Болгарія), 2003), 3-й Конференції Європейського товариства історії науки (Відень (Австрія) 2008), Міжнародних київських симпозіумах з наукознавства, Всеукраїнській науково-методичній конференції “Викладання історії науки і техніки в університетах України” (квітень 2006), Науково-практичних конференціях “Історія науки, техніки і освіти” (Національний технічний університет України, 2003–2009 рр.).

**Публікації.** Основні результати та висновки дисертаційного дослідження опубліковані в 2 монографіях: Литвинко А.С. Становлення статистичної фізики в Україні (30–40 рр. ХХ ст.) / А.С.Литвинко. К:Фенікс, 2009. — 220 с.; Литвинко А.С. Микола Миколайович Боголюбов та статистична фізика в Україні / А.С.Литвинко. К:Академперіодика, 2009. — 304 с., а також у 31 статті у фахових виданнях та в 30 інших виданнях – 2 науково-методичних працях, збірниках наукових статей, журналах і матеріалах конференцій. Ці матеріали достатньою мірою відображають зміст роботи.

**Структура роботи.** Дисертація складається із вступу, 6 розділів, висновків, списку використаних джерел і літератури. Обсяг основного тексту – 392 сторінки. Список джерел і літератури має 1019 позицій. Загальний обсяг – 472 сторінки.

У **першому розділі** дається огляд історіографії та джерельної бази дослідження. Джерельну базу дослідження складають історіографічна література; довідкові та енциклопедичні видання; оригінальні праці вчених — наукові

монографії, наукові статті у періодичних наукових виданнях (журнали, збірники), дисертації; автобіографічна, меморіальна та ювілейна література; матеріали документального характеру; архівні джерела; наукове листування вчених; результати проведеного нами інтерв'ю та анкетування вчених у галузі статистичної фізики. Зроблено висновок, що, незважаючи на широке коло висвітлених питань, нині немає цілісного аналізу передісторії, становлення та розвитку статистичної фізики в Україні в контексті генезису та еволюції світової науки.

**У другому розділі** викладається предмет, задачі та методологія тієї галузі фізичної науки, історія якої досліджується — статистичної фізики. Показано місце статистичної фізики в системі наук, сферу її застосування, ключове значення для формування нового ймовірнісного стилю мислення у природознавстві та побудови наукової картини світу. На прикладі статистичної фізики як фундаментальної теорії сучасного природознавства розглядаються численні концептуальні підходи до розгляду феномену науки в цілому та пропонується критерій визначення фундаментальних ідей та теорій.

**У третьому розділі** подано передісторію статистичної фізики. Детально висвітлено етапи формування статистичної фізики, тобто світовий контекст, а також стан статистичної фізики на початку 30-х рр. ХХ ст., коли відбувалось становлення даної галузі в Україні. З'ясовується та обґрунтовується значення для формування статистичної фізики ідеї атомізму, молекулярно-кінетичної теорії та її синтезу з термодинамічними уявленнями наприкінці ХІХ—на початку ХХ ст. Прослідковується зародження поняття статистичного закону у працях Дж. Максвелла, Л.Больцмана, Дж.Гіббса, а також узагальнення поняття причинності у фізиці, результатом якого стало створення квантової механіки і нових квантових статистик Бозе–Ейнштейна та Фермі–Дірака, які відіграли важливу роль у розвитку фізики конденсованих середовищ та теорії твердого тіла. Пропонується також періодизаційна схема розвитку статистичної фізики.

У цьому розділі дисертаційної роботи також розкривається передісторія статистичної фізики в Україні в хронологічних межах ХІХ—20-х рр. ХХ ст. Обґрунтовано, що експериментальні роботи з термодинаміки М.Пильчикова та О.П. Грузинцева, з дифузії М.О.Умова, з молекулярної фізики та критичного стану речовини М.П.Авенаріуса, а також перші теоретичні узагальнення ймовірнісних уявлень М.М.Пирогова, М.М.Шиллера, М.Смолуховського та Т.О.Афанасьєвої-Еренфест сприяли осмисленню статистичного підходу та усвідомленню сфери його застосування, ставши підґрунтям розвитку статистичної фізики в Україні.

**У четвертому розділі** розглянуто становлення статистичної фізики в Україні у 30—40 рр. ХХ ст. Тут показано виникнення нерівноважної статистичної фізики (світовий контекст) (Л.Онсагер, Ж.Івон, М.Борн, Г.Грін, Дж.Кірквуд) та обґрунтовано, що початок систематичних досліджень у галузі розбудови методів статистичної фізики та їх застосування в фізиці твердого тіла, ядерній фізиці, фізиці плазми та магнетизмі пов'язаний з науковою та педагогічною діяльністю засновника харківської теоретичної школи Л.Д.Ландау в Харківському фізико-технічному інституті та у Харківському університеті у 1932—1937 рр. Результати Л.Д.Ландау в галузі статистичної фізики пов'язані перш за все з його фундаментальними працями з теорії фазових переходів II роду, теорії плазми та статистичної теорії ядра, які

були виконані в цей період.

Обґрунтовується також, що початком широкомасштабних досліджень зі статистичної фізики в Україні стала фундаментальна монографія М.М.Боголюбова “Проблеми динамічної теорії в статистичній фізиці”, яка була видана у 1946 р. Висвітлено генезис появи робіт із статистичної фізики в творчості М.М.Боголюбова, що було обумовлене, зокрема, його попередніми роботами в галузі математичної фізики та теорії динамічних систем.

У **п’ятому розділі** відображено розвиток статистичної фізики в Україні у 50–60 рр. ХХ ст., пов’язаний з побудовою М.М.Боголюбовим мікроскопічних теорій надплинності (1947 р.) та надпровідності (1957 р.), поширенням у 1951 р. методів статистичної фізики на квантову теорію поля та теорію елементарних частинок, а також з результатами в галузі статистичної фізики, одержаними в ряді наукових інститутів та університетів України, де працювали такі вчені, як В.І.Данилов, О.І. Ахієзер, І.М.Ліфшиць, М.М.Боголюбов, О.Г.Ситенко, В.Г.Бар’яхтар, А.А.Смирнов, І.Р.Юхновський, Д.Я.Петрина, С.В.Пелетмінський, В.П.Шелест, Е.Г.Петров, О.З. Голик, С.Д.Герцрікен, А.Ю.Глауберман, Й.З.Фішер, А.В.Свідзинський, Г.М. Зинов’єв, Б.В.Струминський та інші.

В Україні були одержані результати як у галузі методів статистичної фізики, так і їх застосувань. Так, набув розвитку метод малого параметра у вигляді створення методу колективних змінних у класичному та квантовому випадках; обчислено статистичну суму тривимірної моделі Ізінга та побудовано статистичну теорію фазових переходів (І.Р.Юхновський); розвинуто метод ансамблів Гіббса та кінетичних рівнянь для квантової статистики (Д.Я.Петрина); побудовано загальний метод скороченого опису для широкого класу макроскопічних систем (С.В. Пелетмінський).

Широкий спектр результатів одержано за допомогою застосування апарату статистичної фізики до конкретних фізичних задач. Слід відзначити роботи науковців Харківського фізико-технічного інституту — вивчення кінетичних та релаксаційних явищ у магнітовпорядкованих кристалах, фазових переходів у магнетиках (О.І.Ахієзер, В.Г.Бар’яхтар); започаткування теорії неупорядкованих систем, розробка теорії флуктуаційних рівнів, створення моделі структурного хаосу та електронної теорії металів (І.М.Ліфшиць); розробка теорії флуктуонів (І.М. Лівшиць, С.А.Гредескул); теорії проходження хвиль та частинок через товсті шари неупорядкованих середовищ (Л.А.Пастур); вивчення кінетики дифузійного розпаду пересичених твердих розчинів (І.М.Ліфшиць, В.В.Слезов); створення гідродинаміки надплинної рідини з урахуванням дисипативних процесів (С.В.Пелетмінський). В Інституті теоретичної фізики НАН України дослідження в галузі статистичної фізики проводилися в двох напрямках: створення ймовірнісного підходу до теорії плазми (О.Г.Ситенко) та застосування методів статистичної фізики у квантовій теорії поля і теорії елементарних частинок (М.М.Боголюбов, Б.В.Струминський, В. П.Шелест, Г.М.Зинов’єв). У теоретичному відділі Інституту металофізики НАН України вивчалися фазові переходи: проводилися дослідження механізму і кінетики мартенситних фазових перетворень (Г.В.Курдюмов), було розроблено статистичну теорію магнітної сприйнятливості реальних плівок (А.Г.Лесник), побудовано теорію кристалізації та структури рідин (В.І.Данилов), досліджено межову дифузію (С.Д.

Герцрікен), вивчено фазові рівноваги багатокомпонентних металевих систем (В.М. Свечников), створено теорію діркоутворення і дифузії атомів у сплавах (В.А. Смирнов, М.О.Кривоглаз).

Великий колектив вчених працював на кафедрі молекулярної фізики Київського університету під керівництвом О.З.Голика. Тут було створено теорію критичних явищ в індивідуальних рідинах та розчинах. Дослідження зі статистичної фізики є традиційними для Львівського університету. Вони були започатковані на кафедрі теоретичної фізики А.Ю.Глауберманом, яким було створено багатоелектронну теорію напівпровідників. В Одеському університеті конденсовані системи вивчались на прикладі дослідження кристалізації переохолоджених рідин (Г.Л.Міхневич), а також закономірностей поведінки аерозолів (В.О.Федосєєв).

У **шостому розділі** розглянуто діяльність центрів зі статистичної фізики: профільних відділів наукових інститутів, кафедр вищих навчальних закладів та фізичних теоретичних шкіл. Це, зокрема Національний науковий центр “Харківський фізико-технічний інститут”, Інститут фізики, Інститут теоретичної фізики, Інститут фізики конденсованих систем, Інститут математики, Донецький та Дніпропетровський фізико-технічні інститути, Фізико-технічний інститут низьких температур, Інституті металофізики, Інститут напівпровідників, Інститут проблем матеріалознавства, Харківський, Київський, Львівський та Одеський університети, а також наукові школи — В.І.Данилова, Л.Д.Ландау, М.М.Боголюбова, О.І.Ахієзера, І.М.Ліфшиця, О.Г.Ситенка, В.Г.Бар’яхтара, І.Р.Юхновського, С.В.Пелетмінського, О.З.Голика. Процес ідентифікації, формування та розвитку наукових шкіл статистичної фізики академіків НАН України І.Р. Юхновського та С.В. Пелетмінського в роботі досліджено вперше.

У **висновках** відмічено наукове та практичне значення одержаних результатів, що виносяться на захист. Це, зокрема:

Доведено ключове місце статистичної фізики в структурі сучасної наукової картини світу та її фундаментальне значення для формування нового ймовірнісного стилю мислення у природничих науках, яке визначається тим, що дана теорія встановлює зв’язок між мікроскопічними та макроскопічними властивостями матерії.

Вперше проаналізовано та систематизовано різні визначення предмету статистичної фізики.

Вперше запропоновано новий методологічний критерій виявлення фундаментальних ідей та теорій сучасного природознавства.

Побудовано та обґрунтовано періодизаційну схему передісторії та розвитку статистичної фізики в хронологічних межах IV ст. до н.е. — 60-ті рр. XX ст.

Вперше на тлі розвитку світової науки реконструйовано передісторію статистичної фізики в Україні.

Вперше відтворено наукові біографії фізиків-теоретиків Т.О.Афанасьєвої - Еренфест та М.М.Пирогова. Зокрема, доведено, що Т.О.Афанасьєва-Еренфест є уродженкою Києва та у 1927–1928 рр. викладала у Симферопольському педагогічному інституті. Знайдено також місце поховання М.М.Пирогова у Вінниці.

Обґрунтовано, що систематичні дослідження в галузі статистичної фізики в Україні в 30-ті рр. XX ст. були започатковані науково-педагогічною діяльністю в

Харківському фізико-технічному інституті та Харківському університеті видатного фізика, засновника теоретичної школи Л.Д.Ландау, перш за все його роботами з теорії фазових переходів II роду, теорії плазми, теорії фермі-рідини та статистичної теорії ядра.

На основі раніше невідомих архівних джерел висвітлено діяльність одного з учнів Д.Д.Ландау харківського періоду — професора В.Л.Германа.

Встановлено, що початок широкомасштабних досліджень у галузі статистичної фізики в Україні був обумовлений виходом у 1946 р. фундаментальної монографії М.М.Боголюбова “Проблеми динамічної теорії у статистичній фізиці”.

Вперше доведено, що центрами досліджень у галузі статистичної фізики в Україні були Харківський, Дніпропетровський та Донецький фізико-технічні інститути, Інститут математики, Інститут фізики, Інститут теоретичної фізики, Інститут металофізики, Інститут фізики конденсованих систем, Інститут проблем матеріалознавства, Інститут фізики напівпровідників, Фізико-технічний інститут низьких температур, Харківський, Київський, Одеський та Львівський університети, а також наукові школи академіків НАН України Л.Д.Ландау, В.І.Данилова, М.М. Боголюбова, О.І.Ахієзера, І.М.Ліфшиця, О.Г.Ситенка, В.Г.Бар’яхтара, І.Р. Юхновського, С.В.Пелетмінського, професора О.З.Голика.

Встановлено одержані в Україні в 30—60-ті рр. найбільш значущі теоретичні результати в галузі розвитку методів статистичної фізики та їх застосування до конкретних фізичних задач.

Вперше з урахуванням численних інтерв’ю, взятих у вчених, ідентифіковано неформальні творчі колективи, керовані академіками НАН України І.Р.Юхновським та С.В.Пелетмінським, з науковими школами в галузі статистичної фізики.

## **РОЗДІЛ 1**

### **ІСТОРІОГРАФІЯ ТА ДЖЕРЕЛЬНА БАЗА ДОСЛІДЖЕННЯ**

Історіографічний аналіз дає уяву про ступінь розробки наукової проблеми, дозволяє систематизувати та критично оцінити використані джерела, виділити головне в сучасному стані вивчення теми та результатах попередників. Робота з науковими джерелами за темою дисертації дозволила виявити напрям дослідження, дати характеристику попередніх робіт з історії даної галузі та чітко з’ясувати питання, котрі залишились не розв’язаними. Аналіз глибини наукової розробки історії розвитку досліджень у галузі статистичної фізики в Україні в 30-60-ті рр. ХХ ст. показав, що дана тема недостатньо вивчена та висвітлена, і не була ще предметом дисертаційного дослідження.

Історіографія даної роботи охоплює джерела, що відображають історичні, біографічні та спеціально-професійні питання наукової діяльності. Зокрема, вони дають загальну характеристику та показують місце досліджуваної галузі в системі фізичних наук; класифікують основні напрями досліджень із статистичної фізики та висвітлюють стан їх розробки з погляду світової науки; відображають різні підходи до викладення процесів зародження та розвитку ймовірнісних уявлень. Вибір джерельної бази було обумовлено темою та завданнями дисертаційного дослідження, при цьому передбачено також урахування як внутрішніх, так і

зовнішніх чинників, що впливали на процес формування та розвитку статистичної фізики в Україні в 30–60-ті рр. ХХ ст. По-перше, комплексний аналіз формування та розвитку статистичної фізики в Україні в 30–60-ті рр. ХХ ст. передбачав узагальнення та систематизацію матеріалу щодо розвитку всіх напрямів статистичної фізики в світі в контексті загальної еволюції теоретичної фізики. По-друге, ґрунтовне дослідження генезису статистичної фізики в Україні обумовило необхідність розгляду її передісторії, тобто зародження у попередній щодо хронологічних рамок дослідження період, а також стану статистичної фізики на початок 30-х рр. ХХ ст. Нарешті, дослідження було б не повним без висвітлення загальних особливостей розвитку фізичного знання, зокрема, історії розвитку основних фізичних уявлень в Україні на тлі розвитку світової науки.

Щоб урахувати все вищевикладене, було опрацьовано значну кількість різноманітних джерел, як опублікованих, так і неопублікованих. Треба зазначити, що не всі вони увійшли до тексту дисертації.

Джерельна база даного історико-наукового дослідження складається, зокрема, з наукових монографій, наукових статей у періодичних наукових виданнях (журнали, збірники тощо), автобіографічної, меморіальної та історіографічної літератури, наукових звітів, архівних джерел. Робота з джерелами була спрямована перш за все на те, щоб одержати якомога більше наукових фактів, які стосуються досліджуваної проблеми. Слід зазначити, що науковим є не будь-який факт, а лише той, що віддзеркалює об'єктивні властивості речей і процесів, визначає закономірності явищ, слугує базою побудови теорій та формулювання законів. Тобто, науковий факт є новим знанням, яке повинно бути точним, об'єктивним та достовірним. У зв'язку з цим у роботі приділялась особлива увага достовірності вихідної наукової інформації.

Усі джерела, які було розглянуто в даному дисертаційному дослідженні, можна класифікувати наступним чином:

- Історіографічна література з історії фізики
- Довідкові та енциклопедичні видання
- Література з історії розвитку наукових ідей, зокрема, огляди вчених щодо розвитку різних аспектів статистичної фізики, нобелівські лекції
- Література з історії розвитку наукових та освітніх установ
- Оригінальні праці вчених – статті, монографії
- Матеріали профільних конференцій
- Періодичні наукові видання
- Біографічна література, зокрема, ювілейні та меморіальні видання
- Матеріали документального характеру – звіти, протоколи засідань, нормативні документи, розпорядження, постанови тощо
- Дисертації за профілем роботи
- Архівні матеріали
- Наукове листування вчених
- Інтерв'ю та анкетування вчених, проведене автором.

Для відтворення повної та об'єктивної картини становлення та розвитку статистичної фізики в Україні в 30–60 рр. ХХ ст. було проаналізовано роботи попередніх дослідників. Історіографічні праці, що прямо або опосередковано

пов'язані з даною проблемою, подані за різними напрямками. Перш за все, це роботи з історії статистичної фізики та термодинаміки у світовому контексті або більш локального масштабу.

Висока значущість статистичної фізики для розвитку наукових знань зосередила увагу вчених-фізиків та істориків науки на процесах її формування та розвитку. Так, історія розвитку фундаментальних принципів статистичної фізики, її обґрунтування та ряд методологічних питань досліджувались у роботах С.Браша, Я.М.Гельфера, О.В.Кузнецової, Н.В.Вдовиченко, Б.Лавенди, Г.Я.Мякішева, І.П.Базарова, А.А.Гухмана, К.Каратеодорі.

Серед даних бібліографічних джерел перш за все слід зазначити фундаментальну монографію Я.М.Гельфера „Історія і методологія термодинаміки і статистичної фізики” [1], у якій досліджено питання виникнення та еволюції основних понять, принципів та методів термодинаміки і статистичної фізики, розглянуто загальні тенденції розвитку цих дисциплін як розділів сучасної теоретичної фізики, а також як методу дослідження явищ. Я.М.Гельфером висвітлено розвиток уявлень про природу теплоти до відкриття законів збереження і перетворення енергії, а також формування феноменологічної термодинаміки та її синтез з молекулярно-кінетичною теорією, який виявився ключовим чинником для виникнення статистичної фізики. Особливо цікавими є розділи монографії, що стосуються застосування термодинамічних та статистичних методів для подальшого вивчення властивостей речовини та випромінювання — у теорії критичного стану, теорії електрики та магнетизму, електронній теорії, теорії теплового випромінювання. Показано вплив на статистичну фізику квантової гіпотези, значення створення квантових статистик, перш за все, для подальшого розвитку фізики твердого тіла. Монографія містить у собі також корисну хронологічну таблицю найважливіших подій в історії термодинаміки і статистичної фізики, яка, на жаль, обмежена 1955 роком.

Одним з ключових для статистичної фізики принципів є принцип причинності, з яким у філософському та методологічному плані глибоко пов'язані закони збереження. Ці закони є підґрунтям, на якому базується причинно-наслідковий зв'язок закономірностей природи, отже, вони стають логічним зв'язком між причиною і наслідком. Із законами збереження пов'язано введення у фізику ідей, які мають принципове значення, зокрема, статистичної ідеї. Так, закон збереження та перетворення енергії для теплових явищ заклав підґрунтя термодинаміки як науки, а закони збереження у мікросвіті обумовили статистичні закономірності систем мікрочастинок. Розвиток законів збереження в класичній та сучасній фізиці, їх наукове та методологічне значення на тлі історичного розвитку викладено в іншій історико-науковій монографії Я.М.Гельфера “Закони збереження”[2].

Питанням історії статистичної фізики багато уваги приділялось відомим істориком фізики С.Брашем, в численних роботах якого подано історію кінетичної теорії газів та атомістики [3—6].

За часів Радянського Союзу в Інституті природознавства і техніки РАН (Москва) проводилися дослідження з історії науки. Сьогодні, зокрема, у секторі фізики, механіки та астрономії інституту (керівник професор В.П.Візгін) традиційно вивчаються питання історії фізики. Слід зазначити узагальнюючу працю цього

колективу „Фізика XIX—XX ст. в загальнонауковому та соціокультурному контекстах. Фізика XIX століття” [7], в якій зроблено спробу поєднати традиційне викладення історії наукових ідей, методів та теорій з питаннями науково-дисциплінарної історії науки, яка враховує аспекти професіоналізації та інституалізації науки, тенденції розвитку системи наукової освіти, формування наукового співтовариства, особливості системи наукових комунікацій, соціокультурні обставини. Два розділи даної роботи, а саме, “Математика в класичній фізиці” (Вл.П.Візгін) та “Вчення про теплоту у XIX ст.: атомістика, термодинаміка і класична механіка” (О.В.Кузнецова) безпосередньо торкаються питань становлення статистичної фізики. Тут окреслено стан вчення про теплоту на початку XIX ст., обговорено працю Н.Карно (1824) “Роздуми про рушійну силу вогню та про машини, які здатні розвивати цю силу”, яка започаткувала термодинаміку як нову наукову дисципліну, описано відкриття першого та другого законів термодинаміки та дискусію на шляху побудови статистичного пояснення другого закону термодинаміки, вказано на важливе значення кінетичної теорії газів та молекулярно-кінетичних уявлень у цілому для побудови статистичної фізики, а також обґрунтовано етапний характер робіт Дж.Максвелла, Л.Больцмана та Дж. Гіббса для формування ймовірнісних уявлень у фізиці.

Важливими для розуміння ключових етапів формування даної галузі та значення для цього процесу атомістичних уявлень про будову речовини є монографії співробітників сектору фізики, механіки та астрономії Інституту історії природознавства і техніки РАН О.В.Кузнецової “Історія обґрунтування статистичної механіки” та “Атомістичні концепції будови речовини в XIX ст.”, а також Н.В. Вдовиченко “Розвиток фундаментальних принципів статистичної фізики у першій половині XX ст.” [8—10]. Остання монографія присвячена проблемі виникнення, сприйняття та розвитку статистичної концепції, а також та перетворення її у розвинену теорію. Такий підхід є вдалою формою організації історичного матеріалу, який охоплює проблему обґрунтування статистичної механіки, броунівський рух, теорію теплового випромінювання, проблему питомої теплоємності, рівняння стану реальних газів. Однак, незважаючи на подані у назві хронологічні рамки, які охоплюють формування квантових уявлень, дослідження у монографії обмежено рамками чисто класичного підходу, а про квантові уявлення згадують подекуди.

Грунтовному огляду історії розвитку математичних методів у теоретичній фізиці у СРСР, зокрема, у статистичній механіці, присвячено два розділи, написані О.І.Ахієзером та А.В.Свідзинським, у 4 томі фундаментальної чотиритомної монографії “Історія вітчизняної математики” [11]. Тут вказано на фундаментальну роль у цій галузі робіт Л.Д.Ландау з теорії рідкого гелію, М.М.Боголюбова з теорії конденсації неідеального бозе-газу, О.С.Давидова з побудови теорії екситонів, І.М. Ліфшиця з теорії конденсованих систем, С.І.Пекара з відкриття та дослідження поляронів.

Ключові етапи розвитку статистичної механіки відображені й у низці наступних праць. Це, зокрема, стаття Е.Монтролла “До 100-річчя статистичної механіки” [12]. Методологічні проблеми статистичної фізики і термодинаміки показані у книзі І.П.Базарова [13] та монографії Г.Я.Мякішева “Від динаміки до статистики” [14], зміст базових постулатів термодинаміки обговорено у монографії



А.А.Гухмана “Про основи термодинаміки” [15] та однойменній праці К.Каратеодорі [16], питанням ймовірнісного тлумачення законів природи присвячено книгу Б. Лавенди “Статистична фізика. Ймовірнісний підхід” [17], співвідношення динамічного та статистичного методів у теорії нерівноважних процесів розглядав Ю .Л.Климонтович [18], зв’язок термодинаміки, статистики та інформації — Л. Бріллюен [19]. Добре ілюстровану монографію А.С.Ястржембського “Термодинаміка та історія її розвитку” [20] присвячено передусім історії технічних застосувань термодинаміки.

Для розбудови статистичної фізики важливим етапом стало формування атомістичних уявлень. Початковий етап зародження атомістичної ідеї в роботах давньогрецьких атомістів виклав А.О.Маковельський [21]. У цій праці автор показує наукову атомістичну методологію Демокріта та її застосування в логіці, математиці, космології, фізиці, біології, медицині, філософії, етиці. Важливо, що у книзі окремо подано приклади оригінальних джерел — частини творів, біографії, коментарі. Більш широко розвиток атомістичних уявлень у контексті генезису науки раннього та середнього еллінізму і часів Римської імперії у тісному зв’язку з філософськими, релігійними та іншими гуманітарними уявленнями тієї епохи висвітлено також у праці І.Д.Рожанського “Історія природознавства в епоху еллінізму та Римської імперії” [22]. Розвитку атомістичних уявлень до початку ХІХ ст. присвячено монографію В.П.Зубова [23], атомістичній концепції будови речовини у ХІХ ст. — монографію О.В.Кузнецова [24], нарисам фізичної атомістики ХХ ст. — книгу Б.Г. Кузнецова [25], аналізу атомістичного підходу в цілому — тритомне видання Б.М. Кедрова “Три аспекти атомістики” [26].

Історії виникнення та стану сучасної атомістики присвячена також стаття Д.Н. Трифонова „Виникнення та розвиток сучасної атомістики” [27]. У ній обговорюються атомні моделі та перетворення, ставиться питання про межу існування атомних структур та явище періодичності. Показано, що сучасний комплекс атомістичних уявлень та ідей є результатом розвитку науки ХХ ст., продуктом фізичних теорій та експериментів. Висвітлено різницю класичної атомістики, яка розглядала елементи, що зустрічаються в Природі, та сучасної атомістики, що викликала до життя атомні різновиди, подекуди відсутні у природі, процес синтезу яких необхідно провести.

Деякі аспекти формування сучасних атомістичних уявлень викладені також в книгах О.І.Ахієзера та М.П.Рекало “Елементарні частинки” та О.І.Ахієзера та Ю.П. Степановського “Від квантів світла до кольорових кварків” [28,29], де викладено історію відкриття численних елементарних частинок, що характеризують дискретну структуру речовини. Розглядаються також властивості фундаментальних взаємодій, яким підпорядковані елементарні частинки та зв’язок цих взаємодій із симетріями, обговорюється проблема побудови єдиної схеми фундаментальних взаємодій — Великого синтезу, що пов’язана із загальним космологічним питанням виникнення Всесвіту. Корисною є подана у першій з монографій хронологія (1900–1990) основних відкриттів у галузі квантової фізики та фізики фундаментальних взаємодій, які визначають природу речовини.

Оглядовий характер сучасного стану ймовірнісних ідей має праця А.В. Рабиновича та М.І.Гапонова-Грехова “Нелінійна фізика. Стохастичність та

структури” [30]. Вона присвячена огляду еволюції фізики нелінійних явищ у 60—80-х рр. ХХ ст. Слід зазначити, що в галузі нелінійної фізики були зроблені фундаментальні відкриття, які привнесли у математичну культуру цієї галузі строгі результати та образи. Найбільш яскраві серед них — солітон та дивний атрактор, які втілюють винайдення зв’язку між нестійкістю руху та народженням хаосу. Тому основна увага у статті приділена фундаментальним проблемам: виникненню стохастичності у простих детермінованих системах, які не підпадають під дію флуктуацій, а також впорядкованих детермінованих структур у нелінійних середовищах подекуди всупереч флуктуаціям. Автори підкреслюють, що дані проблеми стосуються таких різних галузей, як нагрівання плазми, біофізика, єдина теорія поля, теорія еволюції, прогноз погоди.

Для знайдення ключових моментів та логіки розвитку статистичної фізики як фундаментального розділу фізичної науки виявилось необхідним широко застосовувати також літературу, що висвітлює генезис та еволюцію фізичної науки в світі в цілому. Окремо слід зупинитись на таких важливих літературних джерелах, як курси з історії фізики різних авторів — П.Лакура та Я.Аппеля, Ф.Розенбергера, Я.М.Дорфмана, Б.Спаського, П.С.Кудрявцева, М.Льоци, М.Лауе, П.Таннері, Г.Ю.Тредера, А.Ейнштейна, Б.Г.Кузнецова, Х.А.Агабатова, К.Н.Андриєвського і Э.Г.Шипатова, Ф.М.Дягилева, А.І.Ансельма, Ю.О.Храмова та інш., у яких “широкими мазками” подано історію розвитку основних фізичних уявлень. Зокрема, тут обговорюються питання ключових етапів розвитку такого фундаментального розділу теоретичної фізики, як статистична фізика [31—49]. Однією з фундаментальних праць цього циклу є монографія Я.Г.Дорфмана у двох частинах [33,34], у якій розглядаються розвиток та завершення класичної фізики у ХІХ ст., революційні відкриття, філософська криза у фізиці та початок нової ери у першій половині ХХ ст. Окрім викладення послідовної зміни теоретичних уявлень та експериментальних результатів, значну увагу тут приділено аналізу покладених у її основу методів і принципів. Ряд розділів, таких як „Фізико-хімічний атомізм та його перші успіхи”, „Переворот у вченні про теплоту — відкриття закону енергетичної еквівалентності усіх видів руху та взаємодії”, „Розвиток загальної теорії тепла і виникнення статистичної фізики”, „Фізика фазових переходів”, „Синтез квантової механіки та відкриття дуалізму мікросвіту”, „Розвиток фізики твердого тіла” безпосередньо стосуються світового контексту досліджуваної теми.

Оригінальністю вихідної концепції вирізняється також монографія Б.Г.Кузнецова “Розвиток фізичних ідей від Галілея до Ейнштейна в світлі сучасної науки” [42], у якій робиться спроба показати еволюцію уявлень про простір, час, рух та речовину з точки зору сучасних позицій. При цьому за об’єкт історичної ретроспекції автором вибирається фундаментальний принцип класичної науки — уявлення про тотожну собі частинку, яка рухається у неперервному просторі. Зокрема, розглядається зв’язок фізичного та філософського розуміння ідеї статистичної закономірності та необоротності у поведінці комплексу таких частинок з кількісно-математичним конструюванням понять, що відображають міру ймовірності стану статистичних ансамблів.

Важливою для усвідомлення суті фундаментальних фізичних ідей виявилась також книга фізиків В.Акоста, К.Кована та Б.Грема “Основи сучасної фізики”.

Автори мають великий викладацький досвід, тому в роботі у науково-популярній формі викладено еволюцію та найсуттєвіші досягнення атомної фізики, фізики атомного ядра та елементарних частинок – тобто тих фундаментальних галузей фізики, де статистичні методи знаходять широке застосування [50].

Розумінню еволюції фізичної картини світу, яка є динамічною та розвивається, присвячено монографію академіка НАН України О.І.Ахієзера — вченого-фізика, який зробив вагомий внесок у формування сучасних фізичних уявлень та показав роль у них колективних процесів — “Еволюція фізичної картини світу” та “Фізична картина світу, що розвивається” [51,52].

Суттєвим внеском до фонду історико-фізичної літератури є монографія Ю.О. Храмова “Історія фізики” [47]. В книзі історія фізики вперше подається комплексно в соціокультурному контексті як історія фундаментальних ідей, теорій та наукових напрямів у межах розробленої автором періодизаційної схеми, а також через біографії провідних діячів науки та історію ряду фізичних шкіл першої половини ХХ ст. Такі розділи монографії, як “атомістика” та “статистична фізика і теорія твердого тіла” безпосередньо стосуються тематики дисертаційного дослідження.

Окрім курсів історії фізики, існує також низка методологічної літератури, яка стосується базових моментів фізичного пізнання. Так, цикл робіт в галузі філософських проблем фізики, узагальнених, зокрема, в монографії “Вибрані питання з методології фізики”, належить І.В.Кузнецову [53]. Зазначимо ряд його статей, перш за все працю “Структура фізичної теорії”, де обговорюється теза динамічної зміни структури фізичної теорії відповідно до історичного етапу розвитку науки. Наприклад, автор доходить висновку, що найсуттєвіші зміни даної форми нашого “бачення світу” відбуваються перш за все в епоху великих наукових революцій. Стаття “Специфічні риси фізичних форм руху матерії” є спробою уточнення самого поняття фізичної науки порівняно з іншими розділами знання, праця “Співвідношення структури наукової теорії і структури об’єкта” спрямована на пошук перших, вихідних складових компонентів понятійних конструктів майбутньої фізичної теорії, статті “Метод принципів” та “Про математичну гіпотезу” дають філософський аналіз загальних методів побудови та розвитку фізичної науки.

Вивчення глибинного „мікрорівня” внутрішніх процесів наукових революцій передбачає розгляд категоріальної структури теоретичного знання, оскільки філософські категорії виявляються найбільш загальними поняттями, які відображають найсуттєвіші зв’язки та відношення реальності. Основні категоріальні структури ряду теорій класичної фізики було вивчено А.Т.Артюхом, а сучасною фізики — В.Л.Храмовою [54,55]. Близькій тематиці присвячено монографію вітчизняного філософа науки В.І.Кузнецова “Проблема “універсалій” у фізичному пізнанні” [56], де ставиться питання про зв’язок у сучасній фізиці категорій загального, особливого та одиничного як моментів реальності. Виявляється, що їх комплексна структура має універсальний характер, відображується у фундаментальних фізичних теоріях та слугує для виділення об’єктів із предметних галузей, формулювання законів і принципів.

Оскільки діапазон застосування ідей і методів статистичної фізики є надзвичайно широкий, а статистична фізика тяжіє до універсальності опису явищ

природи, під час роботи над дисертацією було корисно ознайомитись з монографією М.О.Гудкова “Ідея “великого синтезу у фізиці” [57], де проаналізовано тенденцію до теоретичного синтезу знань у фізиці з моменту її логічної побудови у формі узагальнюючої теоретичної схеми механіки, а також розглянуто найбільш яскраві вияви цієї тенденції: теоретико-польовий синтез А.Ейнштейна, квантово-теоретичний синтез знань у галузі пізнання мікросвіту та “раннього” Всесвіту; “великий синтез” як програма концептуальної побудови єдиної теоретичної системи, що має відображати Всесвіт як єдине ціле. Остання концепція характеризується автором як притаманна сучасній фізиці методологія цілісного сприйняття світу.

Ряд цікавих матеріалів загального характеру, які відображають тенденції у розвитку фундаментальних проблем фізики, міститься також у тематичних збірках, що видавались у різні роки видавництвом “Наука”, зокрема, “Фізика сьогодні і завтра” та “Фізика ХХ століття: розвиток та перспективи” [58,59].

Слід зупинитись також на тих працях, які стосуються загальних питань історії розвитку науки і техніки. Ознайомлення з ними є необхідним незалежно від того, історія якої саме галузі науки досліджується. Із сучасної літератури з цієї тематики заслуговують на увагу монографії Т.Д.Пікашової, Л.О.Шашкової “Основи історії науки і техніки” та Л.М.Бесова “Історія науки і техніки”, написаних на основі навчальних курсів з історії науки і техніки, які викладаються авторами у Київському університеті та Харківському політехнічному інституті [60,61]. Так, у монографії Т. Д.Пікашової, Л.О.Шашкової висвітлено основні історичні етапи розвитку науки і техніки, їх ідейний зміст від часів зародження систематичного наукового пізнання до кінця XVIII ст. Багато уваги приділено загальній характеристиці соціокультурних умов різних історичних епох, що впливали на процеси формування наукових знань, еволюції освітнього процесу та його змісту, місця науки у суспільному житті в конкретні історичні періоди. Характерним для монографії є подання досягнень фундаментальних природничих наук у комплексі з визначальними для кожної епохи галузями гуманітарного знання — історіографії, філології, психології та соціології.

У зазначеній вище книзі Л.М.Бесова [61] показано, як поєднані між собою природнича, технічна, виробнича і гуманітарна складові культури. Розкрито картину накопичення суперечностей між людиною і природою та запропоновано шляхи їх розв’язання в сучасних умовах.

Для розуміння процесів становлення та розвитку статистичної фізики, а також усвідомлення її місця серед інших наук важливим є розгляд концептуальних засад сучасного природознавства, порівняння різних підходів до розуміння феномену науки в цілому. Для цього виявилось необхідним звернутись до енциклопедичної літератури, зокрема, до Філософської енциклопедії та Філософських енциклопедичних словників [62—64]. Узагальнюючи подані в цих джерелах тлумачення, зазначимо, що сьогодні під *наукою* розуміють соціально значущу сферу людської діяльності, спрямовану на одержання та систематизацію об’єктивних знань про оточуючу дійсність методами теоретичного обґрунтування, емпіричного випробування та перевірки результатів для розкриття їх об’єктивного змісту, істинності та достовірності

У зв’язку з тим, що наука є невід’ємною та надзвичайно важливою частиною духовної культури, спроби побудувати цілісний підхід до її розгляду є природними.

Класичною в цьому напрямі є монографія англійського дослідника Дж.Бернала “Наука в історії суспільства” [65], у якій здійснено спробу дослідити історію взаємовідносин між розвитком науки і техніки, та розвитком суспільства від зародження науки до 50-х рр. ХХ ст. Автором зображена широка картина прогресуючого пізнання наукою дійсності та її зростаюча роль для розвитку суспільства. Цікавим є те, що в книзі аналізується еволюція природничих дисциплін (перш за все фізики і біології) в комплексі з розвитком окремих галузей техніки і суспільних наук. Проте зауважимо, що написана у 1954 р. монографія не позбавлена політизації викладення матеріалу, особливо щодо ролі суспільних дисциплін, серед яких головне місце відведено марксистській теорії.

Слід зазначити, що в цілому сьогодні не існує єдиного загальноприйнятого підходу до опису науки. У цьому напрямі працювали К.Поппер, І.Лакатос, Д.Фейерабенд, О.Койре, Т.Кун, С.Тлумин, К.Гемпель, Р.Карнап, Дж.Снид, В.Штегмюллер та інші. Здійснені ними спроби в різній мірі враховують структуру, функціонування, генезис та розвиток науки. Так, К.Поппер розглядав логіку наукового відкриття, вводячи критерій фальсифікованості [66]; І.Лакатос запропонував концепцію науково-дослідних програм як фундаментальних одиниць методологічного аналізу [67—69]. П.Фейерабенд проаналізував зовнішній генезис науки в своїй концепції „методологічного анархізму” [70,71], започаткувавши „принцип плюралізму” нових та старих теорій, який підкреслює значення передісторії наукової дисципліни та її зв’язків з культурою. Внутрішній генезис науки досліджено в працях О.Койре [72,73], зовнішній розвиток — Т.Куна, який запропонував концепцію наукових революцій [74,75]. К.Поппер висунув також концепцію перманентної революції, С.Тлумин – еволюційного етапу розвитку науки [76,77].

Широко відомими є праці видатного математика, фізика, астронома та філософа А.Пуанкаре з метрологічних та гносеологічних проблем науки („Наука і гіпотеза” (1902), „Цінність науки”(1905), „Наука та метод” (1908), „Останні думки” (1913)), узагальнені в книзі „О Науке” [78]. У них дискутуються теми відносності руху, статус геометрії та фізичних законів, співвідношення логічного та інтуїтивного у науковій творчості. Розробка А.Пуанкаре питання про значення умовно вибраних домовленостей для побудови теоретичних моделей фізичних явищ заклала основи природничо-наукового конвенціоналізму, а передбачення ним напрямів, у яких буде рухатись наукова думка у природознавстві, робить сьогодні його висновки надзвичайно цінними орієнтирами для вчених.

Наступна книга, яка стосується природознавства в цілому — монографія Б.Г. Кузнецова “Ідеали сучасної науки” [79]. Вона присвячена міжгалузевим інваріантам природознавства, ідеям, принципам і методам, які об’єднують наукову картину світу в єдине ціле. Поняття ідеалу науки, введене автором, до певної міри співзвучне поняттю концепції у розглянутих вище працях і пояснюється ним як нескінченний інваріант трансформації науки, а рух до нього — як нескінченний і неперервний процес. Серед прикладів таких ідеалів наводяться детермінізм, атомізм, мікро- та макрокосмос, економічний, екологічний та гносеологічний ефекти науки.

Розділ “Бесіди з історії науки” книги О.Д.Олександрова ”Проблеми науки і позиція вченого” [80] фактично також є коротким викладенням історії розвитку

природознавства з найдавніших часів до 80-х рр. ХХ ст. Коло обговорюваних питань охоплює філософські та етичні проблеми науки, світоглядні питання математики, введення фундаментальних фізичних понять, основ теорії відносності та квантової фізики. Окремо приділяється увага ролі ймовірності у фізичних процесах. Загальним тенденціям розвитку природничих наук та ключовим моментам цього процесу від епохи Давньої Греції до наших днів, зокрема, формуванню сучасних уявлень про дискретну структуру речовини, присвячено також монографію В.А.Кириліна “Сторінки історії науки і техніки” [81].

Тут же слід вказати на монографію відомого українського філософа Ю.В. Павленка “Цивілізаційні трансформації та фундаментальні зрушення в розвитку природознавства” [82], метою якої є дослідження взаємозв'язку основних трансформацій світової цивілізації із становленням та розвитком позитивних знань про природу. Автором встановлюється кореляція між ними від початку цивілізаційного процесу за часів формування відтворювального господарства до сьогодення та робиться висновок про те, що за фундаментальними зрушеннями в культурно-цивілізаційній системі та виходом на новий рівень знань про природу, як правило, відбувається прорив у техніко-технологічній сфері.

Спроби викласти концептуальні засади сучасного природознавства здійснювались і раніше, але особливо вони інтенсифікувались в останні роки [83—95]. Так, у підручнику “Природознавство” В.І.Кузнецова, Г.М.Ідліса та В.Н.Гутіної [95] природознавство подано як єдина цілісна наука про природу в її неперервному розвитку, а специфічні сторони цієї науки — фізика, хімія, біологія — показані як рівні єдиної ієрархічної системи знань, де фундаментальні фізичні принципи є теоретичною основою всього природознавства. Головна концепція книги полягає в тому, що стрижневою лінією розвитку природознавства стало обґрунтування цілісності природи та єдності живої та неживої природи. Тут розглянуто процеси взаємопроникнення методів різних наук, еволюцію фізичної картини світу протягом наукових революцій, уявлення про Всесвіт та його макро- і мікросиметрію. Висвітлено також шляхи розвитку хімічних та біологічних знань, нові методи синтезу речовин та перетворення сонячної енергії в енергію хімічних палив як майбутнього енергетики.

Зупинимось також на монографії Т.Я.Дубнищевої “Концепції сучасного природознавства” [87], матеріал якої подано у вигляді питань і відповідей на них. Робота спрямована перш за все на формування уявлення про єдину сучасну картину світу, яка містить у собі термінологію, мову, сформовані поняття та сучасні досягнення. В книгу входить також короткий словник термінів та персоналій класиків природознавства. Розглядаючи природознавство як невід’ємну складову культури, яка проникає також у гуманітарну сферу та суспільне життя, авторка висвітлює процеси логіки пізнання та формування наукового методу, еволюцію картин світу та наукових програм; обговорює масштаби Всесвіту і еволюцію його об’єктів у просторі і часі, моделі матеріальної точки та хвилі, детермінізму і причинності класичної фізики, континуальну концепцію опису природи. На прикладі корпускулярно-хвильового дуалізму речовини та світу продемонстровано перехід від наочних до математичних уявлень, які втрачають наочність.

Один з розділів праці близький за тематикою до теми дисертації і присвячений співвідношенню динамічних і статистичних закономірностей. Тут розкрито механізм переходу від класичних моделей до складних систем, коли виникає необхідність зіставляти мікроскопічний та макроскопічний описи систем, та коли модельним параметрам на макрорівні відповідають характеристики складної системи. Важливим є обговорення можливості побудови загальних питань теорії нерівноважних процесів у складних системах, висвітлення ключової ролі зворотних зв'язків у системах, далеких від рівноваги, знайомство з міждисциплінарною галуззю вивчення складних систем — синергетикою та з прикладами виникнення самоорганізації матерії у різних предметних галузях (в тому числі зроблено узагальнення спроб побудувати підходи до розгляду еволюційних процесів у такій складній системі, як біосфера Землі). Цей розділ є корисним для усвідомлення загальності ймовірнісних підходів при розгляді різних явищ природи.

В Україні інтенсивні дослідження в галузі історії вітчизняної науки і техніки проводяться у відділі історії науки і техніки Центру досліджень науково-технічного потенціалу і історії науки НАН України під керівництвом відомого історика фізики д.ф.-м.н. Ю.О.Храмова. Фундаментальною колективною працею співробітників відділу є узагальнююча монографія “Природознавство в Україні до початку ХХ ст.” [96], у якій обговорюється питання осмислення історії вітчизняної науки як складової культури нашого народу. Тут розглядається історія природознавства від найдавніших часів у контексті соціокультурного процесу в Україні на тлі загальносвітового цивілізаційного поступу. Монографія складається з шести розділів, де подається історія розвитку наукових знань у ту чи іншу історичну добу. Робота має глобальний характер та містить у собі багато корисної інформації про становлення окремих наук, зокрема, фізики в Україні. У ній показано формування ранніх атомістичних поглядів на будову речовини, пов'язаних перш за все з діяльністю викладачів Києво-Могилянської академії.

Корисним джерелом щодо питань загального розвитку науки, техніки та освіти в Україні також є хрестоматія-посібник “З історії української науки і техніки” [97], яка містить у собі оригінальні тексти авторів з різними поглядами, але які були однаковими в оцінці ключової ролі науки, її історії та організації, зв'язку з вищою школою та технікою. У своїй сукупності матеріали створюють цілісну картину розвитку науки і техніки в Україні до 30-х рр. ХХ ст., дають можливість прослідкувати генезис її сучасного стану. Окремо наукова робота з фізики в Україні, в тому числі в наукових інститутах, відображена в оглядових роботах Ю.О.Храмова [98—101].

Оскільки до 1991 р. Україна входила до складу СРСР, інформацію щодо розвитку фізики в Україні, зокрема, статистичної фізики, доцільно було шукати також в літературі, у якій висвітлювався розвиток фізики в СРСР. Це, зокрема, монографії “Розвиток фізики в СРСР” у двох частинах [102], “Наукове співтовариство фізиків СРСР. 1950–1960 рр.” [103]. Остання містить у собі документи, спогади, дослідження, а також досить повну хронологію основних теоретичних та експериментальних відкриттів, одержаних у СРСР, у тому числі і в Україні, в зазначений період. Сюди ж можна віднести й перше інформаційно-довідкове видання “Наука і техніка СРСР. 1917–1987” [104], де зібрано основні

факти з історії радянської науки і техніки протягом 70 років. До переваг монографії слід віднести те, що оглядові статті поєднані з хронологічним матеріалом.

Основні результати теоретичного плану з фізики в СРСР викладено в статтях Д.І.Блохінцева “Шляхи розвитку теоретичної фізики в СРСР” та А.Ф.Йоффе “Розвиток радянської фізики” [105,106]. Розвиток фізичної науки в СРСР, зокрема, в Україні, також висвітлюють статті В.І.Вернадського “Про наукову роботу в Криму в 1917–1921 рр.” [107], Я.І.Френкеля “Теоретична фізика в СРСР за 30 років” [108], М.В.Пасічника “Розвиток фізики в Україні за 40 років радянської влади” [109], А.К. Вальтера, Б.Г.Лазарева, К.Д.Синельникова “Досягнення в галузі фізики в Україні за 40 років Радянської влади” [110], В.С.Савчука “Біля витоків Української асоціації фізиків” [111].

Такі праці відображають загальні тенденції розвитку досліджуваної галузі науки. Але через глобальність тематики та обширність територіальних меж і хронологічних рамок, звичайно, не всі дослідження у локальних наукових центрах було висвітлено у повному обсязі. Тому проблемно-історичні роботи, тобто дослідження історії окремих питань статистичної фізики, також увійшли до джерельної бази даного дисертаційного дослідження. Так, проблема еволюції поняття причинності у фізиці розглядається в працях В.Фока [112], В.Бояринцева [113], Х.М.Нуссенцвейга [114]; історія теореми Карно – Б.І.Спаського [115], історія побудови квантових статистик – Л.Беллоні [116], побудова нерівноважної статистичної фізики – Л.Онсагера [117], І.Пригожина [118], Г.В.Смирнова [119], Дж. Кайзера, С.Д.Хайтуна [120]; генезис та розвиток термодинаміки Дж.Гіббса – Д.М. Зубарева [121], А.Я.Кипніса [122], С.Д.Хайтуна [123], М.Гольдберга [124], Я.М. Гельфера [125], значення принципу доповнюваності для статистичної фізики – в статті І.П.Базарова [126], помилкові судження у термодинаміці – І.П.Базарова та В.В. Толмачова [127], питання статистичної теорії рідин – у праці І.Фішера [128], проблеми запровадження стохастичних методів до фізики та астрономії – С. Чандрасекара [129] та К.Гардінера; статистична фізика макромолекул – А.Гросберга та А.Хохлова; еволюція поняття фазового переходу – Я.Г.Синая [130], Г.Стенлі [131], П.Фльорі [132]. Значення методу М.М.Боголюбова для розвитку кінетичної теорії виклав К.П.Гуров [133], про важливість концепції квазісередніх М.М.Боголюбова для теорії неупорядкованих систем писали В.П.Ковров та А.М.Курбатов [134], ймовірнісні аспекти квантової теорії розглядав А.Холево [135]; математичні засади статистичної механіки досліджував А.Хінчин [136], підсумкам кінетичної теорії присвятила працю Т.О.Афанасьєва-Еренфест [137], узагальнення законів фізичної статистики для розгляду таких актуальних об’єктів сучасної науки, як ударні хвилі і надгуста речовина, дано О.С.Компанейцем [138], зв’язок стохастичних автоколивань та турбулентності розглядав М.І.Рабіновичем [139]. Кінетична природа міцності вивчається у статті В.Р.Регеля та А.І.Слущера [58,с.90–173]. Авторами робиться узагальнюючий висновок, що саме кінетична концепція міцності є найбільш загальною, і на її основі можна описати практично всі вияви процесу руйнування різних за будовою та властивостям твердих тіл. Визначальним тут виявляється термофлуктуаційний механізм руйнування. Це має важливий пізнавальний характер, оскільки головним чинником виявляється не механічна сила, а тепловий рух атомів, який породжує енергетичні флуктуації, що долають



потенціальний бар'єр в елементарних актах руйнації.

Одним з середовищ, до яких застосовні методи статистичної фізики, є макромолекули та полімери. Можливості використання полімерних матеріалів у фізиці, обчислювальній техніці та біології, а також особливості фазового переходу, який відбувається при полімеризації, обговорено в статті В.Я.Френкеля [58, с. 176–270].

Нерівноважній термодинаміці, а також такому її сучасному узагальненню, як синергетика – наука про процеси самоорганізації, присвячена численна література. Історії формування та розвитку нелінійної динаміки у 1950–1960 рр. ХХ ст. та запровадження у 1963–1964 рр. фундаментального поняття динамічного хаосу, тобто виникнення стохастичної поведінки у динамічних системах, відображено у статті Р.Р.Мухіна [140], монографії Г.Шустера “Детермінований хаос” [141], та частково у книзі А.М.Косевича і О.С.Ковалева “Вступ до нелінійної фізичної механіки” [142].

Аналізу запропонованого І.Пригожиним принципу локальної рівноваги та теореми про мінімум вироблення ентропії у стаціонарних нерівноважних станах, а також обговоренню понять дисипативних структур, самоорганізації, відкритої системи присвячені передусім його праці – монографії “Нерівноважна статистична механіка”, “Від існуючого до виникаючого”, “Самоорганізація в нерівноважних системах” (спільно з Г.Ніколісом), “Сучасна термодинаміка від теплових двигунів до дисипативних структур” (спільно з Д.Кондепуді), “Порядок з хаосу” (спільно з І.Стенгерс), “Кінець визначеності. Час, хаос та нові закони природи”, “Термодинамічна теорія структури, стійкості та флуктуацій” (спільно з П.Гленсдорфом) [143–149]; статті [150, 151]. Подальшому дослідженню самоорганізації, а саме самоорганізації в активних розподілених середовищах (у широкому спектрі фізичних, хімічних та біологічних систем) присвячено статтю Б.С.Кернера, В.В.Осипова [152], синергетичні стратегії в освіті вивчав В.Буданов [153].

Історія розвитку фізичної науки завжди привертала увагу вчених-фізиків, особливо тих, хто були фундаторами формування сучасних фізичних уявлень. Ці науковці публікували дослідницькі та науково-популярні праці з історії поворотних моментів розвитку фізики, висвітлювали її найбільш яскраві моменти у своїх Нобелівських лекціях. Частково питання еволюції статистичної фізики також висвітлені в оглядових працях видатних вчених – А.Пуанкаре [154], Г.Лоренца [155, 156], Г.Герца [157], М.Планка [158], Н.Бора [159], М.Борна [160], Е.Шредінгера [161], П.Дірака [162, 163], В.Гейзенберга [164], П.Ланжевена [165, 166], В.Вайскопфа [167–169], А.Ейнштейна [41], А.Зоммерфельда [170], Л.де Бройля [171], І.Погребиського, М.Каца [172], О.І.Ахієзера, С.В.Пелетминського [173], М.І.Каганова та В.Я.Френкеля [174–176], П.Л.Капіци. Стаття останнього “Про надплинність рідкого гелію-II” [177, с.118-129] дає нарис історії відкриття одного з фундаментальних квантових явищ – явища надплинності, висвітлюючи при цьому його фізичну суть, а також значення гідродинамічної теорії даного явища, створеної Л.Д.Ландау. Окрему позицію займають наукові огляди сучасників [179–183], які містять у собі розгляд основних досягнень фізики.

Слід зазначити також огляди різних авторів, які стосуються історії фізики в Україні, і з яких необхідно було також виокремлювати відомості щодо розвитку

статистичної фізики. Це, наприклад, книга “Розвиток науки в Українській РСР за 40 років”, яка містить у собі розділ щодо досягнень у галузі фізики в Україні до 60-х рр . XX ст. [184], де викладено результати досліджень у галузі фізики твердого тіла та фізики низьких температур, термодинаміки і статистичної теорії твердого тіла, електронної теорії металів, електронної теорії неметалічних кристалів. Ряд питань щодо внеску українських вчених у молекулярну фізику та термодинаміку вивчались у статтях А.М.Павленка та В.М.Коновалова і Г.Г.Кордуна [185—187]. Тут у світовому контексті подано створення основ феноменологічної термодинаміки та молекулярної фізики, показано вдосконалення термодинамічного методу та його поширення на довільні мікроскопічні системи, окреслено розвиток термодинаміки в сучасний період, який характеризується органічним злиттям феноменологічного методу зі статистичним і поширенням його на квантові явища.

Значну цінність становлять видання з історії освітянських та наукових центрів – навчальних закладів, їх факультетів і кафедр, наукових інститутів, де проводилися розробки в галузі статистичної фізики та суміжних з нею наукових галузей, Національної академії наук України. Їх аналіз показав стан дослідження питання про атомістичні уявлення у період перших освітніх центрів в Україні та висвітлив історію становлення і наукові результати, одержані в різні роки у Києво-Могилянській академії, Харківському, Київському, Львівському та Одеському університетах, Київському політехнічному інституті, Харківському фізико-технічному інституті, Інституті радіофізики та електроніки, Фізико-технічному інституті, Інституті фізики, Інституті теоретичної фізики, Інституті металофізики, Інституті матеріалознавства, Інституті напівпровідників тощо [188—202]. Вони містять у собі важливий узагальнений фактичний матеріал, який, проте, потребує серйозного аналізу. Так, в нарисах [203—213] наведено факти з науково-педагогічної діяльності фізиків Харківського та Київського університетів, які, зокрема, працювали на фізичному та механіко-математичному факультетах, дано відомості про їх внесок у розвиток науки. З цього переліку слід зазначити такі ювілейні ґрунтовні видання, як “50 років Харківському фізико-технічному інституту”, “Інститут радіофізики та електроніки ім. О.Я.Усикова НАН України. 50 років”, “Київський політехнічний інститут. Нарис історії. КПП-100 років”, “Об’єднаний інститут ядерних досліджень. Дубна 1956–1981”. Слід згадати також книгу М.В.Полякова та В.С.Савчука “Класичний університет” [214], де простежено історичний шлях, пройдений університетом від зародкових форм в Античності до сьогодення, наведено сучасні моделі університетської освіти.

Окремо вкажемо на нариси розвитку саме фізичної науки в університетах України. Це такі статті, як “Наукові дослідження з фізики у вузах України” (О.З. Жмудський), “Про розвиток наукових досліджень з фізики в університетах УРСР”, “Дослідження в галузі фізичних наук в Київському державному університеті за 40 років”(Г.В.Дмитренко), “Фізика в Харківському університеті” (Н.Л.Полякова), “Про розвиток фізики у Львівському університеті” (І.А.Климишин), “Наукові дослідження на фізичному факультеті Львівського університету” (М.Т.Сеньків), “Фізика в Одеському університеті ім. І.І.Мечникова” (Є.А.Кирилов, Д.І.Поліщук, Т. Я.Сьора), “Теоретична фізика у Київському державному університеті” (Л.Я.Штрум), “Наука і наукові працівники в Київському державному університеті за 112 років

його існування. 1834-1946” (О.П.Маркевич) [215—224]. Ці джерела показують пріоритетні напрямки, які розвивались в університетах, і дають можливість виявити центри досліджень зі статистичної фізики та близьких дисциплін — молекулярної фізики, фізики твердого тіла, фізики рідин тощо.

Блок літератури, який обов’язково необхідно опрацьовувати при роботі з історії фізики в Україні — це джерела щодо історії становлення і розвитку Національної академії наук України. Так, у монографії Ю.О.Храмова, С.П.Рудої, Ю.В.Павленка та В.А.Кучмаренко “Рання історія Академії наук України.1918–1921” [225] досліджено створення і перші роки діяльності Української академії наук у Києві в контексті соціально-політичних подій, що відбувалися в Україні в 1917–1921 рр. ХХ ст. Вперше по-новому подано аналіз процесів у суспільно-політичному і культурному житті в Україні на початку ХХ ст., головним чином, у 1917–1920 рр. Розглянуто Історію УАН 1918–1921 рр., передумови, що привели до її організації, відновлено справжню дату заснування УАН, введено чимало нових фактів та імен, дано нове бачення низки подій академічного життя, уточнено багато дат. У виданні С.Кульчицького, Ю.В.Павленка, С.П.Рудої та Ю.О.Храмова „Історія Національної академії наук України в суспільно-політичному контексті. 1918–1998” [226] в контексті соціально-політичних і культурних процесів, що відбувалися в Україні наприкінці ХІХ ст. і впродовж ХХ ст., розкрито передісторію створення Національної академії наук, її заснування, початок діяльності та подальший розвиток протягом 80 років. Вперше дано нове бачення подій в суспільно-політичному і духовному житті України в розглядуваний період, низку фактів академічного життя. У рамках запропонованої періодизаційної схеми викладено реальні пріоритети і результати світового рівня, які вплинули на логіку конкретних наук і наукових напрямів; вміщено хроніку академії, у якій разом із загально академічними фактами наведено наукові результати та персональний склад провідних наукових шкіл. Слід зазначити, що монографія не містить інформації про наукові школи академіків О.Г.Ситенка, С.В.Пелетминського, В.Г.Бар’яхтара та І.Р. Юхновського, діяльність яких висвітлюється у дисертаційній роботі. Наступна монографія “Історія Академії наук України”. 1918–1923. Документи і матеріали” [227] цікава тим, що у ній вводяться численні джерела з історії Академії наук України, публікуються недоступні раніше для дослідження документи Центральної ради, Української держави, Української народної республіки про створення Академії наук, невідомі і маловідомі документи радянського періоду діяльності УАН (ВУАН). Дослідження з фізики в Академії наук Української ССР з 1917 до 1985 рр. розглянуто у статті В.Г.Бар’яхтара та Ю.О.Храмова [228].

Важливим джерелом дослідження виявились також звітні матеріали, наприклад, Звіт про сесію фізико-математичних і хімічних наук Академії наук УРСР з питань фізики [229] дає можливість виявити пріоритетні розробки в Академії наук України у зазначений період. Наукові щорічники Київського університету, які видавалися з 1958 до 1962 рр., містять у собі звіти кафедр молекулярної фізики та теоретичної фізики з 1957 до 1961 рр., показують одержані там результати [230—234]. Звіт про роботу Українського фізико-технічного інституту О.І.Лейпунського за перші 6 років його існування у 1937 р. показує формування бази подальшого розвитку фізики в Україні, зокрема, в галузі низьких температур та теоретичної

фізики [235].

Окремі аспекти досліджуваної проблеми висвітлюються в історичних працях, де вивчаються особливості розвитку науки залежно від різних зовнішніх чинників, в тому числі і соціально-політичних. Так, жорстоким репресіям у 30-ті рр. ХХ ст. в Українському фізико-технічному інституті присвячена монографія Ю.В.Павленка, Ю.Н.Ранюка, Ю.А. Храмова „Дело „УФТИ”. 1945–1938” [236].

Особливе значення мають дослідження форм розвитку науки у першій половині ХХ ст., зокрема, такої її форми, як наукова школа. Феномен наукової школи є історичним і неоднозначним, але характеризується рядом параметрів. Складність проблеми зумовила різноманітність тлумачень поняття "наукова школа". Під ним розуміють науково-освітню школу, дослідницький колектив, напрям у науці (М.Г.Ярошевський), розрізняють також класичні та сучасні наукові школи (К. О.Ланге), класичні, дисциплінарні, проблемні (С.Д.Хайтун) тощо [237,238].

Комплексне вивчення даного феномену було здійснено Ю.О.Храмовим, у працях якого запропоновано концепцію сучасної наукової школи як найвищої форми колективної творчості, висвітлено її характерні ознаки, умови створення, структури, у яких функціонує школа. Ю.О.Храмов вперше на основі аналізу історико-наукового матеріалу, пов'язаного з діяльністю видатних вчених-фізиків та вихователів творчої молоді, висловлювань відомих учених розробив робочу модель сучасної наукової школи, виділив її характерні ознаки та риси наукового лідера-керівника школи, розкрив комплекс умов, що приводять при певних обставинах до виникнення наукової школи, встановив структури, в яких виникає та функціонує наукова школа, показав значення в цих процесах науково-дослідних програм, узагальнив досвід їх виконання, зміни парадигм, реалізації фізичними школами через свої програми соціального замовлення науки [239—243]. Запропонований Ю. О.Храмовим методологічний інструментарій було застосовано до ряду провідних фізичних шкіл в Україні і світі.

Основну частину джерельної бази роботи складають оригінальні наукові праці науковців як досліджуваного періоду, так і їх попередників. Це монографії, статті, доповіді, дисертації. Особлива увага надавалася також аналізу періодичних видань, таких як “Успіхи фізичних наук”, “Успіхи математичних наук”, “Український фізичний журнал”, “Український математичний журнал”, “Журнал теоретической и экспериментальной физики”, “Теоретична та математична фізика”, “Фізика низьких температур”, “Природа”, “Университетские известия”, “Наукові записки Київського університету”, “Українські фізичні записки”, “Доповіді АН УРСР”, “Доклады АН СССР”, “Вісник НАН України”, “Вестник АН СССР”, “Наука та наукознавство”, “Нариси з історії природознавства та техніки”, “Історія української науки на межі тисячоліть”, „Дослідження з історії техніки”, “Вопросы истории естествознания и техники”, “Zeitschrift für Physik“, “Nature”, “Physical Review”, “Physics Today”, “American Journal of Physics” та інші.

Особливо цінну інформацію містять у собі монографії, що видавались у досліджуваний період, оскільки саме в них підсумовувались результати багаторічних досліджень та визначались подальші шляхи розробки відповідної проблеми. До таких праць належать класична монографія “Кінетична теорія рідин” Я.І. Френкеля [244], який першим висловив ідею про те, що рідина ближче за своїм

складом до твердого тіла, ніж до газу внаслідок наявності ближнього порядку у розташуванні атомів, а також звернув увагу на необхідність застосування методів статистичної фізики при вивченні ядра; перші монографії М.М.Боголюбова зі статистичної фізики “Лекції з квантової статистики” та “Про деякі статистичні методи у математичній фізиці” [245,246]; етапна монографія М.М.Боголюбова “Проблеми динамічної теорії у статистичній фізиці” 1946 р. [247], яка стала початком широкомасштабних досліджень зі статистичної фізики в Україні; книга М.М.Боголюбова, В.В.Толмачова, Д.В.Ширкова “Новий метод в теорії надпровідності” [248], де викладено побудований ними метод; монографія Дж.Бардіна, Дж.Шріффера. “Нове у вивченні надпровідності” [249], де пояснюється ідея куперівських пар, а також одна з книг фундаментального курсу теоретичної фізики Л.Д.Ландау і Є.М.Ліфшиця „Статистична фізика” [250], перша частина якої ( „класична статистика”) була написана у Харківський період діяльності Л.Д.Ландау. Можна вказати також на монографії українських вчених В.І.Данилова “Будова та кристалізація рідин” [251], Й.З.Фішера “Статистична теорія рідин” [128], М.А.Кривогила і А.А.Смирнова “Теорія сплавів, що впорядковуються” [252], А.Г.Ситенка “Електромагнітні флуктуації в плазмі” [253], які містять у собі застосування методів статистичної фізики в галузі теорії рідин, теорії металів та теорії плазми, а також їх подальший розвиток.

Окрема низка монографій — це курси або підручники зі статистичної фізики та термодинаміки (понад 150 джерел), написані провідними вченими в цій галузі (це , зокрема, А.Зоммерфельд, Р.Балеску, Т.Хілл, А.Ісіхара, К.Хуанг, Дж.Уленбек, Дж.Форд, К.Хір, С.де Гроот, П.Мазур, Р.Кубо, Д.Рюель, Дж.Майер, М.Гепперт-Майер, Ч.Кіттель, Р.Фейнман, Дж.Кайзер, Г.Репке, Я.І.Френкель, Ю.Л.Климонтович, М.А.Леонтович, Л.Д.Ландау, Є.М.Ліфшиць, О.І.Ахієзер, С.В.Пелетмінський, Д.Н.Зубарев , К.М.Никольський, Ю.Б.Румер, М.Ш.Ривкін, Л.В.Радушкевич, В.Г.Левич, Я.П.Терлецький, Ф.Куні, А.І.Ансельм, І.А.Квасніков, Р.Л.Стратонович, К.В.Гардинер), які використовувались нами для аналізу генезису та еволюції поняття “статистична фізика” [245—267]. З цією ж метою аналізувались також енциклопедичні видання — Фізичні енциклопедичні словники, Фізичні енциклопедії, Велика радянська енциклопедія та Українська радянська енциклопедія [268—271].

Цікаві факти містять у собі й матеріали конференцій, зокрема, традиційних конференцій зі статистичної фізики, які проводяться у Харкові (Національний науковий центр “Харківський фізико-технічний інститут”, Харківський університет ), Львові (Інститут фізики конденсованих систем, Львівський університет ). Це також матеріали конференції ”25 років нелінійної статистичної механіки” ( Барселона, Іспанія, 1994) та Зимової школи теоретичної фізики “Хаос: взаємозв’язок між стохастичною та динамічною поведінкою” (Карпач, Польща, 1995) [272,273]. Сюди можна віднести також матеріали засідань наукових товариств, зокрема, Російського фізико-хімічного товариства, у роботі яких брали участь українські вчені. Ці джерела дозволяють визначити місце українських вчених в процесі розвитку наукової думки відповідного напрямку та оцінити їх здобутки.

Корисними джерелами є тритомний бібліографічний покажчик „Розвиток фізичних наук в Україні”, де зібрано посилання на основні праці фізиків та на оглядові статті з тої чи іншої тематики за 1917–1967 рр. [274], а також

бібліографічний довідник „Видання Академії наук УРСР (1919–1967). Фізико-технічні та математичні науки” [275]. Надзвичайно багатий бібліографічний матеріал щодо розвитку природознавства в цілому, а також щодо історії фізико-математичних наук з 1948 до 1975 рр., містить у собі багатотомний бібліографічний покажчик “Історія природознавства”, виданий Академією наук СРСР [276]. Вдало у хронологічному та тематичному порядку організована бібліографія історико-наукових робіт, виданих Інститутом історії природознавства і техніки РАН, хронологічні рамки якої обіймають період 1954—1980 рр. [277]. Бібліографія поділена на розділи і висвітлює теоретичні проблеми розвитку природознавства і техніки, наукознавства, історії різних природничих наук та техніки, вміщує праці класиків природознавства і техніки, довідково-бібліографічні видання.

Для ґрунтовного розкриття досліджуваної теми надзвичайно важливу роль відіграло знайомство з біографічною літературою, у якій подаються характеристики життєвого та творчого шляху видатних вчених—фундаторів статистичної фізики, котрі зробили величезний внесок у її становлення та розвиток як в світі, так і в Україні, показані їх основні наукові досягнення. Перш за все слід зазначити серії “Біобібліографія вчених Української ССР” та “Матеріали до біобібліографії вчених СРСР,” у яких друкувались наукові біографії та бібліографії академіків. У дисертаційній роботі використані матеріали з цих серій щодо діяльності академіків НАН України М.М.Боголюбова, Б.І.Веркіна, О.С.Давидова, О.Г.Ситенка, І.Р.Юхновського [278—282].

Про деяких визначних вчених, які зробили фундаментальний внесок у розвиток статистичної фізики в Україні та світі, написані книги. Так, засновникам класичної статистичної механіки та термодинаміки присвячено книги Л.С.Полака „Людвиг Больцман”, У.І.Франкфурта і А.М.Френка „Джозайя Виллард Гіббс”, С.Д.Хайтуна „Парадокс Гіббса”, У.І.Франкфурта, А.В.Лебединського та інш. „Гельмгольц”, В.М.Бородянського „Саді Карно”, А.Пайса “Наукова діяльність та життя А.Ейнштейна”, Г.В.Бикова „Амедео Авогадро”, А.П.Плачинди „М.Д.Пильчиков” [283—290]. О.П.Мороз, В.Я.Френкель та М.Клейн писали про науковий і творчий шлях П.Еренфеста [291—293]. Цікавою є документальна повість Богдана Вереса “Сонячна теорема” про М.М.Боголюбова [294], де у художній формі описано незвичайну долю та життєвий шлях академіка М.М.Боголюбова, що пройшов від села Великі Кручі на Полтавщині до керівництва у Дубні та Києві науковими центрами, які мають світове визнання. Глибокою і змістовною також є книга О.М.Боголюбова “М.М.Боголюбов. Життя. Творчість” [295]. Академіку Л.Д.Ландау присвячено книгу А.Ливанової [296], його дружиною та племінницею також написані книги “Ландау” та “Академік Ландау” [297,298]. Науковій школі Ландау присвячено книгу М.І.Каганова „Школа Ландау: що я про це думаю” [299]. Сторінкам історії Харківського фізико-технічного інституту, а саме, видатним вченим, серед яких академіки Л.Д.Ландау, І.М.Ліфшиць, Б.І.Веркін, О.І.Ахієзер, присвячений розділ альбому “Миттєвості життя”, написаного академіком НАН України О.Я.Усиковим та ілюстрованого його дружиною фотохудожницею Д.Гай [300]. Корисною також є монографія “Розвиток науки в західних областях Української РСР. 1939–1989”, де особлива увага приділяється аналізу фундаментальних і прикладних досліджень в наукових установах та вузівських

центрах, про які додатково подано довідковий матеріал. Зокрема, широко висвітлено одержані у Львівському університеті та Львівському відділенні Інституту теоретичної фізики академіком НАН України І.Р.Юхновським та його науковою школою результати [301]. Значне місце відведено інформації про початок наукової діяльності академіка НАН України В.І.Данилова в книзі В.С.Савчука “Нариси з історії фізичних досліджень на Дніпропетровщині (1917–1945)” [302].

Окреме місце серед біографічних джерел займає меморіальна література — статті (часто ювілейні) та некрологи вчених, які працюють чи працювали в досліджуваній галузі та сприяли її становленню. Тут слід відзначити статті про вчених, які сприяли становленню статистичної фізики як наукової галузі. Змістовні некрологи про М.Смолуховського та П.Еренфеста, написані А.Ейнштейном [303], інформативними є статті М.М.Боголюбова про Л.Больцмана [304], О.Г.Гольдмана про М.П.Авенаріуса та його наукову школу [305], М.Планка, У.І.Франкфурта, С.Ф.Шушурина, О.В.Кузнецової про запровадження Дж.Максвеллом статистичного методу в фізику, розуміння вченим меж застосування другого закону термодинаміки та про розвиток ідей Максвелла російськими фізиками наприкінці ХІХ— на початку ХХ ст. [306—310]. Цікаві праці І.М.Кравця про Т.Ф.Осиповського [311], В.П.Зубарева про Дж.Гіббса [121], В.В.Мігуліна про Л.І.Мандельштама [312], Г.Є.Гореліка про П.Еренфеста [313], М.В.Кирпичова [314] та М.Н.Свиридонова [315] та про науковий доробок Т.О.Афанасьєвої-Еренфест в галузі теорії подібності та розуміння поняття ентропії, Й.Й.Косоногова про М.М.Шиллера [316], О.Габовича про М.Смолуховського [317], Г.Г.Де Метца про Ф.Н.Шведова [318], В.С.Савчука про А.Е.Малиновського [319].

Численні ювілейні статті про М.М.Боголюбова вміщені в наукові журнали “Успіхи математичних наук”, “Успіхи фізичних наук”, “Атомна енергія”, “Журнал теоретичної та експериментальної фізики”, “Український фізичний журнал”, “Український математичний журнал”, “Фізика низьких температур”, “Вісник АН УРСР”, “Доповіді АН СРСР” [320—328], а також у тогочасні газети і журнали – “Правда”, “Правда України”, “Комсомольська правда”, “Знання та праця”, “Культура та життя”, “Вечірній Київ”, “Огонек” [329—334]. Грунтовне висвітлення основних етапів життя та наукової діяльності вченого, а також розкриття значення його досліджень для сучасної фізики містить у собі також некролог, написаний М.М.Боголюбовим (молодшим) та Д.П.Санковичем [335]. Огляд результатів М.М.Боголюбова тут детально структурований за хронологічним принципом і охоплює: наближений розв’язок диференціальних рівнянь (1925–1932); прямі методи варіаційного числення (1926–1932); теорію майже періодичних функцій (1930–1990); нелінійну механіку (1932–1969); теорію динамічних систем (1935–1991); статистичну механіку (1939–1991); квантову теорію поля (1950–1987). Очевидно, що питаннями статистичної фізики та застосуванням її методів М.М.Боголюбов займався протягом майже усього свого життя.

Ювілейні та меморіальні статті, присвячені діяльності таких вчених, як академіки В.І.Данилов, А.А.Смирнов, І.Р.Юхновський, С.В.Пелетмінський, професори О.З.Голик та Й.З.Фішер, також були опубліковані у наукових журналах ( “Український фізичний журнал”, “Електромагнітні явища”, “Металофізика”, “Вісник АН України”, “Журнал експериментальної та теоретичної фізики”,

“Проблеми металознавства та фізики металів”, “Фізика рідкого стану”, “Акустичний журнал”, “Журнал молекулярних рідин”) [336—348].

Надзвичайно інформативними є спогади, есе та інтерв'ю вчених – як авторів наукових результатів про свій творчий шлях, так і їх учнів, послідовників та колег. Нами розглядалися збірки спогадів про М.М.Боголюбова, Л.Д.Ландау, О.С.Давидова, нариси та спогади О.І.Ахієзера, есе та інтерв'ю вчених про І.Р.Юхновського, спогади про П.Еренфеста, про Я.І.Френкеля, які в комплексі розкривають феномен формування цих вчених, їх творчий портрет як особистостей, науковців та засновників наукових шкіл [349—357]. Цікавою також є передмова до вибраних праць І.Р.Юхновського, написана його учнями, що становить огляд запропонованих вченим методів, передусім методу колективних змінних та методу зміщень і колективних змінних, і також їх застосування для розчинів електролітів, квантових багаточастинкових систем, критичних явищ та фазових переходів, чорнобильської проблематики [358].

Увага приділялась також біографічній та бібліографічній інформації про вчених, розміщеній у довідниках або словниках. Необхідно зазначити довідник “Національна академія наук України. Персональний склад. 1918–2003.” [359], де подано короткі відомості про життя, наукову та науково-організаційну діяльність академіків і членів-кореспондентів Національної академії наук України за час її існування до 2003 р., біографічний довідник Ю.О.Храмова “Фізики” [360], довідникову частину в праці Ю.О.Храмова „Історія фізики”, словники “A New Dictionary of Physics” та “Dictionary of Scientists. The Cambridge” [361,362], “Notable 20th Century Scientists” [363], „Twentieth Century Physics” [364], „Dictionary of scientific biography” [365], “Хто є хто. Професори Національного технічного університету “Київський політехнічний інститут” [366], біобібліографічний довідник “Вихованці Харківського університету” [367], “Почесні члені і доктори Університету св. Володимира” [368], „Біографічний словник діячів природознавства і техніки (у 2-х т.)” [369], „Венгеров С.А. Критико-биографический словарь русских писателей и ученых от начала русской образованности до наших дней” [370]. Корисним джерелом також є довідниковий посібник “Класики фізичної науки (з найдавніших часів до початку ХХ ст.)”, що містить у собі праці або уривки з них класиків фізичної науки, які відіграли значну роль у історії фізики, зокрема, у становленні статистичної фізики – Р.Бойля, Д.Бернуллі, Н.Карно, Р.Майера, Дж. Джоуля, Г.Гельмгольца, Р.Клаузіуса, Дж.Максвелла, Л.Больцмана, Дж.Гіббса [371]. Тут оригінальні тексти супроводжуються короткими вступними статтями та коментарями. Надзвичайно корисною також є узагальнююча праця З.К. Соколовської “400 біографій вчених”, яка містить у собі рецензії на книги науково-біографічної серії видавництва “Наука”, численний документальний і ілюстративний матеріал [372].

Слід зазначити також ряд тематичних збірників, які виявились дуже корисними при роботі над дисертаційним дослідженням. Це, перш за все, збірники оригінальних праць основоположників статистичної фізики та термодинаміки – С. Карно, Дж.Клаузіуса, Дж.Максвелла, Дж.Гіббса — „Засновники кінетичної теорії матерії” та „Другий закон термодинаміки”, виданих у 1934 та 1937 рр. [373,374], збірник „Проблеми теоретичної фізики”, який складається з наукових статей з



актуальних проблем статистичної фізики і присвячений 60-річчю М.М.Боголюбова [375], збірник “Проблеми сучасної статистичної фізики”, у якому відображено результати досліджень у цій галузі, одержані у 80-ті роки, і розглянуто теорію фазових переходів, кінетичні явища, строгі математичні методи, нелінійні процеси, статистичну фізику конденсованих середовищ [376]. Наступний збірник наукових праць присвячений одному з методів статистичної фізики – методу Монте-Карло [377]. Методу молекулярної динаміки у статистичній фізиці описано також у статті А.Н.Лагарькова та В.М.Сергеєва [378], а ґрунтовний огляд математичних методів статистичної фізики на прикладі модельних систем зроблено у монографії М.М.Боголюбова (мол.), Б.І.Садовникова, А.С.Шумовського “Математичні методи статистичної механіки модельних систем” [379].

Вагома частина джерельної бази — це архівні матеріали, переважна більшість яких вводиться до наукового обігу вперше. У роботі використано матеріали фондів архівів – насамперед, фонди Державного архіву Києва, Центрального державного архіву вищих органів влади та управління України, архіву Президії НАН України, архіву Київського національного університету, архіву Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут”, архіву Інституту радіофізики і електроніки НАН України, фонди Інституту рукопису та газетного фонду Центральної наукової бібліотеки ім. В.І.Вернадського НАН України. До опрацьованих матеріалів фондів архівів входять, в першу чергу, такі документи: особові справи та фонди вчених, звіти інститутів про наукову діяльність, постанови. Серед них зазначимо особові справи: академіка НАН України В.І.Данилова (архів Президії НАН України [380]), академіка НАН України А.А.Смирнова А.А. (архів Президії НАН України [381], архів НТУУ “КПІ” [382]), академіка НАН України О.Г.Ситенка (архів Президії НАН України [383]), академіка НАН України І.М.Лифшиця (архів Президії НАН України [384]), члена-кореспондента НАН України А.Г.Лесника (архів Президії НАН України [385]), професорів О.З.Голика (архів Київського університету [386]), С.Д.Герцрікена (архів Київського університету [387]), А.М.Федорченка (архів Київського університету [388]), Ю.І.Шиманського (архів Київського університету [389]), доктора фіз.-мат наук В.Л.Германа (архів Інституту радіофізики та електроніки НАН України [390]). Серед звітів наукових інститутів зазначимо звіти Інституту фізики НАН України, наприклад, звіт за 1947 р., де відображено становлення поняття полярону [391]. Цікавий документ, а саме, відгук про наукову роботу професора М.М.Боголюбова, підписаний академіками НАН України Г.В.Пфейффером та Н.М.Криловим, було знайдено у архіві Д.А.Граве Інституту рукопису ЦНБ НАН України [392]. Підтвердженням того, що завдяки зусиллям науковців України дослідження зі статистичної фізики стали пріоритетним напрямом фізичної науки країни, стала низка постанов Президії НАН України різних років, а саме “Про дослідження в галузі статистичної фізики” (постанова №110 від 12 березня 1980 р. [393]), прийняту після доповіді академіка І.Р.Юхновського; “Про створення у м.Львові Інституту фізики конденсованих систем” (постанова № 213 від 7 вересня 1990 р. [394]); “Про стан досліджень з фізики рідкого стану в Україні”, прийняту після обговорення доповіді члена-кореспондента НАН України М.Ф.Головка (постанова № 143 від 31 травня 2000 р. [395]). Надзвичайно корисними для встановлення невідомих сторінок біографії Т.О.Афанасьєвої-

Еренфест є публікація у газеті „Новое время” некролога дядька (брата батька) вченої, у сім’ї якої вона виховувалась [396].

Під час дослідження вивчалися дисертаційні роботи на здобуття наукового ступеня кандидата або доктора історичних, фізико-математичних, філософських та педагогічних наук, тематика яких так чи інакше торкається питання розвитку досліджень у галузі статистичної фізики в світовій науці. Аналіз дисертацій та праць науковців дав змогу, зокрема, встановити наукові центри України, в яких набули формування та розвитку дослідження в даній галузі, а саме – університети та наукові інститути Харкова, Києва, Львова, Одеси, Донецька, Дніпропетровська. Відзначимо дисертацію 2002 р. Н.П.Форостяної на здобуття наукового ступеня кандидата педагогічних наук “Історичні аспекти у вивченні молекулярної фізики в середніх загальноосвітніх навчальних закладах України” (спеціальність 13.00.02.- теорія та методика навчання фізики), у якій проведено комплексне дослідження розвитку молекулярної фізики в Україні у другій половині ХІХ ст. – на початку ХХ ст. як наукової дисципліни та її викладання в середній загальноосвітній та вищій школі [397]. Показано, що генезис та еволюція молекулярної фізики пов’язані, передусім, з діяльністю університетів і товариств, та обґрунтовано, що через історичний підхід активізується пізнавальна діяльність, тобто історичний аспект фізики виступає складовим компонентом сучасної методологічної науки. Корисною та ідейно близькою до розгляду методологічних проблем статистичної фізики виявилась також дисертація 2001 р. на здобуття наукового ступеня доктора педагогічних наук М.І.Садового “Теоретичні та методичні основи становлення та розвитку фундаментальних ідей дискретності та неперервності в курсі фізики загальноосвітньої школи” (спеціальність 13.00.02 – теорія і методика навчання фізики) [498]. У даній праці показано, що формування сучасного фізичного мислення має відбуватись на основі такої методичної системи, яка містить у собі узагальнені фізичні теорії та фундаментальні поняття науки. Внаслідок цього стане можливим створення у людини розуміння низки загальнонаукових понять, зокрема тих, що узагальнюють ймовірнісну ідею – властивостей і закономірностей об’єктів макро- та мікросвіту, співвідношення динамічних та статистичних законів природи, переходу від жорсткого детермінізму до ймовірнісно-статистичних уявлень, на основі яких формується відповідний ймовірнісний стиль мислення. Цікавою є також дисертація М.Н.Свиридонова 1974 р. на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук „Еволюція поняття необоротності у фізиці” [399].

Одним з цікавих джерел є наукове листування вчених. Так, аналіз наукового листування фізиків А.Йоффе та П.Еренфеста [400], між якими існували тісні творчі та дружні контакти, дав можливість вперше реконструювати життєвий і творчий шлях дружини П.Еренфеста – фізика і математика Т.О.Афанасьєвої-Еренфест, яка народилась у Києві і відома своїм внеском у розгляд питань незворотності процесів у природі та аксіоматичної побудови другого закону термодинаміки .

Джерельною базою слугували також проведені автором інтерв’ю та анкетування сучасних вчених, що працювали чи працюють у даній галузі. Це — академіки НАН України І.Р.Юхновський, С.В.Пелетминський, В.Г.Бар’яхтар, А.Г. Загородній, О.Г.Ситенко, Д.Я.Петрина; члени-кореспонденти НАН України В.П. Шелест, В.І.Фушич, М.Ф.Головко, І.М.Мриглод, К.М.Степанов, Е.Г.Петров;

доктори наук Г.М.Зинов'єв, Б.В.Струмінський, А.М.Федорченко, Ю.В.Слюсаренко; В.В.Красильников, О.Й.Соколовський, О.М.Тарасов, М.І.Шут, В.І.Герасименко, О.Л.Ребенко; кандидати наук О.Л.Іванків, О.В.Пацаган. За допомогою узагальнених результатів було встановлено сучасний стан розвитку проблеми, з'ясовано місце статистичної фізики в системі наук та її значення для побудови наукової картини світу, виявлено центри досліджень із статистичної фізики в Україні, ідентифіковано неформальні творчі колективи, керовані академіком НАН України І.Р.Юхновським та академіком НАН України С.В.Пелетмінським, з науковими школами в галузі статистичної фізики. З'ясовано характерні риси, стиль та методи даних наукових шкіл, реконструйовано їх персональний склад, внесок у статистичну фізику, подано творчі портрети лідерів шкіл.

На основі використаної джерельної бази було здійснено порівняльний аналіз усіх фактів та виокремлені ті з них, які є переконливими та об'єктивними, узагальнено наукові результати вітчизняних науковців та показано місце їх праць у світовому контексті.

## ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1

1. Внаслідок опрацювання історіографії та джерельної бази дослідження було зроблено висновок, що, незважаючи на широке коло висвітлених питань, на сьогодні не існує комплексного дослідження становлення статистичної фізики в Україні, яке б містило у собі її передісторію, а також розглядало ці дослідження в Україні як органічну складову розвитку світової науки.

2. Доведено, що фундаментальна роль статистичної фізики в системі наук, а також те, що в цій галузі вченими України одержано ряд вагомих результатів, які не знайшли належного відображення в історико-науковій літературі, визначає безумовну актуальність історико-наукового дослідження становлення даної галузі фізики в Україні. Саме таке дослідження і проводиться вперше в дисертаційній роботі.

## РОЗДІЛ 2

### АНАЛІЗ ПРЕДМЕТУ, ЗАДАЧ ТА МЕТОДОЛОГІЇ СТАТИСТИЧНОЇ ФІЗИКИ

#### 2.1. Предмет та задачі статистичної фізики

Сучасна статистична фізика є самостійним розділом теоретичної фізики, у якому вивчаються специфічні закономірності макроскопічних систем, що складаються з дуже великого, практично незліченного числа однакових частинок ( атомів, молекул, електронів, фотонів, квазічастинок), виходячи з властивостей цих частинок та взаємодії між ними. Такими системами, зокрема, є макроскопічні тіла, гази, кристали. Саме велика кількість частинок обумовлює появу нових закономірностей поведінки таких систем — статистичних законів, яким притаманний ймовірнісний характер. Статистичні закони не можуть бути зведені до динамічних законів, оскільки стають незмістовними при переході до систем з малою кількістю частинок. Як критерій кількості частинок правомірно вибрати число Авогадро ( $N_A = 6.022 \cdot 10^{23}$ ), тому що саме тоді, коли розглядається система з кількістю частинок, які містяться в одному молі чи частках моля речовини, вже починають виявлятися її макроскопічні властивості, які можна безпосередньо спостерігати та кількісно виміряти. Характерна особливість статистичних закономірностей виявляється в тому, що їх поведінка не залежить від конкретних початкових умов. Зокрема, відомим є такий експериментальний факт: система, в якій відсутні зовнішні впливи, з часом прямує до стану термодинамічної рівноваги.

Для розв'язку задач статистичної фізики як теорії багаточастинкових систем використовуються методи теорії ймовірностей та опис елементів системи в рамках гамільтонова формалізму в  $6N$ -мірному фазовому просторі. Тому важливими поняттями статистичної фізики є ймовірність, фазовий простір, функція розподілу ймовірностей, інтеграл станів, статистична вага.

Роль статистичної фізики не обмежується розвитком власного формалізму та розглядом конкретних застосувань. Досліджуючи колективні властивості систем, які не залежать від специфікації частинок, статистична фізика пов'язує між собою різні галузі природознавства та слугує провідником ідей між ними, що в свою чергу, сприяє прогресу самої статистичної фізики як науки. Так, ідея про спонтанне порушення симетрії, яка виникла спочатку у фізиці твердого тіла та оформилась у статистичній фізиці в концепцію квазісередніх, послужила основою для формулювання теорії, що об'єднала електромагнітні та слабкі взаємодії у фізиці елементарних частинок. Розгляд лазерної генерації, хімічної реакції Белоусова-Жаботинського та ряду інших процесів у макроскопічних системах з постійним потоком енергії привів до створення нової наукової дисципліни — синергетики, яка вивчає явище

самоорганізації у фізичних, хімічних та інших системах. Зазначимо, що така роль статистичної фізики в інтеграції науки є особливо важливою у зв'язку із загальною тенденцією до вузької спеціалізації природничонаукових дисциплін.

Головна задача статистичної фізики полягає у визначенні макроскопічних характеристик системи через властивості частинок та взаємодій між ними, тобто за допомогою цієї теорії можна досліджувати співвідношення між мікроскопічним та макроскопічним рівнями опису дійсності. Виявляється, такий зв'язок можливо встановити, оскільки теорія вимагає обчислення у даний момент часу не точних, а середніх значень параметрів. Термодинамічні ж співвідношення зберігаються при цьому як точні, але для даних середніх величин. Саме тому відомий бельгійський фізик Р.Балеску образно назвав статистичну фізику „механікою перенесення” («transfer mechanics») за аналогією з „транспортною РНК” («transfer RNA») у молекулярній біології, роль якої полягає у перенесенні інформації з мікроскопічного на макроскопічний рівень.

Серед всіх розділів теоретичної фізики статистична фізика посідає одне з важливих місць, оскільки вона вивчає макроскопічні тіла, які оточують людину. Проте на відміну від інших розділів фізики, які також вивчають макроскопічні тіла (термодинаміка, механіка, електродинаміка суцільних середовищ), вона є мікроскопічною теорією, яка встановлює зв'язок між спостережуваними термодинамічними характеристиками фізичних тіл та законами руху атомів і молекул. Тому такий великий діапазон має шкала температур і явищ, при описі яких застосовуються закони статистичної фізики — від гелієвих температур до високотемпературної плазми. Методи статистичної фізики використовуються в молекулярній фізиці, фізиці твердого тіла, ядерній фізиці, радіофізиці, астрофізиці, оптиці, біофізиці, техніці при описі агрегатних станів, фазових переходів, плазми, електропровідності, теплоємності, флуктуації, електронів в металах, електролітів, макромолекул, важких ядер. В останні роки коло застосувань статистичної фізики розширюється, формуючи важливий для сучасної фізичної картини світу синергетичний підхід.

Знайти точний розв'язок рівнянь руху для систем багатьох частинок, взагалі кажучи, неможливо, оскільки всі необхідні для їх розв'язку початкові значення координат та імпульсів атомів невідомі. Статистична фізика вирішує цю проблему, розглядаючи всі можливі стани, у яких може перебувати система, та визначаючи ймовірність реалізації кожного

стану. Розраховуючи за цими станами середнє від фізичної величини з деякою ваговою функцією, можна одержати певну макроскопічну картину. „В той час як „звичайна” механіка не може знайти точний розв’язок навіть проблеми трьох тіл, статистична механіка, використовуючи перевагу великого числа  $N$  ступенів вільності, намагається формулювати точні асимптотичні результати при  $N$ , що прямує до нескінченності», — писав Р.Балеску [401, с.1178].

Статистична механіка виходить із припущення, що кожен визначений макроскопічний стан (який характеризується невеликим числом макроскопічних динамічних величин) може бути реалізований надзвичайно великим числом мікроскопічних конфігурацій у фазовому просторі. При цьому макроскопічна величина  $G$ , що є функцією координат  $(x, y, z)$  у тривимірному фізичному просторі  $G(x, y, z)$ , може бути подана як результат усереднення відповідних динамічних функцій координат фазового простору  $g(p, q)$ . Так, Л.Больцман розглядав макроскопічні величини як середнє за нескінченним проміжком часу від відповідних мікроскопічних величин, аргументуючи це тим, що вимірювання макроскопічної величини завжди вимагає кінцевого інтервалу часу:

Інша задача — обчислення середнього значення мікроскопічної динамічної величини за траєкторією — обумовила розвиток нового напрямку динаміки — ергодичної теорії, яка вивчає загальну природу і стійкість траєкторій динамічної системи.

У 30-ті роки ХХ століття група математиків, у числі яких були Дж. фон Нейман, Г.Біркгоф і Е.Хопф, вивчаючи різні типи гідродинамічних потоків у фазовому просторі, наштовхнулися на проблему стійкості траєкторій динамічних систем. Використовуючи введене Лебегом поняття скінченної області фазового простору як розширення поняття об’єму  $V$  деякої області фазового простору  $\gamma$ , яке виявилось надзвичайно плідним для подальших досліджень у галузі ергодичної теорії, а також статистичної механіки, вони одержали такий вираз:

$$V(\gamma) = \int_{\gamma} dp_1 \dots dp_N dq_1 \dots dq_N.$$

Міра  $\mu$  скінченної області  $\gamma$  фазового простору  $\Gamma$  визначається за допомогою певної невід’ємної функції  $f(p, q) \geq 0$  у такий спосіб:

$$\mu(\gamma) = \int_{\gamma} d\mu = \int_{\gamma} f(p, q) dp dq$$

за умови, що міра усього фазового  $\Gamma$ -простору  $\mu(\Gamma)$  нормована на одиницю:

$$\mu(\Gamma) = \int d\mu = \int f(p,q) dp dq = 1.$$

Концепція міри є не менш важливою й у теорії ймовірностей, оскільки динамічну мікроскопічну величину  $g$  можна інтерпретувати як випадкову змінну. Тоді замість однієї мікроскопічної системи розглядається нескінченна множина тотожних копій цієї системи, що розрізняються за конфігураціями і швидкостями. У такий спосіб ураховується кожна уявлювана комбінація конфігурацій і швидкостей, а безліч таких систем називається ансамблем. При цьому кожній точці фазового простору відповідає одна система, що характеризується конкретними значеннями конфігурацій і швидкостей. Щільність розподілу точок, що характеризують  $f(p,q)$  (це збігається зі значенням міри, введеної дещо в іншому контексті), інтерпретується як густина ймовірності знаходження системи в даній точці фазового простору, а міра області у фазовому просторі — як ймовірність перебування системи в даній області.

Згідно з ергодичною теорією, для певного класу динамічних систем усереднення за часом може бути замінене на статистичне усереднення за ансамблем, однорідно розподіленим на енергетичній поверхні. У такому випадку динамічна задача обчислення середнього значення величини  $g$  за траєкторією окремої системи, що практично була нерозв'язною, замінюється набагато простішою задачею обчислення середнього значення цієї ж величини на енергетичній поверхні.

У цьому випадку макроскопічна динамічна величина визначається як середнє значення змінної  $G$ , що відповідає даному розподілу ймовірності:

$$G = \int g d\mu = \int f(p,q)g(p,q)dpdq .$$

Дана формула, що постулює зв'язок між макроскопічними величинами  $G(x,y,z;t)$  і відповідними мікроскопічними величинами  $g(p,q;t)$ , містить у собі немеханічний, статистичний елемент — вибір функції розподілу  $f(p,q)$ . Її вибирають так, щоб якнайповніше врахувати всю доступну інформацію про систему, тобто щоб значення обчислених середніх макроскопічних величин  $G$  збігалися зі значенням відповідних макроскопічних характеристик системи, одержаних в експерименті. Правильно вибрана функція розподілу  $f(p,q)$  повністю визначає стан макроскопічної системи в даний момент часу. Цей стан задається тепер нефіксованою точкою  $(p, q)$  у фазовому просторі, але кожна точка фазового простору в даний момент  $t$  являє собою можливий стан системи з певною "вагою", що відповідає значенню функції розподілу  $f(p,q)$  у цій самій точці. Після того, як вибір функції  $f(p,q)$  зроблено, подальша еволюція розподілу строго визначається законами гамільтонової механіки. Саме у такий спосіб здійснюється контакт між статистичною механікою і реальністю.

Завдяки ергодичній теорії вдалося показати надзвичайно складну поведінку динамічних систем. Виявилось, що окрема динамічна система протягом своєї еволюції виявляє численні особливості, що традиційно розглядалися як виключно статистичні. Разом з цим багато важливих

властивостей термодинамічних систем можна пояснити, тільки якщо розглядати їх як властивості дуже великої динамічної системи.

Слід зазначити, що хоч ергодична проблема являє собою класичне питання, яке традиційно зв'язувалось з питанням обґрунтування статистичної механіки від часу її зародження, проте сучасний розвиток ергодичної теорії все більше відокремлює її від статистичної механіки. Сьогодні вважається, що ергодична гіпотеза не є ані необхідною, ані достатньою для обґрунтування статистичної механіки, яке може полягати в тому, щоб розглядати середнє за ансамблем як початкове визначення макроскопічних динамічних функцій, а уявлення про ансамбль — як постулат.

Зв'язок статистичної механіки і термодинаміки можна здійснити шляхом побудови спеціального термодинамічного процесу, що дозволяє обчислювати деяку функцію  $A(T, V, N)$  (яка має формальні властивості термодинамічної вільної енергії) через статистичну суму  $Z = \int e^{-\beta H(p, q)} dp dq$  у вигляді  $A = -k T \ln Z$ .

Вільна енергія  $A(T, V, N)$  є термодинамічним потенціалом, знаючи який, можна обчислити всі інші термодинамічні функції. Очевидно, що статистична сума  $Z$  відіграє найважливішу роль у рівноважній статистичній термодинаміці, оскільки вона містить у собі всю інформацію про термодинамічні властивості рівноважної системи.

Макроскопічне спостереження надає інформацію щодо невеликого числа макроскопічних характеристик системи (таких, як густина, температура тощо), з якими можуть бути сумісні механічні початкові умови величезного числа мікросистем. У цьому полягає реалістичність статистичних ансамблів: задаючи всі дані, відомі про досліджувану макроскопічну систему, можна побудувати ансамбль систем однакової природи, але з різними конфігурацією і швидкостями частинок у нульовий момент часу. При цьому слід враховувати кожен можливу комбінацію конфігурацій і швидкостей, і кожній комбінації має задаватися деяка "вага"  $\mu$ , така, щоб обчислені за формулою

$$G = \int g d\mu = \int g(p, q) f(p, q) dp dq$$

макроскопічні величини  $G$  збігалися зі значеннями, одержаними експериментально. Після цього вивчається еволюція вихідного ансамблю, тобто досліджується, як розподіляється число мікроскопічних систем за різними конфігураціями і швидкостями у будь-який момент часу, відмінний від початкового. Основним рівнянням при цьому є рівняння Ліувілля. Такого роду передбачення надзвичайно точно підтверджуються експериментально, тому саме цей факт слугує обґрунтуванням методів статистичної механіки.

Слід зазначити, якщо на першому етапі побудови статистичної механіки процеси на мікроскопічному рівні описувалися законами класичної механіки, то після створення квантової механіки для цього



стали застосовувати її закони. Формалізм статистичної механіки не залежить від прийнятого способу опису на молекулярному рівні — квантового чи класичного. Статистичні методи з точки зору обчислення ймовірностей є однаковими незалежно від прийнятої моделі будови речовини. Так, рівноважні системи мають стабільні середні параметри, тому функції розподілу залежать від інтегралів руху, зокрема від повної енергії системи. У класичній механіці ця енергія визначається функцією Гамільтона, яка є функцією координат та імпульсів, а в квантовій механіці вона є дискретним набором власних значень, що впливають з рівняння Шредінгера для розглядуваної системи.

Такі фундаментальні побудови, як три рівноважні ансамблі статистичної механіки — мікроканонічний (для адіабатних систем частинок), канонічний (для рівноважних термодинамічних підсистем, які входять у більшу загальну систему (термостат), слабо зв'язані з нею і містять у собі сталу кількість складових частинок) і великий канонічний (для змінюваної кількості частинок при взаємодії системи з навколишнім середовищем), а також еквівалентність цих ансамблів сьогодні строго обґрунтовані як для класичної, так і для квантової статистичної механіки, виняток становить тільки область фазових переходів. Цей факт відображає фундаментальну структурну єдність статистичної механіки: системи, досліджувані статистичною механікою, належать до класу систем, описуваних динамікою Гамільтона.

## 2.2. Аналіз підходів до визначення статистичної фізики як предметної галузі науки

Розглядаючи сучасне трактування та розуміння предмету статистичної фізики, слід зазначити, що було проаналізовано більше ніж 150 енциклопедичних та монографічних видань і знайдено 22 визначення поняття „статистична фізика”. Виявилось, що вони суттєво розрізняються як за глибиною тлумачення предмету дослідження, так і за відображенням принципового для цієї галузі взаємозв'язку між мікрорівнем та макрорівнем опису дійсності.

Так, означення Д.М.Зубарева та С.В.Тябликова [270,с.72] передбачає розгляд у статистичній фізиці систем з величезною кількістю частинок, у визначеннях Л.П.Питаєвського, [271,т.4,с.665], Ю.Л.Климонтовича [402,с.18], Л.Д.Ландау і Є.М.Ліфшиця [403,с.13], Ф.Куні [404,с.6] предмет статистичної фізики зведено до макроскопічних тіл.

При цьому Л.П.Питаєвський та Ю.Л.Климонтович розглядають як еквівалентні поняття „макроскопічне тіло” та „система, що складається з величезного числа однакових частинок”, в той час як друге поняття вочевидь не вичерпується тільки макроскопічними тілами.

Означення Р.Балеску [405,т.1,с.13] розширює предмет статистичної фізики до всіх макроскопічних явищ, водночас звужуючи поняття „частинка” лише до атомів і молекул. Таке ж трактування поняття „частинка” дають Т.Хілл [406,с.9], А.Ісіхара [407,с.8], К.Хуанг [408,с.157], К.Хір [409,с.215], Л.Д.Ландау та Є.М.Ліфшиць [403,с.13], О.Г.Ситенко [410,с.442].

Детальний опис структури розглядуваної системи в більшості означень взагалі відсутній. Тільки Ю.Л.Климонтович [402,с.18] та Л.В.Радущкевич [411,с.5] вважають число частинок в системі „величезним”, якщо за порядком величини воно зрівнюється з числом молекул в одному молі речовини — числом Авогадро. Саме тоді починають виявлятися такі властивості, які піддаються безпосередньому спостереженню та кількісному виміру (це тлумачення макроскопічності явища дається також в означенні Я.І.Френкеля ).

У більшості означень (Л.П.Питаєвський [271,Т.4,с.665], О.Г.Ситенко [410, с.442], Р.Балеску [401, с.1178; 405,т.1.,с.13], Т.Хілл [406,с.9], М.О.Леонтович [412, с.163], Я.І.Френкель [413, с.5], К.Хуанг [408, с.157], Я.П.Терлецький [414, с.7], Ю.Б.Румер та М.Ш.Ривкін [415, с.11], В.Г.Левич [416, с.12—13]) авторами підкреслюється така глибинна властивість статистичної фізики, як виведення макроскопічних властивостей системи

через властивості мікрочастинок та взаємодій між ними. Проте в низці означень, наприклад Д.М.Зубарева та С.В.Тябликова [270, с.72], Ю.Л.Климонтовича [402,с.18], Л.В.Радушкевича [411,с.5] акцент на цьому принциповому моменті не робиться.

Той фундаментальний факт, що статистичний закон є особливим типом законів, які не зводяться до динамічних законів, відображено в не багатьох означеннях, наприклад Л.Д.Ландау і Є.М.Ліфшиць [403, с.13], К.Хір [409, с.219], Ф.Куні [404, с.6], тому ці означення видаються більш загальними.

З нашої точки зору, адекватним за загальним характером введення предмету дослідження статистичної фізики, а також за відображенням специфічної ролі статистичної фізики як теорії, яка здійснює зв'язок між мікроявищами та макроявищами, є, наприклад, означення Р.Балеску: "Статистична механіка – це механіка великих ансамблів, які складаються з відносно простих систем (таких, як молекули в газі, атоми в кристалі, фотони в лазерному пучку, зірки в Галактиці, автомобілі на дорозі, люди в соціальній групі). Головна мета цієї науки полягає в тому, щоб зрозуміти поведінку ансамблю в цілому на основі поведінки систем, які його складають" [405,т.1,с.13].

При аналізі даних означень нами було з'ясовано, що часто авторами без додаткових обговорень використовуються як синоніми такі терміни: „статистична фізика”, „статистична механіка”, „кінетична теорія матерії”. Проте вказує на це лише М.О.Леонтович [412,с.163].

Аналіз даних означень показує також, що спроба розділити явища на нерівноважні процеси та рівноважні стани іноді призводить до термінологічних розбіжностей. Так, деякі автори (К.Хуанг [408,с.157], Дж.Уленбек і Дж.Форд [417, с.13], В.Г.Левич [416, с.12—13] пропонують називати статистичною механікою (або статистичною термодинамікою) розділ фізики, який вивчає тільки рівноважні властивості динамічних систем і не розглядає процес наближення до стану рівноваги.

Теорію процесів в даних системах пропонується називати фізичною кінетикою (М.О.Леонтович [412, с.163]). У той же час інші автори хронологічно більш пізніх робіт стверджують, що статистична фізика складається з двох розділів — рівноважної та нерівноважної статистичної фізики (Я.П.Терлецький, [414, с.7]). У першому розділі розглядаються ймовірності та середні, які не залежать від часу, а в другому — які залежать від часу. Нам таке тлумачення видається більш прийнятним через спільність підходу до явищ природи.

Структура статистичної фізики залежно від явища, яке розглядається, а також від вибраної моделі будови речовини може бути відображена у спосіб, наведений у Таблиці 1 (Я.П.Терлецький [414,с.8]):

Таблиця 1.

Тип процесів	Класична модель	Квантова модель
Рівноважні стани	Класична статистика рівноважних станів (статистична механіка)	Квантова статистика рівноважних станів (квантова статистика)
Нерівноважні процеси	Класична теорія нерівноважних процесів (класична кінетика)	Квантова теорія нерівноважних процесів (квантова кінетика)

### 2.3. Методологія статистичної фізики

Створення статистичної механіки у ХІХ століття на основі уявлення про те, що існують принаймні два рівні опису природи — макроскопічний і мікроскопічний, призвело до глибоких і всеосяжних змін усієї схеми фізичного пояснення явищ та самого методу наукового мислення. Один із фундаторів статистичної фізики Дж.Гіббс зазначав: „Незважаючи на те, що своїм виникненням статистична механіка завдячує дослідженням у галузі термодинаміки, вона, вочевидь, значною мірою заслуговує на незалежний розвиток завдяки як елегантності та простоті своїх принципів, так і новим результатам, висвітленню старих істин у галузях, зовсім далеких від термодинаміки” [418, с.13].

Американський фізик Ч.Кіттель писав, що „статистичній фізиці притаманні витонченість філософського аспекту її основних положень, вишуканість математичного апарату, який використовується при розв’язанні її задач, а також широта застосувань у астрофізиці, біології, фізиці твердого тіла та ядерній фізиці, техніці зв’язку та математиці” [419, с.7]

Відкриття Л.Больцманом статистичної природи другого закону термодинаміки вплинуло на розвиток не тільки термодинаміки, а й багатьох розділів фізики. Воно по-новому висвітлило старі проблеми і поставило низку фундаментальних методологічних питань — про співвідношення між динамічними і статистичними закономірностями, про статистичний детермінізм, про напрям часу.

До досліджень Больцмана в фізиці був відомий тільки один тип закономірностей — динамічні закономірності, що, наприклад, становили фундамент причинно-наслідкових зв’язків у механіці. До кінця ХVІІІ століття математичний апарат механіки було остаточно розроблено. Виходячи з основних диференціальних рівнянь руху, записаних згідно з законами Ньютона, і знаючи діючі на дану систему сили і початкові значення координат і швидкостей тіл, що утворюють цю систему, можна було однозначно визначити траєкторію руху, швидкості і положення тіл, які рухаються у просторі у кожний наперед заданий момент часу. Таким чином, закони динаміки дали змогу вченим передбачати з великим ступенем точності поведінку механічних систем у майбутньому. Це, а також розвиток теорії електромагнітного поля Максвелла, стало основою для сприйняття динамічних законів як абсолютно універсальних.

Першим, хто сформулював загальний філософський "принцип механічної причинності" для Всесвіту, став П.Лаплас. "Якби розум у будь

-який момент часу знав усі сили, що діють у природі, і відносно розташування її складових частин, якби він, крім того, був такий великий, щоб міг проаналізувати ці дані, то описав би єдиною формулою рухи найбільших тіл у Всесвіті і найлегшого атому; для нього не було б нічого неясного, і майбутнє, як і минуле, було б у нього перед очима... Крива, яку описує молекула повітря або пари, керується настільки ж строго і визначено, як і планетні орбіти: між ними лише та різниця, що ми не уявляємо цього", — писав він [420, с.364—365].

Така точка зору була названа лапласівським (або механічним) детермінізмом. Узагальнюючи, ми приходимо на основі цього до поняття динамічної закономірності: при заданих зовнішніх впливах початковий стан однозначно визначає майбутню поведінку системи. Завдяки дослідженням Больцмана така точка зору потребувала перегляду. Дійсно, оскільки в цей період механічний детермінізм уявлявся єдиним видом причинного зв'язку, то передбачалося, що якби було можливо простежити за траєкторією кожної молекули, то майбутній стан молекулярної системи можна було б визначити, не використовуючи метод теорії ймовірностей. Вважалося також можливим зведення статистичних закономірностей до динамічних. Одна з причин такого уявлення полягала в тому, що самі статистичні закономірності були вперше отримані на основі динамічних рівнянь механіки, яким і приписувалася первинна роль.

Оскільки відповідно до лапласівського детермінізму будь-яка наступна подія була передбачена попередньою подією, то випадкова подія вважалася такою, що виникає за рахунок недостатності знання початкових умов і тому не має об'єктивного характеру. Сучасна наука розглядає динамічні і статистичні закономірності як невіддільні і водночас такі, що не зводяться одна до одної. Динамічні закономірності відображають ті випадки причинного зв'язку, коли основну роль у поведінці даної системи відіграють початкові умови, а статистичні закономірності – ті випадки, які своїми основними рисами обумовлені масовим характером явищ або процесів. Особливість статистичної закономірності полягає в тому, що, відображаючи об'єктивно існуючі зв'язки великої сукупності випадкових подій, вона начебто відводить на другий план індивідуальні властивості окремих інгредієнтів.

З часом виявилось, що ймовірнісна концепція, яка виникла при створенні статистичної механіки, є фундаментальною і покладена у саму природу речей. Це стало зрозумілим після створення квантової механіки, закони якої передбачають принципову статистичність у поведінці мікрооб'єктів. Таким чином, створення статистичної механіки склало

базу формування ймовірнісного стилю мислення у природознавстві в цілому. З цього приводу відомий математик Н.Вінер навіть стверджував, що “саме Гіббсу, а не Альберту Ейнштейну, Вернеру Гейзенбергу чи Максу Планку ми повинні приписати першу велику революцію в фізиці ХХ сторіччя” [421,с.26].

Крім того, статистична фізика запровадила у фізику розуміння того, що необоротні процеси відіграють фундаментальну і конструктивну роль у фізичному світі. Поняття необоротності процесів у природі виявляється ключовим для нерівноважної статистичної механіки. Оскільки елементарна симетрія руху окремих частинок може порушуватись у великих ансамблях частинок, тому властивості ансамблю в цілому можуть якісно повністю відрізнитись від властивостей індивідуальних компонент. Яскравим прикладом цього є неінваріантність обернення (інверсії) часу, завдяки чому існує його виділений напрям (від минулого до майбутнього). Це виявляється не тільки рухом стрілки годинника, а й безпосередньо у подіях, таких як синтез і розпад, народження і смерть. Тому відповідь на питання, чому ізольована макроскопічна система поводить ся суттєво необоротним чином, прямуючи до рівноваги, тоді як мікроскопічні рівняння руху є оборотними, дотепер залишається одним з центральних у статистичній фізиці.

Слід зазначити, що хоч до середини ХІХ ст. теорія ймовірностей уже була досить розвинута, проте до робіт Больцмана проблеми, які виникали в ній, не виходили за рамки математичних і не торкались фізики. Той факт, що статистичні закономірності є по суті окремим типом законів природи, був усвідомлений Р.Клаузіусом та Дж.Максвеллом і остаточно утверджений Л.Больцманом після статистичної інтерпретації другого закону термодинаміки.

Сучасна наука розглядає динамічні і статистичні закономірності як невіддільні і водночас такі, що не зводяться одна до одної. Динамічні закономірності відображають ті випадки причинного зв'язку, коли основну роль у поведінці системи відіграють початкові умови, а статистичні закономірності — випадки, обумовлені переважно масовим характером явищ або процесів. Таким чином, до формулювання статистичних законів було вперше введено об'єктивну випадковість, при цьому необхідності, які покладено в її основу, подаються розподілом ймовірностей. При цьому загальний принцип причинності набув нового розвитку і збагатився новим змістом.

Дослідженням макроскопічних тіл займаються також і інші розділи фізики — термодинаміка, механіка та електродинаміка суцільних середовищ, гідродинаміка. Однак при розв'язанні конкретних задач методами цих дисциплін у відповідні рівняння завжди входять

невідомі параметри чи функції, які характеризують тіло. Наприклад, для розв'язання задач гідродинаміки необхідно знати рівняння стану рідини чи газу, теплоємність рідини, її коефіцієнт в'язкості тощо. Всі ці залежності і параметри можна, зрозуміло, визначити експериментально, тому методи цих наук називаються феноменологічними. Статистична ж фізика дає змогу принаймні визначити всі ці величини, якщо відомі сили взаємодії між атомами і молекулами, тобто використовує відомості про мікроскопічну будову тіл. Отже, це і є мікроскопічна теорія.

Рівноважний стан системи залежить тільки від таких загальних характеристик початкового стану, як кількість частинок, їх сумарна енергія тощо. Кількість молекул в об'ємі буде змінюватись внаслідок їх руху і носити характер хаотичних коливань відносно деякого середнього значення — флуктуацій. Існування флуктуації має принципове значення, оскільки безпосередньо доводить статистичний характер термодинамічних закономірностей. Крім того, флуктуації відіграють роль шуму, який заважає фізичним вимірюванням та обмежує їх точність. Так, важливою є теорія флуктуації для статистичної радіофізики, яка охоплює дослідження статистичних закономірностей у коливальних і хвильових процесах (когерентність, взаємодія сигналів та шумів у нелінійних системах). Практичне значення статистичної радіофізики пов'язано з тим, що в системах радіолокації та радіозв'язку флуктуації мають важливе значення, а часто стають визначальними на всіх ділянках передачі інформації. Електричні флуктуації, обумовлені фундаментальними фізичними процесами в речовині, є причиною виникнення флуктуацій напруги та токів у радіопередавачах та радіоприймачах, обмежуючи сприйнятливості перших і гранично допустимі монохроматичність та стабільність частоти других. Флуктуаційні явища при поширенні радіохвиль в атмосфері пов'язані з тим, що показник заломлення тропосфери й іоносфери зазнає нерегулярних змін.

Статистичний підхід при розгляді взаємодії світла з речовиною привів до формування статистичної оптики. Статистичний характер світлових полів зумовлений тим, що джерела світла зазвичай складаються з великої кількості хаотично розташованих у просторі і не пов'язаних між собою випромінювачів (атоми, молекули), випромінювання яких має ймовірнісний характер. Флуктуації виникають і при поширенні світла в середовищі в процесі його розсіяння на хаотично розташованих частинках, або таких частинках, що рухаються хаотично. Одним із розділів статистичної оптики є теорія когерентності, яка вивчає кореляцію станів світлового поля в різних точках простору-часу. Важливими ці методи стали також для нових типів квантових джерел — лазерів та квантових підсилювачів, випромінювання яких має суттєво статистичні властивості, а також у застосуванні до задач голографії та нелінійної оптики.

Флуктуації також можна спостерігати при розсіянні світла: випадкові зміни густини середовища внаслідок флуктуацій викликають випадкові зміни за об'ємом показника заломлення. Отже, в однорідному середовищі або навіть у хімічно чистій речовині розсіяння світла може відбуватися так само, як і у мутному середовищі (критична опалесценція). Це явище особливо помітно в бінарних розчинах при температурі, близькій до критичної температури розчинення — так зване критичне розсіяння світла. Флуктуації тиску виявляються при броунівському русі змулених у рідині чи газі малих частинок під впливом некомпенсованих ударів молекул оточуючого середовища. У квантовій теорії поля важливими є флуктуації вакууму, пов'язані з можливістю або народження, або поглинання віртуальних частинок, що призводить також до зміни значень маси і заряду частинок. З'язок між флуктуаціями системи у рівноважному стані та її нерівноважними властивостями дається флуктуаційно-дисипативною теоремою, яка була встановлена Х.Калленом та Т.Уелтоном у США у 1951 р.

Суттєво те, що зміна стану системи з багатьох частинок має складний характер. Тому з часом точки, які відповідають певному стану, розподіляться на поверхні сталої енергії рівномірно (ергодична гіпотеза). Найважливіший результат статистичної фізики полягає у встановленні статистичного змісту термодинамічних величин, що дає можливість вивести закони термодинаміки з основних уявлень статистичної фізики та обчислити термодинамічні величини для конкретних систем. Наприклад, внутрішня енергія ототожнюється з середньою енергією системи, а перший закон термодинаміки набуває очевидного пояснення як вираз закону збереження енергії при русі частинок, з яких складається тіло. Особливе значення має статистичне



тлумачення ентропії як величини, що пропорційна статистичній вазі макроскопічного стану, тобто його ймовірності. При цьому рівноважний стан має максимальну статистичну вагу, тобто виявляється найбільш ймовірним станом. Процес переходу від нерівноважного стану до рівноважного є процесом переходу від менш ймовірних до більш ймовірних станів, тому ентропія замкненої системи може тільки зростати.

Застосування статистичної фізики до вивчення тих чи інших властивостей конкретних систем математично зводиться до наближеного обчислення статистичної суми з урахуванням специфічних властивостей конкретної системи, які іноді спрощують розрахунки. У випадку газів такою обставиною є їх розрідженість, через що взаємодія між молекулами відіграє незначну роль. У першому наближенні можна взагалі вважати газ ідеальним, а взаємодію враховувати як поправку. У квантовій статистиці при низьких температурах виявляються зовсім різними властивості газів, які утворені частинками з цілим спіном (бозонів) та з напівцілим спіном (ферміонів). Наближене обчислення статистичної суми для кристалічних твердих тіл базується на малих амплітуді коливань атомів кристала біля їх положень рівноваги.

У рідині взаємодію між молекулами і амплітуди їх коливань не можна вважати малими. Тому обчислення термодинамічних функцій рідини вимагає додаткових припущень для розрахунків. Ситуація спрощується при температурах, низьких порівняно з температурою виродження рідини. За цих умов тепловий рух у рідині можна розглядати як появу в ній елементарних збуджень – квазічастинок, які мають енергію, імпульс, і підпорядковані певному закону дисперсії. При низьких температурах ці частинки утворюють ідеальний газ, це дозволяє обчислити термодинамічні функції речовин. З теоретичної точки зору до таких рідин відносять, крім рідких при нормальному тиску аж до абсолютного нуля температур  $^4\text{He}$  та  $^3\text{He}$ , також електронну рідину в металах, систему спінів в феромагнетиках тощо.

Суттєво те, що статистична фізика дозволяє обчислити константи хімічної рівноваги, які визначають рівноважні концентрації реагуючих речовин. Термодинамічна теорія задає умову рівноваги у вигляді рівності нулю деякої комбінації хімічних потенціалів цих речовин. При цьому у вирази для хімічних потенціалів входить стала Планка, тому квантові ефекти є значущими навіть для реакцій між класичними газами.

При розв'язанні задач квантової статистичної фізики важливе значення мають методи квантової теорії поля, які були введені у статистичну фізику порівняно недавно. Головну роль у цих методах відіграє функція Гріна макроскопічної системи, аналогічна функції Гріна в квантовій теорії поля. Полюси цієї функції визначають закон дисперсії квазічастинок.

Важливу, але ще далеко від завершення галузь статистичної фізики становить статистична теорія фазових переходів. У ряді випадків при неперервній зміні зовнішніх параметрів (тиск, температура) властивості системи можуть при деяких значеннях параметрів змінюватися стрибкоподібно, тобто відбувається фазовий перехід. Фазові переходи поділяються на фазові переходи I роду, коли виділяється теплота переходу і стрибкоподібно змінюється об'єм (наприклад, плавлення) і II роду, коли теплота переходу і стрибок об'єму відсутні (наприклад, перехід рідкого гелію в надплинний стан). Найскладніше досліджувати властивості речовини поблизу лінії фазового переходу II роду, де аномально зростають флуктуації, і розглянуті вище наближені методи статистичної фізики стають незастосовними. Тому важливу роль відіграє розгляд моделей, у яких є переходи та існує точний розв'язок (наприклад, модель Ізінга).

Суттєвим розділом статистичної фізики є статистична фізика нерівноважних процесів. Вона вивчає процеси у системах, які прямують до рівноваги, а також в системах, де нерівноважний стан підтримується зовнішніми умовами. Наприклад, тіло, в якому задано градієнт температури, тече електричний струм, або яке знаходиться у змінному магнітному полі. При цьому, якщо відхилення від рівноважного стану незначне, то система описується кінетичними коефіцієнтами (коефіцієнти в'язкості, теплопровідності та дифузії, електропровідність металів). Ці параметри задовольняють принцип симетрії кінетичних коефіцієнтів, який виражає симетрію рівнянь механіки відносно зміни знаку часу (згідно з теоремою Онсагера). Інша ситуація — опис значно нерівноважних станів, коли кінетичні коефіцієнти обчислюються за допомогою кінетичного рівняння — інтегро-диференціального рівняння для одностатистичної функції розподілу. У

квантовому випадку замість одночасткової функції розподілу використовують одночасткову матрицю густини, або статистичний оператор. Таке замкнене рівняння неможливо отримати у загальному випадку, при його виведенні необхідно використовувати малі параметри кожної конкретної задачі. Найважливішим прикладом є кінетичне рівняння Больцмана, яке описує встановлення рівноваги в газі за рахунок співударів між молекулами. Особливу проблему становить виведення кінетичного рівняння для плазми. Через повільність зменшення кулонівських сил з відстанню навіть при парних зіткненнях суттєвим є вплив інших частинок.

Нерівноважні стани твердих тіл і квантових рідин можна розглядати при низьких температурах як нерівноважні стани відповідних квазічастинок. Тому кінетичні процеси в таких системах описуються кінетичними рівняннями для квазічастинок, які враховують зіткнення між ними та процеси їх взаємного перетворення.

“Розвиток статистичної механіки нерозривно пов’язаний з розробкою її апарату, заснованого на теорії ймовірностей, функціональному аналізі, алгебрі та інших розділах математики. Однак статистична механіка не тільки запозичує математичні методи, а й здійснює вплив на їх подальший розвиток, тому постановка ряду принципів проблем ініціює появу нових розділів математики, як це було, наприклад, з ергодичною гіпотезою. Характерною ознакою сучасної статистичної механіки є органічне злиття аналітичних та числових методів, серед яких, в першу чергу, слід згадати метод Монте-Карло та метод молекулярної динаміки. Підкреслимо, що “машинні експерименти” дають змогу не тільки моделювати реальну фізичну ситуацію, а й перевіряти межі застосовності наближень, які використовуються у аналітичному дослідженні. Тут спостерігається зворотний зв’язок, і ідеї та методи статистичної механіки знаходять застосування при побудові статистики обчислювальних середовищ”, — писали М.М.Боголюбов (мол.), Б.І. Садовников та А.С.Шумовський про методологію статистичної фізики [422, с.5].

Важливе місце в статистичній механіці відводиться використанню гамільтонова підходу. Гамільтоніан, заданий на просторі станів, повністю визначає рівняння руху системи, тому вибір гамільтоніанів для конкретних систем частинок, що взаємодіють, є важливим завданням рівноважної статистичної механіки. Разом з тим, строге дослідження модельної задачі в рамках рівноважної статистичної механіки наштовхується на складні математичні проблеми. Тому точні розв’язки модельних задач надзвичайно рідкісні та здійснюють значний вплив на розвиток статистичної механіки в цілому. Як приклад можна навести результат у пласкій моделі Ізінга, результат М.М.Боголюбова в модельних задачах теорії надплинності та надпровідності, результат Бакстера у восьмивершинній моделі. Так, точний розв’язок М.М.Боголюбова в теорії надпровідності не тільки відіграв значну роль у розумінні механізмів цього фундаментального фізичного явища, а й дозволив сформулювати концепцію квазісередніх, яка встановила глибокий зв’язок між спонтанним порушенням симетрії у макроскопічній системі та умовами стійкості стану термодинамічної рівноваги Він привів до формулювання фундаментальної теореми про виникнення дальності при спонтанному порушенні симетрії, здійснив стимулюючий вплив на розвиток алгебраїчного підходу в статистичній механіці.

Важлива риса рівноважної статистичної механіки полягає в тому, що модельні гамільтоніани та відповідні простори станів будуються для систем зі скінченною кількістю частинок та у скінченному об’ємі, тоді як рівноважні значення динамічних величин (термодинамічні величини) визначаються у так званій термодинамічній границі. Таким чином, у статистичній фізиці існує надзвичайно складна з математичної точки зору проблема встановлення асимптотичних співвідношень, які визначають точні значення термодинамічних величин при необмеженому зростанні ступенів вільності у системі. На існування цієї проблеми вказується вже в основоположних роботах Дж.Гіббса, а також у знаменитому огляді П. та Т.Еренфестів. Перше систематичне її дослідження здійснили Ч.Дарвін та Р.Фаулер, а встановлення її зв’язку з граничними теоремами теорії ймовірностей — О.Я.Хінчин. Перше доведення існування термодинамічної границі було дано М.М.Боголюбовим та Б.І.Хацетом, а також Л.Ван Ховом. Значення проблеми термодинамічного граничного переходу для різних застосувань статистичної механіки, перш за все, для теорії фазових переходів, вперше показали та Ч. Лі та Т.Янг. Подальший розвиток цієї проблеми сформувався у самостійний напрям сучасної математичної

фізики.

Реалізація ідеї послідовного виведення кінетичних рівнянь у нерівноважній статистичній фізиці безпосередньо з системи рівнянь руху, які задають механічну природу системи, належить М.М.Боголюбову як для класичного, так і для квантового випадку. При цьому відправним пунктом теорії є рівняння Ліувілля, а необхідність процесу наближення до рівноваги впливає з функціональної гіпотези Д.Гільберта про перехід від кінетичного рівняння до гідродинамічних рівнянь внаслідок “скороченого” опису. Проблема термодинамічного граничного переходу тут також значуща, перш за все через дослідження процесу еволюції до рівноваги.

## 2.4. Статистична фізика та наукова картина світу

Основоположним для розуміння функціонування науки, в тому числі статистичної фізики, є поняття наукової картини світу. Наукова картина світу - це цілісна система уявлень про світ, його загальні властивості та закономірності, яка формується в результаті узагальнення та синтезу основних наукових понять і принципів та включає уявлення про Природу і суспільство [63,с.396; 423,с.201,479; 424,с.459; 425,с.355]. Це особлива теоретична форма знання, яка представляє предмет дослідження науки відповідно певному етапу її історичного розвитку. Загальнокультурний зміст наукової картини світу відображає проблему пошуку нових шляхів цивілізаційного розвитку, а також світоглядних ідей. При цьому наукова картина світу, на відміну від теорії, віддзеркалює об'єкт, не зосереджуючись на процесі одержання знання, а тому тісно пов'язана зі світоглядом, виступаючи одним з дієвих способів його формування.

Структура наукової картини світу включає два головних рівня – концептуальний (поняттєвий) та чуттєво-образний. Перший рівень репрезентовано філософськими категоріями, принципами, законами, загальнонауковими поняттями та фундаментальними поняттями окремих наук. Другий рівень-це рівень наочних уявлень про Природу, які забезпечують розуміння наукової картини світу широким колом вчених, незалежно від спеціалізації.

По мірі прогресу науки комплекс уявлень про світ модифікується, при цьому виявляється головна відмінність саме наукової картини світу від ненаукових (наприклад, релігійної), яка полягає в тому, що вона будується на основі фундаментальної наукової теорії або теорій, які слугують її обґрунтуванням. Так, картина світу у XVII- 50-х рр. XIX ст. формувалась на базі класичної механіки (механічна картина світу), картина світу початку 60-х рр. XIX ст. - початку XX ст. на базі ідеї поля Фарадея та електродинаміки Максвелла (електродинамічна картина світу), картина світу початку XX ст.-60-х рр. XX – на основі спеціальної та загальної теорій відносності і квантової механіки (квантово-релятивістська картина світу), а сучасна фізична картина світу – на основі ідеї кваркової будови речовини, квантової теорії поля, теорії елементарних частинок, квантової хромодинаміки, теорії Великого вибуху, інфляційної теорії, синергетики (кварково-лептонна картина світу). Саме з цим пов'язано виділення основних історичних типів фізичної картини світу -механічної, електродинамічної, квантово-релятивістської, кварково-лептонної.

Сучасний етап пов'язаний з формуванням постнекласичної науки, яка характеризується посиленням процесу міждисциплінарного синтезу знань на основі принципу глобального еволюціонізму. Особливістю нової науковою картини світу, яка формується зараз (еволюційна) є не прагнення до уніфікації всіх областей знань, а єдність у різноманітності дисциплінарних підходів. Керівними в цьому процесі стануть ідеї самоорганізації, глобального еволюціонізму (80-ті рр. XX ст.), методології систем, які історично розвиваються. Необхідно зазначити, що в ході розвитку науки фізична картина світу поступово втрачала свою наочність, тим не менш прогресуюче віддалення фізичної картини світу від світу відчуттів сприяє водночас її більшому наближенню до реальної дійсності.

Вивчення глибинного «мікрорівня» внутрішніх процесів наукових революцій полягає у розгляді категоріальної структури теоретичного знання. Філософські категорії виявляються тими найбільш загальними поняттями, які відображають найсуттєвіші зв'язки та відношення реальності, визначають фундаментальні рівні розуміння людиною Природи та суспільства. Основні категоріальні структури ряду теорій класичної фізики було вивчено А.Т.Артюхом, а сучасною фізики - В.Л. Храмовою [54,55]. Так, синергетика спирається на ідеї необоротності історії системи та самоорганізації шляхом самодії, а також на категорії якісного стрибка, розвитку як самоорганізації, хаосу, порядку, частини, цілого.

На відміну від динамічної схеми закономірностей класичної фізики, закони квантової фізики мають статистичний характер, описують не саму фізичну реальність, а лише ймовірність її появи. Як писав А.Ейнштейн, «тільки ця фундаментальна зміна, внесена у фізику квантовою теорією, зробила можливим адекватне пояснення подій, без сумніву дискретного та статистичного характеру, тієї галузі явищ, у якій виявляють своє існування елементарні кванти речовини та випромінювання» [426, т.4, с.539].

Категоріальна переорієнтація пізнавальних засобів у період становлення нової теорії супроводжується, як правило, ідейною боротьбою. Так, А.Ейнштейном було висунуто ідею квантово-хвильового дуалізму. Однак у подальшому для нього виявилась неприйнятною необхідність звернення до ймовірносної ідеї при осмисленні спостережуваних закономірностей руху мікрооб'єктів. Поступово в процесі утвердження квантової механіки стало зрозумілим, що динамічна схема закономірностей Природи змінюється статистичними законами природознавства, характер яких визначатиме філософські й культурні основи епохи. Уявлення про ймовірнісний характер законів природи, закладене в процесі створення статистичної фізики та квантової механіки, привело до того, що жорстко детерміністський стиль мислення у наукових дослідженнях та суспільній думці почав замінятися ймовірносним, а далі - нелінійним стилем, який став основоположним елементом сучасної наукової картини світу та набув принципового світоглядного значення. «Статистичний характер  $\Psi$ -функції (а таким чином, і законів Природи...) буде визначати стиль законів по меншій мірі протягом декількох століть...Мріяти про повернення до минулого, до класичного стилю Ньютона-Максвелла...- це здається мені безнадійним, неправильним, ознакою поганого смаку...», - писав В.Паулі [160].

Взагалі оскільки наукова картина світу є квінтесенцією наукових знань, то опанування її базовими уявленнями, ідеями і теоріями є необхідною умовою формування світогляду сучасної людини, свідомого та адекватного сприйняття нею законів оточуючого світу. Однак ситуація ускладнюється тим, що нині зміна ідей, знань та технологій відбувається набагато швидше, ніж зміна поколінь людей. Оскільки опанування етапів формування сучасної наукової картини світу складає предмет історико-наукових досліджень, то вони стають в цьому контексті на фоні зниження за останні роки інтересу до вивчення фундаментальних наук в світі особливо актуальними, дозволяючи побачити весь комплекс взаємопов'язаних наукових напрямів та місце в ньому конкретних розробок; сформуванню свідомого розуміння та гуманістичне ставлення до процесів і явищ оточуючого світу,

створення нової техніки та її використання.

Акцентуючи увагу на ключовому значенні поняття наукової картини світу, ми пропонуємо віднести до фундаментальних ідей та теорій природознавства ті з них, з появою яких пов'язана зміна наукових картин світу та оновлення категоріальних структур наукового знання. До таких ідей відносяться, наприклад, ідея корпускулярно-хвильового дуалізму, ідея необоротної історії системи, ідея розвитку як самоорганізації шляхом самодії, ідея еволюції; до теорій - класична механіка, квантова механіка, статистична механіка, спеціальна та загальна теорії відносності, квантова хромодинаміка, космологія. Статистична фізика є фундаментальною теорією сучасного природознавства, а ймовірнісна ідея, яка лежить у її основі – фундаментальною ідеєю сучасного природознавства. Тому вони виступають суттєвими факторами побудови сучасної наукової картини світу. Значення статистичної фізики полягає також у тому, що на її основі наприкінці ХХ ст. сформувались така міждисциплінарна галузь науки, як синергетика (започаткована Г.Хакеном та І.Р.Пригожиним) – наука про самоорганізацію складних систем, про перетворення хаосу у порядок. Основними її ідеями, на основі яких у формується тенденція до глобального еволюційного синтезу у природознавстві, є рівноправність процесів еволюції та деградації; творча роль хаосу на шляху до порядку незалежно від характеру систем; розвиток через нестійкість системи; нелінійний характер еволюції більшості складних систем, наявність декількох варіантів їх розвитку; закономірність виникнення структур зростаючої складності; включення випадковості у механізм еволюції. До ключових результатів світового рівня тут слід віднести дослідження динамічного хаосу, які бурхливо розвиваються в останні десятиріччя, та набувають застосувань в багатьох розділах науки і техніки – в теорії хімічних реакцій, у радіотехніці, у фізиці плазми, прискорювачів заряджених частинок тощо.

“Парадокс часу не був осмислений до другої половини ХХ століття, - писав І.Р. Пригожин.- До цього часу закони динаміки вже давно сприймалися як вираз ідеалу об'єктивного знання. Нині ситуація інша. Ми знаємо, що необоротність...грає суттєву, конструктивну роль. Ми діти стріли часу, еволюції, але ніяк не її творці” [ 427].

Нам видається цікавим і доречним навести також висловлювання сучасних українських вчених, відомих працями з методів та застосувань статистичної фізики. Так, розмірковуючи про місце статистичної фізики в системі наук, академік НАН України С.В.Пелетмінський зазначає: “Ця галузь науки стосується всіх наук — фізики твердого тіла, фізики плазми, теорії фазових переходів тощо. Все це статистична фізика. Тому, якщо треба пояснити фізичні явища. то без статистичної фізики тут не обійтись, її методи та ідеї відіграють ключову, визначальну роль для розуміння практично всіх явищ природи, вона дає також філософські узагальнення. Сьогодні деякі проблеми вже вирішені, проте років тридцять тому проблеми необоротності були багато в чому філософськими проблемами. Наприклад, проблеми, пов'язані з Великим вибухом, також мають загально філософський зміст — чи був він взагалі, що під ним розуміти, що було до нього? Серед ключових результатів, які визначають сьогодні формування ймовірнісного стилю мислення в природознавстві, слід назвати вивчення бозе-конденсації в ідеальних газах,

дослідження надплинності у критичному стані (super-solid), коли кристал переходить у стан, дуже близький до стану надплинної рідини. Ці праці зараз цікавлять як теоретиків, так і експериментаторів, оскільки такі надплинні квантові кристали ще не знайдені. Але фізики вірять, що цей стан має існувати, і дослідження стимулюють розвиток теоретичних уявлень про таку фазу речовини. Останнім часом між собою межують статистична фізика і квантова теорія поля, розвивається теорія фазових переходів у статистичній фізиці, релятивістська статистична фізика. Методи статистичної фізики застосовують у космології, теорії Великого вибуху, моделях елементарних частинок. Широко використовуються такі нові поняття, як струни та брани, до яких застосовують теорію фазових переходів, які відбувалися протягом тисячних часток секунди від початку виникнення Всесвіту. Експериментального матеріалу, на жаль, обмаль, є тільки непрямі підтвердження, пов'язані з мікрохвильовим випромінюванням. Ці дослідження значно дискусійні, але є сучасними, цікавими та стимулюють розвиток більш “земних проблем”.\*

Говорячи про місце статистичної фізики в сучасній науковій картині світу та про її роль на сучасному етапі побудови фізичних уявлень, академік НАН України В.Г.Бар'яхтар підкреслював, що її застосовують при вирішенні різних проблем фізичної науки: “Ефекти, які ми досліджували у магнетизмі, збагатили конкретно, нетривіально фізику взаємодії багатьох частинок. Результати зі зростання ентропії мають загально філософське значення у фізиці. Сьогодні проблема переходу від упорядкованого руху до хаосу є однією з центральних, викликає надзвичайну зацікавленість бозе-ейнштейнівська конденсація. Зростання ентропії — це шлях, за яким можна прослідкувати, як з механіки, здавалося б, оборотної, виникають необоротні явища, як виникає стріла часу”. \*

Представник львівської школи статистичної фізики І.М.Мриглюд писав про роль статистичної фізики в науковій картині світу: ”Статистична фізика є однією із ключових галузей сучасної теоретичної фізики, яка описує закономірності поведінки багаточастинкових систем у природі. В силу такого означення до переліку об'єктів її вивчення потрапляють практично усі різновиди матерії – від газів, плазми та простих рідин і до полімерів, скла, рідкокристалічних і міцелярних систем. Традиційне коло явищ, що описує ця наука охоплює сьогодні практично все, що відносилось раніше до хімічних та біологічних наук. Окрім того, в силу значної загальності розвинутих тут підходів і методів, в останні роки отримали бурхливий розвиток такі екзотичні напрямки статистичної фізики як фізика складних систем, економічна фізика, фізика комплексних мереж тощо, де слово фізика часто використовується лише для позначення методів і мови, які є притаманні більше саме статистичній фізиці. До екзотичних задач статистичної фізики відносяться нині також проблеми руху транспорту, польоту великої групи птахів чи плавання риб, особливостей формування громадської думки і таке інше. Уже один такий далеко неповний перелік показує, що методологія статистичної фізики та її математичний апарат мають велику пізнавальну силу і велике евристичне значення. Фактично в рамках цієї науки формується своєрідна наукова методологія пізнання світу, яка стає корисною при вирішенні багатьох проблем суспільства, навіть тих, які видаються цілком віддаленими від проблем фізики” \*.

Як зазначала відомий в Україні спеціаліст в галузі статистичної фізики О.В. Пацаган, “Методи статистичної фізики є невід’ємною складовою частиною методологічного апарату теоретичної фізики, який направлений на розкриття і розуміння основних законів і явищ навколишньої природи (як неживої, так і живої)”

.\*

Представник наукової школи статистичної фізики член-кореспондент НАНУ С.В.Пелетминського Ю.В.Слюсаренко писав, що “статистичну фізику часто називають “царицею наук”, відзначаючи її роль у формуванні наукового світогляду та методології наукових досліджень. Методи статистичної фізики застосовні (а часто і необхідні чи є єдино можливими) для опису не тільки різноманітних фізичних систем, які складаються з великого числа складових. Завдяки своїй універсальності вони використовуються у хімії, біології, матеріалознавстві. Зараз виникла нова галузь їх використання – економічна фізика” . \*

Ще один учень С.В.Пелетмінського О.М.Тарасов, відзначає, що ключові наукові результати останньої чверті ХХ ст., відзначені нобелівськими преміями з фізики, лежать саме в галузі статистичної фізики. Це, зокрема, роботи, присвячені експериментальному відкриттю у 1972 р. та наступному теоретичному поясненню основних властивостей низькотемпературних надплинних фаз рідкого  $^3\text{He}$  ( Нобелівські премії 1996 та 2003 р.); відкриття у 1980 р. та пояснення цілочислового квантового ефекту Холла (Нобелівська премія 1985 р.); відкриття у 1981 р. та пояснення дрібного квантового ефекту Холла (Нобелівська премія 1998 р.); відкриття високотемпературної надпровідності у 1986 р. (Нобелівська премія 1987 р.), що означало якісний прорив на шляху створення матеріалів, які є надпровідниками при кімнатній температурі (однак, на жаль, на сьогодні відсутня загальна точка зору на мікроскопічний механізм цього явища); експериментальне відкриття у 1995 р. явища бозе-ейнштейнівської конденсації передбаченого у 1925 р. А.Ейнштейном, в ультрахолодних розріджених квантових газах атомів у магнітних пастках (Нобелівська премія 2001 р.). Це відкриття привело до потоку теоретичних робіт з проблеми бозе-ейнштейнівської конденсації у квантових газах з атомів не тільки з цілочисловими (бозевськими), але й з напівцілими (ферміївськими) значеннями спінів. У 2003-2004 р. були одержані ферміївські конденсати з пар атомів-ферміонів (двоатомних квазімолекул) то виявлено надплинність. Ці дослідження є перспективними в плані пояснення поведінки таких складних ферміонних систем з сильною міжчастинковою взаємодією, як атомні ядра та нейтронні зорі, що проявляють властивість надплинності, а також механізму високотемпературної надпровідності. Тому, зазначає О.М.Тарасов, “статистична фізика займає одне з фундаментальних, центральних місць у теоретичній фізиці, дозволяючи описувати різноманітні явища та процеси у різних системах, які складаються з великого числа частинок, що взаємодіють (газоподібні та конденсовані середовища, які можуть знаходитись у різних агрегатних станах – рідкому та твердому). Методи статистичної фізики застосовуються також у фізиці плазми, в ядерній фізиці та астрофізиці в широких діапазонах зміни температур, густин та інших величин, що характеризують стан речовини. Таким чином, без статистичної фізики неможливо уявити собі сучасну наукову картину світу” \*.



Член-кореспондент НАН України М.Ф.Головко також підкреслює фундаментальне значення статистичної фізики нового міждисциплінарного синтезу у природознавстві:” Статистична фізика встановлює зв’язок між мікроскопічними та макроскопічними властивостями , дає відповідь на питання та причини еволюції та деградації систем. Методи, розвинуті статистичній фізиці, використовуються при моделюванні також економічних та суспільних процесів. Я би відмітив тенденцію до поєднання комп’ютерних та аналітичних методів у різних ділянках статистичної фізики, використання методів, що поєднують властивості системи на ”різних масштабах часу і простору” \*.

Професор В.В.Красильников також вважає, що „статистична фізика є одним з фундаментальних наріжних каменів в науковій картині світу. Але її не можна уявляти собі як дещо закінчене та непорушне. Вона постійно розвивається, поглиблює та уточнює наше уявлення про світ. Людство пізнає світ саме методами статистичної фізики”, — підкреслював він \*.

## ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2

1. Ключове значення статистичної фізики для формування нового міждисциплінарного синтезу та імовірнісного стилю мислення у природознавстві, її фундаментальна роль у науковій картині світу визначається тим, що дана теорія встановлює зв’язок між мікроскопічними та макроскопічними властивостями матерії, дає відповідь на питання та причини еволюції та деградації систем. В роботі ми пропонуємо віднести до фундаментальних ідей та теорій природознавства ті, з появою яких пов’язана зміна наукових картин світу та оновлення категоріальних структур наукового знання. До таких ідей належить, зокрема, ймовірнісна ідея розгляду законів природи, а до теорій – статистична фізика.

2. Роль статистичної фізики не обмежується розвитком власного формалізму та конкретних застосувань. Розглядаючи колективні властивості систем, які не залежать від специфікації частинок, вона пов’язує між собою різні галузі природознавства та здійснює перенесення ідей між ними. Методи, розвинуті у статистичній фізиці, використовуються при моделюванні хімічних, біологічних, економічних та суспільних процесів.

3. При дослідженні сучасного розуміння предмету статистичної фізики нами було проаналізовано більше ніж 150 енциклопедичних та монографічних видань і знайдено 22 визначення поняття „статистична фізика”. Виявилось, що вони суттєво розрізняються як за глибиною тлумачення предмету дослідження, так і за

відображенням принципового для цієї галузі взаємозв'язку між мікро- та макрорівнем опису дійсності

4. При формуванні статистичної фізики було вперше введено об'єктивну випадковість, при цьому необхідності, які покладено у її основу, представляються розподілом ймовірностей. Таким чином, загальний принцип причинності набув нового розвитку і збагатився новим змістом. Сучасна наука розглядає динамічні і статистичні закономірності як невіддільні і водночас такі, що не зводяться одна до одної. Динамічні закономірності відображають такі випадки причинного зв'язку, за яких основну роль у поведінці системи відіграють початкові умови, а статистичні закономірності — випадки, що обумовлені переважно колективним характером явищ або процесів.

### РОЗДІЛ 3 ПЕРЕДІСТОРІЯ СТАТИСТИЧНОЇ ФІЗИКИ В УКРАЇНІ (XIX—20-ті рр. XX ст.)

3.1. Стан статистичної фізики на початок 30-х рр. XX ст. (світовий контекст)

3.1.1. Зародження статистичної механіки у 50-х рр. XIX ст. (А. Крьюніг, Р.Клаузіус, Дж.Максвелл)

Статистична фізика виникла в середині XIX ст. завдяки перш за все працям з молекулярної фізики, а також спробам вчених пояснити на механічній основі закони термодинаміки (насамперед другий закон). Підґрунтя для розуміння необхідності запровадження ймовірнісних уявлень при формулюванні законів природи склало уявлення про те, що макроскопічні властивості, які спостерігаються в реальному досліді, обумовлені мікроскопічними процесами, що розвиваються на атомно-молекулярному рівні. Результатом синтезу молекулярно-кінетичних та термодинамічних уявлень в середині XIX– на початку XX ст. в працях Дж.Максвелла, Л.Больцмана та Дж.Гіббса, де було встановлено зв'язок між тепловою та механічною формами руху матерії, стало виникнення статистичної фізики як самостійного розділу науки.

Для розгляду процесу еволюції статистичної фізики можна запропонувати наступну періодизаційну схему:

Передісторія статистичної фізики

Виникнення атомістичних уявлень

(IV ст. до н.е. (Античність) – XVII ст.)

(Демокріт, Епікур, Лукрецій Кар, Г.Галілей, І.Ньютон)

Створення основ молекулярно-кінетичної теорії

(кінець XVII ст. – початок XIX ст.)

- Створення теоретичних засад молекулярно-кінетичної теорії (Д.Бернуллі, Л.Ейлер, М.Ломоносов)
- Створення експериментального підґрунтя молекулярно-кінетичної теорії (Р.Бойль, Е.Маріотт, Д.Дальтон, Ж.Гей-Люссак, А.Авогадро)

Формування термодинаміки як науки

(20–50-ті рр. XIX ст.)

(Н.Карно, Р.Майер, Дж.Джоуль, Г.Гельмгольц, Р.Клаузіус, В.Томсон )

)

Формування рівноважної статистичної фізики як синтез молекулярно-кінетичних та термодинамічних уявлень

(кінець 50-х рр. ХІХ ст. – 20-ті рр. ХХ ст.)

- Створення засад класичної рівноважної статистичної механіки (кінець 50-х рр. ХІХ ст. – початок ХХ ст.)

(А.Кр'юніг, Р.Клаузіус, Дж.Максвелл, Л.Больцман, Дж.Гіббс)

- Створення засад квантової рівноважної статистичної механіки (1900 – 1932)

(М.Планк, А.Ейнштейн, Ш.Бозе, Е.Фермі, П.Дірак, Дж. фон Нейман)

Створення нерівноважної статистичної фізики

(30–60-ті рр. ХХ ст.)

- Формування засад класичної нерівноважної статистичної фізики

(30-50-ті рр. ХХ ст.)

(В.Паулі, Л.Онсагер, М.М.Боголюбов, Л.Д.Ландау, І.Пригожин)

- Формування засад квантової нерівноважної статистичної фізики

(50-60-ті рр. ХХ ст.)

(Л. Ван Хов, Р.Кубо, М.М.Боголюбов)

Таким чином, передісторією статистичної фізики була молекулярно-кінетична теорія, в основу якої покладена ідея дискретності матерії або атомізму. Ця ідея, яка проходить через усю історію розвитку природничих наук, є одним з найдавніших уявлень, витoki якого сягають Античності. Існує припущення, що зародження ідеї атомістичної будови речовини започатковано астрономічними спостереженнями античних натурфілософів, їх уявленням про цілісність природи та прагнення віддзеркалити єдність будови та законів макро- і мікрокосмосу. Видатний фізик-теоретик Р.Фейнман вважав атомістичну ідею настільки змістовною, що достатньою для збереження у випадку гіпотетичної втрати всіх накоплених людством знань.

Відомості про припущення щодо перерваної будови матерії ми знаходимо у працях античних авторів Левкіппа, Демокріта, Лукреція Кара . У XVII—XVIII століттях, коли центральне місце в природознавстві посідала механіка, атомізм набув механістичного характеру: мікрочастинки розглядались як кулі, які рухаються по точних орбітах.

Нове розуміння атомістичної ідеї як наукової гіпотези склалося у період XVII — початку ХІХ століття завдяки працям П.Гассенді, Р. Декарта, Р.Бойля, Р.Гука, І.Ньютона, Д.Локка, Ф.Бекона, Х.Гюйгенса, І. Бернуллі, Д.Бернуллі, Л.Ейлера, М.Ломоносова, Р.Бошковича, Дж. Дальтона, А.Авогадро, в яких було сформовано молекулярно-кінетичну теорію.

Так, Д.Бернуллі у 1738 р. на основі корпускулярної теорії дав тлумачення закону Бойля—Маріотта, вказавши на його наближений характер та умови виконання [2]. Л.Ейлер у тому ж 1738 р. у своїй „Дисертації про вогонь” розвинув загальний методологічний підхід до тепла як до різновиду руху та поширив дію закону збереження кількості руху на теплові явища [428].

Систематичне пояснення корпускулярної гіпотези, починаючи з 1745 р., належить М.Ломоносову. Він обґрунтував на основі молекулярно-кінетичних уявлень такі явища, як плавлення, випаровування, теплопровідність, розширення тіл, необхідність існування абсолютного нуля [429, т.1].

Надзвичайно важливими для розвитку молекулярно-кінетичної теорії стали роботи Дж. Дальтона у 1801—1803 рр. з вивчення дифузії газів, що були покладені в основу закону незалежності тисків у газових сумішах. „Якщо будь-які два або більше змішані гази досягають рівноваги, то пружна дія кожного з них на стінку посудини чи на деяку рідину дорівнює такій дії, за якої був би присутній тільки цей газ, коли б він займав весь об’єм, за відсутності всіх інших газів», — писав він [430, с.67]. Даний закон Дж.Дальтон поширив на суміш газу з парою, довівши незалежність тиску водяної пари у повітрі та у пустоті. Він також встановив, що атоми одного й того ж хімічного елемента мають ідентичні властивості, дав визначення атомної ваги елемента як відношення маси одного атома елемента до маси одного атома водоводу.

У міру розвитку теорії деталізувались властивості і структура атома. Було введено поняття хімічного елемента (Р.Бойль, 1661), іону (С. Арреніус, 1887), атомної ваги (Дж.Дальтон, 1803) та валентності (А.Купер, Е.Франкленд, Ф.Кекуле, 60-ті роки ХІХ століття). Розвиток атомної теорії в хімії було започатковано доведенням у 1808 р. Ж.Гей-Люссаком закону кратних співвідношень для газів, які хімічно взаємодіють (виявилось, що об’єми таких газів можна подати простими співвідношеннями), а також формулюванням А.Авогадро у 1811 р. двох принципів: вся речовина складається з молекул, які утворені з атомів; у рівних об’ємах будь-яких газів при однакових умовах міститься однакова кількість молекул [431]. Зазначені дослідження Гей-Люссака і аналогічні виміри Джоуля у 1845 р. підтвердили незалежність внутрішньої енергії ідеальних газів від їх об’ємів. Це доводило, що діючі між молекулами сили надзвичайно малі.

У перші десятиліття ХІХ ст. потреби виробництва зумовили інтерес до інтенсивного вивчення теплових явищ, у зв’язку з чим з’явилася

велика кількість досліджень, що мали практичну спрямованість. Вони були пов'язані з вивченням властивостей газів і пари, процесів теплопровідності, теплового випромінювання та взаємозв'язку між теплотою та іншими явищами. Так, дослідження в галузі теплового розширення газів стимулювались недосконалістю конструкції барометра та необхідністю визначення об'ємного розширення газів для внесення поправок у його показання залежно від висоти. Вивчення даного питання було розпочато ще у XVI столітті К.Дребблем, а потім було продовжено в працях Г.Амонтона, П.Мушенбрека, Ла-Гіра, Ж.Делюка та Прістлі 1699—1702 рр. [432,433].

Значний внесок у цьому напрямі було зроблено у 1802 р. Ж.Гей-Люссаком. Вважаючи, що розширення газу є рівномірним, він одержав

коефіцієнт об'ємного розширення повітря, що дорівнював  $1/273$  град-1 за шкалою Цельсія, а також аналогічні результати для інших газів (закон Гей-Люссака) [434].

„Розширення газу не залежить від різних фізичних властивостей чи особливої природи цих тіл. Всі гази в цілому, наскільки я можу зробити висновок, при однаковому тиску розширюються від теплоти однаково”, — писав він [435,с.20]. У цьому ж році Дж.Дальтон незалежно від Гей-Люссака також провів серію досліджень, у яких одержав коефіцієнт об'ємного розширення  $0,00373$  град-1 та вперше висловив думку про те, що сам процес розширення не є рівномірним. Слід зазначити, що Ж. Шарль дійшов аналогічного висновку раніше, у 1787 р., але його дані не були опубліковані.

Роботи з вивчення теплових властивостей газів та їх теплоємностей продовжували Ж.Гей-Люссак, С.Пуассон, П.Дюлонг, Н.Клеман, Ш. Дезорм та інші вчені. У 1813 р. у досліджах Ф.Делароша та Ж.Берара було одержано перші достовірні дані теплоємностей водяної пари, повітря, кисню та інших газів, що знаходяться під постійним тиском [436]. Проте спроби визначити теплоємності газів при сталому об'ємі успіху не мали. Разом з тим ряд спостережень вказували на те, що теплоємності одного газу при сталих тиску та об'ємі мають бути різними. Так, Е.Дарвін в 1788 р. та М.Пітке в 1799 р. вказували на пониження температури повітря під час його розширення, Молле у 1803р. відзначав підвищення температури газу при його стисканні [437]. На різницю даних теплоємностей як для газів, так і для твердих і рідких тіл першим вказав Ж.Біо у 1816 р. [438, т. 4, с.275].

У 1807 р. дослід, проведений Ж.Гей-Люссаком, не підтвердив залежність теплоємності газу від об'єму, проте ним було експериментально показано різницю питомих теплоємностей газів при сталих об'ємі та тиску ( $C_p > C_v$ ) [439]. Ці дані нашоувхнули С.Пуассона у 1807 р та П.Лапласа у 1816 р. на дослідження зв'язку між явищем поширення звуку в газах і тепловими ефектами, які виникають при зміні його об'єму [440, с.364; 34]. Оскільки відомі на той час розрахунки 1686 р І.Ньютона значення швидкості звуку не збігались з експериментальними даними, то для їх узгодження Ж.Пуасон та П.Лаплас запропонували

ввести у вираз для швидкості звуку у повітрі коефіцієнт  $\gamma$ . Це дозволило знайти співвідношення  $C_p/C_v$  з формули  $V_{зв.екс.} = V_{зв.теор.}$

[441]. Воно було підтверджено експериментами Клемана і Дезорма у 1819 р., які одержали для повітря значення 1,357 (сучасне значення 1,41) [442], а також П.Дюлонга у 1829 р., який визначив  $C_p/C_v$  для різних газів. Він також одержав, що це співвідношення не є сталим для різних газів та вперше показав, що даний факт не пов'язаний з похибкою експерименту [443].

У 1819 р. Дюлонг та Пті розробили метод визначення різних речовин за часом охолодження тіл, на основі якого було встановлено загальний закон: добуток питомих теплоємностей хімічно простих речовин є сталим [444]. У 1830—1840 роках Ф.Нейман, В.Реньо та Г. Копп підтвердили цей закон та поширили його на хімічні сполуки.

Ключовим моментом для подальшого розвитку всієї фізичної науки стало формулювання у 1850—1851 рр. Р.Клаузіусом та В.Томсоном другого закону термодинаміки. Цей закон був результатом узагальнення численних дослідних фактів і дав поштовх формуванню термодинаміки як нової наукової феноменологічної дисципліни, предметом якої є процеси перетворення тепла в будь-які види руху та взаємодії або, навпаки, їх перетворення у тепло. Причому вже у 80-ті роки ХІХ століття стало зрозуміло, що обидва постулати термодинаміки виходять за рамки вчення про теплоту та є загальними законами природи.

Створення та становлення термодинаміки викликало відродження молекулярно-кінетичних уявлень. Так, на цій основі Дж.Джоуль вперше обрахував швидкість молекули водню, температуру абсолютного нуля та теплоємність деяких газів. У 1856 р. А.Крьюнігом була створена наочна модель газу як ідеально пружних куль, що не взаємодіють між собою і хаотично рухаються із сталою швидкістю, поки не зіткнуться одна з

одною чи зі стінкою посудини. Ця модель виявилась надзвичайно важливою та дозволила показати, що кінетична енергія поступального руху залежить від температури, а також пояснити явища дифузії, розчинення та теплопровідності [445]. А.Кр'оніг також вперше висловив ідею про необхідність застосування ймовірнісних методів розрахунку. „Шлях кожної молекули настільки неупорядкований, що обчислити його неможливо. Проте, використовуючи закони теорії ймовірностей, можна разом з тим замість цілковитого хаосу одержати повний порядок”, — писав він [446].

Надзвичайно важливий внесок у створення кінетичної теорії газів зробив Р.Клаузіус. У 1857 р. вийшла його праця "Про природу руху, що ми називаємо теплом", в якій він, на основі моделі „більярдних куль” Кр'оніга, доповненій введенням обертального та коливального рухів молекул, дав пояснення теплових процесів, зокрема теплопровідності і внутрішнього тертя, у газах, рідинах, твердих тілах. У ній чітко вказувалося, що тепла енергія є кінетичною енергією хаотичного руху молекул та обґрунтовувались закони Дальтона і Гей-Люссака. Р.Клаузіусу належить також заслуга введення поняття довжини вільного пробігу та нової функції стану тіла — дисгрегації як міри ступеня його дисперсії.

Закон збереження імпульсу вимагав, щоб тиск газу був пропорційний середній кінетичній енергії молекул з деяким універсальним коефіцієнтом пропорційності. Разом з тим, із закону Бойля—Маріотта випливало, що ця енергія пропорційна абсолютній температурі. Це положення виявилось фундаментальним, і має виключення у сучасній квантовій теорії тільки при дуже низьких температурах.

Крім того, дані оцінки швидкостей молекул у газах виявились неочікувано високими і на перший погляд були несумісними з фактом повільної взаємної дифузії газів та їх малою теплопровідністю. Прямі експериментальні виміри були здійснені тільки у 1920 р. О.Штерном. Однак у 1858 р. Р.Клаузіус показав, що в цих явищах головну роль відігравала не стільки швидкість молекул, скільки середня довжина вільного пробігу між двома зіткненнями. Числові значення цих середніх шляхів, які пояснили повільність дифузії, одержав у 1860 р. Дж. Максвелл у своїй знаменитій праці про розподіл молекул за швидкостями.

Розглянуті результати в галузі молекулярно-кінетичної теорії стали підґрунтям при подальшому застосуванні ймовірнісних уявлень для опису фізичних процесів і створення рівноважної статистичної механіки в працях Дж.Максвелла, Л.Больцмана та Дж.Гіббса (середина ХІХ—



початок ХХ століття), у яких було встановлено зв'язок між тепловою та механічною формами руху матерії.

Статистична фізика як самостійний розділ фізики виникла у другій половині ХІХ століття. Саме тоді у 1860 р. ідеї Р.Клаузіуса було розвинуто Дж.Максвеллом, з праці якого 1860 р. у розвитку кінетичної теорії починається новий етап, пов'язаний з систематичним застосуванням теорії ймовірностей [447].

У цій праці Дж.Максвелл одержав закон розподілу молекул газу за швидкостями (розподіл Максвелла). Тут він також вперше висловлює сумнів з правомірності застосування законів класичної механіки до опису руху атома і зазначає, що розглядає свою модель тільки як математичну аналогію реальності. „Слід бути обережними при перенесенні висновків, одержаних в експериментах з тілами, які складаються з величезної кількості частинок, на більш тонкі спостереження та експерименти, які могли б бути виконані, якщо б можна було сприймати окремі молекули», — писав він [448].

Дж.Максвелл вказував, що зіткнення молекул приводитимуть не просто до вирівнювання їх швидкостей, а навпаки, будуть сприяти встановленню деякого розподілу їх значень. Таким чином, Дж.Максвелл вперше було сформулював статистичний підхід, а саме, необхідність пошуку не швидкості окремої молекули, а кількості молекул із заданою швидкістю в даний момент. Суть запропонованого статистичного підходу полягала в тому, що даний закон неможливо звести до динаміки, він відображає лише статистичну впорядкованість, що виникає у системі з великою кількістю частинок. Термін „статистична механіка” також було введено Дж.Максвеллом, але пізніше, у 1878 р.

Вважаючи, що молекули взаємодіють за законом пружних куль, після зіткнення яких всі напрямки є рівноймовірними, і що компоненти швидкостей кожної молекули — незалежні випадкові змінні, Дж. Максвелл формулює закон розподілу газу за швидкостями:

### .3

На цій основі він вперше одержав довжину вільного пробігу  $l=1/447000$  дюйма, число зіткнень в 1 секунду  $n=8077200000$ , а також розвинув молекулярну теорію дифузії та показав незалежність коефіцієнта в'язкості від густини. Останній результат ним також було підтверджено експериментально. Зазначимо, що на основі висновків Максвелла в 1865 р. І.Лошмідт вперше обчислив „діаметри молекул” повітря на основі середніх довжин вільного пробігу як  $12 \cdot 10^{-8}$  см, а число молекул у молі — як  $10^{23}$ .

У 1866 р. Дж.Максвелл у праці „Динамічна теорія газів” [449] дав строге доведення свого закону розподілу швидкостей, виключивши попередню умову про незалежність компонент швидкості та розглядаючи молекули не як пружні кулі, а як точкові центри сил. Він також ввів гіпотезу про пропорційність сил відштовхування п'ятому ступеню відстані між центрами, що, проте, викликала серйозні заперечення.

Поступово почали також розглядатись молекули із внутрішніми ступенями вільності, для яких було встановлено узагальнений закон розподілу та виведено важливий наслідок — закон рівнорозподілу: середня кінетична енергія будь-якого ступеня вільності пропорційна абсолютній температурі, причому коефіцієнт пропорційності є універсальною сталою. Обчислення питомої теплоти багатоатомних газів на основі цього закону дало результати, які повністю відповідали досліду.

Слід зазначити, що кінетична теорія газів привнесла у фізику принципово нову точку зору ймовірнісного розгляду. Оскільки неможливе вивчення шляхів окремих молекул, то суттєвим стало обчислення середніх параметрів: середнього вільного пробігу, середнього числа ударів молекули в одиницю часу, розгляд тиску та температури як середніх значень для великої кількості молекул.

### 3.1.2. Формування рівноважної статистичної фізики як синтез молекулярно-кінетичних та термодинамічних уявлень (кінець XIX — 20-ті рр. XX ст.) (Дж. Максвелл, Л.Больцман, Дж.Гіббс)

Невдовзі дослідження Дж.Максвелла продовжив Л.Больцман. Завдяки чіткому формулюванню ймовірнісних понять та введенню постулату про молярну та молекулярну неупорядкованість газу, Л.Больцман у 1872 р. вивів формулу, що описує розподіл молекул газу в зовнішньому полі, зокрема, в полі сили тяжіння (розподіл Больцмана). Він також довів теорему про рівномірний розподіл кінетичної енергії за ступенями вільності, з'ясував ймовірнісний зміст ентропії та дав статистичне тлумачення другого закону термодинаміки.

Виявилось, що у випадку розподілу Больцмана густина газу зменшується з висотою, а його температура залишається сталою. Одержане кінетичне рівняння, що дозволило описувати нерівноважні стани газів, стало також одним з важливих досягнень вченого. Це рівняння давало зміну функції розподілу, яка характеризує кількість частинок в околі деякої точки фазового простору. Хоча Л.Больцман не одержав розв'язку свого рівняння в загальному випадку, проте він вивів надзвичайно важливий наслідок, який було названо спочатку мінімум-теоремою, а потім  $H$ -теоремою. На основі цієї теореми у 1877 р. Л.Больцману вдалося встановити кількісний закон, який інтерпретував другий закон термодинаміки в термінах теорії ймовірностей, а також провести аналіз межі застосування поняття ентропії [450].

При цьому виявилось, що знайдена ним величина  $H$  не може зростати під впливом руху атомів, а виявляє необоротний характер, з точністю до знака подібний поведінці термодинамічної ентропії. Мінімум  $H$ , як показав Больцман, відповідає розподілу Максвелла.

Особливість даної теореми полягає в тому, що з оборотного механічного рівняння впливало існування функції  $H$ , яка необоротно змінювалась з часом за рахунок зіткнень молекул, що також розраховувались за законами механіки, інваріантними відносно заміни  $t$  на  $-t$ . На цій основі Больцман показав неможливість повної оборотності молекулярного руху і одержав мікроскопічну інтерпретацію другого закону термодинаміки. «Вершиною життя Больцмана з 1877 р. стало доведення зв'язку між ентропією та ймовірністю стану, який все ясніше усвідомлювався — однієї з найбільш глибоких думок усієї фізики», — писав М.Лауе [38,с.117]. Числове значення сталої Больцмана в 1900 р обчислив М.Планк.

Ідея статистичної закономірності дозволила Л.Больцману показати, що енергія переходить з менш ймовірної форми в більш ймовірну і що якщо початковий розподіл енергії в тілах був менш ймовірним, то надалі ймовірність розподілу буде збільшуватися. Він вважав, що при повній хаотичності рухів молекул немає підстав припускати, що в одній частині тіла швидкості молекул будуть у середньому відрізнятися від швидкості молекул в іншій частині. Якщо з деякої причини такий стан виникає, то надалі через повну безладність молекулярних переміщень він зміниться на більш ймовірний рівномірний розподіл температури. Тому тепло і переходить від нагрітого тіла до холодного. Ймовірність цього кінцевого стану

системи більше, ніж початкового, або, що то ж саме, ентропія системи протягом цього необоротного процесу зростає. Проте, оскільки стан максимальної ймовірності близький до стану з дещо меншою ймовірністю, то завжди будуть зустрічатись невеликі відхилення від нього — флуктуації. Це був принципово новий результат ймовірнісного розгляду явищ природи.

Таким чином, у працях Л.Больцмана було сформовано точку зору, згідно з якою статистичні закономірності є об'єктивними законами, яким підпорядковуються молекулярні процеси на відміну від законів для окремих частинок, та показано, що другий закон термодинаміки має ймовірнісний характер. Таке розуміння суттєво відрізнялось від поглядів Максвелла і Клаузіуса, які розглядали статистику як метод розрахунку середніх величин. Больцман же трактував статистичні закономірності як новий вид об'єктивного причинного зв'язку, при якому розподіл енергії прямує до найбільш ймовірного.

У подальшому це призвело до необхідності пошуку зв'язку статистичних законів з динамічними законами, поставило проблему обґрунтування статистичного детермінізму та направленості часу. Причому важливо, якщо на ранній стадії розвитку молекулярно-кінетичної теорії використання статистики розглядалось лише як засіб подолання обмежених людських можливостей, то після Больцмана така точка зору виявила свою обмеженість. Стало зрозумілим, що статистичні закономірності принципово неможливо звести до динамічних законів і що вони відповідають тим випадкам причинного зв'язку, які обумовлені колективним характером процесів. Ці закономірності охоплюють більш широке коло явищ, а необхідності, які лежать в їх основі, подають розподіл ймовірностей. Таким чином, до формулювання законів природи було вперше введено об'єктивну випадковість. Тим самим принцип детермінізму не тільки не зазнав поразки, а й суттєво розширився і збагатився новим змістом.

Однак спочатку роботи Больцмана не привернули уваги вчених. У той час ідея про можливість вивести другий закон термодинаміки із законів механіки ще не втратила своїх прихильників, і сучасникам Больцмана здавалася незвичною думка про те, що цей, один з найбільш загальних законів природи, має ймовірнісну природу. Такого погляду дотримувались В.Міхельсон, Г.Гельмгольц.

З часом теорію Больцмана було піддано критиці. Особливо різко проти неї виступали послідовники Е.Маха, які взагалі не погоджувались з існуванням молекул. Тільки у ХХ столітті, після створення А.Ейнштейном та М.Смолуховським теорії броунівського руху, ідея про статистичний характер другого закону термодинаміки одержала визнання. Експериментальна перевірка закону розподілу Максвелла—Больцмана була здійснена у 1932 р. О.Штерном.

Інший підхід до побудови статистичної фізики розглядався американським фізиком Дж.Гіббсом — сучасником Больцмана. Ще у 1862 р. Р.Клаузіус вперше поставив питання про можливі сфери застосування термодинаміки та запропонував використати її для опису хімічних процесів. Принциповими на цьому шляху стали дослідження Дж.Гіббса, в яких статистична механіка вперше розглядалася як самостійна наука і одержала фундаментальне обґрунтування, застосовне для довільних, а не тільки для газоподібних систем. Сьогодні розподіл Гіббса є принципом, який відіграє таку саму роль у статистичній фізиці, яку відіграють

рівняння Ньютона в класичній механіці або рівняння Максвелла в електродинаміці. Тому значення для фізичної науки праці Гіббса "Основні принципи статистичної механіки" [422], що вийшла в 1902 році, часто порівнюють зі значенням "Трактату" Максвелла з електродинаміки.

У цій роботі Дж.Гіббс розглядав феноменологічний метод термодинаміки як перше наближення при вивченні фізичних і хімічних процесів. „Закони термодинаміки неважко одержати з принципів статистичної механіки, які вони не цілком виражають, а слугують чимось на кшталт сліпого провідника у пошуках цих принципів”, — писав Дж.Гіббс [451, т.2, с.9].

Він розглядає у  $6N$ -мірному просторі рух консервативної системи з  $N$  частинок, яка описується узагальненими координатами та імпульсами. Далі Гіббс вводить ансамбль однаково розподілених за різними фазами механічних систем, кожен з яких подано точкою у  $6N$ -мірному фазовому просторі, а рух усього ансамблю описується рівнянням неперервності для рідини, що не стискається, згідно з теоремою Ліувілля.

Термодинамічна система, яка розглядається, уявляється таким ансамблем. Для неї ставиться завдання знайти в будь-який момент часу, як повне число систем, розподілене за конфігураціями та швидкостями, якщо в деякий момент їх розподіл відомий. При цьому основним є рівняння, яке описує швидкість зміни числа систем, замкнених усередині певних малих меж координат та швидкостей.

У праці Дж.Гіббса в трьох еквівалентних формулюваннях доводиться теорема 1838 р. Ж.Ліувілля про збереження фазового об'єму при зміні консервативної динамічної системи з часом: як збереження фазового об'єму, фазової густини та ймовірності фази. На цій основі ним виведено основне рівняння статистичної механіки:

яке в умовах статистичної рівноваги має вигляд:

де  $D$  — фазова густина. Це рівняння вперше було оприлюднено у 1884 р., а надруковано в 1885 р. [447].

У загальному випадку ця проблема надзвичайно складна, тому Гіббсом було розглянуто тільки випадок статистичної рівноваги. Розподіл систем, які входять в ансамбль, за динамічними станами є реальною системою в тому сенсі, що середнє за ансамблем від деякої функції  $G(p, q)$  динамічного стану системи збігається зі значенням відповідної термодинамічної функції  $G_{\text{спост}}$ , яка визначається експериментально. Результат цього спостереження — це середнє за часом  $G(p, q)$ :

Побудоване рівняння Гіббс назвав принципом збереження фазової густини та сформулював його так: ”Для ансамблю механічних систем, тотожних за своєю природою, які перебувають під дією сил, що визначаються тотожними законами, але неперервно розподілені за фазами, фазова густина є сталою у часі для змінних фаз рухомої системи за умови, що сили системи є або функції тільки її координат, або залежать ще й від часу” [418, с.23].

Залежно від способу фіксації макроскопічного стану систем ансамблю Гіббс розрізняє макроскопічний статистичний ансамбль — ансамбль ізольованих систем, в якому задається енергія системи, її зовнішні параметри (об’єм, зовнішні поля) та кількість частинок в ній; канонічний статистичний ансамбль — ансамбль систем, які перебувають у термостаті з фіксованою кількістю частинок; та великий канонічний статистичний ансамбль — ансамбль систем в загальному термостаті з нефіксованою кількістю частинок.

Дослідження властивостей канонічного ансамблю дозволило Дж. Гіббсу показати аналогію статистичних та відповідних термодинамічних рівнянь. Це стало можливим завдяки збігу середніх за ансамблем значень різних величин з їх значеннями, які одержані з рівнянь феноменологічної термодинаміки. Таким чином, даний результат став підтвердженням адекватності формалізму канонічного розподілу термодинамічним методам дослідження. При цьому було досягнуто більшу порівняно з Максвеллом та Больцманом простоту у формулюванні принципів статистичної механіки. Зокрема, більш загального визначення набуло поняття ентропії. Воно виявилось справедливим для будь-якого числа ступенів вільності, на відміну від больцманівського, яке справедливе лише в нескінченній границі.

Цитуючи Дж.Гіббса, можна сказати, що він точно визначив величини та строго довів „положення, які мають силу для будь-якого числа ступенів вільності і які при достатньо великому числі ступенів вільності будуть сприйматися людиною як однакові з величинами і положеннями емпіричної термодинаміки” [418,с.168].

Розподіл Гіббса дозволив найбільш загальним чином зв'язати статистику з термодинамікою і тим самим завершити молекулярно-кінетичне обґрунтування цієї феноменологічної науки, розпочате Больцманом. При цьому виявились деякі вади класичної статистичної фізики, наприклад, неможливість створення послідовної теорії теплового випромінювання, пояснення парадокса Гіббса, вирішення питання про значення ентропії (третє начало термодинаміки). Це вдалося подолати лише на наступному етапі розвитку статистичної фізики, пов'язаному з появою квантової механіки.

Водночас з розробкою фундаментальних питань кінетичної теорії газів та статистичної фізики розвивались застосування цієї теорії. Це, насамперед, праці Й.Ван дер Ваальса, який в 1873 р. запропонував рівняння стану реальних газів і рідин, а також дослідження його учнів, які визначили поправки до закону ідеальних газів при високих тисках.

Г.Лоренц також використав кінетичну теорію як основу для своєї електронної теорії провідності у металах (1903 р.) і розв'язав кінетичне рівняння Больцмана для спеціального випадку суміші важких і легких частинок. Проста наближена форма його розв'язку широко використовується і нині.

Важливими для розробки математичних методів рівноважної статистичної механіки стали праці Ч.Дарвіна та Р.Фаулера 1922 р., в яких було запропоновано метод обчислення статистичного інтеграла [453—455].

### 3.1.3. Проникнення квантових уявлень у статистичну фізику (1900–1932 рр.)

Квантова ера почалась у фізиці в грудні 1900 р. з відкриття дискретної природи випромінювання в класичних працях М.Планка [456]. Одним з тих вчених, хто стояв біля джерел створення квантової статистичної фізики, був також А.Ейнштейн. Він присвятив різним питанням статистичної фізики, термодинаміки та кінетичної теорії газів близько 40 статей, написаних ним від 1900 до 1925 р. Завдяки його виключно плідному інтересу до цих галузей фізики ним було зроблено важливий внесок у розвиток квантової теорії.

Так, у 1905 р. А.Ейнштейн дав повне пояснення винайденому у 1827 р. броунівському руху — одному з найбільш наочних підтверджень уявлень молекулярно-кінетичної теорії та реального існування атомів [457]. Він показав, що теоретично значущим є тільки відношення середньоквадратичного зміщення до кореня квадратного з часу, що було підтверджено вимірюваннями у 1906 р. Ж.Перрена та Т.Сведберга, на основі яких було експериментально визначено сталу Больцмана та число Авогадро [458,459]. Незалежно теорію броунівського руху на основі своєї теорії флуктуацій у 1906 р. розробив М.Смолуховський [460].

Слід зазначити, що одним з принципових моментів в історії термодинаміки, який зв'язав два різних розділи фізики — термодинаміку та оптику, стала праця Г.Кірхгофа 1859 р., у якій він застосував термодинамічні принципи до оптики та створив термодинаміку теплового випромінювання. Г.Кірхгоф поширив поняття температури на випромінювання, яке перебуває у термодинамічній рівновазі з тілами, встановив пропорційність при однаковій температурі між поглинальною та випромінювальною здатністю тіл та її незалежність від природи тіла.

Першим, хто знайшов правильний вираз для функції Кірхгофа та обґрунтував спектральні закономірності випромінювання абсолютно чорного тіла, був М.Планк. Його фундаментальні результати 1900 р. — гіпотеза кванта, а також виведений ним закон розподілу енергії у спектрі випромінювання абсолютно чорного тіла, стали ключовими моментами у розвитку статистичної фізики та започаткували квантову статистику — теорію поведінки фізичних систем, що складаються з величезної кількості мікрочастинок.

Теорія теплового випромінювання, створена М. Планком, успішно пояснила властивості теплового випромінювання, що спостерігаються експериментально, та усунула принциповий дефект класичної теорії



теплого випромінювання – „ультрафіолетову катастрофу”. Проте спробам застосувати до випромінювання, як до фотонного газу, класичні статистичні критерії перешкоджали зміна числа частинок в об’ємі та неможливість існування деяких станів внаслідок квантової гіпотези. Індійський фізик Ш.Бозе, розглядаючи теплове випромінювання як газ фотонів, вважав, що до фотонів не можна застосовувати закони статистики як для звичайних матеріальних частинок та вніс поправку на нерозрізненість фотонів [461]. Він підраховував не самі кванти, а комірки, що містять у собі їх різну кількість. Беручи це за основу, при визначенні найбільш ймовірного стану Ш.Бозе одержав закон Планка.

Німецький переклад статті Бозе потрапив на редагування до А. Ейнштейна, і він дав їй позитивний відгук. Водночас А.Ейнштейн одержав дисертацію Л. де Бройля. Зіставляючи результати цих вчених та застосовуючи нові статистичні закони до ідеальних газів, у своїх двох статтях 1924 та 1925 рр. А.Ейнштейн побудував квантову теорію одноатомного газу і дав чисто статистичне обґрунтування фазового переходу, який зараз називають конденсацією Бозе—Ейнштейна [426, т.3, с.481—503]. Коментуючи свою роботу, А.Ейнштейн вказував, що різниця між підрахунком „за Больцманом” та „за Бозе—Ейнштейном” віддзеркалює невідому поки що гіпотезу про взаємний вплив молекул невідомої поки що природи. Таким чином, як зазначав А.Пайс, А. Ейнштейн підійшов дуже близько до створення хвильової механіки систем тотожних частинок [290, с.58]. Так була побудована квантова статистика, що одержала назву статистики Бозе—Ейнштейна.

Створення квантової статистики стало найяскравішим досягненням А.Ейнштейна в галузі статистичної фізики. Як і при одержанні інших результатів у квантовій теорії, він, використовуючи статистичні методи, побудував квантову теорію молекулярного газу, відкрив явище конденсації, на основі теорії флуктуацій ввів поняття корпускулярно-хвильового дуалізму методом, який відрізнявся від запропонованого раніше Л.де Бройлем.

Питаннями причинності А.Ейнштейна почав займатися починаючи 1916 р. з праці про нове доведення закону Планка „До теорії теплового випромінювання”, в якій він вказав на відсутність класичної причинності у процесі спонтанного випромінювання [426, т.3, с.44]. Однак побудована у 1923—1928 рр. квантова механіка викликала у нього глибоке занепокоєння принциповою статистичністю тлумачення мікроявищ та відходом від класичного причинного опису явищ природи. Адже, за твердженням О.Штерна, Ейнштейн був глибоко переконаний в тому, що

термодинаміка, на відміну від інших галузей фізики, не повинна змінюватися. „Я захоплююся працями фізиків молодого покоління, що об'єднані під назвою квантова механіка, та вірю в правильність цієї теорії. Я тільки вважаю, що обмеження, які приводять до статистичного характеру її законів, повинні бути з часом ліквідовані”, — писав А. Ейнштейн [426, т.4, с. 110]. Скептичне ставлення А.Ейнштейна до квантової механіки стало причиною його відмови виступити з доповіддю про квантову статистику на Сольвеевському конгресі 1927 р. „Це пов'язано з тим, що я не міг брати активну участь у сучасному розвитку квантової теорії, а це необхідно для підготовки доповіді. Частково це пояснюється тим, що я не дуже здібний до сприйняття бурхливих змін, які відбуваються, частково тим, що не схвалюю чисто статистичний підхід, на якому базуються нові теорії”, — писав він Г.Лоренцу [290, с. 414].

Відстоюючи тезу про те, що статистичний характер квантової механіки пов'язаний з її недостатністю внаслідок неповноти набору величин, які необхідні для її опису, А.Ейнштейн вважав, що подальший розвиток теорії мікроявищ буде відбуватись в напрямі побудови теорії елементарного процесу, заснованої на принципі причинності. За його точкою зору, в майбутній фізиці статистична квантова теорія мала займати приблизно таке ж місце, яке займає статистична механіка в рамках класичної. У 1927 р. А.Ейнштейн зазначав: „Тільки в квантовій механіці диференціальний метод Ньютона перестав відповідати дійсності і строга причинність залишила нас, але останнє слово в цій галузі ще не сказано. Так нехай же дух ньютонівського методу надихне нас для відновлення відповідності між фізичною реальністю та найбільш глибокою рисою вчення Ньютона – строгою причинністю” [426, т.4, с.94].

Розв'язанню цієї задачі були присвячені останні роки А.Ейнштейна, коли він шукав шляхи до побудови саме такої фундаментальної теорії – єдиної теорії поля, в якій природнім чином збереглася б класична причинність, а квантова механіка впливала б з неї як конструктивна теорія.

Ще одна квантова статистика була створена в 1926 р. незалежно італійським фізиком Е. Фермі й англійським фізиком П.Діраком (статистика Фермі—Дірака) [462,463]. Статистика Фермі—Дірака застосовується до частинок з напівцілим спіном, зокрема, до електронів. Важливо, що у дослідженнях цих вчених, крім принципу нерозрізненості частинок, враховувався також принцип Паулі.

Слід підкреслити, що такий загальний результат, яким є встановлення нової квантової статистики, Фермі одержав, намагаючись розв'язати часткову задачу виведення формули Сакура—Тетроде. Цікаво,

що стаття Фермі вийшла на декілька місяців раніше, ніж праця Дірака. Проте в статті Дірака не згадувалось про результат, одержаний Фермі. Тому Фермі вирішив у листі від 25 жовтня 1926 р. звернути увагу Дірака на свою працю. Як говорив Дірак в інтерв'ю 1963 р., він насправді читав статтю Фермі “Про квантування ідеального одноатомного газу”, але забув про це, оскільки його шлях був зовсім іншим: він не намагався розв'язати конкретну проблему, а прагнув в найзагальнішому вигляді сформулювати свою нову квантову механіку [116, с.167].

Перший крок до відкриття статистики Фермі зробив, коли надрукував замітку про теорію Штерна визначення абсолютного значення константи ентропії ідеального газу [464]. У 1924 р. він повернувся до задачі про константу ентропії, розглядаючи в невеликій, але змістовній статті труднощі, на які наштовхуються при застосуванні правил квантування Зоммерфельда до системи ідентичних частинок. Фермі зазначив, що зазвичай недолік застосування правил Зоммерфельда до складних систем пов'язували з неможливістю розділити змінні, однак на його думку, цей недолік є наслідком неможливості розрахунку орбіт для системи, яка містить у собі декілька ідентичних частинок. Ці частинки не можна розрізнити, отже, не можна і застосовувати умови Зоммерфельда, які виникає потреба модифікувати. Як саме змінити правила квантування, Фермі не пропонує. Однак він продовжує обчислювати точне значення константи ентропії ідеального газу та формулює декілька гіпотез щодо її квантування. Він також розглянув різні способи квантування ідеального газу, вказавши, що вони не є еквівалентними і дадуть різні значення ентропії.

Невдовзі Фермі написав статтю італійською мовою, яку розширив у публікації в “*Zeitschrift für Physik*” (доповідь 7 лютого 1926 р.). Він вказав, що через притягання до центра (області пружного потенціалу) густина газу є функцією відстані, яка обертається на нуль на нескінченно великій відстані. Таким чином, при нескінченно великих  $r$  виродження „знімається” і статистика переходить у класичну. Серед безпосередніх результатів, одержаних Фермі за допомогою нової статистики, є визначення константи ентропії для ідеального газу.

Подальший розвиток квантової статистики обумовив появу математичного апарата, що значно відрізняється від того, який застосовувався в класичній статистиці. Так, зв'язок квантових статистик з математичним апаратом квантової механіки був обґрунтований П.Діраком, а їх зв'язок зі спіном — В.Паулі у 1940 р.

На відміну від Фермі, Дірак в статті “До теорії квантової механіки” поставив задачу дати найбільш узагальнене формулювання квантової механіки. Він записав рівняння Шредінгера у формі, яка придатна не тільки для визначення власних функцій, а й для будь-якого стану. Погоджуючись з точкою зору Гейзенберга щодо ролі спостережуваних величин у фізичній теорії, він вважає  $(m,n)$  та  $(n,m)$  одним станом системи двох електронів. Дійшовши висновку, що власні функції сукупності частинок розділяються на дві категорії (симетричні та антисиметричні відносно

координат), Дірак вказав, що антисиметрична функція тотожно обертається на нуль, якщо два електрона містяться на одній орбіті, та, відповідно, мають однакові квантові числа. Звідси робився висновок, що власні стани сукупності частинок, підпорядкованих принципу Паулі, мають бути зображені антисиметричними функціями, інакше на одній орбіті була б довільна кількість електронів. Але це не відповідає досліду.

Даний результат Дірак узагальнив на теорію ідеального газу, яка виявилась ідентичною теорії Фермі. У цьому випадку, якщо розглянути симетричні функції, то ми прийдемо до статистики Бозе—Ейнштейна, а в антисиметричному випадку — до статистики іншого типу, яка справедлива для електронів у атомі.

Квантова статистика відіграла важливу роль у розвитку фізики конденсованих середовищ, і, насамперед, теорії твердого тіла. У подальшому їй було застосовано при створенні електронної теорії металів, загальної теорії електропровідності твердих тіл, включаючи напівпровідники, використано при поясненні природи рідкого стану, вивченні стану речовини при низьких температурах (пояснення третього закону термодинаміки, надпровідності, надплинності), побудові теорії фазових переходів II роду.

Так, квантову теорію у 1907 р. Ейнштейном було застосовано для обчислення теплоємності твердих тіл, а в 1911 В.Нернстом — теплоємності газів. У 1928 р. А.Зоммерфельд за допомогою функції розподілу Фермі—Дірака описав процеси перенесення в металах, на засадах цього набула подальшого розвитку квантова теорія електро- і теплопровідності, термоелектричних, гальваноманітних та інших кінетичних явищ у твердих тілах.

Відкриття в 1911 р. надпровідності Г.Камерлінг-Оннесом і надплинності П.Капіцею у 1938 р. стимулювали розвиток нових методів у квантовій статистиці. Були побудовані феноменологічні теорії надплинності Л.Ландау в 1941 р. і надпровідності Л.Ландау і В. Гінзбургом у 1950 р., розроблені нові методи розрахунку в статистичній квантовій теорії багаточастинкових систем. Одним з найяскравіших досягнень стало створення Дж.Бардінім, Л.Купером і Дж.Шриффером і незалежно М.М.Боголюбовим у 1957 р. мікроскопічної теорії надпровідності [465,466].

Суттєвий внесок у розвиток квантової статистичної фізики зробив Р. Фейнман, який запропонував метод інтегрування за траєкторіями (1948), графічний метод зображення амплітуд розсіяння та народження частинок (1949), теорію квантованих вихорів у надплинному гелії та зв'язок спектра елементарних збуджень з кореляційною функцією густини, яка вимірюється методами дифракції нейтронів (1955 р.) [467].

### 3.2. Передісторія статистичної фізики в Україні (XIX ст. — 20-ті рр. XX ст.)

#### 3.2.1. Експериментальні передумови сприйняття статистичної фізики в Україні (М.П.Авенаріус, М.О.Умов, М.Д.Пильчиков, М.Ф.Шведов)

Науково-дослідна діяльність у галузі фізики в Україні в XIX — на початок XX століття була тісно пов'язана з навчальним процесом у вищій школі, передусім у Харківському, Київському, Львівському та Одеському університетах. Хоча вона розвивалась не систематично, а завдяки зусиллям окремих вчених, проте їх досягненнями часто ставали роботи високого рівня. Так, питання тлумачення будови матерії вивчалось в Україні вже в XVII—XVIII ст., перш за все професорами Києво-Могилянської академії, які розглядали матерію головним об'єктом фізики як і вважали її за основу природних речей. І.Гізель, Ф.Прокопович, М. Козачинський, Г.Кониський та Г.Щербацький сформулювали погляд про єдність і однорідність як земної, так і небесної матерії. Ф.Прокопович, крім того, вважав, що вона має властивості протяжності: ширини, довжини, глибини, висоти, і запропонував принцип кількісного і якісного збереження матерії. Таке розуміння матерії створило передумови для виникнення на теренах України механіко-матеріалістичних концепцій, відповідно до яких матерія сприймалась як сукупність незмінних первинних елементів Всесвіту [96]. Найгрунтовніше таке розуміння матерії розглядав Г.Щербацький, який вважав, що вона є субстанцією, яка може являти собою атоми Демокріта.

На початку XIX століття ідеї атомної будови матерії також підтримували в Україні ряд вчених. Одним з них був вчений-природознавець і філософ-матеріаліст Т.Ф.Осиповський, який розглядав речовину як сукупність частинок, що взаємодіють одна з одною внаслідок сил тяжіння та відштовхування. Він працював у Харківському університеті від часу його заснування. Народився Т.Ф.Осиповський 22 січня 1765 р. у с. Осиповому (тепер Володимирської обл.), у 1799—1803 рр. був професором фізико-математичних наук в Петербурзькому педагогічному інституті, від часу заснування Харківського університету у 1805 до 1820 р. — професором математики Харківського університету (1813—1820 рр. — ректор). В актових промовах “Про простір і час” 1807 р. і “Міркування про динамічну систему Канта” 1813 р. [183,468] він розглядав простір і час як умови існування матерії та вважав рух без матерії неможливим [313].

Прихильником реальності атомів, кінетичної теорії теплоти, хвильової теорії світла та противником теорії теплороду також був завідувач з 1839 р. кафедри фізики Харківського університету В.І.Лапшин. Він народився 1809 р. у Петербурзі, де закінчив у 1828 р. університет. Після навчання в Професорському інституті при Дерптському університеті в 1835—1863 рр. працював у Харківському університеті, в 1865—1870 рр. був професором Новоросійського університету. Серед вчених— прихильників дискретної будови речовини можна назвати завідувача кафедри фізики А.П.Шимкова, за ініціативою якого в 1867-1899 рр. для вивчення курсу математичної фізики у Харківському університеті були рекомендовані монографії Р.Клаузіуса та Дж.Максвелла.

У Київському університеті курс механічної теорії теплоти читав професор М.І.Тализін, перший вітчизняний фізик, керівник кафедри фізики у 1858—65 рр. У Львівському університеті активно працював як викладач і вчений А.Гандль (народився у 1837). Він був автором ряду праць, що були надруковані у періодичних виданнях Віденської академії, зокрема, про будову рідин, кристалічну будову солей, поглинання світла.

Протягом ХІХ та до початку 30-х років ХХ століття в Україні було виконано ряд робіт, які сприяли експериментальному дослідженню того кола явищ, що в подальшому започаткували феноменологічну базу формування статистичної фізики, і теоретичному осмисленню та розробці нових ймовірносних ідей. Це, перш за все, роботи в галузі критичного стану речовини Михала Петровича Авенаріуса та його учнів, в галузі термодинаміки та дифузії водних розчинів Миколи Олексійовича Умова, а також роботи з дослідження термодинамічного потенціалу Миколи Дмитровича Пильчикова та Олексія Петровича Грузинцева, теоретичні роботи Маріана Смолуховського з броунівського руху та праці з обґрунтування другого закону термодинаміки Миколи Миколайовича Шиллера, Миколи Миколайовича Пирогова та Тетяни Олексіївни Афанасьєвої-Еренфест.

Значний внесок у молекулярну фізику та вивчення критичного стану речовини належить професору Київського університету, засновнику першої в Україні науково-дослідної лабораторії експериментальної фізики Михайлу Петровичу Авенаріусу. В 1875 р. він вперше в університеті запровадив для студентів лабораторний практикум з фізики, почав залучати здібних студентів до дослідницької діяльності, став ініціатором створення при університеті Товариства дослідників природи.

Михайло Петрович Авенаріус народився 7 вересня 1835 р. у Царському Селі. У 1858 р. закінчив Петербурзький університет, у 1865—

1890 рр. завідував кафедрою фізики та метеорологічною обсерваторією Київського університету (з 1866 р. - професор), у 1876 р. був обраний членом-кореспондентом Петербурзької Академії наук.

Значний вплив на формування М.П.Авенаріуса як вченого здійснив М.І.Пирогов, який з 1858 р. пропагував докорінне оновлення та зміни університетської освіти, в основу чого вважав за необхідне покласти тісний зв'язок викладання та наукового дослідження. Основне завдання освіти М.І.Пирогов вбачав у засвоєнні студентами наукового методу. „Покажіть освіченій людині в певному масштабі, на будь-якій будь-якої галузі науки, тільки по суті, метод і механізм, яким сучасна наука доходить до результатів — і все інше він одержить сам, якщо дійсно прагне знань», — писав він [469, с.571-572].

З травня 1862 р. до жовтня 1864 р. М.П. Авенаріус у складі групи молодих вчених, загальне керівництво освітою яких здійснював М.І. Пирогов (так званих пироговців), був відряджений Міністерством народної освіти Росії за кордон для підготовки до професорської діяльності. Більшу частину часу він провів у Берліні, де слухав лекції в університеті, брав участь у фізичних зборах у Г.Магнуса та проводив у його лабораторії самостійну наукову роботу. Протягом останнього півроку він місяць ознайомлювався з методикою викладання фізики у Парижі, а потім працював у Гейдельберзі у Г.Кірхгофа.

О.Г.Столетов так писав про М.П.Авенаріуса: „У літописах російської фізики М.П.Авенаріусу належить почесне місце і як досліднику, і як вчителю. Ім'я його не повинно бути забутим і в світовій науці” [470, с.432]. „Це була людина м'якого і в той же час прямого характеру, він ніколи не кривив душею, говорив і діяв завжди відповідно до своїх переконань і на його слово можна було покластися. До науки та професорських обов'язків ставився відповідально, як до святого діла. Свідчення рідних, колег та учнів доповнюють це особисте враження. Вони всі згадували про нього як про відмінного сім'янина, якого гаряче любили в родинному колі, як про стійкого та надзвичайно чесного члена колегії, як друга та улюбленця учнівської молоді. В колективі співробітників та у колі товаришів він користувався повагою навіть у людей з „іншого табору”, не визнавав опортунізму та формалістики. Студенти цінували його як захоплюючого лектора та невтомного робітника—керівника, а також як надійного захисника у правому ділі. Завжди делікатний, доброзичливий без поблажок, він вмів щадити молоде самолюбство, вмів надихнути талановитого та підбадьорити слабкого; являв собою високий моральний приклад, а за необхідності не відмовляв і

у матеріальній допомозі”, — так змальовував науковий портрет М.П. Авенаріуса О.Г. Столетов [470, с.426].

Наукові праці М.П. Авенаріуса були присвячені вивченню термоелектричних явищ та молекулярній фізиці, зокрема, критичному стану речовини. У зв'язку з розвитком парової машини визначення критичних величин було однією з найважливіших задач фізики у 70-80-х роках ХІХ століття. Цими питаннями займались в Росії одночасно з дослідженнями, що проводилися в київській лабораторії, також О.Г. Столетов, П.О. Зилов, Б.Б. Голіцин. “Використовуючи основи механічної теорії тепла і дані з критичного стану тіл, останнім часом фізики з особливим інтересом розглядають питання щодо змін, які відбуваються в тілах під дією теплоти. Проте через недостатність дослідних даних, особливо з критичного стану тіл, постали перепони — з одного боку, на шляху подальших теоретичних пошуків, а з іншого — щодо вирішення, яким з пропонованих теорій надати перевагу”, — писав М.П. Авенаріус про предмет своїх досліджень [471, с.7].

У 1865 р. М.П. Авенаріус захистив при Петербурзькому університеті магістерську дисертацію „Про термоелектрику”, в 1866 р. — там же докторську дисертацію „Про електричні різниці металів при різних температурах”. У цих та подальших працях було досліджено залежність термоелектрорушійної сили від температури спаїв, подано і обґрунтовано на основі механічної теорії теплоти формулу цієї залежності [472,473]. “Застосування основ механічної теорії тепла до явищ термоелектрики приводить до того ж виразу електрорушійної сили термоелектричного елемента, який було одержано з досліду як точний емпіричний вираз закону залежності електрорушійної сили елемента від температури спаїв” , — писав він. [473, с.5]

У курсі фізики О.Д. Хвольсона ця поправка приписується англійському фізику Тету, який дав її трьома роками пізніше, ніж вона була опублікована М.П. Авенаріусом.

З 1873 р. інтереси М.П. Авенаріуса зосередилися на вивченні рідкого стану і пари при зміні температури і тиску. Він перший вказав, що у критичній точці прихована теплота випаровування дорівнює нулю, а також запропонував новий метод визначення критичної температури для ряду рідин [474].

Протягом 1875—1889 рр. М.П. Авенаріус зі своїми учнями В.І. Зайончевським, О.Е. Страусом, К.М. Жуком та О.І. Надеждіним виконав цикл досліджень критичних значень для багатьох речовин, які ввійшли в основний фонд фізичних величин і довго залишалися незмінними [475,



307]. М.Авенаріус також установив формулу теплового розширення

рідин: 
$$\text{EMBED Equation.3}$$
, де  $t_c$  і  $V_c$  — відповідно температура критична і спостережувана;  $t_0$  і  $V_0$  — деякі сталі для цієї рідини. Ця формула точно визначала зміну об'єму рідини залежно від зміни температури на всьому проміжку температур аж до критичної [476,477].

Розквіт фізичної лабораторії Авенаріуса припадає на 1877—1886 рр. У 1874 р. університет виділив 2 тис. крб. на переобладнання фізичної лабораторії із хімічної, проте умови, в яких проводилися дослідження, були надто важкими. Незважаючи на це, роботи лабораторії набули широкого авторитету.

Так, учень М.П.Авенаріуса В.І.Зайончевський у 1878 р. опублікував працю «Визначення пружності насиченої пари деяких рідин при високих температурах» [478]. Він виміряв пружності насиченої пари до критичної температури і знайшов критичні температури та тиски сірчаного ефіру, сірчистого ангідриду, сірчистого вуглецю, бензолу, ацетону, хлористого етилу, уксусного етилу, чотирихлористого вуглецю та інших речовин. Останньою в цьому ряду була дисертаційна праця Надеждіна, яка побачила світ у 1886 р, вона містила у собі визначення критичної температури, критичного тиску та критичного об'єму 18 речовин [471].

За словами О.Г.Столетова, з усього набору критичних температур, який був зібраний у другому виданні 1894 р. відомих фізичних таблиць Ландольдта і Бернштейна, близько четвертої частини було одержано в молодій київській лабораторії [470, т.2, с.429]. Через 30 років ці таблиці вийшли у п'ятому виданні. Багато даних в них було замінено, однак дані В.І.Зайончевського 1878 р. (які були найбільш ранніми з усіх даних у таблицях) та дані О.І.Надеждіна були збережені повністю. З 34 визначень критичних об'ємів, поданих у таблицях, половина належить О.І.Надеждіну. Достовірність дослідних визначень, зроблених співробітниками М.П.Авенаріуса, підтверджується також тим фактом, що і через 70 років у «Довіднику з глибокого охолодження в техніці» М.П.Малкова та К.Ф.Павлова [479], виданому у 1947 р., теж були наведені визначені О.І.Надеждіним критичні температури ізобутілену та пропілену. У перекладі «Довідника фізика-експериментатора» Д.Кей та Т.Лебі [480], виданому у 1949 році, також зустрічаються одержані В.І.Зайончевським дані критичних температур та тисків для сірчаного газу і хлороформу.

Особливий інтерес становило на той час визначення критичних значень для води, як речовини, надзвичайно важливої для застосування. Вимірювання для води були пов'язані з особливими труднощами, оскільки металеві ємності для цього не підходили через їх недостатню

герметичність, а скляні — лопались. Р.Клаузіус, І.Ван де Вальс, Ш. Каньяр де ла Тур, Д.І.Менделеев та ін. намагалися різними шляхами знайти критичну температуру води. Результати, що було знайдено, значно різнилися між собою, від 323 до 8730С. Таким чином, критична температура води була невизначена.

На основі спостережень за критичними температурами двох рідин один з учнів М.П.Авенаріуса О.Е.Страус у 1880 р. показав, що для суміші спостерігається критичний стан, подібний до критичного стану чистих рідин, та встановив емпіричну формулу для визначення критичної температури суміші за критичними температурами її компонент. Використовуючи цю формулу, він розробив (1882р.) метод експериментального визначення критичної температури води, за яким ця температура становила  $370 + 50\text{C}$  (сучасне її значення  $374,150\text{C}$ ). Користуючись цими даними, він також знайшов критичний тиск для води, який на той час не можна було визначити. Він становив 195,5 атм. (сучасне його значення дорівнює 225,65 атм.). На ряді прикладів О.Е. Страус показав, якщо це значення застосовувати для обчислення температур кипіння різних рідин, то можна дістати результати, дуже близькі до спостережень [481].

Вперше пряме визначення критичної температури води провів 7 березня 1885 р. О.І.Надеждін (1885—1886) за допомогою винайденого ним приладу — диференціального денсиметра [482]. О.І.Надеждін народився в 1858 р., у 1882 р. закінчив Київський університет і був залишений при ньому для підготовки до професорського звання. Вже на третьому курсі за працю “Про зміни, помітні у властивостях тіл поблизу так званої температури абсолютного кипіння” одержав золоту медаль і премію ім.І.Пирогова, в 1886 р. захистив магістерську дисертацію „Етюди з порівняльної фізики”.

Оскільки оптичний метод встановлення критичного стану для води був незастосовний, то Надеждін запропонував для цього новий метод, який увійшов у науку як “метод Надеждіна”. Прилад Надеждіна складався з трубки, що була вставлена в оправу з тригранною віссю, на якій вона могла коливатись, подібно до коромисла терезів. Спочатку трубка врівноважувалась так, щоб вона займала горизонтальне положення. Потім частина трубки заповнювалась рідиною, а інша частина — насиченою парою. При цьому трубка нахилялась. Критична температура визначалася як така, при якій зникає межа між густинами рідини та пари, що виявлялось за поверненням трубки у горизонтальне положення. Важливою перевагою методу Надеждіна стала можливість його

застосування у тих випадках, коли речовина має такий інтенсивний колір (як бром чи йод), що складно побачити меніск, або коли ця речовина руйнує скло (як вода). За методом Надеждіна було одержано  $t_{кр.води} = 3580 \text{ C}$ , що добре узгоджувалося з даними Страуса. Результати з визначення критичної температури води, які О.Г.Столетов характеризував як кульмінаційний момент діяльності лабораторії Авенаріуса, сприяли зростанню її наукового авторитету. Роботи лабораторії навіть друкувалися в центральному російському фізичному журналі (Журнал Російського фізико-хімічного товариства) під загальним заголовком: "З фізичної лабораторії університету св. Володимира."

О.І.Надеждін також встановив зв'язок між точкою кипіння й критичною температурою рідини [483]. Досліджуючи залежність від температури пружності насиченої пари деяких органічних рідин та визначаючи критичні температури декількох сумішей, він помітив, що критична температура і температура кипіння сумішей підвищуються на одну й ту ж величину. О.І.Надеждін припустив, що цей закон діє для близьких за складом речовин-полімерів, ізомерів. Тому, досліджуючи ряд ізомерів, він переконується в існуванні такої закономірності. Дещо пізніше з'явилася праця Павлевського, який висловив такі ж припущення для гомологів і дав результати вимірювань для 17 ефірів в підтвердження цієї закономірності. О.І.Надеждін навів також подальші приклади існування цього співвідношення для гомологів. [484,485]. Вибираючи ряди чи групи з аналогічними властивостями (гомологи, ізомери, похідні одних і тих же радикалів) і знаходячи для них часткові закономірності, О. І.Надеждін вважав, що часткові узагальнення мають слугувати ступенями для загального синтезу, для виявлення вигляду функції, яка зв'яже властивості тіла з його будовою та молекулярною масою. В знайдений закономірності він вбачав ознаки того, що залежність температури кипіння від молекулярної маси і будови має той же вигляд, що і для критичної температури.

У наступній своїй праці про теплоємність рідин [486] О.І.Надеждін установлює нову закономірність: відношення теплоти випаровування рідини до добутку теплоємності на критичну температуру є сталим для будь-якої рідини, якщо проводити порівняння при температурах, за яких питомий об'єм кожної рідини становить однакову частку її критичного об'єму (відповідні об'єми). Він також підтвердив це положення експериментальними даними, і далі показав, що відношення внутрішніх робіт при випаровуванні і нагріванні різних рідин, взятих при відповідних об'ємах, прямо пропорційно критичному тиску. Для пояснення цих

фактів О.І.Надеждін пропонує гіпотезу, що в рідині всі молекули об'єднуються в групи і що значення критичного тиску пропорційне числу молекул, які утворюють одну складну частинку рідини.

У вступі до своєї дисертації О.І.Надеждін розкриває вихідні методологічні положення даної роботи. “Субстратом всіх фізичних явищ є матерія чи речовина” [471,с.2], “...атомістична гіпотеза одержала таку ступінь ймовірності, що дозволяє хімічний атом вважати реальністю”[471,с.4]. Виступаючи прихильником атомістичної гіпотези, О.І.Надеждін висловлював свою думку, що безперечним є “існування того, що рухається, найменших частинок, атомів” [471,с.4].

Для всебічного та повного вивчення фізичних явищ О.І.Надеждін вважав за необхідне досліджувати залежність між фізичними властивостями та складом тіл. Він очікує, і вважає це висновком із Періодичної системи елементів Д.І.Менделєєва, що повинен існувати “тісний зв'язок між атомною (іноді частинковою) вагою і фізичними та хімічними властивостями тіла” [471,с.4]. Завдання “знайти та виміряти цей зв'язок” він розглядає як програму майбутніх досліджень [471,с.3].

У дисертації О.І.Надеждіна досліджується дія тепла на тверді та рідкі тіла. Розуміючи, що за станом сучасної йому науки результати порівняльного вивчення дії тепла на різні речовини “ще довго будуть мати частковий характер”, вчений прагне максимально повно розглянути та критично проаналізувати наявні дослідні відомості, розібрати та перевірити існуючі теорії. Дисертація складалась з трьох частин. У першій розглядалось теплове розширення твердих тіл, співвідношення між коефіцієнтом розширення, молекулярним об'ємом та температурою плавлення. Друга частина присвячена тепловому розширенню рідин і переходу тіл з рідкого стану в газоподібний. Тут містяться власні визначення О.І.Надеждіним критичного стану ряду ефірів жирних кислот, викладено його методику, описано критичний стан. Розглянуто також коефіцієнти розширення при звичайних температурах, на основі численних вимірювань лабораторії Авенаріуса дискутується питання про залежність між точкою кипіння та критичною температурою. Визнаючи, що сталість різниці цих двох температур спостерігається у метамірних та гомологічних речовин (і то тільки приблизно) для температур кипіння при нормальному тиску, вчений пов'язує цю залежність зі сталістю добутку коефіцієнта розширення на абсолютну температуру кипіння рідини. Далі в праці порівнюються формули для розширення рідин, досліджуються висновки з рівняння стану щодо розширення рідин, а також розглядаються дані про пружність насиченої пари.

“Я Вам надіслав працю Надеждіна. Сподіваюсь, що Вам буде приємно побачити такий капітальний доробок, виконаний без допомоги закордонних вчених....Тільки одні його визначення пружності пари в цій праці заслуговують, на мою думку, докторського ступеня”, — писав М.П. Авенаріус А.Г.Столетову 21 березня 1886 р. [487].

Через рік, у передмові до посмертного видання фізичних досліджень О.І.Надеждіна, М.П.Авенаріус так оцінює цю дисертацію: ”Пропоновані ним дослідні дані критичного стану тіл та пружності рідин при високих температурах переважають за своїм значенням всі відомі на цей час дані. Оскільки цей матеріал ним і опрацьований, то дане дослідження є капітальною працею” [488, с.5–6] О.Г.Столетов також схвально характеризував праці О.І.Надеждіна з критичного стану речовини, називаючи його “глибоким знавцем питання, яке нас цікавить” [470].

На жаль, вже через два місяці після захисту дисертації, в червні 1886 р. О.І.Надеждін помер у Німеччині, куди його було відряджено з науковою метою на два роки. З сумом писав М.П.Авенаріус про долю свого найталановитішого учня: “Хоча Росія не може поскаржитись на відсутність здібностей у її синів, але рідко ці здібності приносять бажані плоди. Ті чи інші негаразди заважають виконанню часто дуже широко поставлених наукових завдань, і залишається тільки шкодувати про втрату для науки молодих сил, які подавали великі надії. Зі смертю О.І. ми втратили набагато більше; незважаючи на свої молоді роки, він не тільки подавав надії, а й встиг блискуче виправдати найсміливіші очікування своїх наставників та товаришів і в 28 років посісти почесне місце серед європейських вчених” [488,с.6]

Такий перебіг подій, безумовно, був пов’язаний з тим, що протягом усього періоду інтенсивної діяльності умови роботи в лабораторії Авенаріуса були складними. “Якщо врахувати те, що кімнати мають висоту 8 футів, а вікна дуже малі, то можна сказати, що приміщення нашої лабораторії до неможливості мізерне”, — писав В.І.Зайончевський О.Г.Столетову 4 жовтня 1895 р. [487]. У той же час за словами учня М.К. Авенаріуса Е.К.Шпачинського, “Авенаріус по декілька годин поспіль проводив щоденно в одній з кімнат своєї лабораторії серед запалених газових горілок та розжарених магнусовських ванн, при неможливо високій температурі, в сухій переповненій вуглекислотою атмосфері, весь час на ногах, терпляче слідкуючи за показаннями термометрів, з олівцем у руці для запису об’єму та ін.” [487].

Роки таких занять підірвали сили М.П.Авенаріуса і вже у 1890 р. у віці 55 років він вимушений був припинити читання лекцій. Ядро

лабораторії теж розпалося. Так, В.І.Зайончевський перейшов на роботу доцентом до Інституту сільського господарства та Лісівництва в Нову Олександрію, О.Е.Страус переїхав у 1881 р. у Петербург, де почав займатись електротехнікою, К.М.Жук зосередився на учбовому процесі.

Розглянуті роботи лабораторії Авенаріуса мають численні приклади оригінальних методичних прийомів, які давали можливість всебічно і глибоко розглядати складнодоступні явища. Наприклад, М.П.Авенаріус для створення потрібних тисків міг замінити тепловим розширенням допоміжної рідини нагнітальний насос, який був відсутній, тобто розв'язував поставлену задачу надзвичайно простими технічними засобами. Його співробітники завжди наслідували його принцип про те, що “необхідно розглядати явище у можливо більш широких межах зміни” причини, яка його обумовлює” [489].

Фізичні дослідження проводились також і в інших університетах на теренах України. Так, активна наукова діяльність з фізики в Новоросійському (Одеському) університеті пов'язана з іменами П. Павлова, М.О.Умова, М.Д.Пильчикова та Ф.Н.Шведова. У Одеському університеті широко проводились дослідження з молекулярної фізики молекулярної фізики. Тут розпочав свою діяльність П.Павлов, теоретично і експериментально вивчаючи зв'язки між термодинамічними властивостями дисперсійних систем і ступенем їх дисперсійності. Ним була вперше встановлена залежність температури топлення від поверхневої енергії твердого тіла, вивчені термодинамічні потенціали хімічних елементів та їх сполук, рівновага між кристалічною та рідинною фазами, сформульовано загальне правило фаз конденсованих систем, досліджувались адсорбція і поверхневий натяг на межі поділу двох фаз.

З 1868 р. в університеті працював Ф.Н.Шведов (1840—1905 рр.). Він народився у Кілії (тепер Одеська обл.), закінчив 1863 р. Петербурзький університет. З 1870 р. був професором Новоросійського університету, в 1895—1903 рр. – його ректором. У 1870 р. йому було присуджено ступінь доктора фізики після захисту дисертації „Про закони перетворення електрики в теплоту”. Ф.Н.Шведов створив фізичну лабораторію, поповнив фізичний кабінет новими приладами, на посаді ректора домігся створення хімічного і фізичного інститутів. Наукові праці вченого стосувалися молекулярної фізики, електрики, астрофізики. Ф.Н.Шведов перший спостерігав (1889 р.) пружність форми й аномалію в'язкості колоїдних розчинів, вивчав процес релаксації напруг у колоїдах, вивів рівняння стаціонарного в'язко-пластичного плинину речовини. Він став засновником нового наукового напрямку — реології дисперсних систем та

високомолекулярних сполук [320].

У 1871 р. доцентом кафедри фізики Новоросійського університету було обрано М.О.Умова (1846—1915 рр.). Він народився в Симбірську, в 1867 р. закінчив Московський університет, у 1871 р. захистив магістерську дисертацію „Теорія термомеханічних явищ у твердих пружних тілах”. Протягом 1871—1893 рр. працював у Новоросійському університеті (у 1875 р. став професором). У 1893—1911 рр. він — професор Московського університету, де з 1896 р. після смерті О.Г. Столетова очолював кафедру фізики.

Уже в своїй магістерській праці М.О.Умов зробив спробу об'єднати теорію пружності з термодинамікою та теорією теплопровідності. У працях 1873—1874 рр., особливо в докторській дисертації „Рівняння руху енергії в тілах”, М.О.Умов запровадив поняття густини енергії, швидкості її руху, а також потоку енергії, вивів диференціальні рівняння руху енергії в пружному твердому тілі й рідині, сформулював теорему, що пов'язує потік механічної енергії крізь площадку з тиском, якого вона зазнає, та швидкістю руху енергії (теорема Умова). Він перший застосував закон збереження енергії до вивчення хвильових процесів, показавши, що поширення хвиль пов'язане з перенесенням енергії, та запропонував його нове формулювання. Ця робота М.О.Умова мала суттєве значення для побудови статистичної фізики нерівноважних станів і необоротних процесів.

В університеті М.О.Умовим були виконані також теоретичні дослідження з теорії коливань, термодинаміки, термопружності. Для його робіт характерним було філософське тлумачення проблеми [490]. Зокрема, він запровадив поняття теплових напруг, виконав експериментальні дослідження дифузії водневих розчинів та явищ поляризації світла в каламутних середовищах тощо. Досліджуючи явища дифузії у водних розчинах, М.О.Умов сформулював більш точний закон для знаходження дифузійного потоку, а саме показав суттєві обмеження застосування закону Фіка, згідно з яким кількість речовини, що продифундувала, пропорційна до градієнта концентрації, а коефіцієнт пропорційності (коефіцієнт дифузії) вважається величиною сталою. Вчений встановив, що у випадку дифузії водних розчинів солей і кислот закон Фіка можна застосовувати тільки при ізотермічних умовах та для дуже слабких розчинів [491].

Експериментальні дослідження проводились також у Харківському університеті. У 1892—1902 рр. на кафедрі фізики працював відомий вітчизняний фізик М.Д.Пильчиков. Зокрема, його монографія ”Матеріали

щодо питання про застосування термодинамічного потенціалу до виведення електрохімічної динаміки” (1896 р.) започаткувала вітчизняні дослідження термодинаміки процесів у електролітах. У 1881—1919 рр. у Харківському університеті працював також О.П.Грузинцев, який у 1900-1914 завідував кафедрою фізики, був засновником семінару і фізичної бібліотеки при ньому. Важливим внеском в дослідження властивостей середовищ, що складаються з великої кількості частинок, стала запропонована ним концепція “світлового ефіру”, який він трактував як певне дискретне середовище, що складається з “ефірних частинок” [492]. Основні рівняння теорії виводяться вченим на механічній основі, де ефірні частинки взаємодіють між собою та з матеріальними частинками, внаслідок чого в кожній точці ефірного середовища виникає ряд механічних сил — пружності, тертя, гідростатичного тиску, опору руху ефірних частинок, дії матеріальних частинок на ефірні частинки. Зворотною дією ефірних частинок на матеріальні частинки, яка виявлялася як опір руху ефірних частинок і зміна пружності ефіру, О.П. Грузинцев нехтував внаслідок її малості. Таким чином, ним були розглянуті фізичні взаємодії в системі, що складається з ефірних та матеріальних частинок, та визначена робота кожної із сил на основі використання закону збереження енергії.

Починаючи з 1894 р. року наукові інтереси О.П.Грузинцева зосередились безпосередньо на питаннях молекулярної фізики та термодинаміки. Ним були побудовані теорія осмотичного тиску (1894), теорія капілярності та гідростатики (1899—1901 рр.), теорія стехіометрії (1912 р.), досліджено асоціації молекул у твердих сполуках (1914 р.). Результати своїх досліджень в цій галузі він підсумував та узагальнив у двох монографіях: “Термодинамічна теорія хімічних реакцій” (1913 р.) та “Застосування термодинаміки до хімічних реакцій з твердими фазами” (1915 р.). Зокрема, в праці “Застосування термодинаміки до хімічних реакцій з твердими фазами” ним було розроблено теорію хімічних реакцій, що базується на методі термодинамічного потенціалу. Причому вчений вважав за необхідне враховувати енергію не тільки поступального та обертального, а й коливального руху молекул, а при розрахунках внутрішньої енергії він використовував квантову теорію твердого тіла, яка саме тоді створювалася П.Дебаєм, М.Борном і Т.Карманом.

Курс лекцій О.П.Грузинцева з термодинаміки, який читався ним навесні 1912 р. і був виданий у 1913 р., також містить у собі результати його власних досліджень у галузі термодинаміки хімічних реакцій. Характерною рисою курсу є широке застосування методу



термодинамічного потенціалу. Значна частина книги присвячена теорії хімічної рівноваги фаз. Слід підкреслити, що у розділах про термодинамічні властивості твердих тіл використовуються положення квантової теплоємності твердих тіл, створеної А.Ейнштейном у 1907 р. В праці також подано власне виведення автором формули Ернста—Ліндемана, вперше одержаної Ф.Ліндеманом у 1910 р. напівемпіричним шляхом, а також наведено її критичний аналіз та приклади застосувань [205,493].

Важливе значення для розвитку уявлень про будову речовини мала діяльність в Харківському університеті професора хімії у 1826—1911 рр., академіка АН СРСР, засновника вітчизняної фізичної хімії М.М. Бекетова. Він став одним з тих, хто ввів закон діючих мас, поставив та оригінально вирішив питання про зв'язок між будовою і властивостями елементів, про перетворення елементів та енергетичні зміни, які супроводжують ці перетворення, а саме, про відношення між атомними масами елементів, що з'єднуються та кількістю теплоти, яка виділяється при цьому. У підручнику неорганічної хімії він висловлював передбачення, якщо буде відкрито подільність атомів, то процеси, пов'язані із нею, цілковито відрізнятимуться від хімічних процесів і будуть супроводжуватися величезним виділенням енергії [494]. З праць послідовників М.М. Бекетова у галузі термодинаміки та вивчення розчинів у Харківському університеті слід відзначити книгу професора І.П.Осипова “Вступ до вивчення термодинаміки хімічної рівноваги” та його докторську дисертацію “Теплота горіння органічних речовин та її зв'язок з явищами гомології, ізомерії та конституції”, а також праці професора П.Д.Хрущова “Про деякі нові дослідження з теорії розчинів” та професора Д.П.Турбаби “Термодинаміка” [495].

### 3.2.2. Перші теоретичні узагальнення ймовірнісних уявлень (М.М. Пирогов, М.Смолуховський, М.М.Шиллер, Т.О.Афанасьєва-Еренфест)

Розглянуті у розділі 3.2.1. експериментальні роботи сприяли формулюванню на їх базі теоретичних узагальнень. Так, одним з перших, хто розпочав роботу в галузі узагальнень ймовірнісних уявлень в Україні, був відомий польський фізик Маріан Смолуховський (1872—1917 рр.), який працював у Львівському університеті протягом 1898—1913 рр. Саме його основоположні класичні праці зі статистичної фізики започаткували систематичні теоретичні дослідження у Львівському університеті. Насамперед, це статті „Середній шлях газових молекул і його зв'язок з теорією дифузії” та „До кінетичної теорії броунівського молекулярного руху і суспензій”, які вийшли з друку у 1906 р. [485,486].

М.Смолуховський народився в м.Фордербрюле поблизу Відня. У 1894 р. закінчив Віденський університет, де його вчителями були Стефан та Екснер. Удосконалював М.Смолуховський свої знання в лабораторіях Г.Липпмана, В.Томсона та Е.Варбурга. Так, у 1895—1896 рр. у Парижі у Липпмана він теоретично й експериментально вивчав теплове випромінювання, в 1896—1897 рр. в Глазго у Томсона — радіоактивність та провідність газів, у 1897 р. працював у Берліні у Варбурга. Після повернення до Австрії у 1898 р. одержав у Відні вчений ступінь. У 1898—1913 рр. працював у Львівському університеті (з 1900 р. — професор теоретичної фізики). З 1913 р. був професором Краківського університету, пізніше — ректором. Помер М.Смолуховський 25 вересня 1917 р. у Кракові [487,221,10].

"Коло наукових інтересів М.Смолуховського охоплювало молекулярну теорію теплоти. Особливо його цікавили ті наслідки з молекулярної кінетики, які не можна було зрозуміти з точки зору класичної термодинаміки; він відчував, що тільки вивчивши ці явища, можна буде подолати сильний опір, який чинили молекулярній теорії вчені кінця ХІХ століття", — писав про нього А.Ейнштейн. [426,т.4,с.36]

Ще у 1898 р. М.Смолуховський теоретично обґрунтував явище температурного стрибка між стінкою і газом при поширенні тепла в сильно розріджених газах, яке було відкрито експериментально в 70-х роках ХІХ століття Е.Варбургом та А.Кундтом. Це стало досить значущим аргументом на користь молекулярної кінетики [221,10]. Проте загальне визнання кінетична теорія одержала лише в 1905—1906 рр., коли було теоретично доведено, що вона може кількісно пояснити відкритий у 1828 р. Р.Броуном хаотичний рух частинок у рідині [499].

Саме у цей період одночасно з працями А.Ейнштейна [500,501] з'являються зазначені вище праці М.Смолуховського з броунівського руху [460,502]. Дослідження вченого з цієї тематики, а також з питань межі застосування другого закону термодинаміки, обґрунтовували й розвивали ідеї Л.Больцмана. Таким чином, виходячи з кінетичного закону рівномірного розподілу енергії, М.Смолуховський запропонував у 1905—1906 рр. незалежно від А. Ейнштейна теорію броунівського руху, яка сприяла утвердженню кінетичної теорії теплоти та її висновків.

Праці з броунівського руху М.Смолуховського побачили світ через кілька місяців після праць А.Ейнштейна. Зі слів М. Смолуховського можна навіть зробити припущення про те, що ці результати були одержані декількома роками раніше. “Питання про суть відкритого ботаником Робертом Брауном (1827 р.) явища змулених у рідині мікроскопічних частинок, яке багато дискутувалося, нещодавно було підняте у двох теоретичних працях Ейнштейна, результати яких достатньо відповідають тим, які я одержав декілька років тому, виходячи зовсім з інших міркувань, і які я вважаю з тих пір вагомим аргументом на користь кінетичної природи цього явища. Хоч я досі не зміг одержати експериментальні результати, тобто перевірити це уявлення, тим не менш я наважився одразу ж надрукувати ці міркування; я сподіваюсь допомогти поясненню цього цікавого явища, тим більше, що мій метод є більш безпосереднім і простим, а тому може бути переконливішим, ніж метод Ейнштейна”, — писав М.Смолуховський [460, с.133-134].

Він звертав увагу на те, що метод Ейнштейна заснований на міркуваннях непрямого характеру, які не завжди видаються достатньо переконливими. Наприклад, застосування законів осмотичного тиску до частинок та обчислення швидкості їх дифузії чи застосування больцманівського закону (про статистичний розподіл стану систем під дією потенційних сил) до опору тертя, якого зазнають частинки. Проте тотожність своїх результатів з результатами Ейнштейна надзвичайно задовольняла вченого. “У будь-якому разі збіг результатів двох різних методів, які висвітлюють механізм одного й того ж процесу, є позитивним фактом. Різниця в числовому множнику пояснюється введенням різних положень для спрощення, і для застосувань, природно, не має ніякого значення», — зазначав М.Смолуховський [460,с.155].

Виступаючи прихильником статистичних ідей Л.Больцмана, М. Смолуховський вважав, що перевірити їх можна перш за все там, де статистична теорія виходить за межі термодинаміки, наприклад, розраховуючи саме ті миттєві випадкові відхилення, яких слід очікувати

відповідно до кінетичної теорії від середнього, найімовірнішого стану, що відповідає термодинаміці, а також розглядаючи питання щодо змоги виявлення їх на досліді у деяких випадках. “Ми обмежимося заздалегідь розглядом таких станів, які відповідають термодинамічній рівновазі, оскільки тут особливо простежуються протиріччя. Дійсно, тоді як згідно зі звичайним термодинамічним уявленням, замкнена система прямує до стану рівноваги, який однозначно визначається умовою мінімуму потенціалу, то відповідно до кінетичної теорії, стан системи у термодинамічній рівновазі повинен коливатися біля деякого середнього нормального стану, і навіть у деяких випадках може відхилятися від останнього як завгодно далеко», — писав він [502,с.167].

Розглядаючи явище з різних сторін, він дійшов висновку, що воно “залежно від прийнятої точки зору виявляється трьома різними формами: з макроскопічної точки зору називається “дифузією”; з мікроскопічної, тобто якщо слідкувати за історією окремої матеріальної частинки, це — “броунівський молекулярний рух”, і, нарешті, якщо не упускати з уваги певний елемент об’єму та зазначати кожен змін числа частинок у цьому об’ємі, то тут мова йде про “флуктуації концентрації”. Природно, що між цими різними формами явищ існує внутрішній зв’язок, і нашою головною задачею є теоретичне дослідження цього зв’язку та більш точне визначення границь застосування звичайної теорії дифузії” [503,с.333].

Наочна теорія Смолуховського, хоч і більш наближена, дозволила детально прослідкувати механізм явища броунівського руху і пояснити його не лише як результат теплового руху молекул навколишнього середовища, а й кількісно обґрунтувати реальність молекул. Зокрема, вченим було показано, що внутрішнє тертя постійно зменшує миттєву швидкість частинки в рідині, тоді як неупорядковані співударя відновлюють її.

“Пізнання суті броунівського руху привело до несподіваного зникнення всіх сумнівів щодо достовірності больцманівського розуміння термодинамічних законів. Стало ясно, що термодинамічна рівновага в точному значенні цього слова взагалі не існує, а скоріше, кожна надовго залишена сама по собі система здійснює неупорядковані коливання навколо стану ідеальної термодинамічної рівноваги», — писав А. Ейнштейн [426,т.4,с.37].

У подальшому, виконуючи свою програму встановлення зв’язку між броунівським рухом, дифузією та флуктуаціями, М.Смолуховський побудував у 1913—1914 рр. теорію флуктуацій [504,505] та на її основі у 1916 р. теорію колоїдних розчинів [503]. Його праці з теорії флуктуацій

не лише сприяли утвердженню молекулярної теорії, а й стали підґрунтям для розуміння зв'язку між статистичною фізикою і термодинамікою. Так, встановлені закони флуктуацій рівноважних станів у молекулярних системах вчений використав для обґрунтування обмеженості тлумачення Р.Клаузіусом другого закону термодинаміки. Теорія М.Смолуховського дала можливість визначити час, через який настає новий аномальний стан системи, а отже, спростувала гіпотезу „теплової смерті” Всесвіту. В узагальнюючих доповідях у Мюнстері у 1912 р. та у Геттінгені 1913 і 1916 рр. М.Смолуховський розвиває свої нині загальноприйняті погляди на межі застосування другого закону термодинаміки як статистичного закону [502—504]. Ним було також запропоновано власне формулювання другого закону термодинаміки: “Неможливо здійснити жодного автоматичного пристрою, який би тривалий час продукував корисну роботу за рахунок теплоти більш низької температури” [502,с.197]. Крім того, вчений був переконаний, що дійсно необоротних явищ не існує, що “...всі явища, які здаються необоротними, в дійсності є оборотними. Для цього не потрібно ніякого спеціального пристрою, необхідно тільки зачекати, поки це станеться само собою відповідно до законів випадку, тобто поки настане порівняно велике відхилення від нормального стану. Будь-якого стану з часом буде досягнуто, яким би “неймовірним” він не був, і буде одержано будь-яке значення роботи  $A$  за рахунок навколишньої теплоти. При цьому тільки у випадку, коли ми значно виходимо з області середньої флуктуації, час  $T$ , в середньому необхідний для цього, настільки сильно зростає, що границя відношення  $A/T$  дорівнює нулю, тобто

Таким же чином при чесній азартній грі можна виграти будь-яку бажану суму, якщо тільки гра буде продовжуватись досить довго, тобто якщо ми будемо мати в розпорядженні достатньо часу і капіталу, щоб не бути примушеними достроково припинити гру. Однак, незважаючи на це, така гра не може бути постійним джерелом заробітку, оскільки час, необхідний за припущенням для виграшу деякої суми, зростає у квадратичному відношенні до величини останньої” [502,с.197—198].

Слід зазначити, що оскільки флуктуації у випадку броунівського руху дуже малі, то в цілому вони не спостережувані. Однак у 1908 р. М. Смолуховському вдалося знайти іншу групу спостережуваних явищ, у яких ці флуктуації виявляються майже безпосередньо. Це — опалесценція газів та рідин в критичному стані. В 1908 р. на основі теорії флуктуації М.

Смолуховський побудував теорію критичної опалесценції. Він показав, що чим більше стисливість речовини, або окремої складової частини цієї речовини, тим більшими є неперервні просторово-часові флуктуації, які зазнає густина внаслідок хаотичності теплового руху. На цій основі вчений визначив, що флуктуації мають приводити до оптичного помутніння речовини, що пояснювало блакитний колір неба та червоний колір сходу Сонця. Саме ці явища доводять існування просторових флуктуацій густини повітря.

Важливою є також праця М.Смолуховського 1913 р. з вивчення поведінки броунівських частинок під дією зовнішньої сили [506]. Він одержав рівняння, яке може розглядатись як рівняння дифузії під дією зовнішньої сили, за допомогою якого пояснив досліди Ф.Еренгафта та Р. Міллікена з визначення величини заряду на невеликих матеріальних частинках, завислих у газі, які доводили неподільність заряду електрона, а також досліди Ф.Перрена, Іль'їна та А.Вестгрена щодо дослідження розподілу частинок гуммігута. Вчений також у 1915 р. дослідив поступовий перехід між трьома стадіями, що відповідають різним значенням часу, з перевагою то броунівського руху, то вільного падіння, то осадового розподілу, які до тих пір розглядалися окремо [507].

Рівняння Смолуховського та рівняння Ейнштейна для залежності функції розподілу від спостережуваного параметра фізичної системи, яка знаходиться в тепловій рівновазі, записані для різних функцій і мають різні розв'язки, але зображають один і той же процес. Відтоді, як статистичні методи почали застосовувати не тільки в молекулярно-кінетичній теорії, а й для опису об'єктів іншої природи, наприклад, при дослідженні поведінки електричного диполя в полі випромінювання, було з'ясовано, що там виникає рівняння, аналогічне рівнянню Ейнштейна (рівняння Фоккера—Планка). Пізніше у зв'язку з розвитком теорії марковських процесів це рівняння було виведено у загальному вигляді і було показано, що рівняння Смолуховського є рівнянням Фоккера—Планка в конфігураційному просторі, справедливим на часових інтервалах, більших порівняно з часом релаксації за імпульсними змінними, і являють собою узагальнене рівняння дифузії.

М.Смолуховському належать роботи також і в інших галузях фізики — щодо теорії планетних атмосфер, процесів горотворення, методу подібності в аеродинаміці. Доречно навести характеристику, дану у 1917 р. М.Смолуховському А.Ейнштейном як людині і педагогу: “Кожний, хто близько знав Смолуховського, любив у ньому не тільки вченого з гострим розумом, а й благородну, тонку і доброзичливу людину. Світова

катастрофа останніх років викликала у нього почуття невимовного болю за жорстокість людей та за збиток, нанесений нашому культурному розвитку. Доля занадто рано обірвала його благодотворну діяльність як дослідника та педагога; однак ми будемо високо цінувати його життя та його праці”[426,т.4,с.39].

Слід зазначити, що дискусія, яка виникла серед фізиків після формулювання другого закону термодинаміки, мала велике значення для усвідомлення статистичного характеру законів природи. Пошуки чітких формулювань закладеної в другому законі термодинаміки ідеї необоротності і спроби усвідомити місце нового закону в системі фізичних законів мали принциповий вплив на подальший розвиток фізики в другій половині ХІХ століття.

Якщо перший закон термодинаміки після визнання закону збереження енергії відповідаючи прийнятим загальним поглядам на природу, не викликав заперечень та успішно застосовувався в суміжних з фізикою галузях, а саме в хімії і біології, то сприйняття другого закону термодинаміки було іншим. Особливо багато заперечень виникало у зв'язку з поширенням другого закону на необоротні процеси. Адже новий закон затверджував досі невідому односторонність перебігу всіх реальних процесів. Заперечення стосувалися насамперед того, що поняття ентропії формулювалося лише як безпосереднє узагальнення досвіду, а також не відокремлювалися одне від одного два різних положення — принцип існування ентропії і принцип її зростання. Численні спроби по-новому сформулювати другий закон та гостра дискусія з цього приводу (М. Пирогов, М.Шіллер, К.Каратеодорі, Е.Цермело, А.Пуанкаре, В.Оствальд, Е.Мах, М.Окатов) вказували на внутрішню незадоволеність вчених його логічною побудовою.

Альтернативним виявився шлях аксіоматичної побудови термодинаміки, розвинутий перш за все у працях М.Шіллера, К. Каратеодорі і Т.Афанасьєвої-Еренфест. Першим фізиком, хто систематично розробляв даний підхід і довів існування ентропії на загальній основі, незалежно від еквівалентності теплоти і роботи, був М. М.Шіллер, який став наступником кафедри фізики Київського університету після М.П.Авенаріуса. Він народився у Москві, де закінчив у 1868 р. університет і був залишений у фізичній лабораторії в О.Г. Столетова. У 1875—1903 рр. вчений викладав у Київському університеті (з 1876 р. – професор, з 1890 р. завідувач фізичним кабінетом і лабораторією), у 1903—1905 рр. був ректором Харківського технологічного інституту, керував кафедрою фізики після М.П.

Авенаріуса протягом 1890—1903 рр. М.М.Шіллер є автором близько 90 наукових праць, в тому числі трьох курсів теоретичної фізики. Його наукові дослідження стосувалися теоретичної механіки, термодинаміки, математичної фізики, електродинаміки, оптики, молекулярної фізики та інших галузей. Він одним із перших фізиків застосував у 1879 р. закон термодинаміки до вивчення стану пружного тіла [318]. Вивчаючи пружність насичених газів, вчений теоретично довів, що кривизна поверхні рідини відіграє роль додаткової сили, і пружність насиченої рідини змінюється в той чи інший бік залежно від характеру дії, додатково прикладеної до поверхні рідини, яка досліджується на пружність насиченої пари (закон Томсона—Шіллера). Причому він не тільки розвинув теорію цього питання, а й підтвердив її.

Разом з оригінальними дослідженнями окремих наукових проблем М.М.Шіллер присвятив чимало праць аналізу основних понять і законів фізики, здебільшого термодинаміки. Він детально проаналізував основні термодинамічні поняття і закони – температуру, кількість теплоти, термічну рівноваги, перший і другий закони термодинаміки. Доповнивши й уточнивши поняття адіабатичного процесу у 1898, М.М.Шіллер показав, що диференціальне рівняння другого закону термодинаміки повинно мати інтегрувальний дільник, який є універсальною функцією температури [508—511]. Другий закон термодинаміки за Шіллером приводить до тих же наслідків, що і класичні формулювання. Зводячи основний зміст даного закону до твердження про існування інтегрувального дільника для  $dQ$ , М.М.Шіллер його формулює так: "Для даного тіла не можна підібрати такий адіабатний коловий процес зміни параметрів, незалежних від температури, за допомогою якого можна було б досягти безперервного підвищення або зниження температури тіла. Або інакше: при будь-якій оборотній адіабатній зміні тіла, яка характеризується за допомогою  $n$  незалежних один від одного параметрів, будь-який з вищезгаданих параметрів повертається до свого початкового значення, якщо інші  $n-1$  параметрів повертаються до своїх" [512].

Ім'я нашої співвітчизниці, що народилася в Києві, Тетяни Олексіївни Афанасьєвої-Еренфест, талановитого математика і фізика, на жаль, мало кому відомо навіть серед наукової громадськості. Її праці, присвячені обґрунтуванню статистичної механіки, зокрема, змісту поняття ентропії і принципу її існування, ролі ймовірності у фізичних процесах, логічному обґрунтуванню другого закону термодинаміки, почали публікуватися з 1906 р.



Можливість застосування методу статистичних ансамблів щодо реальних механічних систем строго довели Пауль та Тетяна Еренфести в 1911 р. у статті в Математичній енциклопедії [513]. Розробляючи ідеї Л. Больцмана, вони показали, що зміна функції  $H$ , яка залежить від процесу, підпорядковується виключно законам теорії ймовірності, застосування яких у статистичному обґрунтуванні поняття ентропії не заперечує принцип детермінізму. Тетяна Олексіївна в праці "До питання про кінетичне тлумачення необоротних процесів" також довела, що несумісність властивостей квазіперіодичності і переважного спадання  $H$ -функції є уявною, оскільки обидві властивості є логічними наслідками з тих самих основ теорії ймовірності. Вона побудувала функцію, яка явно поєднує ці властивості [514]. Тим самим Т.О.Афанасьєвою-Еренфест було зроблено принциповий крок в узгодженні припущення детермінізму всередині газу із застосуванням формул теорії ймовірності.

Т.О.Афанасьєва-Еренфест вводить поняття гіпотез першого і другого порядку і показує, що остання лежить в основі теорії газу за рівноваги, теорії стаціонарних процесів,  $H$ -теореми Больцмана. Згідно з її тлумаченням саме явище визначає і порядок гіпотези, і припустиму похибку. Незмінно застосовуючи гіпотезу одного порядку, ми тим самим припускаємо свого роду закономірність щодо досліджуваного явища, тобто статистичне обґрунтування поняття ентропії ймовірності не заперечує принцип детермінізму. Розуміння цього факту сприяло формуванню у фізиці уявлень про клас статистичних закономірностей, що охоплюють більш широке коло явищ та містять у собі, на відміну від динамічних закономірностей, об'єктивну випадковість.

Найбільш суттєвим результатом, який одержала Т.О.Афанасьєвою-Еренфест у 1925—1928 рр., став висновок, що другий закон термодинаміки можна обґрунтувати лише за допомогою аксіом, які перевіряються експериментально. Вона ділить другий закон і формулює чотири аксіоми, що приводять до чотирьох його еквівалентних формулювань для квазістатичних процесів. Ключовим моментом цих праць стало доведення необхідності розрізнення принципів існування і зростання ентропії, які були історично об'єднані. Крім того, Т. Афанасьєва-Еренфест вводить поняття елементарної необоротності (необоротності реальних, нестатичних процесів) і необоротності другого роду. Елементарна необоротність не збігається з поняттям нестатичності, а виводиться з двох аксіом: одна, що заперечує оборотність нестатичного процесу, і друга, що визначає його напрямом. Необоротність другого роду виводиться з властивостей квазістатичного процесу і відповідних аксіом.

Вона також обумовлює існування ентропії, зростання якої, у свою чергу, залежить від елементарної необоротності, що визначає односторонність реальних процесів [515].

Праці з аксіоматичної побудови статистичної механіки Т.О. Афанасьєвої-Еренфест разом з працями М.Шіллера, К.Каратеодорі та ін. створили базу для наступного кроку в узагальненні поняття необоротності — застосування поняття рівноваги до Всесвіту в цілому —, а також до створення термодинаміки необоротних процесів як загальної теорії реальних процесів у природі.

Як вже зазначалося, спочатку праці Л.Больцмана зі статистичного обґрунтування законів термодинаміки не привернули до себе уваги вчених. Одним з не багатьох фізиків, хто за життя Л.Больцмана уважно стежив за його роботами та усвідомлював глибину нових ідей, був наш співвітчизник М.М.Пирогов, син засновника сучасної хірургії М.І. Пирогова. Прогностичну цінність праць М.М.Пирогова зазначав і сам Л. Больцман. М.М.Пирогов підкреслював необхідність існування поряд з динамічними законами об'єктивних статистичних законів [516—519]. Так, в одній зі своїх праць він писав: "Ще в 1860 р. з'явився знаменний мемуар Clerk-Maxwella: Illustrations of the Dynamical Theory of Gases, якому, очевидно, призначено стати однією з відправних точок нової ери природознавства. Якщо період до 60-х років нинішнього століття справедливо може бути названий Newton'івською ерою, тобто ерою вивчення закономірного, то з 60-х років виявляється з особливою силою майже у всіх галузях природознавства новий напрямок: вивчення закономірності випадкового" [519,с.198].

М.М.Пирогов, розглядаючи ергодичну проблему, першим вірно вказав, що для суттєвого вдосконалення теорії реальних газів Ван дер Ваальса необхідно, крім парних взаємодій, досліджувати ще взаємодію груп молекул — агрегацій. Використовуючи цю модель, Пирогов дав якісний начерк теорії критичних явищ та загальної теорії двофазного стану газ—рідина. Щодо питання помилковості гіпотези теплової смерті Всесвіту, він висловлювався навіть більш категорично, ніж Л.Больцман. Заперечуючи В.Томсону і Р.Клаузиусу, М.М.Пирогов писав: "Я думаю, щодо сучасних відомостей, з однаковим успіхом можна захищати два зовсім протилежних положення: 1) переместимість світу постійно зростає, тому що стан світу не стійкий, і 2) переместимість світу є сталою, оскільки стан світу стаціонарний, і ті вражаючі нас зміни, що відбуваються у світі, суть не більше як неминучі коливання поблизу типового стаціонарного стану" [517,с.175].

Найбільш цікаві результати вченого стосуються питання статистичного обґрунтування другого закону термодинаміки і теорії реальних газів. Узагальнюючими дослідження М.М.Пирогова в цьому напрямку є праці 1890 р. "Про закон Boltzmann'a" і "Основи термодинаміки". Підхід М.М.Пирогова був іншим, ніж у Больцмана, для якого значну роль відігравали модельні уявлення про будову газів і механізм зіткнень між молекулами. М.М.Пирогов ставить питання у більш загальному вигляді. Перш за все він розробляє спеціальний математичний апарат, який відноситься до теорії імовірності. Цей апарат містив у собі ідеї майбутньої теорії випадкових процесів, яка почала розвиватися пізніше, вже в ХХ столітті.

При застосуванні розробленого математичного апарата до статистичного обґрунтування другого закону термодинаміки М.М. Пирогов пропонує розглядати макроскопічне тіло як систему з величезного числа  $N$  матеріальних точок. Стан кожної з них визначається шістьма величинами: координатами і компонентами швидкостей. Таким чином, загальний стан усієї системи може бути зображений як шестивимірна послідовність. Внаслідок величезного числа  $N$  ця послідовність може розглядатися як "суцільна". Аналізуючи передумови, що покладені в основу виведення розподілу швидкостей Максвеллом, М. М.Пирогов дійшов наступного висновку: закон розподілу Максвелла справедливий лише для безмежного простору. На думку М.М.Пирогова, вплив зовнішнього середовища, наприклад стінок, що обмежують об'єм газу, не сприяє встановленню максвеллівського хаосу. Необхідно знайти особливий механізм взаємодії між стінкою і газом, за якого у газі встановиться розподіл Максвелла. У сучасній статистичній фізиці припускають наявність флуктуаційних рухів у стінці, які і підтримують максвеллівській хаос у посудині. Однак цей шлях подолання труднощів, на які вказав М.М.Пирогов, не був єдиний. Зрівноважуючу дію зовнішнього середовища, що впорядковує певним чином хаос, можна не зводити до нуля, а у випадку наявності зрівноважуючих факторів обмежувати функції Максвелла, які приводять до молекулярно-кінетичного опису газу, що відповідає досліду. М.М.Пирогов вказав ці обмеження. Якщо відсутня зрівноважуюча дія на газ зовнішніх факторів, то при обчисленні середніх величин за допомогою максвеллівського розподілу необхідно брати інтеграли за нескінченними межами. У випадку, якщо дія зовнішніх зрівноважуючих факторів не може бути усунута, М.М.Пирогов показав, що необхідно обчислювати середні величини за допомогою інтегралів зі скінченними межами. Виявляється,

що при певних умовах операції можуть виконуватися, і головні результати кінетичної теорії будуть відповідати досліду.

Задовго до М.Планка М.М.Пирогов також припускав, що взаємодія матерії зі "світлоносним ефіром" (чорним випромінюванням) є причиною багатьох явищ, які не можна описати з точки зору максвеллівського хаосу, наприклад, залежність молекулярної теплоємності газу від температури. Так, якщо середню кінетичну енергію молекули обчислювати за допомогою максвеллівської функції, використовуючи, за Пироговим, граничні швидкості, які обмежують можливі рухи молекул газу, то одержуємо не лінійну залежність енергії молекули від абсолютної температури, а новий закон. Він з точністю збігається із середньою енергією молекули газу, яку їй приписує квантова теорія Планка.

### ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3

1. Статистична фізика виникла в середині ХІХ ст. завдяки перш за все працям з молекулярної фізики, а також спробам вчених пояснити на основі механіки закони термодинаміки (насамперед другий закон). Підґрунтям для розуміння необхідності запровадження ймовірнісних уявлень при формулюванні законів природи стала ідея про те, що макроскопічні властивості, які спостерігаються в реальному досліді, обумовлені мікроскопічними процесами, що розвиваються на атомно-молекулярному рівні.

2. Результатом синтезу молекулярно-кінетичних та термодинамічних уявлень в середині ХІХ– на початку ХХ ст. в працях Дж.Максвелла, Л.Больцмана та Дж.Гіббса, де було встановлено зв'язок між тепловою та механічною формами руху матерії, стало виникнення статистичної фізики як самостійного розділу науки.

3. Для розгляду процесу еволюції статистичної фізики нами запропонована та обґрунтована періодизаційна схема розвитку статистичної фізики.

4. Поступ світової науки та усвідомлення нових ідей вплинули на процес наукових досліджень в Україні. Проте природничі науки тут почали розвиватися дещо пізніше, ніж в європейських країнах, а саме, у ХІХ ст. Тому і передісторію статистичної фізики в Україні слід датувати хронологічними межами ХІХ— початок 30-х років ХХ ст.

5. Вперше питання пояснення будови матерії в Україні розглядалось в XVII—XVIII ст. викладачами Києво-Могилянської академії, але тільки у XIX ст. систематичні експериментальні роботи з термодинаміки М.Д. Пильчикова та О.П.Грузинцева, з дифузії М.О.Умова, з молекулярної фізики та критичного стану речовини М.П.Авенаріуса, а також перші теоретичні узагальнення ймовірнісних уявлень М.М.Пирогова, М.М. Шиллера, М.Смолуховського та Т.О.Афанасьєвої-Еренфест сприяли осмисленню статистичного підходу та усвідомленню сфери його застосування і започаткували побудову статистичної фізики в Україні.

## РОЗДІЛ 4 СТАНОВЛЕННЯ СТАТИСТИЧНОЇ ФІЗИКИ В УКРАЇНІ (30–40-і рр. ХХ ст.)

### 4.1. Формування нерівноважної статистичної фізики (світовий контекст) (30—40-і рр. ХХ ст.)

Після розглянутих вище фундаментальних праць Дж.Гіббса стала зрозумілою формальна структура рівноважної статистичної механіки. Значення цієї теорії було усвідомлено завдяки працям Г.Урсела (1928) та Дж.Майера (1937), які успішно застосували рівноважну статистичну механіку для виведення рівняння стану [520,521].

Кардинальною для подальшого розвитку статистичної фізики стала квантова теорія, початок якій поклав М.Планк у 1900 р. [456]. Використання у статистичній фізиці квантових уявлень започаткувало квантову статистичну фізику. Так, у 1924 р. Ш.Бозе [461] ввів розподіл за імпульсами квантів світла та винайшов його зв'язок з розподілом Планка, Е.Фермі (1925) [463] також одержав функції розподілу частинок, що підпорядковуються принципу Паулі. Зв'язок розподілів Фермі–Дірака та Бозе–Ейнштейна з математичним апаратом квантової механіки було встановлено у 1926 р. П.Діраком і описано у праці “Про основи квантової механіки”. Логічні принципи рівноважної статистичної механіки було критично опрацьовано П.Еренфестом та Т.О.Афанасьєвою-Еренфест (1911) [513], а її математичні методи широко розвинули Ч.Дарвін і Р.Фаулер (1922), які запропонували метод обчислення статистичного інтеграла [453—455].

Потреба розробити загальну точку зору на нерівноважні процеси та дослідити зв'язок між рівняннями типу Больцмана, що описують процеси перенесення, та рівнянням Ліувілля, яке є основним рівнянням теорії ансамблів, обумовила появу низки праць. У цьому напрямі першою була робота Ж.Івона (1935) [522], (пізніше—[523]), за нею вийшли роботи М.Борна і Г.Гріна (1946–1947) [524], підсумовані в книзі [525], а також роботи Дж.Кірквуда (1941–1947) [526] та М.М.Боголюбова (1946) [247]. Одним з результатів стало створення формальної теорії рідкого стану, в розвиток якої великий внесок зробив і також і Дж.Майер [527]. Дані роботи, разом з дослідженнями М.С.Крилова (1950) [528] започаткували динамічне обґрунтування статистичної теорії нерівноважних процесів.

Надзвичайно важливими для розвитку статистичної фізики в Україні стали також праці Л.Ландау, виконані ним в 30-ті рр. ХХ ст. у Харківському фізико-технічному інституті. Це, зокрема, створена ним теорія фазових переходів II роду, теорія Фермі-рідини та теорії надплинності, теорія космічних променів, результати з фізики плазми. Ці роботи, розвинуті в подальшому учнями Л.Д.Ландау, започаткували систематичні дослідження в галузі статистичної фізики в Україні.

Початок історії нерівноважної термодинаміки можна датувати 1931 роком, коли вийшли дві праці норвезького фізико-хіміка Л.Онсагера (Нобелівського лауреата 1968 р.) „Співвідношення взаємності в нерівноважних процесах” [529], у яких він розвинув засади загальної теорії, яка намічала єдиний підхід до розгляду нерівноважних процесів. Дана теорія, названа автором „квазітермодинамікою”, будувалась за аналогією з динамікою частинок, де головними були поняття сили та швидкості. Так, при розгляді таких необоротних процесів, як дифузія, теплопровідність та електропровідність, Л.Онсагер вводить „термодинамічні сили і швидкості.” Зокрема, термодинамічна сила – це величина, що характеризує ступінь відхилення системи від її термодинамічно рівноважного стану. У випадку електропровідності швидкістю є сила струму, а термодинамічною силою – ЕРС джерела

струму або від'ємний градієнт потенціалу поля. Для теплопровідності швидкістю є вектор потоку енергії, а сила пропорційна градієнту температури. На основі даного підходу Л.Онсагер запропонував лінійні термодинамічні рівняння руху, система яких може описати одночасні потоки енергії та дифузії двох речовин, теплопровідність в анізотропному тілі тощо. Ключовим моментом теорії Онсагера стало виведення умов для коефіцієнтів рівнянь. Виявилось, що справджується умова  $L_{ik}=L_{ki}$ , яка дістала назву співвідношень взаємності та привела до суттєвого спрощення термодинамічних рівнянь руху. Надалі з'ясувалось, що співвідношення взаємності тісно пов'язані з принципами симетрії, зокрема, з принципом Кюрі, в основу якого було покладено твердження про зв'язок симетрії системи з характером процесів у ній. Дані співвідношення відображають на макроскопічному рівні інваріантність мікроскопічних рівнянь руху відносно обернення часу.

Різні властивості співвідношень взаємності та межі їх застосовності пізніше вивчали Х.Казимір, П.Мазур та С.де Гроот, Й.Мейкснер, Л.Д.Ландау та Є.М.Ліфшиць, Кокс. Так, у 1945 р. Х.Казимір [530,531] сформулював співвідношення взаємності таким чином, що вони стали справедливими для більш широкого класу необоротних процесів, ніж це передбачалось Л.Онсагером. Починаючи з 1941 р. Й.Мейкснер, а пізніше І.Пригожин побудували феноменологічну теорію необоротних процесів, яка містила у собі як теорему взаємності Онсагера, так і безпосереднє обчислення для ряду фізичних випадків джерела ентропії, що відповідає некомпенсованому теплу Клаузіуса [532—534]. У цілому в працях цих вчених було показано, що співвідношення взаємності, хоч і залежать від молекулярної структури системи, проте виражають чисто феноменологічні зв'язки між величинами, які входять у термодинамічні рівняння руху. Отже, вони можуть розглядатися як один з принципів нерівноважної термодинаміки, який внаслідок лінійності рівнянь застосовний до систем, які не дуже сильно відхиляються від положення рівноваги.

Після Л.Онсагера найбільш суттєвий внесок у нерівноважну термодинаміку було зроблено нідерландськими вченими де Донде, І.Пригожиним, С.де Гроотом, К.Денбигом, П.Мазуром. Для подальшого розвитку нерівноважної теорії було необхідно встановити її зв'язок з фундаментальними динамічними принципами механіки. Запропонований у 1946 р. М.М.Боголюбовим динамічний підхід до обґрунтування та узагальнення кінетичного рівняння Больцмана дозволив виявити загальні принципи побудови скороченого опису макроскопічних систем та

побудови рівнянь нерівноважних процесів. Подальше розвинення динамічний підхід одержав у працях Л. Ван Хова та І.Пригожина. Оригінальний метод вивчення нерівноважних систем за їх реакцією на зовнішні механічні збурення без складання керуючих рівнянь запропонував Р.Кубо.

Фундаментальні праці зазначених вчених сприяли тому, що бурхливий розвиток у всіх галузях фізики в останні десятиліття ХХ ст. позначився, зокрема, на статистичній фізиці нерівноважних станів, яка виокремилась у самостійний розділ науки, і узагальненням якої став новий міждисциплінарний напрям фізичної науки — синергетика.



#### 4.2. Л.Д.Ландау і початок систематичних досліджень у галузі статистичної фізики в Україні (30-ті рр. ХХ ст.)

Фізика в Україні набула інтенсивного розвитку після створення низки наукових інститутів, це перш за все Український фізико-технічний інститут (УФТІ) в Харкові у 1928 р. Завдяки роботам цього інституту було суттєво змінено стан фізичних досліджень в Академії наук, започатковано та зроблено значний внесок у розвиток ключових напрямів: фізика твердого тіла, фізика конденсованого стану, фізика низьких температур, ядерна фізика, радіофізика.

УФТІ було організовано за рішенням уряду України на основі пропозиції академіка А.Ф.Іоффе — створити ряд фізичних інститутів на всій території СРСР, зокрема, в Харкові — столиці України, великому промисловому й культурному центрі. Головними співробітниками УФТІ стали фізики, що переїхали з Ленінградського фізико-технічного інституту — І.В.Обреїмов, О.І.Лейпунський, Л.В.Шубников, К.Д. Синельников, А.К.Вальтер, В.С.Горський, Г.Д.Латишев, А.Ф.Прихотько, О.М.Трапезникова, Л.В.Розенкевич та інші. До складу УФТІ ввійшли також молоді харківські вчені А.О.Слуцкін і Д.С.Штейнберг.

У серпні 1932 р. теоретичний відділ УФТІ очолив Лев Давидович Ландау, який, незважаючи на свої 24 роки, вже був всесвітньо відомим фізиком. Діяльність Л.Д.Ландау значною мірою сприяла перетворенню УФТІ у світовий центр фізичної науки [243,47]. Людина величезного творчого потенціалу, теоретик надзвичайно широкого світогляду, один з останніх універсалів фізики, Л.Д.Ландау здійснив могутній вплив на формування та становлення стиля фізичного мислення. Він також увійшов в історію науки як талановитий педагог і вихователь кадрів теоретиків, який розробив оригінальну систему їх ефективної підготовки, створив велику і авторитетну наукову школи зі своїм стилем і традиціями

Говорячи про свого вчителя, один з перших учнів Л.Д.Ландау академік НАН України О.І.Ахієзер писав: „Широта та діапазон його творчих інтересів справді величезні. У наш час важко, а може навіть і неможливо знайти ще одного вченого такого ж діапазону, чи, висловлюючись фізично, спектра інтересів. Універсалізм його був унікальним, бо характеризувався рідкісною глибиною проникнення в суть фізичних явищ” [535 с.60].

"Ландау був фізиком „надекстракласу”, — зазначав В.Л. Гінзбург. — Це був абсолютно унікальний фізик...І якщо я виділяю Ландау з усіх,

то тому, що оцінка його "класу" складається з багатьох інгредієнтів. По-перше, це наукові досягнення...По-друге, це рідкісна універсальність знань, знання всієї фізики. І, по-третє, він був Учителем з великої літери, Вчителем за покликанням. Добуток трьох таких "множників" занадто великий" [536, с.73-74].

Лев Давидович народився в Баку 22 січня 1908 р. У 1922 р. поступив до Бакінського університету, але 1924 р. перевівся на фізичне відділення Ленінградського університету, який закінчив у 1927 р. У 1929—1931 рр. він стажувався у Данії, Великобританії та Швейцарії. Особливим стало для молодого вченого перебування в Копенгагені, в Інституті теоретичної фізики Нільса Бора та можливість спілкування з провідними фізиками того часу — М.Борном, В.Гейзенбергом, В.Паулі, П. Діраком. Після повернення у 1931 р. на Батьківщину Л.Д.Ландау починає працювати у Ленінградському фізико-технічному інституті, а в 1932 р. очолює теоретичний відділ УФТІ.

Харківський період для Л.Д.Ландау був в науковому відношенні напруженим і плідним. Саме тут почалася реалізація його ідей щодо навчання теоретичній фізиці, сформувалися його перші учні, які започаткували наукову школу. У 1932 — 1937 рр. він керував теоретичним відділом УФТІ й одночасно завідував кафедрою теоретичної фізики Харківського механіко-машинобудівного інституту (нині — політехнічний інститут), з 1935 р. — кафедрою експериментальної фізики Харківського університету [537,243].

У ті роки Л.Д.Ландау та його учні виконали низку важливих фундаментальних робіт. Так, він один з перших 1933 р. ввів поняття антиферромагнетизму як особливої фази магнетиків [538 т.1, с.97–101] і невдовзі після відкриття цього явища Л.В.Шубниковим обґрунтував його теоретично. У 1934 Л.Д.Ландау та Є.М.Ліфшиць побудували теорію утворення електронно-позитронних пар при зіткненнях швидких заряджених частинок (до цього досліджувався лише механізм утворення пар фотонами) [538 т.1, с.110—122]. У 1935 р. він разом з Є.М.Лифшицем розвинув послідовну термодинамічну теорію доменної структури ферромагнетиків та теорію дисперсії магнітної проникності ферромагнетиків у змінному магнітному полі, встановив рівняння руху магнітного моменту домену в змінному магнітному полі (рівняння Ландау — Ліфшиця), побудував теорію ферромагнітного резонансу [538 т.1, с.1128—1143]. У 1936 р. Л.Д.Ландау, О.І.Ахієзер та І.Я.Померанчук пояснили розсіяння світла світлом в області високих частот, коли неможливо побудувати функцію Лагранжа електромагнітного поля [538, т.1, с.222—

223].

Працями Л.Д.Ландау зі створення теорії фазових переходів II роду, теорії фермі-рідини та теорії надплинності, теорії космічних променів, фізики плазми було започатковано систематичні дослідження в галузі статистичної фізики в Україні. Ще в своїй студентській праці 1926 р. він уперше ввів для опису стану систем поняття матриці густини ( статистичний оператор), що стало вирішальним для квантової статистики і кінетики квантових систем. Головне місце в науковій роботі Ландау як за безпосереднім значенням, так і за обсягом застосувань займає теорія фазових переходів II роду, побудована у 1937 р. [539]. Ідеї, які були покладені в її основу, містилися вже в його замітці 1935 р. [8].

Поняття про фазові переходи різного порядку вперше з математичної точки зору було запроваджено П.Еренфестом, залежно від порядку термодинамічних похідних, що можуть зазнавати стрибків у точці переходу. Однак питання про те, які саме з цих переходів справді можуть відбуватися, а також у чому полягає їх фізична природа, залишалися відкритими.

Якщо звернутися до самого феномену фазових переходів, то слід зазначити, що зазвичай при фазовому переході спостерігається стрибок стану тіла, наприклад, перебудова кристалічної ґратки. Однак можливий і інший тип переходів, пов'язаних зі зміною симетрії, коли жодного стрибка в зміні стану тіла не відбувається, і розміщення атомів у кристалі змінюється неперервно, але як завгодно малий зсув атомів від їх початкового симетричного розміщення є достатнім для того, щоб симетрія ґратки одразу змінилися. Такий перехід однієї кристалічної модифікації в іншу називають фазовим переходом II роду на відміну від звичайних фазових переходів I роду.

У випадку фазових переходів II роду стрибкоподібно змінюються похідні термодинамічного потенціалу: теплоємність, стисливість, коефіцієнт теплового розширення. При цьому перші похідні залишаються незмінними, а термодинамічні функції стану тіла (його ентропія, енергія, об'єм і т.п. ) — неперервними при проходженні через точку переходу. Це означає відсутність виділення чи поглинання тепла, яке характерне для переходів I роду.

Загальна термодинамічна теорія фазових переходів II роду була розроблена Ландау в 1937 р. Він обумовив фазовий перехід II роду зміною симетрії системи, вперше вказавши на глибокий зв'язок між можливістю існування неперервного (у розумінні зміни стану тіла) фазового переходу і стрибкоподібною зміною деякої властивості симетрії

тіла в точці переходу. Л.Д.Ландау також показав, що в точці переходу спостерігається не будь-яка зміна симетрії. Він запропонував метод, що дозволяє визначити, які типи зміни симетрії можливі.

Оскільки стани обох фаз у точці переходу II роду збігаються, то симетрія тіла саме в точці переходу повинна містити у собі елементи симетрії обох фаз. Виявилось, що вона збігається із симетрією з однієї сторони від цієї точки, тобто із симетрією однієї фази. Таким чином, симетрія однієї з фаз є більш високою, а симетрія іншої фази — більш низкою. На відміну від фазового переходу II роду, зміна симетрії тіла при фазовому переході I роду не має жодних обмежень, і симетрії обох фаз можуть не мати нічого спільного. У переважній більшості всіх відомих фазових переходів II роду більш симетрична фаза відповідає вищим температурам, а менш симетрична — нижчим. Зокрема, перехід II роду з упорядкованого в неупорядкований стан відбувається при підвищенні температури. Це правило, однак, не є термодинамічним законом і допускає винятки.

Зміна симетрії тіла при фазовому переході II роду може відбуватися як при зміщенні атомів, так і при зміні впорядкованості кристала. Може здійснюватися також і взаємне перетворення двох фаз, які розрізняються іншою властивістю симетрії. Такими, наприклад, є точки Кюрі феромагнітних речовин (точки перетворення феромагнетика у парамагнетик), коли відбувається зміна симетрії розміщення елементарних магнітних моментів у тілі, перехід металу у надпровідний стан (за відсутності магнітного поля), перехід рідкого гелію в надплинний стан. Тому розвинута Л.Д.Ландау кількісна теорія була заснована на припущенні про регулярність розкладання термодинамічних величин поблизу точки переходу за степенями введеного ним коефіцієнта впорядкування. Це дозволило йому дослідити відомі випадки фазового переходу II роду, побудувати загальну класифікацію всіх можливих переходів та їх особливостей, дати термодинамічне тлумачення явищам надплинності та надпровідності. Так, на цій основі Л.Д.Ландау розробив теорію проміжного стану надпровідників, показавши, що в цьому стані надпровідник складається з послідовних шарів нормальної та надпровідної фази. Спільно з І.Я.Померанчуком у 1937 Л.Д.Ландау видав працю „Про властивості металів при дуже низьких температурах [538, т.1, с.208—221]. Нині зрозуміло, що теорія фазових переходів II роду Ландау не відображала всі властивості і механізм фазового переходу II роду, не враховувала можливі особливості величин у точці переходу. В останні роки свого життя Л.Д.Ландау багато працював над проблемою з'ясування

характеру цієї особливості, та, на жаль, не встиг прийти до однозначних висновків.

Дві праці Л.Д.Ландау зі статистичної фізики стосуються фізики плазми. Характерні особливості, які відрізняють плазму від інших макроскопічних середовищ, безпосередньо зв'язані з її колективними властивостями, що виявляються в існуванні різних власних хвиль та коливань. Одна із зазначених праць Л.Д.Ландау 1936 р. “Кінетичне рівняння у випадку кулонівської взаємодії” [541], над якою він працював у Харківському фізико-технічному інституті, мала надзвичайно важливе значення для започаткування робіт з фізики плазми в Україні. Там вперше було одержати кінетичне рівняння з урахуванням кулонівської взаємодії між частинками. Через повільне зменшення кулонівських сил у цьому випадку не можна було застосувати звичайні методи для побудови кінетичних рівнянь. Проте Ландау вдалося вивести кінетичне рівняння для плазми у випадку кулонівської взаємодії та одержати інтеграл зіткнень для заряджених частинок при їх кулонівській взаємодії. Ці результати стали основою теорії релаксаційних процесів у плазмі. Значення цієї роботи було усвідомлено пізніше, коли почала розглядатися можливість побудови термоядерних установок і фізика плазми стала однією з пріоритетних галузей науки. Відтоді одержаний інтеграл зіткнень, який використовується в задачах з релаксації у плазмі, електропровідності та нагрівання плазми, почали називати інтегралом зіткнень Ландау.

Інший важливий результат Л.Д.Ландау в царині фізики плазми стосується коливань плазми і полягає у тому, що було підтверджено закон дисперсії хвиль Ленгмюра, проте показано наявність їх згасання (згасання Ландау) у випадку плазми без зіткнень, але з урахуванням так званого самоузгодженого поля частинок, що описується кінетичним рівнянням Власова [542]. Це означало, що навіть в умовах високих частот, коли зіткненнями між частинками в плазмі можна знехтувати, коливання будуть все ж таки згасаючими. Таким чином, ця праця Л.Д.Ландау разом з працею А.О.Власова [543] стала основоположною у побудові кінетичної теорії плазми.

Після цього з'явилися численні статті, у яких було пояснено фізичну природу згасання Ландау та показано, що воно зумовлюється резонансною взаємодією електронів із самоузгодженим полем хвилі, тому відіграє важливу роль в усіх плазмових процесах. Від неї було започатковано ще один важливий напрям у фізиці плазми, розвиток якого належить учням і послідовникам Л.Д.Ландау. Це — дослідження взаємодії пучків заряджених частинок із плазмою. Так, у 1948 р. О.І. Ахієзер спільно з Я.Б.Файнбергом незалежно від Д.Бома і Е.Гросса (1949 р.) передбачили ефект пучкової нестійкості плазми, через яку проходить електронний пучок. Даний ефект виявлявся як виникнення у плазмі не згасаючих, а зростаючих коливань [544]. Разом з працями А.О.Власова та Л.Д.Ландау з фізики плазми ця праця була покладена в основу сучасних досліджень колективних процесів у плазмі і мала важливе значення для практичних застосувань, зокрема для розробки методів нагрівання плазми.

Праці Л.Д.Ландау з вивчення закономірностей процесів у плазмі, а також їх застосування до термоядерного синтезу започаткували традиційний напрям фізики і техніки в Україні. Ці питання досліджувались у наукових школах самого Л.Д.

Ландау, а також у дочірніх школах академіків О.І.Ахієзера, Я.Б.Файнберга, О.Г. Ситенка.

Л.Д.Ландау належать також пріоритетні результати щодо застосування методів статистичної фізики до теорії ядра. Основою положенням у вихідному уявленні Н.Бора, що стало засадами розвитку нових поглядів на ядерні реакції, був розгляд ядра як системи з великим числом ступенів вільності. Тому взаємодія налетілої частинки з ядром-мішенню (перший етап ядерної реакції) вже не могла тлумачитися як задача про рух однієї частинки у силовому полі ядра, адже при зіткненні енергія цієї частинки розподіляється між багатьма ступіннями вільності ядра. Як наслідок виникає сильно збуджена система (проміжне або складене ядро), властивості якої вже практично не залежать від індивідуальних особливостей першого етапу реакції.

Цей важливий висновок про незалежність другої фази реакції (розпад складеного ядра) від її першої фази (утворення складеного ядра) обумовив розуміння того, що процес розпаду ядра практично цілком визначається властивостями збуджених станів проміжного ядра, такими як енергія, спін, парність. Отже, головною проблемою в дослідженні ядерних реакцій стало вивчення збуджених станів ядер.

Дослідженням цих питань займався Я.І.Френкель, який у 1918—1921 рр. працював в Україні у Кримському університеті. У своїх роботах він, виходячи з уявлення ядра як системи, що складається з великої кількості частинок, робить сміливу для того часу спробу — застосувати до ядра замість законів механіки закони статистики, що дало змогу описувати збуджені стани, виходячи з нових понять. Уперше таку думку Я.І.Френкель висловив у березні 1936 р. у своєму виступі на сесії Фізико-математичного відділення Академії наук СРСР у Москві.

На основі цих нових ідей Л.Д.Ландау, а пізніше В.Вайскопф і Х.Бете створили статистичну теорію ядра, що тепер є одним з основних розділів ядерної фізики. Початок розвитку ідеї Френкеля про статистичний розгляд явищ у атомному ядрі був покладений у праці Л.Д. Ландау "До статистичної теорії ядер", надрукованої у 1937 р. [545]. Виходячи із загальних міркувань та розглядаючи систему нуклонів ядра як вироджений ідеальний фермі-газ, що підпорядковується статистиці Фермі — Дірака, він вивів основні формули і співвідношення, зокрема, формули для розподілу ядерних рівнів і визначення порядку їх ширини. "Якщо враховувати взаємодію частинок у ядрі, то, звичайно, немає жодних підстав розглядати ядро як "тверде тіло", тобто як "кристал", а варто розглядати його як "рідку краплю" з протонів і нейтронів. На відміну від звичайних рідин у цій рідині суттєву роль відіграють квантові ефекти, тому що квантова невизначеність координат частинок всередині ядра значно більша за їх взаємні відстані. Незважаючи на те, що ми ще не маємо методу для теоретичного дослідження "квантових рідин", можна все ж таки одержати деякі властивості ядер, застосувавши до них статистичні міркування", — пояснював свій підхід Ландау.

“Будемо вважати енергію ядра в нормальному стані рівною нулю. У цьому стані "температура" ядра  $T$  теж дорівнює нулю ( $T$  ми будемо вимірювати нижче в енергетичних одиницях). Оскільки енергія "збудження" ядра у випадках, що нас цікавлять, мала порівняно з енергією зв'язку ядерних частинок, то і температуру  $T$  збудженого ядра можна вважати малою. Тому вільну енергію  $F$  збудженого ядра можна розкласти в ряд за степенями  $T$ . Обмежуючись першим членом, маємо

де  $\dots$  — стала. Членом  $T$  в першому степені нехтуємо відповідно до теореми Нернста. Ту обставину, що розкладання в ряд повинно починатися у рідин від члена  $T^2$ , можна вивести як з аналогічних співвідношень для газів, так і безпосередньо з дослідів Кеєзона, згідно з якими теплоємність електронної рідини в металах пропорційна  $T$  ", — писав він. [545, с. 819—820 ].

Виходячи із зроблених припущень, Л.Д.Ландау виводить наступне основне рівняння для ентропії  $S$  збудженого ядра:

$$S = \dots,$$

а також одержує число рівнів у одиничному інтервалі енергії, тобто "щільність" квантованих рівнів ядра:

Ця формула визначає розподіл за енергіями всіх рівнів, з усіма можливими моментами обертання. З неї можна одержати обернену величину  $=dE/dN$ , що виражає середню відстань між сусідніми збудженими рівнями ядра на шкалі енергії.

Далі в праці Ландау розглядаються питання станів ядра з певним моментом, шириною резонансних рівнів для нейтронів при розсіянні (пружному і непружному), розрахунку радіаційних переходів ядер із збудженого стану. Ці питання нині становлять основу статистичної теорії ядер, тому їх розгляд Л.Д.Ландау був значною віхою у її розвитку.

Харківський період наукової творчості Л.Д.Ландау важливий також тим, що саме на цей час припадає початок формування наукової школи вченого [537,243]. Мету Л.Д.Ландау в УФТІ було чітко визначено: створення теоретичного відділу, виявлення творчої молоді і робота з нею, наукова діяльність у сфері теоретичної фізики, педагогічна робота в харківських вузах, організація семінару, написання книг і оглядів з теоретичної і загальної фізики, співпраця з експериментаторами інституту . Все це він повністю реалізував за короткий час. Співробітники

теоретичного відділу, на думку Л.Д.Ландау, мають бути єдиним цілим в організаційному плані, інтенсивно займатися науковою працею, бути строго дисциплінованими, обов'язково складати екзамени з теоретичної фізики та брати участь у теоретичному семінарі.

Особистість Л.Д.Ландау викликала захоплення творчої молоді. Його доступність, постійна готовність до обговорення фізичних проблем визначили навколо вченого коло осіб, які бажали з ним працювати. Однак Л.Д.Ландау чітко розумів, що багато хто з них не має достатньої професійної підготовки, тому з 1933 р. почав створювати програми необхідного мінімуму знань у галузі теоретичної фізики і математики, оволодіння яким було обов'язковим для молодих фізиків-теоретиків (теормінімум Ландау).

"Питання навчання теоретичній фізиці, як і фізиці в цілому, зацікавили його ще зовсім молодим, — згадував Є. М. Ліфшиць. — Саме тут, у Харкові, він уперше став розробляти програми "теоретичного мінімуму" — основних знань з теоретичної фізики, необхідних для фізиків-експериментаторів, і окремо для тих, хто хоче присвятити себе професійній дослідницькій роботі з теоретичної фізики. Не обмежуючись розробкою одних лише програм, він читав лекції з теоретичної фізики для співробітників УФТІ, а на фізмеху — для студентів. Захоплений ідеями перебудови викладання фізики в цілому, він прийняв завідування кафедрою загальної фізики в ХДУ... " [546, с.12].

Л.Д.Ландау надавав великого значення оволодінню фізиком-теоретиком математичною технікою, тому претендентам у теоретики перш за все необхідно було витримати іспит з математики в її практичних аспектах, а потім — іспити з фізичної частини програми теормінімуму, що містили у собі основні знання з семи розділів теоретичної фізики: механіки, теорії поля, квантової механіки, статистичної фізики, механіки суцільних середовищ, електродинаміки, релятивістської квантової теорії. На думку Л.Д.Ландау, цими знаннями мали володіти всі теоретики незалежно від майбутньої спеціальності, оскільки теоретик повинен у "чорновому варіанті" знати всю теоретичну фізику, а викладацька діяльність повинна йому в цьому допомогти. Після опанування основами теоретичної фізики учні могли розв'язувати конкретні фізичні задачі, обов'язково поєднуючи наукову працю з викладанням, причому курси щоразу змінювалися. Таким чином, молоді теоретики ставали фахівцями широкого профілю.

Теормінімум Ландау виявився одним з найбільш дієвих способів постійного наукового контакту з вчителем. Екзамен став тією основою, на



якій виникла наукова школа, адже практично всі учні і співробітники вченого пройшли через теормінімум. Це дало підставу І.М.Халатникову написати: "Школа Ландау виникла не стихійно, вона була задумана, запрограмована, як тепер говорять, а теормінімум став механізмом, що дозволяв робити протягом багатьох років селекційну роботу — відбирання талантів" [547,с.267—268].

Органічно пов'язаним з теормінімумом був і багатотомний курс теоретичної фізики, написаний Л.Д.Ландау з одним з його найближчих учнів Є.М.Ліфшицем. Ідея курсу як серії монографій, у яких викладаються основні розділи теоретичної фізики, народилася в Харкові, там же почалася і її реалізація. Так, у статистичній фізиці викладалась також термодинаміка, причому на основі загального розподілу Гіббса, завдяки чому встановлювався її глибокий зв'язок зі статистичною механікою [250]. Семитомний курс теоретичної фізики, практично завершений ще за життя Л.Д.Ландау, являв собою енциклопедію теоретичної фізики, в той же час слугував методичним посібником для науковців, аспірантів і студентів. Книги курсу стали настільними, неодноразово перевидавалися і перекладалися багатьма мовами. Разом з теормінімумом Ландау курс теоретичної фізики відіграв значну роль у підготовці кадрів фізиків-теоретиків у нашій країні. У харківський період учнями Ландау були Є.М.Ліфшиць, О.С.Компанієць, О.І.Ахієзер, І.Я.Померанчук, І.М.Ліфшиць, В.Г.Левич, В.Л.Герман та інші.

Одним з учнів Л.Д.Ландау харківського періоду був В.Л.Герман, який провів ряд досліджень із взаємодії світла з атомними системами. Діяльність вченого мало висвітлена в історико-науковій літературі, однак нами знайдені архівні матеріали, які свідчать, що Веніамін Львович Герман народився 10 травня 1914 р. у Замброво (Польща). Закінчив Харківський університет (1936 р.), у якому з 1936 р. почав викладати (з 1944 р. був керівником кафедри теоретичної механіки) та водночас працювати в Харківському фізико-технічному інституті (у 1945 р. став доктором фізико-математичних наук, у 1946 — професором). У 1955—1964 рр. очолював відділ теоретичної фізики новоствореного Інституту радіофізики та електроніки, підготував 15 кандидатів наук [548]. Праці В.Л.Германа стосувались фізики твердого тіла, зокрема, тензорних властивостей кристалів, теорії суцільних середовищ, квантової механіки, електродинаміки і теорії відносності, нелінійної фізики, кавітації, теорії спектрів, поляризації світла. Він дослідив взаємодію світла з атомними системами, побудував теорію пластичності анізотропних середовищ, розв'язав ряд важливих задач статистичної радіофізики, а саме, побудував теорії розсіяння, поглинання та поширення радіохвиль [549—556]. Під час керівництва В.Л.Германа кафедрою теоретичної механіки Харківського університету там почали розроблятися нові напрями, такі як магнітогазодинаміка, астрофізика, теорія пластичності і температурних напруг, кристалофізика, газо- та магнітодинамічна теорія мастил, анізотропна теорія пружності, теорія ударних хвиль, теорія турбулентності та теорія граничного шару. Проте головним напрямом досліджень кафедри стала механіка суцільних середовищ. В.Л.Герман ввів у учбові плани курси магнітної гідродинаміки та тензорного аналізу, об'єднав декілька окремих дисциплін в один курс механіки суцільних середовищ. Помер вчений 24 жовтня 1964 р.

На початку 1937 р. обстановка навколо Ландау, яка на тлі посилення репресій сталінського режиму нагніталась його недоброзичливцями, дуже ускладнилася і він змушений був переїхати до Москви, залишивши Харківський університет і УФТІ. У лютому 1937 р. Л.Д.Ландау очолив теоретичний відділ Інституту фізичних проблем АН СРСР. На жаль, переїзд не дав можливості вченому уникнути арешту. Він майже рік провів у в'язниці.

У Москві відбувався інтенсивний розвиток школи Ландау. Цьому значною мірою сприяли організований ним теоретичний семінар, де доповідалися оригінальні роботи і реферувалися статті з найбільш авторитетних фізичних журналів. Саме тут виявлялася та універсальна підготовка, що давав теормінімум. Зробити доповідь на семінарі було важко, але почесно. Доповідача піддавали наче "допиту з пристрасстю", учасникам дозволялося перебивати його. Скоріше це була не доповідь, а діалог між доповідачем і аудиторією на чолі з Л.Д. Ландау. О.І.Ахієзер згадував, що семінар був своєрідним явищем – не просто зборами, на яких надають слово і чемно дякують, а скоріше "запорозькою січчю", на якій на доповідача, що уособлював у собі автора, "накидався" Ландау зі своїми питаннями і величезним критицизмом. Відбувалася своєрідна боротьба розумів, що було дуже цікаво для всіх учасників семінару.

Л.Д. Ландау привчав своїх учнів до самостійності, не ставив перед ними задач і не давав тем, вважаючи, що учні повинні самі знаходити їх. Він також ніколи не робив того, що, на його думку, повинні були робити самі учні. Але коли учень, винайшовши задачу і зробивши попередні викладки, зупинявся на складному етапі, Ландау давав пораду, а іноді допомагав навіть серйозним розрахунком. У цьому виявлявся науковий стиль Л.Д.Ландау, якому були властиві ясність і чіткість постановки питань, бачення найбільш прямого шляху їх вирішення, прагнення "тривіалізувати" складні речі. Усі ознаки цього стилю містять у собі його чіткі і ясні праці. Ландау ретельно обмірковував кожну фразу, яку після знаходження найбільш вдалого формулювання один з учнів, з ким він у цей час працював, записував. Вчений залучав до підготовки статей своїх найближчих співробітників, найчастіше Є.М.Ліфшиця. Саме в такий спосіб відточувався стиль викладання та водночас вирішувалися робочі питання.

У 1962 р. відбулося непоправне — автомобільна катастрофа зупинила інтенсивну наукову роботу Л.Д.Ландау, і хоч його життя було врятовано, він вже не міг повернутися до творчої діяльності. Помер вчений 1 квітня 1968 р.

Наукові напрями, започатковані Ландау, розроблялися далі його учнями. Зі створенням у 1964 р. Інституту теоретичної фізики АН СРСР, що нині носить ім'я Л.Д.Ландау, вони сформувалися інституціонально і продовжують відігравати провідну роль у сучасній теоретичній фізиці. Стиль школи Ландау, її дух, високий дослідницький клас існують і зараз, оскільки ряд учнів (І.М.Ліфшиць, А.Б.Мігдал, І.Я.Померанчук, О.І. Ахієзер) стали засновниками власних теоретичних шкіл. Вони зберегли успадковані традиції школи, демонструючи тим самим її еволюцію, цілісність та ефективність методів підготовки молодих теоретиків, запроваджених Л.Д.Ландау.

#### 4.3. Розгортання широкомасштабних досліджень зі статистичної фізики в Україні.

Ідеї та методи статистичної фізики також набули інтенсивного розвитку у працях академіка НАН України Миколи Миколайовича Боголюбова та його наукової школи, яка працювала водночас з науковою школою Л.Д.Ландау. Різні аспекти статистичної фізики стали домінуючими в творчості М.М.Боголюбова на початку 40-х років після розробки ним проблем нелінійної механіки, і вивчалися ним до останніх днів життя. Ці дослідження охоплювали обґрунтування статистичної механіки, рівноважну статистичну механіку класичних і квантових систем, нерівноважну статистичну механіку. Запропоновані М.М.Боголюбовим методи виявились надзвичайно ефективними та привели до низки принципових результатів, що започаткували новий підхід та новий етап у цій галузі знання.

Основою досліджень М.М.Боголюбова зі статистичної фізики стали його попередні праці з математичної фізики. Крім строгого обґрунтування асимптотичних методів нелінійної механіки, М.М.Крилову і М.М.Боголюбову також належить ряд теорем нелінійної механіки, що стосуються абстрактної теорії динамічних систем. Одним з постулатів, що був покладений у основу статистичної фізики, є постулат про ергодичність, згідно з яким середні характеристики систем частинок за часом та за фазовим простором збігаються. Наприкінці 30-х років Дж. фон Нейман і Г. Біркгоф довели ергодичні теореми, пов'язані з ергодичною гіпотезою Больцмана. При доведенні вони припустили в динамічній системі наявність інваріантної міри. Для гамільтонових систем такою мірою, згідно з теоремою Ліувілля, є звичайний об'єм фазового простору, проте чи існує інваріантна міра довільної динамічної системи, було невідомо.

У 1936—1937 рр. М.М.Крилов і М.М.Боголюбов дали позитивну відповідь на це складне питання. Досліджуючи нормальні структури точних розв'язків рівнянь за допомогою топологічних методів, зокрема, досліджень А.Пуанкаре і А.Данжуа відносно відображення тора на себе, М.М.Крилов та М.М.Боголюбов дійшли висновку про те, що майже періодичність є скоріше за все винятком, ніж правилом. При цьому виникла потреба розгляду різних середніх значень динамічних змінних як функцій часу [557,558]. Таким чином, М.М.Крилов і М.М.Боголюбов підійшли до ергодичної теорії. У вересні 1935 р. на Першій міжнародній конференції у Москві вони зробили доповідь "Загальна теорія міри та її застосування до вивчення динамічних систем нелінійної механіки." Результати цих досліджень було викладено в 1937 р. перш за все у праці "Загальна теорія міри в нелінійній механіці", де вони встановили існування інваріантної міри компактної динамічної системи, ввели важливе поняття ергодичної множини та довели ряд теорем щодо розбиття інваріантної міри на міри, локалізовані в ергодичних множинах [559,560]. Ця праця була першим значним результатом з функціонального аналізу в Україні і принесла авторам широке визнання. Один з творців ергодичної теорії Дж. фон Нейман надіслав їм листа, в якому вітав з успіхом.

Результати М.М.Боголюбова з нелінійної механіки та абстрактної теорії динамічних систем, крім самостійного значення, започаткували дослідження широкого кола питань топологічної динаміки та статистичної механіки, розробку яких він почав в циклі праць 1937—1939 рр., присвячених вивченню динамічних систем, що знаходяться під впливом випадкових збурень. Так, у спільній з М.М.Криловим праці 1939 р. розглядалися проблеми виведення на основі методів теорії збурень фундаментальних для статистичної механіки рівнянь Фоккера—Планка для динамічних систем із випадковою силою, без припущення існування ймовірності переходу з одного стану в інший, як це розглядалося раніше [561]. Ними досліджувались ергодичні властивості процесу Маркова та вперше розглядалися диференціальні рівняння з "білими шумами", які становлять основу сучасної теорії стохастичних диференціальних рівнянь [560,562—565]. Даний напрям в подальшому розробляв учень М.М.Боголюбова член-кореспондент НАН України Й.І.Гіхман.

Фактично в цих роботах вже було використано новий підхід, який пізніше М.М.Боголюбов з успіхом застосував у статистичній механіці. Суть його полягала в тому, що основні рівняння статистичної механіки виводяться на основі мінімально необхідних фундаментальних принципів

без додаткових, чисто технічних припущень.

На момент звернення М.М.Боголюбова до статистичної фізики формальна структура рівноважної статистичної механіки вже була зрозумілою завдяки фундаментальним працям Дж. Гіббса. Значення цієї теорії усвідомили після праць Г.Урсела (1928 р.) та Дж.Майєра (1937 р.), які успішно застосували рівноважну статистичну механіку для виведення рівняння стану [520,521]. Логічні принципи рівноважної статистичної механіки критично опрацювали П.Еренфест та Т. Афанасьєва-Еренфест (1911 р.) [513], а її математичні методи широко розвинули Ч.Дарвін і Р. Фаулер (1922 р.), які запропонували метод обчислення статистичного інтеграла [453—455].

Кардинальною для подальшого розвитку статистичної фізики стала квантова теорія, яку започаткував М.Планк у 1900 р. [456]. На основі використання у статистичній фізиці квантових уявлень сформувалась квантова статистична фізика. Так, у 1924 р. Ш.Бозе [461] ввів розподіл за імпульсами квантів світла та винайшов його зв'язок з розподілом Планка, а також Е.Фермі (1925) [463] одержав функції розподілу частинок, що підпорядковуються принципу Паулі. Зв'язок розподілів Фермі—Дірака та Бозе—Ейнштейна з математичним апаратом квантової механіки було встановлено у 1926 р. П.Діраком. З цих робіт бере початок квантова статистична фізика.

Потреба розробити загальну точку зору щодо нерівноважних процесів та дослідити зв'язок між рівняннями типу Больцмана, що описують процеси перенесення, та рівнянням Ліувілля, обумовила появу низки праць. У цьому напрямі першою була праця Ж.Івона (1935 р.) [522], (пізніше — [523]), за нею вийшли праці М.Борна і Г.Гріна (1946—1947 рр.) [524], підсумовані в книзі [525], а також Дж.Кірквуда (1941—1947 рр.) [526] та М.М.Боголюбова (1946 р.) [247]. Зокрема, було створено формальну теорію рідкого стану, в розвиток якої значний внесок здійснив і Дж.Майєр [527]. Ці праці, разом з дослідженнями М.С.Крилова 1950 р. [528], започаткували динамічне обґрунтування статистичної теорії нерівноважних процесів.

З рівняння Ліувілля методом послідовного інтегрування за координатами та імпульсами частинок  $N-1$ ,  $N-2$ , ... виводяться рівняння, що визначають зміни частинкових функцій розподілу

класичної системи частинок з парним потенціалом взаємодії. Таким чином, виходить

ланцюжок "зачіплених" рівнянь, що пов'язують зміни функцій  $\rho$  та  $\text{EMBED Equation.3}$  у часі. Ці рівняння й було виведено вперше Ж.Івоном в 1935 р., а потім підтверджено та широко використано М.Борном і Г.Гріном, Дж.Кірквудом та М.М.Боголюбовим. При їх виведенні було виконано термодинамічний граничний перехід  $\lim_{N \rightarrow \infty}$ ,  $\lim_{V \rightarrow \infty}$ . З  $\rho$  при  $\text{const}$ , після якого знехтувано впливом стінок та відкинуто члени  $\sim \frac{1}{N}$ . Важливими є перші рівняння ланцюжка:

де  $m$ ,  $\mu$  — маса частинок.

Система цих рівнянь еквівалентна, зрозуміло, рівнянню Ліувілля.

Розглянутий метод нерівноважної статистичної механіки виявився надзвичайно ефективним і у світовій літературі дістав назву методу, або ланцюжка рівнянь ББГКІ (Боголюбова—Борна—Гріна—Кірквуда—Івона). За його допомогою вдається вивести кінетичне рівняння Больцмана для газу малої густини та для газу із слабкою взаємодією між молекулами.

Суттєвий внесок цих праць полягає як у спільності головних припущень, так і в можливості застосування результатів до густіших середовищ (у випадку теорії Кірквуда). М.Борн та його учень Г.Грін мали на меті узагальнити кінетичну теорію для застосування її до рідин. Вони запропонували узагальнення рівняння Больцмана, в основу якого було покладено послідовне використання рівнянь неперервності в просторі координат, швидкостей і прискорень окремих

молекул та введено деякий статистичний опис, що дозволяє розв'язати систему даних взаємозв'язаних рівнянь. Цей метод було викладено в серії статей [524], зібраних згодом в окремій книзі, виданій у 1949 р. [525]. Однак у згаданих теоріях не можна було обійтися без додаткових припущень, а також були відсутні вказівки на послідовний метод узагальнення класичного рівняння Больцмана.

Хоч на перший погляд рівняння Кірквуда відрізняється від ланцюжка рівнянь, одержаних у працях Ж.Івона, М.Борна та Г.Гріна, а також М.М.Боголюбова, проте, як показав Дж.Майєр, воно за суттю тотожно ланцюжку, тому що без жодних наближень дає ті самі результати. Своє інтегральне рівняння Дж.Кірквуд подав у серії спільних з учнями статей незалежно від невідомої ще в той час за межами Франції більш ранньої праці Ж.Івона [522]. Вихідні положення Дж.Кірквуда та Ж.Івона різні, але зрештою вони приводять до одних і тих же результатів.

Однак до М.М.Боголюбова автори не розглядали важливе питання про граничні умови. Для одержання кінетичного рівняння — замкненого рівняння для функції розподілу — необхідна була додаткова умова, яку і було запроваджено М.М.Боголюбовим. Це умова про послаблення кореляцій, завдяки якій одержують рівняння, що описує також необоротні процеси, зокрема, встановлення рівноважного стану.

Першою працею М.М.Боголюбова в цьому напрямку стала післявоєнна монографія 1945 р. "Про деякі статистичні методи в математичній фізиці" [566], де, розвиваючи ідеї праці 1939 р. [567], він провів подальше дослідження поведінки системи, яка зазнає зовнішнього випадкового впливу. Зокрема, було розглянуто задачу про вплив випадкової сили на гармонічний вібратор та вперше математично строго обґрунтовано загальновідому гіпотезу про встановлення статистичної рівноваги в системі, пов'язаній з термостатом (сукупністю великої кількості осциляторів).

У даній монографії М.М.Боголюбов показав, що залежно від вибору масштабу часу один і той самий випадковий процес можна розглядати як динамічний, марковський, або деякий немарковський процес. Тим самим вперше було запроваджено в статистичну механіку та обґрунтовано ідею про ієрархію часів релаксації в багаточастинковій системі (поняття "час релаксації" вперше ввів Дж.Максвелл у 1866 р.) Запропонована ідея виявилася принциповою для статистичного опису нерівноважних процесів у газах, рідинах та кристалах, визначивши подальший розвиток статистичної теорії необоротних процесів.

Це стало підґрунтям для наступної фундаментальної монографії 1946 р. "Проблеми динамічної теорії в статистичній фізиці" [247] М.М.Боголюбовим було розглянуто важливе методологічне питання зв'язку статистичних та динамічних закономірностей в природі та запропоновано новий оригінальний метод рівноважної та нерівноважної статистичної механіки, суттєва особливість якого полягала у необхідності чіткого розрізнення масштабів часів, що виникають в задачі. Даючи тлумачення загальної динамічної теорії газів, М.М.Боголюбов висунув ідею про абсолютно різні масштаби часу та пов'язані з ними стадії еволюції: хаотичну, кінетичну та гідродинамічну. Таким чином, у розглядуваних задачах з'явилися принаймні два характерні часи: тривалість взаємодії (твз — порядку 10-12—10-13 с) та час релаксації, який для розріджених газів збігається за порядком величини із середнім часом між двома зіткненнями (10-8—10-9 с).

М.М.Боголюбов показав, якщо початковий розподіл довільний, то на ранній стадії стан системи може значно відрізнятись від рівноважного і для його опису необхідно задати дуже велике число функцій розподілу: не тільки одночастинкову та двочастинкову, а й функції вищих порядків. Вони швидко змінюються за часом відповідно до рівняння Ліувілля. Проте за проміжок порядку часу зіткнення для багатьох систем з великою кількістю частинок (наприклад, гази з малою густиною чи малою взаємодією) встигає пройти значно швидший процес, ніж релаксаційний. Настає синхронізація функцій розподілу, або кінетична стадія, коли всі функції розподілу повністю визначаються одночастинковою функцією розподілу. Для цієї стадії вдається, виходячи з рівняння Ліувілля, побудувати кінетичне рівняння для одночастинкової функції розподілу. Таким чином, М.М.Боголюбов припускає, що через час порядку твз можна суттєво спростити опис системи: одночастинкова функція розподілу  $f_1$  задовольняє окреме рівняння типу

хр, q),

а функції розподілу багатьох частинок стають функціоналами від :

Для більших масштабів часу (для газів — з більшим часом вільного пробігу) дали зменшується кількість параметрів, необхідних для опису системи, і настає гідродинамічна стадія, яку можна зобразити гідродинамічними рівняннями (спільно з рівнянням теплопровідності), тобто лише кількома моментами функцій розподілу — середньою кількістю частинок, середніми енергією та швидкістю. Функція розподілу починає залежати від часу тільки через ці параметри, і рівняння гідродинаміки можна одержати безпосередньо з ланцюжка рівнянь як асимптотику. М.М. Боголюбов показав також, що перше наближення ланцюжка рівнянь дає рівняння руху ідеальної рідини, а друге — в'язкої рідини, в якій враховуються також процеси теплообміну.

На основі даного методу ланцюжків рівнянь для функцій розподілу комплексів частинок, використаному у випадку нерівноважних процесів, М.М.Боголюбову вдалося розвинути загальний метод побудови кінетичних рівнянь для систем взаємодіючих частинок — неідеальних квантових газів, що ґрунтується тільки на основних положеннях статистичної механіки. Цей метод вперше дозволив при спеціальному запровадженні малих параметрів строго вивести з єдиної, послідовно мікроскопічної точки зору різні типи кінетичних та гідродинамічних рівнянь для систем з коротко- чи далекодійними, але слабкими, силами. За допомогою цього методу стало можливим уточнювати формули класичної кінетичної теорії подібно до того, як це зроблено в теорії Урсела —Майєра для випадку статистичної рівноваги. Зокрема, область застосування кінетичного рівняння Ландау, яке узагальнює рівняння Власова та має фундаментальне значення в дослідженні властивостей плазми, було з'ясовано за допомогою схеми М.М.Боголюбова.

М.М.Боголюбовим було також запропоновано регулярні методи розв'язання кінетичних рівнянь для різноманітних систем як в рівноважному, так і в нерівноважному випадку, наприклад, для найбільш важливих фізичних випадків — короткодії (газ малої густини) та далекодії (система з кулонівською взаємодією). При цьому підсумовування секулярних членів, пропорційних степеням часу, М.М.Боголюбов виконав методами нелінійної механіки. Пізніше І.Пригожин зробив це методом підсумовування діаграм [568]. Перше строге виведення рівняння перенесення в квантово-механічному випадку без повторного використання припущення про випадковість фаз було здійснене у 1955 р. Л.Ван Ховом [569].

Значення розглянутих праць М.М.Боголюбова полягає в тому, що до їх появи дослідження проблеми кінетики здійснювалось методами, в яких існувало внутрішнє протиріччя. З одного боку, рух молекул тлумачився як деякий випадковий процес і вводився до розгляду певний статистичний механізм бінарних зіткнень, а з іншого боку, для розрахунку ефективного перерізу випадкового процесу застосовувалися рівняння класичної механіки. У квантовій статистиці використовувались такі самі "гібридні" прийоми з тією тільки різницею, що ефективні перерізи обчислювались за правилами квантової механіки та враховувалися вимоги симетрії. До того ж динамічний процес інерціального руху молекул і стохастичний процес їх зіткнень розглядались як неінтерферуючі, тому в кінетичному рівнянні член співудару приписувався конвекційному члену чисто феноменологічно. Внаслідок цього такий підхід, заснований на повному нехтуванні кореляцією між динамічними станами молекул, не можна було безпосередньо

узагальнити для одержання рівнянь більш високого наближення. Метод М.М. Боголюбова дозволив усунути ці труднощі.

Замість больцманівської гіпотези молекулярного хаосу (stosszahlansatz) М.М.Боголюбов при побудові кінетичних рівнянь для розв'язання рівняння Ліувілля використав принцип послаблення кореляцій при необмеженому зростанні відстаней між молекулами, завдяки чому одержав необоротність релаксаційного процесу. Цей постулат має статистичний характер і з формальної точки зору виступає як гранична умова, що накладається при знаходженні розв'язків системи рівнянь, завдяки чому явна структура інтеграла зіткнень одержується вже на динамічному рівні. Тому, якщо метод Больцмана, заснований на повному нехтуванні динамічною кореляцією між молекулами, був придатний тільки для розріджених газів і не міг бути безпосередньо узагальнений для одержання рівнянь більш високого наближення, то метод М.М.Боголюбова давав можливість ураховувати в кінетичному рівнянні вищі члени розкладання за степенями густини. Фактично, М.М.Боголюбовим було дано нове тлумачення стану систем статистичної механіки як нескінченної послідовності функцій розподілу, де еволюція стану описувалась рівняннями Боголюбова. Внаслідок цього були радикально переглянуті уявлення про суть динамічних процесів, які призводять до виникнення необоротності, і вказано шлях, на якому можна одержати поправки до рівняння Больцмана та вирішити проблему кінетики в найбільш важливих фізичних випадках, зокрема, в системах з кулонівською взаємодією.

Однією з важливих проблем, яка виникає при розгляді великого числа частинок, є необхідність здійснити в розглядуваній системі термодинамічний граничний перехід, щоб одержати точні термодинамічні співвідношення. М.М.Боголюбов приділяв велику увагу строгому математичному обґрунтуванню такого граничного переходу до нескінченного числа ступенів вільності в нескінченному об'ємі для класичних систем [570,571].

У статті [570] спільно зі своїм учнем Б.І.Хацетом він вперше в світовій літературі розпочав строге обґрунтування процедури термодинамічного граничного переходу для кореляційних функцій. Автори виділили клас модельних систем статистичної фізики, який припускає точний розв'язок у термодинамічній границі, довели існування термодинамічної границі для рівноважних систем. Термодинамічний граничний перехід для одновимірних нерівноважних систем, а також для певних багатовимірних систем обґрунтували учень М.М.Боголюбова академік НАН України Д.Я.Петрина спільно з В.І.Герасименко (про ці праці детально у розділах 5.1.5., 5.1.6.).

Починаючи з 1947 р. наукові інтереси М.М.Боголюбова звернулись до проблем квантової статистичної механіки. Так, спільно зі своїм учнем К.П.Гуровим у 1947 р. він здійснив узагальнення методу побудови кінетичних рівнянь для квантових систем на основі спеціального варіанта теорії збурень за мализною взаємодією [572,573]. При цьому для випадку бозе-системи за відсутності виродження вони побудували кінетичне рівняння у вигляді, уточненому порівняно з больцманівським. Це рівняння відрізнялося від звичайного рівняння Больцмана наявністю додаткового члена, який враховував інтерференцію конвекції та співударів. Фізичний зміст даної поправки з'ясовується при переході до рівнянь гідродинаміки. Якщо звичайне рівняння Больцмана приводить до рівнянь гідродинаміки, що відповідають середовищу з рівнянням стану ідеального газу, то одержане М.М.Боголюбовим і К.П.Гуровим уточнене кінетичне рівняння приводить до поправок коефіцієнтів в'язкості та теплопровідності в рівнянні стану. Таким чином, фундаментальним результатом дослідження Боголюбова було не тільки обґрунтування рівняння Больцмана на основі динамічної теорії, а і його суттєве уточнення.

Дещо інший варіант розкладання за малим параметром був застосований М.М. Боголюбовим у задачі щодо системи частинок, які взаємодіють за законом Кулона. Такою є, зокрема, задача про розчин сильних електролітів. Спільно з С.В.Тябликовим і В.В.Толмачовим він у 1958 р. розробив послідовну теорію сильних електролітів [574]. У 1955 р. М.М.Боголюбовим та Д.Н.Зубаревим було побудовано метод дослідження неідеальних квантових систем, у основу якого покладене введення фур'є-компонент густини як колективних змінних [575].

Результати М.М.Боголюбова з нерівноважної статистичної механіки класичних систем значною мірою сприяли тому, що статистична фізика стала одним із найважливіших розділів сучасної теоретичної фізики. Фундаментальна монографія М.М.Боголюбова "Проблеми



динамічної теорії в статистичній фізиці" на багато років визначила розвиток статистичної фізики в Україні і світі, а його результати і нині є підґрунтям для багатьох сучасних методів статистичної фізики.

#### 4.4. Побудова М.М.Боголюбовим мікроскопічної теорії надплинності (1947 р.)

Фундаментальним внеском у квантову статистичну фізику стали також роботи М.М. Боголюбова з теорії конденсації неідеального бозе-газу. Побудова мікроскопічної теорії надплинності, яка є фундаментальною властивістю бозевських систем, привернула увагу М.М. Боголюбова ще в 1947 р. У цьому ж році було надруковано дві його праці, де описано послідовну наближену схему вторинного квантування щодо моделі неідеального бозе-газу [576,577].

Явище надплинності рідкого гелію, тобто відсутності в ньому будь-якого тертя, було експериментально відкрито П.Л.Капіцею, а також незалежно від нього Дж.Алленом і А. Майзнером у 1938 р. [578—580]. Виявилось, що нижче температури 2,19 К рідкий гелій розкладається на дві компоненти: надплинну, абсолютно позбавлену в'язкості (гелій II) і нормальну (гелій I). З приводу цього відкриття П.Л.Капіца писав у своїй праці: "Ми запропонували вважати, що He-II — ідеально плинна рідина, і за аналогією із надпровідністю назвали цю властивість надплинністю" [581,с.28].

Надплинність рідкого гелію є унікальним явищем природи, у якому властиві мікрооб'єктам квантові закономірності виявляються в макроскопічних масштабах. Дослідження цього явища відбувалось в двох напрямках: побудова феноменологічної макроскопічної теорії, яка б відображала всю сукупність експериментальних фактів щодо даних макроскопічних об'єктів, та розробка мікроскопічної теорії, яка б пояснювала внутрішній механізм явища і встановлювала б зв'язки між динамічними величинами, з яких випливають рівняння мікроскопічної теорії.

На можливість квантово-механічного обґрунтування ефектів у рідкому гелії вказували Л. Тісса (1938 р.) [828] та Г.Лондон (1939 р.) [583]. На цій основі Л.Тісса розробив макроскопічну теорію надплинності, у якій рідкий гелій при нижчій температурі, ніж температура фазового переходу, розглядався як сукупність надплинної та нормальної компонент, кожна з яких може рухатися зі своєю швидкістю. Більш розвинуту форму макроскопічної теорії надплинності в 1941 р. дав Л.Д.Ландау у статті "Теорія надплинності гелію II", де рух надплинної компоненти відрізняється від руху нормальної не тільки відсутністю в'язкості, а й тим, що він є обов'язково потенціальним [584]. Л.Д.Ландау побудував досить повну картину відомих властивостей гелію II та передбачив ряд нових. Зокрема, було визначено характер розподілу енергетичних рівнів у спектрі гелію II як квантової рідини, досліджено температурну залежність гелію II, передбачено одночасне існування в гелії II при температурах, що відрізняються від абсолютного нуля, двох рухів — надплинного та нормального, виведено рівняння макроскопічної гідродинаміки гелію II, передбачено в ньому другий звук. Таким чином, Л.Д.Ландау вперше дав якісне пояснення надплинності на основі феноменологічних уявлень про те, що слабкозбуджені стани квантової рідини мають вигляд елементарних збуджень (квазічастинок). Він емпірично зробив припущення про характер спектра елементарних збуджень в рідкому гелії, який складається з двох гілок:

фононної, де  $\omega = v_s k$ , та ротонної, де  $\omega = \omega_0 + v_0 k$ . Тут  $v_s$  — деякі сталі,

— ефективна маса. Саме фононний характер спектра при малих імпульсах і забезпечує можливість утворення "зв'язаного" колективу бозонів, який здійснює надплинний рух. Згідно з цією теорією He II, як це й спостерігалось, протікає через вузьку щілину, не переносючи ентропію.

Ці дослідження Л.Д.Ландау продовжив у 1944 р. у статті "До гідродинаміки гелію II" [533, т.1, С.453—457], а також у 1948 р., у спільній з І.Я.Померанчуком праці, де було розглянуто поведінку сторонніх атомів в гелії II [533, т.2,с.35—37.] і у 1949 р., коли ним з І.М.Халатниковим було визначено в'язкість гелію II [538,т.2,с.66—109]. У подальшому в 1956—1957 рр. Л.Д.Ландау побудував загальну теорію фермі-рідин, засновану на представленні енергії збуджень як функціонала від функції розподілу [538,т.2,С.328—348]. За ці дослідження з теорії конденсованих середовищ у 1962 р. Л.Д.Ландау було присуджено Нобелівську премію з фізики.

Проте, незважаючи на успіхи макроскопічної теорії надплинності, вона не привела до повного розуміння причин цього явища та його внутрішнього механізму. Зокрема, Р.Фейнман [585] показав, що квантова гідродинаміка не передбачає спектра збуджень, як це раніше вважали

Ландау та інші дослідники. Оскільки гідродинаміка Ландау повинна приводити до множини більш низьких збуджень, то вона не пояснює надплинності. Помилка Л.Д.Ландау, на думку Р.Фейнмана, була в тому, що, неявно припускаючи розрізнення частинок, він не врахував ефекти статистики [586].

Складність побудови мікроскопічної теорії надплинності полягала в тому, що безпосередньо розрахувати властивості реального рідкого гелію було неможливо через відсутність у задачі малого параметра. Ідеальний бозе-ейнштейнівський газ не має властивості надплинності тому, що конденсат (тобто сукупність частинок, імпульс яких точно дорівнює нулю), не створює зв'язаного колективу і ніяк не реагує на процес руху окремих частинок, які містяться у ньому. Таким чином, для пояснення явища надплинності необхідно було враховувати взаємодію між частинками, тому за об'єкт дослідження найдоцільніше було вибрати неідеальні бозе-системи. За цих умов й було розроблено мікроскопічну теорію надплинності М.М.Боголюбовим (1947).

Оскільки елементарні збудження в неідеальному бозе-газі є суперпозицією операторів народження та знищення частинок з протилежно направленими імпульсами, то М.М.Боголюбов припустив, що слабкозбуджені стани неідеального бозе-газу можна розглядати як стани бозе-газу квазічастинок, і що закон дисперсії квазічастинок, які при малих імпульсах мають лінійний хід, задовольняє критерій надплинності. Тим самим фактично було дано мікроскопічне пояснення явища надплинності в  $\text{He}^4$ , пов'язане з утворенням термодинамічно стійкого бозе-конденсату в цій системі при досить низьких температурах та при слабкій взаємодії (відштовхуванні), завдяки якій бозе-конденсат створює зв'язаний колектив, і „випадання” окремих частинок з нього стає енергетично не вигідним.

М.М.Боголюбову належить мікроскопічне доведення того, що при деяких умовах в слабконеідеальному бозе-газі вироджений конденсат може рухатися без тертя відносно

елементарних збуджень з довільною досить малою швидкістю [587]. В

ідеальному ж газі, де не враховується взаємодія між бозонами, і явище надплинності відсутнє.

Виходячи із загального гамільтоніана для бозе-систем і припускаючи, що макроскопічна кількість частинок перебуває в основному стані з нульовим імпульсом, М.М.Боголюбов одержав для збуджень апроксимуючий гамільтоніан, який є квадратичною формою від операторів народження та знищення. Оскільки звичайна теорія збурень тут виявилась незастосовною внаслідок сильної взаємодії частинок з протилежними імпульсами, то для розрахунку спектра  $\mathcal{E}(p)$  елементарних збуджень була запропонована діагоналізація гамільтоніана. Для цього вперше М.М. Боголюбовим було запроваджено  $U-V$ - канонічні перетворення, відомі нині як перетворення Боголюбова, а також поза межами теорії збурень знайдено спектр  $\mathcal{E}(p)$  елементарних збуджень слабконеідеального бозе-газу, з виразу для якого впливав висновок про єдність спектра фонон-ротонних збуджень. Виявилось, що даний спектр має ті самі властивості, що й спектр гелію II, тобто що гелій II може знаходитися у виродженому стані і мати надплинність. Завдяки цьому було створено теоретичну модель для пояснення явища надплинності гелію II.

Квазічастинкове тлумачення, дане теорією Боголюбова, дозволило побудувати прозору фізичну картину надплинного стану, систему гідродинамічних рівнянь у всьому діапазоні температур, послідовно описати енергетичний спектр надплинної системи та пояснити співвідношення між надплинними та нормальними станами. Висновок М.М.Боголюбова про те, що сили відштовхування між бозонами сприяють надплинності, а сили притягування заважають, тобто що звичайна парна взаємодія не руйнує, а, навпаки, стабілізує основний стан системи, завдяки чому відбувається нібито злипання частинок з протилежними імпульсами, виходило за межі розглянутої ним моделі. В подальшому це стало основою для введення такого важливого поняття класичної і квантової статистики, як стійкість взаємодій. Таким чином, можна

стверджувати, що теоретичні праці Л.Д.Ландау та М.М.Боголюбова з теорії надплинності разом з експериментальними роботами П.Л.Капіци започаткували фізику квантових рідин.

У розвиток цих ідей в 1963 р. у праці [588] М.М.Боголюбов, виходячи з рівнянь руху однакових бозе-часток, дав послідовне виведення рівнянь гідродинаміки надплинної ідеальної рідини, і одержав гідродинамічне наближення для функцій Гріна. Він також поширив виведення рівнянь гідродинаміки для нормальної компоненти на випадок наявності надплинної компоненти [589].

У 1949 р. М.М.Боголюбов узагальнив свої результати, пов'язані з побудовою молекулярної теорії надплинності та полярної моделі металу, розробленої спільно з учнем С.В.Тябликовим в [590—592], у монографії “Лекції з квантової статистики” [593]. Ця книга стала першим систематичним викладенням основних положень і методів статистичної механіки квантових систем, перш за все методу статистичних операторів комплексів молекул та тісно пов'язанного з ним методу наближеного вторинного квантування, що базується на квазікласичному описі основного стану системи за методом Фока. Елементарні збудження відповідають малим відхиленням від цього стану. В монографії М.М.Боголюбов запровадив також нове поняття стану систем у квантовій статистичній механіці як нескінченної послідовності статистичних операторів, еволюція якого описується рівняннями для статистичних операторів (нині їх називають рівняннями Боголюбова). Слід підкреслити, що праці М.М.Боголюбова з класичної та квантової статистики в цілому започаткували новий напрям в сучасній математичній фізиці — математичну фізику нескінченних систем, характерною рисою якої є поняття стану. В класичній математичній фізиці стан системи задається скінченним числом функцій, які визначаються через розв'язки скінченної системи диференціальних рівнянь в частинних похідних. На відміну від цього в сучасній математичній фізиці стан описується нескінченною послідовністю функцій від зростаючого числа аргументів, які задовольняють операторні рівняння.

Розроблений Боголюбовим метод побудови секулярного рівняння для полярної моделі металу суттєво поліпшив метод Гайтлера—Лондона і за змістом виявився спеціальною формою методу Рітца. Для розв'язання даного рівняння використовували метод наближеної ортогоналізації пробних хвильових функцій та метод теорії збурень для визначення енергетичного спектра. Було також встановлено важливі співвідношення, що пов'язують ферміонні, бозонні та спінові оператори, та побудовано розв'язок секулярних рівнянь у другому та третьому наближеннях. Саме третє наближення дає можливість вивчення властивостей електричного струму.

Багателектронний метод Боголюбова є послідовним методом при тлумаченні обмінної взаємодії в кристалах. Він дає змогу врахувати всі типи обмінних взаємодій більш строго, ніж це може бути зроблено при “механічному” перенесенні результатів “молекулярної” задачі трьох центрів — чотирьох електронів на кристал.

Методи, розроблені М.М.Боголюбовим у монографії “Лекції з квантової статистики”, стали основою для активного розвитку мікроскопічної теорії ферромагнетизму, зокрема, дослідження спектрів елементарних збуджень ферромагнітних та антиферромагнітних кристалів. Так, М.М.Боголюбов і С.В.Тябликов розробили один з варіантів теоретико-польової техніки в статистичній фізиці — техніку температурних двочасових (запізнілих і випереджальних) функцій Гріна. Цей метод зручний завдяки простоті аналітичних властивостей фур'є-образів запізнитої і випереджальної функцій Гріна в комплексній площині енергетичної змінної. Важливим новим результатом, одержаним С.В.Тябликовим, було уточнення низькотемпературного розкладання для намагніченості ферромагнетиків. Більш докладно ці проблеми досліджувались у працях С.В.Тябликова та Д.М.Зубарева в 1960—1963 рр. Метод двочасових функцій Гріна та його численні застосування в статистичній механіці викладено в 1961 р. у монографії В.Л.Бонч-Бруєвича та С.В.Тябликова “Метод функцій Гріна в статистичній механіці” з передмовою М.М.Боголюбова [594].

Нескінченна система рівнянь для двочасових функцій Гріна, складена на основі зредукованого гамільтоніана теорії надпровідності, розглядалася в праці М.М.Боголюбова, Д.М.Зубарева та Ю.О.Церковникова “Асимптотично точний розв'язок для модельного гамільтоніана теорії надпровідності” [595]. Крім того, в 1958 р. С.Т.Беляєв побудував діаграмну техніку для нормальних та аномальних функцій Гріна при нульовій температурі [596].

#### 4.5. Створення теорії кристалізації та теорії будови рідин (В.І.Данилов, 30-ті рр. ХХ ст.)

Одним з об'єктів досліджень статистичної фізики є речовина в рідкому стані. Академік НАН України Віталій Іванович Данилов стояв біля джерел зародження фізики рідкого стану в Україні та створив велику наукову школу в цій галузі. Його праці щодо дослідження процесів будови рідин, а також однієї з головних проблем фізики фазових перетворень — кристалізації рідин стали основоположними для формування уявлень про конденсований стан речовини [597—600].

Оскільки важливим етапом при створенні матеріалів з високими характеристиками міцності є процеси термічної обробки сплавів, то вивчення цих процесів, зокрема для сталі, стало основним напрямом розвитку фізичного матеріалознавства в Україні. Перші дослідження з фізики металів були виконані в організованому в 1928 р. Українському фізико-технічному інституті у Харкові; потім проводились з 1931 р. у Дніпропетровській філії УФТІ, на базі якої у 1932 р. було створено Дніпропетровський фізико-технічний інститут ДФТІ; з 1946 р. ця тематика вивчалась у Лабораторії металофізики НАН України, яка стала базою для створення у 1955 р. Інституту металофізики НАН України.

В організації Дніпропетровського фізико-технічного інституту значною була роль завідувача кафедри фізики Дніпропетровського гірничого інституту, професора Дніпропетровського університету (на той час — Інституту народної освіти (ДІНО)) та керівника відділу фізичних вимірів Українського науково-дослідного інституту фізичної хімії Андрія Едуардовича Малиновського. На жаль, його доля склалась трагічно, його було репресовано та страчено у 1937 р. [304].

А.Е.Малиновський організував у ДІНО семінар підвищеного типу з фізики, а потім з учасників цього семінару с у Фізико-хіміко-математичному інституті (виділився з ДІНО у 1930 р.) творив групу, яка працювала над питаннями електронної теорії металів та фізики горіння та вибухів. До цієї групи входили випускники Дніпропетровського інституту народної освіти, зокрема, один з перших аспірантів А.Е.Малиновського — Віталій Іванович Данилов. Він одразу виявив себе як серйозний і самостійний дослідник та почав розробляти новий напрям досліджень рідкого стану речовини, в тому числі рентгенографічними методами; вивчав термоелектричні властивості сплавів при плавленні та кристалізації; розсіювання рентгенівських променів у розчинах, які містять важкі молекули в легкому розчиннику. Працював також в

Українській асоціації фізиків [304].

В.І.Данилов народився 10 квітня 1902 р. в с.Жовте (нині Луганська обл.). Після закінчення у 1926 р. Дніпропетровського інституту народної освіти (нині університет) вступив до аспірантури (керівник-професор А.Е. Малиновський). З 1926 р. викладав фізику в ДІНО, з 1930 — у фізико-хіміко-математичному інституті. З 1934 до 1941 рр. він — професор Дніпропетровського університету, де у 1935 р. організував та очолив кафедру молекулярної фізики; водночас з 1931 р. — науковий співробітник Дніпропетровської філії УФТІ, у 1933—1944 — завідувач лабораторії будови рідких металів (пізніше — кристалізації) Дніпропетровського фізико-технічного інституту. В подальшому, коли Дніпропетровський фізико-технічний інститут у 1944 р. після евакуації переїхав до Москви та був реформований у Інститут металознавства та фізики металів у складі Центрального науково-дослідного інституту чорної металургії, В.І.Данилов продовжував очолювати відділ кристалізації. Аналогічним відділом він керував у 1946—1954 рр. у Лабораторії металофізики АН України, багато зробив для її перетворення в Інститут металофізики та в 1951 р. став його першим директором. Цього ж року вченого було обрано академіком НАН України.

Формування наукової школи В.І.Данилова почалося у 30-х рр. ХХ ст. у Дніпропетровському університеті та Дніпропетровському фізико-технічному інституті, а продовжилося в Києві в Інституті металофізики НАН України. Відділи кристалізації в зазначених установах стали тими центрами, які згуртували навколо В.І.Данилова талановиту молодь і стали основою для формування його наукової школи.

Численні роботи В.І.Данилова та його учнів щодо з'ясування структури рідини та геометрії взаємного розташування в ній атомів і молекул, обумовленого міжатомною та міжмолекулярною взаємодією в рідині, мали ключове значення для побудови теорії рідкого стану та практичного застосування в металургійній промисловості. Вже на момент створення ДФТІ у 1932 р. одним із завдань інституту мало стати “вивчення внутрішнього механізму перетворень у металах та сплавах при різних видах термічної та механічної обробки, а також вивчення кристалізації металів, головним чином, за допомогою рентгенівського проміння (рентгенометалографія) із застосуванням магнітних, мікроскопічних методів дослідження...” [601].

Слід підкреслити, що за словами С.І.Вавилова, “це був період, коли вчення про рідкий стан залишалось „білою плямою” у фізиці, було мало вивченим та малозрозумілим” [602]. З перших же днів організації

лабораторії В.І.Данилов поставив завдання дослідити зв'язок між структурою речовини у твердому та рідкому станах, вивчити закони утворення та росту кристалів, щоб навчитися керувати процесами кристалізації та одержувати металічні зливки з наперед заданою структурою.

Учень В.І.Данилова І.В.Радченко згадував про умови праці в лабораторії: "...в тій же кімнаті, де проводились рентгенометалографічні дослідження рідин, за диктовою перегородкою велися й інші дослідження – Ткаченко, Теверовський, Неймарк, Плужник вивчали процеси переохолодження рідин, зародкоутворення при кристалізації, дію ультразвуку на ці процеси, перевіряли досліди Тамма. В цих умовах були одержані результати тих широко відомих робіт Віталія Івановича 30-х років з рентгенографічного вивчення рідких металів, про які згадував Я.І. Френкель у своїй "Кінетичній теорії рідин" та на які даються посилання у всіх статтях, присвячених структурі рідких металів і сплавів"[602].

У працях В.І.Данилова було встановлено ряд важливих закономірностей, пов'язаних з характерним розподілом атомів у рідких металах і сплавах, а також з переходом речовини з рідкого стану в твердий. Зокрема, було показано, що різні рідкі метали мають різну упаковку атомів, а одноатомні рідини можуть мати різну структуру, яка значно відрізняється від щільної упаковки, причому в багатьох випадках є близькою до координації атомів у кристалі. Тим самим було спростовано тенденцію, яка намітилася після модельних дослідів П.Дебая та Х.Менке (1931), приписувати рідким металам та і взагалі одноатомним рідинам структуру щільно упакованих куль. Було також з'ясовано важливий факт, що кристалізація визначається спонтанним зародженням центрів кристалізації, а домішки є другорядним фактором.

Дослідження фізичної природи явища зародження центрів кристалізації та вивчення впливу різних факторів на цей процес були розпочаті В.І.Даниловим в період його роботи в Дніпропетровському фізико-технічному інституті у 1932–1941 рр. Ці роботи значно розширили статистичну теорію кристалізації та відкрили нові можливості впливу на структуру литого металу шляхом введення домішок. Так, було встановлено, що частинки домішок у рідині можуть бути у активному й неактивному станах; виявлено і детально вивчено явище активації; запропоновано гіпотезу про механізм активації (В.І.Данилов, О.Д. Козачковський); показано, що процес активації твердих поверхонь має місце тільки в контакті з закристилізованою рідиною, а дезактивація – тільки при перегріванні рідини [603]. Зокрема, В.І.Даниловим та В.Є.

Неймарком у 1933–1935 рр. було показано, що рідка ртуть має структуру, яка відрізняється від щільної упаковки, і взаємне розташування атомів у ній наближається до стану, який спостерігається у твердій фазі [604].

Спільно з Б.М.Теворовським вченим було розроблено теорію переохолодженої рідкої фази, в якій були використані введені Я.І. Френкелем уявлення про гетерофазні флуктуації. Розглядаючи зародження центрів кристалізації у переохолоджених рідинах, вчені виділили дві головні проблеми: явище спонтанної кристалізації та вплив на кристалізацію нерозчинних домішок. Розділення цих ефектів є складним завданням, однак В.І.Данилову із співробітниками вдалося, працюючи з чистими органічними речовинами і металами, після їх ретельного очищення виділити зразки, які задовольняють критерій спонтанного утворення в них центрів кристалізації, та вивчити кінетику цього утворення. Разом з тим, при дослідженні закономірності кристалізації на домішках (В.І.Данилов, В.Є.Неймарк, Д.С.Каменецька, А.Т.Помогайбо), було виключено вплив нерозчинних дисперсних домішок та експериментально розв'язано питання про можливість спонтанної кристалізації.

Таким чином, В.І.Даниловим із співробітниками було показано, що основою кристалізації, незважаючи на величезну роль домішок, є спонтанне зародження її центрів. Всі речовини були систематизовані за характером залежності швидкості зародження в них центрів кристалізації від переохолодження на три групи, кожна з яких позначається за назвою речовини, що досліджена більш детально (В.І.Данилов, В.Є.Неймарк, Є.Є.Плужник, Б.М.Теворовський, М.А.Левашевич, О.Д.Козачковський). Так, у речовинах групи салолу спонтанна кристалізація відсутня за всіх температурах; група ортохлорнитробензолу характеризується наявністю різкої межі метастабільності. Речовини цієї групи, куди відносять і метали, не вдається перевести в склоподібний стан. У речовин групи пиперіну одержано криву залежності швидкості зародження центрів кристалізації від переохолодження в широкому інтервалі переохолоджень, тому вони виявились зручними об'єктами досліджень.

Цікаві ефекти було виявлено при дослідженні впливу перегріву рідини на здатність її до переохолодження, зокрема, не підтвердився пропонований раніше зв'язок між температурною залежністю структури рідини та здатністю її до переохолодження. Прямими дослідженнями було показано, що залежність між ступенем переохолодження та попереднього перегрівання цілком обумовлена домішками, оскільки після достатнього перегрівання домішки дезактивуються й їх роль можна звести до нуля.



Саме в цьому випадку спостерігається спонтанне зародження центрів кристалізації. Уявлення про межу метастабільності переохолодженої рідини як характеристики речовини, а не домішок, і яку можна визначити експериментально, було запропоновано В.І.Даниловим та Б.М.Тверовським. Межа метастабільності була визначена для ряду металів і органічних речовин, використана для обчислення поверхневої енергії на межі кристал–рідина.

Вивчення кристалізації чистих рідин дозволило перевірити справедливості флуктуаційної теорії зародження центрів кристалізації, а також обчислити можливі фізичні константи (поверхневий натяг на межі зародок–рідина, енергію активації), які характеризують кінетику кристалізації конкретних речовин. Одержані експериментальні закономірності були узгоджені з висновками флуктуаційної теорії, що дало змогу оцінити поверхневий натяг між кристалічним зародком та рідиною, а також енергію активації, яка відповідає переходу молекули з рідини в зародок.

Одержані результати привели В.І.Данилова до важливої закономірності: чим значніше в рідкій фізі порушено молекулярну упаковку, яка переважала у кристалі, тим при більшому переохолодженні зароджуються центри кристалізації. За Даниловим, це пояснюється збільшенням поверхневого натягу при збільшенні різниці в упаковках молекул у твердій та рідкій фазах.

У 1948—1958 рр. в Інституті металофізики НАН України було також проведено ряд досліджень (В.І.Данилов, Д.Є.Овсієнко, А.Г.Лісник) щодо встановлення закономірностей кристалізації на так званих ізоморфних домішках та з'ясування природи їхнього впливу. На багатьох системах (органічних сполуках, солях, легкоплавких металах) були вивчені ці особливості поведінки природноактивних (ізоморфних) домішок і тих, що активуються. Виявилось, що такі домішки, перебуваючи в контакт з закристалізованою рідиною, можуть набувати додаткової активності, яка, обумовлюючи явище залежності переохолодження від перегрівання, легко усувається перегріванням.

Проте, оскільки роль ізоморфних домішок добре вивчена експериментально та задовільно пояснюється флуктуаційною теорією кристалізації, то В.І.Данилов більше цікавився ефектами активованих домішок, досліджуючи які, він дійшов висновку, що активація домішок відбувається тільки в тому випадку, коли вони перебувають у контакт з кристалічною фазою досліджуваної речовини. Швидкість активації залежить від температури і при сильному зниженні останньої

зменшується до нуля. Механізм активації пов'язаний із встановленням молекулярного контакту між частинками домішок і кристалами речовини, що закристалізувалася. Дезактивація домішок, яка зростає вище точки топлення рідини, пов'язана з руйнуванням межового шару, який виникає на поверхні частинок при активації.

Таким чином, працями В.І.Данилова та його учнів було з'ясовано фізичну суть явища зародження центрів кристалізації та впливу на цей процес різних зовнішніх факторів, надано фізичного змісту статистичній теорії кристалізації. Ці результати знайшли застосування, зокрема, в металургії для вивчення формування графітової структури у вугіллі та коксах.

Дослідження структури ряду подвійних рідких металевих систем евтектичного складу (І.В.Данилов, І.В.Радченко, О.С.Лашко) показали, що в рідинах існують області з двома типами упаковки атомів, близькими до розташування атомів компонентів у твердому стані. Так, у 1937 р. В.І. Данилов і І.В.Радченко винайшли, що дифракційна картина рідких евтектичних сплавів Bi-Pb, Pb-Sn та Zn-Sn є суперпозицією дифракційних картин чистих компонент з урахуванням співвідношення їх концентрації, та висловили припущення, що в рідких евтектичних сплавах поблизу точки плавлення є мікроділянки зі структурою чистих компонент, які дозволяють провести аналогію між структурами рідких та твердих евтектичних сплавів. Таким чином, розплавлені інтерметалічні речовини мають, за даними Данилова, особливу структуру.

Були виконані також роботи з вивчення будови молекул за рентгенограмами рідин. У подальшому рентгенографічні дослідження рідких евтектичних сплавів проводились учнями В.І.Данилова – А.Ф. Скришевським, А.В.Романовою, Я.І.Дутчаком, Є.З.Спектором. Була встановлена квазіевтектична структура подвійних рідких металічних і неметалічних систем з діаграмою стану евтектичного типу та вперше побудовані криві атомного розміщення подвійних рідких систем.

Під керівництвом В.І.Данилова розроблена також методика дослідження структури рідини на моделях методами ультразвуку [605]. Зокрема, досліджувалось поглинання ультразвуку в подвійних рідких системах, вивчалась структура електролітів, визначалась температурна залежність теплоємності рідких металів.

Необхідно підкреслити, що структура рідин досліджувалась школою В.І.Данилова перш за все рентгенівськими методами, що дозволило науково обґрунтувати класифікацію рідин за їхньою здатністю до переохолодження. Відкрите у 1912 р. явище дифракції рентгенівського

проміння на кристалах (М.Лауе, В.Фридрих, П.Книппинг) стало фізичною основою методу рентгеноструктурного аналізу, розробленого одразу після цього відкриття у 1913 р. Генрі та Лоуренсом Бреггами та незалежно Ю.В.Вульфом. За допомогою цього методу було вперше розшифровано кристалічну структуру NaCl. У 1916 р. П.Дебай та П.Шерер запропонували метод вивчення структури дрібнокристалічних (полікристалічних) матеріалів за допомогою дифракції рентгенівських променів (метод Дебая–Шерера), та, дослідивши рідкий бензол, поклали початок рентгенографії рідин.

У формуванні нового напрямку в Україні – вивчення будови речовини, перш за все металів і сплавів у рідкому стані, рентгенівськими методами – В.І.Данилов був піонером, а його монографія “Розсіяння рентгенівських променів у рідинах” 1935 р. стала широко відомою у світі [606].

Надалі у 1934—1937 рр. В.І.Даниловим та І.В.Радченком було проведено рентгенографічне дослідження будови деяких рідких металів, зокрема вісмуту, свинцю, олова. Було показано, що характер цих металів у рідкому стані близький до упаковки цих атомів у кристалах, тобто при плавленні металів та сплавів взаємне розташування атомів не є довільним, а зберігає взаємну координацію, характерну для твердого стану (збереження координаційного числа) [606,608].

“Під час плавлення зникає кристалічна ґратка, але взаємні розташування атомів не є цілком довільними. Ефект міжмолекулярних сил виявляється в тому, що в невеликих ділянках рідини в кожний момент часу атоми об’єднуються в такі групи, у яких їх взаємне розташування є енергетично вигідним. Координаційне число, яке характеризує упаковку атомів у кристалі, при плавленні зберігається. При цьому в рідині будуть зустрічатись атоми, навколо яких є неправильне число сусідів. У будь-який момент часу вся рідина складатиметься з невеликих ділянок з правильним та неправильним взаємним розташуванням атомів”, — писав В.І.Данилов. [243,с.103]

Отже, праці В.І.Данилова з учнями Є.Є.Плужником, В.Є.Неймарком, І.В.Радченком, М.М.Подосинниковим, М.А.Левашевичем, І.З.Олифиренко, Б.М.Теверовським в галузі рентгенівського вивчення будови рідин, виконані у 30-ті роки ХХ ст., стали фундаментальним внеском у фізику рідкого стану і сприяли створенню її теорії. Так, використовуючи метод малокутового розсіяння рентгенівських променів, В.І.Данилов з М.В.Моховим та Я.М.Лабковським дослідили флуктуації густини у рідинах, пов’язали здатність до переохолодження рідких

металів із їх структурними особливостями, показали, що найбільшими переохолодження є для тих металів, у яких молекулярна структура в рідкому стані значно порушена в порівнянні з будовою кристалічної фази. Був також знайдений зв'язок між будовою та здатністю до переохолодження для ряду органічних речовин.

Під керівництвом В.І.Данилова виконано розробку нових і вдосконалення існуючих методів рентгенографічного дослідження рідин для виявлення джерел можливих похибок при кількісних розрахунках функцій атомного розподілу (О.С.Лошко). На цій основі стало можливим більш точно визначити координатні числа, які характеризують структуру рідкої фази (застосування короткохвильового випромінювання). Перспективні роботи в цьому напрямі, розпочаті у 1940 р., на жаль, були перервані війною.

Результати цих досліджень дозволили дати кількісні характеристики структури деяких розплавлених металів та солей (В.І.Данилов, С.Я.Красницька, А.В.Романова), кристалогідратів і низки водних розчинів електролітів. У цілому, внаслідок рентгенографічного дослідження рідин дійшли висновку, що в них спостерігається впорядкований розподіл атомів і молекул на близьких відстанях — ближній порядок. Зокрема, вивчалася структура металевих систем для з'ясування параметрів ближнього порядку та міжатомної взаємодії.

Вивчення рідкої фази речовини В.І.Даниловим не обмежувалось застосуванням рентгенівських методів. Під його керівництвом в Дніпропетровському університеті була розроблена оригінальна методика дослідження будови рідини на моделях. На керованій ним кафедрі молекулярної фізики університету було здійснено велику роботу з вивчення поглинання звуку в подвійних рідких системах.

В.І.Даниловим та його учнями було виконано праці прикладного характеру, пов'язані із завданнями металургійної та гірничодобувної промисловості. Зокрема, було з'ясовано, що введенням незначних кількостей певного роду домішок можна регулювати кінетику кристалізації рідин, а також впливати на структуру зливка. На конкретних прикладах алюмінію та інших легкоплавких металів (Д.Ю.Овсієнко) шляхом термонамагнічення криворізьких кварцитних руд було показано, що введення десятих часток відсотка частинок активних домішок, вибраних на підставі конкретних фізичних уявлень про природу їх активності, призводить до різкого подрібнення зерен і зміни характеру розподілу зон у зливку. Таким чином, було розроблено спосіб одержання дрібнокристалічної структури зливка та обґрунтовано методику

рентгенографічного аналізу марганцевих руд та вугілля. У 1954—1958 рр. у лабораторії виконано ряд робіт (Д.Ю.Овсієнко, К.І.Сосніна) з дослідження впливу умов кристалізації на формування мозаїчної структури.

Науковий доробок В.І.Данилова було відзначено тим, що у 1940 р. він одержав запрошення до участі в конкурсі на Нобелівську премію з фізики [304]. В.І.Данилов був надзвичайною особистістю і як вчений, і як людина. “В.І.Данилов не тільки крупний вчений-дослідник, він широко відомий як педагог та організатор навчальної та науково-дослідної роботи . В.І.Данилов зробив великий внесок у справу створення та організації кадрів фізиків. Під його керівництвом проведено 16 дисертаційних робіт. Керівники кафедр ряду вузів та колективи декількох лабораторій у різних містах Союзу — учні В.І.Данилова”, — писав у 1951 році академік Г.В. Курдюмов [597, л.4]. “В роботі проф. Данилова характеризує висока вимогливість та наполегливість і постійне прагнення до вдосконалення роботи керованого ним колективу”, — зазначав у 1946 р. віце-президент НАН України М.О.Лаврентьєв [597, л.32].

В.І.Данилову була притаманна виключна захопленість наукою. “...Яке свято було в нас, як радів Віталій Іванович, коли установка запрацює”, — писав І.В.Радченко [602]. Згідно зі спогадами сучасників, В.І.Данилова вирізняло доброзичливе і поважне ставлення до людей. ”Працюючи і тісно спілкуючись з ним багато років, я жодного разу не помітив, щоб Віталій Іванович про когось погано відізвався чи когось образив. Це була людина високої культури, величезних знань, великої внутрішньої скромності”, — згадував В.Є.Неймарк [609]. Д.С.Каменецька додає: ”Він був людиною з великої літери: виключно ерудований, дуже талановитий фізик. Він міг би бути гарним скульптором – вмів добре ліпити; був делікатним — не міг сказати людині будь-яке неприємне слово, стримувався всупереч порадам лікарів, що позначалося на його нервовій системі. Він був мислителем у фізиці, і які б питання на семінарах чи радах не порушували, виявлялось, що він про них вже думав і викладав їх дуже ясно, навіть ті питання, якими безпосередньо не займався. Незважаючи на свої достоїнства, він був людиною дуже скромною та по-батьківськи ставився до своїх учнів, турбувався не тільки про їхнє наукове зростання, а й про побут. Учні у нього було багато” [610]. Так, одним з перших учнів В.І.Данилова був випускник фізико-математичного факультету Дніпропетровського університету О.Д. Козачковський, який під його керівництвом виконав роботи з виявлення механізму впливу нерозчинних домішок на кристалізацію. Надалі В.І.

Данилов познайомив його з О.І.Лейпунським, під керівництвом якого О.Д.Козачковський працював тривалий час і став директором Фізико-енергетичного інституту в Обнінську (Росія) [304,с.54].

Ґрунтовні наукові результати, а також високі особисті якості привели до згуртування навколо В.І.Данилові його наукової школи. Викладені дослідження В.І.Данилова 30–40 рр. ХХ ст. у галузі кристалізації, які справили великий вплив на фізику металів, металургію, а також на розуміння властивостей конденсованого стану речовини, успішно розроблялись у подальші роки його учнями в Інституті металофізики НАН України (О.С.Лошко, Д.Є.Овсієнко, А.В.Романова), Інституті фізики металів та металознавства (Москва), у який було у 1944 р. реформовано Дніпропетровський фізико-технічний інститут (О.М.Зубко, Д.С.Каменецька, В.Є.Неймарк), Дніпропетровському металургічному інституті (І.В.Радченко), Київському університеті (О.З.Голик, А.Ф.Скришевський). Наукову школу В.І.Данилова складають член-кореспондент НАН України А.Г.Лесник, доктори наук І.В.Радченко, О.З.Голик, О.М.Зубко, О.Д.Козачковський, М.В.Мохов, М.Л.Левашевич, Б.М.Теверовський, В.Є.Неймарк, Я.І.Дутчак, Д.С.Каменецька, О.С.Лошко, Д.Є.Овсієнко, А.В.Романова, А.Ф.Скришевський, Є.Є.Плужник, Е.З.Спектор.

Сьогодні напрям, започаткований В.І. Даниловим, продовжує розвиватись. Так, в Інституті металофізики НАН України створено фізичну модель гомогенного зародкоутворення при формуванні литих структур, з'ясовано особливостей кінетики і механізмів зародження центрів кристалізації і структуроутворення багатокомпонентних металевих розплавів; встановлено вплив на особливості кристалізації і структуроутворення глибокого переохолодження, структурних неоднородностей, розчинних і нерозчинних включень, характеру фронту кристалізації, умов невагомості; вивчаються процеси релаксацій в аморфних сплавах і проводиться розробка нових матеріалів і виробів з унікальними фізичними властивостями.

1. На початок систематичних досліджень з фізики твердого тіла, статистичної фізиці, ядерної фізики, фізики плазми, магнетизму в Україні значно вплинули в 30-ті рр. ХХ ст. наукова творчість та педагогічна діяльність у Харківському фізико-технічному інституті та в Харківському університеті видатного фізика, засновника теоретичної школи Л.Д.Ландау, особливо його роботи з теорії фазових переходів II роду, теорії плазми, теорії фермі-рідини та статистичної теорії ядра.

2. Формальна структура рівноважної статистичної механіки стала зрозумілою після фундаментальних праць Дж.Гіббса. Початок історії нерівноважної термодинаміки можна датувати 1931 р., коли вийшли дві праці норвезького фізико-хіміка Л.Онсагера, у яких він намітив єдиний підхід до розгляду нерівноважних процесів. Однак залишалась необхідність розробити загальну точку зору щодо таких процесів, це обумовило низку праць.

2. Статистична фізика стала одним із найважливіших розділів сучасної теоретичної фізики значною мірою завдяки результатам М.М.Боголюбова з нерівноважної статистичної механіки класичних систем, особливо його монографії "Проблеми динамічної теорії в статистичній фізиці" 1946 р. Запропонована вченим ідея про ієрархію часів релаксації та ланцюжок рівнянь для функцій розподілу і нині є підґрунтям багатьох сучасних методів статистичної фізики.

3. Фундаментальним внеском у квантову статистичну фізику стали роботи М.М. Боголюбова з теорії конденсації неідеального бозе-газу. Завдяки квазічастинковому тлумаченню явища надплинності, даному теорією Боголюбова 1947 р, було побудовано ясну фізичну картину надплинного стану, систему гідродинамічних рівнянь у всьому діапазоні температур, послідовно описано енергетичний спектр надплинної системи та пояснено співвідношення між надплинними та нормальними станами. Одержані результати виходили за межі розглянутої моделі і стали основою для введення такого важливого поняття, як стійкість взаємодій. Таким чином, теоретичні праці Л.Д.Ландау та М.М. Боголюбова з теорії надплинності разом з експериментальними роботами П.Л.Капіци започаткували фізику квантових рідин.

4. Важливим напрямом для формування уявлень про конденсований стан матерії є вивчення речовини в рідкому стані. Академік НАН України В.І.Данилов був одним з фундаторів фізики рідкого стану в Україні, він створив велику наукову школу в цій галузі ( Дніпропетровський університеті, Дніпропетровський фізико-технічний інститут, Інституті металофізики НАН України). Його праці з дослідження процесів будови та кристалізації рідин стали теоретичним підґрунтям основного напрямку розвитку фізичного матеріалознавства в Україні — термічної обробки сплавів, зокрема сталі.

## РОЗДІЛ 5 РОЗВИТОК СТАТИСТИЧНОЇ ФІЗИКИ В УКРАЇНІ (50-60-ті рр. ХХ ст.)

### 5.1. Розвиток методів статистичної фізики в Україні

5.1.1. Започаткування теорії неупорядкованих систем та теорії флуктуаційних рівнів (І.М. Ліфшиць, 1964–1967 рр.)

З ім'ям представника харківської теоретичної школи фізика-теоретика Іллі Михайловича Ліфшиця та його учнів пов'язано створення сучасної електронної теорії металів і теорії неупорядкованих систем, а також розвиток теорії твердого тіла, квантової механіки та статистики (зокрема, статистичної механіки систем у стані часткової рівноваги, термодинаміки нерівноважних систем), вивчення динаміки ґратки, проблеми енергетичного спектра неупорядкованих систем, теорії квантових кристалів та фазових переходів.

У дослідженнях І.М.Ліфшиця з динамічної теорії реальних кристалів, виконаних у 40-ві роки, було вперше показано, що дефекти можуть призводити до перебудови спектра та зміни коливальних станів, проаналізовано енергетичний спектр кристалів з точковими дефектами, відкрито локальні рівні, побудовано термодинаміку шаруватих та нитевидних структур, запропоновано теорію одного з основних процесів пластичної деформації — процесу двійчастості, засновану на суттєво нелінійній поведінці кристала [611—613]. У наступному циклі його робіт 1945—1952 рр. створено послідовну теорію локальних збурень реального кристала, у якій проводився аналіз спектра квазічастинок при вироджених збуреннях і знайдені ефективні формули для зміни спектральних характеристик мікроскопічного кристала.

І.М.Ліфшицем були також досліджені пружні властивості полікристалів як при статичному навантаженні, так і при поширенні в них ультразвуку; суттєво розвинуто теорію дифузійно-в'язкої течії полікристалів [614]. Побудовано термодинаміку шаруватих та ланцюгових структур і вперше звернено увагу на визначальну роль згинальних коливань у таких структурах [615,616]. Пізніше опис високотемпературної повзучості полікристалів було доповнено теорією дифузійно-дислокаційного механізму течії полікристалів.

У праці І.М.Ліфшиця та Л.Н.Розенцвейга (ФТІАН) було поставлено задачу дослідити вплив на спектр коливань ґратки вільної поверхні кристала. Цей вплив трактувався як збурення в незбуреній задачі про коливання необмеженої кристалічної ґратки, яка розв'язувалась методами теорії регулярних збурень, запропонованої І.М.Ліфшицем. Введене збурення приводить до появи у спектрі коливань дискретних частот, яким відповідають поверхневі хвилі, що затухають у глибині кристала. Частотам, які відділилися від акустичних гілок, у граничному випадку довгих хвиль відповідають звичайні релеєвські хвилі. Однак існують також „оптичні” поверхневі хвилі, які не мають аналогів у теорії пружності. Одержані рівняння описують точний закон дисперсії та форму поверхневих хвиль, загальне дослідження яких можливо тільки в деяких граничних випадках.

Теорія дислокацій є основою сучасної фізики пластичності та міцності. У цій важливій галузі І.М.Ліфшиць одержав суттєві результати – розвинув динаміку дислокацій та вивів рівняння руху довільної дислокаційної лінії у зовнішніх пружних полях. Причому передбачені динамічні ефекти типу випромінювання звуку дислокацією були знайдені експериментально.

Важливим результатом, який пізніше було підтверджено численними експериментами, стала розвинута І.М.Ліфшицем та В.В.Слезовим кінетика дифузійного розпаду пересичених



твердих розчинів, за допомогою якої можна було описати пізню стадію будь-якого дифузійного процесу, серед яких кінетика макроскопічних дефектів типу включень другої фази, пор, дислокацій. Роботи І.М.Ліфшиця в галузі дифузійного розпаду твердих розчинів та високотемпературного дифузійно-в'язкої течії створили нову фізичну картину цих процесів та стимулювали численні дослідження. Продовженням робіт з теорії енергетичного спектра реальних кристалів стало дослідження вченим у 1955—1957 рр. електронного енергетичного спектра неупорядкованих систем, що реалізують цей спектр квантових станів (зокрема, структури спектра домішкових зон елементарних збуджень у твердих розчинах [617]. Використавши результати своєї теорії локальних збурень, І.М.Ліфшиць здійснив розкладання термодинамічних величин кристала з домішками за степенями їх концентрації, показавши найбільш загальний характер цього розкладання порівняно з розкладанням за степенями збурення; він перший (1956) використав термін “неупорядкована система” у сучасному розумінні; чітко визначив властивість самоусереднення спектра в домішковій зоні при малих концентраціях домішок. У 1963 р. вченим було побудовано “базисну модель” для структури енергетичного спектра домішкових зон, у рамках якої було доведено, що при малій концентрації домішок всі стани у домішковій зоні локалізовані; розроблено ефективний метод знаходження густини станів у флуктуаційній області (сингулярність Ліфшиця), введено поняття оптимальних флуктуацій, побудовано флуктуаційну картину спектра, модель структурного хаосу (модель Ліфшиця) [618].

У 1967 р. І.М.Ліфшиць розробив послідовну кількісну теорію флуктуаційних рівнів, у якій здійснив макроскопічний опис оптимальної флуктуації, що дало можливість побудувати самоузгоджені рівняння та знайти для них загальну формулу для густини флуктуаційних рівнів, тобто зробити метод оптимальної флуктуації більш універсальним.

У 1969 р. І.М.Ліфшиць та С.А.Гредескул, використавши флуктуаційний підхід, прийшли незалежно від М.О.Кривоглаза (1973 р.) до уявлення про флуктуони (автолокалізовані на флуктуаціях стани електронів) та розробили їх теорію. У 70-ті роки ХХ ст. програма в галузі теорії неупорядкованих систем, запропонована у 1964 р. І.М.Ліфшицем, була значною мірою реалізована його учнями. Так, Л.А.Пастур винайшов густину станів у ряді моделей неупорядкованих систем, розробив ефективний метод обчислення кінетичних коефіцієнтів у одновимірних системах, детально вивчив домішковий та флуктуаційний спектри, винайшов ряд нових властивостей процесу проходження хвиль та частинок через товсті шари неупорядкованих середовищ [619]. Пізніше І.М.Ліфшиць з учнями виконали ряд робіт, пов'язаних з вивченням проходження частинок та хвиль через випадково неоднорідні середовища. Значущість цих робіт пов'язана з незастосовністю до неупорядкованих структур уявлень про збудження, розроблених для періодичних структур.

Ще один напрям, де І.М.Ліфшиць було одержано визначні результати – це новий розділ біофізики, що бурхливо розвивався у 60-ті роки – статистична термодинаміка полімерів. Він запропонував підхід до задачі перетворення “клубок”–“глобула” у макроскопічних ланцюгах типу молекули ДНК. У даному напрямі теорії біополімерів у Харкові продовжував працювати А.М. Косевич, у працях якого було розвинуто нелінійну динаміку магнітоупорядкованих середовищ та суттєво вдосконалено теорію солітонів у конденсованих середовищах.

Широта спектру теоретичних робіт І.М.Ліфшиця залишила вченого лідером харківських теоретиків у галузі фізики твердого тіла та статистичної фізики навіть після його від'їзду у 1968 р. до Москви.

### 5.1.2. Створення методу колективних змінних у класичному та квантовому випадках (І.Р.Юхновський, 1958—1964 рр.)

Розбудова ідей і методів статистичної фізики в Україні значною мірою пов'язана з діяльністю академіка НАН України Ігоря Рафаїловича Юхновського. В його працях одержано низку принципово важливих результатів у галузі фізики конденсованої речовини, фазових переходів та критичних явищ, зроблено вагомий внесок у розвиток статистичної теорії рідин, розчинів та розплавів електролітів, металів і сплавів, невпорядкованих систем, квантових рідин, електронного газу в металах, частково збуджених систем, сегнетоелектриків, електролітичних плівок та мембран, надплинної рідини та високотемпературної плазми. Серед результатів І.Р. Юхновського — метод колективних змінних у класичному і квантовому випадках для одночасного коректного врахування коротко- і далекодіючих вкладів в термодинамічні та структурні властивості багаточастинкових систем, статистична теорія фазових переходів другого роду, мікроскопічна теорія розчинів електролітів.

Ключове місце в наукового доробку академіка Юхновського займає побудова наприкінці 50-х — на початку 60-х рр. ХХ ст. методу колективних змінних у класичній та квантовій теорії для опису колективних ефектів у системах взаємодіючих частинок, створеного на основі узагальнення попередніх результатів для систем заряджених частинок [620—622]. На основі даного методу, у якому центральну роль відіграє якобіан переходу від індивідуальних координат частинок до колективних змінних, у подальшому І.Р.Юхновським з учнями виконано дослідження в галузі теорії іонно-молекулярних систем, електронного газу в металах, високотемпературної плазми, бінарних сплавів.

Слід зазначити, що спроби здійснити у статистичному описі перехід до простору колективних координат, які б давали можливість адекватно описувати колективні ефекти, робили як на рівні рівнянь руху, так і на етапі побудови статистичної теорії ряд вчених — Дж.Пайнс, Д.Бом, Ж.Перкус, Г.Йевік, М.М. Боголюбов та Д.М.Зубарев [623—625]. Однак у більшості цих робіт колективні координати розглядалися як зайві чи додаткові і перехід до них вимагав або забезпечення умови збереження загального числа ступенів вільності, коли йшлося про рівняння руху, або ж, відповідно, розрахунку якобіану переходу під час побудови статистичної теорії. В останньому випадку, зокрема, виходили з того, що коли розглядати колективні координати як незалежні флуктуаційні хвилі, які описують коливання густини числа частинок, то згідно з центральною теоремою теорії ймовірностей, можна прийти до гаусової форми для якобіану переходу. Одержаний у такий спосіб опис відомий під назвою наближення хаотичних фаз. Спроби послідовнішого розрахунку якобіану переходу робив Д.М.Зубарев [626], однак у межах гаусової форми. Розвиваючи цей напрям, І.Р.Юхновський запропонував схему розрахунку якобіану, що дало змогу послідовно одержати математично-коректне функціональне представлення для статистичної суми уже в просторі колективних змінних, врахувати кореляції між флуктуаційними хвилями, за допомогою чого вийти за межі гаусового наближення.

Коллективні змінні в методі Юхновського використовувалися для опису далекосяжних кулонівських взаємодій, але оскільки в системі частинок присутні й короткосяжні взаємодії, то Ігор Рафаїлович запропонував ідею виділення системи відліку шляхом усереднення функції переходу до колективних змінних за підсистемою з короткосяжною взаємодією. Ці результати були опубліковані в 1958 році. Вони певною мірою випереджали свій час, оскільки методи опису систем з короткосяжною взаємодією не були тоді достатньо розвинуті. Пізніше вчений повертається до ідеї системи відліку, яка стає ефективною в теорії численних конденсованих систем, зокрема рідин і розчинів.

У запропонованому І.Р.Юхновським формалізмі, що одержав назву базисного підходу, опис системи взаємодіючих частинок (атомів, іонів, молекул) здійснюється в розширеному фазовому просторі, утвореному як з індивідуальних координат частинок, так з колективних змінних — хвиль коливань густини для відповідної характеристики системи. Залежно від конкретної задачі це може бути густина числа частинок, густина електричного заряду, густина дипольного моменту, спінова густина тощо. Ці групи змінних використовуються відповідно для опису коротко- і далекосяжних взаємодій. Перехід у розширений фазовий простір відбувається за допомогою функції переходу, для якої доведені властивості повноти та ортонормованості, знайдено явний вираз якобіану переходу. Одержані вирази для термодинамічних і структурних функцій мають форму високорупових розвинень і замість далекодійних потенціалів містять екрановані. Це дає змогу послідовно врахувати багаточастинкові кореляційні ефекти. Характерною особливістю цих розвинень є екранування далекосяжних взаємодій та усунення математичних розбіжностей, які виникали у традиційних підходах теорії класичних частинок.

Для врахування короткосяжних взаємодій І.Р.Юхновський розвинув два підходи. Перший з них базується на функціональному диференціюванні і веде до узагальнення масрівських групових розвинень для систем з коротко- і далекосяжними взаємодіями, а другий ґрунтується на базисному розгляді короткосяжних взаємодій, на фоні яких враховуються уже екрановані далекосяжні взаємодії. Останній метод виявився ефективним для кількісного опису різних конденсованих систем, зокрема, ґраткових моделей.

Слід зазначити, що приблизно в той самий час була запропонована інша методологія отримання функціонального представлення у задачах статистичної механіки, що базувалася на використанні інтегральної тотожності Стратоновича-Габарда [627,628]. В даному підході в якості змінних виступають величини, комплексно спряжені до колективних змінних. Однак, на відміну від останніх, вони не мають чіткого фізичного змісту. Перевагою підходу Юхновського стало також те, що він легко узагальнюється у разі врахування багаточастинкових взаємодій, де інша схема стає незастосовною.

Другий етап у розвитку методу колективних змінних пов'язаний з застосуванням його до опису квантових систем взаємодіючих частинок. Суть запропонованого в 1964 році І.Р.Юхновським підходу, названого методом зміщень і колективних змінних, полягала у послідовному виділенні із квантового статистичного оператора еволюції, заданого на множині декартових координат частинок такої частини, що характеризує взаємодію квантових хвильових пакетів частинок і виражається через колективні змінні [621,622]. Цю частину Ігор Рафаїлович представив у експонентному вигляді як безмежний ряд, записаний у термінах колективних змінних. В такий спосіб можна було прийти до еквівалентного представлення статистичної суми квантової системи, яке з формальної точки зору ставило їй у відповідність класичну систему із багаточастинковими взаємодіями. Таким чином, у методі зміщень і колективних змінних розрахунок статистичної суми квантової системи зводиться до розрахунку статистичної суми ефективної класичної частини з багаточастинковими взаємодіями.

Запропонований підхід виявився продуктивним в теорії різноманітних фермі- та бозе-систем взаємодіючих частинок, таких як високотемпературна плазма та електронний газ в металах. На початок 60-х рр. ХХ ст. у роботах Д.Бома, Дж.Пайнса, М.Гелл-Манна, К.Бракнера було побудовано теорію електронного газу для випадку, коли кінетична енергія електронів набагато більша від енергії кулонівської взаємодії, тобто коли значення параметра неідеальності в одиницях радіуса Бора менші від 1. Для густин вільних електронів реальних металів величина параметру

неідеальності знаходиться в інтервалі „проміжних” значень: 2–6. Тому на той час не існувало теорії, яка б адекватно описувала властивості електронного газу, який має густину, характерну для металів. У багатьох наукових центрах вівся інтенсивний пошук способів розв’язання цієї проблеми.

Досвід показав, що метод зміщень та колективних змінних виявився одним з найефективніших. Особливо успішними були його застосування до кількісної мікроскопічної теорії рідкого гелію. Характеристикою останньої моделі електронного газу в однорідному компенсуючому позитивному фоні є параметр неідеальності – середній об’єм, що припадає на один електрон. Першим почав використовувати з Ігорем Рафаїловичем цей підхід в теорії високотемпературної плазми Л.Ф.Блажиевський, який розробляє як рівноважну статистичну теорію релятивістських систем заряджених частинок, так і нерівноважний статистичний опис релятивістської плазми.

### 5.1.3. Розвиток статистичної теорії фазових переходів (І.Р.Юхновський, кінець 60-х рр. ХХ ст.)

Новий етап розвитку методу колективних змінних настає наприкінці 60-х — на початку 70-х років ХХ ст. і пов'язаний з розробкою І.Р.Юхновським статистичної теорії фазових переходів другого роду [629].

Наприкінці шістдесятих років в літературі відзначалося зростання робіт в цій галузі. Найтой момент стало зрозуміло, що специфічні критичні явища, які спостерігаються поблизу фазових переходів другого роду, зумовлені, насамперед, сильними кореляціями в системі. Ця обставина призводить до часткової втрати інформації про мікроскопічні деталі, а також до уніфікації поведінки у формально різних фізичних системах. Основні зусилля теоретиків були спрямовані на опис такого механізму та розробку адекватного математичного апарату для розрахунку цих універсальних характеристик для широких класів фізичних систем. Для цього достатньо було обмежитися розглядом деяких моделей, в яких деталі мікроскопічного опису враховуються лише опосередковано. Такими були модель К.Вільсона, відзначеного нобелівською премією з фізики у 1982 р. за його внесок у розвиток на початку сімдесятих років теорії критичних явищ, а також моделі М.Фішера, Л.Каданова, Ж.Зін-Жюстена, Ф.Венгера та інших фізиків-теоретиків, у працях яких була створена сучасна теорія фазових переходів.

Підхід І.Р.Юхновського відрізняється від зазначених робіт послідовною мікроскопічністю. Він мав на меті розробити теорію, яка б давала можливість починати із розгляду певної конкретної мікроскопічної моделі і бачити, в який саме спосіб формується універсальна поведінка на прикладі саме цієї моделі, а також дослідити прояв деталей міжчастинкових взаємодій на поведінці термодинамічних характеристик. В основу підходу І.Р.Юхновський кладе ідею про те, що статистичний опис процесу фазового переходу має здійснюватись у відповідному кожній фізичній системі фазовому просторі колективних змінних, серед яких є змінні, пов'язані з відповідним параметром порядку. Паралельно була розв'язана задача обчислення функціональних інтегралів, які виникали в теорії, без використання звичних пертурбативних методів, які призводили до виникнення розбіжностей поблизу фазового переходу. Ідеологія, сформульована при створенні цієї непертурбативної ренормгрупової теорії в 70-ті роки оформилася у метод пошарового інтегрування, на основі якого вдалося отримати численні результати, які наочно демонстрували механізм виникнення ренормгрупової симетрії і формування універсальної поведінки поблизу переходу другого роду на прикладах конкретних моделей статистичної фізики. Даний метод дозволив в єдиній схемі виконувати розрахунки як універсальних, так і неуніверсальних характеристик для реалістичних модельних систем у тривимірному просторі в околі точки фазового переходу II роду.

„Про одне його наукове досягнення хочеться сказати кілька слів — маю на увазі дослідження з теорії фазових переходів II роду, зокрема з теорії тривимірної моделі Ізінга, — писав А.Свідзинський. — Знаю особисто не одного фізика-теоретика, а часом і математика, який, надихаючись блискучим результатом Онзагера щодо двовимірної моделі, виходив на черговий штурм тривимірної моделі. Однак проблема не піддавалася героїчним зусиллям: точного розв'язку не дав ніхто.

Проблемою займався Ігор Рафаїлович. Він застосував свій улюблений метод колективних змінних, які вигідні при описі фазового переходу тим, що серед них знаходиться параметр впорядкування. Перехід від вихідних змінних, через які записаний гамільтоніан, не є унітарним перетворенням, тому в представленні статистичної суми у вигляді інтеграла за колективними змінними фігурує якобіан переходу, функціональні властивості якого виявляються вельми важливими, він певною мірою подібний до функціонала Гінзбурга—Ландау. Наближену теорію Ігор Рафаїлович побудував шляхом функціонального розкладу, при цьому цікава фізика виникла вже при врахуванні члена четвертого порядку (обмеження квадратичним гауссовим членом дало б стандартну теорію критичних показників). Ігор Рафаїлович розвинув техніку пошарового інтегрування, починаючи із змінних з великим значенням квазіімпульсу і далі — з меншими. На цьому шляху було розкрито мікроскопічний механізм фазового переходу, появу скейлінгового режиму, теорії подібності. Після подальшого розвитку, в якому брали участь учні Ігоря

Рафаїловича, теорія була уточнена кількісно і зараз має високий науковий статус не лише як теорія моделі Ізінга, а й як загальна схема побудови мікроскопічної теорії фазових переходів. Я згадую той величезний інтерес, навіть ентузіазм, який викликала ця робота Ігоря Рафаїловича на найвищих (і найвимогливіших) наукових форумах Москви” [647,с.41].

Оскільки Ігоря Рафаїловича зацікавив кулонівський характер поведінки кореляційної функції в точці фазового переходу та пов'язані з цим особливості поведінки термодинамічних величин, він повертається до плазмових розвинень для бінарних функцій розподілу систем заряджених частинок, класифікує розбіжності і показує, що якобіан переходу до колективних змінних в околі фазового переходу має негауссівську форму і повинен містити в експоненті як мінімум другий та четвертий степені колективних змінних.

Слід зазначити, що на першій стадії досліджень постає проблема правильного вибору колективних змінних, „відповідальних” за фазовий перехід. У магнітних системах, наприклад, ці змінні пов'язані з модами коливань спінового моменту, у сегнетоелектриках – з модами коливань дипольного моменту, у системі рідина-газ – з модами відхилень густини від критичної. І.Р. Юхновським було строго доведено, що середні значення тих колективних змінних, які відповідають абсолютному мінімуму фур'є-зображення ефективного потенціалу взаємодії мод, пропорційні параметру порядку. Нижче температури фазового переходу для них з'являються нетривіальні (ненульові) розв'язки. Важливо, що у методі колективних змінних параметр порядку одержують природним чином, а не вводяться ззовні, як це має місце у феноменологічній теорії фазових переходів другого роду Л.Д.Ландау. Ці висновки лягли в основу розробленого І.Р. Юхновським методу інтегрування статистичної суми моделі Ізінга з негауссовим базисним розподілом [648].

Запропонований підхід виявився достатньо загальним і застосовним для опису фазових переходів у різноманітних фізичних системах. Разом з учнями — І.О.Вакарчуком, Ю.К. Рудавським, М.П.Козловським, В.О.Коломійцем, Ю.В.Головачем, І.М.Мриглодом, І.М.Іздиком, Р. Р.Левицьким, М.А.Кориневським, І.Р.Зачеком, О.В.Держком, О.В.Пацаган — даний метод І.Р. Юхновським було узагальнено для дослідження фазових переходів у дво-, три- та багатокомпонентних сплавах, гелії, моделі Гейзенберга, в невпорядкованих магнітних системах, сегнетоелектриках, рідинах та розчинах, для критичної точки рідина-пара. Запропонований метод містить у собі також потенційні можливості, особливо щодо застосування в таких складних і важливих об'єктах, як флюїди в пористих середовищах, самоорганізовані та самоасоційовані системи. Детальний опис даних робіт міститься у розділі 6.4.

5.1.4. Поширення методу скороченого опису на широкий клас динамічних систем. Побудова нерівноважної крупноструктурної ентропії системи взаємодіючих частинок (С.В.Пелетмінський, 60-ті — початок 70-х рр. ХХ ст.)

Значний внесок у розвиток методів статистичної фізики незворотних процесів, що базуються на ідеї скороченого опису нерівноважних багаточастинкових систем, а також у застосування цих методів в галузі надплинності, надпровідності, теорії плазми, фізики магнітних і спінових явищ у твердих тілах належить академіку НАН України Сергію Володимировичу Пелетмінському.

Так, у 60–70-ті рр. ХХ ст. С.В.Пелетмінський виконав фундаментальний цикл робіт в галузі розбудови методології статистичної фізики. Ним було запропоновано метод опису кінетичних процесів, де завдяки певній структурі гамільтоніану стан в області великих часів описується певним набором параметрів, який визначається ергодичними співвідношеннями. Використовуючи метод сумування секулярних членів, Сергій Володимирович з'ясував фізичну і математичну причини можливості такого скороченого опису. В цих працях він розвиває та узагальнює метод М. М.Боголюбова скороченого опису нерівноважних процесів для широкого класу макроскопічних систем, використовуючи такі загальні принципи, як принцип просторового послаблення кореляцій та ергодичні співвідношення.

С.В.Пелетмінський не тільки значно розвинув ідеї Боголюбова в статистичній фізиці, він знайомив харківських теоретиків з цими ідеями і ще навчаючись в аспірантурі, він організував семінар по цій книзі.

Важливо, що при математичному обґрунтуванні методу скороченого опису С.В.Пелетмінським було з'ясовано вирішальну роль принципу просторового послаблення кореляцій між молекулами, а також ергодичних співвідношень для нерівноважного статистичного оператора [632—634]. Одержане рівняння Пелетмінського-Яценко для статистичного оператора стало значним досягненням нерівноважної статистичної фізики [635].

Оскільки макроскопічна система з великим ступенем точності є системою з нескінченно великим числом ступенів вільності, то будь-який макроскопічний опис таких систем по суті може бути тільки скороченим. Причому за наявності малого параметру ідея скороченого опису може застосовуватись не тільки до станів статистичної рівноваги, а також до широкого класу нерівноважних станів [636]. Поклавши в основу розрахункової схеми добре розроблені квантово-польові методи, на базі запропонованого методу С.В.Пелетмінський побудував квантові кінетичні рівняння для нормальних та вироджених систем.

Розроблений метод скороченого опису, об'єднаний з іншим методом теорії багатьох частинок – методом функцій Гріна, дозволив знаходити асимптотичні представлення останніх в різних областях частот та хвильових векторів, де стандартні методи теорії збурень незастосовні. Так, С.В.Пелетмінським та В.С.Щелоковим було досліджено асимптотичні представлення електродинамічних функцій Гріна, а також одночасткових функцій Гріна вироджених Бозе- та Фермі-систем [637—639].

Ідея скороченого опису нерівноважних станів дала можливість дослідити також питання побудови кінетичної теорії крупномасштабних флуктуацій та вирішити таку фундаментальну проблему статистичної механіки, як побудова нерівноважної крупноструктурної ентропії системи взаємодіючих частинок. Ця проблема залишалась нерозв'язаною з часу виникнення статистичної механіки. Тому праці С.В.Пелетмінського 1974—1978 років, де було вирішено це питання і знайдено загальний вираз для крупноструктурної ентропії, який узагальнив формулу Больцмана для ентропії ідеального газу, стали суттєвим внеском у світову статистичну фізику. С.В.Пелетмінським з учнями О.Й.Соколовським, Ю.В.Слюсаренком та В.І.Приходьком було знайдено універсальну структуру кінетичних рівнянь для флуктуацій, побудовано гідродинамічну теорію довгохвильових флуктуацій, а також досліджено степеневі закони релаксації системи до стану статистичної рівноваги.

С.В.Пелетмінському, Ю.П.Вірченко, О.Й.Соколовському та М.Ю.Ковалевському вдалося з'ясувати, у чому полягає різниця між мілкоструктурною ентропією (ентропія Неймана), та крупноструктурною ентропією, яка з часом зростає [640—642]. Виявилось, що мілкоструктурна ентропія для огрубленого статистичного оператора розбігається, і це пов'язане з переходом від точного до скороченого опису. Використовуючи відомі міркування Гіббса про структуру фазового простору в області великих часів, вчені побудували зростаючу з часом крупноструктурну ентропію, вільну від згаданих розбіжностей. Ними було показано, що побудована нерівноважна ентропія задовольняє всі фізичні вимоги, які ставляться до неї, тобто у стані рівноваги вона збігається з термодинамічною ентропією та реалізує її максимум, а також приводить до термодинамічних сил, які задовольняють основний принцип нерівноважної термодинаміки — принцип симетрії кінетичних коефіцієнтів. Було показано, що питання побудови крупноструктурної ентропії можна пов'язати з визначенням добутків узагальнених функцій із збіжними особливостями (регуляризація).

Інший важливий напрямок, який розроблявся у працях Сергія Володимировича та його учнів (Н.М.Лавриненко, О.Й.Соколовський, Ю.В.Слюсаренко, В.І.Приходько та О.М.Тарасов), був пов'язаний з побудовою теорії систем із спонтанно порушеною симетрією, дослідженням асимптотичної поведінки функцій Гріна таких систем та поширенням цих результатів на квантово-механічні системи, з використанням концепції квазісередніх. До таких систем належать, наприклад, надплинні рідини та надпровідники, ферромагнетики, квантові кристали, спіральні магнітні структури.

У 80-х—90-х роках ХХ століття у працях С.В.Пелетмінського та його учнів О.О.Яценка, В.В.Красильникова та О.О.Ісаєва на основі запропонованої Л.Д.Ландау концепції фермі-рідини одержала розвиток теорія фермі-рідини та було побудовано узагальнений фермі-рідинний підхід для надплинних систем [643—646]. На базі знайденого вченими простого виразу для ентропії нерівноважного газу елементарних збуджень, було побудовано просте рівняння самоузгодження для визначення рівноважних нормальної та аномальної функцій розподілу. Це рівняння не передбачає наявності слабкої взаємодії між частинками.

Була також побудована напівфеноменологічна теорія надплинних систем синглетним та триплетним паруванням та розвинута кінетична і гідродинамічна теорія довгих (макроскопічних) нерівноважних флуктуацій. Знайдено універсальну структуру кінетичних рівнянь для флуктуацій, на основі якої було побудовано гідродинамічну теорію флуктуацій; одержані рівняння флуктуаційної гідродинаміки та досліджено степеневі закони релаксації. Вивчено явища надплинності та надпровідності при наявності зв'язаних станів ферміонів, які існують вище за точку переходу (О.І.Ахієзер, С.В.Пелетмінський, О.О.Яценко), запропоновано підхід до побудови гідродинаміки надплинної рідини з урахуванням дисипативних процесів. Таким чином, створена теорія є узагальненням, з одного боку, звичайної теорії фермі-рідини Ландау—Силіна на надплинні системи (включаючи He3), а з іншого боку — теорії БКШ—Боголюбова на системи, в яких не передбачається слабка взаємодія.

Займаючись статистичною фізикою, велику увагу Сергій Володимирович приділяв також застосуванням методів квантової теорії поля та теорії елементарних частинок. У 80-х—90-х роках ХХ століття С.В.Пелетмінським та О.І.Ахієзером були написані дві великі монографії з кантової теорії поля, які відображають останні досягнення в цих галузях теоретичної фізики, пов'язані з поєднанням слабкої, електромагнітної та сильної взаємодій, відкриттям кварків, введенням суперсиметрії [647,648].



### 5.1.5. Обґрунтування нерівноважної статистичної механіки нескінченних систем. Еволюційний підхід до кінетичних рівнянь для квантової статистики (Д.Я.Петрина, кінець 60-х рр. ХХ ст.)

Ідеї М.М.Боголюбова в галузі статистичної фізики узагальнювали та розвивали його послідовники в Україні. Одним з яскравих представників наукової школи М.М.Боголюбова був академік НАН України Дмитро Якович Петрина — талановитий вчений, учитель, організатор, непересічна особистість. Він збагатив науку фундаментальними результатами в галузі класичної та квантової статистичної механіки, квантової теорії поля, теорії граничних задач у ділянках зі складною структурою. Задачі, розв'язані ним, завжди були пов'язані з необхідністю строгого математичного розгляду.

„Головне місце в житті Дмитра Яковича займала наука. Він був великим трудівником, який віддав науці все своє життя. І наука віддячила йому, подарувавши світове визнання, повагу і любов учнів”, — писали про вченого В.І.Герасименко та А.Г.Загородній [649, с.7].

Д.Я.Петрина народився 23 березня 1934 р. у селі Торгановичі Старосамбірського району Львівської області. В 1951 р. вступив на механіко-математичний факультет Львівського університету, який закінчив у 1956 р. за спеціальністю механіка. Того ж року був зарахований до аспірантури Інституту математики АН УРСР, по завершенні якої з 1959 р. працював молодшим науковим співробітником, з 1963 р. — старшим науковим співробітником цього інституту. У 1966 р. перейшов до Інституту теоретичної фізики, де працював старшим науковим співробітником, з 1969 — завідувачем лабораторії, з 1978 р. — керівником відділу статистичної механіки. У 1986 р. відділ Д.Я.Петрини був переведений до Інституту математики. Цим відділом математичних методів у статистичній механіці Інституту математики НАН України вчений керував до останнього дня життя. У 1981 р. Д.Я.Петрині було присвоєно звання професора кафедри теоретичної фізики Київського університету ім. Т.Г. Шевченка, в 1988 р. його обрано членом-кореспондентом, у 2006 р. — академіком НАН України. Праці вченого відзначено Державною премією України в галузі науки та техніки за 2001 рік, преміями Президії НАН України ім. М.М. Крилова (1984 р.) та ім. М.М. Боголюбова (2004 р.).

Протягом тридцяти років Д.Я.Петрина викладав у Київському університеті імені Тараса Шевченка на фізичному та механіко-математичному факультетах, підготував 15 кандидатів та 7 докторів наук — О.Л.Ребенко, В.І.Скрипник, В.І.Герасименко, М.Расулова, В.З.Енольський, А.В. Пілявський, О.К.Видибіда. Вчений був експертом Вищої атестаційної комісії при Раді Міністрів СРСР та членом редакційної колегії Українського математичного журналу, співпрацював з багатьма провідними науковцями Росії, Італії, Канади, Австрії, Польщі, Ірландії, Німеччини, Франції, Бельгії, США, Японії, Болгарії, Чехії.

Науковий доробок академіка Д.Я.Петрини налічує понад 170 наукових праць, серед яких 6 монографічних оглядів в журналах „Успехи математических наук” і “Soviet Mathematical Review” та 8 монографій, широко відомих у світі. Свою дев'яту монографію він завершив, але не встиг побачити її виходу в світ у 2008 р. в Інституті математики [650].

В галузі статистичної фізики Д.Я.Петрині вдалося розв'язати фундаментальну проблему математичного обґрунтування виведення кінетичного рівняння Больцмана, яке широко використовується для опису газів, плазми, конденсованих станів багаточастинкових систем, а також еволюційних процесів у сучасних технологіях, соціальних науках. Ним також була побудована теорія ланцюжків рівнянь Боголюбова для класичної (1969) та квантової (1972) статистик нескінченних динамічних систем, вперше доведено існування термодинамічної границі для нерівноважних станів.

Спільно зі своїм вчителем академіком М.М.Боголюбовим Д.Я.Петрина виконав фундаментальну роботу з обґрунтування термодинамічної границі для станів рівноважних необмежених систем [571]. Нині широко відомою є теорема Боголюбова-Петрини-Хацета про існування термодинамічної границі рівноважних станів статистичних систем, яка стала основою розвитку наприкінці ХХ ст. сучасної математичної статистичної механіки.

У квантовій статистичній механіці вчений першим побудував розв'язки рівнянь Боголюбова для статистичних операторів, при цьому ним було запропоновано новий підхід, коли квантовий ланцюжок рівнянь Боголюбова розглядається як єдине еволюційне рівняння у функціональному просторі послідовностей ядерних операторів [651]. З даної праці беруть витоки створених Д.Я.Петриною функціонально-аналітичних методів розв'язання ланцюжка рівнянь. Ці результати підсумовано в монографіях "Математичні основи класичної статистичної механіки" та „Кінетичні рівняння динаміки багатьох частинок” (англ.мовою) [652—654]. Роботами вченого початку 70-х рр. ХХ ст. започатковано математичну теорію нерівноважних статистичних систем. Д.Я.Петриною було одержано принципові результати також в галузі квантової теорії поля, які будуть розглянуті в розділі 5.3.

Дослідження Д.Я.Петрини були продовжені його учнями. Так, у працях доктора фізико-математичних наук, професора, завідувача відділу математичних методів у статистичній механіці Інституту математики НАН України В.І.Герасименка розвивається напрям, в основу якого покладено застосування рівнянь Боголюбова нескінченночастинкових систем для опису нерівноважних станів статистичних систем, зокрема, кінетичних рівнянь [655—659]. Праці Д.Я.Петрини та В.І.Герасименка в цій галузі було відзначено Державною премією України галузі науки і техніки за 2001 р.

Доктор фізико-математичних наук, професор, завідувач відділу математичної фізики Інституту математики НАН України О.Л.Ребенко та С.С.Іванов — перші учені Д.Я.Петрини — при дослідженні модельних систем квантової теорії поля і класичної статистичної механіки методами евклідової квантової теорії поля розглядали рівняння для коефіцієнтних функцій матриці розсіяння в евклідовому просторі—часі з розмірністю 4 та побудували проекційно-ітеративний метод розв'язання цих рівнянь. Даний метод привів до перенормованого ряду теорії збурень, який виявився квазірозв'язком вихідних рівнянь [660,661].

Доктор фізико-математичних наук В.І.Скрипник встановив відсутність фазових переходів для низки одновимірних неперервних моделей класичної статистичної механіки і розглянув проблему граничного переходу до нескінченного об'єму в моделі з суттєво-нелінійним лагранжіаном. За допомогою трансфер-матриці встановлено відсутність фазових переходів у одновимірних гіббсових неперервних класичних системах з потенціалом з класу додатньо визначених обмежених функцій [662].

У 1971 р. В.П.Яцишиним при доведенні існування фазового переходу з нормального в надпровідний стан було показано, що ланцюжок рівнянь для функцій Гріна має два розв'язки, а саме вільні функції Гріна та функції Гріна надпровідного стану. Даний метод було поширено на бозе-системи та розглянуто для бозе-газу модельний гамільтоніан типу БКШ, якому надано строгий математичний зміст при нескінченному об'ємі [663].

О.К.Видибіда досліджував кінетичні рівняння Боголюбова для класичної статистики і за умови наявності скінченної кількості частинок або скінченного об'єму він побудував розв'язки цих рівнянь у просторі інтегрованих функцій, довів голономність одержаних розв'язків за щільністю та побудував формулу, що наочно відображувала розв'язки кінетичних рівнянь залежно від початкових умов [664]. В цьому напрямку визнаною є фундаментальна праця Д.Я.Петрини про метод області взаємодії [665].

Методи статистичної фізики Д.Я.Петриною застосовувались також зо задач квантової теорії поля. Про ці роботи йтиметься у розділі 5.1.6.

### 5.1.6. Застосування методів статистичної фізики у квантовій теорії поля та теорії елементарних частинок (М.М.Боголюбов, 1951—1965 рр. ).

Для розв'язання задач статистичної фізики М.М.Боголюбов широко використовував методи квантової теорії поля, оскільки одним з перших усвідомив глибоку ідейну спорідненість нерелятивістської задачі багатьох тіл та квантової теорії поля, яка нині видається очевидною. Тут яскраво виявилось вміння Миколи Миколайовича виділяти спільне в різних галузях фізики, що зробило можливим плідне взаємне використання ідей та методів. Тому не дивно, що за роботами зі статистичної фізики, за послідовною розробкою апарата вторинного квантування, ідей надплинності і надпровідності з 1951 р. почав проводитись значний цикл глибоких досліджень з основ сучасної квантової теорії поля [666, т.3, с.282—485].

На той момент, коли М.М.Боголюбов почав вивчати проблеми квантової теорії поля, в ній був тільки один ефективний апарат — теорія збурень, що мала, на жаль, суттєвий недолік — ультрафіолетові розбіжності, яких намагались уникнути шляхом перенормування маси та заряду. Це була одна з основних проблем квантової теорії поля, що була виявлена внаслідок аналізу взаємодії заряджених частинок з полем випромінювання.

Значення розбіжностей зрозуміли не одразу. Вперше на те, що наступні наближення (тобто більш високі порядки теорії збурень в квантовій теорії поля) завжди містять у собі розбіжні інтеграли в результатах для власних енергій, звернули увагу в 1930 р. незалежно один від одного Дж.Опспенгеймер та І.Валлер [667,668].

В.Вайскопф разом з двома студентами В.Гейзенберга: Е.Ейлером (внуком великого математика), та Ф.Коккелем висловили в 1936 р. припущення, що нескінченні внески від фотонів з великими імпульсами цілком обумовлені нескінченною власною масою, нескінченним “голим” зарядом та вакуумними величинами на зразок діелектричної сталої вакууму, які не піддаються вимірюванню. Вони також показали, що розбіжні вирази, по суті, є не спостережувані — інакше кажучи, їх можна внести в перенормовані масу та заряд [669—671]. Так на ідейному рівні було закладено перенормування.

У ті ж роки Е.Штюкельберг надрукував кілька статей (1935,1938) [672,673], у яких містились ідеї та деякі математичні прийоми перенормувань. Свій внесок у розробку методу перенормувань на початковому етапі зробили також Х.Краммерс (1938 р.), Х.Бете (1947 р.), В. Вайскопф та Дж.Френч (1949 р.), Н.Кролл та У.Лемб (1949 р.).

Новий поштовх теоретичним зусиллям дали експериментальні результати. У 1947 р. У. Лемб та Р.Ризерфорд зуміли точно виміряти цю величину (лембів зсув) [674]. Після цього Х.Бете теоретично обчислив ефект взаємодії з електромагнітним полем, вважаючи, що воно дорівнюватиме нулю для фотонів, енергія яких перевищує  $mc^2$  [675]. У 1949 р. Дж.Френч та В. Вайскопф здійснили розрахунок відповідної різниці та дістали результат, що добре узгоджувався з експериментом [676]. Проте до моменту виходу з друку їх праці аналогічні обчислення були проведені декількома місяцями раніше Н.Кроллом та У.Лембом [677]. Вперше ж такий підхід було запропоновано ще в 1939 р. С.М.Данковим, але при обчисленнях він припустився помилки.

Головна теоретична складність полягала в тому, щоб відокремити питання про нескінченність маси і заряду від основної частини теорії та одержати результати, які можна було б порівняти з явищами, що відбуваються в природі, тобто переформулювати квантову електродинаміку так, щоб релятивістська інваріантність теорії стала більш очевидною.

Цю трудомістку задачу розробки більш надійного апарата для "приборкування" нескінченностей було виконано пізніше Ю.Швінгером, Р.Фейнманом, Ф.Дайсоном та С. Томонагою [678—687]. За створення сучасної квантової електродинаміки (1942—1949 рр.) С. Томоназі, Ю.Швінгеру та Р.Фейнману у 1965 р. було присуджено Нобелівську премію з фізики.

Проте все ж таки це не було повною перемогою, оскільки доводилося вдаватись до нескінченних контр членів, віднімальний формалізм мав значною мірою рецептурний характер, процедура усунення нескінченностей вимагала проведення послідовного перенормування в кожному порядку теорії збурень за степенями константи зв'язку. Крім того, метод перенормувань

виявився незастосовним до опису сильних взаємодій елементарних частинок, де ефективна константа зв'язку більша за одиницю. Ставало зрозуміло, що необхідно створити нові принципи квантової теорії поля, відмінні від лагранжевого методу з його теорією збурень.

Підхід М.М.Боголюбова до досліджень квантової теорії поля ґрунтувався на трьох основних припущеннях: гамільтоновому формалізмі, який автоматично враховує умови причинності, використанні теорії збурень та концепції адіабатичного включення та виключення взаємодії.

Перша спроба вийти за рамки лагранжевого формалізму належить В.Гейзенбергу (1943), який дійшов висновку, що основною величиною, яка спостерігається, є матриця розсіяння [688]. Однак виявилось, що даний підхід надто радикальний і повне виключення локальних величин із теорії позбавляє нас можливості розглядати розвиток системи в просторі та часі, а також враховувати принцип причинності. На практиці така загальна постановка, що містить у собі лише умову лоренц-інваріантності та унітарності, не дає змоги одержувати нетривіальні динамічні передбачення про елементи  $S$ -матриці. Тому аксіоматичний метод почав розвиватись шляхом вивчення локальних величин. При цьому з самого початку (50-ті роки ХХ століття) визначилось принаймні три напрями, зв'язки між якими було з'ясовано тільки в 60-ті роки. Це були підходи А. Вайтмана; Г.Лемана, К.Сіманзика та В.Цімммермана; М.М.Боголюбова, Б.В.Медведева та М.К. Поліванова.

Так, якщо формалізм А.Вайтмана виділяє як основні об'єкти квантовані поля (в розумінні Гейзенберга) та вакуумні середні від їх звичайних добутків [689], то у своїх дослідженнях М.М. Боголюбов на початку 50-х років ХХ століття прийшов до нового формулювання формалізму квантової теорії поля. Він показав, що тлумачення розбіжностей як недоліку теорії впливає з перенесення в квантову теорію поля традиційних понять макрофізики, оскільки образи, пов'язані з апаратом теорії збурень, в області сильних взаємодій стають дуже далекими від фізичної реальності. Природу ж ультрафіолетових розбіжностей слід шукати в основних уявленнях мікрофізики, що вимагає розробки нових методів опису сильних взаємодій. Вказавши на причину появи розбіжностей, а саме на те, що квантова теорія оперує узагальненими функціями, М.М. Боголюбов запропонував своє вирішення цієї проблеми. Центральним результатом тут було встановлення ним так званої  $R$ -операції, за допомогою якої усуваються розбіжності.

Новизною підходу Боголюбова було те, що він відмовився від прийнятого гамільтонового формалізму та взяв за основу матрицю розсіяння, яка повинна описувати взаємодію полів через формулювання теорії тільки в її термінах.  $S$ -матрицю він будує на засадах кількох постулатів або аксіом: релятивістської інваріантності, унітарності, причинності та спектральності, показуючи, що при цьому матрицю розсіяння можна відновити в усіх порядках теорії збурень за лагранжіаном взаємодії [690—696].

Релятивістська інваріантність, унітарність та причинність належать до загальних властивостей  $S$ -матриці. Перша характеризує незалежність процесів взаємодії частинок від використовуваної системи відліку, друга вказує, що сума ймовірностей всіх можливих процесів розсіяння повинна дорівнювати одиниці. Умови релятивістської інваріантності та унітарності безпосередньо виражаються через елементи матриці.

У квантовій теорії поля запроваджують умову мікроскопічної причинності (локальної комутативності). Її виражено оберненням на нуль комутатора польових операторів, взятих у двох не збігаючих просторово-подібних точках. Умова причинності на мові  $S$ -матриці означає, що її елементи, які залежать від енергій та імпульсів взаємодіючих частинок, повинні бути аналітичними функціями своїх аргументів, продовжених в комплексну область. Властивість аналітичності дозволяє одержати інтегральні співвідношення між різними матричними елементами для дійсних значень аргументів, які дістали назву дисперсійних.

Як уже зазначалось,  $S$ -матричний метод Гейзенберга в релятивістській квантовій теорії був попередником аксіоматичного  $S$ -матричного методу (або методу мікропричинної  $S$ -матриці Боголюбова). Однак, хоч підхід Боголюбова, Медведева та Поліванова, в якому основним об'єктом є розширена (за масову оболонку)  $S$ -матриця, зовні начебто ближче до початкової програми Гейзенберга, в змістовному ж відношенні він тісно пов'язаний з підходом LSZ, оскільки

розширена S-матриця є насправді твірним функціоналом T-добутків від операторів струму. Крім того, виявилось, що метод Гейзенберга дозволив одержувати динамічні співвідношення між S-матричними елементами тільки після введення М.М.Боголюбовим в теорію варіаційних похідних за класичними полями, в термінах яких вдалося сформулювати умову мікропричинності.

Першим на роль мікропричинності звернув увагу Е.Штюкельберг (1949, 1950, 1951 рр.), не запропонувавши, однак, її закінченого формулювання [697,698]. Його підхід як більш доцільний на відміну від побудови розв'язку методом послідовних наближень за степенями мализни взаємодії, що застосовувався в більшості основних робіт з квантової теорії поля, й було використано М.М.Боголюбовим, причому спільне використання властивостей причинності та спектральності дозволило йому довести дисперсійні співвідношення для пружного піон-нуклонного розсіяння. Під час їх доведення S-матричний підхід було сформульовано як самостійний напрям, що дістав подальшого розвитку в 1961—1967 рр. у працях його учнів Б.В.Медведева, М.К.Поліванова, А.Д.Суханова [700,701].

Таким чином, М.М.Боголюбовим було показано фундаментальне значення принципу мікроскопічної причинності для побудови S-матриці, формулювання якого в її термінах та використання в теорії дисперсійних співвідношень є фундаментальним результатом вченого.

Разом зі своїм учнем О.С.Парасюком М.М.Боголюбов розробив правила поводження з узагальненими функціями (передусім, операцію множення) та показав, що за певних випадків, при належному визначенні хронологічно впорядкованих добутків операторів полів, можна побудувати матрицю розсіяння, яка не буде містити у собі розбіжностей [702—704]. Подальший аналіз процедури перенормування привів М.М.Боголюбова та Д.В.Ширкова в 1955 р. до побудови послідовної математичної теорії ренормалізаційної групи.

Фактично, в квантовій теорії поля, як і в статистичній механіці, М.М.Боголюбов створив нове поняття стану за допомогою нескінченної послідовності амплітуд розсіяння та коефіцієнтних функцій (функцій Гріна), а також рівнянь для них. Як результат в теорії квантованих полів (і в статистичній механіці) було вироблено новий стандарт необхідних математичних засобів та підвищених вимог до доказової сили побудов. Фізики дістали нове поняття про амплітуду розсіяння як про єдину аналітичну функцію змінних розсіяння, і саме це поняття стало основоположним для подальшого розвитку теорії.

М.М.Боголюбову належить ряд ідей та досліджень у багатьох напрямках релятивістської динаміки частинок. У середині 60-х років, розробивши аксіоматику квантової теорії поля та дисперсійну техніку, М.М.Боголюбов зі співробітниками зацікавився теорією елементарних частинок, що бурхливо розвивалась в ті роки та одержав низку важливих результатів з теорії симетрії та динамічних кваркових моделей елементарних частинок, а також детальну картину властивостей амплітуди розсіяння в асимптотичній області високих енергій.

Уперше гіпотезу про складену структуру адронів, що являють собою великий клас частинок, які беруть участь у сильних взаємодіях, у 1949 р висловили Е.Фермі та Ч.Янг [705]. Саме численність адронів сприяла виникненню ідеї кварків. У 1951 р. К.Нишиджима незалежно від М.Гелл-Манна ввів поняття дивності кварків [706], проте головним поштовхом до появи праць М.М.Боголюбова в галузі кваркової гіпотези стало відкриття, зроблене М.Гелл-Манном та Ю.Неєманом (1964 р.), що всі адрони можна логічним чином згрупувати в сім'ї — супермультиплети [707].

Якщо обмежитись трьома початково введеними кварками (u,d,s), то з'являються значні труднощі, зокрема, через небажані нейтральні струми зі зміною дивності. Вони усуваються введенням нового “зачарованого кварка” c, гіпотезу про існування якого було висунуто Дж. Бйоркеном та Ш.Глешоу, Д.Аматі, З.Макі та Й.Онукі, Й.Харою. З'явилась вона лише через рік після появи першої трикваркової схеми Гелл-Манна—Цвейга [708—711].

Початковий шлях до вирішення проблеми статистики кварків було запропоновано в 1964 р. О.Грінбергом. Вивчаючи так звані параполя, введені Г.Гріном, тобто поля, що не є ні бозе-ні фермі-полями, О.Грінберг поставив питання про існування парapolів та відповідних ним парачастинок у природі. Спочатку в його спільних з А.Мессіа [712, 713] працях було зроблено висновок, що парачастинок не може бути серед тих частинок, які на той момент були відомі.

Однак вже в наступній своїй статті [714] він доходить до висновку, що такими частинками, а саме, параферміонами порядку три є кварки, припустивши при цьому, що кварки можуть підпорядковуватись не статистиці Фермі—Дірака, а іншому незвичному набору правил, який він назвав парафермі-статистикою за модулем три. Така статистика допускає три частинки частинок в одному стані, при цьому принцип Паулі не порушується, і кварки залишаються ферміонами.

Інша пропозиція змінити не статистику, а кварки, була висунута одночасно та незалежно декількома авторами: М.М.Боголюбовим, А.Н.Тавхелідзе та Б.В.Струминським [715], М.Ханом та Й.Намбу [716], Міямото. Це було досягнуто шляхом введення для розрізнення кварків ще одного їх ступеня вільності — нового додаткового квантового числа з трьома значеннями та запропоновано нову схеми сильних взаємодій, засновану на трьох триплетах кварків. У подальшому, після створення квантової хромодинаміки як нової теоретико-польової теорії з введеним лагранжіаном і гамільтоніаном на зміну статичним кварковим моделям прийшли динамічні погляди на природу. Стало зрозуміло, що розглянуті М.М.Боголюбовим, Б.В.Струминським, А.Н.Тавхелідзе та М.Ханом і Й.Намбу стани кварків, які характеризуються введеним ними додатковим квантовим числом, мають розрізнятися саме “кольором”, концепція якого виникла, коли з'ясувалося, що всі взаємодії ґрунтуються на калібрувальній неабелевій теорії, а КХД є динамічною теорією. Термін "колір" було введено М.Гелл-Манном, автором таких фізичних термінів, як "дивність", "кварки”.

Крім того, в працях М.М.Боголюбова, А.Н.Тавхелідзе, В.П.Шелеста, Нгуен Ван Хьєу, Д.Стоянова, Б.В.Струминського та інших було вперше запропоновано нерелятивістське кваркове рівняння, що описує адрони як складені частинки, та допомагає розрахувати магнітні моменти адронів в рамках цього уявлення. У подальшому вони побудували релятивістсько-інваріантне рівняння для адронів як для складених частинок. На цій основі вдалося дістати електромагнітні та слабкі формфактори адронів за абсолютними значеннями їх магнітних моментів [717].

Численні напрями квантової теорії поля та фізики елементарних частинок розробляли представники київської гілки теоретичної школи М.М.Боголюбова — академіки НАН України О.С.Парасюк та Д.Я.Петрина, члени-кореспонденти НАН України В.І.Фушич та В.П.Шелест, доктори наук Г.М.Зинов'єв, Б.В.Струминський, А.Н.Тавхелідзе, Ю.Л.Ментковський, А.М.Федорченко та інші. Інтенсивній розробці даних проблем сприяло те, що з моменту заснування Інституту теоретичної фізики АН України в ньому було створено відділ теорії елементарних частинок, який очолював А.Н.Тавхелідзе, а з 1971 року — В.П.Шелест. Загальне наукове керівництво роботами здійснював М.М.Боголюбов.

Принципові результати в галузі квантової теорії поля було одержано також Д.Я.Петриною. Його відома теорема про неможливість існування нелокальної квантової теорії поля з додатним спектром енергії-імпульсу визначила напрям розвитку квантової теорії поля на значний період. Вченим сформульовано та досліджено рівняння для коефіцієнтних функцій матриці розсіяння квантової теорії поля, вивчено спектри модельних гамільтоніанів теорії надпровідності й надплинності у введених ним просторах трансляційно-інваріантних функцій [718,719]. Д.Я.Петрина встановив критерії справедливості спектральних представлень для амплітуд розсіяння, вивів рівняння для коефіцієнтних функцій матриці розсіяння, відомих як рівняння Петрини, та першим розв'язав їх для евклідової неполіноміальної теорії.

Д.Я.Петрина запропонував спеціальні простори трансляційно-інваріантних функцій, за допомогою чого встановив термодинамічну еквівалентність широкого класу модельних та апроксимуючих гамільтоніанів [720]. У циклі останніх робіт ним було відкрито нове відгалуження спектра гамільтоніана теорії надпровідності, що стало певною несподіванкою для дослідників [721].

Велика низка праць Д.Я.Петрини стосується дослідження аналітичних властивостей амплітуд розсіяння теорії збурень, де він встановив загальні критерії справедливості спектральних представлень, довів теорему про повноту амплітуд розсіяння в просторі амплітуд, запропонував метод підсумовування внесків від діаграм Фейнмана, показав глибоку аналогію між твірним оператором від діаграм Фейнмана та гамільтоніаном, завдяки чому класифікував комплексні особливості діаграм Фейнмана методами теорії функцій багатьох комплексних змінних. Ним

проаналізовано рівняння для матричних елементів у евклідовій області імпульсів для моделі скалярного поля з поліноміальним лагранжіаном взаємодії, а також рівняння для евклідових функцій Гріна квантової електродинаміки [722,723].

На аналізі віднімальної процедури Боголюбова-Парасюка у квантовій теорії поля заснований Запропонований Д.Я.Петриною новий підхід для розрахунку електростатичних полів в неоднорідному мілкозернистому середовищі.

Ряд цікавих задач з квантової механіки та квантової теорії поля розв'язав В.І.Фушич, який побудовав теоретико-групові засади узагальненої релятивістської квантової механіки для частинок та полів зі змінною масою та довільним спіном, а також виведено та детально вивчено рівняння руху в рамках такої узагальненої механіки. В 70-х роках ХХ століття він запропонував нові способи дослідження симетрій рівнянь теоретичної та математичної фізики, що дозволило відкрити невідомі раніше групи симетрії цілого ряду важливих рівнянь руху [724—729].

Низка фундаментальних результатів була одержана учнями М.М.Боголюбова також у галузі фізики високих енергій та теорії елементарних частинок. Так, результати В.П.Шелеста стосуються побудови структурно-динамічних моделей елементарних частинок, дуальної резонансної моделі та статистичного підходу в ній, який дозволяє описувати деякі властивості множинних процесів; теорії фазових переходів між адронним та кварк-глюонним станами матерії; побудови релятивістсько-інваріантних рівнянь для складених частинок, алгебри струмів у моделі квазінезалежних кварків та деяких модифікацій кваркових моделей, зокрема, моделі ефективних кварків.

Розглянуті ним нерелятивістські задачі трьох тіл дозволили суттєво з'ясувати одне з основних питань теорії елементарних частинок — питання про аналітичну структуру парціальних амплітуд розсіяння елементарних частинок. У подальшому В.П.Шелест із співавторами, застосовуючи методику дисперсійних правил сум, вивчав динамічні моделі адронів у межах кваркових уявлень в теорії вищих симетрій елементарних частинок. На основі релятивістсько-інваріантних рівнянь для складених частинок, запропонованих М.М.Боголюбовим, він вивів рівняння, за допомогою яких на кварковій основі розвинув теорію опису адронів. Було побудовано релятивістсько-інваріантну модель сильновзаємодіючих елементарних частинок, відому нині як модель ефективних кварків, яка виявилась еквівалентною відомому підходу алгебри струмів, але відрізнялась від нього математичною простотою. Всі ці дослідження проводились з єдиної точки зору на базі вперше запропонованих В.П.Шелестом у 1967 році релятивістсько-коваріантних рівнянь [730—732]. В подальшому учню В.П.Шелеста О.П.Кобушкіну вперше вдалося знайти конструктивний метод для побудови перетворення від “струмових” до “структурних” кварків [733, 734].

Вивчаючи можливість реалізації принципу дуальності в рамках аналітичної теорії S-матриці, В.П.Шелест у 1971 році спільно з Л.Л.Єнковськи, М.А.Кобилинським та А.І.Бугрієм побудував клас дуальних амплітуд з мандельстамівською аналітичністю і венеціанівською границею (ДАМА). Ними було досліджено проблему появи кратних полюсів у цій моделі та можливий шлях їх усунення. Було одержано аналітичне продовження амплітуди на всю S-площину, за допомогою якого досліджено властивості таких амплітуд; запропоновано прості вирази для ДАМА та методи її аналітичного продовження за однією та двома змінними; вивчено полюсну структуру амплітуди, її порогову та асимптотичну поведінку, а також властивості подвійної спектральної функції. За допомогою ДАМА описано інклюзивні процеси, сформульовано нове фундаментальне наближення в теорії сильних взаємодій на основі ДАМА, запропоновано та вивчено узагальнення ДАМА на п'ятиточкові процеси, конкретну параметризацію траєкторій Редже на основі обмежень, що впливають з ДАМА, модель траєкторії Померанчука. Вчені показали, що дуальні моделі з мандельстамівською аналітичністю взагалі правильно відбивають природу процесів та можуть використовуватись як для феноменологічних цілей, так і слугувати основою для побудови теорії сильних взаємодій [735—737].

В.П.Шелест, Г.М.Зинов'єв, В.А.Міранський та М.І.Горенштейн розробили також статистичний підхід до вивчення сильновзаємодіючих частинок при високих енергіях. У рамках дуальної резонансної моделі ними було обчислено статистичні середні резонансного спектра:

густину адронних станів, середній спін, середню повну ширину, що дозволило дати повний статистичний опис адронної матерії при високих енергіях. Численні риси такого опису досить близькі до результатів статистичної бутстрап-моделі, що дає підстави вважати дуальну резонансну модель динамічною реалізацією статистичного бутстрапа. В ряді праць Г.М.Зинов'єва та його учнів було запропоновано нову інтерпретацію моделі статистичного бутстрапа та на її основі модифіковано статистичне бутстрап-рівняння. При цьому встановлено глибокий зв'язок між статистичною бутстрап-моделлю та моделлю Померанчука для множинного народження, і як наслідок, з'ясовано важливість поняття обсягу взаємодії в бутстрап-теорії [738,739]. В.А. Міранським модифіковані рівняння ренормалізаційної групи Боголюбова—Ширкова, які були застосовані до вивчення проблеми спонтанного порушення киральної інваріантності в калібрувальних теоріях поля [740—742].

Відомими є також праці учня М.М.Боголюбова Б.В.Струминського з кваркової моделі елементарних частинок — одного з авторів першої моделі адронів з цілочисловими кварками, на основі якої ним було розглянуто електромагнітні, слабкі та слабкі радіаційні розпади адронів. Він також запропонував підхід, який полягає в тому, що всі покоління кварків об'єднуються в один мультиплет калібрувальної групи, після порушення якої залишаються слабкі взаємодії та нові взаємодії, що приводять до переходів між поколіннями. На цій основі було побудовано модель слабких взаємодій з 8 кварками і 8 лептонами та вивчено властивості нових кварків та лептонів. Інший запропонований Б.В.Струминським підхід до цієї ж проблеми полягає у введенні нової групи "горизонтальних" калібрувальних взаємодій, яка дала можливість класифікувати покоління кварків та лептонів, розробити механізм порушення СР-інваріантності і вивчити осциляції в системах нейтральних К- та Д-мезонів [743—745].

Ю.Л.Ментковському належать роботи в галузі великих квантових систем та теорії потенціального розсіяння. Вчений розвинув математичний апарат руху нерелятивістської частинки в ядроно-кулонівському полі, а також строго дослідив проблеми, пов'язані з парціальним ядроно-кулонівським рівнянням Шредінгера. [746].

Дослідження А.М.Федорченка стосуються теорії хвильових процесів у плазмі та плазмових середовищах, фізичної акустики та акустoeлектроніки. Він вивчав акустичні хвилі в обмежених діелектриках та п'єзоелектриках, підсилення хвиль Релея та Лемба в п'єзонапівпровідниках, розробляв теорію акустичного генератора, підсилувача та новий метод розрахунку поглинання звуку в твердих тілах. Вченим одержано критерії характеру нестійкості (абсолютної чи конвективної), а також просторового посилення, ним було проаналізовано дисперсійні рівняння зв'язаних циклотронних та електромагнітних хвиль, що поширюються вздовж магнітного поля, рівняння для обмеженої системи плазма—пучок у магнітному полі, розглянуто взаємодію швидких електромагнітних хвиль циліндричного хвилеводу з несиметричними хвилями електронного пучка, що обертається, взаємодію струму в провіднику з електромагнітними та акустичними хвилями, яка описувалась не кінетичними рівняннями, а рівняннями гідродинаміки. Він також розглянув плазмовий механізм підсилення ультразвуку та проаналізував дисперсійне рівняння оптичного квантового генератора, дослідив процеси з перетворення хвиль на межі діелектрик—плазма, нелінійні ефекти, викликані високочастотним полем, а також взаємодію електромагнітних хвиль з рівноважними флуктуаціями у плазмовому середовищі [747,748]. Під керівництвом А.М.Федорченка його учнем М.Я.Коцаренком було розроблено методику знаходження стаціонарних характеристик плазми, викликаних високочастотним полем та досліджено стаціонарний розподіл густини плазми в полі електромагнітної хвилі. Було також вивчено збільшення кількості електронів та іонів у плазмі, викликане поздовжніми та поперечними хвилями [749,750].



## 5.2. Застосування математичного апарату статистичної фізики до конкретних фізичних задач

### 5.2.1. Побудова мікроскопічної теорії надпровідності (М.М.Боголюбов, 1957 р.)

Важливість досліджень з теорії надплинності М.М.Боголюбова полягає також в їх подальшому розвитку. Ідея про те, що за певних умов енергетичний спектр фермівської системи можна зобразити у вигляді сукупності елементарних збуджень, які підпорядковуються статистиці Бозе—Ейнштейна, стала базою для побудови вченим мікроскопічної теорії надпровідності, у якій було запропоновано загальну схему неідеального фермі-газу зі слабкою взаємодією. Подібні елементарні збудження в такому газі, які пов'язують оператори народження та знищення частинок з протилежно напрямленими імпульсами та спінами, дають теоретичне пояснення явища надпровідності. Фізичною причиною появи подібних зв'язаних пар у металі є взаємодія електронів з коливаннями ґратки. При переважанні сил притягання в такому газі виникає надплинність та можна побудувати фізичну картину надплинного стану. Виявилось, що єдина суттєва розбіжність між надпровідними та надплинними системами полягає в тому, що в надплинних системах струмовий стан завжди метастабільний, а в надпровідних він стабілізується магнітним полем. Аналогія між надпровідністю та надплинністю є настільки глибокою, що в певному розумінні обидва явища можна розглядати як одну загальну фундаментальну властивість квантових рідин.

Явище надпровідності було відкрито Г.Камерлинг-Оннесом ще у 1911 р. [751], проте його вивчення проходило порівняно повільно. Основним для аналізу макроскопічних властивостей став ефект, відкритий в 1933 р. В.Мейснером та Р.Оксенфельдом, коли виявилось, що разом з ідеальною провідністю надпровідник має ідеальний діамagnetизм (ефект Мейснера) [752]. Стало зрозуміло, що багато властивостей, пов'язаних з нескінченною провідністю, є наслідком магнітних властивостей.

Уже в 1935 р. Ф.Лондоном та Г.Лондоном було розвинуто макроскопічну теорію надпровідності — феноменологічну теорію електродинамічних властивостей, в основу якої було покладено діамagnetизм надпровідників та передбачено, що глибина проникнення повинна бути порядку  $10^{-6}$  см [753]. Теорія Лондонів базується на припущенні, що вектор-потенціал електромагнітного поля в даній точці зображується через струм у цій точці. У 1948 р. Ф.Лондон вказав загальний напрямок, за яким доцільно шукати пояснення надпровідності, підкресливши, що діамagnetичні властивості можна обґрунтувати, виходячи з квантово-механічних уявлень, якщо припустити "жорсткість" основної функції електронів в надпровідному стані, тобто, що хвильова функція слабо змінюється під дією зовнішнього магнітного поля [754].

У 1950 р. В.Л.Гінзбург і Л.Д.Ландау в праці [755] узагальнили феноменологічну теорію Лондонів, запропонувавши напівфеноменологічну теорію, одним із успіхів якої стало обчислення енергії на межі поділу нормальної та надпровідної фаз (теорія Гінзбурга—Ландау). У 1953 р. теорію Лондонів поліпшив А.Піппард [756], який перейшов до нелокальних уявлень та зобразив відповідну залежність за допомогою векторного усереднення в околі. Ввівши "довжину когерентності", він нелокально змінив рівняння Лондонів для пояснення результатів експериментів щодо визначення глибини проникнення. Пізніше, після побудови мікроскопічної теорії, стало зрозумілим, що саме теорія Піппарда є більш правильною макроскопічною теорією.

Проте, незважаючи на пояснення ефекту Мейснера, електродинаміка надпровідників, заснована на працях Лондонів, була, як правило, непридатною для реальних умов. Протягом тривалого часу, незважаючи на деякі окремі успіхи, спроби побудувати загальну мікроскопічну теорію надпровідності не приводили ні до яких результатів. У певній послідовній та замкненій формі її не існувало до 1957 р., хоч в цій галузі й були висловлені деякі важливі ідеї.

Так, ще на початку розробки теорії металів у 1928—1930 рр. Ф.Блох пояснив електричний опір металів тим, що рухомі електрони збуджують коливання ґратки, віддаючи їй

свою енергію, і тим самим нагрівають її. Враховуючи квантовий характер коливань ґратки металу, він пояснив електричну взаємодію як випромінювання або поглинання електроном кванта коливань — фонона.

Суттєвий внесок у розвиток теорії зробив у 1950 р. Г.Фрьоліх, аналізуючи властивості електрон-фононої взаємодії. Він перший висунув ідею про те, що явище надпровідності визначається головним чином взаємодією електронів з фононами ґратки, тобто тією самою взаємодією, яка у звичайних умовах зумовлює опір металу. Г.Фрьоліх та незалежно Дж.Бардін відкрили новий тип непрямого зв'язку між електронами (сили притягання), яку можна наочно уявити як результат обміну віртуальними фононами ґратки [757,758]. У 1951 р. Дж.Бардін здійснив спробу побудувати теорію надпровідності, основу на врахуванні електрон-фононої взаємодії [759], а в 1952 р. провів обчислення притягання між електронами, зумовленого обміном віртуальними фононами з урахування кулонівської взаємодії [760].

Однак динамічна система, визначена гамільтоніаном Фрьоліха, виявилась складною для математичного опису, і йому не вдалося розв'язати поставлену задачу та побудувати послідовну мікроскопічну теорію надпровідності. Проте, виходячи з загальних якісних міркувань, Г.Фрьоліх зробив правильний висновок, що температура фазового переходу з нормального у надпровідний стан повинна бути пропорційною енергії, тобто обернено пропорційною кореню квадратному з маси атома ґратки (ізотопічний ефект). Даний ефект, на існування якого вказувала теорія Фрьоліха, того ж року експериментально підтвердили Е.Максвелл та С.Рейнольдс [761,762]. Після цього важливого відкриття з'явилась впевненість, що дійсно саме електрон-фононна взаємодія відповідальна за явище надпровідності. Залишались, однак, незрозумілими інші властивості надпровідників, а також те, як ця слабка взаємодія змінює структуру електронної системи.

Нові важливі ідеї були висунуті М.Шафротом, Дж. Блаттом і С.Батлером [763,764]. Відомо, що для бозе-газу, який складається з заряджених частинок, нижче його температури переходу повинні справджуватися ефект Мейсснера та інші властивості надпровідників. Намагаючись на цьому шляху пояснити надпровідність, М.Шафрот, Дж. Блатт і С.Батлер припустили, що можуть існувати локалізовані пари електронів, підпорядковані статистиці Бозе—Ейнштейна. З 1954 р. вони систематично розвивали уявлення про суттєву роль парних кореляцій електронів та про утворення вільних "квазімолекул", що складаються з двох електронів і тому підлягають статистиці Бозе—Ейнштейна. Цими вченими було зроблено спробу розвинути теорію надпровідності за допомогою методу, названого ними квазіхімічним. У їх концепції основним чинником, зумовлюючим утворення квазімолекул, є фрьоліховське притягання двох електронів в околі Фермі. Поява конденсату в системі молекул — це і є, на їх думку, виникнення надпровідності.

Нині зрозуміло, що уявлення М.Шафрота, Дж.Блатта і С.Батлера були досить близькими до істини. Але через математичні труднощі їм не вдалося послідовно провести обчислення для жодної моделі, яка б мала надпровідні властивості, та побудувати переконливу схему. Для якісного розгляду вони запропонували модель з локалізованими парами, в якій середній розмір пар менший за відстань між ними. Такі пари здатні рухатись поступально, і можлива їх аналогія з бозе-газом.

Над експериментальним і теоретичним обґрунтуванням теорії надпровідності, крім названих вчених, працювали також В.Кеєзом (1924 р.), А.Рутгерс (1933 р.), К.Гортер (1933 р.), Б.Казимір (1934 р.), Р.Понтіус (1954р.), Д.Шьонберг (1940, 1949 рр.) [765—771].

Так, К.Гортер у 1933 р. провів термодинамічний розгляд надпровідного переходу та дістав зв'язок між електронною теплоємністю та критичним полем. Наступного року він разом з Б.Казиміром за допомогою дворідинної моделі феноменологічно описав перехід другого роду та деякі інші властивості надпровідників. Д.Шьонбергу вдалося визначити залежність глибини проникнення від температури для олова та ртуті, яка підтвердила передбачення теорії Лондонів.

Подальший принциповий успіх теорії було пов'язано з дослідженнями Дж.Бардіна, Л.Купера і Дж.Шріффера. Праця Л.Купера [772] з'явилася в 1956 р., коротку замітку Дж.Бардіна,

Л.Купера і Дж.Шріффера [773] було опубліковано в квітні, а їх докладну працю [774] — в грудні 1957 р.

Перший крок, зроблений у цьому напрямі Л.Купером [772], показав, що у випадку результуючого притягання в фермі-системі дві частинки, які знаходяться над фермівським фоном нормального металу, можуть створювати зв'язану пару з вирашем у сумарній енергії. Л.Купер знайшов, що при цьому створення пари (пізніше названою куперовською парою) відбувається і при як завгодно малому притяганні, оскільки основний стан фермі-газу у даному випадку виявляється нестійким відносно створення зв'язаних пар (ефект Купера). Куперовські пари є бозе-частинками, і коли для них виконується критерій Ландау, тобто відбувається конденсація пар, то газ із цих пар буде надплинним (або надпровідним, оскільки кожна пара несе подвоєний заряд електрона  $2e^-$ ).

Дж.Бардін, Л.Купер і Дж.Шріффер побудували модельний гамільтоніан, в якому взаємодію електронів через фонони замінили прямою взаємодією електронів. Вони вибрали хвильову функцію основного надпровідного стану у вигляді добутку парних функцій, які містять у собі параметри, що визначаються на основі варіаційного принципу мінімуму енергії, тобто хвильова функція є конфігурацією "нормального типу", що відповідає металу в нормальному (не надпровідному) стані. В цих конфігураціях індивідуальні електронні стани заповнені парами електронів з протилежними спінами та імпульсами, причому для спрощення враховувалась тільки взаємодія електронів з нульовим сумарним імпульсом. Таким шляхом Бардін, Купер та Шріффер встановили, що енергії збуджених станів відділені щільною від основного стану, що і є причиною появи в їх схемі надпровідності. В початковій короткій замітці вчені обчислили для спрощеної моделі різницю енергій між нормальною та надпровідною фазами при температурі 0 К та показали, що для збудження електронів з основного надпровідного стану необхідно подолати енергетичну щільну, тобто для створення в системі електронів надпровідного стану потрібно розірвати принаймні одну пару.

В своїй докладній роботі вони знайшли спектр електронних збуджень при відмінній від нуля температурі, який було використано для обчислення теплових та електромагнітних властивостей в сталому та низькочастотному полі. Було показано, що з теорії випливає фазовий перехід при критичній температурі, пояснено ефект Мейсснера та існування незгасаючого струму, з'ясовано, що характер електродинаміки надпровідників суттєво залежить від відношення розміру куперовської пари та лінійного розміру тієї ділянки простору в надпровіднику, де помітно змінюється магнітне поле. Таким чином, Дж.Бардіним, Л.Купером та Дж.Шріффером на основі уявлення про те, що частинки з протилежними імпульсами і спінами утворюють зв'язані пари, було розроблено послідовну мікроскопічну теорію надпровідності (теорія Бардіна—Купера—Шріффера, або теорія БКШ).

Однак через недостатньо обґрунтовані спрощення та наближення в теорії БКШ, виникли сумніви щодо її переконливості. Так, запізнилу взаємодію електронів вони замінюють їх миттєвою прямою взаємодією, функцію, що характеризує останню — деякою сталою всередині енергетичного шару в околі поверхні Фермі, а поза його межами взаємодія вважається рівною нулю. Крім того, розглядалися тільки частинки в стані конденсату. До того ж виявилось, що за цією схемою відсутня гілка енергетичного спектра, яка характеризує колективні збудження, і не враховано належним чином ефект кулонівських сил.

Аналіз математичної структури теорії БКШ проводили Дж.Валатін [775], М.М. Боголюбов із співробітниками [776—782]. "Ще до того, як у Москві стала відомою докладна робота БКШ, — писав М.М.Боголюбов наприкінці вересня 1957 р., — мені вдалося показати, що метод, розроблений нами для побудови мікроскопічної теорії надплинності бозе-систем, може бути узагальнено також для послідовної побудови теорії надпровідності на основі початкової моделі Фрьоліха.

На шляху узагальнення методу канонічних перетворень з нашої теорії надплинності було одержано формули основного надпровідного стану та його збурень ферміонного типу з характерною енергетичною щільною. Підкреслюємо, що проведені нами дослідження підтверджують правильність в першому наближенні формул БКШ для розрахунку основного

стану і одноферміонних збуджень" [666, т.3, с.25].

В.П.Шелест зазначав з цього приводу: "Ідею куперівських пар подали БКШ, ідею енергетичної щілини — Л.Д.Ландау. І в такому якісному стані ця теорія перебувала, поки до справи не взявся М.М.Боголюбов. Відтоді наука стала кількісною".\*

М.М.Боголюбов ввів у модель Фр'юліха явним чином члени, які відповідають кулонівському відштовхуванню між електронами, та дістав критерій надплинності. Властивість надплинності виявляється в такій системі, якщо в ній переважають сили притягання. При такому підході вже не можна говорити про окремі молекули, а потрібно розглядати весь колектив, процес взаємодії у якому характеризується зв'язуванням частинок у комплекси. Зазначимо, що необхідність розгляду "колективних" електронних збуджень замість індивідуальних молекул вперше була підкреслена Л.Д.Ландау в його відомій праці з надплинності (1941 р.) [584].

М.М.Боголюбов здійснив повне систематичне вивчення моделі Фр'юліха. Узагальнивши методику Гелл-Манна—Бракнера—Савада у сенсі розвинутого раніше методу вторинного квантування, він розглянув також колективні бозонні збудження для моделі Фр'юліха та встановив наявність двох типів таких збуджень — поздовжнього та поперечного. В його теорії електронні збудження є колективним ефектом і не можуть ототожнюватись з індивідуальними молекулами. Роль колективних збуджень електронів описували в своїх працях Ф.Андерсон [783], Й.Намбу [784], Д.Пайнс та Дж.Шріффер [785] 1958—1959 рр., де було з'ясоване питання про градієнтну інваріантність при обчисленні ефекту Мейсснера.

Картина, яка впливала з праць М.М.Боголюбова, виявилась близькою до уявлень, що були висунуті та дискутовані М.Шафротом, Дж.Блаттом і С.Батлером [763,764]. Цікавими є спогади М.М.Боголюбова про народження цієї ідеї: "Над цією проблемою працювали не лише ми, великий внесок в неї зробили англійський вчений Фр'юліх, американські вчені Бардін, Купер, Шриффер, австралійці Батлер та Блатт. Нас до неї підштовхнула одна приваблива ідея. Це було влітку минулого року, коли запанував відпускний настрій. Дискусія наша відбувалася досить бурхливо, адже у фізиків-теоретиків, як відомо, ніколи не буває єдиної думки з жодного питання. І тут раптово ми переключились на найжорсткіший режим через ідею, яка несподівано майнула..." [786].

У цей період М.М.Боголюбов працював з двома групами учнів, ядро яких склали Д.В.Ширков, Д.М.Зубарев, С.В.Тябликов, В.В.Толмачов, Ю.О.Церковников. Одна група починала роботу разом з Миколою Миколайовичем з ранку. Після обіду приходила друга група, але інтенсивність роботи залишалась такою ж. Коли темпи помітно починали спадати, учні уходили, а Микола Миколайович залишався в лабораторії і працював сам. Так тривало майже півроку, поки проблему не вдалося вирішити в основному.

Учні М.М.Боголюбова зазначають, що до теорії надпровідності у М.М.Боголюбова було особливе ставлення, він дуже любив цю тематику і абсолютно всі обчислення, перепроверяючи своїх помічників, зробив сам. Причому основним мотивом докладного дослідження моделі БКШ для М.М.Боголюбова було не тільки бажання домогтись повної математичної строгості, а й прагнення до кінця зрозуміти причину появи в теорії надпровідності "аномальних" середніх та з'ясувати, в якому саме розумінні розглядається усереднення.

У роботах [781,787] М.М.Боголюбов із співавторами описав асимптотично точний (у термодинамічній границі) розв'язок для моделі БКШ теорії надпровідності. Важливо, що це становило основу для подальшого розвитку цілого напрямку, так званого методу апроксимуючого гамільтоніана [787,788]. При цьому було застосовано спеціальний технічний прийом, що полягав у введенні додаткового оператора у вихідний гамільтоніан взаємодії, який відігравав допоміжну роль при відборі необхідних розв'язків, забезпечуючи наявність надпровідної фази при досить низьких температурах. В остаточних результатах вважають  $V=0$ . Цей, на перший погляд, чисто технічний прийом дав можливість М.М.Боголюбову розробити (1961 р.) потужний метод теорії фазових переходів, відомий нині як метод квазісередніх Боголюбова [789,790].

Метод квазісередніх при теоретичному дослідженні подібних систем дозволяє позбутися квазівиродження основного стану. Після цього в системі можна застосовувати регулярні методи теорії збурень. У згадуваній праці "Квазісередні в задачах статистичної механіки" (1961 р.) М.М.Боголюбов писав: "Для того, щоб застосувати будь-яку форму теорії збурень для вивчення вироджених станів статистичної рівноваги, необхідно передусім зняти виродження, або, що те саме, розглядати не функції Гріна, побудовані зі звичайних середніх, які задовольняють всі правила відбору, а функції Гріна, побудовані з цих квазісередніх, які не задовольняють деякі з цих правил" [789].

Ідеї М.М.Боголюбова про квазісередні значно вплинули на розвиток статистичної фізики. Його метод засновано на тому, що в задачах статистичної механіки, завдяки наявності адитивних законів збереження, завжди існує так зване виродження, у багатьох статистичних системах основний стан виявляється нестійким відносно малих збурень. Так, у випадку моделі феромагнетизму Гейзенберга при температурах, нижчих точки Кюрі, значення сумарного вектора намагнічування не дорівнює нулю, а його напрямок може бути взятий довільним. У цьому розумінні стан статистичної рівноваги є виродженим. Аналогічна ситуація спостерігається також в інших системах, що допускають фазовий перехід — надпровідники, надплинні бозе-системи. У них при досить низьких температурах додавання до гамільтоніана нескінченно малих джерел, які знімають виродження (і, відповідно, порушують той чи інший адитивний закон збереження) приводить до скінченного приросту середніх значень динамічних змінних.

Нерівність Боголюбова дає прості, але строгі докази відсутності феромагнетизму та антиферомагнетизму в одно- або двовимірних ізотропних моделях Гейзенберга та відсутності надплинності та надпровідності в одно- чи двовимірних випадках. Крім того, що М.М. Боголюбов показав, наскільки суттєву роль відіграє поняття квазісередніх в статистичній механіці при дослідженні специфічного упорядкування в системах багатьох частинок, він довів, що воно є досить важливим при формулюванні принципу послаблення кореляцій, а також у квантовій теорії поля в тих випадках, коли відбувається виродження, наприклад, при дослідженні так званого спонтанного порушення симетрії [791—793].

Таким чином, разом з розвинутим М.М.Боголюбовим методом двочасових функцій Гріна [794] метод квазісередніх став універсальним засобом вивчення систем, основний стан яких нестійкий відносно малих збурень. Ідеї М.М.Боголюбова про квазісередні мають глибокий зв'язок з теоремою Голдстоуна про порушену симетрію. М.М.Боголюбов показав, що при спонтанному порушенні симетрії в системі завжди виникає строгий порядок, тобто фазовий перехід. Зокрема, в моделі неідеального бозе-газу М.М.Боголюбов одержав строгий результат, відомий як теорема про особливості типу  $1/q^2$ . Згідно з цією теоремою функції Гріна мають особливості типу  $\text{const}/q^2$  в околі  $q \approx 0$ , а для надплинних бозе- або фермі-систем густина неперервного розподілу частинок за імпульсами  $q$  при  $q \rightarrow \infty$  прямує до нескінченності більш повільно, ніж  $1/q^2$ . Саме дана теорема дозволила вирішити принципове питання про структуру енергетичного спектра низьколежачих елементарних збуджень в неідеальних бозе- та фермі-системах, а також довести відсутність фазового переходу в одно- та двовимірних моделях неідеального бозе-газу.

Метод квазісередніх М.М.Боголюбова є строгим, конструктивним та загальним методом теорії фазових переходів. Він знайшов також широке використання в теорії поля, дістав нового розвитку в теорії фазових переходів [795,796]. Зокрема, спеціальна форма цього методу дозволила узагальнити теорему Боголюбова про особливості типу  $1/q^2$  і строго довести існування бозе-конденсату для ряду нетривіальних моделей неідеального бозе-газу [797,798].

Термодинаміку надпровідників було розраховано М.М.Боголюбовим спільно з Д.М.Зубарєвим і Ю.О.Церковниковим на основі модельного гамільтоніана в праці "До теорії фазового переходу" (1957 р.) [781]. Тут же за допомогою теорії збурень вперше було доведено той факт, що задачу із

зредукованим гамільтоніаном можна розв'язати асимптотично точно для нескінченно великого об'єму. Ці результати, а також результати подальшого докладного дослідження моделі Фрьоліха, проведені М.М.Боголюбовим та його співробітниками, було викладено в книзі М.М.Боголюбова, В.В.Толмачова та Д.В.Ширкова "Новий метод в теорії надпровідності" (1958 р.) [248].

Таким чином, у працях М.М.Боголюбова було побудовано послідовне мікроскопічне обґрунтування теорії надпровідності як надплинності фермі-систем. Дослідження модельних задач в теорії надпровідності привело М.М.Боголюбова у 1958—1959 рр. до формулювання спеціального методу компенсації небезпечних діаграм та варіаційного принципу в проблемі багатьох тіл (принципа Хартрі—Фока—Боголюбова), коли мінімум енергії шукають на більш широкому класі функцій, ніж в методі Хартрі—Фока [799—80,50]. У подальшому, розвиваючи ці ідеї, учень М.М.Боголюбова Д.Я.Петрина запропонував оригінальний метод дослідження моделей типу БКШ безпосередньо при нескінченному об'ємі. В 1971 р. йому вдалося довести існування фазового переходу з нормального в надпровідний стан [801].

Отже, М.М.Боголюбов не тільки заклав фундамент сучасної мікроскопічної теорії надплинності, а й зробив завдяки новизні та ефективності розроблених ним математичних прийомів значний внесок у розвиток інших галузей теоретичної фізики. Так, у 1958 р. на основі цього уявлення він відкрив новий фундаментальний ефект надплинності ядерної матерії [802], виявивши, що стани надпровідного типу можуть виникати як в металах, так і в атомних ядрах (парні взаємодії нуклонів надпровідного типу повинні взагалі відігравати важливу роль в атомних ядрах). У цій праці М.М.Боголюбов вказав на подібність властивостей ядерної матерії електронній структурі металів, при цьому розвиток ідеї надпровідності як надплинності фермі-систем привів його до відкриття ефекту надплинності ядерної матерії та побудови надплинної моделі, або напівмікроскопічної теорії ядра. Ця модель в подальшому докладно вивчалась В.Г.Солов'йовим та С.Т.Беляєвим. [803—805]. У працях В.Г.Солов'йова на основі систематизації експериментальних даних та застосування до атомних ядер математичного методу, розвинутого М.М.Боголюбовим при побудові теорії надпровідності, було дано мікроскопічне уявлення про складні ядра. Зокрема, ним було зроблено висновок, що в рамках надплинної моделі ядра правильно описується та частина залишкових взаємодій між нуклонами, яка відіграє суттєву роль при порівняно невеликих збудженнях.

Тут знайшов широке використання новий варіаційний принцип Хартрі—Фока—Боголюбова, завдяки якому, зокрема, М.М.Боголюбов запропонував математичний метод для розгляду збуджених станів, пов'язаних з малими коливаннями. Ці збуджені стани утворюються внаслідок когерентної взаємодії багатьох частинок. М.М.Боголюбов ввів недиагональні доданки, склав для них рівняння та запропонував метод розв'язання цих рівнянь. Завдяки цьому він дістав секулярні рівняння для взаємодій загального типу. Необхідно зазначити, що такого ж типу секулярні рівняння можна дістати за допомогою нового підходу до методу вторинного квантування, запропонованого М.М.Боголюбовим в 1949 р.

Оскільки було показано, що розроблена теорія колективних коливань деформованих ядер правильно описує колективні властивості ядер, то вона виявилась важливою при інтерпретації та плануванні експериментів. Методи вивчення вібраційних станів у сферичних і деформованих ядрах, що застосовуються в теорії ядра [802,806], є частинними випадками методів, розроблених М.М.Боголюбовим.

Необхідно зазначити, що для впровадження ідеї надплинності в ядерну фізику потрібна була неабияка наполегливість, оскільки в той час була поширена думка, що в рамках нового підходу не може йти мова про опис властивостей конкретних ядер. Однак ідея надплинності виявилась плідною й дозволила зрозуміти численні якісні та кількісні закономірності, відкриті в енергетичних спектрах та інших характеристиках структури ядра.

На широкому використанні методів статистичної фізики базується також сучасна теорія плазми, яка повністю описується в рамках загального динамічного підходу статистичної теорії, запропонованого М.М.Боголюбовим. На базі цього підходу успішного розвитку теорія статистичних та електродинамічних властивостей плазми дістала в Інституті теоретичної фізики НАН України у працях академіка НАН України О.Г.Ситенка і його наукової школи та академіка НАН України А.Г.Загороднього.

У 1986 р. Дж.Беднорц та К.Мюллер відкрили явище високотемпературної надпровідності, повідомивши про одержання речовини, що зазнає надпровідного переходу при 35 К [807]. Після цього експериментаторами різних країн були досягнуті ще більш високі температури (близько 100 К) для металооксидних керамік. У останні роки життя М.М.Боголюбов з учнями зробив спробу застосувати розвинуті ним методи до пояснення високотемпературної надпровідності [808—810]. Необхідно зазначити важливу роль запропонованого ними мікроскопічного підходу для розуміння внутрішнього механізму цього явища, причому одержані результати є важливими як для конкретної моделі, так і з точки зору використання традиційних механізмів.

У ході подальшої розробки нерівноважної термодинаміки стала зрозумілою необхідність вивчення спонтанного утворення та еволюції просторово-неоднорідних станів в нерівноважних системах — так званих дисипативних структур або автоструктур, при зміні рівня збудження вигляд яких плавно чи стрибкоподібно змінюється. (Це явище названо І.Пригожиним самоорганізацією [811], а галузь науки Г.Хакеном — синергетикою [812]). Характер поведінки даних структур виявився таким, що вони поводять себе як єдине ціле, і кожний елемент має інформацію про стан всієї системи. Флуктуації замість затухання можуть зростати, і система еволюціонує, необоротно рухаючись до більш складних рівнів організації. При цьому час виявляється внутрішньою характеристикою даних фізичних систем, яка виражає необоротність відповідних процесів, а еволюція можлива в різних напрямках і містить у собі як детерміністські, так і стохастичні елементи. Дані роботи сприяли оформленню ймовірнісного стилю мислення в природничих науках, для становлення якого ключовими стали також розглянуті роботи академіка М.М. Боголюбова.

### **5.2.2. Створення електронної теорії металів (І.М.Ліфшиць, друга половина 50-х–60-ті рр. XX ст.)**

Найбільш значними роботами академіка НАН України І.М.Ліфшиця та його наукової школи є роботи із сучасних проблем електронної теорії металів (теорія магнітних та гальваномангнітних явищ, теорія надпровідності, резонансні явища у металах тощо). Слід відзначити такі результати в цій галузі, як розробка теорії ефекту де Гааза-ван-Альфена, теорії гальваномангнітних явищ, передбачення циклотронного резонансу, побудова теорії поглинання ультразвуку металами. Остання заклала основу досліджень в галузі електронної акустики в СРСР. За роботи з електронної теорії металів І.М.Ліфшиць був нагороджений Ленінською премією 1967 р.

В цих роботах розроблено новий підхід до проблем фізики металів та сформовано ті уявлення, які лежать у основі сучасної електронної фізики нормального стану металів. Однією з основних проблем теорії металів є проблема відновлення на основі експериментальних даних електронного енергетичного спектру. Вона була розв'язана на основі робіт, присвячених механіці електронів у металах у магнітному полі, теорії осциляційних ефектів та теорії гальваномангнітних явищ. В основі цих робіт лежало запропоноване І.М.Ліфшицем уявлення про те, що електронні властивості металів значною мірою визначаються геометрією та топологією їх поверхонь Фермі – ізоенергетичних поверхонь в імпульсному просторі, які відповідають граничній фермівській енергії, а тому можуть слугувати індикатором електронного енергетичного спектру.

Перш за все з'ясувалось, що для детального опису особливостей поверхонь Фермі надзвичайно важливими є ті явища, які повністю визначаються квантовим характером руху електрону у магнітному полі. (Ще раніше у 1950 р. І.М.Ліфшиць показав незалежно від Л.Онсагера, як само квантується рух електрону у магнітному полі (умова квантування Ліфшиця—Онсагера)). Такими явищами виявились осциляційні залежності магнітної сприйнятливості та електропровідності металу від напруженості магнітного поля, відомі відповідно як ефекти де Хааса-ван Альфена та Шубнікова-де Хааса. Ці осциляційні ефекти в електронних властивостях металів при низьких температурах і стали одними з найбільш важливих джерел інформації про структуру електронних енергетичних спектрів.

Сильна анізотропія ефекту де Хааса-ван Альфена поставила задачу знаходження кількісного зв'язку між параметрами осциляцій, які вимірюються, та геометрією поверхні Фермі. Ця задача була повністю розв'язана І.М.Ліфшицем та А. М.Косевичем у 1943–1955 рр. [813,814]. Зокрема, ними у 1954 р. було встановлено зв'язок осциляцій магнітних властивостей металів з формою їх поверхонь Фермі (формула Ліфшиця-Косевича). Виявилось, що періоди осциляцій та їх амплітуди містять цінну інформацію про електронний спектр. Експериментальне дослідження залежності періоду осциляцій від напрямлення магнітного поля відразу ж дозволяє зробити важливі якісні висновки відносно загальної форми, що відповідає порожнині поверхні Фермі. Для деяких простих ситуацій можливо повністю визначити поверхню Фермі. У 1954 р. І.М.Ліфшиць та А.В.Погорелов показали, що



якщо поверхня має центр симетрії та якщо будь-який промінь, проведений з центра, перетинає поверхню тільки один раз, то задача про відновлення поверхні Фермі розв'язується точно [815].

Інформацію про електронний спектр дає також аналіз осциляцій термодинамічних та кінетичних параметрів металу в залежності від зміни товщини зразка. Вперше такі осциляції були описані І.М.Ліфшицем та А.М.Косевичем у роботах, присвячених магнітній сприйнятливості тонких шарів металу [816,817]. Вони виявились пріоритетними в циклі наступних досліджень, які завершилися реєстрацією у 1977 р. відкриття “явище осциляцій термодинамічних та кінетичних властивостей плівок твердих тіл”. У 1955 р. І.М.Ліфшиць та А.М.Косевич передбачили явище осциляційної залежності термодинамічних величин металів від будь-яких параметрів, що визначають положення рівнів енергії електронів, якщо відстань між цими рівнями зрівнюється з температурою чи більша неї [818]. Велике значення мала також побудова у 1956—1960 рр. теорії гальваномагнітних явищ у металах у сильних магнітних полях (І.М.Ліфшиць, М.Я.Азбель, М.І.Каганов, В.Г.Пісчанський).

У 1960 р. І.М.Ліфшиць дослідив особливості поведінки електронних властивостей у металів із дуже високими тисками, які здатні викликати перебудову енергетичного спектру електронів. При цьому був передбачений чисто електронний фазовий перехід в металі (перехід  $2 \frac{1}{2}$  роду), пов'язаний зі зміною топології поверхні Фермі [819]. Запропонувавши новий погляд на електрони провідності як на фермі-газ або фермі-рідину квазічастинок з довільним законом дисперсії, він дослідив динаміку квазічастинок у зовнішніх полях та розвинув теорію, яка пов'язала електронні властивості металів з енергетичним спектром квазічастинок.

Таким чином, в циклі розглянутих робіт І.М.Ліфшиця та його учнів була створена геометрична термінологія, яка нині використовується у фізиці металів. На шляху розвитку даного напрямку у багатьох наукових лабораторіях світ на сьогодні відновлені поверхні Фермі практично всіх металів.

### 5.2.3. Вивчення фазових переходів у магнетиках (О.І.Ахієзер, В.Г.Бар'яхтар, С.В.Пелетмінський, 60-ті рр. ХХ ст.)

Суттєвий внесок у розуміння механізму кінетичних та релаксаційних явищ у магнетиках зроблено академіком НАН України Олександром Іллічем Ахієзером і його учнями академіками НАН України Віктором Григоровичем Бар'яхтаром та Сергієм Володимировичем Пелетмінським.

У період інтенсивного розвитку плазмових досліджень у 60-ті роки ХХ ст. С.В. Пелетмінський спільно з В.Г.Бар'яхтаром та В.Ф.Алексіним під керівництвом О.І. Ахієзера звертаються до побудови теорії плазми. Ці праці стосуються теорії радіаційних ефектів у процесах релаксації та переносу у плазмі, яка знаходиться у сильному магнітному полі, а також квантовим ефектам у електродинаміці релятивістської електрон-іонної та електрон-позитрон-фотонної плазми. Значними стали праці С.В.Пелетмінського також для теорії магнетизму, визначивши сучасний рівень теорії кінетичних і релаксаційних явищ в магнітовпорядкованих кристалах. У 60-ті роки ним разом з О.І.Ахієзером та В.Г.Бар'яхтаром на основі розвинутого О.І. Ахієзером у 1946 р. уявлення про магнони як спінові хвилі, які взаємодіють, вперше були виконані дослідження магнітопружних хвиль у ферромагнетиках та антиферромагнетиках, побудована квантова теорія кінетичних, релаксаційних та високочастотних процесів у ферродіелектриках (1959) і теорія зв'язаних магнітоакустичних хвиль [820,821], а також у 1956 р. передбачено нове явище – магнітоакустичний резонанс [822]. Відкриття мало назву “Явище взаємодії гіперзвукових і магнітних (спінових) хвиль у феро-, фері- та антиферомагнетиках (магнітоакустичний резонанс)” та було зареєстровано в Реєстрі відкриттів СРСР у 1966 р. з пріоритетом відкриття 16 березня 1956 р. (диплом №46).

В цей період В.Г.Бар'яхтаром та С.В.Пелетмінським було також розвинуто мікроскопічну квантово-механічну теорію термо-гальвано-магнітних явищ в металах та напівпровідниках на основі конкретної структури інтеграла зіткнень електронів з фононами; О.І.Ахієзером та С.В.Пелетмінським було піднято та розв'язано питання про встановлення розподілу Планка для фотонів в середовищі [823]. Було також розроблено теорію магнітоакустичного резонансу у антиферомагнетиках різних типів у зовнішньому магнітному полі (В.Г.Бар'яхтар та інші, 1964), вперше досліджено нелінійні процеси у спіновій системі – спінові хвилі великої амплітуди та нелінійний магнітоакустичний резонанс (А.С.Бакай, В.Г.Бар'яхтар), детально вивчено процеси пружного та непружного розсіяння повільних нейтронів у феро-та антиферомагнетиках (В.Г.Бар'яхтар та інші, 1962). Ці результати увійшли у монографію С.В.Пелетмінського, О.І.Ахієзера та В.Г. Бар'яхтара 1967 р. “Спінові хвилі” [824].

Велика увага приділялась також фазовим переходам у магнетиках. Була побудована теорія критичних явищ та аномального розсіяння нейтронів поблизу точки фазових переходів, передбачено температурний магнітоакустичний резонанс (І.О.Ахієзер), вперше запропоновано мікроскопічне пояснення антиферомагнетизму металів на основі моделі колективізованих електронів (О.І.Ахієзер, Д.П.Белозеров).

У тих випадках, коли характер взаємодій в системі не допускає кінетичного етапу еволюції, залишається можливим гідродинамічний етап (наприклад, при малих градієнтах фізичних величин). Для цього випадку С.В.Пелетмінський та В.Г. Бар'яхтар показали, що розроблений метод скороченого опису дає можливість одержувати рівняння гідродинаміки, а також інші макроскопічні рівняння, причому коефіцієнти перенесення виражаються в термінах рівноважних часових флуктуацій потоків фізичних величин [825,826]. Даний метод знайшов застосування при зображенні гідродинамічного етапу еволюції надплинної рідини, теорії релаксації магнітного моменту у феродіелектриках, кінетики чорного випромінювання.

Ці результати стали важливими для фізики твердого тіла, а саме, для теорії явищ перенесення в металах у сильних магнітних полях, коли суттєвим є квантування руху електронів в магнітному полі. Слід зазначити, що в літературі висловлювався сумнів з приводу того, що принцип Онсагера та співвідношення Ейнштейна виконуються для скісних компонент кінетичних коефіцієнтів в умовах квантування руху електронів в магнітному полі. С.В.Пелетмінським було показано, що принцип симетрії кінетичних коефіцієнтів Онсагера, а також співвідношення Ейнштейна будуть виконуватись, якщо враховувати поверхневі діамагнітні потоки заряду та енергії.

Значного розвитку набула розробка теорії магнетизму в подальшому в школі В.Г.Бар'яхтара. Великий цикл його досліджень, перш за все у Донецькому фізико-технічному інституті НАН України, був присвячений розробці доменної структури феро- та антиферомагнетиків, основних станів гелікоїдних магнітних структур, розвинуто теорію спін-переорієнтаційних переходів у ортоферитах та рідкоземельних феритах-гранатах у магнітному полі, метамагнітних фазових переходів, фазових переходів у антиферомагнетиках у магнітних полях, теорію утворення зародків при магнітних фазових переходах першого роду, досліджено динаміку циліндричних магнітних доменів, передбачено виникнення циліндричних доменів в околі фазових переходів. Зазначені роботи сприяли усвідомленню того факту, що доменні структури є неоднорідним станом поляризованих середовищ із співіснуючими фазами. Це дозволило описати властивості феромагнетиків, сегнетоелектриків, антиферомагнетиків та надпровідників із доменною структурою в околі фазових переходів I роду з єдиних позицій.

#### 5.2.4. Створення ймовірнісного підходу в теорії плазми (О.Г.Ситенко, 60-ті рр. XX ст.)

Важливість завдань, що стоять перед фізикою плазми, та надзвичайно широке коло явищ, які вивчає ця наука, зумовили її інтенсивний розвиток в останні десятиліття. В основу теорії плазми було покладено використання методів статистичної фізики, оскільки детальний опис плазмових середовищ може бути наведене в рамках загального динамічного підходу статистичної теорії, запропонованого М.М.Боголюбовим. На базі цього підходу теорія статистичних та електродинамічних властивостей плазми дістала успішного розвитку в Інституті теоретичної фізики в роботах академіка НАН України Олексія Григоровича Ситенка та його школи, чий дослідження дозволяють більш глибоко зрозуміти фундаментальні закономірності поведінки систем багатьох заряджених частинок, а також природу аномальних явищ у плазмі в умовах її магнітного утримання. Так, О. Г.Ситенком було розроблено ймовірнісний підхід до теорії плазми, на основі якого досліджено хвилі, випромінювання, флуктуації та процеси перенесення в обмежених системах заряджених частинок, що перебувають в стаціонарних нерівноважних станах. Встановлене вченим узагальнене кінетичне рівняння для хвиль у плазмі, яке враховує нелінійну взаємодію хвиль як між собою, так і з флуктуаційними полями, дало можливість дослідити процеси розсіяння, трансформації та випромінювання хвиль в нерівноважній плазмі. Було розроблено також теорії електромагнітних флуктуацій у плазмі та поляризаційної взаємодії заряджених частинок з плазмою, передбачено явище комбінаційного розсіяння хвиль у плазмі, вивчено властивості запыреної плазми та колоїдних систем, розроблено нелінійну електродинаміку плазми та кінетичну теорію часового і просторового відлуння в плазмі, досліджено флуктуації у надпровідному електронному газі та плазмі твердого тіла, закладено основи теорії електромагнітних флуктуацій у слабо турбулентній плазмі. [827—830]. В працях О.Г.Ситенка та К.Н. Степанова з коливань плазми в магнітному полі було сформульовано загальне дисперсійне рівняння для електромагнітних хвиль в рівноважній однорідній плазмі та введено тензор діелектричної проникності плазми в магнітному полі, що дало змогу повністю описати її електродинамічні властивості [831].

Наближений розв'язок ієрархії рівнянь, в основі якого лежить використання розкладань за степенями малого плазмового параметра, дозволяє виразити двочастинкову функцію розподілу через одностинкову і таким способом одержати кінетичне рівняння з інтегралом зіткнень Ландау. При розробці теорії флуктуацій в однорідній плазмі з урахуванням нелінійної взаємодії хвиль було використане розкладання за степенями напруженості поля та введено процедуру усереднення, що враховує принцип послаблення кореляції Боголюбова. З урахуванням розкладання за степенями напруженості поля з мікроскопічних рівнянь виводиться нелінійне рівняння, що подає динаміку електромагнітних полів у плазмі. При цьому електродинамічні властивості плазми повністю визначаються коефіцієнтами нелінійного рівняння. За допомогою методу багаточасових послідовних наближень з нелінійного рівняння виводиться ієрархія рівнянь, які описують різні нелінійні

процеси в плазмі. Послідовно перемножуючи нелінійне рівняння само на себе і роблячи далі статистичне усереднення з урахуванням принципу послаблення початкових кореляцій, отримують ієрархію нелінійних рівнянь для послідовності кореляційних функцій. Обриваючи ланцюжок рівнянь та виключаючи з нього вищі кореляційні функції, одержуємо замкнене рівняння для парної кореляційної функції флуктуацій поля з урахуванням як квадратичних за інтенсивністю поля процесів, так і кубічних, а також з урахуванням некогерентних явищ, обумовлених випадковим рухом окремих частинок. У стаціонарному випадку таке рівняння безпосередньо визначає спектральний розподіл енергії флуктуаційного поля. У загальному випадку це рівняння — основа для виведення узагальненого кінетичного рівняння для хвиль, яке й описує турбулентні процеси у плазмі, а також процеси розсіяння й трансформації хвиль, зумовлені флуктуаціями параметрів плазми. Безпосередній аналіз нелінійного рівняння для спектральної квадратичної кореляційної функції флуктуацій електричного поля з урахуванням кубічних доданків показує, що частина з них, яка описує трихвильову взаємодію, розбігається. Вибіркове підсумовування розбіжних доданків формально зводиться до введення діелектричної проникності плазми, модифікованої за рахунок нелінійних ефектів.

Труднощі, що виникають при підсумовуванні рядів теорії збурень, усуваються за рахунок перенормування теорії. Запропонована О.Г.Ситенком концепція перенормування дозволила побудувати перенормовану нелінійну електродинаміку сильнотурбулентної плазми, що застосовна для опису в умовах магнітного утримання плазми широкого кола низькочастотних нелінійних явищ (нелінійна взаємодія хвиль та флуктуацій, слабка та сильна турбулентність, сильнонелінійні збудження та структури, аномальне перенесення і самоорганізація плазми) та їх фундаментальних властивостей в умовах як слабкої, так і сильнонелінійної взаємодії з урахуванням кінетичних та електромагнітних ефектів.

Сьогодні роботи в галузі теорії плазми очолює наступник О.Г.Ситенка на посту директора Інституту теоретичної фізики НАН України, академік НАН України, заступник академіка-секретаря Відділення фізики і астрономії НАН України А.Г. Загородній, який розробив статистичну теорію просторово-обмежених плазмово-молекулярних систем і на її основі дослідив вплив взаємодії плазмової та молекулярної підсистем на електромагнітні флуктуації у таких системах (разом з І.П. Якименком та Ю.Л.Клімонтовичем), сформулював кінетичні рівняння (типу рівняння Балеску—Ленарда) для функцій розподілу вільних та зв'язаних заряджених частинок в обмежених плазмово-молекулярних середовищах, встановив явний вигляд інтегралів зіткнень і дослідив вплив межових поверхонь на розподіли електронів, іонів та молекул поблизу межі середовища [832—841]. А.Г.Загородній розвинув теорію гальмівного випромінювання у плазмово-молекулярних системах, яка послідовно враховує всі можливі процеси розсіяння за участю заряджених частинок та молекул (у тому числі з урахуванням іонізації та рекомбінації), а також розсіяння електронів та молекул на колективних флуктуаціях. Разом з О.Г.Ситенком узагальнив теорію флуктуацій у стійкій стаціонарній плазмі на випадок турбулентної плазми з дифузійно-дрейфовими рухами рідинного типу, знайшов динамічні фактори такої плазми і виявив їх особливості, пов'язані з великомасштабними турбулентними рухами плазми. Запропонував модель

немарківської дифузії частинок у турбулентній плазмі, що дає можливість описувати насичення плазмових нестійкостей у граничних випадках слабкої і сильної турбулентності, сформулював кінетичні рівняння систем з немарківськими процесами релаксації. А.Г.Загороднім також розвинуто теорію електромагнітних флуктуацій у заповненій плазмі з урахуванням флуктуацій заряду порошинок, вивчено вплив динаміки зарядження порошинок на колективні флуктуації і розсіяння хвиль у плазмі, виконано числове моделювання структурних та термодинамічних властивостей сильнонеідеальних кулонових систем, що моделюють заповнену та колоїдну плазму; показано можливість критичних явищ у таких системах, зроблено якісні висновки щодо критичних значень константи зв'язку та зарядового числа колоїдної компоненти.

Останні роботи А.Г.Загороднього присвячено розробці послідовної кінетичної теорії заповненої плазми на основі перших принципів статистичної механіки. Він сформулював строгі мікроскопічні рівняння та ланцюжок рівнянь Боголюбова для такої плазми, що дає змогу описати широкий клас нових фізичних явищ у заповненій плазмі, які досі не мали свого пояснення. За роботи із статистичної теорії плазмово-молекулярних систем А.Г.Загородньому було присуджено премію імені К.Д. Синельникова НАН України.

Академіки О.Г.Ситенко та А.Г.Загородній сприяли організації зустрічей вчених, які працюють в галузі теорії плазми. Так, у 1971 р. Інститут теоретичної фізики вперше у світовій практиці виступив з ініціативою проведення конференцій з теорії плазми. Вже перша конференція, яка проходила від 19 до 23 жовтня 1971 р., зібрала більше 250 вчених. Наступні Київські конференції з теорії плазми проходили у Києві (1971, 1974, 1987 рр.), Трієсті (1977 р.), Нагої (1980, 1996 рр.), Гьотеборзі (1982 р.), Лозанні (1984 р.), Делі (1989 р.), Інсбруку (1992 р.), Фос-Ігуасі (Бразилія) (1994 р.). Успіх Київських конференцій в значній мірі зумовлений підтримкою та авторитетом одного з їх організаторів — М.М.Боголюбова.

### 5.2.5. Створення мікроскопічної теорії розчинів електролітів (М.Ф.Головка, кінець 60-х — початок 70-х рр. ХХ ст.)

Метод колективних змінних, розвинутий І.Р.Юхновським спочатку для моделей заряджених частинок, був успішно застосований для опису різноманітних реальних систем. Зокрема, побудовано іонно-молекулярний підхід в теорії розчинів електролітів, у якій всі міжчастинкові взаємодії (як іонів електроліту, так і молекул розчинника) враховуються рівноправно.

У наступних роботах учня І.Р.Юхновського члена-кореспондента НАН України Мирослава Федоровича Головка одержано принципово важливі результати у галузі фізики конденсованої речовини. Це, зокрема, створення мікроскопічної теорії розчинів електролітів, в результаті чого було успішно розв'язано одне з центральних завдань статистичної теорії класичних систем взаємодіючих частинок: одночасне коректне врахування короткосяжних та далекосяжних взаємодій, тобто коротко- і далеко діючих вкладів в термодинамічні та структурні властивості багаточастинкових систем.

Слід зазначити, що проблема концентрованих розчинів сильних електролітів залишалась тривалий час нерозв'язаною. Складність полягала в необхідності одночасного урахування далекосяжних електростатичних та короткосяжних взаємодій, які приводять до протилежних за величиною значень малих параметрів. Задача побудови цієї теорії вимагала передусім явного і послідовного врахування взаємодій між іонами електроліту та молекулами розчинника. На той час в рамках традиційних іонних підходів явно розглядалася лише іонна підсистема. У наукових колах існував певний скептицизм щодо можливостей застосування мікроскопічних методів до опису складних сольватаційних ефектів у розчинах. Розчинник розглядався як середовище, яке характеризується діелектричною сталою та іншими параметрами, що вводились феноменологічно. Вважалося, що вони відповідають за сольватацію іонів.

Перші спроби в галузі теорії розчинів були зроблені І.Р.Юхновським спільно з А.О.Некротом і присвячені опису іонно-дипольних систем. Тут розчинник ще явно не розглядався, а враховувався як ефективне середовище із певною діелектричною сприйнятливістю. Властивості розчинника у такому підході моделюють також опосередковано, вибираючи короткосяжну частину міжіонної взаємодії. Починаючи з 60-х років, І.Р.Юхновський розвиває іонно-молекулярний підхід у теорії розчинів електролітів, спершу в межах іонно-дипольної моделі, а згодом з урахуванням складнішої електростатичної структури молекул розчинника. Згодом цей підхід був узагальнений на системи з довільною електростатичною взаємодією, що привело до важливого досягнення — побудови мікроскопічної теорії розчинів електролітів (І.Р.Юхновський, М.Ф.Головка та ін.) [842]. Ця задача була успішно розв'язана ними в методі колективних змінних, де далекосяжні взаємодії описувались у фазовому просторі змінних, а короткосяжні - у фазовому просторі індивідуальних координат частинок. Були розраховані функції, які визначають ближній порядок у взаємному розміщенні частинок у розчині, для опису взаємодій з полярними молекулами розвинута методика коректного врахування орієнтаційних рухів молекул.

Математична строгість опису у розширеному фазовому просторі забезпечувалась відповідною узагальненою функцією. М.Ф.Головком була запропонована зручна інтерполяційна формула для вільної енергії густих змішаних іонно - молекулярних систем, справедлива в широкій області термодинамічних станів. Таким чином, було вперше побудована мікроскопічна теорія електролітів, в якій рівноправно враховані взаємодії між усіма частинками розчину.

В результаті було показано, що характер екранування електростатичних взаємодій іонами і молекулами розчинника принципово різний. Тоді як іонне екранування приводить до експонентного спадання всіх електростатичних взаємодій, екранування полярними молекулами визначає діелектричні властивості розчину.

Проведені дослідження показали вирішальну роль молекулярного розчинника у формуванні багатьох властивостей розчинів електролітів. Рівноправне врахування обох підсистем дозволило створити теорію, придатну для опису розчинів в широкому інтервалі іонних концентрацій, температур і тисків. Використання групових розкладів допомогло виявити фундаментальну роль молекулярної підсистеми для розкриття на мікроскопічному рівні багатьох властивостей розчинів електролітів – явища іонної сольватації та процесу утворення і специфіки близького порядку у розчинах електролітів. Було проаналізовано вплив іонно-молекулярних та міжмолекулярних взаємодій на формування міжіонних потенціалів і доведено, що вони мають кулонівський характер лише на великих відстанях, а на середніх і малих міжіонних відстанях форма ефективного потенціалу відображає лише процеси утворення і розпаду сольватнорозділених іонних пар (І.Р.Юхновський, М.Ф.Головко, В.С.Височанський, А.В.Попов).

Започаткований іонно-молекулярний підхід у теорії електролітів успішно використовується при розв'язанні різних конкретних задач. Так, у працях І.Р. Юхновського, М.Ф.Головка, І.Й.Куриляка, Є.М.Сов'яка теорію розчинів електролітів було узагальнено на просторово-обмежені системи: електролітичні плівки та мембрани. Ідеї розділення потенціалів на коротко-та далекосяжну частини та побудови групових розвинень для кореляційних функцій просторового розподілу іонів і молекул були використані М.Ф.Головком, А.Д.Трохимчуком та К. Хайцингером для розробки підходу, в основі якого органічно поєднувалися методи комп'ютерного моделювання та теорії рідин. Отримані в методі колективних змінних групові розвинення були також використані для описання сольових і метало-сольових розплавів.

Результати, отримані методом колективних змінних, так само були використані в працях М.Ф.Головка, О.О.Пізіо та інших при побудові теорії іонних розплавів. Узагальнену модель іонно-молекулярних систем, у якій присутність компенсуючого поля враховується явним чином, було розвинуто у роботах І.А. Процикевича та М.Ф.Головка. У подальшому ця модель була використана авторами для опису структури розчинів металів у рідкому аміаку.

Побудована мікроскопічна теорія розчинів електролітів має важливе прикладне значення для передбачення їх термодинамічних і структурних властивостей у різних зовнішніх умовах. Зокрема, отримані результати для електролітичних плівок сприяють розумінню на мікроскопічному рівні явища опріснення електролітів, перш за все води [843]. Результати досліджень класичних



систем взаємодіючих частинок методом колективних змінних підсумовано в 1980 р. у монографії І.Р.Юхновського та М.Ф.Головка „Статистична теорія класичних рівноважних систем”. Сьогодні такий напрям, як теорія електролітів, розвивається у напрямку врахування різноманітних асоціативних та сольватаційних ефектів у розчинах і описання складних анізотропних рідин. Так, М.Ф.Головка продовжує дослідження в цій галузі, запропонувавши ідею врахування кластеризаційних ефектів. Розвинуті методи опису кластеризаційних ефектів у системах взаємодіючих частинок дозволили поширити методи, розвинуті для опису простих рідин, на складні рідини, включаючи різноманітні об’єкти фізики м’якої речовини – полімерні та сіткоутворюючі системи, колоїдні та міцелярні системи, поліелектроліти, мікроемульсії, рідини у пористих середовищах, біологічні об’єкти.

### 5.2.6. Застосування методів статистичної фізики у проблемах фізики металів та сплавів (Г.В.Курдюмов, В.М.Свєчников, А.А.Смирнов, М.О.Кривоглаз, А.Г.Лесник, С.Д.Герцрікен, 50–60-ті рр. ХХ ст.)

Важливі теоретичні результати, значущі для розвитку статистичної фізики, були одержані при розгляді задач фізики металів в Інституті металофізики НАН України, перш за все у відділах дифузії, фазових перетворень та теоретичному відділі інституту [861,194].

Оскільки важливим етапом в процесі створення матеріалів з високими характеристиками міцності є термічна обробка сплавів, то вивчення процесів, пов'язаних з термічною обробкою сплавів, зокрема сталі, стало основним напрямом розвитку фізичного матеріалознавства в Україні. Перші дослідження з фізики металів були проведені в організованому у 1928 р. Українському фізико-технічному інституті в Харкові; потім з 1931 р. розроблялись у його Дніпропетровській філії, на базі якої у 1932 р. було створено Дніпропетровський фізико-технічний інститут ДФТІ; а з 1946 — в Лабораторії металофізики НАН України, яка стала базою для створення у 1955 р. Інституту металофізики НАН України [192,193,<sup>845</sup>].

Наприкінці 1944 р. група вчених ДФТІ була переведена до Києва, де було організовано відділ металофізики Інституту чорної металургії АН УРСР. Очолив цей відділ академік НАН України Георгій В'ячеславович Курдюмов, який до війни з 1932 р. завідував рентгенівською лабораторією Дніпропетровської філії УФТІ, а потім — відділом рентгенометалографії новоствореного ДФТІ. 15 листопада 1945 р. на базі відділу металофізики Інституту чорної металургії було створено лабораторію металофізики АН УРСР, куди увійшли вчені лабораторії фазових перетворень у металах та сплавах, а також лабораторії кристалізації металів та сплавів довоєнного ДФТІ, разом з відділом дифузії Інституту фізики АН УРСР. Лабораторія металофізики розпочала свою діяльність з 1 січня 1946 р. У 1953 р. до її складу було введено відділ металознавства та лабораторію рентгеноспектрального аналізу Інституту чорної металургії. 1 березня 1955 р. лабораторія металофізики була перетворена в інститут металофізики НАН України, який очолив Г.В.Курдюмов.

Одним з головних напрямів робіт відділу фазових перетворень, керованого Г. В. Курдюмовим, були дослідження механізму й кінетики фазових перетворень при гартуванні і відпуску сплавів, насамперед фазового переходу мартенситу в аутенсит. Встановлення вченими відділу структури мартенситу і з'ясування характеру його орієнтації відносно вихідної аутенситної фази дали уявлення про бездифузійний характер мартенситного перетворення в сталях. Тобто було з'ясовано, що перебудова ґратки має такий характер, коли атоми зміщуються відносно один одного не обмінюючись місцями на відстані, що не перевищує міжатомної. Були також виявлені та детально досліджені бездифузійні фазові перетворення в сплавах кольорових металів.

Одним з ключових результатів цих досліджень стало чітке розуміння наявності двох основних процесів, що відбуваються при фазових перетвореннях. Це — дифузійні процеси, які спричиняють перерозподіл концентрації, а також процеси перебудови ґратки. Для вказаних процесів характерна значна різниця швидкостей

протікання та їх залежність від температурни. Було встановлено, що найзначніше розбіжності під час протікання цих процесів спостерігаються при розпаді твердого розчину аутенситу в сталі та інших евтектоїдних сплавах. Керування процесами розпаду твердого розчину дало можливість одержати набір проміжних станів з тими чи іншими заданими властивостями. Одним з важливих результатів досліджень цього напрямку є встановлення зворотності мартенситних перетворень, що дало підставу розглядати їх як фазові перетворення в однокомпонентних системах. Уперше це явище було докладно вивчене на мідно-алюмінієвих сплавах (Г.В. Курдюмов, В.Н.Гріднєв, Е.З.Камінський, Т.І.Стеллецька), потім на сплавах мідь-олово та мідь-цинк (І.В.Ісайчев), а пізніше було виявлено й для низки сплавів на основі заліза [846,864].

Відомі на той час праці з цього питання давали підставу припустити, що мартенситні перетворення взагалі не підлягають основним законам фазових перетворень. Проте, детально проаналізувавши експериментальний матеріал, накопичений до 1940 р., Г.В.Курдюмов висловив припущення, що ці перетворення також відбуваються також внаслідок шляхом зародження центрів кристалізації й подальшого їх росту У 1947 р. він видав працю, у якій на нових уявленнях було пояснено ряд особливостей мартенситного перетворення, вказано умови, при яких швидкість перетворення може бути сповільнена, і висловлені міркування про можливість існування пружних кристалів мартенситних фаз. Дослідження перетворень у сплавах мідь-алюміній-нікель, проведені Г.В.Курдюмовим та Л.Г. Хандросом у 1948 р., підтвердили ці припущення про існування „пружного” росту кристалів мартенситної фази, тобто було відкрито явище термопружної рівноваги при мартенситних перетвореннях (ефект Курдюмова).

Разом з дослідженнями природи механізму кінетики мартенситних перетворень широко досліджувались також процеси відпускання загартованої сталі. Так, було показано (Г.В.Курдюмов, Л.І.Лисак), що розпад мартенситу відбувається в дві стадії, які розрізняються механізмом та кінетикою протікання. Вивчався також вплив легуючих елементів на механізм і кінетику розпаду мартенситу при відпусканні загартованої сталі. Було встановлено, що легуючі елементи істотно не змінюють протікання першої стадії розпаду, в той час як швидкість другої стадії розпаду суттєво залежить від природи і кількості легуючих елементів (Г.В. Курдюмов, Л.І.Лисак, Г.Я.Козирський).

Цікаві роботи були проведені при вивченні мозаїчної структури та внутрішніх напружень мартенситу, відпущеного при різних температурах. Встановлено (Г.В. Курдюмов, Л.І.Лисак), що для стану високої міцності сталі характерна наявність високих напружень II й III роду і велика дисперсність кристаликів як альфа-твердого розчину, так і карбідної фази. Знеміцнювання сталі супроводжується зняттям спотворень ґраток і збільшенням частинок складових фаз.

Важливі дослідження на монокристалічних зразках (Г.В.Курдюмов, І.В. Ісайчев, М.П.Арбузов) були проведені з метою вивчення процесів карбідоутворення при відпусканні загартованої сталі. Вивчалася кінетика коагуляції цементиту при відпусканні загартованої сталі та вплив легуючих елементів на ці процеси. Зокрема, підтвердилося припущення Г.В.Курдюмова, що мартенсит є пересиченим твердим розчином вуглецю в альфа-залізі, а тетрагональність кристалічних ґраток

мартенситу обумовлена не напруженнями, а розчиненим вуглецем (Г.В.Курдюмов, М.П.Арбузов).

Праці Г.В.Курдюмова, його співробітників та учнів у галузі гартування і відпускання сталі заклали основу наукового обґрунтування процесів термічної обробки сталі. Ці роботи стали базою подальших досліджень відділу фазових перетворень з вивчення процесів зміцнення і знеміцнення сплавів, що відбуваються при термічній і механічній обробках, а також питань фізичної природи жароміцності сплавів, створення нових типів конструкційних перетворень та сплавів з “пам’яттю форми” [865,866]. Відкриття явища термопружної рівноваги фаз обумовило унікальні фізико-механічні властивості, — ефекти пам’яті форми, надпружності, аномально високої демпфуючої здатності; встановлення механізму впливу включень, структурних неоднорідностей, зовнішніх пружних полів, тиску, багатократних імпульсних навантажень, термоцикування і інших зовнішніх чинників на особливості мартенситних перетворень, що дозволило істотно розширити застосування на практиці матеріалів з вказаними вище унікальними властивостями. Роботи Г.В.Курдюмова ініціювали розвиток досліджень з фізики металів на заводах і у вузах Придніпров’я. Так, у Дніпропетровському університеті він організував перші в Радянському Союзі кафедру металофізики (1934) і рентгенологічну лабораторію (1935).

Один з учнів В.І.Данилова член-кореспондент НАН України Андрій Герасимович Лесник також продовжував роботу в Інституті металофізики НАН України, де з 1955 до 1987 керував відділом фізики плівок. Вчений у 1940 р. закінчив Київський університет та у 1947 р. — аспірантуру кафедри металофізики. З 1947 р. працює в Інституті металофізики, у 1947—1954 рр. викладав у київському університеті та Київському політехнічному інституті, з 1958 р. — професор, з 1976 р. — членом-кореспондент НАН України [850]. Наукові праці А.Г.Лесника побудові статистичної теорії сплавів та фізиці магнітних явищ. Він розробив статистичну теорію фазових перетворень у бінарних сплавах, теорію розпаду твердих розчинів, теорію магнітної анізотропії та статистичну теорію магнітної сприйнятливості реальних плівок.

Уявлення, розвинуті А.Г.Лесником в теорії термодинамічних властивостей бінарних сплавів, дали змогу пояснити ряд їх характерних особливостей. Так, було показано, що між атомами компонент можливий перерозподіл електронів, який обумовлює появу електростатичних сил взаємодії між атомами, що, в свою чергу, впорядковують структуру сплаву. Роботи А.Г.Лесника з теорії поліморфних перетворень у сплавах заліза та розрахунки діаграм стану деяких бінарних систем узагальнено в його монографії “Моделі міжатомної взаємодії в статистичній теорії сплавів” [851].

Даний підхід було застосовано А.Г.Лесником для дослідження магнітних плівок. Це дозволило дати статистичне тлумачення магнітних властивостей та впливу неоднорідностей наведеної магнітної анізотропії на феромагнітний резонанс, створити магнітостатичну теорію наведеної магнітної анізотропії, яка виникає при термомагнітній обробці та холодній пластичній деформації феромагнетиків, встановити роль структурних дефектів ґратки в утворенні наведеної магнітної анізотропії [852, 853]. Ці результати були узагальнені в монографії “Наведена

магнітна анізотропія” [854] та використані при розробці промислової технології виготовлення матриць пам’яті на тонких плівках. Було також розроблено методику спостереження електронно-ядерної взаємодії в тонких магнітних плівках. Уперше експериментально відкрито та досліджено явище подвійного резонансу ФМР–ЯМР, що свідчить про перспективність використання явища спінового відлуння в радіотехніці.

Ще один важливий науковий напрям було започатковано в організованому у 1946 р. відділі дифузії Лабораторії металофізики під керівництвом професора Соломона Давидовича Герцрікена, який вивчав рентгенівські промені, дифузію металів, виникнення та рухомість дефектів. Йому також належить винахід скла, прозорого для м’яких рентгенівських променів, що дало змогу СРСР у 30-40 рр. ХХ ст. розпочати виробництво запаяних рентгенівських трубок, а не ввозити їх із-за кордону.

З іменем С.Д.Герцрікена пов’язаний початок фізики металів у Києві з 1930 р. у відділі рентгенівських променів Інституту фізики (пізніше називався відділом дифузії, потім – металофізики), який він очолював. Цією тематикою С.Д.Герцрікен продовжував займатись в Інституті металофізики.

С.Д.Герцрікен закінчив Київський університет (1926 р.) та аспірантуру в 1929 р. Вже у 1927 р. в "Українських фізичних записках" було видано його першу працю у співавторстві з В.Є.Лашкарьовим "Камера для дебаєграм зі зразків довільної форми". З 1928р. до 1932 р. він працює доцентом Індустріального інституту (Київський політехнічний інститут), а у 1931 р. створює та очолює кафедру рентгенометалофізики в Київському університеті. Основним напрямом роботи керованого С.Д.Герцрікеном відділу дифузії Інституту металофізики було вивчення чинників, що впливають на процеси дифузії, удосконалення існуючих методів дослідження, а також розробка нових методів. Так, вивчаючи явища дифузії в металах, вчені ставили завдання з’ясувати головні фактори, що характеризують процес дифузії у двокомпонентних сплавах. Виявилось, що це енергії та ентропії активації. Досліджувались також трикомпонентні сплави, зокрема, срібні та мідні, в тому числі й за допомогою радіоактивних ізотопів [855]. Так, для деяких металів і сплавів було докладно розглянуто питання про кількість вакансій, енергію їх утворення та руху, визначено розподіл дислокацій, їх щільність та енергії руху в деформованих і термічно оброблених зразках [856—860].

С.Д.Герцрікеном та І.Я.Дехтярем удосконалено метод дослідження дифузії випаровуванням у вакуумі, який застосовується у тих випадках, коли одна зі складових має відносно високу пружність пари в області досліджуваних температур. На той час існуючі методи дослідження коефіцієнта дифузії на межах мали істотний недолік, оскільки визначення носили відносний характер: даний параметр визначався за допомогою коефіцієнта дифузії в зерні та ширину межі, яка довільно обиралася рівною  $5 \cdot 10^{-8}$  см. У відділі С.Д.Герцрікена ж було розроблено новий спосіб визначення абсолютного значення коефіцієнта межової дифузії за методами кінцевої задачі, який дав змогу оцінити ширину межі між зернами. Отже, це дало можливість з’ясувати роль горофільних домішок, які концентруються на межах, а також горофобних, що, відходять з меж у глибину зерна.

Під керівництвом С.Д.Герцрікена було розроблено також метод дослідження дифузії в суміші двох фаз. Зазвичай деталі, що мають підвищену температуру (при якій помітну роль відіграє рухомість атомів), знаходяться під навантаженням, а тому швидкість процесів, які відбуваються в них, порівняно з ненавантаженими деталями, змінюється. У відділі було проведено дослідження впливу осьових напружень (І.Я. Дехтяр) на параметри дифузії, зокрема, показано, що швидкість дифузії при осьових напруженнях зростає приблизно в 10–15 разів. Вивчення впливу всебічного стиску на самодифузію цинку (С.Д.Герцрікен) показало, що при тиску в  $100 \text{ кг/см}^2$  енергія активації зменшується, а коефіцієнт дифузії зростає. У металах найчастіше відбувається дифузія через вакансії, де енергія активації самодифузії дорівнює сумі енергії утворення вакансій та енергії активації їх руху. Ці дослідження були підсумовані в монографії С.Д.Герцрікена та І.Я.Дехтяря у 1960 р. "Дифузія в металах та сплавах у твердій фазі" [861].

С.Д.Герцрікеном із співробітниками було розроблено також метод визначення з кривих лінійного розширення енергії утворення вакансій, проведені систематичні дослідження впливу домішок на параметри дифузії внаслідок зміни складу сплавів, валентності елементів, атомного радіуса, а також розроблено теорію направлених валентностей у ковалентних сполуках.

Ряд досліджень у цьому відділі (І.Я.Дехтяр) присвячувалась вивченню характеру міжатомної взаємодії у сплавах на основі металів групи заліза, а також теоретичним питанням повзучості і міцності металів при високих температурах. Зокрема, встановлено, що зростання твердості металів внаслідок пластичної деформації пов'язано із збільшенням дислокацій, яка вимірюється за зміною об'єму при відпалі деформованих металів (С.Д.Герцрікен, Н.Н.Новиков).

Започаткована С.Д.Герцрікеном тематика розробляється його учнями і послідовниками у таких напрямках, як дослідження межової (об'ємної) дифузії; параметрів дифузії на стаціонарних межах зерен; параметрів дифузії на рухомих границях зерен; параметрів поверхневої дифузії; аномального масоперенесення за нестационарних умов; параметрів дифузії у металевих сплавах з нетрадиційними (квазі-, нанокристалічною) структурами. Це, перш за все, професор Л.Н.Ларіков і останній аспірант Соломона Давидовича, доктор фіз.-мат. наук, професор В.М. Фальченко.

Слід зазначити, що у 1953 р. з Інституту чорної металургії НАН України в Лабораторію металофізики було переведено відділ металознавства, очолюваний академіком НАН України Василем Миколайовичем Свечниковим. Основним напрямом праці відділу були дослідження фазових рівноваг дво- і трикомпонентних металевих систем з метою пошуку композицій, придатних для високотемпературної експлуатації. Паралельно у контакті з Міністерством чорної металургії у зв'язку з керченською проблемою використання арсеністих руд, вивчалися сплави залізо–арсен та залізо–арсен–вуглець. З робіт В.М.Свечникова теоретичного характеру у першу чергу слід зазначити роботи із систематики даних за впливом легуючих елементів на поліморфізм заліза, а також роботу В.М.Свечникова і А.Г. Лісника „До теорії поліморфізму заліза” 1956 р.

Надзвичайно важливими для розвитку методів статистичної фізики стали роботи теоретичного відділу Інституту металофізики, який було створено у 1950 р.

Від дня заснування та до 1987 р. відділом керував академік НАН України Адріан Анатолійович Смирнов. Великий цикл наукових праць А.А.Смирнова стосується теорії твердого тіла та фазових переходів у недосконалих металевих кристалах. Він розвинув теорії руху електрона в кристалічній ґратці та електронного енергетичного спектру сплавів, що впорядковуються (1947), квантову теорію електроопору металів і сплавів, статистичну теорію впорядкування і дифузії у металах і сплавах, зокрема, в сплавах впровадження. Передбачив ефект впливу впорядкування сплавів на дифузію та електронний спектр, встановив принципову можливість при впорядкуванні переходу між металічним та неметалічним типами твердих тіл (1954). Побудував теорії розпаду сплавів, які містять у собі домішки на вузлах і міжвузлях кристалічної ґратки (1955), фазових переходів «порядок — хаос» у сплавах з кількома надструктурами при високих тисках (1974), спільно з С.В.Вонсовським розвинув теорію розсіяння повільних нейтронів в упорядкованих сплавах, теорії в'язкості та дифузії в рідких і аморфних металах. Запропонував новий метод дослідження форми поверхні Фермі в металах і сплавах (1959), теорію розсіяння світла полем електричних зарядів, при цьому вперше одержав спостережуваний ефект розсіяння гамма-променів на атомних ядрах.

Перш за все слід відзначити започаткований А.А.Смирновим науковий напрям з впорядкування атомів у сплавах, у рамках якого ним було розвинуто статистичну теорію впорядкування та його вплив на різні властивості сплавів, досліджено перебудову енергетичного спектра електронів провідності, яка виникає при впорядкуванні, передбачено новий важливий якісний ефект можливої появи щілини в енергетичному спектрі сплавів при виникненні дальнього порядку. Ця теорія стала основою для досліджень оптичних, фотоелектричних, магнітних та інших властивостей сплавів. Зокрема, було передбачено можливість фазового переходу з утворенням упорядкованого розташування проникних атомів в міжвузлях кристалічної ґратки [862,863]. Пізніше ці ідеї одержали подальший розвиток у зв'язку з явищем “плавлення в підґратці”. Учнями А.А.Смирнова також вперше був проведено статистико-термодинамічний аналіз, на основі якого встановлено всі можливі типи термодинамічно стійких надструктур впровадження на основі щільно упакованих металів (В.Н.Бугаєв, В.А.Татаренко, Р.В.Чепульський).

А.А.Смирнов та М.О.Кривоглаз приділяли значну увагу розвитку молекулярно-кінетичної та термодинамічної теорії металів та сплавів, побудували теорію діркоутворення і дифузії атомів у впорядкованих сплавах. За цієї теорії вперше було враховано статистичний розкид висот потенціальних бар'єрів, вона дала змогу передбачити низку особливостей залежно від параметрів дифузії — температури та концентрації, які виникають при упорядкуванні [864, 865, 252]. Ці особливості згодом були виявлені експериментально.

Розвинуто також теорію самодифузії за допомогою уявлень про дірковий механізм у бінарних і потрійних неупорядкованих сплавах. М.О.Кривоглаз, крім того, передбачив ефект подавлення критичних флуктуацій при наявності далекодійних сил, запровадив поняття про флуктуони та розробив їх теорію. А.А.Смирнов розробив теорію дифузії та термодифузії у сплавах впровадження при великих концентраціях включених атомів та за міжвузлями різного типу ґратки металу, а також теорію фазових перетворень зі зміною порядку в системі включених

атомів, які займають нееквівалентні положення у ґратці. Ним побудовано також не пов'язану з квазікристалічним наближенням теорію дифузії та в'язкості в рідких металах, яка привела до нового типу температурних залежностей коефіцієнтів самодифузії та в'язкості, що добре узгоджуються з експериментом. Учений також вперше створив послідовну молекулярно-кінетичну теорію сплавів віднімання, пояснив основні експериментально спостережувані особливості структурних та термодинамічних властивостей цих сплавів. Ним було розвинуто теорію дифузійних процесів у плівках окидів на металах та сплавах, яка пояснила механізм захисної дії таких плівок при їх окисленні. Учнями А.А.Смирнова була розвинута строга статистична теорія високоенергетичних квазічастинок у багатокомпонентних неупорядкованих системах, упорядкованих сплавах та кристалах з дефектами різного типу. На її основі передбачено та вперше теоретично описано нові фундаментальні фізичні явища: явище екстинкції внаслідок розсіяння на викривленнях, а також порушення в монокристалах відомого з кінематичної теорії розсіяння закону збереження повної інтегральної відбивної здатності, яка виявилася дуже інформативною величиною. Передбачено також ефекти аномального проходження та екстинкції для некогерентної складової хвильового поля квазічастинок, які знайшли широке застосування (В.Б.Молодкін, М.Є.Осиновський, С.І.Олиховський).

У відділі розвивалася й теорія фазових перетворень. Було досліджено вплив домішки третього елемента на розпад сплавів і з'ясовано деякі особливості фазових переходів II роду. Розроблено метод точок розгалуження кривої рівноваги (що не передбачав тип ґратки у впорядкованому стані), за допомогою якого можна було досліджувати фазові переходи типу порядок—хаос та порядок—порядок у сплавах з декількома фазовими перетвореннями і передбачати тип надструктур, що з'являються при пониженні температури. З'ясовано вплив на впорядкування різних факторів, зокрема, показана можливість появи двох точок фазового переходу порядок—хаос при монотонній зміні тиску (А.А.Смирнов, В.В.Гейченко); побудовано теорію, в якій враховано взаємний вплив двох колективних явищ — спінового впорядкування в антиферомагнітних тілах та атомного впорядкування. Дана теорія виявила можливість ряду характерних особливостей, пов'язаних із взаємним впливом впорядкування та намагнічення у сплавах (зміна температур фазових переходів, особливості діаграми стану тощо).

Великий обсяг досліджень теоретичного відділу було присвячено побудові теорії електроопору сплавів, які мають різні дефекти кристалічної будови. У працях А.А.Смирнова, М.О.Кривоглаза, З.А.Матисіної та А.І.Носарь було розвинуто багатоелектронну теорію остаточного електроопору багатокомпонентних упорядкованих сплавів перехідних металів з неперехідними металами, яка добре узгоджувалась з дослідом, встановлено залежність опору від складу сплаву, параметрів дальнього порядку, кореляції та величин, які характеризують різного роду викривлення кристалічної ґратки. Досліджено електроопір періодичних модульованих структур, що значною мірою визначають міцність сплавів, та запропоновано простий метод визначення важливих характеристик таких структур (амплітуди коливань, складу тощо).



Слід вказати на проведені теоретичним відділом дослідження з теорії розсіяння рентгенівських променів та повільних нейтронів. У працях В.В.Гейченка, В.М.Даниленка, М.О.Кривоглаза, З.Я.Матисиної, Д.Р.Різдвянецького та А.А.Смирнова було розвинуто статистичну кінематичну теорію розсіяння сплавами різного типу хвиль та теплових нейтронів. Ця теорія дає можливість визначати характер мікронеоднорідностей складу, які впливають на практично важливі властивості сплавів, і знаходити деякі енергетичні константи міжатомної взаємодії. На основі побудованої теорії нейтронографії сплавів з урахування дальнього порядку, кореляції, геометричних дефектів та ефектів магнітного розсіяння, було також розроблено нейтронографічний метод дослідження дефектів будови сплавів.

Використовуючи метод флуктуаційних хвиль, М.О.Кривоглаз та К.П.Рябошак проаналізували розсіяння рентгенівських променів на статичних викривленнях та критичне розсіяння; запропонували класифікацію дефектів за створюваними ними рентгенографічними ефектами; дослідили розсіяння на дислокаціях. М.О.Кривоглаз та А.А.Смирнов також розробили новий метод дослідження форми поверхні Фермі в металах та сплавах, заснований на вивченні кутового розподілу квантів, які утворюються при анігіляції позитронів з електронами провідності в монокристалічних зразках. Перевагою цього методу було те, що він не вимагав, на відміну від інших загальновідомих методів, застосувань магнітних полів та низьких температур. Результати А.А.Смирнова відображені у численних наукових працях, серед яких три монографії та одна науково-популярна книга [866—868,252].

Нині Інститут металофізики НАН України продовжує фундаментальні дослідження на молекулярному та електронному рівнях природи структурних змін та фазових перетворень, які виникають у металевих матеріалах та сплавах за особливих умов (низькі та високі температури, високий тиск та вакуум, невагомість, космічна радіація) та станах (плівки, поверхневі шари, аморфні стрічки, нано- та квізікристали, надпровідники, високодисперсні матеріали та наноструктури), під дією різних факторів (радіаційне та ультразвукове опромінення, ударні навантаження, циклічні механічні та теплові впливи, агресивні середовища, швидкісні нагрівання) та встановлення їх зв'язку зі спостережуваними фізичними властивостями.

### 5.2.7. Створення теорії критичних явищ в індивідуальних рідинах та розчинах (О.З.Голик, 50—70-ті рр. ХХ ст.)

Організатором великого колективу вчених, які працювали в галузі фізики рідкого стану речовини, критичних явищ і фазових перетворень, був професор, керівник кафедри молекулярної фізики Київського університету Олександр Захарович Голик. Його дослідження являли собою новий підхід до вивчення рідкого стану, який ґрунтувався на з'ясуванні властивостей рідин у тісному зв'язку з розглядом їх структури та на знаходженні закономірностей у групах рідин, однорідних за своєї структурою [869—871]. Всі роботи кафедри молекулярної фізики були тісно пов'язані з проблемами промисловості. Об'єктами дослідження виступали органічні рідини та їх розчини, рідкі метали і металеві розчини, розчини електролітів. Зокрема, досліджувались в'язкість, густина і структура мастильних матеріалів, особливо кремнієорганічних сполук; вивчались розчини вода–ацетон–бутанол–етанол; проводились автоматичні визначення за густиною або в'язкістю вмісту етанолу у розчинах. Так було започатковано новий розділ вчення про рідини.

Наукові праці О.З.Голика та його учнів (Ю.І.Шиманського, О.В.Чалого, Т.П.Рощиної, І.І.Адаменка та інш.) стосуються пружних та в'язких властивостей молекулярних рідин та розчинів, теплового руху молекул, критичних явищ у індивідуальних рідинах та розчинах, зокрема, в електролітах, фазових перетворень рідина–пара, структури та реологічних властивостей полімерних матеріалів і аеродисперсних систем [872,873]. Вивчалися густина, стисливість, в'язкість різних рідин та твердих розчинів у широкому інтервалі температур і концентрацій, було встановлено зв'язок між цими параметрами. Розроблено рентгенографічні методи дослідження структури рідин, в тому числі й рідких металів, методи дослідження рівняння стану рідин у широкому інтервалі температур та тисків, вивчено фізичні властивості речовини поблизу критичного стану рідина-пара та побудовано теорію явища, одержано нові дані про оптичні та кореляційні властивості критичного стані, досліджено пружні та теплові властивості багатьох молекулярних рідин, їх структуру, стисливість та зсувну в'язкість, встановлено кореляцію між ними (О.З.Голик, О.В.Чалий, І.І.Адаменко, Ю.І.Шиманський, А.Ф.Скришевський, В.М.Сисоєв, Ю.Г.Кузовков) [874—878]. Було вивчено густини речовин, стан яких близький до критичного, релаксаційні механізми молекулярних перебудов рідин, рідких розчинів та полімерів (В.Сперкач, Ю.В.Забашта, О.Н.Алекєєв, О.С.Свечникова), проведено дослідження впливу динамічної адсорбції молекулярних домішок та опромінення на швидкість випаровування крапель води та частинок льоду (В.М.Нужний, Г.А.Кричевський) [879—881].

Разом з І.І.Адаменком, О.В.Тарасенком та С.Ф.Соколовською О.З.Голик вивчав структуру в'язкості, пружності, електропровідності індивідуальних рідин та розчинів, зокрема, електролітів та полімерів (з П.П.Чолпаном, А.Ф.Скришевським та А.К.Дорошем) [882—884]. Спільно з І.І.Адаменком він дослідив поглинання ультразвуку та об'ємний коефіцієнт в'язкості багатьох молекулярних рідин в широкому інтервалі температур і тисків. Зокрема, розглянув питання про рівняння

стану рідких *n*-парафінів, поширення та поглинання ними ультразвуку вздовж лінії насичення [885]. Він також експериментально довів вплив гравітаційного поля на фізичні властивості індивідуальних речовин та подвійних розчинів поблизу критичного стану рідина–пара, а також показав, як цей гравітаційний ефект впливає на властивість речовини розсіювати світло в критичному стані (спільно з Ю.А. Шиманським). Разом із Ю.Ф.Забаштою, М.А.Геніною, А.Я.Фрідманом та А.Ф. Скришевським дослідив релаксаційні властивості полімерів, що кристалізуються та утворюють волокна.

Започаткований О.З.Голиком науковий напрям розробляли його учні. Так, Д.Є. Овсієнко із співробітниками продовжував вивчення процесів зародження центрів кристалізації у переохолоджених рідинах, у тому числі процесів утворення зародків на твердих поверхнях. Зокрема, було з'ясовано кінетику та механізм зародження цього процесу, сформульовано більш строгі критерії гомогенної кристалізації. Одночасно з цим традиційним напрямом розвивається дослідження механізму росту кристалів з розплавів і природа утворення в них субструктурних недосконалостей. Внаслідок цього було встановлено особливості кінетики і механізму росту кристалів, морфології, втрати стійкості та розвитку нерівноважних форм, механізму впливу та захвату домішок [886].

Подальше інтенсивне вивчення будови рідин продовжували А.С.Лошко та А.В. Романова. Ними були створені нові методи дослідження будови рідин та розроблені нові прилади. Одержані більш точні кількісні характеристики ближнього порядку, вивчена їх залежність від температури, складу сплавів, встановлена різниця між структурами рідких металів залежно від типу упаковки у твердій фазі та температури, вперше виявлено мікронеоднорідну будову бінарних сплавів, які утворюють тверді розчини [194].

Масштабні дослідження рідких розчинів проводилися у Київському університеті під керівництвом А.Ф.Скришевського. Ним було виконано великий цикл робіт з вивчення структури молекулярних рідин з різним характером міжатомної та міжмолекулярної взаємодії [887,888]. І.В.Радченко з учнями вивчав розчини, метали та сплави, розвивав модельні дослідження структури рідини [889, 890]. Зокрема, незалежно від інших він та Н.Я.Клинцов показали, що у розплавлених солях зберігається досить високий ступінь ближнього порядку іонів у межах найближчих сусідів. Вони ж встановили, що у бінарних сольових розплавах ближній порядок значною мірою визначається структурою відповідних іонних систем у твердій фазі.

Вивчивши розсіяння рентгенівських променів сумішами метилового спирту з водою, І.В.Радченко та Ф.К.Шестаковський встановили, що присутність у воді молекул метанолу укріплює її структуру, сприяючи утворенню більш міцних молекулярних асоціацій, ніж у чистій воді.

У подальшому на кафедрі спільно з Об'єднаним інститутом ядерних досліджень (м. Дубна, Росія) та з інститутом ядерних досліджень НАН України сформувався новий науковий напрям – нейтронна спектроскопія конденсованих середовищ, у рамках якого досліджувалися критичні явища у системах полімер–розчинник. У співпраці з Інститутом теоретичної фізики НАН України були знайдені узагальнені частотні спектри рідин, визначені критичні явища у обмежених системах (О.В.Чалий).

### 5.2.8. Розробка статистичної теорії рідин (Й.З.Фішер, 60-ті рр. XX ст.)

Значною подією у розвитку статистичної фізики в Одесі став перехід восени 1963 р. на посаду завідуючого кафедрою теоретичної фізики Одеського університету професора Йосипа Залмановича Фішера. Становлення Й.З.Фішера як вченого почалось з досліджень у галузі загальної теорії відносності, де він запропонував нове рівняння гравітаційного поля, що відрізнялось від рівняння Ейнштейна врахуванням флуктуацій поля за допомогою усереднення за часом та простором [891]. Ці роботи сформували інтерес Й.З.Фішера до методів усереднення різних типів, які відіграють ключову роль при розгляді кінетичних явищ у рідинах, пізніше він підійшов до вивчення широкого спектра проблем у конденсованій речовині, зокрема теорії рідин та критичних явищ. На момент переходу в Одеський університет Й.З.Фішер вже був одним із відомих вчених у цієї галузі. Головні його роботи, присвячені теорії класичних та квантових рідин, а саме, застосуванню методу кореляційних функцій до вивчення рівноважних властивостей простих рідин, було узагальнено у 1961 р. у монографії “Статистична теорія рідин” [128], яка у 1964 р. вийшла також англійською мовою у США та Індії. Ця монографія мала ключове значення для розуміння природи рідкого стану речовини.

В Одеському університеті Й.З.Фішер проводив дослідження з різних проблем критичного стану речовини, таких як флуктуації, кінетичні та дифузійні процеси, гідростатичний ефект, в'язкість, швидкість звуку [892—897]. Розвинувши ідею М.О. Леонтовича про нелокальний зв'язок між густиною та флуктуаціями концентрації, він побудував феноменологічну теорію флуктуацій багатокомпонентних розчинів поблизу їх критичних станів. При цьому було показано, що всі кореляційні функції асимптотично виражаються через ту саму функцію, а дифузійний процес біля критичної точки є дуже повільний та описується нелінійним рівнянням. З цього рівняння випливав розподіл концентрації коливального типу, дуже відмінний від класичної поведінки [898].

Проблеми статистичної теорії рівноважних рідин завжди залишались у центрі уваги професора Й.З.Фішера, серія його робіт присвячена також структурі рідин. Ним було показано, що поведінка структурного фактору рідини суттєво відрізняється від поведінки неаналітичної функції. Слід згадати також роботи вченого щодо поведінки багаточастинкових функцій розподілу в околі критичної точки. Й.З.Фішер вказував, що їх аналіз є важливим, оскільки багато термодинамічних похідних виражаються в термінах даних функцій. Разом із співробітниками він показав, що поблизу критичних точок тричастинкова функція розподілу може бути асимптотично виражена через двочастинкову функцію та її похідні. Аналогічні вирази були одержані також для чотиричастинкової функції розподілу. Дані результати мали суттєве значення як додаткові правила сум для  $F_n$ .

Протягом багатьох років професор Й.З.Фішер вивчав рівноважні та кінетичні властивості води та водних іонних розчинів. Важливими є його праці в галузі статистичної термодинаміки не повністю визначених систем, з модельним потенціалом, залежним від густини та температури.

Вивчаючи рідини та їх розчини, професор Й.З.Фішер одержав ряд нових результатів. Так, ним було показано, що у розбавлених розчинах при низьких температурах, коли існує надплинний стан, можуть виникнути квантові вихори. Виявилось, що квазічастинки, які відповідають нормальній компоненті, та вихори ефективно притягаються, спричиняючи абсорбцію нормальної компоненти. Найбільш цікавий наслідок одержаної картини — це можливість формування лінійної фермі-рідинної системи вздовж вихору. Іншим важливим результатом стало дослідження Й.З.Фішером мобільності позитивних іонів у розбавленому розчині або у рідині.

Слід зазначити, що Й.З.Фішер був одним з перших, хто звернув увагу на комп'ютерні експерименти як потужний засіб дослідження неупорядкованих систем. У 1971 р. він надрукував статтю щодо автокореляції функції швидкості молекули у класичній рідині, пояснив деякі незрозумілі результати ранніх комп'ютерних експериментів, дав нове якісне розуміння природи молекулярних рухів у рідині, розробив теорію температурних гідродинамічних флуктуацій в межах формулювання Лагранжа, розглянув низькотемпературну частину швидкості молекули у рівноважній рідині як швидкість її руху в полі гідродинамічних флуктуацій, разом з Л.І.Комаровим узагальнив метод часових кореляційних функцій для пояснення експериментів з розсіяння світла. Однією з останніх робіт вченого стало вивчення експоненціальної асимптотики в спектрі молекулярного розсіяння світла в газах та простих рідинах. Згідно з цими результатами, явище відображує динаміку у часі початкової фази міжмолекулярних взаємодій у такій системі.

Інформація щодо діяльності Й.З.Фішера в Одеському університеті міститься також у підрозділі 6.2.

## ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 5

1. З'ясовано, що розвиток статистичної фізики в Україні у 50–60-х рр. ХХ ст. генетично пов'язаний з діяльністю наукової школи твердого тіла та теоретичної фізики Л.Д.Ландау (Харків), наукової школи математичної та теоретичної фізики М.М.Боголюбова (Київ), наукової школи фізики рідин В.І. Данилова (Дніпропетровськ, Київ), професора Й.З.Фішера в галузі статистичної теорії рідин (Одеса).

2. Встановлено, що найбільш значущими науковими результатами в галузі розвитку методів статистичної фізики, одержаними в Україні в 50–60х рр. ХХ стали: започаткування теорії неупорядкованих систем та теорії флуктуаційних рівнів (І.М.Ліфшиць, 1964—1967); створення методу колективних змінних у класичному та квантовому випадках (І.Р.Юхновський, 1958—1964); розвиток статистичної теорії фазових переходів (І.Р.Юхновський, кінець 60-х рр. ХХ ст.); узагальнення методу скороченого опису на широкий клас динамічних систем, побудова нерівноважної крупноструктурної ентропії системи взаємодіючих частинок (С.В.Пелетмінський, 60-ті —початок 70-х рр. ХХ ст.); обґрунтування нерівноважної статистичної механіки нескінченних систем, еволюційний підхід до кінетичних рівнянь для квантової статистики (Д.Я.Петрина, кінець 60-х рр. ХХ ст.); застосування методів статистичної фізики у квантовій теорії поля та теорії елементарних частинок (М.М. Боголюбов, 1951—1965 рр. ХХ ст.)

3. Доведено, що в галузі застосування математичного апарату статистичної фізики до конкретних фізичних задач ключовими є наступні результати: побудова мікроскопічної теорії надпровідності (М.М.Боголюбов, 1957 р.); створення електронної теорії металів (І.М.Ліфшиць, друга половина 50-х рр. ХХ ст.); вивчення фазових переходів у магнетиках (О.І.Ахієзер, В.Г. Бар'яхтар, С.В.Пелетмінський, 60-ті рр. ХХ ст.); створення ймовірного підходу до теорії плазми (О.Г.Ситенко, 60-ті рр. ХХ ст.); створення мікроскопічної теорії розчинів електролітів (М.Ф.Головко, кінець 60—початок 70-х рр. ХХ ст.); застосування методів статистичної фізики у проблемах фізики металів та сплавів (Г.В.Курдюмов, В.М.Свечніков, А.А. Смирнов, М.О.Кривоглаз, А.Г.Лесник, С.Д.Герцрікен, 50—60-ті рр. ХХ ст.); створення теорії критичних явищ в індивідуальних рідинах та розчинах (О.З. Голик, 50—70-ті рр. ХХ ст.); розробка статистичної теорії рідин (Й.З.Фішер, 60-ті рр. ХХ ст.).

## РОЗДІЛ 6

### НАУКОВІ ЦЕНТРИ ЗІ СТАТИСТИЧНОЇ ФІЗИКИ В УКРАЇНІ

#### 6.1. Розвиток статистичної фізики в наукових інститутах України

(Національний науковий центр “Харківський фізико-технічний інститут”

, Інститут фізики, Інститут теоретичної фізики, Інститут фізики конденсованих систем, Інститут математики, Донецький та Дніпропетровський фізико-технічні інститути, Фізико-технічний інститут низьких температур, Інститут радіофізики та електроніки, Інститут металофізики, Інститут фізики напівпровідників, Інститут проблем матеріалознавства, Український науково-дослідний гідрометеорологічний інститут)

В установах Національної академії наук України, зокрема, в Харківському фізико-технічному інституті, Інституті математики, Інституті фізики, Інституті теоретичної фізики, Інституті фізики конденсованих систем, Фізико-технічному інституті низьких температур, Інституті радіофізики та електроніки, Донецькому фізико-технічному інституті, Інституті металофізики, Інституті фізики напівпровідників, Інституті проблем матеріалознавства проводились численні дослідження властивостей конденсованого стану речовини, що мали принципове значення для становлення і розвитку статистичної фізики в Україні.

Важливі теоретичні дослідження, зокрема, в галузі кінетики електронів та фазових переходів, проводились у теоретичних відділах Інституту фізики та Інституту напівпровідників НАН України [899, 195]. Теоретичний відділ Інституту фізики було створено та очолено професором Леоном Йосиповичем Кордишем, з 1944 р. ним керував академік НАН України Соломон Ісакович Пекар. У 1960 р. відділ майже у повному складі було переведено в Інститут напівпровідників, де на його базі організовано відділи теоретичної фізики (завідувач — С.І.Пекар) та теорії напівпровідників (завідувач — Е.І.Рашба), об'єднані у 1983 р. Знову відділ теоретичної фізики в Інституті фізики було організовано у 1964 р. під керівництвом О.С.Давидова, з 1973 р. його очолює П.М.Томчук.

Одним з найзначніших досягнень теоретичних відділів за час керування С.І. Пекара стало створення у 1945—1952 рр. ним з учнями теорії поляронів та  $F$ -центрів у кубічних кристалах при сильному електрон-фононному зв'язку та найпростішій формі зони провідності, теорії фотопереходів і теплових переходів електронів у локальних центрах, істотно вдосконаленої теорії коливань кристалічних ґраток з урахуванням деформації іонів і атомів при коливаннях [900]. Після організації Інституту напівпровідників теорія поляронів була узагальнена на випадок проміжного та слабкого електрон-фононного зв'язку, та застосована до багатодолинної структури зони провідності. Було також з'ясовано специфіку поведінки рухомого полярону та п'єзополарону (С.І.Пекар, В.М.Буймистров, Г.В. Вихнина, Е.В.Моздор, Л.С.Хазан, В.І.Шека). Завдяки цим результатам стало можливо на новій основі розглядати теорію електропровідності кристалів з іонною ґраткою, вони також суттєво змінили уявлення про носії заряду та знайшли широке застосування у фізичній хімії та ядерній фізиці.

Під час керування теоретичним відділом Інституту фізики О.С.Давидова ним була створена фундаментальна теорія екситонів у молекулярних кристалах та передбачено існування додаткових світлових хвиль. У 1948—1953 рр. О.С.Давидов показав, що у спектрах молекулярних кристалів мають з'являтися специфічні колективні взаємодії, пов'язані з виникненням екситонів, здатних мігрувати кристалом. Зокрема, з теорії випливало, що у спектрах поглинання спостерігатимуться мультиплети смуг, причому кількість смуг у мультиплетах повинна дорівнювати кількості молекул у елементарній комірці кристалу [901]. Такі мультиплети смуг у спектрах молекулярних кристалів вперше були експериментально відкриті А.Ф.Прихотько у 1948 р. У 1966 р. О.С.Давидову був виданий диплом на відкриття, яке відомо під назвою “давидовське розщеплення”. Свої дослідження він продовжував у створеному в 1966 р. Інституті теоретичної фізики, де очолював відділ теорії ядра, а з 1973 до 1988 рр. був директором інституту та створив наукову школу.

У Інституті фізики разом з Інститутом напівпровідників у 1966—1976 рр. вивчались також явища перенесення у напівпровідниках, що знаходяться в сильних електричних та магнітних полях. Було розвинуто теорію перенесення та колективних процесів у нерівноважній (розігрітій полем) плазмі напівпровідників зі складним законом дисперсії енергії носіїв току, запропоновано методи обчислення кінетичних коефіцієнтів, які враховують специфіку зонної структури (непараболічність закону дисперсії та його анізотропію), а також деталі та деталі механізмів розсіяння. Виявлено високу чутливість багатьох характеристик нерівноважної напівпровідникової плазми (кінетичних коефіцієнтів, частот та декрементів власних коливань) до специфіки зонної структури напівпровідника. Проведено конкретні обчислення ряду кінетичних коефіцієнтів у статичних та високочастотних полях, досліджено роль електрон-електронного розсіяння, суттєвого при великих концентраціях носіїв (І.М.Дикман, П.М.Томчук). Розглянуто також кінетичні коефіцієнти у класичних (з періодом порядку довжин релаксації) надгратках, зокрема, у надгратці, утвореній стоячою лазерною хвилею; резонансні ефекти електромагнітних хвиль, період яких близький до періоду надгратки. З'ясовано, що слабке постійне електричне чи магнітне поле суттєво змінює оптичні властивості надрешітки у резонансних умовах (І.М.Дикман, П.М.Томчук). Для напівпровідників зі складним зонним спектром було передбачено новий механізм розсіяння хвиль флуктуаціями у зовнішньому електричному полі (П.М.Томчук, В.А.Шендеровський); побудовано теорію флуктуації у термодинамічно нерівноважній напівпровідникової плазмі у квантуючих як магнітних, так і електричних полях (вузькозонні напівпровідники), а також з урахуванням нерівноважності фононної підсистеми (П.М.Томчук, А.А.Чумак, А.А.Тарасенко, С.С.Рожков, 1973—1977); розроблено теорію динамічної взаємодії двох когерентних світлових пучків у нелінійному оборотному середовищі; запропоновано способи одержання ефективної перекачки енергії між пучками, відкрито ефект нестационарної перекачки енергії (В.Л.Винецький, Н.В.Кухтарев, 1970—1977); побудовано кінетичну теорію лазерної генерації у спектрально-неоднорідних твердих конденсованих середовищах; досліджено провідність у невпорядкованих напівпровідниках та властивості метаоксидних надпровідних матеріалів; вивчено перенесення електронів та



електронних збуджень у конденсованих середовищах за участі віртуальних зонних станів (В.С.Машкевич, Л.П.Годенко, Є.А.Шадчин, Л.В.Щедрина, 1972—1977) [902].

В Інституті напівпровідників для кристалів з деформаційною електрон-фононною взаємодією було також розвинуто теорію фазових переходів, яка пояснила експериментальні результати для напівпровідникових сполук типу  $A_4B_6$  (А.В.Кочелап, В.Н.Писковий, В.І.Пипа, В.Н.Соколов). Вперше для довільної залежності електромагнітного поля від часу у випадку середовища, яке диспергує, було одержано вираз для густини енергії та подано оператор енергії поля. Це дозволило послідовно кантувати поле, одержати фотони у такому середовищі та обчислити ймовірності багатофотонних процесів, при яких поглинаються та народжуються фотони (С.І.Пекар, Г.В.Вихнина). Були також розраховані ймовірності оже-процесів захвату носіїв заряду у зв'язаний стан з передачею енергії, яка виділяється, іншому носію (К.Б.Толпиго, Є.І.Толпиго, М.К.Шейкман).

В інституті було розвинуто теорію взаємодії вільних носіїв заряду у напівпровіднику з інтенсивним лазерним випромінюванням (Д.І.Абакаров, В.М.Буймистров, В.П.Олейник) та записано квантове кінетичне рівняння для електронів у полі лазерного випромінювання (Ф.Т.Васько, В.І.Мельников).

Цікаві результати були одержані при розгляді оптичних явищ у напівпровідниках. Аналіз оптичних властивостей кристалів потребує розгляду систем, у яких різні пари енергетичних рівнів поглинають світло однієї частотами. Важливим прикладом таких систем, вироджених за інтервалом енергії між рівнями, є локальні та квазілокальні коливання домішок. Разом з Інститутом металофізики було описано динаміку та спектри поглинання світла домішковими коливаннями у широкому діапазоні параметрів (М.І.Дикман, М.О.Кривоглаз), що дозволило пояснити залежність особливостей спектрів від температури в експериментах, зокрема, появу та наступне розмиття тонкої структури спектральних ліній при нагріванні. Внаслідок аналізу нерівноважних систем (наприклад, нелінійного осцилятора в періодичному зовнішньому полі) за стаціонарними станами обчислено ймовірності флуктуаційних переходів між ними (М.О.Кривоглаз, М.І.Дикман).

Специфіка релаксації вироджених за частотами систем приводить також до нових нелінійних оптичних ефектів. Найяскравіший з них – самоіндукований поворот площини поляризації резонансного випромінювання, передбачений у інституті, а потім експериментально відкритий для різних типів домішок у кубічних кристалах (М.І.Дикман, Г.Г.Тарасов).

На шляху розвитку теорії оптичних явищ в одновимірних неоднорідних середовищах (оптичні резонатори та хвилепроводи) було одержано зв'язок між ймовірностями фотопереходу випромінювального центру в неоднорідному та однорідному середовищах, а також повну ортогональну систему такого середовища. Це дозволило трансформувати спектр теплового випромінювання в зону найбільшої сприйнятливості ока (В.С.Пекар).

У циклі досліджень, які стосуються кінетичних явищ у електронно-дірковій плазмі, було побудовано феноменологічну теорію перенесення в біполярних напівпровідниках та встановлено значний вплив малих просторових неоднорідностей і слабкого розігрівання на біполярний дрейф. Передбачено польовий інжекційний ефект, побудовано теорії магнітодіодного ефекту,

інжекційного шнура, термодрейфових ефектів та взаємного захоплення електронів та дірок (З.С.Грибников, А.А.Акопян, Р.Н.Литовський, В.І.Мельников, Ю.С.Мельникова). Було розроблено також нелінійну теорію електромагнітних хвиль у біполярних напівпровідниках (В.Л.Борблик), побудовано теорію пінч-ефекту у напівпровідниках (стиснення електронно-діркової плазми власним магнітним полем струму), показано можливість відриву плазми від межі кристала при сильному виродженні носіїв (І.І.Бойко). У теоретичному відділі також розвинуто теорію кінетики електронів провідності у приповерхневих шарах напівпровідників (Ю.І.Горкун).

Важливі теоретичні результати, значущі для розвитку статистичної фізики, були одержані при розгляді задач фізики металів в Інституті металофізики НАН України, перш за все у відділах дифузії, фазових перетворень та теоретичному відділі інституту [844,194]. Тут біля джерел фізики рідкого стану в Україні стояв академік НАН України В.І.Данилов, який створив велику наукову школу в цій галузі. Формування наукової школи В.І.Данилова почалося у 30-х рр. ХХ ст. у Дніпропетровському університеті та Дніпропетровському фізико-технічному інституті, а продовжилося в Києві в Інституті металофізики НАН України. Відділи кристалізації в зазначених установах стали тими центрами, які згуртували навколо В.І.Данилова талановиту молодь.

Праці вченого з досліджень процесів будови рідин, а також однієї з основних проблем фізики фазових перетворень — кристалізації рідин, склали важливий для формування уявлень про конденсований стан речовини напрям. [380,339—341]. Детально результати академіка НАН України В.І.Данилова викладені у підрозділі 4. 5.

Формування високого рівня роботи в галузі теоретичної фізики у Дніпропетровську було пов'язано з приїздом туди у 1928 р. після закінчення механічного факультету Ленінградського політехнічного інституту та аспірантури Ленінградського фізико-технічного інституту в рамках концепції організації науково-дослідних центрів, запропонованої А.Ф.Іоффе, Бориса Миколайовича Фінкельштейна — учня А.Ф.Іоффе, М.М.Семенова та Я.І.Френкеля.

Про цей етап у своєму житті Б.М.Фінкельштейн згадував: "...закінчився термін аспірантури и за рекомендацією А.Ф.Іоффе, М.М.Семенова та Я.І.Френкеля з кінця 1928 р. починається самостійна наукова, педагогічна та науково-організаційна робота у Дніпропетровську" [302,904].

Б.М.Фінкельштейн обійняв посаду професора Дніпропетровського інституту народної освіти, з 1930 р. працював у фізико-хіміко-математичному інституті, що виділився з ДІНО. У фізичній лабораторії Дніпропетровського гірничого інституту він також очолював теоретичні пошуки, які стосувались з'ясування властивостей розчинів, хімічних властивостей атомів та молекул, статистичної механіки та термодинаміки. Зокрема, ним проводились розрахунки спорідненості з воднем галоїдних розчинів і розроблялась теорія галоїдних розчинів. Подальші наукові роботи Б.М.Фінкельштейна стосувались фізики діелектриків, теорії електролітів, фізичного металознавства, методів досліджень у твердих тілах. Він — піонер досліджень з проблем внутрішнього тертя та ядерного парамагнітного резонансу в металах і сплавах.

Організаторська діяльність Б.М.Фількенштейна (разом з А.Е.Малиновським) втілилася у створення кафедри теоретичної фізики в Дніпропетровській університеті, а також Дніпропетровської філії Всеукраїнського фізико-технічного інституту (з 1932 р. — Дніпропетровського фізико-технічного інституту), директором якого він був у 1931—1937 рр, одночасно керував теоретичною групою. Навколо Б.М.Фількенштейна згуртувалось ядро теоретиків, до складу якого увійшли М.Юхвець, О.С.Компанієць, О.З.Голик, М.В.Беліков, М.М.Чурсін, А.С.Джидарян, Я.Д.Солок. В університеті він читав лекції з теоретичної фізики, класичної електродинаміки та статистики. Його манера викладання була особливою. “На лекції він завжди приносив портрет того фізика, чиї ідеї збирався викладати... Окрім затверджених програмою курсів, на своїх лекціях він розповідав про останні відомості в галузі фізики, тому що був ерудованою людиною, був добре обізнаний з новинками літератури. В нього була блискуча пам'ять. Він кожному міг сказати, в якій літературі добре висвітлено питання, яким займається той чи інший студент... Особливого викладацького дару в нього не було, проте він багато нам дав”, — згадувала доктор фізико-математичних наук, професор Д.С.Каменецька [302, с. 54]

Наукова робота співробітників теоретичного відділу була пов'язані з тими дослідженнями, які проводилися в ДФТІ та Дніпропетровському університеті. Так, група Б.М.Фількенштейна запропонувала, наприклад, зручні методи розрахунку нестационарних температурних полів у тілах, що пройшли загартування, термообробку. Це дозволило оцінити величину й розподіл залишкових термонапружень, які виникають у виробках, занурених у охолоджувальне середовище. Зокрема, учень Л.Д.Ландау О.С.Компанієць, який працював у Дніпропетровську близько двох років, розробив тут метод обчислення залишкових напружень у загартованому зразку на основі теорії пластичності.

Одним з учнів Б.М.Фількенштейна, випускником Дніпропетровського університету, був академік АН СРСР І.М.Халатников, який за рекомендацією свого вчителя у 1940 р. склав теоремінімум Ландау. В подальшому І.М.Халатников тривалий час керував Інститутом теоретичної фізики ім. Л.Д.Ландау АН СРСР у Москві. На жаль, талановиті учні Б.М.Фількенштейна М.М.Чурсін та М.Юхвієць загинули під час війни. Коли весною 1937 р. почалася хвиля арештів серед співробітників вузів та інститутів Дніпропетровська, було репресовано учня Б.М.Фількенштейна А.С.Джидаряна, який помер у засланні поблизу Магадана у 1939 р. [302]. Б.М.Фількенштейн як директор ДФТІ також знаходився під загрозою арешту після виходу однієї з типових для того часу статей під назвою “Професор Фінкельштейн замітає сліди”. У ній писалося: “У Фінкельштейна сім років лежить у кармані партійний квиток, але за ці роки професор на набув жодного грама партійності. Він діє не як більшовик, а як безхребетний обиватель, якщо не прямий захисник ворога” [905]. Дійсно, Б.М.Фінкельштейн захищав начальника спецлабораторії інституту і професора університету В.Д.Нескучаєва, а також репресованого у 1937 р. співробітника ДФТІ Давидовича, що приїхав з Харкова і замінив В.Д.Нескучаєва.

Високий науковий рівень робіт інституту починали визнавати і за кордоном. Так, Б.М.Фількенштейн відвідав Англію, інститут теоретичної фізики ім. А.

Пуанкаре у Сорбонні, їздив у Париж до П.Ланжевена. Про визнання Дніпропетровська як нового фізичного центру свідчить також те, що Б.М. Фількенштейн як директора ДФТІ було введений Президією АН СРСР до складу групи фізики Відділення математики і природничих наук, у тому ж році він брав участь у березневій сесії АН СРСР, на якій йшлося про стан і перспективи розвитку радянської фізики. А.І.Іоффе з цього приводу писав у 1936 р.: "Виріс ФТІ у Дніпропетровську. Все це не філіали, а спеціалізовані фізичні інститути, пов'язані з місцевою промисловістю, які в галузі своєї спеціалізації є всесоюзними центрами. Такою є галузь низьких температур у Харкові... фазові перетворення у Дніпропетровську" [906].

У післявоєнні роки діяльність Б.М.Фількенштейна була пов'язана з Москвою: з 1944 р. він – начальник відділу теоретичної фізики Інституту металознавства та фізики металів (у складі ДНДІ Чормет), пізніше – професор та завідувач кафедри Московського інституту сталі і сплавів, організатор фізико-хімічного факультету цього інституту.

Слід зазначити, що наприкінці 1944 р. група вчених ДФТІ була переведена до Києва, де було організовано відділ металофізики Інституту чорної металургії АН УРСР, керований академіком НАН України Г.В.Курдюмова. У 1945 р. на базі цього відділу було створено лабораторію металофізики АН УРСР, яка з 1 березня 1955 р. перетворилася на інститут металофізики НАН України (директор — Г.В.Курдюмов). (Детально результати, що стосуються статистичного підходу при розгляді задач фізики металів, викладено у пункті 5.2.6.)

Одним з головних напрямів праць відділу фазових перетворень, керованого Г. В. Курдюмовим, були дослідження механізму й кінетики фазових перетворень при гартуванні і відпуску сплавів, насамперед фазового переходу мартенситу в аутенсит, який виявився зворотним (Г.В.Курдюмов, В.Н.Гріднев, Е.З.Камінський, Т.І. Стеллецька, І.В.Ісайчев) [880,907].

Член-кореспондент НАН України А.Г.Лесник – один з учнів В.І.Данилова – також працював в Інституті металофізики НАН України, де керував відділом фізики плівок. Його наукові праці присвячені побудові статистичної теорії сплавів та фізиці магнітних явищ [851].

Ще один важливий науковий напрям розроблявся у організованому в 1946 р. відділі дифузії Лабораторії металофізики керованому професором С.Д.Герцрікена, який, починаючи з 1930 р., займався рентгенівськими променями, дифузією металів, виникненням та рухливістю дефектів у керованих ним відділах рентгенівських променів Інституту фізики (пізніше він називався відділом дифузії, потім — металофізики). Започаткована С.Д.Герцрікеном тематика розробляється його учнями і послідовниками (Л.Н.Лариков, В.М. Фальченко) у таких напрямках, як класичні дослідження ґратничевої (об'ємної) дифузії; дослідження параметрів дифузії на стаціонарних межах зерен; дослідження параметрів дифузії на рухомих межах зерен; вивчення параметрів поверхневої дифузії; дослідження аномального масоперенесення за нестационарних умов; дослідження параметрів дифузії у металевих сплавах з нетрадиційними (квазі-, нанокристичною тощо) структурами.

Слід зазначити праці відділу металознавства, очолюваного академіком НАН України В.М.Свечниковим, у яких вивчались фазові рівноваги дво- і

трикомпонентних металевих систем з метою відшукування композицій, придатних для високотемпературної експлуатації.

Надзвичайно важливими для розвитку методів статистичної фізики стали роботи теоретичного відділу Інституту металофізики, яким від дня заснування до 1987 р. керував академік НАН України А.А.Смирнов. А.А.Смирнов народився 16 жовтня 1908 р. у Новгороді (Росія). Після закінчення Ленінградського університету в 1932—1939 рр. працював в Уральському фізико-технічному інституті в Свердловську, в 1939—1949 — Уральському філіалі АН СРСР та вузах Свердловська (з 1944 – професор, у 1945—1947 – декан фізико-математичного факультету Уральського університету), у 1949—1950 – в Інституті фізики, з 1950 р. – очолював теоретичний відділ в Лабораторії металофізики. Водночас у 1950—1957 р. був професором та завідувачем кафедри теоретичної фізики Київського політехнічного інституту, з 1957 до 1962 — професором Київського університету. Після захисту докторської дисертації “Теорія руху електронів у кристалічній решітці сплавів, що впорядковуються” (1946), обирається членом-кореспондентом (1951) та академіком (1967) НАН України, у 1963—1966 рр. працював академіком-секретарем Відділення НАН України, у 1970—1974 – віце-президент АН УРСР [342,344,381,382,908].

Великий цикл наукових праць А.А.Смирнова стосується теорії твердого тіла та фазових переходів у недосконалих металічних кристалах. Він розвинув теорії руху електрона в кристалічній ґратці та електронного енергетичного спектру сплавів, що впорядковуються (1947), квантову теорію електроопору металів і сплавів, статистичну теорію впорядкування і дифузії у металах і сплавах, зокрема в сплавах впровадження. Велику увагу А.А.Смирнов та М.О.Кривоглаз приділили розвитку молекулярно-кінетичної та термодинамічної теорії металів та сплавів, вони побудували теорію діркоутворення і дифузії атомів у сплавах, що впорядковуються. [864]. Учнями А.А.Смирнова була розвинута строга статистична теорія високоенергетичних квазічастинок в багатокомпонентних неупорядкованих системах, упорядкованих сплавах та кристалах з дефектами різного типу. На цій основі передбачено нове фізичне явище екстинкції внаслідок розсіяння на викривленнях (В.Б.Молодкін, М.Є.Осиновський, С.І.Олиховський). Провадився також розвиток теорії фазових перетворень (побудовано теорію, в якій враховано взаємний вплив двох кооперативних явищ: спінового впорядкування в антиферромагнітних тілах та атомного впорядкування) (А.А.Смирнов, В.В.Гейченко), побудовано теорію електроопору сплавів, які мають різні дефекти кристалічної будови (А.А.Смирнов, М.О.Кривоглаз, З.А.Матисіна та А.І.Носарь), розроблено метод дослідження форми поверхні Фермі в металах та сплавах (М.О.Кривоглаз та А.А.Смирнов). Більш детально про роботи А.А.Смирнова йдеться у пункті 5.2.6.

Нині метою роботи Інституту металофізики є пошук та виявлення принципово нових можливостей та шляхів створення унікальних металевих матеріалів з поліпшеним комплексом фізичних властивостей, які можна використовувати в складних спеціальних умовах, а також розробка на основі цих матеріалів принципово нових засобів сучасної техніки та докорінна перебудова існуючих технологічних процесів та підвищення рівня технологічної культури виробництва. Теоретичні основи фізики металу як конденсованого середовища розробляються в Інституті металофізики у відділі теорії твердого тіла (завідувач член-кореспондент

НАН України В.Б.Молодкін), де розвивають теорії систем, що конденсують, передусім твердих тіл з дефектами будови (недосконалих металевих кристалів), кінематичну і динамічну теорії розсіяння, теорії фотонів у кристалах з дефектами, теорії фазових перетворень, структурних змін і дифузії у сплавах впровадження, заміщення і віднімання, а також теоретичні і експериментальні основи нових методів діагностики на пучках синхротронного випромінювання.

Праці відділу теорії неідеальних кристалів (доктор фізико-математичних наук, професор М.А.Іванов), присвячені розвитку теорії кристалів з дефектами, сплавів, впорядкованих систем, інтерметаллідів, аморфних речовин, теорії спектрів елементарних збуджень у реальних кристалах, теоретичних основ методів досліджень недосконалості кристалів і властивостей систем із структурним і динамічним хаосом. У відділі дифузійних процесів (доктор фізико-математичних наук, професор О.А.Шматко) тематика стосується дослідження дифузії і обумовлених нею фізичних процесів у металах і сплавах, що визначають працездатність металевих матеріалів при високих температурах і інших інтенсивних зовнішніх діях. У відділі фазових перетворень (Ю.Н.Коваль), основна увага приділяється вивченню кінематики і механізмів фазових перетворень. Протягом тривалого часу проводяться дослідження оборотної пластичної деформації в сплавах з термоупружним мартенсітом; у відділі індуктивних мартенситних перетворень (В. Е. Данильченко). Тут основний науковий напрям — дослідження умов і механізму утворення та розпаду мартенситних фаз у сплавах на основі заліза. У відділі будови і властивостей твердих розчинів (А.І.Устинов) досліджуються зміни атомно-кристалічної структури при фазових перетвореннях різного типу (старіння, мартенситне перетворення, впорядкування) і вплив їх на фізичні і механічні властивості металевих твердих розчинів, у відділі кристалізації (В.В.Маслов) вивчається атомна структура рідин і фізична природа процесів їх переходу в твердий стан. У відділі фазових рівноваг (доктор технічних наук В.Г.Іванченко), досліджуються фазові рівноваги, структура і властивості багатокомпонентних сплавів на основі титану з метою розробки нових жароміцних і конструкційних матеріалів.

Важливі теоретичні роботи, що становлять наукову базу створення нових матеріалів та розробки технологій їх виробництва, проводяться в Інституті матеріалознавства НАН України, організованому у 1955 р. [196]. Тут, зокрема, досліджуються структурно-фазові перетворення та фазові рівноваги в металевих та неметалевих системах, вивчається термодинаміка розплавів та фізика поверхневих явищ (В.Н.Еременко, Ю.В.Найдич). Протягом багатьох років тут досліджуються гетерогенні рівноваги у багатокомпонентних системах, утворених тугоплавкими, металевими та неметалевими компонентами. На основі результатів цих досліджень побудовано численні діаграми стану подвійних систем, представлених тугоплавкими металами, киснемісткими та безкисневими сполуками, а також визначено термодинамічні параметри змішаних фаз з тими ж складовими у твердому стані та у розплавах (ентальпія, енергія Гіббса, ентропія, хімічні активності) у широкому інтервалі температур.

З моменту організації в 1928 р. у Харківському фізико-технічному інституті Іваном Васильовичем Обреїмовим лабораторії кристалів, та криогенної лабораторії

Львом Васильовичем Шубніковим і донині значне місце в тематиці Інституту займають дослідження твердого тіла та конденсованого стану речовини, які стосуються фізики низьких температур, електронних властивостей металів, фізики міцності і пластичності. Особливістю робіт цього інституту є поєднання фундаментального підходу з практичною направленістю досліджень, чому сприяє постійна взаємодія експериментаторів та теоретиків. Як зазначав тогочасний директор УФТІ академік Олександр Ілліч Лейпунський, у 1932—1933 рр. одними з основних напрямів, які сформувались у інституті, стали низькі температури, тобто вивчення надпровідності, аномалій теплоємності, магнітних властивостей, питань розділення газів при низьких температурах; фізика кристалів, зокрема питання пластичної деформації, дифузії в сплавах; теоретична фізика [909]. За роки роботи Інституту в галузі низьких температур виконано ряд теоретичних та експериментальних робіт, які значною мірою покладені в основу створення сучасних уявлень про надпровідність, електронні властивості металів, магнетизм, властивості кристалічної ґратки, рідкого гелію, водню та їх ізотопів, низькотемпературної адсорбції.

Одним з напрямів фізичної науки, де знайшли застосування положення та принципи статистичної фізики, стало вивчення основ міцності та пластичності металів і сплавів, які перебувають у різному стані та зазнають механічної, термічної та фізико-хімічної обробки. Основною метою цих досліджень було встановлення закономірностей, що дають змогу створити сплави з наперед заданими властивостями, важливі для багатьох галузей техніки — виробництва реактивних двигунів, газових турбін, ядерних реакторів.

Так, лабораторія кристалів інституту займалась вивченням пластичної деформації. Було доведено, що зсуви в досліджуваних кристалах відсутні, а існує явище двійчастості. В лабораторії В.С.Горським та І.В.Обреїмовим виконувались також роботи з вивчення дифузії у сплавах, які велись паралельно з дослідженнями Бреґга в Манчестері. Інша група робіт цієї лабораторії пов'язана з іменами. Це — роботи Важливою стала робота В.С.Горського про пружну взаємодію, яка впливала з розробленою ним теорії дифузії.

Відомо, що більшість матеріалів, металів і сплавів пластично деформуються при незначних напруженнях і що їх практична міцність становить незначну частку міцності, яка відповідає силам міжмолекулярного зчеплення. Саме це розходження між теоретичною та практичною міцностями твердого тіла вказувало на можливість підвищення реальної міцності матеріалів. Тому побудова теорії пластичної деформації кристалів та дослідження процесів, що спричиняють руйнування кристалів, виявились актуальною задачею в галузі фізики твердого тіла.

Так, у 1928 р. І.В.Обреїмов показав, що умови руйнування кристалів треба характеризувати не напруженнями, які спричиняють руйнування, а роботою, що витрачається на відділення однієї частини кристалу від іншої. Розвиток цих досліджень в Українському фізико-технічному інституті у Харкові, де працював І.В.Обреїмов з 1929 до 1938 рр. (у 1929—1932 рр. — директор), допоміг з'ясувати особливості основних механізмів пластичної деформації — процесів двійчастості та утворення смуг ковзання. Вивчення пружної двійчастості вказало на роль концентрації напружень в процесі пластичної деформації і в руйнуванні кристалу,

оскільки двійчасті прошарки виникають у перенапружених мікрообластях при незначних прикладених напруженнях, а потім поступово відбувається колективний процес їх поширення на весь кристал. Дослідженням смуг ковзання було встановлено, що в процесі деформації вони також поступово “проростають” через всі перерізи кристала. Проте смуги ковзання мають складну будову, всередині них утворюються тріщини і розриви.

Для розгляду процесу пластичної деформації істотним є дослідження енергії залишкових спотворень у ґратці (тобто роботи, витраченої на створення деформованих областей), яка набагато перевищує енергію залишкових пружних напружень. Слід зазначити, що в цих дослідженнях відіграло вирішальну роль застосування низьких температур, коли процеси відновлення кристалічної ґратки практично відсутні. Розглянуті роботи І.В.Обреїмова заклали основу нового теоретичного напрямку в галузі фізики твердого тіла та статистичної фізики — теорію кінетики дислокацій.

З нових напрямів у галузі молекулярної фізики на особливу увагу заслуговують рентгенівські текстури речовин, що характеризують зміну кристалічної будови під час деформацій і холодної обробки. Основне уявлення про рентгенограми як про результат відбиття рентгенових променів від атомних площин у кристалічних ґратках висунув незалежно від Бреґга російський фізик-кристалограф Ю.В.Вульф.

В цей період почали розвиватись ідеї, висунуті Я.І.Френкелем, серед яких особливо плідною виявилася ідея про переміщення вільних місць у заповненому середовищі. Ця ж ідея з успіхом була поширена Я.І.Френкелем на переміщення всередині кристала збуджених станів атомних електронів (екситонів) [910, с.24–37].

Виходячи з уявлень, розвинутих Я.І.Френкелем щодо дифузії і теорії в’язкої течії твердих тіл, Б.Я.Пінесом докладно вивчалось явище повзучості. Було встановлено, що в умовах повзучості уповільнюються процеси спікання та гетеродифузії завдяки тому, що швидше виділяються надлишкові вакансії, які беруть участь у здійсненні процесу дифузії. Процеси, які викликають збільшення концентрації вакансій, неминуче призводять до прискорення дифузійної повзучості (в’язкої течії). Було досліджено вплив холодного наклепу на швидкість повзучості та на довговічність під навантаженням при підвищених температурах відлитих і металокерамічних зразків Cu, Ni, Fe, Al. Закономірності дифузійної повзучості виявились подібними до закономірностей, зумовлених рухом або переповзанням дислокацій, було з’ясовано причину збільшення концентрації вакансій поблизу пор [911—916]. Так, у своїй доповіді на сесії Відділення фізико-математичних і хімічних наук АН УРСР з питань фізики 2–5 лютого 1948 р. професор Б.Я.Пінес виклав теорію утворення компонентів, що входять у сплав при затвердінні у евтектиках з шаруватою структурою, які складаються з пластинчастих утворень.

Принциповими для початку систематичних досліджень у галузі статистичної фізики виявились фундаментальні роботи керівника теоретичної відділу УФТІ Д.Д.Ландау, зокрема, створена ним у 1937 р. теорія шаруватого проміжного стану надпровідників у магнітному полі, яка була експериментально підтверджена у тому ж році у Харкові. Найбільш важливе дослідження в цій галузі — це теорія фазових переходів II роду, яку запропонував Л.Д.Ландау. За допомогою цієї теорії з'



ясовано природу фазових переходів II роду, показано, що у випадку таких переходів симетрія тіла змінюється стрибком, встановлено критерії існування фазових переходів II роду. Теорія Ландау дозволила з єдиної точки зору розглянути різноманітні явища. Ідеї цієї теорії покладено в основу термодинамічної теорії феромагнетиків, сегнетоелектриків, феноменологічної теорії надпровідності.

Л.Д.Ландау у Харкові також написав перші дві книги свого курсу теоретичної фізики — „Механіку” і першу частину „Статистичної фізики” („Класична статистика”, 1938 р.). Детально про роботи Л.Д.Ландау в УФТІ йдеться у підрозділі 4.2.

З ім'ям учня Л.Д.Ландау, керівника одного з теоретичних відділів Харківського фізико-технічного інституту академіка НАН України І.М.Ліфшиця пов'язаний розвиток сучасної квантової теорії твердого тіла, квантової механіки та статистики (зокрема, дослідження статистичної механіки систем у стані часткової рівноваги, термодинаміки нерівноважних систем), динаміки ґратки, електронної теорії металів, проблеми енергетичного спектра неупорядкованих систем, теорії квантових кристалів та фазових переходів. Його підхід до проблеми упорядкування заснований на статистичному розгляді твердих розчинів. У цій галузі ряд результатів, одержаних І.М.Ліфшицем, пов'язаний з введенням поняття кореляційних функцій для розчину, за допомогою чого побудована статистична термодинаміка рівноважних і нерівноважних станів таких систем. Особливим випадком розчинів є розчин ізотопів, спектр нульових коливань якого було досліджено І.М.Ліфшицем. Виявилось, що при досить низьких температурах настає розшарування таких розчинів. Цей своєрідний ефект є чисто квантовим і тому відсутній в класичній теорії. Слід згадати також дослідження І.М.Ліфшиця з визначення теплових властивостей шаруватих структур. Наявність хвиль, аналогічних хвилям згину в тонких плівках, дає новий закон дисперсії в таких структурах та нову температурну залежність теплоємності їх, що не збігається з дебаївською.

Звичайна постановка задачі статистичної фізики полягає в обчисленні термодинамічних величин, виходячи з відомого енергетичного спектра системи. У Фізико-технічному інституті АН УРСР з'ясована принципова можливість розв'язання оберненої задачі: відновлення енергетичного спектра бозе-системи (зокрема, фононного спектра) за експериментальними значеннями теплоємності. Методи, розвинуті в цих роботах, мають суттєве значення для аналізу інших обернених задач, зокрема, при визначенні потенціалу за даними про розсіяння частинок.

У дослідженнях з динамічної теорії кристалічної ґратки було розроблено метод розв'язання задач механіки кристалічної ґратки і побудовано теорія локальних збуджень, що має суттєве значення для багатьох задач теорії кристалів. За допомогою цих методів була досліджена теорія розсіяння і поглинання інфрачервоних променів у неідеальних кристалах і твердих розчинах, розглянуто питання про розсіяння коротких дебаєвських і електронних хвиль на неоднорідностях ґратки, з'ясовано вплив домішок на спектр коливань і на термодинамічні потенціали кристала. Розроблені методи, крім того, дозволили вивчити особливі поверхневі оптичні хвилі в кристалах. Ці питання розглядались у

працях, присвячених створенню мікроскопічної та макроскопічної теорій явища двійчастості.

У дослідженнях І.М.Ліфшиця з динамічної теорії реальних кристалів, виконаних у 40-ві роки, було вперше показано, що дефекти можуть призводити до перебудови спектра та зміни коливальних станів, у 1945—1952 рр. ним було створено послідовну теорію локальних збурень реального кристала, побудовано теорію флуктуаційних рівнів [614]. У 1969 р. І.М.Ліфшиць та С.А.Гредескул, використавши флуктуаційний підхід, незалежно від М.О.Кривоглаза (1973 р.) прийшли до уявлення про флуктуони (автолокалізовані на флуктуаціях стани електронів) та розробили їх теорію.

Значущими роботами І.М.Ліфшиця та його наукової школи є праці з електронної теорії металів. У них розроблено новий підхід, який дає можливість уникнути труднощів, що виникають під час вибору моделей для визначення електронного спектра металу. Цей підхід заснований на загальних уявленнях про можливі типи енергетичного спектра квантових систем, понятті про квазічастинки, що реалізують цей спектр, на гіпотезі про те, що спектр носіїв струму є ферміївський, причому залежність енергії окремої квазічастинки від її квазіімпульсу — довільна функція, сумісна з симетрією кристала. Як виявилось, більшу частина кінетичних і статистично-термодинамічних характеристик металу (включаючи і його магнітні властивості) можна виразити через параметри, що характеризують квазічастинки, не торкаючись генезису останніх. Більш детально результати І.М. Ліфшиця викладено у пунктах 5.1.1. та 5.2.2.

Один з маловідомих учнів Л.Д.Ландау харківського періоду це професор Веніамін Леонтійович Герман, який з 1936 р. працював в Харківському університеті (пізніше – керівник кафедри теоретичної механіки) та Харківському фізико-технічному інституті (1945 р. – доктор фіз.-мат. наук, з 1946 – професор), з 1962 до 1964 рр. керував відділом теоретичної фізики Інституту радіофізики та електроніки [380]. Його роботи стосувались фізики твердого тіла, теорії суцільних середовищ, квантової механіки, нелінійної фізики, кавітації, статистичної радіофізики (див. пункт 4.2.).

У Фізико-технічному інституті проводились також фундаментальні роботи в галузі статистичної фізики академіками НАН України О.І.Ахієзером, С.В. Пелетмінським, В.Г.Бар'яхтаром, у Інституті теоретичної фізики – академіками НАН України О.Г.Ситенком, Д.Я.Петриною, в Інституті фізики конденсованих систем НАН України – академіком НАН України І.Р.Юхновським. Результатам цих вчених та діяльності керованих нами наукових шкіл присвячено окремі розділи даної роботи.

Своїми дослідженнями в галузі статистичної фізики відомий відділ статистичних методів у математичній фізиці створеного у 1970 р. Фізико-технічного інституту низьких температур НАН України, який проводить широкий спектр фундаментальних досліджень у галузі фізики низьких температур — надпровідності, магнітооптики антиферромагнетиків, фізики низькорозмірних та невпорядкованих систем, нелінійних явищ у металах. Тут побудовано теорію випадкових матриць, спінового скла та нейронних сіток, моделі взаємодіючих впорядкованих та невпорядкованих систем з фазовими переходами у них, теорію квантових

магнетиків — спінових ланцюжків з магнітними та немагнітними домішками або без них, теорію корельованих електронних систем з фіксованим хаосом, теорію мезоскопічних електронних систем та систем нанорозміру (доктор фізико-математичних наук М.В.Щербіна).

Широкий спектр досліджень зі статистичної радіофізики було проведено у 40–60 рр. ХХ ст. у Харкові, спочатку в Харківському фізико-технічному інституті, а з 1955 р. – в Інституті радіофізики та електроніки. Так, В.Л.Германом, О.Я. Усиковим та І.Х.Ваксером вперше були проведені теоретичні та експериментальні дослідження молекулярного поглинання радіохвиль міліметрового діапазону та їх розсіяння гідрометеоутвореннями (опади, туман). Ці роботи були спрямовані на визначення питомої радіолокаційної відбивної здатності опадів та її спектрального складу, а також на вивчення статистичних характеристик послаблення у гідрометеоутвореннях. Крім цього, були детально вивчені характеристики послаблення радіохвиль міліметрового діапазону у газах атмосфери у лініях поглинання та вікнах прозорості. При цьому знайдено аномальні флуктуації в околі лінії поглинання на хвилі 5 мм. Дані цих багаторічних досліджень дали змогу виробити рекомендації для розробки та експлуатації різних радіоелектронних систем [919].

На базі великого циклу експериментальних та теоретичних робіт Ф.Г.Басс, С. Я.Брауде, В. Л. Герман, Е. А. Канер, І.Є.Островський та інші розв’язали задачу про поширення хвиль у випадково неоднорідному середовищі при наявності поверхні розділу. Ця модель найбільш точно описувала поширення радіохвиль та світла в реальній тропосфері при відбитті від поверхні землі з урахуванням випадкових неоднорідностей коефіцієнта заломлення повітря та дозволила всебічно дослідити флуктуаційні характеристики радіосигналів [920—926].

Першим, хто звернув увагу на аналогію між рівняннями в теорії дифракції поліхроматичних хвиль, що описують частотну дисперсію, та відомим рівнянням дифузії, був П.В.Бліох, який вказав на можливість стиснення імпульсу в середовищі, яке диспергує [927]. Його праці з дослідження поширення наддовгих радіохвиль у хвилепровідному каналі Земля-іоносфера були спрямовані на вивчення характеру та особливостей флуктуацій амплітуди та фази сигналу в пункті прийому, які обумовлені періодичною зміною параметрів природного хвилепроводу. Так, П.В. Бліохом із співробітниками було передбачено виникнення аномально високих флуктуацій амплітуди та фази при прийомі наддовгохвильових сигналів в областях інтерференційних максимумів середнього поля. Питання багаторічної розробки статистичної моделі хвилепровідного каналу Земля-іоносфера та методики розрахунку статистичних характеристик сигналу було узагальнено в монографії [928]. Особливий інтерес П.В.Бліоха у статистичній теорії дифракції хвиль з сильними фазовими флуктуаціями викликали питання конкуренції механізмів, якими обмежуються «нескінченні» геометрооптичні коефіцієнти посилення при фокусуванні. Так, ним були поставлені та розв’язані задачі про фокусування хвиль у природних “лінзових” утвореннях [929]. За матеріалами досліджень фокусування електромагнітних хвиль гравітаційним полем масивних об’єктів в подальшому було надруковано монографію [930].

Строгий підхід до обчислення статистичних характеристик флуктуацій фазових фронтів поля хвилі, відбитої складною ціллю, яка є сукупністю великої кількості незалежних точкових відбивачів, було запропоновано та розроблено Є.В. Чаєвським. Цей метод дозволив поглибити розуміння фізичної природи помилок пеленгування та запропонувати ряд методів їх зменшення. Вперше це питання було висвітлено у праці [931], а результати подальшої розробки цього напрямку – у [932].

Методи розв'язування задач дифракції електромагнітних хвиль на статистично нерівній та неоднорідній поверхні узагальнені в роботах Ф.Г.Басса та І.М.Фукса. За допомогою комбінації методів збурень та методів фізичної оптики було побудовано модель розсіяння хвиль на поверхнях з широким спектром випадкових неоднорідностей, яка виявилась найбільш адекватній поверхням, які існують в реальних умовах. Внаслідок цього були одержані середні та флуктуаційні характеристики поля, розсіяного подібними поверхнями – коефіцієнти відбиття, індикатриси розсіяння, флуктуації амплітуди і фази, кореляційні функції [933].

У 60—70-х рр. ХХ ст. В.Б.Разказовський та Г.П.Кулемін вперше одержали спектральні характеристики радіолокаційних сигналів у міліметровому та сантиметровому діапазонах, відбитих від земної поверхні в різні сезони та при різних метеоумовах, а також залежно від типу та стану рослинного покриву. Спільно з Л.М.Лобковою (Севастопольський приладобудівний інститут, нині – Севастопольський національний технічний університет) у міліметровому діапазоні хвиль вперше одержані спектральні характеристики радіолокаційних відбиттів від морських цілей з урахуванням особливостей перевипромінювання поверхнею моря з вітровим хвилюванням, а також вивчено вплив багатопроменевого поширення міліметрових хвиль на точність вимірювання координат цілей [934—938].

Роботи в цьому напрямі проводилися також у 50-60-ті рр. ХХ ст. у Харкові в Артилерійській радіотехнічній академії (з 1968 р. – Військова інженерна радіотехнічна академія ПВО ім. Л.А. Говорова, нині – університет повітряних сіл України). Так, Я.С.Шифриним було розроблено статистичний підхід до аналізу антен з випадковими джерелами, тобто такими джерелами, коли випадковими величинами можуть бути амплітуда, фаза чи просторове положення. Цей метод суттєво розширює можливості аналізу антенних систем при збільшенні їх габаритів та числа елементів, тобто в тих випадках, коли зростає роль різних факторів, які породжують розкид параметрів антени (антени систем дальнього космічного зв'язку, радіоастрономії, багатоелементні антенні решітки з розгалуженою системою живлення, антени з синтезованою апертурою), а також при аналізі роботи антени у випадковому полі, наприклад, в лініях тропосферного поширення [939,940].

Я.Д.Ширманом розроблено статистичну теорію детектування радіолокаційних сигналів та вимірювання їх параметрів при наявності гауссових перешкод, а також запропоновано принципи побудови приладів для оптимальної обробки заданих сигналів [941,942].

С.Є.Фальковичем було узагальнено методи визначення граничних можливостей радіолокаційних систем з різними видами сигналів та проведено аналіз основних факторів, які визначають енергію порогових сигналів та максимальну точність підрахунку цілі при прийомі стаціонарних гауссових перешкод [943]. Подальший розвиток цього напрямку дозволив побудувати статистичну теорію

вимірювальних систем, які містять у собі системи радіолокації, радіонавігації, радіоастрономії, траєкторних вимірювань, та провести дослідження параметрів навколишнього середовища, які забезпечують статистичну атестацію якості функціонування в реальних умовах роботи [944,945].

Відомий колектив дослідників у галузі фізики хмар та аерозолів сформувався під керівництвом завідувача лабораторії теоретичних досліджень Українського гідрометеорологічного інституту, доктора фізико-математичних наук, професора Михайла Васильовича Буйкова (1926–2002). М.В.Буйков уперше в гідрометеорології в 1961-1963 рр. розробив математичний апарат для опису еволюції в просторі і часі полідисперсної системи будь-якого аерозолу, у тому числі хмар і туманів. Це було досягнуто включенням у систему рівнянь динаміки і термодинаміки хмарної системи кінетичних рівнянь для функцій розподілу хмарних частинок за розмірами. Побудовані на цій основі мікрофізичні моделі дозволили одержати більш точну інформацію щодо мікрофізичних, оптичних, радіолокаційних характеристик хмар і опадів, розвинути як аналітичні методи (М.В. Буйков, Ю.П. Шулєпов, М.І. Дехтяр та інші), так і чисельні методи дослідження (М.В.Буйков, Г.М.Пірнач, В.П.Баханов, В.Й.Хворостянов, Л.В.Паламарчук, С.В. Краковська, Б.А.Дорман, О.А.Манжара, В.Т.Колежук, В.М.Шпиг та інші) [946,947]. Ці дослідження стали теоретичною основою для експериментальних робіт УкрНДГМІ з активних впливів.

Був проведений цикл досліджень з термодинаміки і кінетики спонтанної (гомогенної) конденсації пересиченої пари: у пограничному шарі біля холодної поверхні гранули твердої вуглекислоти як реагенту для активних впливів; у надзвукових соплах парових турбін і гетерогенних ракетних двигунів; у газотурбінних агрегатах, що експлуатуються на магістральних газопроводах (В.П. Баханов, М.В.Буйков, О.А. Манжара; 1963–1972 рр.) Математичний апарат і результати циклу досліджень з термодинаміки та кінетики спонтанної конденсації в різних технічних системах були використані для оцінок ефективності холодореагентів для активних впливів, при розробці ракетних двигунів космічної програми СРСР (впроваджено в КБ «Енергомаш»), для оптимізації пристроїв, що запобігають обмерзанню газопроводів (впроваджено в Київському Політехнічному Інституті).

Розглянутий спектр досліджень показує, наскільки широким є коло застосувань статистичної фізики, яке, в свою чергу, здійснює потужний вплив на формування основних уявлень, ідей та методів даної галузі фізичної науки.

## 6.2. Статистична фізика в університетах України (Харківський, Київський, Львівський, Одеський та Донецький університети)

В університетах України, зокрема, в Київському, Харківському, Львівському, Одеському, Донецькому та Сумському університетах, проводились численні дослідження властивостей конденсованого стану речовини, принципово значущих для становлення і розвитку статистичної фізики в Україні.

Харківський національний університет, заснований у листопаді 1804 року за ініціативи просвітителя В.Н.Каразіна згідно з грамотою Олександра I, є одним із найстаріших університетів Східної Європи. Його відкриття відбулося 29 січня 1805 року та дало потужний імпульс перетворенню Харкова на великий науковий і культурний центр. Фізичний та фізико-технічний факультети відомі своїми дослідженнями в галузі фізики конденсованих середовищ. Фізичний факультет є одним з найстаріших підрозділів Харківського університету. Тут працювали такі видатні вчені, як лауреат Нобелівської премії Л.Д.Ландау, академіки НАН України І.М.Ліфшиць, М.О.Барабашов, Б.І.Веркін, В.Г.Хоткевич, Е.А.Канер, А.М.Косевич, професори Є.С.Боровик, Б.Я.Пінес, І.М.Шклярєвський, Я.О.Гегузин. Студентам викладають такі дисципліни спеціалізованого циклу підготовки, як фізика конденсованого стану, теорія твердого тіла, фізика магнітних явищ, надпровідність та квантові рідини.

Фізико-технічний факультет було організовано у 1962 році на базі ядерного відділення фізико-математичного факультету для підготовки спеціалістів у галузі ядерної фізики. Випускники факультету брали активну участь у розробці водневої бомби, атомних електростанцій, пристроїв для термоядерного синтезу. Тут працювали чи працюють академіки НАН України С.В.Пелетмінський та В.Г.Бар'яхтар, члени-кореспонденти НАН України К.М.Степанов, В.В.Сльозов, В.Т.Толок, І.І.Залюбовський. Читаються курси квантової теорії твердого тіла, фізики плазми. Питаннями фізики конденсованих середовищ займаються перш за все на кафедрі теоретичної ядерної фізики під керівництвом академіка С.В.Пелетмінського. Дослідження вченого присвячені узагальненню рівняння Больцмана та обґрунтуванню сфери його застосувань. Значний прогрес був досягнутий С.В.Пелетмінським у вирішенні проблеми нерівноважної ентропії, де він узагальнив формулу Больцмана ентропії ідеального газу для газу частинок, що взаємодіють. Проведене ним вивчення термодинамічних властивостей релятивістського газу електронів, позитронів та фотонів дало змогу розглянути кінетику чорного випромінювання. У подальшому в 60—70-ті рр. ХХ ст. С.В.Пелетмінський виконав фундаментальний цикл робіт в галузі розбудови методології статистичної фізики, запропонував метод опису кінетичних процесів, де завдяки певній структурі гамільтоніану стан в області великих часів описується набором параметрів, який визначається ергодичними співвідношеннями. Про праці С.В. Пелетмінського йдеться також у пунктах 5.1.4., 5.2.2., підрозділі 6.5.

Фундаментальні результати було одержано на керованій академіком НАН України І.М.Ліфшицем кафедрі статистичної фізики в напрямі побудови теорії магнітних властивостей металів при низьких температурах, який розроблявся ним та

А.М.Косевичем. Було досліджено магнітні властивості тонких металевих плівок при низьких температурах, а також магнітні властивості електронного газу при довільних законах дисперсії. З ім'ям І.М.Ліфшиця пов'язаний також розвиток сучасної квантової теорії твердого тіла, квантової механіки та статистики, зокрема, дослідження статистичної механіки систем у стані часткової рівноваги, термодинаміки нерівноважних систем. Більш детально про ці праці — у пунктах 5.1.1., 5.2.2.

Слід відзначити дослідження, проведені у Київському університеті. У довоєнний час тут було одержано значущі результати в галузі застосування статистичного підходу до задач фізичної електроніки. Під керуванням професора М.Д.Моргуліса проводилося дослідження катодного розпорошення, що має принципове значення для іонних приладів. Вивчались поріг та адсорбційна рівновага активних моноатомних плівок, присутність яких обумовлює високу електронну емісію і визначає можливість практичного використання катодів у різних приладах. Значну увагу було приділено питанню статистичної теорії явища катодного розпорошення в області великих швидкостей іонів. Дослідження створеної моделі дало можливість М.Д.Моргулісу одержати дані щодо деталей статистичного характеру явища катодного розпорошення та побудови його теорії. На цьому шляху було досліджено питання про поріг розпорошення оксидних катодів, про явища при підвищених швидкостях розпорошуючих іонів в умовах високочастотного розряду у водні. Досліди підтвердили наявність розпорошення катоду включно до малих енергій розпорошуючих іонів.

На кафедрі металофізики університету професором С.Д.Герцрікеном були започатковані дослідження з вивчення рухомості атомів і явищ дифузії у металах і сплавах, впливу різних легуючих домішок на об'ємну, поверхневу та межову дифузію. Було показано, що поведінка металів і сплавів при підвищених температурах значною мірою обумовлена властивостями меж зерен, розроблено метод абсолютного визначення коефіцієнта дифузії за межами і шириною межі. Про ці роботи С.Д.Герцрікена йдеться також у пункті 5.2.6.

На кафедрі теоретичної фізики Київського університету розвиток досліджень, значущих для розуміння конденсованого стану речовини, пов'язаний з іменами академіків НАН України С.І.Пекара, О.С.Давидова, А.А.Смирнова, члена-кореспондента НАН України К.Б.Толпиго, професора А.М.Федорченка. У післявоєнний час С.І.Пекаром, який з 1953 до 1960 рр. завідував кафедрою, були закладені основи теорії поляронів, побудовано теорію  $F$ -центрів та інших локальних електронних центрів у іонних і гомеополярних кристалах, теорію домішкового поглинання світла і люмінесценції у цих кристалах (С.І.Пекар, К.Б.Толпиго, О.Ф.Томасевич). Під його керівництвом була також створена теорія додаткових світлових хвиль в області екситонного поглинання, К.Б.Толпиго з учнями розвинув теорію коливань кристалічних ґраток з урахуванням деформації іонів.

О.С.Давидовим, який керував кафедрою у 1951—1953 рр., була розвинута квантова теорія екситонів в молекулярних кристалах та передбачено мультиплетне розщеплення молекулярних термів, яке пізніше дістало назву “давидівського розщеплення” [901]. У 60—70-х рр. ХХ ст. у роботах керівника кафедри теоретичної фізики професора А.М.Федорченка (завідувач кафедри у 1966—1994 рр.) була

побудована теорія нестійкості систем з розподіленими параметрами, з якої одержано принципи генерації та підсилення надвисокочастотних коливань у плазмі твердих тіл. Значний внесок у розвиток поширення та взаємодії електромагнітних хвиль у плазмі, підсилення акустичних хвиль у п'єзонапівпровідниках здійснено роботами професорів М.Я.Коцаренка та Г.М.Бурлака, в теорію кінетичних властивостей напівпровідників — роботами професора Г.Є.Чайки [747—750]. Розвинута Г.Є. Сугаковим теорія локальних екситонів дала можливість інтерпретувати спектри та визначити параметри міжмолекулярної взаємодії. Важливими стали дослідження екситонної природи люмінесценції, а також дифузії екситонів (Ю.І.Карханін). У лабораторії люмінесценції органічних кристалів вивчалась передача енергії електронного збудження основної речовини до домішки. Внаслідок цього було доведено її екситонний механізм і вивчено залежність передачі енергії від розмірів кристалів, концентрації додаткових домішок, коефіцієнта поглинання збуджувального світла і температури. На основі уявлень про дифузійний характер екситонів розроблено теорію, яка дала можливість пояснити залежність квантового виходу люмінесценції основної речовини і домішки від концентрації домішки, коефіцієнта поглинання і розмірів кристалів (О.М.Файдиш).

У 1965 році була створена кафедра квантової теорії поля, засновниками якої стали академіки М.М.Боголюбов та О.Г.Ситенко (перший завідувач кафедри). Тематика наукових досліджень кафедри охоплює питання теорії елементарних частинок, теорію плазми та кінетичних явищ. На кафедрі закладено основи релятивістської теорії надплинності систем з двома типами конденсатів (член-кореспондент НАН України П.І.Фомін, С.Й.Вільчинський), запропоновано модель надплинності бозе-рідини на основі ідеї про парний характер конденсату (Е.А. Пашицький, С.Й.Вільчинський)

Необхідність проведення досліджень у галузі рідкого стану, найменш вивченого з трьох агрегатних станів, привела до створення кафедри молекулярної фізики в Київському університеті у 1952 р. Відтоді роботи з фізики рідкого стану є традиційними для Київського університету. Організатором великого колективу вчених, які працювали в галузі фізики рідкого стану речовини, критичних явищ і фазових перетворень, був один з перших учні академіка В.І.Данилова О.З.Голик, який починав працювати в цьому напрямі у Дніпропетровській філії УФТІ [345—347, 388—390]. Дослідження О.З.Голика характеризувались новим підходом до вивчення рідкого стану, що ґрунтується на з'ясуванні властивостей рідин у зв'язку з розглядом їх структури та пошуком закономірностей усередині груп рідин, однорідних за своєї структурою. Всі роботи кафедри молекулярної фізики були тісно пов'язані з проблемами промисловості, об'єктами дослідження виступали органічні рідини та їх розчини, рідкі метали і металеві розчини, розчини електrolітів.

Олександр Захарович Голик з 1951 до 1956 рік був ректором Київського університету, у 1952 р. створив та протягом двадцяти п'яти років очолював кафедру молекулярної фізики, у 1958—1962 рр. був деканом фізичного факультету. Вчений народився у селі Мерефа Харківської області. У 1930 р. закінчив Дніпропетровський інститут народної освіти (Університет), де і працював доцентом до 1937 р. Водночас у 1932—1942 рр. був старшим науковим співробітником Дніпропетровського Фізико



-технічного інституту НАН України (філіал Харківського фізико—технічного інституту НАН України) та у 1937—1941 рр. керував створеною ним кафедрою фізики Дніпропетровського інституту інженерів залізничного транспорту. Виконані О.З.Голиком у цей період наукові роботи, присвячені в'язкості розчинів електролітів, стали основою його кандидатської дисертації, захищеної у 1937 р. У роки Великої Вітчизняної війни О.З.Голик брав активну участь у евакуації підприємств Дніпропетровська до Магнітогорська, з 1942 до 1946 р. воював на південно-західному фронті, пройшовши з військами від Донбасу до Будапешта. У повоєнні роки з 1946 по 1951 рр. він — заступник директора Інституту фізичної хімії НАН України, вчений секретар Президії НАН України. В цей час у створеній О.З.Голиком та керованій ним лабораторії молекулярної фізики були виконані дослідження зв'язку в'язкості зі структурою індивідуальних рідин та розчинів, на основі яких у 1950 р. він захистив дисертацію на здобуття вченого ступеня доктора фізико-математичних наук.

З перших днів роботи кафедри молекулярної фізики під керівництвом О.З.Голика було розпочато великий цикл досліджень рівноважних кінетичних властивостей рідин, з 60-х рр. ХХ ст. – механічних та теплофізичних властивостей полімерів.

Наукові праці учнів О.З.Голика (Ю.І.Шиманського, О.В.Чалого, Т.П.Роциної, І.І.Адаменка, А.Ф.Скришевського, Сисоєва В.М., Кузовкова Ю.Г.) стосуються пружних та в'язких властивостей молекулярних рідин та розчинів, теплового руху молекул, критичних явищ в індивідуальних рідинах та розчинах, зокрема, в електролітах, фазових перетворень рідина—пара, структури та реологічних властивостей полімерних матеріалів і аеродисперсних систем [872—879]. Разом з І.І.Адаменком, О.В.Тарасенком та С.Ф.Соколовською О.З.Голик вивчав структуру в'язкості, пружності, електропровідності індивідуальних рідин та розчинів, зокрема, електролітів та полімерів (з П.П.Чолпаном, А.Ф.Скришевським та А.К.Дорошем) Разом із Ю.Ф.Забаштою, М.А.Геніною, А.Я.Фрідман та А.Ф.Скришевським дослідив релаксаційні властивості полімерів, що кристалізуються та створюють волокна. (Працям О.З.Голика присвячено пункт 5.2.7.). У подальшому на кафедрі молекулярної фізики спільно з Об'єднаним інститутом ядерних досліджень (Дубна, Росія) та з інститутом ядерних досліджень НАН України створено новий науковий напрям – нейтронна спектроскопія конденсованих середовищ, у рамках якого досліджено критичні явища в системах полімер—розчинник. Роботи О.З.Голика мали наукове значення для контролю технологічних процесів та продуктів у ряді виробничих циклів, зокрема, сприяли створенню мастильних матеріалів з наперед заданими властивостями.

Слід зазначити, що інтенсивно займаючись науковою роботою, О.З.Голик був також талановитим педагогом і лідером великої наукової школи в галузі фізики рідин, організатором і керівником наукових колективів. Під його керівництвом було підготовлено та захищено близько 40 кандидатських та докторських дисертацій, У Київському університеті, крім кафедри молекулярної фізики, ним створено наукові лабораторії з дослідження аеродисперсних систем та вивчення механічних властивостей полімерів.

О.З.Голик читав загальні курси фізики на фізичному, хімічному та філософському факультетах. Йому було притаманно в процесі викладання матеріалу робити акцент на методологічних питаннях фізики та її сучасному стані. У період з 1953 до 1979 рю під його керівництвом підготовлено та проведено десять всесоюзних конференцій з фізики рідин, тривалий час вчений керував комісією з координації наукових досліджень рідкого стану речовини при Міністерстві вищих учбових закладів СРСР та був членом науково-технічної ради при цьому міністерстві. Багато часу приділяв науково-видавничій діяльності, працював заступником відповідального редактора “Українського фізичного журналу”, заснував міжвідомчий збірник з фізики рідкого стану і десять років очолював його редколегію.

Учні та колеги завжди характеризували О.З.Голика як сумлінного трудівника, надзвичайно чуйну та щедру людину. За суттєвий внесок у розвиток фізико-математичних наук, а також у підготовку кадрів він одержав у 1966 р. звання Заслуженого діяча науки України. Започаткований вченим науковий напрям розробляли його учні. Так, процеси зародження центрів кристалізації у переохолоджених рідинах вивчав Д.Є.Овсієнко, будову рідин — А.С.Лошко та А.В. Романова, рідкі розчини — А.Ф.Скришевський. І.В.Радченко досліджував розчини, метали та сплави, розвивав модельні дослідження структури рідини. О.В.Чалим були знайдені узагальнені частотні спектри рідин, визначені критичні явища в обмежених системах.

Розглянутий внесок школи В.І.Данилова та генетично пов’язаної з нею дочірньої школи О.З.Голика у науку становить важливу сторінку історії фізики в Україні. Під керівництвом О.З.Голика було сформовано такі наукові напрями, як рентгенографічне дослідження структури рідин та рідких розчинів, вивчення теплофізичних та кінетичних властивостей рідин і рідких розчинів, дослідження фазових перетворень рідина–пара (критичні явища, випаровування, конденсація). Науковий авторитет започаткованого напрямку підтверджує той факт, що для обговорення одержаних результатів та планів подальших досліджень кафедрою молекулярної фізики Київського університету у 1953, 1955 та 1957 рр. у Києві скликались всесоюзні наради з фізики рідкого стану. Зокрема, завдяки результатам школи О.З.Голика вивчення задач молекулярної фізики стало традиційним для фізичного факультету Київського університету, і продовжується нині наступними поколіннями вчених. Так, з 1978 до 1988 р. кафедру молекулярної фізики очолював учень О.З.Голика, професор Ю.І.Шиманський [878,949], який дослідив густину і рефракцію чистих рідин і розчинів в околі критичної точки, виміряв гравітаційний ефект у сумішах, вивчив кінетику випаровування одиночних крапель води та водних розчинів солей у квазістаціонарних умовах при термостатуванні поверхні розділу рідина–пара, кінетику фазових перетворень аеродисперсних систем, властивості дисперсних композиційних матеріалів, де матрицею є полімер, а диспергованою фазою – високотемпературний надпровідник; реагенти для ліквідації вибухових ситуацій у вугледобувних шихтах та нові органічні льодоутворювальні речовини [ 880].

З 1989 р. керівником кафедри і досліджень у галузі фізики рідин і фазових перетворень у них є академік НАН України Л.А.Булавін. Під його керівництвом

проводяться оптичні та нейтронні дослідження фазових переходів і критичних явищ у рідинах, розчинах і гетерогенних сполуках, акустична спектроскопія рідких гомогенних та гетерогенних систем у широкому діапазоні термодинамічних параметрів, дослідження рівнянь стану широкого класу рідких систем . рівноважних і кінетичних властивостей біологічних систем, структурно-динамічних властивостей характерних об'єктів рідинного середовища людини методами акустичної та оптичної спектроскопії, термодинамічними методами, властивостей рідин у малих об'ємах, фізичних властивостей композитних полімерів, встановлення природи процесів дифузії іонів у рідких діелектриках, флуктуаційної природи просторових неоднорідностей речовини у гравітаційному полі поблизу критичних точок рідина–пара, рідина–рідина, подвійної критичної точки, встановлення механізмів, що лімітують швидкість випаровування крапель рідини при наявності хімічних реакцій у газовій фазі, побудова моделі хемоконденсації [950,951].

Так, за програмою „Конденсований стан — фізичні основи новітніх технологій” було визначено параметри ближнього порядку багатьох рідин, будову молекул у рідкій фазі та сольватних комплексів у розчинах електролітів (О.З.Голик, О.З.Скришевський, А.К.Дорош, В.П.Клочков), флуктуаційну структуру рідин і рідких розчинів (Рощина Г.П.); експериментально та теоретично досліджено рівняння стану, термодинамічні, кореляційні, акустичні властивості рідинних та нанорозмірних систем у широких межах зміни температур і тисків п'єзOMETричним, акустичним, віскозиметричним методами та методом числового моделювання (І.І. Адаменко, В.М.Сисоєв, Ю.І.Кузовков, Л.П.Самойленко, А.М.Григор'єв); властивості рідин в обмежених об'ємах (Л.А.Булавін, О.В.Чалий, Д.А.Гаврюшенко); структуру та енергетичні властивості розчинів полярних та неполярних рідин (Н.О.Атамась); критичні явища у рідинах і розчинах під дією зовнішніх полів (Ю.І.Шиманський, О. Т.Шиманська, Л.А.Булавін, О.Д.Альохін, Н.П.Крупський, Б.І.Басок); отримані нові дані про оптичні та кореляційні властивості критичного стану (О.Д.Альохін, А.В. Олейнікова, Ю.Л.Остапчук, Є.Г.Рудніков); досліджено вплив ультрафіолетового опромінення та динамічної адсорбції молекулярних домішок на швидкість випаровування крапель води та частинок льоду (В.М.Нужний, Г.А.Киричевський); досліджено зсувну та об'ємну в'язкості, густини, швидкості та поглинання ультразвуку в рідинах та в рідких сумішах (органічні сполуки, електроліти) вздовж лінії насичення; методами акустичної спектроскопії вивчені релаксаційні механізми молекулярних перебудов у рідинах та рідких розчинах (Ч П.П.олпан, В.С.Сперкач, О.П.Руденко, Л.М.Гаркуша, А.Л.Стрибулевич).

Дослідження зі статистичної фізики у Львівському університеті є традиційними, вони почалися з праць М.Смолуховського з теорії броунівського руху в 1906 р. [220]; надалі вони продовжувалися на кафедрі теоретичної фізики університету, на якій з 1948 до 1959 р. працював професор А.Ю.Глауберман, чії праці стосувались теорії твердого тіла і статистичної теорії конденсованих систем. З 1959 р. кафедру очолив академік НАН України І.Р.Юхновський, який започаткував дослідження в галузі статистичної теорії систем взаємодіючих частинок. Серед результатів І.Р.Юхновського та його учнів — метод колективних змінних у класичному і квантовому випадках для одночасного коректного врахування коротко- і далекосяжних внесків у термодинамічні та структурні властивості

багаточастинкових систем, статистична теорія фазових переходів другого роду, мікроскопічна теорія розчинів електrolітів.

Саме успіхи науковців Львівського університету в галузі статистичної фізики під керівництвом І.Р.Юхновського привели до організації у 1969 р. за його ініціативою Львівського відділу статистичної теорії конденсованих станів Інституту теоретичної фізики АН України, який очолив І.Р.Юхновський. Відділ став основою організованого у 1980 р. Львівського відділення Інституту теоретичної фізики НАН України, яким вчений керував до 1990 р., коли став директором створеного на базі даного відділення Інституту фізики конденсованих систем НАН України. Детально роботи школи І.Р.Юхновського висвітлюються у пунктах 5.1.2., 5.1.3., 5.2.4., підрозділі 6.4.

З 1958 р. у Львівському університеті була створена кафедра фізики твердого тіла, де проводиться робота в галузі фізики напівпровідників та рентгенометалофізики. Зокрема, розробляється багатоелектронна теорія напівпровідників (А.Ю.Глауберман, О.Музичук, Ф.І.Стасюк). У рентгенівській лабораторії цієї кафедри досліджуються структура та властивості простих рідин (В. П.Цветков, Я.Й.Дутчак, О.Г.Миколайчук).

Важливе місце в розвитку молекулярної та статистичної фізики, теорії рідин традиційно займає Одеський (Новоросійський Університет) [222]. У ньому розпочав свою діяльність П.Павлов, який теоретично і експериментально вивчав зв'язки між термодинамічними властивостями дисперсійних систем і ступенем їх дисперсійності, встановив залежність температури топлення від поверхневої енергії твердого тіла, вивчав термодинамічні потенціали хімічних елементів та їх сполук, рівновагу між кристалічною та рідинною фазами, сформулював загальне правило фаз конденсованих систем, досліджував адсорбція і поверхневий натяг на межі поділу двох фаз.

Фізичний факультету Одеського університету було організовано з моменту створення університету у 1865 р. у складі кафедри фізики та фізичної географії і кафедри астрономії. У 1920 р. після реформи вищої школи на базі фізичного і математичного факультетів було створено фізико-математичний інститут, який у 1921 р. приєднано до Інституту народної освіти. На базі цього інституту організовано фізико-хіміко-математичний інститут, але з 1930 р. після відновлення статусу університету знову організовано фізичний факультет з кафедрами експериментальної фізики, рентгенофізики і теоретичної фізики. У 1936 р. фізичний і математичний факультети були об'єднані у фізико-математичний факультет, з 1960 р. фізичний факультет знову існує самостійно.

Першими викладачами на кафедрі фізики були призначені професор В.І. Лапшин та Ф.Н.Шведов, який пізніше став деканом фізико-математичного факультету, ректором університету. Надзвичайно цікавими є роботи Ф.Н.Шведова з розгляду такої колективної властивості, як пружно-в'язка течія тіл. Він вперше знайшов пружність форми та аномалію в'язкості колоїдних розчинів, яка полягала у тому, що в околі границі плинності ефективна в'язкість різко спадає при зростанні напруження зсуву. Тому Ф.Н.Шведов вважається основоположником фізико-хімічної реології дисперсних систем та високомолекулярних сполук.

22 листопада 1871 р. за пропозицією Ф.Н.Шведова на посаду доцента університету було обрано відомого фізика-теоретика М.О.Умова, який працював в університеті протягом 22 років. Ним було введено поняття про швидкість та направлення руху енергії, про густину енергії в даній точці середовища, про потік енергії та вектор густини цього потоку. М.О.Умов виконав експериментальні дослідження дифузії водних розчинів та розчинності деяких солей, оптичної поляризації у каламутних середовищах, розробив нові прилади – дифузіометр, дифузійний циліндр, дифузійний ареометр.

Виключно важливими є термодинамічні дослідження М.О.Умова. Одержаний ним у 1889 р. загальний вираз термодинамічного потенціалу є яскравою ілюстрацією плідності методу Гіббса у дослідженні властивостей розчинів. М.О. Умов підтримував наукові контакти з європейським вченими, листувався та був особисто знайомий з Г.Кірхгофом, Г.Гельмгольцем, В.Томсоном, В.Віном, М. Планком. Після переїзду М.О.Умова до Москви у 1894 р. його замінив професор Харківського університету М.Д.Пильчиков, який під впливом термодинамічних досліджень М.О.Умова виконав велику працю по застосуванню методів Гіббса та Дюгема до аналізу питань електрохімії та інших термодинамічних питань.

Теоретичною фізикою в Одеському університеті почали займатись у 1935 р., коли в Одесу на відносно короткий строк приїхав з Німеччини Г.Бек, який здобув освіту та навички наукових досліджень в університетах Німеччини, Австрії та Швейцарії, протягом п'яти років працював першим асистентом В.Гейзенберга в Лейпцизькому університеті. З 1935 до початку 1937 року Г. Бек прочитав в Одеському університеті всі розділи курсу теоретичної фізики. Його лекції занотував Ю.Г.Векштейн, який у подальшому більше ніж сорок років був доцентом кафедри теоретичної фізики. Ці оригінальні конспекти довго були основою викладання теоретичної фізики в Одесі. Г.Бек зумів заохотити до професійної дослідницької роботи в галузі теорії ядра та елементарних частинок декількох із своїх Одеських слухачів і студентів, за цей період його учні встигли підготувати шість робіт з теоретичної фізики, які були опубліковані у наукових виданнях того часу. Серед них були такі відомі науковці, як професори А.Ю.Глауберман, М.М.Альперін, В.В. Маляров, Г.В.Скроцький.

Науковий рівень викладання і досліджень з теоретичної фізики, встановлений Г.Беком, до певної міри зберігався, незважаючи на труднощі воєнних років. На семінарі, який започаткував А.І.Костарев, регулярно реферувалися статті з останніх наукових журналів. Постійним учасником цих семінарів був Ю.А.Цвірко, який працював на кафедрі теоретичної фізики з 1959 до 1962 р. після закінчення аспірантури в Київському університеті під керівництвом професора С.І.Пекара — лідера київської школи фізики твердого тіла. Завдяки цьому на кафедрі сформувався напрям досліджень з теорії твердого тіла, який існує і сьогодні.

Слід також зазначити, що професори А.І.Костарев та В.В.Маляров започаткували у 1961 році всесоюзні одеські симпозиуми з теоретичної фізики, які відтоді проводились кафедрою теоретичної фізики разом з інститутом теоретичної фізики ім. Л.Д.Ландау майже кожні два роки до 1989 року.

Подією, яка мала значний вплив на розвиток теоретичної фізики в Одеському університеті, став перехід до університету восени 1963 року професора Йосипа

Залмановича Фішера, якого було обрано на посаду завідуючого кафедрою теоретичної фізики. До цього він працював професором кафедри ядерної фізики у Мінському університеті. Цікаві спогади про навчання в той період у професора Й.З. Фішера академіка РАН, директора Інституту філософії РАН В.С.Стьопіна: "На другому курсі філософського факультету був обов'язковий предмет – природознавство, який включав основи математики, фізики та біології. І нам пощастило, що фізику філософам читала чудова людина – доцент Й.З.Фішер. Він прекрасно знав теоретичну фізику, але нам читав загальну фізику – доступно і ясно... Для мене те, що стосувалось філософії науки, було особливо цікавим. Взагалі я зрозумів, що, крім філософії, треба вивчати ще й природознавство. І почав вивчати фізику. Мій ентузіазм посилювався після екзамену, на якому Йосип Залманович Фішер не тільки похвалив мене за відповіді, а й порадив перейти на фізфак. Я залишився на філософському, але спитав Й.З.Фішера, чи можна мені ходити на його лекції. Він дозволив. Оформивши у деканаті право на відвідування лекцій та навчання на фізфаку, я почав осягати основи сучасної фізики" [952].

Головні роботи вченого, присвячені теорії класичних та квантових рідин, а саме застосуванню методу кореляційних функцій до вивчення рівноважних властивостей простих рідин, було узагальнено в 1961 р. у монографії "Статистична теорія рідин" [128], яка була видана англійською мовою в 1964 р. у США та Індії. У Одеському університеті Й.З.Фішер проводив дослідження з різних проблем критичного стану речовини, таких як флуктуації, кінетичні та дифузійні процеси, гідростатичний ефект, в'язкість, швидкість звуку [892—898]. Роботам Й.З.Фішера присвячено окремий пункт 5.2.8.

Протягом відносно короткого часу Й.З.Фішер зміг суттєво підвищити рівень наукових досліджень кафедри. Ті, хто працював з Й.З. Фішером, вважали його взірцем творчого ставлення до викладацької професії. Особистий приклад вченого сприяв значному зростанню кваліфікації викладачів кафедри. Й.З.Фішер ініціював численні сучасні навчальні курси в галузі теоретичної фізики, а також систематично діючий семінар, до роботи якого залучались науковці та аспіранти. Підтримувались партнерські стосунки з лабораторіями та дослідницькими центрами різних країн світу. Кафедра поступово стала визнаною установою з дослідження і підготовки спеціалістів з теорії рідкого стану та статистичної фізики.

Проблеми статистичної теорії рівноважних рідин завжди залишались у центрі уваги професора Й.З.Фішера. Серія його робіт присвячена структурі рідин. Так, було показано, що поведінка структурного фактору рідини суттєво відрізняється від того, щоб вважати його неаналітичною функцією. Слід згадати також його роботи щодо поведінки багаточастинкових функцій розподілу в околі критичної точки. Й.З. Фішер вказував, що їх аналіз є важливим, оскільки багато термодинамічних похідних виражаються в термінах даних функцій.

Протягом багатьох років вчений вивчав рівноважні та кінетичні властивості води та водних іонних розчинів. Не менш важливими є його праці в галузі статистичної термодинаміки не повністю визначених систем, з модельним потенціалом, залежним від густини та температури. Ним було показано, що у розбавлених розчинах при низьких температурах, коли існує надплинний стан, можуть виникнути квантові вихрі, він одним з перших звернув увагу на комп'ютерні

“експерименти” як потужний засіб дослідження неупорядкованих систем. Завдяки створеній Й.З.Фішером творчій атмосфері кафедри теоретичної фізики його відхід від керівництва у 1978 році внаслідок тяжкої хвороби не позначився на її роботі. Ідеї, побудови і наближення теорії простих рідин, які були відправною точкою і об'єктом удосконалення у багатьох роботах Й.З.Фішера, при застосуванні до них прийомів і методів теорії твердого тіла та квантової статистичної теорії кулонівських систем, привели до створення теорії рівноважних та кінетичних властивостей рідких металів (професор Ю.П.Красний); до розробки методів рахування багаточастинкових взаємодій у кулонівських системах та визначення їх внесків у термодинамічні характеристики рідких металів (професор М.П.Коваленко) з подальшим використанням цих результатів в теорії металевих стекол. Загальні методи теорії систем багатьох частинок разом з теорією гідродинамічних флуктуацій дали змогу розробити ефективні методи дослідження оптичних характеристик та діагностики неідеальної плазми (професор В.М.Адамян, професор І.М.Ткаченко). Подальші дослідження з теорії в'язких рідин та теорії фазових переходів мали своїм результатом розробку теорії критичних явищ та фазових переходів II роду у в'язких рідинах та багатокомпонентних системах (професор М.П. Маломуж). На основі гідродинамічного наближення у теорії в'язких рідин була побудована теорія месбауерівської спектроскопії розчинів макромолекул (професор О.В.Затовський).

Дев'яності роки, попри економічні труднощі, були сприятливими для подальшого розвитку теоретичних досліджень в Одеському університеті. Співробітники кафедри теоретичної фізики брали участь у міжнародних наукових програмах та міжнародних конференціях, самі організовували такі конференції в Одесі з залученням великої кількості закордонних учасників. Варто зазначити міжнародну конференцію "Спеціальні проблеми фізики рідин" з нагоди 80-річчя Й.З.Фішера (Одеса, 31 травня—4 червня 1999 року), ідея скликання якої належала учню І.З.Фішера професору Н.П.Маломужу.

Сьогодні на кафедрі, якою керує професор В.М.Адамян, вивчаються такі ключові напрями статистичної фізики та фізики конденсованого стану речовини, як фізика низькотемпературної плазми, критичні явища та фазові переходи, фізика рідин та макромолекул. Наукова тематика кафедри продовжує традиційно концентруватися навколо теорії конденсованих середовищ, зокрема, теорії переохолоджених та сильно в'язких рідин, теорії систем із сильними водневими зв'язками, теорії кулонівських рідин та неідеальної плазми, теорії колективних збуджень в емульсіях та розчинах макромолекул.

Поглибленню досліджень з теоретичної фізики в Одеському університеті у період з 1966 до 1974 р. значно сприяло повернення до Одеси професора Аби Юхимовича Глаубермана, якого ректор А.І.Юрженко запросив очолити науково-дослідницький інститут фізики університету. За короткий час А.Ю.Глауберман розробив переконливе теоретичне обґрунтування результатів традиційних досліджень інституту з електронних процесів в іонних кристалах та з питань наукової фотографії. Водночас він тісно співпрацював з кафедрою теоретичної фізики, зокрема, з Й.З.Фішером, читав лекції для студентів, брав участь у роботі спільних семінарів, керував аспірантами кафедри. На жаль, передчасна смерть

професора А.Ю. Глаубермана у 1974 р. перервала цю плідну працю.

Дослідницька робота з фізики проводилась також у Науково-дослідному інституті фізики Одеського університету – першому інституті фізичного профілю в системі освіти України, який був створений 1 червня 1926 р. Зараз інститут є відомим центром у галузі запису оптичної інформації, який представляє Україну в Міжнародному комітеті з науковій фотографії (директор — професор О.В.Тюрін).

З дня заснування інститут разом з кафедрами експериментальної та молекулярної фізики працює над двома проблемами: електронні процеси в кристалах напівпровідників та діелектриків і кристалізація переохолоджених рідин. З середини 40—х рр. ХХ ст. виник третій напрям — дослідження утворення та випадання туманів і вивчення елементарних процесів, які відбуваються при цьому. З кінця 50—х рр. ХХ ст. завдяки відновленню теоретичного сектору інституту розширилися теоретичні дослідження відповідно до основних напрямів експериментальних досліджень в інституті, зокрема в галузі фазових переходів.

Початок вивчення кристалізації переохолоджених рідин було покладено дослідями В.В.Кондогурі 1926 р. з вивчення впливу електричного та магнітного полів на кристалізацію піперину і салолу. Подальша робота в галузі кристалізації переохолоджених рідин проводилась на кафедрі загальної фізики під керівництвом Г.Л.Міхневича. Ця робота була важлива для практики виробництва хімічно чистих речовин, а також для інтенсифікації виробництва цукру та харчових кислот. Так, було встановлено, що в постійному електричному полі температурна крива зміщується у бік значних переохолоджень, відкрито існування другого максимуму на цій кривій. У той же період виконано ряд робіт, присвячених вивченню впливу поверхні скла на кристалізацію в пристінному шарі. Так, у працях Г.Л.Міхневича, Ф.К.Горського, І.Ф.Бровко та Є.М.Овчинникової було проведено мікроскопічне дослідження температурної залежності розподілу центрів в тонкому шарі розплаву на різних віддальх від поверхні скла та впливу на цей розподіл електричного та магнітного полів.

Слід зазначити досліди Г.Л.Міхневича й П.І.Домбровського з впливу механічних коливань на кількість центрів кристалізації в бетолі. Вплив ультразвукових та високочастотних електричних коливань на швидкість зростання центрів вивчали Р.Я.Берлага і К.К.Демидов. О.К.Чернюком і пізніше П.І. Домбровським вивчався вплив різних фізичних агентів на в'язкість рідин, зокрема О.К.Чернюк розробив точний диференціальний спосіб вимірювання в'язкості за допомогою аналітичних терезів і вивчив вплив електричного поля.

У післявоєнні роки почалась розробка теорії кристалізації переохолоджених рідин, для чого необхідно було детально вивчити кінетику досліджуваного процесу. Працюючи над цим, Г.Л.Міхневич та його співробітники В.П.Єфімова і В.Г.Заремба відкрили явище релаксації, яке полягає в тому, що під час різкого охолодження на певній стадії процесу і нагрівання після цього до попередньої температури виникає затримка в утворенні центрів кристалізації, що обумовлено, як показали автори, впливом поверхні скла. Аналогічне явище було відкрито для діелектричної проникності (Б.І.Солдатов).

Крім того, було встановлено, що для багатьох органічних речовин кількість центрів кристалізації згодом досягає граничного значення, хоча значна частина



розплаву ще залишається рідкою. Цей факт показує, що кристалізація відбувається лише на частинках домішок.

Серед теоретичних робіт цього періоду слід зазначити працю Г.Л.Міхневича, в якій він розвинув теорію кінетики утворення центрів кристалізації органічних переохолоджених рідин на частинках твердих домішок, згідно з якою кінетика кристалізації розглядається як перетворення частинок домішок, вкритих кристалічним шаром, у центри кристалізації. Механізм перетворення залежить від розподілу цих частинок за розмірами і від величини критичного розміру, який визначається флюктуаційною теорією, тобто залежить від температури перетворення. Таке уявлення про механізм кристалізації дало змогу розрахувати міжфазну енергію на поверхні розділу кристал–рідина за допомогою невеликої ділянки температурної кривої. Дані теоретичні результати було підтверджено експериментально.

Крім досліджень переохолоджених рідин, наприкінці 50—х рр. ХХ ст. були поставлені досліди з пересиченими розчинами винної кислоти й сахарози. Результати, одержані для винної кислоти, були використані на виробництві і дозволили скоротити тривалість виробничих операцій й значно збільшити випуск продукції. Ці роботи були виконані під керівництвом Г.Л.Міхневича І.А.Захалевим, М.С.Нічиком, П.М.Гудзем.

За результатами цих досліджень Г.Л.Міхневич захистив у 1941 р. докторську дисертацію “Експериментальне дослідження кристалізації рідин у тонких шарах”, однак у воєнний час документи було загублено. Роботу було продовжено після звільнення Одеси, коли Г.Л.Міхневич очолив кафедру загальної фізики та керував нею до 1961 р. У березні 1961 р. він захистив нову докторську дисертацію “Кінетика кристалізації переохолоджених органічних речовин та пересичених розчинів”.

На фізичному факультеті у післявоєнні роки сформувався ще один напрям досліджень під керівництвом професора В.О.Федосєєва, який працював науковим керівником Проблемної науково-дослідної лабораторії аеродисперсних систем, а також у 1963 р. організував кафедру теплофізики. Це напрям: фізика аеродисперсних систем, випаровування крапель, диспергування рідин. Дана тематика була започаткована дослідями В.О.Федосєєва 1934 р., які довели можливість осадження хмари у вигляді дощу при ланцюговому процесі злиття крапель. Надалі проводились дослідження в галузі високо- і низькотемпературних процесів тепломасообміну, конденсації, випаровування та хімічних реакцій в аеродисперсних системах (В.А.Федосєєв, Є.В.Гернет, В.А.Шустов, Г.А.Мохов, К.В.Романов, В.І.Глухов, І.Н.Григоренко, С.М.Контущ, А.І.Полянський). У працях В.О.Федосєєва, Б.О.Манакіна, Б.Б.Кажинського і З.М.Доментіянової з осадження водяного туману було доведено, що впуск у камеру розпиленого розчину хлористого кальцію прискорює седиментацію туману внаслідок коагуляції крапель води і крапель розчину. При цьому виявилось, що умовою взаємної коагуляції є різниця тиску пари над краплями, причому дослідження були проведені для ряду речовин. Встановлено, що поверхнево-інертивні і нелетучі речовини викликають прискорення седиментації туману, при чому це прискорення тим більше, чим вище їх концентрація в розчині і чим більше розчину розпилено в камері. При цьому розпорощення поверхнево-активних речовин не впливає на швидкість седиментації.

Завдяки працям Я.Ю.Корпуна, Б.О.Манакіна і В.О.Федосєєва було одержано рівняння седиментації водяних туманів в обмеженому об'ємі. Б.О.Манакін, В.П.Гречановський і М.З.Доментіанова досліджували осадження пари води з повітря за допомогою штучних ядер конденсації. Вони розробили спосіб осадження вологи з атмосфери за допомогою гігроскопічних ядер конденсації, які утворювались при взаємодії пари соляною кислоти з розпорошеними порошками металів, їх оксидів і карбонатів. В.О.Федосєєв та Л.П.Латоніна досліджували залежність стійкості аерозолу від його часткової концентрації та встановили, що для аерозолу хлористого алюмінію існує оптимальна концентрація, вище якої число частинок починає зменшуватись внаслідок коагуляції, яка відбувається досить бурхливо.

Водночас В.О.Федосєєв, Д.І.Поліщук і А.І.Полянський вивчали елементарні процеси в аерозолях, зокрема, закономірності випаровування крапель і явища, що їх супроводжують. Ними було встановлено, що при взаємодії крапель, які випаровуються, виникають відштовхувальні сили, значення яких виміряне за допомогою крутильних терезів. Даний результат було використано для створення нового способу розпилювання рідини шляхом розбризкування перегрітої рідини. Такі ж досліді проводились з бензином, толуолом, ксилолом, етиловим спиртом. Виявилось, що характер залежності швидкості випаровування від температури і швидкості потоку такий же, як і для крапель води. Проте у випадку багатofракційних рідин закон Срезневського, не виконується. При підвищенні температури повітря залежність квадрата діаметра краплі від часу наближається до лінійної. До такого ж висновку приводить вивчення випаровування крапель при горінні. Викладені дослідження знайшли практичне застосування. Зокрема, було розроблено новий економічний вигідний метод боротьби із шкідниками сільськогосподарського виробництва завдяки використанню туманів, одержаних при розбризкуванні перегрітої рідини, для обприскування рослин, при якому змочуються обидві сторони листа.

Сьогодні роботи в напрямі вивчення високотемпературних аерозолів та фізики аеродисперсних систем продовжуються в університеті у проблемній науково-дослідній лабораторії фізики аеродисперсних систем (завідувач – професор М.Х. Копит); в напрямі теоретичного дослідження мікронеоднорідних явищ, дуже в'язких рідин з водневими зв'язками розчинів — у науково-дослідній лабораторії теоретичної і молекулярної фізики (завідувач – В.М.Махлайчук); у напрямі вивчення процесів коагуляції і росту конденсованої фази в полум'ях – у науково-дослідній лабораторії фізики і хімії низькотемпературної плазми (завідувач – С.Г. Орловська), у напрямі вивчення поверхневих явищ на міжфазних межах тверде тіло–рідина на кафедрі фізики твердого тіла та твердотільної електроніки (завідувач – В.І.Солошенко), а також в учбово-виробничому центрі (директор – М.А. Гауберман). У цих колективах досліджуються можливості одержання аерозолів з розчинів електролітів в умовах нерівноважної деформації рідини; транспортування дисперсних систем вихровими кільцями в умовах вільної атмосфери, кінетичні фактори в процесах фазових перетворень; динаміка тепломасопереносу при фазових переходах тверда фаза–рідина–пара при лазерній обробці металів, рівноважні та кінетичні процеси у неупорядкованих гетерогенних рідинних іонізованих системах методами статистичного моделювання, фізика процесів міжфазної взаємодії у

плазмі продуктів згоряння, яка містить у собі конденсовану фазу та домішку у газовому середовищі, що легко іонізується. Ці дослідження поширено на область високих температур, що дало можливість досліджувати процеси горіння чистих та твердих палив. Продуктивними виявилися ідеї В.Г.Шевчука про зв'язок параметрів дисперсної системи та різних режимів поширення полум'я — ламінарного, вібраційного, турбулентного. Розвитком цього традиційного для кафедри напряму, але на новому експериментальному та теоретичному рівнях, стали дослідження процесів конденсованої фази при горінні металів (А.В.Флорко), а також роботи з вивчення динаміки систем, які хімічно реагують, поблизу критичних точок. Ці питання є особливо актуальними у зв'язку із чернобильською тематикою, та тісно пов'язані з проблемами теорії катастроф, синергетики, екології, медицини, біології, гео- та астрофізики (Є.Н.Кондратьєв, А.В.Коробко, В.Н.Корнілов).

Важливі дослідження в галузі застосування ідей та методів статистичної фізики проводились на фізичному факультеті Донецького університету, а саме на кафедрах теоретичної фізики; фізики нерівноважних процесів, метрології та екології; твердого тіла та фізичного матеріалознавства. Фізичний факультет університету є наступником (з 1965 р.) фізико-математичного факультету Донецького педагогічного інституту. Ядром викладацького складу стали представники двох кафедр педінституту та співробітники Донецького фізико-технічного інституту. Серед них академіки НАН України О.О.Галкін та В.І.Архаров, члени-кореспонденти НАН України І.Л.Повх та К.Б.Толпиго, професори Н.М.Ковтун, В.П.Набережних. Одним зі структурних підрозділів факультету є фізико-технологічне відділення Донецького фізико-технічного інституту НАН України. Кафедра теоретичної фізики була організована у 1966 р. одночасно зі створенням у Донецьку Наукового центру Академії наук України. Першим її завідувачем був професор К.Б.Толпиго, в різний час на кафедрі теоретичної фізики працювали академік НАН України В.Г.Бар'яхтар, А.А. Боргард, Л.Н.Овандер, І.М.Конєв.

Головними напрямками тематики наукових досліджень кафедри теоретичної фізики стали такі важливі для розуміння конденсованого стану речовини галузі, як теорія магнетизму та надпровідності. Визначальний вплив на її формування здійснили академік В.Г.Бар'яхтар та його учень член-кореспондент Академії педагогічних наук України Ю.І.Горобець Вони сформували колектив теоретиків та експериментаторів, який потягом короткого часу став відомим в СРСР та за кордоном. Багато результатів наукових досліджень, виконаних на кафедрі, знайшли практичне застосування, зокрема, вимірювальний комплекс для атестації тонкоплівкових магнітних матеріалів.

Як результат набутого досвіду в 1988 р. на базі кафедри теоретичної фізики було створено науково-дослідний відділ “Фізика магнітних явищ та високотемпературна надпровідність” (науковий консультант професор Ю.І. Горобець, керівник І.А.Мельничук), у якому поряд з традиційною магнітною тематикою було розпочато дослідження тоді щойно відкритого явища – високотемпературної надпровідності. У чотирьох лабораторіях відділу, а саме “Фізика магнітних явищ”, “Високотемпературної надпровідності”, “Технології поверхні” та “Фазових переходів у неоднорідних структурах” виконано ряд розробок, які були застосовані у електронній промисловості — розроблено комплекс

експериментальних методик та приладів на їх основі для контролю технологічних процесів мікроелектроніки. На цій основі вивчено вплив структурних дефектів на властивості доменної структури низьковимірних магнітних систем, досліджено ефективність роботи високоградієнтних феромагнітних насадок із впорядкованою структурою на феромагнітних основах різної форми, показано особливості руху прискорених частинок в полі доменних структур та вплив радіаційних ефектів на процеси самоорганізації доменних структур.

Набутий на посаді професора кафедри теоретичної фізики Донецького університету досвід втілює у Сумському державному університеті керівник кафедри загальної та експериментальної фізики професор С.І.Денисов. Його наукові роботи пов'язані з розвитком нових методів для дослідження збуджених систем, вивченням магнітних наноструктур з комплексною спіновою конфігурацією, що самоорганізуються, статистичних характеристик динамічних систем з флуктувальними параметрами, магнітної релаксації в двовимірних ансамблях наночастинок, динамічних змін, самоорганізації та хаосу в доменних структурах неоднорідних магнітних матеріалів, флуктуаційних ефектів у динаміці магнітних солітонів.

Роботи у галузі застосування методів статистичної фізики проводилися також на кафедрі фізики нерівноважних процесів, метрології та екології Донецького університету, яка під назвою кафедри фізичної гідродинаміки була створена у серпні 1965 р. Перший завідувач – член-кореспондент НАН України Іван Лукич Повх, який очолював колектив кафедри до грудня 1987 р.

І.Л. Повх народився 11 листопада 1909 р. у с. Миропілля (тепер Сумська обл.). У 1938 закінчив фізико-механічний факультет Ленінградського політехнічного інституту. У період репресій з 1938 до 1940 р., перебував у засланні, працював керівником кафедри математики Учительського інституту м. Тобольськ, виконував обов'язки декана фізико-математичного факультету інституту. Після реабілітації повернувся у Ленінградський політехнічний інститут. У роки війни воював та працював у Ленінграді, був тяжко поранений. У лабораторії аеродинаміки, яку вчений очолював протягом усієї війни, було організовано ремонт інгаляторів для Ленінградського фронту, розроблено нові способи збільшення висоти під'йому аеростатів загородження. У наступні роки наукові інтереси вченого були зосереджені на дослідженні гідравлічних та парових турбін, велику увагу він приділяв методам вимірювання аеродинамічних характеристик потоків. І.Л.Повх завжди пропагував досягнення науки, відомі його книги про М.Є.Жуковського та Л. І.Лугутіна.

Починаючи з 1958 р. І.Л.Повх працює у Інституті механіки НАН України, з 1961 р. — замісник директора Інституту гірничої справи АН УРСР у Донецьку, у 1962—1963 рр. — завідувач відділу Донецького НДІ чорних металів та водночас професор Донецького педагогічного інституту. За активної участі І.Л.Повха на базі цього інституту було створено Донецький університет, де він став першим професором у 1964 р. і організував учбово-науково-дослідне об'єднання – «Кафедра фізичної гідродинаміки», СКТБ «Турбулентність» та проблемна лабораторія «Фізичних методів дослідження турбулентності та зниження гідродинамічного супротиву тертя», у якому працювало близько 400 співробітників. Слід зазначити

такі результати колективу, як зниження гідродинамічного опору в турбулентних потоках (О.Б.Ступін), турбулентний обмін у стратифікованих течіях, розробка керувальних систем для дослідження турбулентних потоків.

За час роботи у Донецьку І.Л.Повхом розвинено ряд нових напрямів прикладної гідроаеродинаміки (магнітогідродинамічна сепарація, транспортування та дозування рідких металів). З 1967 року під керівництвом І.Л.Повха та при його безпосередній участі розпочаті систематичні дослідження з розробки методів вимірювання турбулентних потоків, а також новий для СРСР напрям – зниження гідродинамічного опору тертя мікродомішками високомолекулярних полімерів та міцеллотвірних поверхнево-активних речовин.

Вчений був членом наукових рад АН СРСР та АН УРСР, ряду редакційних рад, мав близько 100 авторських свідоцтв на винаходи. Його наукова діяльність завжди поєднувалась з педагогічною роботою, ним підготовлено 10 докторів та більше 80 кандидатів наук. Активну діяльність Іван Лукич проводив щодо організації наукових конференцій, зокрема, з прикладної магнітної гідравліки та з турбулентності, які сприяли встановленню зв'язків між вченими Москви, Ленінграда, Мінська, Києва, Новосибірська, Донецька.

Наступником І.Л.Повха став професор, заслужений діяч науки і техніки України (1979), декан фізичного факультету (1986—1995), проректор з наукової роботи Донецького університету (з 1995) Олександр Борисович Ступін. У наступні роки за його ініціативи кафедра суттєво розширила тематику та була перейменована в кафедру фізики нерівноважних процесів, пізніше – у кафедру фізики нерівноважних процесів, метрології та екології. Одним з напрямів кафедри традиційно залишається теорія нерівноважних процесів. Так, О.Б.Ступіним було запропоновано молекулярний механізм та теорію ефекту зниження гідродинамічного опору мікроприсадками полімерів, розроблено механізм зменшення турбулентності у розчинах міцеллотвірних поверхнево-активних речовин, побудовано кінетичну теорію деструкції полімерних молекул у турбулентному потоці, запропоновано модель турбулентного теплообміну у розчинах полімерів.

Слід також відзначити ще один науковий напрям, який розробляється на кафедрі фізики твердого тіла та фізичного матеріалознавства доктором фізико-математичних наук професором А.Г.Петренком. Це – встановлення природи дефектності структури та закономірностей її впливу на фазові переходи у сегнетоелектриках.

### **6.3. Розвиток ідей і методів статистичної фізики в теоретичних школах в Україні — наукових школах академіків О.І.Ахієзера, І.М.Ліфшиця, М.М.Боголюбова, В.Г.Бар'яхтара, О.Г.Ситенка**

Якщо в цілому розглядати таке комплексне явище, як наукова школа, слід зазначити, що вивчення діяльності вчених-організаторів науки та наукових колективів, закономірностей колективної роботи, форм її організації та процесу формування наукових шкіл традиційно привертає увагу істориків науки, наукознавців, соціологів, психологів. Показ закономірностей розвитку науки крізь призму таких неформальних формувань дозволяє більш глибоко простежити генезис та еволюцію багатьох наукових понять, ідей та концепцій, повніше усвідомити динаміку розвитку науки.

Наукова школа являє собою яскравий вияв колективної форми творчості під безпосереднім практичним та ідейним керівництвом видатного вченого, який надає цьому неформальному колективу ідеї та визначає методи і зміст досліджень, що проводяться в школі. Це не просто колектив науковців, а творча співдружність вчених різних поколінь, об'єднаних спільним підходом до вирішення проблем, стилем роботи та мислення, поглядом на розвиток досліджень у вибраному науковому напрямі та оригінальною стержневою ідеєю. Доведення цієї ідеї, що покладено в основу роботи, є стимулом у розвитку досліджень та чинником, який об'єднує виконавців, незважаючи на різницю їх характерів та світогляду. Отже, наукова школа — це колектив дослідників-однодумців, найвища форма взаємодії у процесі наукового пошуку.

Численні проблеми, пов'язані з науковими школами, вивчали як вчені-професіонали: О.О.Богомолець [953], М.Борн [954], С.І.Вавилов [955], П.Л.Капіца [956], П.М.Лебедев [957], В.Оствальд [958], М.М.Семенов [959], Д.Д.Зербіно [960] та ін., так й історики науки та наукознавці: Т.Кун [74], Дж.Агассі, І.Лакатос [69], Б.М.Кедров, Ф.Гернек, С.Р.Мікулинський, М.Г.Ярошевський [237], К.О.Ланге [238], Н.І.Родний [961], Г.М.Добров [962], С.Г.Кара-Мурза [963] В.П.Карцев [964], Ю.О.Храмов [239—243, 47], Е.С.Бойко [965], О.З.Мирська [966] та ін.

З їх праць випливає, що феномен наукової школи є історичним та неоднозначним, але характеризується рядом параметрів. Складність проблеми обумовила численність тлумачень поняття "наукова школа". Під ним розуміють науково-освітню школу, дослідницький колектив, напрям в науці (М.Г.Ярошевський), розрізняють також класичні та сучасні наукові школи (К.О.Ланге), дисциплінарні та проблемні (С.Д.Хайтун) тощо. Згідно з моделлю Ю.О.Храмова сучасна наукова школа визначається як неформальна творча співдружність учених різних поколінь високої кваліфікації на чолі з науковим лідером, об'єднаних спільністю підходів до вирішення проблеми, стилем роботи та мислення, оригінальністю ідей та методів їх реалізації, яка дістала значні результати та завоювала авторитет і суспільне визнання в даній галузі знання. Основні ознаки наукової школи, це: наявність наукового лідера — видатного вченого, який вміє відбирати творчу молодь, виховувати з неї вчених; певний стиль досліджень, наукова ідеологія; науково-дослідна програма; особлива наукова атмосфера, що панує в школі; висока

кваліфікація дослідників, значущість одержаних ними наукових результатів, високий авторитет у даній галузі.

Значний внесок у статистичну фізику було здійснено теоретичними школами академіків Л.Д.Ландау, О.І.Ахієзера, І.М.Ліфшиця, М.М.Боголюбова, О.Г.Ситенка, а також школами статистичної фізики академіків І.Р.Юхновського та С.В.Пелетмінського.

Так, від початку 50-х рр. ХХ ст. активно формується наукова школа одного з перших учнів Л.Д.Ландау — Олександра Ілліча Ахієзера. який після від'їзду Л.Д.Ландау в 1938 р. до Москви очолив теоретичний відділ Харківського фізико-технічного інституту, і керував ним до 1988 р. Більш ніж півстоліття О.І.Ахієзер викладав у Харківському університеті, де керував кафедрами теоретичної фізики та теоретичної ядерної фізики, виступив організатором фізико-технічного факультету. Його надзвичайний талант та ерудиція, невичерпна енергія, оптимізм та працездатність, доброта і гумор сприяли тому, що О.І.Ахієзер став справжнім лідером харківських фізиків. Особливістю наукової школи О.І.Ахієзера є широкий спектр досліджень та фізичний універсалізм. Це ядерна фізика, квантова електродинаміка, фізика елементарних частинок, фізика плазми, магнетизм, фізика твердого тіла, статистична фізика [967,243].

У галузі фізики конденсованого стану речовини слід відзначити наступні результати школи. Наприкінці 30-х рр. ХХ ст. О.І.Ахієзер побудував теорію розсіяння фотона фотоном та теорію когерентного розсіяння фотона у полі ядра. Ним також були виконані основоположні роботи з вивчення взаємодії ультразвуку з кристалами, розвинуто загальний підхід до досліджень затухання низькочастотних коливань у кристалах та побудовано мікроскопічну теорію поглинання низькочастотних звукових коливань ангармонічним кристалом. У випадку високих частот звук розглядався як газ фононів та виявлялась ймовірність поглинання звукового фону за рахунок ангармонічних процесів. При малих частотах та довгих хвилях – як деяке зовнішнє поле, що модулює енергію елементарних збуджень (квазічастинок) твердого тіла – фононів у діелектриках та фононів і електронів у металах [968]. Запропонований механізм поглинання, обумовлений модуляцією енергії квазічастинки зовнішнім полем, увійшов у літературу як “механізм поглинання Ахієзера”.

У 1941 р. О.І.Ахієзер та І.Я.Померанчук виконали піонерські дослідження з розсіяння повільних нейтронів кристалами та передбачили повільні нейтрони, у 1948 р. побудували теорію резонансних ядерних реакцій, а у 1949 р. – теорію розсіяння швидких заряджених частинок ядрами. Пізніше О.І.Ахієзер із співробітниками розглянув розсіяння електронів протонами, спільно з В.Ф.Болдишевим та М.Ф.Шульгою розробив квазікласичну теорію гальмівного випромінювання та пружного розсіювання швидких частинок у монокристалах, яка дозволила передбачити ефекти пригнічення когерентного випромінювання та значного збільшення випромінювання в умовах каналювання частинок, а також класичну теорію когерентного випромінювання ультрарелятивістських електронів у кристалі; показав можливість динамічного хаосу при проходженні швидких заряджених частинок через кристал, орієнтований кристалографічною віссю за променем.

Суттєвий внесок було зроблено школою Ахієзера у розробку теоретичних основ фізики плазми [969]. Характерні особливості, які відрізняють плазму від інших макроскопічних середовищ, безпосередньо пов'язані з її колективними властивостями. Це виявляється в існуванні різних власних хвиль та коливань. У рамках наближення самоузгодженого поля плазмові коливання вперше були досліджені в основоположних для побудови кінетичної теорії плазми роботах А.О. Власова та Л.Д.Ландау [542,543]. Так, Л.Д.Ландау показав, що навіть в умовах знехтування зіткненнями між частинками в плазмі, коливання високої частоти все ж будуть згасати. Цією роботою було започатковано важливий напрям у фізиці плазми, розвиток якого належить учням і послідовникам Л.Д.Ландау, зокрема О.І.Ахієзеру — це взаємодія пучків заряджених частинок із плазмою (при їх проходженні через плазму). Так, у 1948 році О.І.Ахієзер спільно з Я.Б.Файнбергом незалежно від Д.Бома і Е.Гросса (1949) передбачили ефект пучкової нестійкості плазми, через яку проходить електронний пучок. Цей ефект виявлявся у вигляді виникнення у плазмі не затухаючих, а зростаючих коливань [544]. Разом з роботами А.А.Власова та Л.Д.Ландау цю працю покладено лежить в основу сучасних досліджень колективних процесів у плазмі і має суттєве значення для практичних застосувань плазми, зокрема, для розробки методів її нагрівання.

У подальших роботах О.І.Ахієзера та його школи фізика плазми набула значного розвитку. Так, у 1951 р. спільно з Г.Я.Любарським він виконав піонерське дослідження стаціонарних простих нелінійних ленгмюровських хвиль, дослідив прості хвилі у холодній магнітоактивній, а також нерівноважній плазмі, розвинув детальну теорію нелінійних хвильових процесів у плазмі. У 1958 р. О.І.Ахієзер, Г.Я.Любарський і Р.В.Половін дослідили стійкість ударних хвиль та сформулювали умову еволюційності, що дало можливість встановити критерії їх стійкості, у 1961 р. дали загальний розв'язок задачі про кінетичну стійкість плазми. Питаннями стійкості плазми у магнітному полі займалися також В.Ф.Алексін та В.І.Яшин, які у 1960 р. сформулювали узагальнений енергетичний принцип для вивчення стійкості плазми. Теоретичні основи фізики плазми було узагальнено у монографії „Електродинаміка плазми” під редагуванням О.І.Ахієзера у 1974 р. [969].

Від початку 50-х рр. у Харківському фізико-технічному інституті почали проводитися дослідження з кінетичної теорії плазми в магнітному полі. Велике значення для розвитку цієї теорії мали роботи учнів О.І. Ахієзера академіка НАН України Олексія Григоровича Ситенка та члена-кореспондента НАН України Костянтина Миколайовича Степанова, де було сформульовано загальне дисперсійне рівняння для електромагнітних хвиль у рівноважній однорідній плазмі та введено тензор діелектричної проникності плазми в магнітному полі, який дав змогу дослідити різні процеси в ній [831].

У наступних роботах О.Г.Ситенка та його наукової школи в Інституті теоретичної фізики НАН України набула успішного розвитку теорія статистичних та електромагнітних властивостей плазми. Було розроблено ймовірнісний підхід до теорії плазми, на цій основі досліджено хвилі, випромінювання, флуктуації та процеси заряджених частинок, які знаходяться в стаціонарних нерівноважних станах. Встановлено узагальнене кінетичне рівняння для хвиль у плазмі, яке враховує нелінійну взаємодію хвиль між собою та із флуктуаційними полями. На його основі



досліджено процеси розсіювання, трансформації та випромінювання хвиль у нерівноважній плазмі, побудовано теорію поляризаційної взаємодії заряджених частинок з плазмою, передбачено явище комбінаційного розсіювання хвиль у плазмі, вивчено властивості запорошеної плазми та колоїдних систем Розроблено також теорію електромагнітних флуктуацій у плазмі, перенормовану нелінійну електродинаміку плазми, кінетичну теорію відлуння в плазмі [827—830]. Розгляд було засновано на використанні розкладу за степенями напруженості поля та введення процедури усереднення, що враховує принцип послаблення кореляцій Боголюбова. Слід відзначити як науково-організаційний результат О.Г.Ситенка та його учня, наступника на посаді директора Інституту теоретичної фізики академіка НАН України Анатолія Глібовича Загороднього те, що у 1971 р. Інститут теоретичної фізики вперше в світовій практиці виступив з ініціативою проведення конференцій з теорії плазми. Вже перша конференція, яка проходила з 19 до 23 жовтня 1971 р., зібрала більше 250 вчених. Наступні Київські конференції з теорії плазми проходили у Києві (1971,1974,1987,2006), Трієсті(1977), Нагої(1980,1996), Гьотеборзі(1982), Лозанні(1984), Нью-Делі(1989), Інсбруку(1992), Фос-Ігуасу (Бразилія)(1994), Празі (1998), Квебеку (2000), Сіднеї (2002), Ніцці (2004).

Значний внесок у фізику плазми зробив К.М.Степанов. Окрім вищезазначених робіт, разом із А.Б.Киценко він розглянув черенковське та циклотронне збудження різних типів повільних хвиль у плазмі потоком заряджених частинок, виявив іонну циклотронну та конусну нестійкості у адиабатичній „пастці”, разом із Р.В.Половіним вивчив нелінійні поздовжні коливання однорідної та неоднорідної плазми. Важливим циклом робіт К.Н.Степанова стали проведені разом із В.В.Долгополовим дослідження спектрів і затухання хвиль, які було покладено в основу теоретичного розгляду методів нагрівання плазми електромагнітними полями до термоядерних температур. У зв'язку з задачами високочастотного нагрівання плазми ними вивчались процеси збудження, поширення, затухання та трансформації хвиль у неоднорідній плазмі в області високих та низьких частот.

Питаннями дослідження хвильових процесів у плазмі займався А.С.Бакай. Він вивчав багатохвильові процеси взаємодії високо- та низькочастотних хвиль у плазмі, побудував самоузгоджену теорію повільно змінних хвиль, які еволюціонують у плазмі без зіткнень, а також динамічну теорію взаємодії хвиль.

З 60-х років ХХ ст. в Україні почалась розробка методів дослідження нелінійних процесів у турбулентній плазмі. Цей науковий напрям пов'язаний перш за все з роботами Я.Б.Файнберга та його наукової школи, яка відома своїм фундаментальним внеском не лише у фізику плазми, а й розробку прискорювальної техніки. Було побудовано квазілінійну теорію слабкої турбулентності, за допомогою якої досліджено нелінійне розсіювання іонно-звукових коливань на електронах та розвиток іонно-звукової нестійкості.

Суттєвий внесок зроблено школою О.І.Ахієзера щодо розуміння механізму кінетичних та релаксаційних явищ у магнетиках. У 60-ті роки ним разом з О.І. Ахієзером, В.Г.Бар'яхтаром та С.В.Пелетмінським на основі розвинутого О.І. Ахієзером у 1946 р. уявлення про магнони як спінові хвилі, що взаємодіють, вперше були виконані дослідження магнітопружних хвиль у ферромагнетиках та антиферромагнетиках, побудована квантова теорія кінетичних, релаксаційних та

високочастотних процесів у феродіелектриках (1959) і теорія зв'язаних магнітоакустичних хвиль, а також у 1956 р. передбачено нове явище – магнітоакустичний резонанс [821,822]. Розроблено теорію магнітоакустичного резонансу у антиферомагнетиках різних типів у зовнішньому магнітному полі (В.Г. Бар'яхтар та інші, 1964), вперше досліджено нелінійні процеси у спіновій системі (О.І.Ахієзер), спінові хвилі великої амплітуди та нелінійний магнітоакустичний резонанс (А.С.Бакай, В.Г.Бар'яхтар, 1970), детально вивчено процеси пружного та непружного розсіяння повільних нейтронів у феро- та антиферомагнетиках (В.Г. Бар'яхтар та інші, 1962). Значущість даної роботи полягає у тому, що взаємодія між спіновими хвилями і фононами визначає особливості кінетичних процесів у феромагнетиках і обумовлює існування у феромагнетиків своєрідних магнітоакустичних коливань, а взаємодія магнітного спектра з ґраткою – має суттєве значення в процесі магнітного охолодження.

О.І.Ахієзер та С.В.Пелетмінський встановили розподіл Планка для фотонів у середовищі [823]. Приділялась велика увага також фазовим переходам у магнетиках. Ними була побудована теорія критичних явищ та аномального розсіяння нейтронів поблизу точки фазових переходів, передбачено температурний магнітоакустичний резонанс (І.О.Ахієзер), вперше запропоновано мікроскопічне пояснення антиферомагнетизму металів на основі моделі колективізованих електронів (О.І. Ахієзер, Д.П.Белозеров).

Значного розвитку набула розробка теорії магнетизму у школі академіка НАН України Віктора Григоровича Бар'яхтара. Великий цикл його досліджень у Донецькому фізико-технічному інституті НАН України було присвячено розробці доменної структури у ферро- та антиферомагнетиках. Досліджено основні стани гелікоїдних магнітних структур, розвинуто теорію спін-переорієнтаційних переходів у ортоферитах та рідкоземельних феритах-гранатах у магнітному полі, метамагнітних фазових переходів, фазових переходів у антиферомагнетиках у магнітних полях, теорію утворення зародків при магнітних фазових переходах I роду. Виконано дослідження динаміки циліндричних магнітних доменів, передбачено виникнення циліндричних доменів в околі фазових переходів. Як результат в школі В.Г.Бар'яхтара було сформульовано новий погляд на доменні структури як на неоднорідний стан поляризованих середовищ із співіснуючими фазами, який дозволив з єдиних позицій описати властивості феромагнетиків, сегнетоелектриків, антиферомагнетиків та надпровідників із доменною структурою в околі фазових переходів I роду [970—973].

У 50-ті роки почала формуватись наукова школа учня О.І.Ахієзера, видатного фізика-теоретика Іллі Михайловича Ліфшиця, одного з творців сучасної електронної теорії металів та теорії неупорядкованих систем. Створенню школи сприяла також робота вченого у Харківському університеті, де він з 1944 до 1968 р. керував кафедрою статистичної фізики і термодинаміки, одночасно очолюючи (1941—1968 рр.) теоретичний відділ Харківського фізико-технічного інституту [384,974].

У Харкові під керівництвом І.М.Ліфшиця сформувалось багато відомих теоретиків, це – академік НАН України Л.А.Пастур, члени-кореспонденти НАН України Е.А.Канер, А.М.Косевич, І.О.Кулик, доктори наук М.Я.Азбель, М.І.Каганов, Є.В.Інопін, Ф.Г.Басс, В.П.Галайко, С.А.Гредескул, Р.Н.Гуржи, Г.Є.Зільберман, В.

М.Конторович, В.І.Пересада, В.Г.Пісчанський, Л.Н.Розенцвейг, В.В.Слезов, А.А.Слущкін, В.М.Цукерник, які сформували ядро його наукової школи в галузі фізики твердого тіла.

З ім'ям І.М.Ліфшиця пов'язано розвиток сучасної квантової теорії твердого тіла, квантової механіки та статистики, динаміки ґратки, електронної теорії металів, проблеми енергетичного спектра неупорядкованих систем, теорії квантових кристалів та фазових переходів. Важливим циклом робіт стала побудова І.М.Ліфшицем динамічної теорії реальних кристалів, розвинуто теорію дифузійно-в'язкої течії полікристалів. І.М.Ліфшицем та Л.Н.Розенцвейгом було досліджено вплив на спектр коливань ґратки вільної поверхні кристала. За подальший розвиток теорії неідеальних кристалів учні І.М.Ліфшиця А.М.Косевич та В.В.Слезов у 1978 р. одержали Державну премію УРСР.

Важливим результатом, який пізніше одержав численні експериментальні підтвердження, стала розвинута І.М.Ліфшицем та В.В.Слезовим кінетика дифузійного розпаду пересичених твердих розчинів, за допомогою якої одержано універсальний опис пізньої стадії будь-якого дифузійного процесу, включаючи кінетику макроскопічних дефектів типу включень другої фази, пор, дислокацій. Продовженням робіт з теорії енергетичного спектра реальних кристалів стало дослідження вченим у 1955—1957 рр. електронного енергетичного спектру неупорядкованих систем, що реалізують цей спектр квантових станів (зокрема, структури спектра домішкових зон елементарних збуджень у твердих розчинах [617]). У 1969 р. І.М.Ліфшиць та С.А.Гредескул, використавши флуктуаційний підхід, прийшли незалежно від М.О.Кривоглаза (1973 р.) до уявлення про флуктуони (автолокалізовані на флуктуаціях стани електронів) та розробили їх теорію.

У 70-ті роки програма в галузі теорії неупорядкованих систем, запропонована у 1964 р. І.М.Ліфшицем, була значною мірою реалізована його учнями. Так, Л.А.Пастур знайшов густину станів у ряді моделей неупорядкованих систем, розробив ефективний метод обчислення кінетичних коефіцієнтів в одномірних системах [619]. Пізніше І.М.Ліфшиць з учнями виконали ряд робіт, пов'язаних з вивченням проходження частинок та хвиль через випадково неоднорідні середовища.

Значущі роботи І.М.Ліфшиця та його наукової школи з проблем електронної теорії металів, за які І.М.Ліфшицю у 1967 р. було присуджено Ленінською премією. У 1943—1955 рр. І.М.Ліфшиць та А.М.Косевич розв'язали задачу знаходження кількісного зв'язку між параметрами осциляцій, які вимірюються, та геометрією поверхні Фермі [813,814]. Зокрема, ними у 1954 р. було встановлено зв'язок осциляцій магнітних властивостей металів з формою їх поверхонь Фермі (формула Ліфшиця–Косевича). У 1954 р. І.М.Ліфшиць та А.В.Погорелов показали, якщо поверхня має центр симетрії та якщо будь-який промінь, проведений з центра, перетинає поверхню тільки один раз, то задача про відновлення поверхні Фермі розв'язується точно [815].

Інформацію щодо електронного спектра дає також аналіз осциляцій термодинамічних та кінетичних параметрів металу залежно від зміни товщини зразка. Вперше такі осциляції були описані І.М.Ліфшицем та А.М.Косевичем у роботах, присвячених магнітній сприйнятливості тонких шарів металу [816,817]. Вони виявились пріоритетними в циклі наступних досліджень, які завершилися

реєстрацією у 1977 р. відкриття “явище осциляцій термодинамічних та кінетичних властивостей плівок твердих тіл”. У 1955 р. І.М.Ліфшиць та А.М.Косевич передбачили явище осциляційної залежності термодинамічних величин металів від будь-яких параметрів, що визначають положення рівнів енергії електронів, якщо відстань між цими рівнями дорівнює температурі або більша за неї [818]. Велике значення мала також побудова у 1956—1960 рр. теорії гальваноманітних явищ у металах у сильних манітних полях (І.М.Ліфшиць, М.Я.Азбель, М.І.Каганов, В.Г.Пісчанський).

У наступні роки у школі були виконані дослідження з теорії манітного пробою в металах (М.І.Каганов, А.А.Слуцкін), теорії нелінійних електродинамічних явищ у металах у сильних манітних полях (А.А.Слуцкін, А.М.Кадигроров), теорії високочастотних і резонансних явищ у металах. Так, М.Я.Азбелем та Е.А.Канером у 1956 р. було передбачено новий тип циклотронного резонансу у металах (резонанс Азбеля–Канера) [975]. Е.А.Канером була побудована повна його теорія, зокрема, для довільного відбиття електронів від поверхні, різних кутів нахилу манітного поля; розроблена теорія ефекту запізнення у слабких манітних полях, передбачено також ефект відсікання циклотронних резонансів, який став першим серед високочастотних розмірних ефектів. Детальна теорія циклотронного резонансу у металах побудована у 1962 р. І.М.Ліфшицем, М.Я.Азбелем та А.А.Слуцкіним [976]. Вона стала основою розвитку нового наукового напрямку — вивчення резонансних та плазмових явищ (Е.А.Канер, Ф.Г.Басс).

Слід відзначити також такі важливі результати школи І.М.Ліфшиця, як побудова феноменологічної теорії спінових хвиль у антиферомагнетиках (М.І.Каганов, В.М.Цукерник, 1958); опис комбінаційного розсіяння електромагнітних хвиль на магнонах (Ф.Г.Басс, М.І.Каганов, 1959); побудова загальної теорії дисперсії звуку без поля та у манітному полі (В.М.Конторович, 1963—1968), передбачення ряду манітоакустичних та високочастотних ефектів, які дають інформацію про спектр електронів та характер їх відбиття межею зразка (В.Г.Пісчанський, 1968—1980); створення теорії поглинання електромагнітних хвиль металами у інфрачервоній зоні спектра, де суттєву роль відіграє квантування енергії поля (Р.Н.Гуржи, 1958), запропонування механізму явищ перенесення у твердих тілах при низьких температурах (Р.Н.Гуржи, 1969), вивчення розсіяння хвиль статистично нерівною поверхнею (Ф.Г.Басс).

Значний цикл робіт школи стосується теорії надпровідності (І.О.Кулик та В.П.Галайко із співробітниками). Так, вивчаючи тунельні явища в металах та квантові когерентні явища у надпровідниках, зокрема, слабку надпровідність, І.О.Кулик ввів уявлення про вихровий характер поверхневого надпровідного шару металу в манітному полі (1969) та передбачив існування когерентних явищ у системах з порушеним недиагональним порядком (1970); побудував мікроскопічну теорію тунельних контактів Джозефсона (1965—1969) та слабких надпровідних контактів (1969—1975), теорію нелінійних явищ у мікромостиках, довів динамічну природу резистивного стану надпровідників (1966); розробив електродинаміку надпровідників, зокрема, II роду, метод кінетичних рівнянь в теорії надпровідності (1971).

Ще один напрям, у якому І.М.Ліфшиць одержав результати був новий розділ біофізики, що бурхливо розвивався у 60-ті роки – статистична термодинаміка полімерів. У даному напрямі теорії біополімерів у Харкові продовжував працювати А.М.Косевич. У його роботах було також розвинуто нелінійну динаміку магнітовпорядкованих середовищ та фотонно вдосконалено теорію солітонів у конденсованих середовищах. Роботи в галузі біофізики були продовжені І.М.Ліфшицем вже після від'їзду до Москви у 1968 р., де він очолив теоретичний відділ Інституту фізичних проблем АН СРСР і став професором Московського університету. Незважаючи на свій від'їзд, вчений протягом усього життя залишався лідером харківських теоретиків у галузі фізики твердого тіла та статистичної фізики, а керована ним школа здійснила великий вплив на загальний рівень розвитку фізичних досліджень.

Видатним вітчизняним фізиком-теоретиком і математиком, вченим широкого профілю та наукового світогляду був академік Микола Миколайович Боголюбов. У 1928—1973 рр. він працював в АН України, з 1936 до 1949 рр. був професором, завідувачим кафедрою теорії функцій у Київському університеті, в 1946—1949 рр. — деканом механіко-математичного факультету Київського університету, з 1945 по 1956 рр. завідував відділом Інституту математики НАН України, з 1966 до 1973 р. очолював Інститут теоретичної фізики АН України. З 1956 року — керівник лабораторії теоретичної фізики у Об'єднаному інституті ядерних досліджень (Дубна), з 1965 до 1989 рр. — директор інституту. У 1957 р. за його пропозицією в Інституті фізики АН України було створено лабораторію атомного ядра та елементарних частинок, керівником якої він став, а в 1966 — 1973 рр. очолював організований ним Інститут теоретичної фізики НАН України.

Обдарованість, знаущі власні наукові результати, любов до науки та відданість їй, моральний авторитет, уміння організувати роботу, особиста доброзичливість, інтерес до людей — ось риси, завдяки яким М.М.Боголюбов став засновником і керівником наукових шкіл.

Г.М.Зинов'єв зазначав, що „М.М.Боголюбов був, перш за все, надзвичайно делікатним. Він дуже жалкував, коли не в змозі був приділяти учням достатньої уваги, оскільки був дуже зайнятий, очолював численні ради, комісії і комітети”.\* А. М.Федорченко пише про такі риси Миколи Миколайовича: “Висока інтелігентність та справжній демократизм, а також зразкова наукова сумлінність. Якщо праця ґрунтувалася на його ідеї, а сам він не брав участі в ній, то заперечував своє співавторство”.\* Хоча, як підкреслювали його учні, в спільних працях генератором ідей завжди був він.

Навколо М.М.Боголюбова вже у 40—50-х рр. ХХ ст. почав консолідуватися колектив учнів, який сформувався згодом у ядро наукової школи. У розвитку теоретичної школи М.М.Боголюбова у Києві чітко простежуються три періоди, пов'язані зі зміщенням акцентів в його науковій діяльності. У першому періоді (кінець 30— початок 40-х рр.) сфера інтересів М.М.Боголюбова охоплювала галузь математичної фізики та теорії нелінійних коливань, у другому (40-ві роки — приблизно до 1965 р.) для нього було характерним прагнення до математично строгого розв'язання задач статистичної фізики, квантової теорії поля та теорії потенціального розсіяння, а для третього періоду (з 1966 р.) характерні дослідження

найбільш актуальних питань фізики високих енергій. Це був новий етап розвитку школи, організаційно пов'язаний зі створенням у 1966 р. за його ініціативою Інституту теоретичної фізики НАН України.

Слід відзначити не тільки фундаментальний внесок М.М.Боголюбова в розвиток практично всіх основних напрямів статистичної фізики, але й заслугу в становленні великого колективу учнів, що розвивають його ідеї (Москва, Дубна, Київ, Харків, Львів, Бельгія, Болгарія, В'єтнам, Німеччина, Голландія). Серед учнів і послідовників М.М.Боголюбова в галузі статистичної фізики в Україні – академіки НАН України І.Р.Юхновський, С.В.Пелетмінський, Д.Я.Петрина, О.Г.Ситенко, А.Г.Загородній, члени-кореспонденти НАН України В.П.Шелест, Е.Г.Петров, М.В.Головко, І.М.Мриглод, Ю.В.Слюсаренко, доктори наук А.В.Свідзинський, Г.М.Зинов'єв, Б.В.Струмінський, А.М.Федорченко, М.С.Гончар, В.І.Герасименко, О.Л.Ребенко. Детально внесок у статистичну фізику М.М.Боголюбова та його учнів висвітлено у підрозділах 4.3., 4.4. та пункті 5.1.6.

Методи, розроблені М.М.Боголюбовим у галузі статистичної фізики, розвивались інтенсивно у працях одного з перших учнів О.І.Ахієзера С.В.Пелетмінського, про якого О.І.Ахієзер говорив, що цей учень в такій самій мірі є учнем М.М.Боголюбова, в якій і його. В 1960—1970 рр. С.В.Пелетмінський з своїми учнями виконав дослідження, присвячені розвитку загального методу скороченого опису для широкого класу макроскопічних систем. В основу цього методу, започаткованого працями М.М.Боголюбова, покладено такі загальні принципи статистичної механіки, як принцип просторового послаблення кореляцій та ергодичні співвідношення [635]. У його працях та інших дослідників було розвинуто також підхід до побудови гідродинаміки надплинної рідини з урахуванням дисипативних процесів [646,977].

Напрямом С.В.Пелетмінського розвивав член-кореспондент НАН України Ельмар Григорович Петров, його аспірант по Харківському фізико-технічному інституту, нині завідувач відділу ІТФ НАН України. Е.Г.Петрову доводилось виступати на семінарах, керованих М.М.Боголюбовим. \* Аспірантом М.М.Боголюбова був Анатолій Вадимович Свідзинський, який розробляв методи надпровідності, досліджував кінетику електронів у металах, струмові стани в просторово-неоднорідних надпровідникових системах, побудував послідовну мікроскопічну теорію на основі методу функціонального інтегрування [978].

Учнем М.М.Боголюбова академіком НАН України академіком Д.Я.Петриною та його учнями проводились дослідження кінетичних рівнянь Боголюбова для квантової статистики, для розв'язання яких було розвинуто новий підхід як до розв'язання еволюційних рівнянь у функціональних просторах, коли система кінетичних рівнянь розглядається як єдине еволюційне рівняння в банаховому просторі послідовностей ядерних операторів, а також створено функціонально-аналітичний метод їх розв'язання. Дано строгий математичний опис систем з нескінченною кількістю частинок, доведено існування та єдність граничних функцій розподілу та їх аналітичну залежність від густини, збіжність віріальних розкладань для вільної енергії та структурних функцій змішаних систем іонно-дипольних частинок у рівноважній класичній статистичній фізиці [653].

М.С.Гончар вивчав термодинамічні властивості систем з чисто відштовхувальним потенціалом взаємодії та розвинув метод дослідження багаточастинкових систем, що знаходяться в рівновазі. На цій основі він побудував фізичну теорію опису кристалізації в моделі твердих сфер, в рамках якої розв'язав задачу побудови зведених функцій розподілу Боголюбова для випадку відштовхувального парного потенціалу взаємодії за будь-яких значень активності та температури [979].

Значний внесок у розвиток статистичної фізики було зроблено працями учня М.М.Боголюбова академіка НАН України І.Р.Юхновського та його школи (про це йдеться також у підрозділі 6.4.). Ним було розвинуто боголюбівський метод розкладання за плазменим параметром для бінарної функції розподілу та одержано загальні вирази для вищих наближень бінарної функції, що відіграють нині важливу роль при розробці теорії високотемпературної плазми, теорії електролітів, статистичної теорії металів, надплинної рідини, а також в теорії фазових переходів, коли в системі виникають далекосяжні колективні кореляції. Як природний розвиток ідей та методів М.М.Боголюбова розроблено метод колективних змінних (КЗ), в основу якого покладено використання того факту, що в системах заряджених частинок існують далекосяжні взаємодії, вперше дістав високотемпературні розкладання для систем заряджених частинок з урахуванням короткосяжних взаємодій [629].

Важливим результатом І.Р.Юхновського став також новий підхід до опису фазових переходів II роду, та розроблений метод зміщень і колективних змінних (ЗКЗ). Вчений він зумів зібрати навколо себе велику групу здібних молодих вчених, на базі якої виросла його львівська наукова школа зі статистичної фізики та Інститут фізики конденсованих систем НАН України.

Численні напрями квантової теорії поля та фізики елементарних частинок розробляли представники київської гілки теоретичної школи М.М.Боголюбова — академіки НАН України О.С.Парасюк та Д.Я.Петрина, члени-кореспонденти НАН України В.І.Фуцич та В.П.Шелест, доктори наук Г.М.Зинов'єв, Б.В.Струмінський, А.Н.Тавхелідзе, Ю.Л.Ментковський, А.М.Федорченко, В.Г.Писаренко, В.П.Гачок В. І.Ленд'єл, І.П.Дзюб та інші. Інтенсивній розробці даних проблем сприяло те, що з моменту заснування Інституту теоретичної фізики АН України в ньому було створено відділ теорії елементарних частинок, який очолив А.Н.Тавхелідзе, а з 1971 р. — В.П.Шелест. Загальне наукове керівництво роботами здійснював М.М. Боголюбов.

Так, Д.Я.Петрина запропонував метод підсумовування внесків від діаграм Фейнмана, встановив загальні критерії справедливості спектральних представлень [980,981]; Результати В.П.Шелеста пов'язано з побудовою структурно-динамічних моделей елементарних частинок, дуальної резонансної моделі та статистичного підходу в ній [730—732]; з Л.Л.Єнковськи, М.А.Кобилінським та А.І.Бугрієм він побудував клас дуальних амплітуд з мандельштамівською аналітичністю і венеціанівською границею (ДАМА) [736—739]; з Г.М.Зинов'євим, В.А.Міранським та М.І.Горенштейном розробили також статистичний підхід до вивчення сильновзаємодіючих частинок при високих енергіях. У ряді робіт Г.М.Зинов'єва було запропоновано нову інтерпретацію моделі статистичного бутстрапа та на її основі модифіковано статистичне бутстрап-рівняння [982].

Широко відомі також роботи учня М.М.Боголюбова — Б.В.Струмінського, який, зокрема, запропонував підхід, який полягає в тому, що всі покоління кварків поєднуються в один мультиплет калібрувальної групи, після порушення якої залишаються відомі слабкі взаємодії та нові взаємодії, що обумовлюють переходи між поколіннями. [743—745].

Дослідження А.М.Федорченко стосуються теорії хвильових процесів у плазмі та плазмових середовищах, фізичної акустики та акустоелектроніки. [749,750].

Результати названих учнів, кожний з яких вже сам має групу послідовників, свідчать про важливість внеску в статистичну фізику київської гілки теоретичної школи М.М.Боголюбова.



#### **6.4. Формування та розвиток наукової школи статистичної фізики І.Р. Юхновського.**

Розбудова ідей і методів статистичної фізики в Україні значною мірою пов'язана з науковою та педагогічною діяльністю академіка НАН України Ігоря Рафаїловича Юхновського, в особі якого втілювався талант видатного вченого в галузі теоретичної фізики, педагога і організатора науки, громадського діяча.

У його працях одержано низку принципово важливих результатів у галузі фізики конденсованої речовини, фазових переходів та критичних явищ, ним зроблено вагомий внесок у розвиток статистичної теорії рідин, розчинів та розплавів електролітів, металів і сплавів, неупорядкованих систем, квантових рідин, електронного газу в металах, частково збуджених систем, сегнетоелектриків, електролітичних плівок та мембран, надплинної рідини та високотемпературної плазми. До результатів І.Р.Юхновського належать метод колективних змінних у класичному і квантовому випадках для одночасного коректного врахування коротко- і далекодієвих внесків в термодинамічні та структурні властивості багаточастинкових систем, статистична теорія фазових переходів другого роду, мікроскопічна теорія розчинів електролітів. Ігор Рафаїлович є автором близько 500 наукових праць, в тому числі 7 монографій, серед його учнів більше 40 кандидатів та 21 доктор наук [630,985—990].

Надзвичайна працездатність, ґрунтовні наукові результати, вимогливість до себе і колег у виконанні прийнятих рішень, чесність та водночас демократизм, інтелігентність, скромність, доброта, чуйність, відкритість та м'якість у спілкуванні — ось риси, якими можна охарактеризувати академіка І.Р.Юхновського.

Один з учнів І.Р. Юхновського І.М.Мриглюд так писав про свого вчителя: "Протягом п'ятдесяти років Ігор Юхновський працює в галузі статистичної фізики та конденсованої теорії матерії. Результатом його діяльності в цій галузі стало створення ряду нових методів у багаточастинковій теорії класичних і квантових систем, поява численних фундаментальних результатів у фізиці конденсованого стану, а також створення Львівської школи статистичної фізики, відомої нині в багатьох дослідних центрах усього світу" [987]. „Учений з іменем, знаний організатор науки, яскравий представник справжньої львівської інтелігенції. М'який за манерою спілкування і наполегливий у рішеннях, ерудований і безмежно відданий своїй справі. Людина, котра вмiла знаходити порятунок від тимчасових невдач у важкій до запаморочення праці. Професіонал, який вмiв запалити іскорку мрії у багатьох і повести їх за собою. Особистість, яку багато критикували та обговорювали, однак попри все завжди робили це з повагою" [630,с.32].

“Слід зазначити велику заслугу І.Р.Юхновського як організатора науки. Він дуже багато працював з організації конференцій зі статистичної фізики, які проходили у 70-ті роки та пізніше. Його школа зробила суттєвий внесок у розвиток статистичної фізики рівноважного стану, який пов'язаний із дослідженням моделі Ізінга та фазових переходів у ній”, — зазначав академік НАН України С.В. Пелетмінський. \*

„Готуючи до видання вибрані праці з фізики І.Р.Юхновського, редакційна колегія та усі причетні до цієї справи працівники ІФКС НАН України отримали велике задоволення і насолоду від високого теоретичного рівня робіт та їх математичної елегантності, від фізичної інтуїції автора”, — писали про наукові праці вчителя І.М.Мриглод, М.Ф.Головко, О.Л.Іванків, М.П.Козловський, І.В.Стасюк та М.В.Токарчук [988, с.6].

„Ігор Рафаїлович не є вченим книжного типу, — зазначає його учень член-кореспондент НАН України М.Ф.Головко. — Мудрість Юхновського є природна, від самого себе — і в цьому його неповторність. Будь-який матеріал він переосмислює, дошукується до першопричин, роблячи іноді несподівані висновки. Так сталося, наприклад, коли партійне керівництво в середині 70-х років доручає йому вивчити проблеми АСУ (автоматизованої системи управління) міста. З'ясувавши зв'язок між інформацією та ентропією, Ігор Рафаїлович застосовує другий закон термодинаміки до інформаційних систем і робить висновок про нестійкість закритих систем без доступу інформації ззовні”[630, с.25].

Уміння працювати на межі можливого — ще одна риса, притаманна академіку Юхновському. Він завжди говорив, що досягти результату у фізиці можна, лише повсякденно тяжко працюючи та розв'язуючи надважкі задачі. Тільки так компенсується недостатній рівень забезпечення науковою літературою і віддаленість від столичного наукового життя. „Орієнтація на максимальний результат і обов'язковість у його досягненні, молодечий максималізм, великий життєвий досвід і наполегливість у праці — усе це ми мали змогу спостерігати багато років, і в цьому життєве кредо академіка Юхновського”, — писав про свого вчителя член-кореспондент НАН України І.М.Мриглод [630, с.34].

Це підтверджує А.В.Свідзинський, який пригадує, що одного разу при випадковій зустрічі у Львівському оперному театрі з Ігорем Рафаїловичем той виявив інтерес до питань про градієнтні перетворення і змусив вченого розповісти в антракті про сучасний стан цієї проблеми. Розмова виявилась цікавою і взаємокорисною, а надзвичайна доскіпливість І.Р.Юхновського при обговоренні, його прагнення ґрунтовного та докладного аналізу були вражаючими [630, с.39].

Активна наукова позиція І.Р.Юхновського виявляється в тому, що він планомірно пропагує одержані наукові результати, часто їздить на конференції, робить наукові доповіді, старанно до них готуючись. Причому “практично завжди, незалежно від тематики конференції, Ігор Рафаїлович у своїх виступах демонструє приклад наукового підходу до справи, що базувався на принципах статистичної фізики. До речі кажучи, саме такий підхід пізніше було покладено в основу одного з сучасних напрямів статистичної фізики, який одержав назву екзотичні задачі статистичної фізики і розвивається нині дуже активно”, — зазначав І.М.Мриглод \*.

Колег захоплює виняткова працездатність академіка І.Р.Юхновського та вміння швидко переключатись з одного виду діяльності на інший: так, зранку він міг проводити засідання фракції у Верховній Раді, потім науковий семінар у Комітеті з освіти і науки, а після цього виступати в Академії наук. Учень І.Р.Юхновського З.О. Гурський так писав про ці риси свого вчителя: „Ми, молоді, під кінець такого тривалого семінару втомлювалися і не дуже уважно сприймали доповідача, проте цього не скажеш про І.Р.Юхновського: він і під кінець прослуховування виглядав

свіжим і допитливим. А часом — по дружньому в'їдлигим із своїми запитаннями та зауваженнями. Під час кожної доповіді він щось занотовував у спеціально заведений для цього зошит, але найбільш нас вражало те, що задачі всіх своїх працівників він тримав у пам'яті. Це було навіть і тоді, коли кількість працюючих у відділі переважила за десяток та ще й додалися аспіранти. І сам І.Юхновський був, є та залишається для нас взірцем працьовитості, наукової порядності і принциповості. При такому заведеному порядку у відділі йшов природним чином відбір найздібніших, найсильніших, найвитриваліших [630, с.130—131]”.

Надзвичайною працездатністю у житті І.Р.Юхновського відзначається період наприкінці 70-х років ХХ століття, коли він працював над задачею розрахунку статистичної суми тривимірної моделі Ізінга – однієї з найактуальніших проблем тогочасної теоретичної фізики. Він щоденно працював в інституті з 10 до 18 години, а потім з 20 до 23 години вдома. Такий режим дав змогу вийти на видатний науковий результат — оригінальний метод обчислення термодинамічних властивостей тривимірної моделі Ізінга.

Можна навести ще один приклад інтенсивнішої роботи академіка І.Р.Юхновського — підготовка за три тижні відпустки 1984 р. рукопису монографії з теорії фазових переходів, і протягом року — підручника з квантової механіки у 1994 р. (при тому, що можливість працювати над ним була тільки у вихідні дні).

„Можу без перебільшення та словесних гіпербол заявити, що за всіма його науковими здобутками, визнаннями, нагородами стоїть насамперед важка, часом дуже виснажлива праця, виняткова цілеспрямованість, воля і наполегливість”, - писав про свого вчителя З.О.Гурський [630, с.134].

Загальна методологія роботи академіка Юхновського як вченого прослідковується в його науково організаційній та державницькій діяльності. Чітке розуміння проблеми, постановка задачі, комплексний пошук розв'язків, їх всебічний аналіз з точки зору шляху розв'язання та можливих наслідків, прийняття рішення і наполеглива його реалізація — такий алгоритм його роботи.

І.Р.Юхновський народився 1 вересня 1925 р. у селищі Княгинин Рівненської обл. У місті Кременець на Тернопільщині закінчив лицей. На формування його дитячого та юнацького світогляду вплинув дід — священник і лікар. Друга світова війна застала І.Р.Юхновського у Кременці. У 1944 р. він був мобілізований, пройшовши з військами через Західну Україну, Польщу, Австрію, повернувся з війни і у 1946 р. поступив на фізико-математичний факультет Львівського університету, який у 1951 р. закінчив з відзнакою та цього ж року розпочав навчання в аспірантурі. Достроково підготував і у 1954 р. захистив кандидатську дисертацію на тему „Бінарна функція розподілу для систем взаємодіючих частинок” . У цьому ж році І.Р.Юхновський почав працювати доцентом кафедри теоретичної фізики, у 1959—1969 рр. став завідувачем цієї кафедри (з 1967 — професор), у 1965 р. захистив докторську дисертацію „Статистична теорія систем заряджених частинок”. Читав курси термодинаміки, статистичної фізики та спецкурс “Електронна теорія металів”, був членом вчених рад Львівського університету та Львівського політехнічного інституту, декілька років поспіль очолював Державну екзаменаційну комісію з захисту дипломів студентами фізичного факультету. Нагороджений пам'ятними знаками ”Отличник народного образования СССР” та

“Відмінник народної освіти УРСР”.

Як завідувач кафедри теоретичної фізики Львівського університету І.Р. Юхновський багато уваги приділяв роботі з аспірантами, передаючи здібним молодим людям, які мали хист і бажання займатися теоретичною фізикою, наявний методологічний багаж та розширяючи коло задач для досліджень. Саме успіхи науковців Львівського університету в галузі статистичної фізики під керівництвом І.Р. Юхновського привели до організації у 1969 р. за його ініціативою та науковою доповіддю першої академічної установи фізичного профілю на Західній Україні — Львівського відділу статистичної теорії конденсованих станів Інституту теоретичної фізики АН України, який очолив І.Р. Юхновський. Спочатку штат новоствореного відділу складався з двох осіб: завідувача та старшого лаборанта, тому постало завдання створити конкурентоспроможний науковий колектив. За короткий час І.Р. Юхновський зумів зібрати групу молодих, талановитих науковців з числа кращих випускників фізичного факультету, які застосовували напрацьовані ним методи до вирішення конкретних завдань теорії конденсованої речовини. У 1980 р. на базі цього відділу було створено Львівське відділення Інституту теоретичної фізики АН України, яким вчений керував до 1990 р., коли очолив створений на базі цього відділення Інститут фізики конденсованих систем НАН України.

Організації відділення сприяв приїзд у 1980 р. до Львова для ознайомлення з діяльністю наукових інститутів Західного наукового центру Президента АН СРСР А.П.Олександрова та Президента АН УРСР Б.Є.Патона. Хоча для виступу керівнику такої малої структурної одиниці, як відділ, було надано мало часу, доповідь І.Р. Юхновського про здобутки відділу та перспективи роботи виявилася настільки ґрунтовною, що А.П.Олександров дав добро на створення Львівського відділення Інституту теоретичної фізики АН УРСР. І.Р.Юхновського призначають заступником директора ІТФ АН УРСР з наукової роботи і керівником Львівського відділення цього інституту у складі трьох відділів, які очолюють І.Р.Юхновський та його учні — І.О.Вакарчук і М.Ф.Головко.

Важливість одержаних результатів у галузі статистичної фізики в цей період було відзначено також в Постанові Президії АН УРСР № 110 від 12 березня 1980 р. “Про дослідження в галузі статистичної фізики” [991]. В ній, зокрема, йшлося: “Заслухавши доповідь члена-кореспондента АН УРСР І.Р.Юхновського “Про дослідження в галузі статистичної фізики, що ведуться у Львівському відділі Інституту теоретичної фізики АН УРСР, Президія АН УРСР відзначає, що колектив відділу досяг значних успіхів у галузі фундаментальних досліджень зі статистичної фізики. Побудована статистична теорія розчинів електролітів, в якій на мікроскопічному рівні враховані взаємодії між усіма частинками. Одержано аналітичний опис явища дисоціації молекул, сольватацій іонів, розподілу іонів і молекул розчинника в середовищі і на границях розділу фаз. Розрахунок тримірної моделі Ізінга дозволив створити основи мікроскопічної теорії фазових переходів.

Визначним науковим досягненням відділу стала побудова кількісної теорії гелію. Роботи учених Львівського відділу з цих напрямів займають провідне місце в СРСР і у світі.

У відділі також ведуться дослідження з електронної теорії металів та вирішується важлива для техніки проблема впливу водню на міцність металу.

Побудована кластерна модель сегнетоактивних сполук. За результатами досліджень опубліковано понад 250 наукових праць у виданнях АН УРСР, АН СРСР і в міжнародних журналах, виходить у світ монографія.

Відділ проводить спільні дослідження з різними інститутами та організаціями країни по 9 договорах про творчу співдружність. На основі одержаних результатів сформульовані рекомендації про структуру мембрани для очищення води від іонів, виконано принципіально новий розрахунок явища радіолізу, розраховані фізичні характеристики сегнетоелектриків типу  $KD_2PO_4$  і ряд інших. Протягом 10 років у відділі підготовлено 18 кандидатів наук та подано до захисту дві докторські дисертації, успішно завершується робота ще над трьома докторськими дисертаціями. На базі відділу щорічно проводяться всесоюзні і республіканські конференції і школи з проблем статистичної фізики. Разом з тим у роботі відділу є труднощі, які істотно стримують дальший розвиток наукових досліджень в галузі статистичної фізики. Має місце значний відтік з відділу кандидатів наук, що не дозволяє розширити фронт досліджень таких проблем, як теорія електролітичних плівок і мембран, теорія металів і сплавів.

Президія Академії наук постановляє:

1. З метою дальшого розвитку наукових досліджень у галузі статистичної фізики і координації зусиль на найбільш актуальних напрямках і прискорення впровадження наукових розробок у виробництво, створити з 1 квітня 1980 р. Львівське відділення статистичної фізики Інституту теоретичної фізики АН УРСР у складі трьох відділів:

- статистичної теорії конденсованих середовищ;
- квантової статистики;
- теорії розчинів.

2. Основними науковими напрямами відділення вважати:

- теорія фазових переходів;
- теорія рідкого стану і електролітів;
- статистична теорія металів, сплавів і стекл.

3. Зобов'язати Інститут теоретичної фізики АН УРСР привести наукові напрями відділів у відповідність з науковими напрямами відділення до ІV кварталу 1980 р. в установленому порядку оголосити конкурс на заміщення посад завідуючих відділами квантової статистики і теорії розчинів.

4. Встановити, що фінансування Відділення статистичної фізики проводиться окремим рядком по Інституту теоретичної фізики АН УРСР.

5. Надати відділенню статистичної фізики право мати штамп і круглу печатку.

6. Призначити члена-кореспондента АН УРСР І.Р.Юхновського керівником Львівського відділення статистичної фізики ІТФ АН УРСР, залишивши його завідуючим відділом статистичної теорії конденсованих станів. Надати керівнику відділення мати право вести заключення господарських договорів з тематики відділення.

7. Дозволити ІТФ АН УРСР ввести до штатного розпису додаткові посади заступника директора по науковій роботі – керівника відділення, бухгалтера та старшого інспектора.

8. Доручити Науково-організаційному та Фінансово-плановому відділам Президії АН УРСР разом з ІТФ АН УРСР у двотижневий строк підготувати на розгляд Бюро президії АН УРСР питання про додаткове фінансування відділення статистичної фізики ІТФ АН УРСР”.

Далі дослідження зі статистичної фізики і теорії конденсованої речовини проводилися (і проводяться надалі) у рамках відомчих тем НАН України, конкурсної тематики Державного фонду фундаментальних досліджень і Міністерства освіти і науки України, а також інших фондів, в тому числі і міжнародних. Координація цих досліджень здійснювалася до 2000 року в рамках діяльності Наукової ради з фізики твердого тіла, а з 2000 року в рамках Наукової ради з фізики м'якої речовини (при якій є секція статистичної фізики, керована І.Р. Юхновським), які функціонують при Відділенні фізики і астрономії НАН України.

Через 10 років у 1990 р. на базі Львівського відділення Інституту теоретичної фізики було створено новий Інститут фізики конденсованих систем НАН України ( Постанова Президії НАН України №213 від 7 вересня 1990 р. “Про створення у м. Львові Інституту фізики конденсованих систем АН УРСР” [991]). Головними напрямками його наукової діяльності стали розробка аналітичних методів статистичної фізики на основі методу колективних змінних, дослідження фазових переходів, неупорядкованих систем, рівноважних та нерівноважних властивостей твердих, рідких та аморфних систем, складних кристалічних сполук із структурними і сегнетоелектричними фазовими переходами, а також комп'ютерне моделювання фізичних процесів і розрахунки основних фізичних характеристик конденсованих систем.

У 1972 р. І.Р.Юхновського було обрано членом-кореспондентом, у 1982 р. — академіком НАН України. У 1990—1998 рр. він працював головою Західного наукового центру НАН України. Одним із позитивних наслідків діяльності на цьому посту стало відкриття філій вищих учбових закладів та наукових інститутів у Тернополі, Чернівцях, Ужгороді, Луцьку. В різні роки вчений був головою секції статистичної фізики та проблемних рад з фізики твердого тіла і біофізики АН УРСР, членом Комісії з координації науково-дослідних робіт з проблеми “Фізика рідкого стану” при Науково-технічній раді Міністерства Вищих навчальних закладів СРСР, редактором фізичного збірника Львівського університету, членом редколегій „Українського фізичного журналу”, міжвідомчих збірників „Фізика рідкого стану” та „Фізика багаточастинкових систем”, головою редколегії збірника „Фізика конденсованих систем”, видавцем якого є Інститут фізики конденсованих систем НАН України. У 1986 р. за цикл робіт “Математичні методи дослідження систем з спонтанно порушеною симетрією” йому була присуджена премія ім.М.М.Крилова НАН України.

Високий рівень робіт в галузі статистичної фізики, значне місце в якому займали праці І.Р.Юхновського та його послідовників, за науковою доповіддю М.Ф. Головка було відзначено спеціальною постановою Президії НАН України № 143 от 31.05.2000 “Про стан досліджень з фізики рідкого стану в Україні”, у якій було прийнято рішення вважати фізику рідин, рідких кристалів і макромолекулярних систем одним з пріоритетних напрямів фундаментальних досліджень в установах відділень фізики і астрономії та хімії НАН України, а також утворити при Президії

НАН України Наукову раду з проблеми “Фізика рідкого стану”. В складі цієї ради було створено секцію статистичної фізики [991]. Діяльність ради висвітлено у книзі “Наукова рада з проблеми ”Фізика м’якої речовини”. Короткий підсумок діяльності у період до 2006 р.” [992].

Цікаві спогади І.Р.Юхновського про навчання в університеті. „Я дуже сильно вчився. То страшно, як я вчився, — писав він. — Кожну лекцію конспектував, намагався по кілька разів перевірити себе, чи знаю її: ходив довкола стола і вголос розповідав матеріал, аж поки не досягав логічної ясності” [630, с.36].

Як учений І.Р.Юхновський сформувався під безпосереднім впливом праць та ідей М.М.Боголюбова. З новими результатами, одержаними М.М.Боголюбовим у галузі статистичної фізики, познайомив студентів-теоретиків Львівського університету, в тому числі і І.Р.Юхновського, професор А.Ю.Глауберман. Він прочитав два спецкурси на основі монографій М.М.Боголюбова, що радикально змінили обличчя статистичної механіки: "Проблеми динамічної теорії в статистичній фізиці" (1946 р.) та "Лекції з квантової статистики" (1949 р.)

Ігор Рафаїлович був дуже захоплений першою книгою, тим більше, що М.М. Боголюбов залишив відкритою проблему дослідження систем за наявності кулонівської та короткосяжної взаємодії. Значні математичні труднощі, на які вказував Боголюбов, спонукали молодого вченого до активних досліджень. У подальшому, розвинувши потужний метод колективних змінних, Ігор Рафаїлович побудував теорію подібних систем.

Хоча інтереси багатьох випускників—фізиків Львівського університету після успішного подолання розбіжностей у квантовій електродинаміці змістилися у квантову теорію поля (цьому сприяла підтримка у Львові цієї тематики авторитетним фізиком Василем Степановичем Міліянчуком), проте І.Р.Юхновський наполегливо і послідовно продовжував розробляти задачі статистичної фізики. Свою наукову діяльність у 50-х роках ХХ століття він розпочав із застосування методу розвинень М.М.Боголюбова за плазмовим параметром для розрахунку бінарних функцій розподілу систем заряджених частинок. Були одержані загальні вирази для вищих наближень бінарної функції, які містили у собі замість вихідних потенціалів кулонівської взаємодії уже екрановані потенціали, тобто давали можливість коректно врахувати ефекти далекодії. Ці результати, покладені в основу кандидатської дисертації, більше як на десятиліття випередили аналогічні дослідження зарубіжних вчених, відомих нині як техніка  $\gamma$ -впорядкування (наприклад, <sup>1023,1024</sup>). У подальших дослідженнях розвинутий метод був застосований при розробці теорії високотемпературної рівноважної плазми, теорії розчинів сильних електролітів, а також теорії фазових переходів в системах з далекосяжними колективними кореляціями.

М.Ф.Головко згадував, що, написавши дисертацію, Ігор Рафаїлович поїхав до М.М.Боголюбова, якому робота сподобалась і він погодився бути опонентом на захисті. З того часу доброзичливі наукові та чисто людські стосунки поєднували цих видатних особистостей. Так, саме за порадою М.М.Боголюбова І.Р.Юхновський розвиває техніку функціонального диференціювання для коректного і рівноправного врахування короткосяжних і далекосяжних взаємодій, консультиється з М.М. Боголюбовим при написанні докторської дисертації [630, с.13]. Особливо тісні

наукові контакти виникають між ними, коли в 1969 р. І.Р.Юхновський очолив відділ керованого М.М.Боголюбовим Інституту теоретичної фізики НАН України. М.М. Боголюбов кілька разів приїжджав до Львова, а І.Р.Юхновський був постійним учасником конференцій, які організовував М.М.Боголюбов у Дубні, Москві, Києві, Баку, Римі. Ігор Рафаїлович завжди підкреслює свою нерозривну приналежність до наукової школи М.М.Боголюбова.

Заслугою академіка І.Р.Юхновського є не тільки плідна наукова, а й інтенсивна педагогічна діяльність, результатом якої стало формування у Львові потужного колективу дослідників у галузі статистичної фізики. Ігор Рафаїлович говорив: "Щоб мати учнів, треба спочатку самому напрацюватись, а тоді розроблений напрямок передати учням. Після цього слід братись за вирішення нових проблем" [630,с.13].

Першими аспірантами І.Р.Юхновського в Академії наук стають Р.М.Петрашко, І.О.Вакарчук, П.П.Костробій. Одночасно Ігор Рафаїлович продовжує читати лекції в університеті, де в нього з'являються нові аспіранти М.В.Ваврух, Ю.К.Рудавський, які після закінчення аспірантури переходять працювати у Львівський відділ Інституту теоретичної фізики. Із задачами релятивістичної фізики у колектив І.Р.Юхновського входить також Р.П.Гайда із своїми учнями.

Вагомий внесок у становлення Інституту фізики конденсованих систем НАН України та у розвиток статистичної фізики конденсованої речовини було зроблено також наступним поколінням учнів І.Р.Юхновського — членами-кореспондентами НАН України М.Ф.Головко та І.М.Мриглодом, докторами фізико-математичних наук З.О.Гурським, Р.Р.Левицьким, М.В.Токарчуком.

І.Р.Юхновський завжди серйозно ставився до підбору учнів. І.М.Мриглод згадує, як це було з ним: "У науковій університетській бібліотеці до мене, як старости групи "теоретиків", підійшов один із "юхнівців" — так інколи жартома називали тих, хто працював тоді під началом члена-кореспондента І.Р.Юхновського у новоствореному Львівському відділенні статистичної фізики Інституту теоретичної фізики АН УРСР. Це був Михайло Токарчук — тоді ще молодий спеціаліст, а нині доктор фізико-математичних наук, завідувач відділу. Мова пішла про те, що він отримав доручення від професора Юхновського запросити до Відділення (першого на Західній Україні академічного підрозділу в галузі фізики) кращих із майбутніх випускників фізичного факультету. ...Найбільше мене вразило при тій розмові те, що Михайло Токарчук мав з собою список, складений особисто Юхновським на основі попереднього досвіду його спілкування із студентами під час викладання квантової механіки та складання відповідного іспиту" [630,с.33]. І.М. Мриглод "...із великою приємністю відгукнувся на пропозицію Ігоря Рафаїловича виконувати у нього спершу дипломну роботу, а потім і роботу над кандидатською дисертацією. Відповідно, після завершення навчання в університеті був зарахований на посаду провідного інженера до Львівського відділення статистичної фізики Інституту теоретичної фізики, який в той час очолював академік О.С.Давидов. Творча атмосфера відділення, де працювали тоді в основному порівняно молоді науковці, сприяла визначенню кола подальших інтересів — статистична фізика і об'єкти, які є предметом її вивчення" \*.



Говорячи про головні риси І.Р.Юхновського як вчителя, учні відзначають, що він надзвичайно щедрий. Свої ідеї легко передає учням, підтримує їх, надихає на сміливість розвивати нові наукові напрями. Вміє оцінити і підтримати успіх своїх учнів, вважаючи, що учений-початківець обов'язково повинен одержати якнайшвидше свій перший науковий результат, щоб бути впевненим у своїх силах. У своїх вихованців він найбільше цінує ініціативу та індивідуальність, але таку, яка не зводиться до розмов, за нею повинна стояти активна позиція автора. Характеризуючи свого вчителя, І.М.Мриглод зазначав ті якості І.Р.Юхновського, які сприяли формуванню навколо нього потужної наукової школи: ”Життєлюбність, моральність, простота у спілкуванні, велика працездатність і наполегливість у досягненні мети, вміння запалити власним прикладом і захопити процесом дослідження молодших колег і учнів” \*.

“Хоча з 1990 року І.Р.Юхновський зайнятий політикою, він не втрачає інтересу до наукових досліджень своїх учнів до цього часу. Нещодавно, у січні 2007 року, при обговоренні однієї з кандидатських дисертацій в ІФКС він запропонував нову цікаву ідею, яку під керівництвом М.П.Козловського зараз успішно розвивають”, — писав М.Ф.Головко \*.

Учні завжди підкоряє особлива манера спілкування І.Р.Юхновського. З будь-якою людиною Ігор Рафаїлович завжди розмовляє однаково, кожен почуває себе з ним спокійно і просто, для кожного він знайде теплі задушевні слова, розмова з ним творчо збагачує. Розмовляти з Ігорем Рафаїловичем про фізику і легко, і складно. Легко тому, що він надзвичайно скромний, применшує свої знання, а найулюбленіша фраза, з якої він починає розмову, така: "Поясни мені, чому...". Складно тому, що він намагається іти до глибин, до вичерпності розуміння.

“Для мене, як і для всіх своїх учнів, І.Р.Юхновський є величезним авторитетом. Спілкується з учнями завжди спокійно, доброзичливо, ніколи не підвищує голосу. Я завжди намагалась розв'язати поставлену переді мною задачу якнайкраще”, — писала учениця Ігоря Рафаїловича О.В.Пацаган \*.

І.М.Мриглод додає: ”Усе будується на простих і відвертих стосунках. Ігор Рафаїлович — терплячий і вимогливий вчитель, який завжди був настроєний допомогти своїм учням. У тих нечисленних випадках, коли йому було важко відразу зорієнтуватися у технічних деталях чи новітніх віяннях, з якими прийшов до нього учень, він ніколи не соромився визнати те, що не дуже добре знає про що йдеться і говорив: “Навчи мене”. Однак, при цьому часто бувало й так, що він починав згадувати якусь віддалену аналогію із чимось подібним і ситуація могла миттєво змінитися — учень бачив, що в цій аналогії і є, мабуть, вихід. За технічними деталями і надто мудрими формулюваннями він завжди намагався побачити суть проблеми і поділитися з учнем. Дуже імponує також те, що спілкування з ним ніколи не йшло по лінії “вчитель—учень”, а нагадувало скоріше розмову двох колег – досвідченого і мудрого та молодого і недосвідченого. Також думаю, що для Ігоря Рафаїловича важливо бачити не лише чисто формальну професійну основу для спілкування, а й особистість учня і його спрямованість відігравали не останню роль при цьому” \*.

Далі він так пише про атмосферу в колективі, керованому І.Р.Юхновським: ”Академік Ігор Юхновський, як науковий керівник і лідер установи, вирізнявся

серед інших, насамперед, незрозумілим поєднанням двох протилежностей — демократизм в усьому і максимальна вимогливість до кожного в реалізації уже прийнятих рішень. Перше сильно притягувало людей, настроювало на майже приятельські відносини і дозволяло легко вести діалог чи то на наукові, чи на будь-які інші теми. Друге іноді відштовхувало окремих з нас, бо вимагало уже праці, часу, великого терпіння, а подекуди і боротьби із собою. Ти міг мати інший погляд на предмет, але мав це довести, виконавши усе необхідне і продемонструвавши явно, що є кращий варіант. Пустопорожні балачки тут не проходили. Водночас вражав демократизм Юхновського” [630,с.33—34].

І.Р.Юхновський завжди виявляє турботу та зацікавленість до своїх учнів. Так, М.Ф.Головка пише, що у спілкуванні з учнями переважають такі його риси, як доброзичливість, вимогливість, уважність та щедрість \*. ”У 1965 році я вступив до аспірантури при кафедрі теоретичної фізики Львівського університету і був щасливий, що моїм науковим керівником погодився стати І.Р.Юхновський. З тих пір ось уже 35 років моє життя тісно пов'язане з ним. У тому, що мені вдалось досягнути за цей час, я зобов'язаний незмінній увазі та турботі, яку виявляв і виявляє до мене Ігор Рафаїлович не тільки як вчитель, а надзвичайно добра і чуйна людина”, — згадує М.Ф.Головка [630,с.12].

З цими словами співзвучні спогади учня І.Р.Юхновського З.О.Гурського. „У 1964 р. я перевівся на четвертий курс фізичного факультету Московського університету. І от влітку 1965 р., повернувшись з Москви до Львова на канікули, я зустрів біля фізичного факультету по вул. Ломоносова Ігоря Рафаїловича. Він підійшов до мене, привітався, розпитував про навчання в Московському університеті. Я був дуже здивований, що він запам'ятав мене з виступів на студентських наукових конференціях і цікавиться мною”[630, с.129].

Турбота про популяризацію результатів учнів виявлялась також в тому, що він на конференції завжди намагається взяти з собою когось із своїх вихованців, в будь-якому науковому виступі чи в розмові обов'язково згадає учнів, з якими він отримав той чи інший науковий результат. Наприклад, Ігор Рафаїлович постійно знайомив М.М.Боголюбова із тематикою докторських дисертацій своїх учнів (І.О.Вакарчука, М.Ф.Головка, Ю.К.Рудавського, З.О.Гурського та інших).

При цьому учні кажуть, що з ним завжди повчально обговорювати почуте на наукових зустрічах, а у вільний час цікаво походити по місту, відвідати церкву, костел, музеї. І.Р.Юхновському подобаються усі міста, в які він приїжджає, але особлива любов у нього до Львова та Києва. Коли хтось з шановних гостей приїжджає до Львова, Ігор Рафаїлович вважає, що гостю обов'язково слід показати місто. Причому кожна така екскурсія не схожа на попередні.

„Особливо мені запам'яталась наша перша спільна поїздка в Німеччину (1986) у рамках договору про співробітництво з Інститутом хімії товариства Макса Планка, м. Майнц. Ми пробули разом декілька тижнів. Свої враження Ігор Рафаїлович занотовував, щоб потім передати колегам та знайомим (слід сказати, що вже тоді до всього побаченого він ставився з державницьких позицій, вважаючи, що багато з того, що є в Німеччині, могло б бути використане в Україні: він придивлявся до стану доріг в Німеччині, як працюють німецькі робітники і т. д.). Крім Майнца, побували і в Мюнхені. З ініціативи Ігоря Рафаїловича в Мюнхені ми відвідали музей

науки і техніки, від якого в мене й досі залишилось незабутнє враження”, — пригадував член-кореспондент НАН України М.Ф.Головко [630,с.24].

Першим етапом роботи І.Р.Юхновського з учнями була постановка задачі. Ігор Рафаїлович вважав, що задачу треба ставити складну (але таку, яку можна розв'язати) і формулювати її "з перших принципів". Як один із принципів вибору задач для своїх учнів, академік І.Р.Юхновський використовував критерій їх фундаментальності. Так, він часто наголошував, що задача має бути нетривіальною і складною, вона має відкривати широку проблематику і створювати перспективу на роки.

„Така постановка задачі давала свідоме розуміння проблеми, запал на все життя. Саме такий глибинний підхід до проблеми дав змогу І.Р.Юхновському та його учням зайняти провідні позиції в ряді наукових галузей. Пам'ятаю, Ігор Рафаїлович говорив: "Це в Москві можуть дозволити собі розв'язувати прості задачі. Ми, позбавлені достатньої інформації, повинні копати глибоко, робити складні розрахунки, за які не беруться інші наукові групи" [630,с.18]. "Постановка задачі на основі перших принципів статистичної фізики, строгість, точність математичних формулювань, ясність зроблених наближень, доведення досліджень з формул до графіків та використання отриманих результатів для інтерпретації експериментів", такі головні риси стилю та методів досліджень школи І.Р.Юхновського, — писав М.Ф.Головко \*.

Слід відмітити ще одну рису І.Р.Юхновського як педагога. Він вважав, що в науці не повинно бути "модних" і "немодних" тем. Наприклад, М.Ф.Головко пригадував, як на семінарі доповідав про свою дисертацію викладач Івано-Франківського педінституту І.М.Кітченко, робота якого торкалась теплового розширення твердих тіл. "Мені здавалось, що тематика не надто цікава, не зовсім сучасна. Однак Ігор Рафаїлович не тільки підтримав цю роботу, а й закликав автора продовжувати свої дослідження, не переходячи, як він сказав, на якусь більш модну тематику. В мене також було в певний момент бажання змінити предмет дослідження і я вдячний Ігорю Рафаїловичу, що він не дозволив мені цього зробити", — згадував він [630,с.19].

У колективі, керованому І.Р.Юхновським, були введені ним та діяли чіткі правила роботи з учнями та перевірки їх звітності. М.Ф.Головко так писав про це: "Мені поталанило бути серед перших вихованців І.Р.Юхновського. Коли в 1966 році після річного перебування в армії я приступив до навчання в аспірантурі, в Ігоря Рафаїловича було фактично 6 учнів, з якими він працював. Це Л.Ф.Блажисевський, який щойно закінчив аспірантуру, М.В.Ваврух, який в цей час був асистентом кафедри, аспірант Г.І.Бігун, я та ще два німецькі стажисти з Ростоцького університету Н.Альберент і Г.Крінке. Останній працює нині професором в Регенсбурзькому університеті і контакти з ним не перериваються. Крім того, ще час від часу з Луцького педінституту приїздив перший аспірант А.О.Некрот, який закінчив аспірантуру раніше і готував до захисту дисертацію. Були ще студенти, які готували під керівництвом І.Р.Юхновського свої дипломні та курсові роботи.

З кожним із нас Ігор Рафаїлович зустрічався один-два рази на тиждень. Був складений спеціальний графік: кожному відводився певний час. Однак часто бувало так, що зустрічі затягувались і я мав можливість послухати розмову Ігоря

Рафаїловича з іншими. Іноді ці зустрічі відбувалися на кафедрі, інколи вони переносились на Коцюбинського, 11, де він проживав” [630,с.17].

Принциповою в роботі з учнями стала також втілена І.Р.Юхновським ідея "прослуховування" колективу, на якому кожен працівник розповідає про свої останні результати і плани на найближчий період. Такі "прослуховування" відбувалися щоквартально і не давали можливості для розслаблення та самозаспокоєння, вони згуртовували колектив, оскільки всі знали, що хто робить. Вони давали можливість, незважаючи на невпинне збільшення колективу, бути керівнику в курсі наукової роботи кожного працівника.

„Стиль праці і керування відділом був незвичайним. У нас не було жорсткої, паличної дисципліни чи певних часових рамок приходу на роботу. Кожному працівникові відділу Ігор Рафаїлович формулював тему роботи, конкретні завдання, і кожні три місяці у нас відбувались „прослуховування”. Проходили вони, як правило, по середах і починалися десь о 10 годині ранку. Кожен працівник відділу виходив до дошки і розповідав, що йому вдалося зробити за цей час. Така доповідь тривала від 30 хвилин до однієї години, а інколи, якщо виникали запитання, і довше. Неважко зрозуміти, що таке прослуховування затягувалось до 15—16 годин, а зрідка переносилось і на наступний день, четвер. ...Так що не працювати, бити байдики хоча б кілька тижнів не було найменшої змоги, бо це відразу виявилось б на черговому прослуховуванні”, — писав про свій досвід у роботі відділу З.О.Гурський [630,с.130].

Наступна важлива ділянка виховання учнів — це робота наукового семінару, що відбувався кожного четверга та відігравав важливу роль у становленні школи. “Відвідування цього наукового семінару було обов’язковим для кожного наукового працівника і аспіранта”, — писала учениця І.Р.Юхновського О.В.Пацаган.\* На семінарі Ігор Рафаїлович завжди виявляв доброзичливість, уважне ставлення до праць своїх учнів, вміння їх оцінити, підтримати, виявити нові проблеми. На перший погляд прості питання, задані ним, завжди містили у собі прихований зміст проблеми, що розглядається, і давали змогу краще її зрозуміти. Ігор Рафаїлович вимагав мати ясно сформульовані математичні перетворення та наближення, а тому на семінарах завжди було цікаво. Питання обговорювалося всебічно, з увагою до найменших подробиць, що могло тривати кілька годин. Саме чітка постановка проблеми та акуратна математична культура, культивована в колективі, стала в подальшому однією з характерних рис створеної ним школи.

„Особливо мені хочеться сказати про семінари цього інституту, — писав А. Свідзинський, — бо стиль їх роботи несе на собі відбиток висококультурної і шляхетної особистості директора інституту. Пишу про це тому, що в своєму житті відвідував багато фізичних семінарів, серед них відомі московські. Для багатьох з них характерне бажання принизити доповідача, довести йому його нікчемність, принаймні — відчути власну неповноцінність. Такі риси стилю насправді лишали враження культурної неповноцінності активу учасників попри високий суто науковий їх рівень.

Цього і сліду немає у Львові, і ти завжди відчуваєш, що знаходишся не просто в науковому осередку України, а передусім у висококультурній установі, яка випромінює гуманний дух українського менталітету в його найкращих проявах.

Доброзичливість і повага до доповідача разом з уважним і справедливим аналізом усіх аспектів його доповіді — ось що визначає атмосферу семінару” [630,с.40].

Така доброзичлива критика притягує на семінар до І.Р.Юхновського багатьох учених: з виступами приїжджають дослідники з Києва, Харкова, Одеси, Чернівців, Кишинева, Москви, Дубни, Ленінграда, Новосибірська та інших міст колишнього Радянського Союзу. Не перериваються контакти з Ростоцьким університетом, устанавлюються нові міжнародні зв'язки з ученими з ФРН, США, Канади, Франції, Чехословаччини, Угорщини та інших країн.

Важливим моментом підвищення кваліфікації послідовників І.Р.Юхновського ставали також його лекції, до яких він дуже старанно готувався. Протягом майже 30 років на фізичному факультеті Львівського університету він читав лекції з квантової механіки, статистичної фізики та окремих розділів теоретичної фізики. Ці лекції виявлялись прикладом того, наскільки дохідливо та зрозуміло можна викладати найскладніші розділи теоретичної фізики.

Приходив Ігор Рафаїлович на лекцію зазвичай з дому, обдумуючи все ще раз дорогою. Іноді запізнювався на кілька хвилин і не любив, щоб в цей час його відволікали. Ніколи не користувався конспектом, будь-яка формула на дошці виводилась. На лекції І.Р.Юхновського, крім студентів, завжди приходили аспіранти, дослідники, а також викладачі університету. Ігор Рафаїлович підкоряв своєю барвистою мовою, інтелектуальністю, ясністю та чіткістю викладу матеріалу. „Заняття як одкровення”, — так відзивались учні про ці лекції.

„Вперше я зустрів його на семінарі для студентів фізичного факультету, які виявили бажання займатись теоретичною фізикою. — пригадував З.О.Гурський. — Як студент другого курсу, я не все зрозумів, але добре пам'ятаю, що тоді мене сильно вразили логічність і послідовність викладу Ігоря Рафаїловича [630,с. 129].”

„Стимулювало й те, що курс квантової механіки, який він читав, вважався одним із ключових у фаховій підготовці фізиків і був свого роду перевалом, після якого можна було вважати себе майже фізиком. Водночас, слід відмітити, що у викладі професора Юхновського цей предмет для моїх одногрупників "фізиків-теоретиків" звучав, як пісня” [630,с.33]. “Цей курс (як і особа лектора) був легендарним і більшість студентів-теоретиків із задоволенням його відвідували. Саме за таких обставин я зустрів людину, яка в подальшому мала величезний вплив на мою долю, — писав І.М.Мриглод \* .

Значну роль у формуванні наукової школи І.Р.Юхновського відіграли також численні конференції та наради, які проводив колектив під його керівництвом. Ще в 1969 р. він домовляється з М.М.Боголюбовим про організацію у Львові регулярних нарад з актуальних проблем статистичної фізики (1969, 1970, 1971, 1972, 1975, 1982). Пізніше тут проводиться всесоюзна школа з теорії твердого тіла, Міжнародна школа з фізики іонної сольватації (1983), Другий радянсько-італійський симпозіум з математичних проблем статистичної фізики (1985), Всесоюзна конференція “Сучасні проблеми статистичної фізики” (1987), робочі наради “Aqueous solutions: The problems of radioactive impurities (1997)” та «Modern problems of soft matter theory» (2000), а також інші заходи, які сприяли зростанню наукового авторитету школи І. Р.Юхновського. “Дещо модифікувалися назви цих зібрань, але їх учасниками залишалися найвідоміші фахівці з Росії (М.М.Боголюбов та його послідовники),

України (представники Києва, Харкова, Одеси та інших міст), Молдови (брати Москаленки і їх учні) та ін. Згодом ці наукові форуми почали відвідувати також і вчені поза меж колишнього СРСР. Традицію таких конференцій, яку було частково припинено наприкінці 80-х, нам вдалося відновити у 2005 році, коли Ігор Рафаїлович святкував свій 80-літній ювілей.

Окрім цього циклу конференцій за ініціативи І.Р.Юхновського започатковані Чорнобильські читання (раз у 5 років фахівці збираються і обговорюють властивості паливовмісних матеріалів у об'єкті “Укриття” в контексті їх зміни і впливу на прогнозні оцінки). Ним також організовувалися різнопланові конференції та робочі наради з багатьох проблем, важливих для майбутнього України. Так, можна пригадати навчальні семінари початку 90-х з питань сучасної математичної економіки, де читалися курси відомими іноземними вченими; „круглі столи” і наради з питань інформаційних технологій, які організовувалися з середини 90-х, а особливо слід відзначити намагання встановити більш тісні зв'язки між вченими та виробничниками, що знайшли своє відображення, зокрема, в Україно-французькому симпозіумі “Наука та індустрія”, який відбувся у Львові в 1993 році за активного сприяння І.Р.Юхновського”, — згадував І.М.Мриглод \*.

Ще одну школу проходили учні в Ігоря Рафаїловича. Молоді науковці активно залучаються до керівництва колективом. У різні часи заступниками І.Р.Юхновського як керівника були З.О.Гурський, М.В.Ваврух, Р.М.Петрашко, І.О.Вакарчук, М.А.Кориневський. Інші співробітники проходять цю школу на посаді вченого секретаря колективу: в різні часи її обіймали Ю.К.Рудавський, М.Ф.Головко, М.П.Козловський, І.М.Мриглод.

У полі зору І.Р.Юхновського завжди знаходиться побут та відпочинок його працівників. Він переконаний, що добре організований і фізично активний вільний час сприяє не тільки зміцненню здоров'я, а й позитивно впливає на ефективність основної роботи, стимулює виконання нових науково-дослідних тем. Сам Ігор Рафаїлович за будь-якої погоди свій робочий день починає з бігу, де б він не перебував. Його ранкова норма — 2 км бігу, а потім півгодини інтенсивних вправ з обов'язковим підтягуванням на перекладині, далі — контрастний душ або купання в річці чи озері. Навіть під час процедури голосування під час його обрання академіком НАН України він займався спортом на стадіоні, перечікуючи хвилюючий час. „Можливо, що в такій високій фізичній культурі, самодисципліні та організованості і є один із секретів доброго здоров'я, високої працездатності та творчого довголіття Ігоря Рафаїловича”, — писав З.О.Гурський [630, с.132].

До цієї діяльності Ігор Рафаїлович залучає профспілкову організацію, яку в різні часи очолювали В.С.Височанський, М.В.Ваврух, Ю.К.Рудавський, І.М.Ідзик, а сьогодні — П.А.Глушак. При цьому організуються виїзди на природу, в Карпати. Пам'ятними стають постійні спільні зустрічі Нового року. Більшість працівників зобов'язані Ігорю Рафаїловичу також розв'язанням своїх квартирних питань.

„Незважаючи на дистанцію в посадах і званнях, він міг вислухати усі твої проблеми — наукові чи то сімейні — і тут же зробити все для їх практичного вирішення. Тому багато із нас, співробітників Відділення, а тепер Інституту фізики конденсованих систем НАН України, багато чим завдячують йому за вчасний дзвінок, прописку у його ж квартирі, вдале звернення чи лист, влаштування дітей у

садок чи школу... І при цьому найбільше дивувало те, що більшість із таких розмов "провокувалися" ним же ж, виходячи із твого настрою, тональності розмови чи наявної у нього інформації. Так формувався і виховувався колектив однодумців", — писав про стиль спілкування свого вчителя І.М.Мриглод [630,с.34].

“Загалом особливість спілкування з академіком Юхновським полягає в тому, що він не лише вчить основам фізичного сприйняття світу, а й багато в чому істотно впливає на оточуючих в інших напрямках світосприйняття. Для мене особисто школа Юхновського — це не лише в статистична фізика, а й вміння сприймати людей, ставлення до жінки, повага до історії своєї держави та багато інших аспектів життя, які визначають особистість у цілому. Від Юхновського отримав також перші уроки організаційної роботи, навички публічних виступів, вміння слухати співрозмовника і виділяти при цьому основне. З Ігорем Рафаїловичем досі часто спілкуюся і отримую від того справжнє задоволення”, — додавав він \*.

Не буде перебільшенням сказати, що для учнів І.Р.Юхновського важливою є його школа сімейного життя, щира любов між Ігорем Рафаїловичем та дружиною і дітьми, постійна підтримка з боку Ніни Василівни чоловіка в його нелегкій праці.

„Його шанобливе ставлення до Ніни Василівни, відношення до дітей Наталі і Павла, тепле опікунство внуками Яринкою і Андрієм створювало такий позитивний фон, в якому із молодих людей швидко формувалися чоловіки. Тому завжди маємо за велику приємність і потребу бувати вдома у Юхновських. І при цьому не є важливо, чи це львівський дім, а чи київська квартира, бо тут завжди відчуваєш родинний затишок і тепло”, — пише І.М.Мриглод [630,с.36].

Оскільки І.Р.Юхновський глибоко розуміє складність формування фізика-дослідника, він переконаний, що виявляти наукові таланти слід від шкільної партії. У 60-і роки ХХ століття він став організатором фізичної олімпіади школярів, пізніше виступив ініціатором видання лекцій з квантової механіки для юнацької фізико-математичної школи при Львівському університеті і написав третій том лекцій. Коли виникали проблеми з друком, видавав їх у вигляді препринтів Інституту теоретичної фізики. У 70-і роки він з ентузіазмом береться за організацію Малої академії школярів Львова та стає її президентом.

Багато учнів І.Р.Юхновського набутий досвід керівництва розвивають на нових посадах: І.О.Вакарчук (нині міністр освіти і науки України) та Ю.К. Рудавський працювали ректорами двох найбільших навчальних закладів Львова — Львівського національного університету імені Івана Франка та Державного університету "Львівська політехніка", а В.С.Височанський та П.П.Костробій — проректорами цих університетів. І.А.Процикевич є директором Української науково-дослідницької мережі УАРНет.

Незважаючи на нелегкі економічні часи, Інститут фізики конденсованих систем НАН України зберіг основний склад колективу. Цьому, безумовно, сприяє генерований його керівником дух працьовитості, наукової і людської порядності, душевної стійкості та пріоритетності наукової праці.

У науковому доробку академіка Юхновського ключове місце займає побудова наприкінці 50-х років ХХ століття методу колективних змінних у класичній та квантовій теорії для опису колективних ефектів у системах взаємодіючих частинок. Цей метод був створений на базі узагальнення попередніх результатів для систем

заряджених частинок [620—622]. На основі даного методу, у якому центральну роль відіграє якобіан переходу від індивідуальних координат частинок до колективних змінних, у подальшому І.Р.Юхновським з учнями були проведені дослідження в галузі теорії іонно-молекулярних систем, електронного газу в металах, високотемпературної плазми, бінарних сплавів тощо. Детальний аналіз методу колективних змінних та методу зміщень і колективних змінних дано у розділі 5.1.2.

Ігор Рафаїлович згадував про народження ідеї даного методу: "Я багато працював над розрахунком якобіана, нічого в мене не виходило, аж голова розболілась. Я пішов гуляти з Ніною Василівною у Стрийський парк. І тут ніби в голові щось переключилось: стало ясно, якою має бути форма якобіана" [630,с.14].

Для врахування короткосяжних взаємодій І.Р.Юхновський розвинув два підходи. Перший з них базується на функціональному диференціюванні і веде до узагальнення маєрівських групових розвинень для систем з коротко- і далекосяжними взаємодіями, а другий ґрунтується на базисному розгляді короткосяжних взаємодій, на фоні яких враховуються уже екрановані далекосяжні взаємодії. Останній метод виявився ефективним для кількісного опису різних конденсованих систем, зокрема, ґраткових моделей. Розвинутий метод І.Р.Юхновський застосовує до опису іонно-дипольних систем. Ці праці започаткували побудову мікроскопічної теорії розчинів електролітів, яка базується на рівноправному врахуванні всіх можливих взаємодій іонів електроліту та молекул розчинника.

Другий етап у розвитку методу колективних змінних пов'язаний з застосуванням його до опису квантових систем взаємодіючих частинок. Суть запропонованого в 1964 році І.Р.Юхновським підходу, названого методом зміщень і колективних змінних, полягала у послідовному виділенні із квантового статистичного оператора еволюції, що заданий на множині декартових координат частинок, такої частини, яка характеризує взаємодію квантових хвильових пакетів частинок і виражається через колективні змінні. Запропонований підхід виявився продуктивним в теорії різноманітних фермі- та бозе-систем взаємодіючих частинок, таких як високотемпературна плазма та електронний газ в металах. Це стало важливим, оскільки на той час не існувало теорії, яка б адекватно описувала властивості електронного газу, що має густину, характерну для металів.

Особливо плідними були його застосування до кількісної мікроскопічної теорії рідкого гелію. Першим, хто почав використовувати разом з Ігорем Рафаїловичем цей підхід в теорії високотемпературної плазми, був Л.Ф. Блажиевський, який розробляв як рівноважну статистичну теорію релятивістських систем заряджених частинок, так і нерівноважний статистичний опис релятивістської плазми.

Новий етап розвитку методу колективних змінних наступив на початку 70-х років і був пов'язаний з розробкою І.Р.Юхновським статистичної теорії фазових переходів II роду [629]. Детально суть та застосування даного методу у працях І.Р.Юхновського викладено у розділі 5.1.3. Підхід І.Р.Юхновського відрізняється від інших робіт послідовною мікроскопічністю. В його основу було покладено ідею про те, що статистичний опис процесу фазового переходу має здійснюватись відповідно для кожної фізичної системи фазового простору колективних змінних, серед яких є



змінні, пов'язані з відповідним параметром порядку. Ідеологія, сформульована при створенні цієї непертурбативної ренормгрупової теорії в 70-ті роки, перетворилася у метод пошарового інтегрування, на основі якого вдалося отримати багато результатів, які наочно демонстрували механізм виникнення ренормгрупової симетрії і формування універсальної поведінки поблизу переходу II роду на прикладах конкретних моделей статистичної фізики.

Разом з учнями І.Р.Юхновський розвиває теорію фазових переходів у магнітних системах, сплавах, сегнетоелектричних системах, рідинах та розчинах. Даний метод було узагальнено для дослідження фазових переходів у дво-, три- та багатокомпонентних сплавах, гелії, моделі Гейзенберга, в неупорядкованих магнітних системах, сегнетоелектриках, для критичної точки рідина—пара.

У наступних роботах школи І.Р.Юхновського також одержано низку принципово важливих фундаментальних результатів у галузі фізики конденсованої речовини. Це, зокрема, техніка інтегральних рівнянь для іонних та іонно-молекулярних систем з короткодійною взаємодією; багатогустинний формалізм опису асоціативних ефектів у рідинах; методика вузлових операторів для багаторівневих систем і на її основі техніка розрахунку кореляційних функцій; методика симетризованих функцій Гріна та ін. На базі цих методів були створені мікроскопічні теорії: розчинів електролітів, асоційованих рідин та водних розчинів, електролітичних плівок та мембран, колоїдних систем, квантових бозе- та фермі-систем, металів і сплавів, кристалічних та неупорядкованих систем із сильними короткосяжними взаємодіями частинок, сегнетоелектричних кристалів та систем з водневими зв'язками, фазових переходів, оптичних і деформаційних ефектів у кристалах тощо.

Як результат було успішно вирішено одне з центральних завдань статистичної теорії класичних систем взаємодіючих частинок: одночасне коректне врахування коротко- та далекосяжних взаємодій, тобто коротко- і далекодійних внесків у термодинамічні та структурні властивості багаточастинкових систем.

Метод колективних змінних став основою побудови починаючи з 60-х років іонно-молекулярного підходу у теорії розчинів електролітів, у якій всі міжчастинкові взаємодії враховуються рівноправно. Перші спроби у царині теорії розчинів були зроблені І.Р.Юхновським спільно з А.О.Некромом і присвячені іонно-дипольним системам. Тут розчинник ще явно не розглядався, а враховувався як ефективне середовище із певною діелектричною сприйнятливістю. Властивості розчинника у такому підході моделюють також опосередковано, вибираючи короткосяжну частину міжіонної взаємодії. Додавши до кулонівського потенціалу міжіонної взаємодії короткосяжну частину у формі потенціалу Юкави, вже в першому наближенні методу Боголюбова за плазмовим параметром І.Р.Юхновський отримав узагальнення теорії Дебая—Гюккеля, яке далі було успішно використано для опису фізичних властивостей деяких водних розчинів електролітів, зокрема, NaBr, LiOH, NaOH, HCl. Наступні праці вченого були спрямовані на коректніше врахування короткосяжних міжіонних взаємодій, побудову групових розвинень для опису термодинамічних і структурних властивостей іонних систем та систем заряджених частинок у зовнішніх електричних полях. Зокрема, ним було показано, що для двовалентних водних розчинів електролітів внесок другого групового

коефіцієнта в області малих концентрацій може призводити до аномальної поведінки термодинамічних величин, що спостерігається експериментально.

Узагальнення цього підходу на системи з довільною електростатичною взаємодією привело до важливого досягнення — побудови мікроскопічної теорії розчинів електролітів (І.Р.Юхновський, М.Ф.Головко та ін.), де далекосяжні взаємодії описувались у фазовому просторі змінних, а короткосяжні — у фазовому просторі індивідуальних координат частинок [842]. (Детально дана теорія розглядається у розділі 5.2.5.)

Так, було проаналізовано вплив іонно-молекулярних та міжмолекулярних взаємодій на формування міжіонних потенціалів (І.Р.Юхновський, М.Ф.Головко, В.С.Височанський, А.В.Попов), розглянуто просторово-обмежені системи: електролітичні плівки та мембрани (І.Р.Юхновський, М.Ф.Головко, І.Й.Куриляк, Є.М.Сов'як). Метод комп'ютерного моделювання, теорію інтегральних рівнянь та теорію рідин об'єднано у новий підхід (А.Д.Трохимчук, К.Хайцингер), побудовано теорію іонних розплавів (М.Ф.Головко, О.О.Пізіо).

Ю.В.Калюжним було розвинуто атом-атомний підхід до опису розчинів електролітів, який ґрунтується на конкретній деталізації реальної структури молекул та розподілу їх зарядів. У рамках такого підходу відкриваються широкі можливості для кількісного опису впливу розчинника на хімічні реакції.

Іонно-молекулярний підхід було використано в працях М.В.Токарчука для представлення нерівноважних властивостей розчинів електролітів. Узагальнену модель іонно-молекулярних систем, у якій явно враховується присутність компенсуючого поля, було розвинуто у працях І.А.Процикевича та М.Ф.Головко.

У полі уваги Ігоря Рафаїловича постійно перебувають проблеми нерівноважної статистичної фізики: його цікавить, як результати, отримані для рівноважного випадку, використати для систем з нерівноважними властивостями. Ця задача в колективі І.Р.Юхновського розв'язується сьогодні в роботах М.В.Токарчука, І.М.Мриглода та їх учнів. Однією з таких проблем є зворотно-осмотичні процеси мембранної фільтрації [843]. У цьому напрямі розроблено статистичну теорію процесу фільтрації в системі „розчин електролітів—мембрана—фільтрат” (М.В.Токарчук, Р.Желем). Інша актуальна задача стосується досліджень фізичних процесів, що відбуваються у ядерній магмі четвертого блока Чорнобильської АЕС та вивчення дифузійних процесів поширення радіонуклідів.

Метод зміщень і колективних змінних розвивали також Л.Ф.Блажиєвський в теорії високотемпературної плазми, М.В.Ваврух в теорії квантових фермі-систем, І.О.Вакарчук в теорії квантових бозе-систем. Ідеї І.Р.Юхновського з теорії фазових переходів втілили його учні Ю.К.Рудавський, М.П.Козловський, З.О.Гурський та інші.

Так, принципово важливою задачею стало узагальнення методу колективних змінних для квантових систем взаємодіючих частинок. При переході до розгляду квантових систем необхідно врахувати ефекти, зумовлені квантовим характером руху частинок і наявністю спіну. Як вже зазначалося, метод коректного врахування колективних явищ у квантових системах був запропонований І.Р.Юхновським на прикладі моделі електронного газу та названий методом зміщень і колективних змінних. У працях І.Р. Юхновського та його учнів М.В.Вавруха, Г.І.Бігуна, П.П.

Костробія на основі цього методу, починаючи з 1964 р., розраховувалися енергетичні характеристики електронного газу неперехідних металів — середня та вільна енергія, теплоємність і енергія зв'язку неперехідних металів, а також рівняння стану виродженого електронного газу [997].

Особливо слід відзначити низку праць, присвячених розв'язанню ще одного актуального завдання теорії електронного газу: дослідженню бінарної функції просторового розподілу електронів сильно неідеального електронного газу. Так, І.Р. Юхновський і Р.М.Петрашко коректно описали кореляції на близьких відстанях між електронами та визначили правильну асимптотичну поведінку бінарної функції електронів у даному випадку, для густин, що типові для металів. Ними було вперше чітко сформульовано ідею про узагальнення класичних групових розкладань на квантові системи взаємодіючих частинок [996-997].

Два оригінальні методи для сильно неідеального електронного газу було запропоновано в працях М.В.Вавруха. Це квантові групові розкладання і модифікований метод зміщень. М.В.Ваврух та його співробітники виконали прецизійні розрахунки інтегральних, локальних та одночастинкових характеристик моделі електронної рідини та інших квантових систем. Побудовано кореляційну теорію однорідних та неоднорідних електронних систем. Отримано енергетичні та діелектричні характеристики, а також функції розподілу сильно неідеального електронного газу [622]. Результати розрахунку, здійсненого М.В.Ваврухом та Т.Є. Крохмальським, є найкращими з усіх попередніх, одержаних аналітичними методами. Вони найближчі до одержаних методом Монте-Карло (відхилення не перевищує 1% в області металів). Авторами запропоновано послідовний статистичний підхід до побудови електрон-іонної моделі металу. Отримано ефективний гамільтоніан, що описує підсистему колективізованих електронів у полі іонів. При цьому знайдено багаточастинкові нелокальні потенціали взаємодій електронів між собою та з іонами. У цих працях вперше застосовано багаточастинковий підхід до задачі електрон-іонних взаємодій.

Базисний підхід з виділенням системи відліку, для якої відомо точний розв'язок, був використаний у дослідженнях різноманітних фізичних об'єктів. Зокрема, ідея І.Р.Юхновського про розгляд короткосяжних взаємодій у просторі індивідуальних координат частинок, а далекосяжних – у фазовому просторі колективних змінних, була далі розвинена в його спільних з Р.Р.Левицьким та С.І. Сороковим працях, присвячених дослідженню класу матеріалів, які описуються псевдоспіновими моделями (сегнетоактивні сполуки із водневими зв'язками, низьковимірні магнетики). Для цього класу матеріалів характерними є низьковимірні короткосяжні кореляції та тривимірні далекосяжні взаємодії. Було запропоновано метод, в основу якого покладено розрахунок функціонала вільної енергії з базисним урахуванням короткосяжних кореляцій, тобто коли система з короткосяжними кореляціями служить системою відліку. Сформульовано загальну методіку отримання узгоджених наближень для термодинамічних та динамічних характеристик псевдоспінових систем, одержано вирази для вільної енергії і температурних кумулятивних функцій Гріна.

Особливо ефективним метод зміщень і колективних змінних виявився для бозе-систем. Роботи у цьому напрямі впливали із потреби побудови кількісної

мікроскопічної теорії рідкого гелію-4, який був предметом інтенсивних теоретичних і експериментальних досліджень, зокрема, у працях П.Л.Капіци, Л.Д.Ландау та М.М.Боголюбова.

За допомогою цього методу І.Р.Юхновським, І.О.Вакарчуком та їх учнями у доброму узгодженні з експериментальними даними було вивчено основний і слабозбуджений стани рідкого гелію. Оскільки хвильові функції бозе-систем мають „чисте” зображення у колективних змінних, тому метод зміщень і колективних змінних став ефективним інструментом досліджень властивостей бозе-рідин. Вже у нульовому наближенні цього підходу отримуються результати теорії бозе-рідин М.М.Боголюбова. Було знайдено хвильові функції основного та слабкозбуджених станів із урахуванням чотиричастинкових кореляцій, розраховано енергію основного стану та спектр елементарних збуджень, отримано структурні функції та проаналізовано проблему бозе-ейнштейнівської конденсації. Так, було встановлено зв'язок спектра збуджень і кількості атомів в бозе-конденсаті із структурними функціями. Таким чином, в цих роботах вперше на основі мікроскопічної теорії отримані кількісні результати для структурних функцій і швидкості звуку рідкого гелію-4. З'ясовано механізм формування фононної області спектра збуджень в бозе-рідині.

У працях І.О.Вакарчука запропоновано новий метод розрахунку матриць густини класичних і квантових багаточастинкових систем. На основі цього методу побудована кількісна теорія явища бозе-ейнштейнівської конденсації в надплинному гелії. Знайдено нове зображення квантової статистичної суми багаточастинкових систем у вигляді континуального інтеграла. Досліджені властивості фермі- і бозе-рідин в низькотемпературній області та в області фазового переходу в надплинний стан, побудовано теорію зоряних спектрів [998].

Львівською школою статистичної фізики розроблялась також теорія псевдопотенціалу — ефективного потенціалу електрон-іонної взаємодії в реальних металах і сплавах. У теорії псевдопотенціалу можна виділити два основні напрями. Більш ранній з них — моделювання псевдопотенціалів простими аналітичними функціями з декількома параметрами. З.О.Гурським і Т.Л.Краском запропоновано модельний двопараметричний псевдопотенціал для представлення електрон-іонних взаємодій в неперехідних металах, який інтенсивно використовувався при дослідженні широкого кола фізичних властивостей неперехідних металів і сплавів в твердому й рідкому станах.

Другий підхід — обчислення псевдопотенціалів «з перших принципів», без моделювання і підганяльних параметрів. На основі запропонованого З.О.Гурським методу повністю ортогоналізованих плоских хвиль була успішно вирішена проблема узагальнення теорії псевдопотенціалу на випадок перехідних та рідкісноземельних металів з частково заповненими електронними оболонками  $d$ - або  $f$ -типу. Це дало змогу описати властивості типових перехідних металів (заліза, кобальту, нікелю) в твердому і рідкому станах. Результати теоретичних розрахунків електроопору металів у рідкому стані, ширини заповненої частини зони провідності добре узгоджуються з експериментальними даними. Згаданими працями започаткована мікроскопічна теорія перехідних металів.

Групою М.В. Вавруха розроблена загальна схема побудови так званих оптимальних базисів одночастинкових хвильових функцій металічних систем, яка використовується при розрахунку псевдопотенціалів не тільки в ідеалізованих безмежних системах, а й у випадку систем з просторовими межами (поверхня металу, контакти та ін.).

Синтез методів псевдопотенціалів та колективних змінних виявився надзвичайно плідним. У працях І.Р. Юхновського, З.О.Гурського та І.М.Зеленчука розвинута теорія термодинамічних властивостей бінарних сплавів заміщення неперехідних металів. Отримані формули для вільної енергії, теплоємності та інших термодинамічних характеристик бінарних сплавів. Вперше вдалося з'ясувати кінетичні властивості бінарних сплавів в евтектичних точках, кількісно описати властивості сплавів поблизу температури впорядкування, які реалізується як фазовий перехід II роду [999]. У сплавах, на відміну від моделі Ізінга, коефіцієнти якобіана переходу до колективних змінних є складними функціями хімічних потенціалів компонентів сплаву (З.О.Гурський). Показано, що далекий порядок у сплавах пов'язаний із середніми значеннями тих колективних змінних, які відповідають абсолютному мінімуму фур'є-зображення потенціалу впорядкування. Обчислено статистичну суму сплаву і розроблено схему побудови фазових діаграм. Одержано і проаналізовано рівняння для знаходження хімічних потенціалів компонентів сплаву, при розв'язку яких можна представити енергію сплаву у вигляді функції температури і концентрації компонентів та побудувати діаграму стану. Таким чином, було розв'язано одну з важливих задач теоретичного матеріалознавства: прогноз поведінки фізичних властивостей сплаву залежно від зовнішніх параметрів — температури і складу сплаву.

Ідея І.Р.Юхновського про виділення системи відліку виявилась ефективною також при побудові теорії термодинамічних властивостей сплавів з урахуванням теплових коливань та локальних статичних зміщень атомів (З.О.Гурський та інші). Теорія будувалась поетапно. Спочатку методом колективних змінних було розв'язано задачу для системи відліку: ідеального неупорядкованого сплаву в наближенні жорсткої ґратки. Потім визначалась динаміка ґратки сплаву із використанням кореляційних функцій системи відліку. Задача третього етапу – обчислення амплітуд статичних зміщень атомів – розв'язується із застосуванням результатів попередніх етапів: унарної та бінарної функцій просторового розподілу атомів та фононних частот „середнього” сплаву.

У середині 70-х років були закладені основи третього ключового напрямку досліджень школи І.Р.Юхновського — сучасної мікроскопічної теорії фазових переходів II роду .

Відправною точкою цих досліджень стала робота з обґрунтування форми базисного розподілу другого роду, виконана спільно з Ю.К.Рудавським. Як вже зазначалося, головним при побудові теорії фазових переходів було створення І.Р. Юхновським нового математичного апарату, що дає змогу обчислити статистичну суму системи з використанням негауссового розподілу. Даний розподіл описує флуктуації колективної змінної, яка асоціюється з параметром порядку. Ці висновки було покладено в основу розробленого І.Р.Юхновським методу інтегрування статистичної суми моделі Ізінга з негауссовим базисним розподілом. Дана модель

дозволяє вивчати основні закономірності фазових переходів у різноманітних фізичних об'єктах: магнітних (спінових) системах, бінарних сплавах тощо.

Так, в працях І.Р.Юхновського та Ю.К.Рудавського [10<sup>0</sup>.631] дано представлення статистичної суми моделі Ізінга в просторі спінових колективних змінних, що мають зміст фур'є-компонент функцій спінової густини. У рамках отриманого зображення було введено поняття базисного розподілу, який є необхідним для опису поведінки системи в околі критичної точки. На основі аналізу діаграмних рядів для спінової кореляційної функції було доведено, що для адекватного представлення критичної поведінки тривимірної моделі Ізінга в околі температури фазового переходу необхідно використовувати негауссовий четвертий базисний розподіл, який, крім гауссового члена, повинен містити у собі ще і четвертий степінь спінових функціональних змінних. Диференціальна форма рівнянь ренормгрупи дала змогу авторам знайти основні характеристики досліджуваних систем в критичній області.

Дослідження одержаних рекурентних співвідношень здійснювалось з використанням як числових, так і аналітичних методів. Були проаналізовані різні можливі підходи до розв'язання цієї задачі ( $z$ -розкладання — спільно з М.А. Козловським,  $g$ - та  $P$ -розкладання — спільно з І.О.Вакарчуком, Ю.К.Рудавським, В. О.Коломійцем та Ю.В.Головачем,  $1/s$ - розкладання — спільно з І.М.Мриглодом) і встановлено, що поблизу критичної точки спостерігається особливий критичний режим, в якому виникає новий тип симетрії, а саме, симетрія ренормалізаційної групи. Головним наслідком, що зумовлює появу такої симетрії, є виникнення універсальних характеристик, що залежать лише від загальних властивостей модельної системи — вимірності простору, кількості компонент параметра порядку, типу взаємодій тощо. Отже, у межах мікроскопічного підходу підтвердилися усі напівфеноменологічні гіпотези, що були сформульовані раніше Л.Кадановим, К. Вільсоном та іншими.

У працях І.О.Вакарчука, Ю.К.Рудавського та Ю.В.Головача метод був узагальнений на багатокомпонентні спінові моделі. Основна увага приділялась представленню універсальних властивостей цієї моделі з використанням диференціальних рівнянь ренормалізаційної групи. Застосовуючи методику Юхновського поетапного інтегрування статистичної суми, автори вперше без теорії збурень одержали значення критичних показників для цілого ряду класичних спінових систем з багатокомпонентним виродженим параметром порядку.

Пізніше в працях Ю.В.Головача було розглянуто критичну поведінку анізотропних моделей, які широко використовуються для магнітних та структурних фазових переходів, а також знайдено критичні показники моделі з кубічною анізотропією та проаналізовано процес виникнення асимптотичної симетрії у такій моделі.

Проте, критичний режим не вичерпує усієї картини. Він описує еволюцію коефіцієнтів блочної задачі лише в певній обмеженій області їх зміни, яка залежить, зокрема, від близькості до критичної точки. Були знайдені, крім того, два інших режими: один з них характеризує входження в область скорельованої ренормогрупової поведінки, а інший — вихід з неї. Тільки послідовне урахування впливів від усіх цих областей дало можливість розрахувати всі термодинамічні

характеристики системи поблизу фазового переходу. Якщо для низьковимірних систем існували на той час ідейно близькі підходи, що базувались на схемах виключення короткохвильових змінних у прямому просторі координат, зокрема, на ідеології трансфер-матриці, процедурі децимації, розгляді спінових блоків тощо, то для тривимірних систем така схема не мала аналогів.

Уперше такі комплексні розрахунки універсальних (критичні показники) та не універсальних (теплоємність, сприйнятливість, температура фазового переходу) величин для температур як нижче, так і вище від критичної, були виконані І.Р. Юхновським та М.П.Козловським наприкінці 70-х— на початку 80-х років ХХ століття на прикладі моделі Ізінга. Ними була розроблена методика, завдяки якій вперше в світовій практиці було одержано явні вирази для всіх термодинамічних характеристик моделі Ізінга як функцій температури і мікроскопічних параметрів гамільтоніана задачі як вище, так і нижче температури фазового переходу. Особливу цінність становили криві для ентропії та теплоємності, розрахунки яких не вдавалося виконати на мікроскопічному рівні до того часу. Ними також було визначено сферу застосувань методу ренормалізаційної групи, досліджено рекурентні співвідношення між коефіцієнтами суміжних ефективних блочних гамільтоніанів, які виникають при обчисленні статистичної суми тривимірної моделі Ізінга.

Варто зауважити, що ця модель, незважаючи на свою простоту, має широку галузь реалістичних застосувань, а також може розглядатись як еталонна модель при дослідженні багатьох інших моделей, значно складніших за своєю побудовою. Саме тому розробка послідовної теорії фазового переходу в моделі Ізінга стала ключем для побудови загальнішої теорії критичних явищ у тривимірних системах.

Прецизійні розрахунки (з використанням ЕОМ) характеристик моделі Ізінга виконали М.П.Козловський та В.О.Коломієць [1001]. Було одержано числові значення критичних показників кореляційної довжини, теплоємності і середнього спінового моменту, а також встановлено, що у вузькій області температур, де термодинамічні функції якісно змінюють свою поведінку, відбуваються два основних флуктуаційних процеси. Перший з них, який автори назвали „критичним режимом”, характеризує короткохвильові флуктуації і зображується рівнянням ренормалізаційної групи. Другий процес відповідає довгохвильовим флуктуаціям і характеризується гауссовим розподілом, дисперсія якого має неаналітичну залежність від температури. Враховуючи ці два процеси, вдалося успішно завершити створення теорії фазових переходів та побудувати комплексний підхід до розрахунку як універсальних (критичні індекси), так і не універсальних (вільна енергія, ентропія, теплоємність, температура фазового переходу) характеристик тривимірних систем поблизу точки фазового переходу.

В подальшому І.Р.Юхновський, М.П.Козловський та І.В.Пилюк дослідили залежність неуніверсальних характеристик моделі Ізінга від мікроскопічних параметрів моделі, зокрема, вигляду потенціалу. Для теплоємності, параметра порядку і сприйнятливості вони винайшли доданки, які враховують поправки до скейлінгу [1002].

Вивченню особливостей передперехідної поведінки та опису фазового переходу в системі з багатокомпонентним параметром порядку присвячено праці,

виконані І.М.Мриглодом [1003]. Зокрема, було показано, що системи з переходами типів зміщення та порядок—хаос можуть досліджуватись у рамках єдиної схеми, а особливості динамічного структурного фактора для систем типу зміщення, відомі як проблема центрального піку, знаходять своє логічне пояснення у формалізмі утворення передперехідних кластерів упорядкування.

Важливим виявилось поширення методу колективних змінних на ізінговські системи з анізотропними взаємодіями, наприклад, на одновісні сегнетоелектрики типу порядок—хаос, де головну роль відіграє дипольна взаємодія. Для таких систем І.Р.Юхновським та М.А.Кориневським було запропоновано схему пошарового інтегрування, що враховує анізотропію міжчастинкового потенціалу. Ця схема була згодом в середині 80-х років ХХ століття використана для дослідження ними моделі кластерного сегнетоелектрика [1004]. Було проаналізовано специфіку та відмінності цієї моделі від моделі Ізінга, реалізовано схему комплексного опису фазового переходу в даній системі, при включенні розрахунків вільної енергії, теплоємності та інших термодинамічних характеристик. На основі встановлення зв'язку між трансляційно-симетричними моделями феромагнетиків та їх аналогів, які мають ієрархічну симетрію подібності, Ю.В.Козицьким було описано ієрархічні моделі. Ці результати цікаві насамперед тим, що для цього класу моделей рекурентні співвідношення Юхновського є точними, на відміну від інших моделей статистичної фізики, де вони все ж мають наближений характер, оскільки під час їх одержання здійснюється усереднення потенціалу взаємодії у кожному із шарів інтегрування.

Вагомим є внесок І.Р.Юхновського у розвиток теорії фазових переходів у неперервних системах — флюїдах. На відміну від ґраткових моделей, флюїди не мають трансляційної симетрії, що істотно ускладнює їх теоретичне представлення. Першим кроком до побудови теорії неперервних систем стало відповідне функціональне зображення для статистичної суми у великому канонічному ансамблі. Метод колективних змінних застосовується для системи флюїдів в околі критичної точки в працях І.Р.Юхновського, що виконані спільно з І.М.Ідзиком та В.О.Коломійцем. Згідно з концепцією системи відліку, конфігураційний інтеграл флюїду вдалося звести до функціонала, заданого на ефективній ґратці, і застосувати методи, розвинені для моделі Ізінга. Отримані явні аналітичні вирази для коефіцієнтів функціонала,  $\epsilon$ , фактично, структурними функціями системи відліку. Дослідження загальних властивостей цих коефіцієнтів дозволило знайти спосіб побудови кількісної теорії критичної точки.

Ними було дано визначення критичної точки і знайдені її координати, з виділеною системою відліку було знайдено функціональне представлення системи рідина—газ, за допомогою якого обчислено статистичну суму, розраховано критичні індекси і показано стрибкоподібну залежність хімічного потенціалу в двофазній області, проаналізовано поведінку термодинамічних характеристик системи в однофазній та двофазній областях. Уперше в явній формі з урахуванням внеску від ділянки ренормгрупової симетрії була розрахована вільна енергія та інші термодинамічні функції системи рідина—газ в околі критичної точки. Ці результати важливі були для реальних речовин поблизу критичної точки.

Метод колективних змінних з виділеною системою відліку І.Р.Юхновський спільно з О.В.Пацаган поширив на випадок класичних багатокомпонентних сумішей



. На основі даного методу було одержано функціональне представлення великої статистичної суми багатокомпонентної моделі, розвинуто статистично-польову теорію для систем багатьох частинок, а також мікроскопічний підхід до фазових переходів у бінарних сумішах. Детально розглянуто ряд моделей, серед яких симетрична бінарна суміш, прості моделі іонних плинів. Проаналізовано умови стійкості системи відносно фазового переходу розшарування типу газ-газ та газ-рідина, а також розраховано температури цих переходів залежно від складу суміші.

Значна увага була сконцентрована на вивченні кристалічних сполук з структурними, в тому числі і сегнетоелектричними фазовими переходами. Особливий інтерес становлять сегнето- і антисегнетоелектрики з водневими зв'язками. Можливості широкого ізоморфного заміщення атомів і вирощування кристалів високої якості завдяки численним фізичним властивостям зробили їх дуже популярними об'єктами експериментальних і теоретичних досліджень. В працях І.В. Стасюка, Р.Р.Левицького і М.А.Кориневського одержано ефективний квазіспінфононний гамільтоніан сегнетоактивних сполук типу  $\text{KN}_2\text{PO}_4$ . У рамках кластерного наближення було розраховано і досліджено вільну енергію та деякі динамічні властивості сегнетоелектриків і антисегнетоелектриків даного типу. Була запропонована кількісна мікроскопічна теорія релаксаційних явищ та термодинамічних властивостей квазіодномірних сегнетоелектриків з водневими зв'язками (Р.Р.Левицький, І.Р.Зачек).

Ідея базисного підходу наприкінці 80-х років ХХ століття була поширена на квантові системи типу порядок—хаос, що описуються псевдоспіновими моделями (сегнетоелектрики з водневими зв'язками, ізінгові магнетики тощо). З метою дослідження таких квазіспінових систем з коротко- і далекосяжними взаємодіями І.Р.Юхновським, Р.Р.Левицьким та С.І.Сороковим розроблений самоузгоджений метод. Для розрахунку вільної енергії та кореляційних функцій базисної системи було запропоновано кластерний підхід. Цей підхід дозволяє у межах кластерного наближення одержати рівняння Орнштейна—Церніке для базисних кореляторів довільного порядку. Показано, що для одновимірної моделі Ізінга в рамках цього методу одержуються точні результати. Досліджено конкретні квазіспінові моделі сегнетоелектриків з водневими зв'язками і магнетиків. Ці праці започаткували подальший розвиток теорії модельних квазіспінових систем.

Важливим напрямом наукової діяльності відділення на початку 50-х років ХХ століття стає вивчення оптичних явищ у складних кристалічних системах. І.В.Стасюком та його учнями запропоновано новий мікроскопічний підхід до вивчення індукованих оптичних ефектів першого порядку у діелектричних кристалах іонного типу. Для зображення таких систем запропонована модель, яка ґрунтується на формалізмі операторів вузлових збуджень (операторів Хаббарда). І.В.Стасюком та П.М.Слободяном була розроблена діаграмна техніка для операторів Хаббарда. Використання апарату операторів Хаббарда допомогло розглянути з єдиної точки зору кристали, у яких відбувається так званий кооперативний ефект Яна—Теллера (структурний фазовий перехід, що стимулюється перебудовою спектра енергій електронів).

У працях І.В. Стасюка, О.Я. Сабана вивчались можливі типи електронних та іонних впорядкувань. І.В. Стасюком та С.С. Коцуром, О.М.Попелем розвинута

теорія, яка дала змогу описати з єдиної точки зору електрооптичний і п'єзооптичний ефекти, електрогірацію та п'єзогірацію. Було розкрито мікроскопічний механізм цих явищ у діелектричних, зокрема сегнетоелектричних кристалах.

Вперше була розроблена мікроскопічна теорія явища електрогірації. Суть цього ефекту, відкритого О.Г.Влохом та І.С.Жолудевим, полягає у появі або зміні оптичної активності кристалів під впливом зовнішнього постійного електричного поля. Проведено симетричний аналіз можливих ситуацій виникнення іонної електрогірації. На основі числових оцінок передбачені значення коефіцієнтів електрогірації у різних кристалах.

Теорія індукованої оптичної активності кристалів була поширена також на явище п'єзогірації, у якому причиною ефекту є постійне механічне напруження (зовнішній тиск), прикладене до кристала. Вперше запропонована мікроскопічна картина п'єзооптичного ефекту у діелектричних кристалах іонного типу. Проведені розрахунки п'єзооптичних, пружнооптичних та пружних констант сегнетоелектричних кристалів типу  $\text{KN}_2\text{PO}_4$  та ян-теллерівських кристалів. Пояснені аномалії цих констант поблизу точок фазових переходів, які спостерігаються експериментально.

Останнім часом сформувався напрям з вивчення оптичних властивостей і динаміки кристалів, елементи структури яких можуть розвпорядковуватися. У працях І.В.Стасюка, С.С.Коцура та їх учнів побудована теорія оптичної активності таких систем та досліджені особливості квадратичного електрооптичного ефекту. Вивчається динаміка коливань ґратки у цих кристалах та досліджуються деякі аспекти комбінаційного розсіювання світла, пов'язані з так званим конфігураційним розщепленням у фононному спектрі.

Технічний прогрес вимагав нових перспективних матеріалів, це привело до бурхливого розвитку порівняно молодій галузі фізики — фізики неупорядкованих систем, об'єктами якої є аморфні та рідкі метали, напівпровідники, неупорядковані сплави, склоподібні стани речовини та ін. Важливими в цьому напрямі є дослідження неупорядкованих магнітних систем. Інтерес до них був викликаний унікальним поєднанням корисних технологічних властивостей, якого часто неможливо досягти для традиційних кристалічних зразків. Разом з тим при спробах математичного опису поведінки таких речовин виникає широке коло фундаментальних теоретичних проблем, які стимулюють розвиток нових концепцій і підходів. Відсутність періодичної кристалічної ґратки, структурна метастабільність, необхідність подвійного усереднення (термодинамічного та конфігураційного) — це, по суті, основні принципи труднощі теоретичного представлення неупорядкованих систем.

Наприкінці 70-х років ХХ століття у Львівському відділенні статистичної фізики ІТФ АН УРСР розпочалось активне вивчення двох перспективних класів неупорядкованих систем — аморфних і рідких магнетиків. Для опису термодинамічних і структурних характеристик цих речовин запропоновано новий оригінальний підхід. Він ґрунтується на математичному формалізмі функціонального інтегрування та колективних змінних (І.Р.Юхновський, І.О.Вакарчук, Ю.К.Рудавський, Г.В.Понеділок). Було одержане нове представлення для статистичного оператора та вільної енергії структурно неупорядкованої квантової

моделі Гейзенберга, запропонована система рівнянь у функціональних похідних для спінових температурних функцій Гріна. На основі цього методу була сформульована теорія аморфних та рідких магнетиків. Проведено детальне дослідження впливу структурної неупорядкованості на магнітні властивості. Зокрема, отримані нові вирази для вільної енергії аморфних і рідких магнетиків, знайдені і проаналізовані рівняння для намагніченості і температури Кюрі в цих речовинах. Показано, що одночасне врахування магнітних та структурних флуктацій приводить до пониження температури магнітного фазового переходу. Були прогнозовані нові ефекти, встановлено, що зовнішнє магнітне поле підвищує ізотермічну стисливість рідкого феромагнетика, зменшує швидкість звуку, підвищує критичну температуру фазового переходу рідина—пара.

З метою аналізу спінової динаміки була розрахована конфігураційно-усереднена поперечна функція Гріна аморфного феромагнетика, одержані рівняння для магнетного спектра та його затухання. Ці рівняння справедливі в широкому діапазоні зміни температури, магнітного поля, щільності атомів.

Відомо, що у критичній області точки фазового переходу головну роль відіграють розмірність простору, число компонент спіну, симетрія гамільтоніана. У зв'язку з цим І.В.Вакарчуком спільно з І.Р.Юхновським та Ю.К.Рудавським було отримано представлення за допомогою функціонального інтеграла статистичної суми моделі Стенлі, яка описує критичну поведінку систем з багатокомпонентним виродженим параметром порядку. Спільно з І.Р.Юхновським та І.О.Вакарчуком методами функціонального інтегрування без застосування теорії збурень була побудована диференціальна форма наближеного перетворення ренормалізаційної групи (РГ). Знайдені в явному вигляді рівняння РГ і система рівнянь для нерухомих точок і лінійного оператора РГ, спектр якого визначає критичний показник кореляційної довжини. Доведена універсальність спектра лінійного оператора РГ.

З появою у 60-х роках ХХ століття потужних джерел електромагнітного випромінювання актуальною виявилася задача про статистичні властивості системи атомів, частина з яких під впливом зовнішньої дії перебуває у збудженому електронному стані. Такі системи можуть розглядатись як квазірівноважні, оскільки, з одного боку, час життя збудженого електронного стану значно перевищує час установлення рівноваги за поступальними ступенями вільності, так, що система демонструє рівноважні властивості. З іншого боку, ці властивості зумовлені новими ефективними взаємодіями, що виникають у системі тотожних різнозбуджених атомів – резонансними взаємодіями, які можуть істотно впливати на термодинаміку такої системи. Детальне дослідження резонансних взаємодій у групах трьох, чотирьох і більше атомів, встановлення їх багаточастинкового характеру, вивчення їх залежності від просторової конфігурації атомів стало предметом досліджень, розпочатих І.Р.Юхновським на початку 70-х років ХХ століття. разом з Р. Кадоб'янським, а згодом — з Р.Р.Левицьким і О.В.Держком. У їх працях була створена послідовна теорія статистичних властивостей частково збуджених систем. Проаналізовано зміст поняття частково збудженої системи у квантовій картині. Побудовано фазову діаграму частково збудженого газу. Це дало змогу пояснити вплив резонансного опромінення на фазовий перехід газ—рідина, що спостерігається експериментально. Глибоко вивчалися ефективні міжчастинкові

резонансні взаємодії в групах тотожних різнозбуджених частинок. Було встановлено їх значну залежність від просторової конфігурації, зокрема показано, що вони мають багаточастинковий анізотропний характер. Це приводить, як впливало з розрахунків функцій розподілу та другого і третього віріальних коефіцієнтів, до істотних змін у термодинаміці частково збудженого газу. Дослідження віріального рівняння стану та побудова рівняння вандервальсового типу виявили, що присутність збуджених атомів навіть у незначній концентрації приводить до значного впливу на фазовий перехід рідина—газ, приводячи до змін у кривій співіснування та зростання критичної температури. Згодом ця теорія була поширена на двокомпонентні суміші газів з урахуванням дії зовнішнього електричного поля. Отримані результати мають значний інтерес у зв'язку з експериментальними дослідженнями впливу потужного резонансного опромінення, зокрема лазерного, на умови конденсації та фазовий перехід газ—рідина.

Численні експериментальні дослідження в галузі фізики твердого тіла, створення нових нетрадиційних матеріалів, відкриття високотемпературної надпровідності, а також потреби сучасного виробництва ставлять нові задачі перед сучасною статистичною фізикою. Невипадково від самого початку переходу на роботу в НАН України Ігор Рафаїлович приділяє значну увагу застосуванню комп'ютерних методів у статистичній фізиці. В інституті здійснюються прикладні дослідження в галузі комп'ютерних та інформаційних технологій; процесів, що відбуваються з лавоподібними паливовмісними матеріалами в об'єкті «Укриття» [1005]; взаємодії ядерної магми з водою на Чорнобильській атомній електростанції, проблеми гетерогенного каталізу та паливних комірок; розробки оптичних елементів голографічних систем розпізнавання образів, процесів мембранної фільтрації. Діє потужний розрахунковий кластер, з 1992 р. розпочато науково-телекомунікаційну діяльність із застосуванням засобів мережі Інтернет, яку здійснює Науково-телекомунікаційний центр «Українська академічна і дослідницька мережа» (УАРНет). Дослідженнями високогрупових розвинень для бінарних функцій іонно-молекулярних систем займається спеціаліст з обчислювальної математики В.С.Височанський.

Ігор Рафаїлович постійно контролює забезпечення обчислювальних можливостей очолюваного ним колективу. Згодом з ініціативи І.Р.Юхновського було укладено договір про співробітництво його колективу з німецьким Інститутом хімії товариства Макса Планка, що дає змогу науковцям ознайомитись із сучасними методами комп'ютерного моделювання. Так, Ігор Рафаїлович багато обговорював з нами та німецьким партнером К.Гайнцінгером методику комп'ютерного моделювання. Завдяки неприйняттю ним існуючих на той час методів врахування далекосяжних взаємодій виникла ідея поєднання методу комп'ютерного моделювання із методом системи відліку. Згодом на цьому шляху було досягнуто значних успіхів у теорії діелектричних і зв'язаних з ними властивостей води та водних розчинів.

Таким чином, викладені вище наукові результати, особисті риси як людини та педагога, прагнення творити в колективі привели до формування навколо І.Р.Юхновського наукового колективу, який можна ідентифікувати як авторитетну наукову школу в галузі статистичної фізики. Ядро її складають члени-

кореспонденти Національної академії наук України М.Ф.Головко та І.М.Мриглод; доктори наук І.О.Вакарчук, Ю.К.Рудавський, М.В.Ваврух, Р.Р.Левицький, М.П.Козловський, Л.Ф.Блажиевський, З.О.Гурський, М.А.Кориневський, М.В.Токарчук, В.І.Третяк, Ю.В.Калюжний, Ю.В.Головач, П.П.Костробій, Ю.В.Козицький, Р.М.Петрашко, Т.М.Брик, О.В.Держко, М.В.Шовгенюк, І.Р.Зачек; кандидати наук Г.І.Бігун, В.С.Височанський, П.А.Глушак, М.Габаші, О.Л.Іванків, І.М.Ідзик, В.О.Коломієць, С.С.Коцур, Т.Є.Крохмальський, І.Й.Куриляк, А.О.Некрот, О.В.Пацаган, О.М.Попель, О.О.Пізіо, П.М.Слободян, Є.М.Сов'як, С.І.Сороков, С.Р.Баран, О.Л.Гонопольський, О.Я.Сабан, А.В.Попов, М.Зеленчук, В.Є.Шпитко, Я.М.Ільницький, І.В. Пилюк, М.А.Шпот.

Як підкреслювала О.В.Пацаган, “стиль наукової роботи школи І.Р.Юхновського можна характеризувати так: вибрати дуже складну та актуальну проблему і здійснювати її дослідження систематично, починаючи з мікроскопічних взаємодій” \*.

## 6.5. Формування та розвиток наукової школи статистичної фізики С.В. Пелетмінського

Значний внесок у розвиток методів статистичної фізики необоротних процесів, що базуються на ідеї скороченого опису нерівноважних багаточастинкових систем, а також щодо застосування цих методів у галузі надплинності, надпровідності, теорії плазми, фізики магнітних і спінових явищ у твердих тілах належить академіку НАН України, заслуженому діячу науки і техніки України, лауреату державних та іменних премій України в галузі науки і техніки Сергію Володимировичу Пелетмінському. Велика частина його досліджень присвячена узагальненню рівняння Больцмана та обґрунтуванню сфери його застосувань. С.В.Пелетмінський вирішував проблеми нерівноважної ентропії, для цього узагальнив формулу Больцмана ентропії ідеального газу для газу взаємодіючих частинок. Ним вивчалися термодинамічні властивості релятивістського газу електронів, позитронів та фотонів, що дало змогу дослідити кінетику чорного випромінювання.

Науковий доробок Сергія Володимировича складає понад 250 наукових праць, у тому числі 5 монографій, серед яких три перекладено на англійську мову. “Яскравий талант фізика-теоретика, високі моральні якості та наукова принциповість створили йому заслужений авторитет і повагу серед колег та учнів”, — писали про вченого академіки НАН України В.Г.Бар’яхтар, В.В.Єременко та В.Ф.Зеленський [1006, с.528].

“Характерна риса наукової діяльності С.В.Пелетмінського — прагнення до вирішення найбільш складних проблем теоретичної фізики, яке поєднується у нього з значною глибиною і ясністю у розумінні природи явища та широтою у застосуванні методів дослідження”, — додає академік НАН України В.Є.Іванов [1007].

“Ви, як і Ваш вчитель О.І.Ахієзер, фізик-теоретик — універсал. Ваші дослідження охоплюють майже всі розділи теоретичної фізики — квантову електродинаміку і квантову теорію поля, теорію явищ перенесення у твердих тілах, теорію магнетизму, теорію надплинності і надпровідності, узагальнення магнітної гідродинаміки на випадки пружних тіл і нейтронної матерії, теорію електронної плазми і теорію кварк-глюонної плазми, релятивістську космологію”, — писали у вітальному адресі на честь 75-річного ювілею С.В.Пелетмінського колеги з Інституту фізики плазми Національного наукового центру “Харківський фізико-технічний інститут”. \*

Учень С.В.Пелетмінського член-кореспондент НАН України Е.Г.Петров пригадує: “Моя дипломна робота була присвячена з’ясуванню руху сингулярностей у гравітаційних полях сферичної симетрії. Тоді я вперше побачив, як Сергій Володимирович ставить задачу і як розв’язує її. Потім, вже навчаючись в аспірантурі під керівництвом С.В.Пелетмінського, я зрозумів, наскільки Сергій Володимирович заглиблюється у проблему, наскільки досконалим є його вміння проводити складні теоретичні розрахунки та наскільки широкий діапазон його наукових інтересів. Якщо моя дипломна робота була пов’язана з гравітацією, то вже дисертаційна робота стосувалась зовсім іншої галузі фізики — фізики магнетизму

твердих тіл” \*.

«Якщо розглядати роботи Сергія Володимировича, то можна зазначити їх характерну особливість: вони написані, як говорять фізики, на основі перших принципів з чітко поставленою задачею та з формулюванням одержаних результатів, і це суттєві результати. Все це дозволяє вважати Сергія Володимировича послідовником М.М.Боголюбова в статистичній фізиці, теоріях надплинності і надпровідності. Підкреслюю, одним з найбільш талановитих продовжувачів його справи», — писав колега С.В.Пелетмінського член-кореспондент НАН України К.М. Степанов \*. Відзначаючи характерні риси С.В.Пелетмінського як вченого, К.М. Степанов продовжує: “Відповідь на це запитання за пунктами: 1. Передусім, талант дослідника, дивовижна „пробивна сила” при роз’язанні конкретних задач. Ці якості дозволили йому одержати найважливіші наукові результати. 2. Широта наукових інтересів. Він з когорти фізиків-універсалів, які могли творчо працювати у багатьох галузях теоретичної фізики і одержувати там важливі результати, і яких, на жаль, з часом стає все менше. 3. Відданість своїй справі. Сергій Володимирович вважає теоретичну фізику найвищою з усіх наук, найефективнішою у пізнанні таємниць природи, і служіння їй – святою справою. 4. Дивовижна працездатність і дисциплінованість у всіх справах. 5. Скромність. Про силу його таланту говорять, зокрема, такі фактори: він проводить теоретичну викладку (виведення формул для величин, що описують дане явище) майже зразу, начисто, не роблячи помилок; він може опанувати, зрозуміти, що зроблено, будь-яку теорфізичну працю; він має каліграфічний почерк – риса, притаманна, за думкою деяких, талановитим людям. С. В.Пелетмінський протягом багатьох років читав курс квантової електродинаміки студентам 4-го курсу фізико-технічного факультету Харківського державного університету, дві перші пари по суботах, а наступні дві пари читав курс “Фізика плазми” і часто милувався довгими рівними формулами, написаними на дошці каліграфічним почерком С.В. На жаль, в останні роки почерк С.В. став більш мілким, але все одно виписані формули красиві. Сергій Володимирович вже рік не читає цей курс...

Розкажу про деякі епізоди його наукової біографії. Після закінчення 4-го курсу Сергій Володимирович підійшов до мене і попросив дати йому книгу Гайтлера “Теорія випромінювання”, переклад з англійської, 1940 р. Це відомий підручник з квантової електродинаміки. Сам Сергій Володимирович вже прослухав курс квантової механіки, а на 5-му курсі мав прослухати курс квантової електродинаміки, який читав Л.Розенцвейг за рукописом тоді ще не виданої монографії О.І.Ахієзера та В.Б.Берестецького “Квантова електродинаміка”. Через два місяці (пройшли липень та серпень 1952 року) він приносить мені взятую книгу. Я був здивований, що за цей час С.В. подолав річний курс, але він відповів, що все прочитав, та подякував за книгу. Досі не можу зрозуміти, коли він зміг подолати найскладніший за тих часів матеріал.

Сергій Володимирович являє собою приклад дисциплінованого працівника: кожний день рівно о 9-й ранку приходить на роботу, о 18-й годині чи пізніше закінчує свій робочий день. Так триває з 1956 року, більше ніж 50 років. Його співробітники намагаються наслідувати його. На роботі він робить усі викладки. В його кабінеті 4 чи 5 письмових столів, за якими працюють його співробітники. Я

вважаю, що робота к одному кабінеті декількох співробітників погіршує робочу атмосферу, але всі багаторічні розмови з С.В. на цю тему ні до чого не привели. Сергій Володимирович за своєю суттю демократ і не бажає мати окремих кабінет».\*

Учень С.В.Пелетмінського професор О.Й.Соколовський зазначав: «Сергій Володимирович підкоряє відданістю науці, працьовитістю. Протягом 37 років нашого знайомства він щодня працює у своїй робочій кімнаті в ХФТІ з 9 до 18 годин (з перервою на обід). Велике враження справляє універсальність С.В. як теоретика, про що свідчать його наукові статті й монографії. У цьому аспекті він поступається хіба що О.І.Ахієзеру, і зараз фактично є головою харківської школи теоретичної фізики». \*

С.В.Пелетмінський народився 14 лютого 1931 р. у селі Тьоткіно Курської обл. (Росія). У 1953 р. закінчив Харківський університет, після чого навчався в аспірантурі університету під керівництвом академіка О.І.Ахієзера. З 1957 р. він працює у Харківському фізико-технічному інституті, де входить до групи молодих талановитих теоретиків, яку О.І.Ахієзер сформував у 50-ті роки (В.Ф.Алексін, В.Г. Бар'яхтар, Д.В.Волков, К.М.Степанов, П.І.Фомін та інші). У цей час практично всі співробітники відділу О.І.Ахієзера займались теорією та розрахунками лінійних прискорювачів електронів і важких частинок. За словами К.М.Степанова, створення таких прискорювачів було однією з найважливіших задач, що були поставлені Фізико-технічному інституту керівництвом радянського атомного проекту. «Керівники теоретичних відділів О.І.Ахієзер та І.М.Ліфшиць вважали, що теоретики інституту повинні досліджувати проблеми, які стоять перед експериментаторами ФТІ АН СРСР, і проводили цю наукову політику ненастирливо, але досить твердо. Така політика була однією з суттєвих сторін наукової роботи теоретиків інституту. І сьогодні вона успішно проводиться в Інституті теоретичної фізики ім.О.І.Ахієзера Національного наукового центру «Харківський фізико-технічний інститут», — зазначав К.М. Степанов \*.

Спочатку Сергій Володимирович працював науковим співробітником відділу теоретичної фізики, у 1971—1988 рр. — завідувачем лабораторії, у 1989—1997 рр. — начальником теоретичного відділу, у 1997—2003 рр. — відділу квантової теорії поля і статистичної фізики. Після захисту кандидатської (1959 р.) та докторської (1966 р.) дисертацій стає професором (1969 р.), заслуженим діячем науки і техніки України (1998 р.), обирається членом-кореспондентом (1978 р.) та академіком НАН України (1990 р.). Про науковий авторитет С.В.Пелетмінського свідчить те, що його кандидатура була висунута в академіки НАН України Науково-технічною радою ХФТІ та особисто академіком М.М.Боголюбовим, підтримана вченими радими Радіоастрономічного інституту, Інституту фізики, Інституту ядерних досліджень НАН України, а також академіком І.Р.Юхновським [1007].

Своїми враженнями про спільний початок життєвого та наукового шляху ділиться близький друг із студентських років, колега та співавтор праць С.В. Пелетмінського академік НАН України В.Г.Бар'яхтар: "Ми із Сергієм Володимировичем Пелетмінським разом навчались. Познайомились ми у 1951 році. Нас одночасно перевели у Харківський університет, його з Воронізького університету, а мене з Ленінградського. Жили разом у гуртожитку на вулиці Артема , 49.



Сергій Володимирович ще у студентські роки виділявся серед нас своїми глибокими знаннями з фізики — квантової механіки, спеціальної та загальної теорії відносності. Його вирізняла глибина сприйняття, для нього дійсно не було проблем з математикою, яку він прекрасно схоплював і розумів. Це дуже глибока людина, і я радий, що доля мені дала можливість багато років співпрацювати з ним.

Ми разом поступили в аспірантуру. Олександр Ілліч поставив перед нами задачу про дослідження радіаційних явищ у квантовій електродинаміці. Ми проводили величезні обсяги розрахунків, просто колосальні, працювали, як правило, до дев'яти—десяти вечора кожен день. І к середині 1955 року здійснили дуже велику роботу. Це був дійсно натхненний час, коли ми з Сергієм Володимировичем багато працювали, обмірковували дуже багато ідей, і багато чому навчилися тоді, це було могутнє професійне зростання нас як теоретиків. Ми з Сергієм Володимировичем робили все разом тоді, і потім, і все життя. Це була дійсно надзвичайно дружна праця. Оскільки всі вчені досить честолюбні люди, то наша співпраця була занадто незвичайна, і це, безумовно, завдяки привабливості особистості Сергія Володимировича.

Заслугою Сергія Володимировича стало розуміння того, що до наших досліджень треба підходити, використовуючи методи М.М.Боголюбова. У 1961 році ми поїхали до М.М.Боголюбова у Дубну, там дві години доповідали йому. З тих часів у нас встановились дуже тісні творчі взаємини з Миколою Миколайовичем, який високо цінував Сергія Володимировича, особливо його праці з доведення існування ентропії у будь-якому порядку теорії збурень, з квантових рідин, а також монографію зі статистичної механіки, написану Ахієзером та Пелетмінським.

З праць Сергія Володимировича я б виділив, перш за все, дослідження надплинних електронних рідин, а також доведення зростання ентропії — видатні результати, без сумніву, світового класу, які мають загально-філософське значення. Вони важливі для вирішення проблеми переходу від впорядкованого руху до хаосу — однієї з центральних проблем сьогодні. Зростання ентропії є одним з методів, за яким можна прослідкувати, як із оборотної механіки виникають необоротні явища, формується стріла часу. Звичайно, в статистичній фізиці є інші напрями. Напряма, що розробляли московські математики, наприклад, Я.Г.Синай. Суттєві результати в галузі біології та кінетики в металах належать І.М.Ліфшицю. Сьогодні у Києві працює Е.А.Пашицький, у Харкові І.О.Кулик та В.П.Галайко. Зараз “бум” у всьому світі — бозе-ейнштейнівська конденсація. Тут також є першокласні праці — В.М. Локтев, Г.А.Мелков. Це сучасна статистична фізика. На жаль, досі ніхто не зрозумів природу високотемпературної надпровідності, не вирішена проблема виникнення хаосу у динамічних системах. Є дуже багато яскравих результатів, але мені приємно, що деякі з них належать особисто Сергію Володимировичу — моєму другові.

У Сергія Володимировича є дуже добра якість — він вміє обговорювати наукові проблеми, і приділяє цьому багато часу. Причому не тільки з теоретиками, а й з експериментаторами. Тому закономірно, що він став співавтором двох Державних премій. У нього багато блискучих учнів. Це виключно глибокий дослідник, математик екстракласу, він має сильну фізичну інтуїцію. Іноді він просто здогадувався. Одного разу ще у студентстві нам треба було знайти рівні нейтрона. Відомо, що у нейтрона є тільки один рівень зв'язаних станів. Де він розміщується:

біля верхнього краю потенціальної ями або біля нижнього? Я вважав, що біля нижнього, а Сергій сказав, що біля верхнього, і виявився правим. Ми тоді ще не досконало знали ядерну фізику, але пам'ятаю, як він сказав: “Він же потім розвалиться. Так коли йому легше розвалитись: коли рівень на дні чи коли рівень на верхівці? Трохи додав енергії – і він розвалився!”

Сергій Володимирович – надзвичайна особистість. Це найкраща людина (після Ахієзера), з якою мені пощастило зустрітися у житті. Ми товаришували сім'ями, я добре знав його батьків та відвідував їх гостинний дім. Чудова мама, прекрасний батько – інженер, який працював на цукрових заводах та прищепив Сергію інтерес до вищої математики. Та й сам Сергій Володимирович – це та людина, з якою, коли поспілкуєшся, то починаєш вірити, що все ж таки, в світі існує справедливість, вірна багаторічна дружба, високі ідеали. І якщо слідувати цим ідеалам, то життя складеться так, як у Сергія Володимировича.

Він приваблює своїм розумом та любов'ю до науки, доброзичливим ставленням, але разом з тим і вимогливістю. Іноді доводиться чути, що Пелетмінський настільки добрий, що може подарувати свої результати. Однак він постійно вимагає відповідального ставлення до роботи, тому ледар чи людина, не віддана науці, не може вжитись поряд з ним. Хоч він не сварить, не кричить, проте вміє показати, з ким приємно працювати, а з ким – ні.

Починаючи з 1959 року, з того часу, коли нас залучив до педагогічної діяльності Олександр Ілліч, ми працювали на фізико-технічному факультеті Харківського університету. Сергій Володимирович лише минулого року за станом здоров'я відмовився від педагогічної діяльності. Це давало, безумовно, нам можливість відбирати кращих, я також, як Ю.О.Храмов, вважаю, що для створення школи необхідно поєднання науки та педагогічного процесу. І, звичайно, семінари. Тут Сергієм Володимировичем також була здійснена величезна робота. Семінари відбувалися раз на тиждень у Будинку вчених Харкова, часто закінчувалися спільним обідом, на якому продовжувалось обговорення науки.” \*

Семінари та наукові форуми, керовані С.В.Пелетмінським, стали надзвичайно авторитетними. Це, перш за все, семінар відділу статистичної фізики та квантової теорії поля, міський семінар з теоретичної фізики, який проводився до початку 90-х років у Будинку вчених Харкова, Міжнародна конференція “Сучасні проблеми статистичної фізики” (1991 р.), де С.В.Пелетмінський очолював оргкомітет, Перша та Друга Міжнародні конференції “Квантова електродинаміка і статистична фізика” (2001, 2006), де він був замісником керівника Оргкомітету та членом Міжнародного консультативного комітету відповідно. С.В.Пелетмінський входив також у склад Оргкомітетів інших численних конференцій, присвячених різним проблемам статистичної фізики чи вибраним питанням інших галузей теоретичної фізики конденсованих середовищ, у дослідженні яких активно використовуються методи статистичної фізики.

“Мені доводилося відвідувати Міжнародний симпозіум зі статистичної фізики (на початку 90-х років), який був організований С.В.Пелетмінським. Я повинен відзначити дуже могутній склад учасників та високий рівень представлених доповідей. Крім того, я виступав з доповідями на декількох наукових семінарах відділу, очолюваного С.В.Пелетмінським. Рівень питань, які ставилися, був

надзвичайно високим, а атмосфера семінару характеризувалася найвищим ступенем доброзичливості”, — писав Е.Г.Петров. \*

У період інтенсивного розвитку плазмових досліджень у 60-ті роки С.В.Пелетмінський спільно з В.Г.Бар'яхтаром та В.Ф.Алексінім під керівництвом О.І.Ахієзера звертаються до побудови теорії плазми. Їх праці були присвячені теорії радіаційних ефектів у процесах релаксації та перенесенню у плазмі, яка знаходиться у сильному магнітному полі, а також квантовим ефектам у електродинаміці релятивістської електрон-іонної та електрон-позитрон-фотонної плазми. Особливе місце серед цих досліджень належить спільній з О.І.Ахієзером праці 1960 р. “Застосування методів квантової теорії поля до досліджень термодинамічних властивостей газу електронів та фотонів” [1008]. Тут було запропоновано новий механізм релаксації електронів у плазмі, пов'язаний з процесами випромінювання та поглинання фотонів електронами в магнітному полі, а також вивчено інтеграл зіткнень електронів плазми, який враховує процеси випромінювання та поглинання фотонів. Цей механізм виявився визначальним для релаксації електронів і явищ перенесення в плазмі в області малих густин і високих температур, тому знайдений інтеграл зіткнень для гарячої плазми виявився суттєвішим, ніж звичайний інтеграл зіткнень Ландау. Важливо, що одержані результати були широко використані для досліджень релятивістської (електрон-позитронної) плазми, а у 80-ті роки ХХ століття виявилися актуальними щодо досліджень властивостей кварків та пошуків кварк-глюонної плазми. Характеризуючи цей цикл праць, К.М.Степанов писав: «Зупинюсь коротко на аналізі роботи О.І.Ахієзера, В.Ф.Алексіна, В.Г.Бар'яхтара та С.В.Пелетмінського, а також двох наступних праць Сергія Володимировича, у яких вони показали, що релаксація в електронному газі у сильному магнітному полі може здійснюватися завдяки обміну між електронами та магнітотормозними фотонами. У такій плазмі може виникнути електричний опір внаслідок поглинання (зштовхування) такого фотону з нерівностями поверхні камери. Цей ефект було використано Дж. Доусоном (J.Dowson) та П.Ко (P.Kaw) для підтримки струму рівноваги у токамаку. Роботу було продовжено С.В.Касиловим (ННЦ ХФТІ) та його колегою з Інституту теоретичної фізики технічного університету Граца (Австрія) В. Кернбихлером (W.Kernbichler), які знайшли «оптимальне» гофрирування поверхні камери» \*.

Праці С.В.Пелетмінського з теорії магнетизму визначили сучасний рівень теорії кінетичних і релаксаційних явищ в магнітовпорядкованих кристалах. У 60-ті роки ХХ століття ним разом з О.І.Ахієзером та В.Г.Бар'яхтаром на основі розвинутого О.І.Ахієзером у 1946 р. уявлення про магнони як взаємодіючі спінові хвилі, вперше були виконані дослідження магнітопружних хвиль у феромагнетиках та антиферомагнетиках, побудована квантова теорія кінетичних, релаксаційних та високочастотних процесів у феродіелектриках (1959 р.) і теорія зв'язаних магнітоакустичних хвиль [820,821], а також у 1956 р. передбачено нове явище – магнітоакустичний резонанс [822]. (Більш детально ці роботи розглянуті у розділі 5. 2.3.)

У цей період В.Г.Бар'яхтаром та С.В.Пелетмінським було також розвинуто мікроскопічну квантово-механічну теорію термо-гальвано-магнітних явищ в металах та напівпровідниках на основі конкретної структури інтеграла зіткнень

електронів з фононами; О.І.Ахієзером та С.В.Пелетмінським було поставлене та розв'язане питання про встановлення розподілу Планка для фотонів в середовищі [823]. Ці результати увійшли у монографію С.В.Пелетмінського, О.І.Ахієзера та В.Г.Бар'яхтара 1967 р. “Спінові хвилі” [824], вони були відзначені премією ім.К.Д.Синельникова НАН України за 1978 р. За цикл праць “Відкриття і дослідження динамічних явищ, пов'язаних з фононними взаємодіями в магнітних кристалах” С.В.Пелетмінському, В.Г.Бар'яхтару та О.І.Ахієзеру було присуджено Державну премію України в галузі науки і техніки за 1986 р.

У подальшому в 60-ті—70-ті роки ХХ століття С.В.Пелетмінський виконав фундаментальний цикл робіт у галузі розбудови методології статистичної фізики. Ним було запропоновано метод опису кінетичних процесів, де завдяки певній структурі гамільтоніана стан в області великих часів характеризується певним набором параметрів, який визначається ергодичними співвідношеннями. Використовуючи метод сумування секулярних членів, Сергій Володимирович з'ясував фізичну і математичну причини можливості такого скороченого опису. В цих працях він розвиває та узагальнює метод М.М.Боголюбова скороченого опису нерівноважних процесів для широкого класу макроскопічних систем, використовуючи такі загальні принципи, як принцип просторового послаблення кореляцій та ергодичні співвідношення. З цього приводу О.І.Ахієзер навіть говорив, що С.В.Пелетмінський в такій самій мірі є учнем М.М.Боголюбова, в якій і його учнем. О.І.Ахієзер писав: “Наукова спадщина М.М.Боголюбова величезна. Вона стосується багатьох галузей теоретичної фізики. І я можу гордитися тим, що розвиток досліджень у галузі статистичної фізики, пов'язаних з ім'ям Миколи Миколайовича Боголюбова, з великим успіхом продовжується в нашому інституті надзвичайно талановитим вченим, академіком Національної академії наук України Сергієм Володимировичем Пелетмінським, моїм найстаршим учнем і найближчим співробітником. Ми разом з С.В.Пелетмінським написали книгу “Методи статистичної фізики”. У цій книзі ми відзначаємо значення видатних праць М.М.Боголюбова з отримання кінетичних рівнянь та основ статистичної фізики”. \*

«Наукове коріння Сергія Володимировича, різноманітність та широта тематики його досліджень закладені у школі його вчителя О.І.Ахієзера. Сам С.В.Пелетмінський завжди підкреслював свою приналежність до школи теоретичної фізики О.І.Ахієзера, ставився до Олександра Ілліча з глибокою повагою. Олександр Ілліч неодноразово говорив: «У мене три сини: Леля, Вітя та Сергій». Цими словами Олександра Ілліча висловлено його глибоку повагу до Сергія Володимировича і Віктора Григоровича, їх таланту, ставлення до науки та суспільних явищ», — писав з цього приводу К.М.Степанов. \*

У С.В.Пелетмінського були контакти також і з учнем М.М.Боголюбова С.В.Тябликовим, який одного разу в Дубні у кабінеті М.М.Боголюбова познайомив його та В.Г.Бар'яхтара, що також був учнем О.І.Ахієзера та однокурсником С.В.Пелетмінського, з Миколою Миколайовичем, і відтоді між ними встановились добрі робочі контакти. С.В.Пелетмінський не тільки значно розвинув ідеї Боголюбова в статистичній фізиці, а й ознайомив харківських теоретиків з цими ідеями. Він говорив, що монографія М.М.Боголюбова “Динамічна теорія в статистичній фізиці” захопила його, як художня література. Ще навчаючись в аспірантурі, він організував

семінар за цією книгою. \*

Важливо, що при математичному обґрунтуванні методу скороченого опису С. В.Пелетмінським було з'ясовано вирішальну роль принципу просторового послаблення кореляцій між молекулами, а також ергодичних співвідношень для нерівноважного статистичного оператора [632—634]. Одержане рівняння Пелетмінського—Яценко для статистичного оператора стало значним досягненням нерівноважної статистичної фізики [635].

Оскільки макроскопічна система з великим ступенем точності є системою з нескінченно великим числом степенів вільності, то будь-яке макроскопічне описування таких систем по суті може бути тільки скороченим. Причому за наявності малого параметра ідея скороченого опису може застосовуватися не тільки до станів статистичної рівноваги, а й до широкого класу нерівноважних станів [636]. Поклавши в основу розрахункової схеми добре розроблені квантово-польові методи, на базі запропонованого методу С.В.Пелетмінський побудував квантові кінетичні рівняння для нормальних та вироджених систем.

Розроблений метод скороченого опису, об'єднаний з іншим методом теорії багатьох частинок – методом функцій Гріна, дозволив знаходити асимптотичні представлення останніх в різних областях частот та хвильових векторів, де стандартні методи теорії збурень незастосовні. Так, С.В.Пелетмінським та В.С.Щолоковим було досліджено асимптотичні представлення електродинамічних функцій Гріна, а також одночасткових функцій Гріна вироджених бозе- та фермі-систем [637—639].

Кінетичні явища в феро- та антиферомагнетиках та нерівноважну матрицю густини вивчав з 1967 р. член-кореспондент НАН України Е.Г.Петров — один з перших учнів С.В.Пелетмінського [1010,1011]. Тепер ці дослідження у вигляді кінетичних рівнянь у стохастичних полях застосовуються ним для задачі молекулярної і біомолекулярної електроніки (протяжних молекул) [1012].

Ідея скороченого опису нерівноважних станів дала змогу також дослідити питання побудови кінетичної теорії крупномасштабних флуктуацій та вирішити таку фундаментальну проблему статистичної механіки, як побудова нерівноважної крупноструктурної ентропії системи взаємодіючих частинок (ці результати детально викладено у розділі 5.1.4.). У 1986 р. за цикл робіт з теорії систем зі спонтанно порушеною симетрією С.В.Пелетмінському спільно з П.М.Боголюбовим та І.Р.Юхновським було присуджено премію імені М.М.Крилова НАН України.

У 80-х—90-х роках ХХ століття у працях С.В.Пелетмінського та його учнів О. О.Яценка, В.В.Красильникова та О.О.Ісаєва на основі запропонованої Л.Д.Ландау концепції фермі-рідини одержала розвиток теорія фермі-рідини та було побудовано узагальнений фермі-рідинний підхід для надплинних систем [643—646].

За ініціативи О.І.Ахієзера ці методи було також застосовано С.В.Пелетмінським з учнями для дослідження фазових переходів в ядерній матерії. Ці праці становлять перспективний напрям на межі ядерної фізики, статистичної фізики, астрофізики та спрямовані на дослідження фізичних процесів в нейтронних зорях (пульсарах). За цикл робіт “Кінетичні явища в квантових рідинах і кристалах” академіку С.В.Пелетмінському з групою вчених було присуджено Державну премію України в галузі науки і техніки за 1996 р. У 2002 р. разом з Л.А.Пастуром та В.Г.

Кадишевським він був нагороджений премією ім.М.М.Боголюбова НАН України за цикл праць „Теорія поля та теорія неупорядкованих систем”. Останнім часом С.В.Пелетмінський розробляє теорію періодичного бозе-конденсату [1009].

Дослідження С.В.Пелетмінського та його учнів щодо загальних методів статистичної механіки та їх застосувань до фермі- та бозе-систем увійшли у монографію 1977 р. О.І.Ахієзера та С.В.Пелетмінського “Методи статистичної фізики” [173].

Водночас з інтенсивним науковим пошуком Сергій Володимирович віддає багато сил і часу підготовці нових кадрів. Викладати у Харківському університеті він почав ще у 1956 р., будучи аспірантом. Більше 40 років він як професор кафедри теоретичної ядерної фізики, читає студентам фізико-технічного факультету лекції з квантової електродинаміки, фізичної кінетики, а також спецкурс “Додаткові розділи квантової статистики”. Його лекції завжди вирізняються ясністю та глибиною викладення.

Сергій Володимирович багато зробив для становлення цього факультету, є членом спеціалізованої вченої ради з захисту кандидатських і докторських дисертацій при факультеті, входить в редакційну колегію “Вісника Харківського національного університету” (серія фізична, “Ядра, частинки, поля”). Він є членом вчених рад Фізико-технічного інституту та Інституту монокристалів, тривалий час керував філософським семінаром Фізико-технічного інституту .

За словами Е.Г.Петрова, С.В.Пелетмінського як наукового лідера і людину характеризує “глибока порядність, відданість науці, ретельність та акуратність у виконанні досліджень, фундаментальність у підході до вирішення проблеми, дуже інтелігентне, делікатне та рівне поводження з учнями , відсутність снобізму.” \*

В.В.Красильников зазначає, що „С.В.Пелетмінський надзвичайно вимогливий до себе як вчений, має значно розвинену наукову інтуїцію та титанічну працездатність. Як вчителю йому немає рівних. Він прекрасний педагог, пояснює ясно, чітко та дохідливо, завжди показує особистим прикладом, як треба боротися за правильність наукового результату. Характер спілкування С.В.Пелетмінського зі своїми учнями дуже м’який та простий. Учням завжди приємно спілкуватись з С.В., оскільки він завжди знає, як вийти з „глухого кута”. При цьому він ніколи не натякає і не підкреслює, який він великий вчений чи „великий начальник”. Він завжди рівний зі своїми учнями”.\*

“Видатний вчений світового рівня, С.В.Пелетмінський – інтелігентна, виключно добра та терпелива людина, в принципових питаннях – не визнає компромісів. Завжди готовий щедро ділитися ідеями та знаннями як з учнями, так і з колегами. Головна риса як вченого – безмірна любов до науки та інтерес практично до всіх галузей фізики, вимогливість до рівня наукових результатів та математичної точності їх одержання. С.В.Пелетмінський щиро любить своїх учнів, піклується про них. Відносно науки — вимогливий вчитель та колега, завжди готовий поділитися у разі необхідності порадою чи ідеями. Йому дійсно цікаво спілкуватися з учнями. Він завжди працює сам навіть із наймолодшими серед своїх учнів, початківцями. Завжди вимагає від них багато працювати, щоб підтвердити зростання свого наукового рівня (захист дисертацій та одержання наукових звань)”, — таким бачить свого вчителя Ю.В.Слюсаренко \*.

“Як вчителя С.В.Пелетмінського вирізняє доступність та простота у спілкуванні, доброзичливість і прагнення допомогти і навчити, особливо молодих учнів, які починали свою наукову роботу під його керівництвом. Разом з тим, він усіяко вітає та заохочує потяг до самостійності у дослідницькій роботі, але при цьому з незмінною вимогливістю до досить високого рівня теоретичних методів, використаних у роботі. Результуючі формули мають бути досить красиві з математичної точки зору, і в цьому, як правило, запорука їх справедливості. Як вченого, С.В.Пелетмінського виділяє також принциповість у наукових питаннях. Він охоче консулює з різних питань теоретичної фізики всіх, хто звертається до нього за порадою. Щодо стиля роботи С.В.Пелетмінського як вченого слід відзначити такі його риси, як широта наукових інтересів, вміння чітко сформулювати задачу наукового дослідження та математично красиво її роз’язати. Для нього характерна самодисципліна, його ставлення до роботи може слугувати прикладом не тільки для учнів, а й для інших співробітників”, — згадував О.М. Тарасов \*.

“Сергій Володимирович, залучаючи співробітників до спільної роботи ( молодих, або тих, хто має досвід роботи), має приблизний план постановки задачі, вибору вихідних рівнянь та методів їх аналізу, всю головну частину досліджень виконує сам. Службові стосунки зі співробітниками рівні, товариські. Дуже делікатний: не може зробити зауваження співробітнику, навіть у тих випадках, коли той його заслуговує. Своім прикладом показує, як повинна виконуватись робота фізика-теоретика”, — згадував К.М.Степанов. \*

Висвітлені риси особистості С.В.Пелетмінського викликають повагу, навіть захоплення у його учнів. „Ми, учні, розуміли, скільки знань, вміння, сил він нам віддає. Ми намагались йому у всьому слідувати, і перш за все у відповідальності за одержаний науковий результат. Ми обожнювали його. Ми любили і любимо його і зараз, хоча доля розкидала нас по білому світу”, — писав В.В.Красильников. \*

Плідна наукова та педагогічна діяльність, скромність і сердечність у спілкуванні дали змогу С.В.Пелетмінському створити відому в усьому світі школу зі статистичної фізики. Серед його учнів 12 докторів та 7 кандидатів наук. Це члени-кореспонденти НАНУ Е.Г.Петров та Ю.В.Слюсаренко, доктори наук О.О.Яценко, В. І.Приходько, Ю.П.Вірченко, О.Й.Соколовський, М.Ю.Ковалевський, Н.М. Лавриненко, В.В.Красильников, М.В.Ласкін, О.О.Ісаєв, Д.Д.Цхакая, кандидати наук В.Д.Цуканов, О.М.Тарасов, В.С.Щолоков С.С. Плохов, Е.А.Іванченко, В.П. Скрипник, А.А.Рожков.

Характерними рисами наукової школи академіка С.В.Пелетмінського є “широкий спектр фізичних проблем: фізика конденсованого стану речовини, ядерна фізика, магнетизм, надпровідність. Роботам притаманний фундаментальний характер, використовуються найсучасніші методи досліджень, запозичені як з квантової теорії поля, так із статистичної фізики”, — писав Е.Г.Петров \*. Ю.В. Слюсаренко так характеризує стиль цього неформального творчого колективу: ”Вимогливість до строгості своїх досліджень та досліджень колег, високий рівень наукових результатів, акуратність та точність формулювань вихідних положень та результатів, їх математична вишуканість та завершеність. Високі вимоги до робіт, що друкуються, до постійної апробації результатів шляхом їх публікації у фахових

наукових журналах та доповідей на авторитетних вітчизняних та закордонних наукових форумах. Доброзичливість і товариський дух у колективі, взаємодопомога.” \*

„Особливості досліджень у науковій школі С.В.Пелетмінського полягають у наступному: найвищій математичний рівень, фундаментальність підходу до вирішення теоретичних проблем, відповідальність за одержаний результат, актуальність задач, які розглядаються. Щодо стилю та методів досліджень, то тут відмічається, перш за все, висока ерудиція вченого у своїй галузі, володіння багатством палітри математичних та теорфізичних методів, принципів своєї позиції”, — додає В.В.Красильников.\*

“Дослідження Сергія Володимировича та його учнів характеризують чітка постановка задачі, використання основних рівнянь та методів їх розв’язання у якомога більш загальному вигляді (вибір малих параметрів, граничних асимптотичних розв’язків, розгляд розв’язків у окремих випадках)”, — зазначав К.М. Степанов.\*

О.М.Тарасов підкреслює, що “С.В.Пелетмінського та більшу частину представників його наукової школи в галузі статистичної фізики вирізняє прагнення одержувати загальні результати, які мають, як правило, фундаментальний характер, на основі загальних методів статистичної фізики і квантової теорії поля з використанням аналітичних математичних методів. Протягом приблизно останніх 15 років, після того, як у нас з’явилась можливість користуватися персональними комп’ютерами, водночас з цими методами все більш активно та частіше стали використовуватись і розрахункові можливості комп’ютерів (особливо більш молодими представниками школи Сергія Володимировича).

При цьому сам С.В.Пелетмінський віддає перевагу аналітичним математичним розрахункам у стилі академіка М.М.Боголюбова, оскільки відносить себе та своїх найближчих учнів до числа послідовників і певною мірою продовжувачів справи М.М.Боголюбова в галузі статистичної фізики, привносячи та розвиваючи також свої методи дослідження” \*.

О.Й.Соколовський так писав про свого вчителя: ”У Сергії Володимировичі приваблюють відданість науці, працелюбність. Протягом 37 років нашого знайомства він кожний день працює в своїй робочій кімнаті у ХФТІ з 9.00 до 18.00 (з перервою на обід). Глибоке враження справляє універсальність Сергія Володимировича як теоретика, краса листків з його розрахунками, про що свідчать його наукові статті і монографії, В цьому аспекті він поступається хіба що О.І. Ахієзеру і зараз фактично очолює харківську школу теоретичної фізики.

Сергій Володимирович — чудовий вчитель. Він мудро, крок за кроком, веде молодого вченого до розуміння складних речей і вирішення наукової проблеми. Йому притаманна делікатність, яка майстерно поєднується з твердим відстоюванням своїх переконань, чіткість думок та винахідливість. Сергій Володимирович дуже простий у спілкуванні, з ним не відчуваєш дистанції, а тільки позитивні емоції від того, що зрештою все так просто”. \*

Уважне ставлення Сергія Володимировича до всіх учнів сприяло тому, що в колективі природним чином відбувався наукове зростання молодих вчених. Е.Г. Петров розповідав так: ”Знайомство відбулося у 1963 році, коли я, будучи



студентом Воронізького державного університету, приїхав проходити курсову практику в теоретичному відділі ХФТІ АН УРСР. Потім у 1964 р. курсова практика перейшла в дипломну. Після вступу до аспірантури ХФТІ тему дисертації мені запропонував С.В.Пелетмінський уже як керівник”. \*

Так, наукові результати члена-кореспондента НАН України Е.Г.Петрова стосуються статистичної фізики, молекулярної електроніки, біофізики, магнетизму. Ним розвинуто теорію магнітних екситонів для неколінеарних магнітовпорядкованих кристалів, що дозволило пояснити спектральні властивості антиферромагнетиків у сильних магнітних полях [1010—1012]. Великий цикл його праць присвячений також дослідженню кінетики транспорту електронів у низькорозмірних молекулярних сполуках, зокрема, біологічного походження. Тут для одержання кінетичних рівнянь, які описують пружні та непружні шляхи транспорту електронів, були використані ідеї С.В.Пелетмінського із застосуванням методу нерівноважної матриці густини.\* В результаті Е.Г.Петровим було розроблено донор-акцепторну модель перенесення електронів у білкових сполуках, що дозволило зрозуміти механізм дистанційного трансмембранного електронного руху, фізику розділення зарядів на первинних стадіях фотосинтезу, а також кооперативність окиснювально-відновлювальних реакцій у ферментах. Ці роботи було узагальнено у побудові кінетичного підходу до опису транспорту зарядів через молекули, в рамках якого виявлено важливу регуляторну роль стрибкових процесів у тунелюванні електронів та дірок при резонансному режимі трансмісії зарядів [1012].

Е.Г.Петров постійно підтримує контакти з С.В.Пелетмінським, хоча одразу після закінчення аспірантури почав працювати в Інституті теоретичної фізики НАН України, де зараз керує відділом. Наприклад, вони працювали за спільними темами “Фундаментальні дослідження зі статистичної фізики нерівноважних процесів (проект ДКНТ № 2/151, 1992—1993 рр.), та «Фундаментальні проблеми нерівноважних процесів в конденсованих середовищах» (проект ГКНТ № 2.3/657, 1994—1995 рр.)

Член-кореспондент НАНУ Ю.В.Слюсаренко також відбувся як науковець завдяки безпосередньому спілкуванню з С.В.Пелетмінським із студентських років. Він слухав його лекції з квантової електродинаміки та статистичної фізики на 4 курсі фізико-технічного факультету Харківського університету, підготував під його керівництвом три курсових і одну дипломну роботу, навчався в аспірантурі університету у Сергія Володимировича, захистив кандидатську та докторську дисертації. Пізніше проводив спільні наукові дослідження з С.В.Пелетмінським на кафедрі теоретичної ядерної фізики Харківського університету та у теоретичному відділі ХФТІ, і став наступником Сергія Володимировича у керівництві теоретичним відділом та співвиконавцем дослідних програм, зокрема, розділу “Теоретичні дослідження з проблем статистичної механіки конденсованих систем і теорії поля” у програмі “Атомна наука і техніка” для ННЦ ХФТІ (1996—2005).

Ю.В.Слюсаренку належить узагальнення методу скороченого опису на випадок систем з нерівноважними крупномасштабними флуктуаціями, а також систем зі спонтанно порушеною симетрією (кристалічні структури, феро- та антиферромагнетика, магнітоакустичні системи). Зокрема, ним побудовано загальну

макроскопічну теорію довгохвильових флуктуацій та розглянуто її застосування в теорії турбулентності (Ю.В.Слюсаренко, С.В.Пелетмінський), виконано піонерську роботу з дослідження бозе-ейнштейнівської конденсації частинок з цілим спіном у зовнішньому магнітному полі (Ю.В.Слюсаренко, С.В.Пелетмінський, О.І.Ахієзер), за допомогою методу квазісередніх доведено існування просторово-періодичних станів бозе-ейнштейнівського конденсату, передбачено ряд нетрадиційних фазових переходів у нормальних фермі-рідинах та відкрито ефект появи у системі ферміонів спонтанної швидкості внаслідок нетрадиційного фазового переходу (аналог ефекту Ейнштейна—де Гааза) (Ю.В.Слюсаренко, С.В.Пелетмінський, О.С.Пелетмінський), вивчено адсорбційно-десорбційну рівновагу на поверхні металів, що знаходяться у розрідженій атмосфері кисню в умовах бомбардування поверхні іонним пучком, розв'язано задачу про залежність виходу вторинних токів від току первинного пучка, а також задачу про вплив зовнішнього електричного поля на енергетичний спектр вторинних іонів, розроблено модель опису початкової стадії та еволюції тонкоплівкових покриттів в умовах бомбардування поверхні важкими іонами та встановлені умови формування зародків у вигляді сферичних куполів [1013—1017].

“У нас і досі є спільні наукові інтереси, наукове співробітництво, спільні публікації. Я продовжую розробляти ідеї С.В.Пелетмінського, працюючи як у співавторстві з ним, так і самостійно, зокрема, з точки зору їх застосувань у суміжних галузях фізики. Наприклад, в галузі фізики поверхні та взаємодії з поверхнею заряджених частинок», — писав Ю.В.Слюсаренко \*.

Один з учнів С.В.Пелетмінського — це відомий фахівець у галузі необоротних процесів у матеріалознавстві професор В.В.Красильников. Він розвинув кінетичну теорію електронних систем з парамагнітними домішками, в якій обчислено кінетичні коефіцієнти, зокрема, аномальну поведінку електропровідності внаслідок інтерференції електрон-домішкової та кулонівської взаємодій, описано спінові хвилі. Вивчив вплив непрямого обміну магнітних домішок на спінові хвилі у електронній фермі-рідині, розглянув особливості низькочастотної електропровідності в області низьких температур, розвинув теорію електронної фермі-рідини з парамагнітними домішками, фермі-рідинну теорію двофазних надпровідників, яка застосовується у високотемпературній надпровідності. Показав можливість фазових переходів першого роду у моделі надплинної фермі-рідини та побудував феноменологічну фермі-рідинну теорію важкоферміонних сполук.

В.В.Красильников так згадував про початок свого наукового шляху: ”З С.В. Пелетмінським моє знайомство відбулось у Харківському фізико-технічному інституті в 1968 р. В той час я займався теоретичною ядерною фізикою, тобто працював у галузі, доволі далекій від інтересів Сергія Володимировича. Про С.В. Пелетмінського я вже чув на той час як про талановитого молодого вченого, який вивчає нерівноважну статистичну фізику. Обставини сприяли моєму знайомству з С. В., оскільки я взяв, що ми працюємо з ним у сусідніх кімнатах одного й того ж будинку. Невдовзі магнетизм вченого та особистості „затягнули” мене в лабораторію С.В., і я почав працювати під його керівництвом у галузі кінетичної теорії електрон-домішкових систем. Моя робота під керівництвом С.В. Пелетмінського тривала близько 30 років і обумовила вибір теорії необоротних процесів у статистичній фізиці як вузької спеціалізації та теми дисертації „Фермі-

рідинний підхід до опису термодинамічних та кінетичних процесів у конденсованих середовищах”.

За час спільної праці я весь час постійно вчився у Сергія Володимировича, відвідував його лекції в Харківському університеті, брав участь у всіх семінарах, на яких він виступав з доповідями, наприклад, міський семінару у Будинку вчених, який проходив під керівництвом Сергія Володимировича, а також Міжнародну конференцію зі статистичної фізики в ХФТІ в 1991 році, яку проводив Оргкомітет на чолі з академіком С.В.Пелетмінським. Захистив кандидатську і докторську дисертацію при його активній підтримці. У багатьох моїх наукових працях керівництво С.В.Пелетмінського втілювалось передусім в актуальній постановці даної конкретної задачі, і, звичайно, у досягненні теоретичного результату високої значущості. Сьогодні я працюю в іншій галузі фізики, а саме, в галузі матеріалознавства, проте знання та навички, набуті під час роботи з С.В. Пелетмінським, мені дуже допомагають.”\*

Представником молодшого покоління учнів С.В.Пелетмінського є старший науковий співробітник відділу статистичної фізики та квантової теорії поля харківського фізико-технічного інституту кандидат фізико-математичних наук О.М. Тарасов. Галузь його наукової спеціалізації — рівноважна та нерівноважна механіка квантових багаточастинкових систем зі спонтанно порушеними симетріями, перш за все, надплинних бозе- та фермі-рідин (як з синглетним, так і з триплетним за спіном паруванням ферміонів), а також магнітних систем. О.М.Тарасов вивчав  $^4\text{He}$  та системи квазічастинок з довільним законом дисперсій у конденсованих середовищах як бозе-системи, як фермі-рідини з триплетним паруванням — низькотемпературні надплинні фази рідкого  $^3\text{He}$  в магнітному полі, а також фази надгустої нейтронної рідини, що існує усередині нейтронних зір, які виявляють властивості надплинності нуклонів та мають сильне магнітне поле [ $^{10}18\cdot1019$ ].

Так, ним було виведено кінетичні рівняння для частинок низьких енергій (нейтронів та заряджених частинок), які взаємодіють з колективними збудженнями у конденсованих середовищах. У межах мікроскопічного підходу на основі методу квазісередніх та методу скороченого опису нерівноважних процесів було запропоновано виведення термодинамічних співвідношень та рівнянь гідродинаміки для надплинних бозе-систем, таких як  $^4\text{He}$ , для систем квазічастинок, підпорядкованих довільному закону дисперсії у різних конденсованих середовищах та для релятивістських надплинних бозе-рідин, а також для надплинних фермі-систем із синглетним типом куперівського парування. Для цих же систем було знайдено загальний вигляд низькочастотних асимптотик запізнілих функцій Гріна (що описують відгук системи на зовнішнє збурення), що побудовані з довільних квазілокальних операторів. Для низькотемпературних надплинних фаз рідкого гелію  $^3\text{He}$ , у яких відбувається триплетне куперівське парування атомів  $^3\text{He}$ , побудовані рівняння гідродинаміки на основі методу квазісередніх та методу скороченого опису нерівноважних процесів. У цьому ж підході одержані рівняння “гідродинаміки” також для багатопідґраткових магнетиків.

Використовуючи загальний фермі-рідинний підхід, О.М.Тарасов для надплинних фаз  $^3\text{He}$  при температурах, близьких до температури переходу з нормального у надплинний стан, вивів рівняння Гінзбурга—Ландау з урахуванням

зовнішнього магнітного поля та течії гелію-3. Одержав також загальні вирази для функцій розподілу квазічастинок у надплинних фазах фермі-рідини з триплетним за спином паруванням при наявності досить сильного магнітного поля та течії рідини. Ці вирази дозволили одержати термодинамічні функції таких фермі-рідин, як надплинні фази гелію-3, а також надплинні фази у густій нейтронній матерії, яка існує всередині сильно намагнічених нейтронних зір. Зокрема, одержані аналітичні вирази для температур фазового переходу цих фермі-рідин з нормального стану у різні надплинні фази з триплетним за спіном паруванням у магнітному полі, а також вирази для щільності у енергетичному спектрі квазічастинок в надплинних фазах. Ці надплинні фермі-рідини виявляють цікаві магнітні властивості і тому були одержані вирази також для їх магнітної сприйнятливості.

Шлях О.М.Тарасова в науку був типовим для представників школи С.В.Пелетмінського завдяки плідній педагогічній праці Сергія Володимировича. “Познайомились ми із Сергієм Володимировичем у вересні 1976 року. Тоді я був студентом четвертого курсу Фізико-технічного факультету Харківського університету і навчався на кафедрі теоретичної ядерної фізики. С.В.Пелетмінський читав нам курс квантової електродинаміки. У той же період часу необхідно було виконати курсову наукову роботу, і я звернувся до Сергія Володимировича з проханням бути моїм науковим керівником. Він погодився і запропонував мені цікаву тему з нелінійної скалярної електродинаміки. Через рік, вже на 5 курсі, після того, як нам прочитали курс лекцій зі статистичної фізики, я вирішив, що буду спеціалізуватися саме в галузі статистичної фізики і попросив Сергія Володимировича допомогти мені вибрати тему для наукової роботи в цій галузі теоретичної фізики. Була виконана спочатку курсова, а потім дипломна робота зі статистичної фізики під керівництвом С.В.Пелетмінського. З 1979 р. я почав працювати в Харківському фізико-технічному інституті у теоретичному відділі О.І.Ахієзера, в лабораторії, якою керував Сергій Володимирович”, — пригадував О.М.Тарасов\*.

Учень С.В.Пелетмінського доктор фізико-математичних наук О.Й.Соколовський у 1971 р. закінчив кафедру теоретичної фізики фізичного факультету Дніпропетровського національного університету, за рекомендацією завідувача кафедри В.С.Ваняшина був відряджений до Харківського фізико-технічного інституту, де підготував дипломну роботу, у 1971—1974 рр. навчався в аспірантурі, у 1989—1992 рр. — докторантурі при кафедрі теоретичної ядерної фізики фізико-технічного факультету Харківського університету під керівництвом С.В.Пелетмінського.

Спільно з С.В.Пелетмінським вчений розробив новий підхід до побудови нерівноважної ентропії, запропонував формули для операторів потоків та мікроскопічну теорію для обчислення потоків у рівноважній надплинній рідині (1974 р.); узагальнив теорію бозе-конденсації Гроса—Питаєвського на випадок наявності квазічастинок та принцип симетрії кінетичних коефіцієнтів Онсагера (з М.Ю.Ковалевським, 1977 р.). Побудував мікроскопічну гідродинаміку надплинної бозе-рідини (з М.Ю.Ковалевським, Н.М.Лавриненко та В.С.Щолоковим, 1974—1982 рр.), теорію броунівського руху в нерівноважному середовищі (1977—1982 рр.), гідродинаміку гранульованої системи з непружних куль (1985—1986 рр.), дав

проекційне формулювання методу скороченого опису нерівноважних станів (і з'ясував його зв'язок з дослідженнями І.Р.Пригожина) (1986—1998 рр.); концепцію згладжених довгохвильових флуктуацій та флуктуаційну гідродинаміку (з С.В.Пелетмінським, 1991—1992 рр.). Винайшов розв'язок проблеми Боголюбова—Греда для флуктуаційної гідродинаміки та узагальнення теорії взаємодіючих мод (з С.В.Пелетмінським, 1991—2006 рр.). Запропонував флуктуаційну електродинаміку в рівноважному та гідродинамічному середовищах (2001—2005 рр.); концепцію хвиль кореляцій електромагнітного поля та їх взаємодії з плазмовими й звуковими хвилями; кінетику систем випромінювачів електромагнітного поля (з 2003 р.) та систем у зовнішньому випадковому полі (спільно з Ю.В.Слюсаренко, з 2003 р.)

Спільно з С.В.Пелетмінським та іншими представниками його наукової школи брав участь у Проекті ІНТАС № 00577 „Динаміка флуктуацій в нерівноважних системах” (2001—2003 рр.) та Проекті державного фонду фундаментальних досліджень України № 2.7/418 „Вплив макроскопічних флуктуацій на нерівноважні системи” .

Таким чином, взаємна повага в колективі та тісні творчі контакти, безумовно, свідчать про монолітність, згуртованість та постійний розвиток наукової школи академіка С.В.Пелетмінського.

## ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 6

1. Вперше виявлено центри досліджень в галузі статистичної (Київ, Харків, Львів, Одеса) та показано одержані в них результати. Це, перш за все, Харківський фізико-технічний інститут, Інститут фізики, Інститут теоретичної фізики, Інститут фізики конденсованих систем, Фізико-технічний інститут низьких температур, Інституті радіофізики та електроніки, Інститут металофізики, Український науково-дослідний гідрометеорологічний інститут, Харківський, Київський, Одеський та Львівський університети, а також наукові школи академіків НАН України М.М. Боголюбова, О.І.Ахієзера, І.М.Ліфшиця, О.Г.Ситенка, В.Г.Бар'яхтара, В.І.Данилова, І.Р.Юхновського та С.В.Пелетмінського.

2. Вперше ідентифіковано неформальні творчі колективи, керовані академіками І.Р.Юхновським та С.В.Пелетмінським, з науковими школами в галузі статистичної фізики. Встановлено персональний склад шкіл, їх характерні риси, внесок в науку — створення методу колективних змінних у квантовому та класичному випадках, статистичної теорії фазових переходів II роду (школа І.Р. Юхновського); розробка узагальнення методу скороченого опису на широкий клас макроскопічних систем, побудова крупноструктурної ентропії систем взаємодіючих частинок, теорії систем зі спонтанно порушеною симетрією, теорії фермі-рідин (школа С.В.Пелетмінського).

3. На основі вперше проведеного анкетування реконструйовано творчий портрет І.Р.Юхновського та С.В.Пелетмінського як вчених та наукових лідерів.

## ВИСНОВКИ

Проведене дослідження дозволяє сформулювати деякі узагальнюючі **висновки**, найважливішими з яких є:

1. Доведено ключове місце статистичної фізики в структурі сучасної наукової картини світу та її фундаментальне значення для формування ймовірнісного стилю мислення у науці, яке визначається тим, що дана теорія встановлює зв'язок між мікроскопічними та макроскопічними властивостями матерії, відповідає на питання про причини еволюції та деградації систем, збагачує новим змістом загальний принцип причинності.

2. Вперше проаналізовано та систематизовано різні визначення предмету статистичної фізики. Виявлено, що у хронологічно більш ранніх визначеннях (до кінця 60-х рр. ХХ ст.) статистичною механікою називають розділ фізики, який вивчає тільки рівноважні властивості динамічних систем. У хронологічно більш пізніх працях переважно стверджується, що статистична фізика складається з двох розділів — рівноважної та нерівноважної статистичної фізики. Така зміна опису предметної галузі статистичної фізики розглядається нами як результат усвідомлення принципової ролі нерівноважних процесів та відображення загальнонаукової тенденції побудови єдиного підходу до опису явищ природи.

3. На прикладі дослідження генезису та еволюції статистичної фізики вперше запропоновано новий методологічний критерій виявлення фундаментальних ідей та теорій сучасного природознавства: вважати фундаментальними ті ідеї та теорії, з появою яких пов'язана зміна наукових картин світу та оновлення категоріальних структур наукового знання.

4. Побудовано та обґрунтовано періодизаційну схему передісторії, становлення та розвитку статистичної фізики в хронологічних межах IV ст. до н.е. — 60-ті рр. ХХ ст., яка складається з наступних періодів: виникнення атомістичних уявлень (IV ст. до н.е. — XVII ст.); створення основ молекулярно-кінетичної теорії (кінець XVII ст.—початок XIX ст.); формування термодинаміки як науки (20—50ті рр. XIX ст.); формування рівноважної статистичної фізики як синтезу молекулярно-кінетичних та термодинамічних уявлень (кінець 50-х рр. XIX ст.—20-ті рр. ХХ ст.); створення нерівноважної статистичної фізики (30—60-ті рр. ХХ ст.)

5. Вперше, з широким урахуванням контексту світової науки, реконструйовано передісторію статистичної фізики в Україні та з'ясовано, що її підґрунтя становили праці в галузі молекулярної фізики та термодинаміки — це систематичні експериментальні дослідження з термодинаміки М.Д.Пильчикова та О.П.Грузинцева, з дифузії М.О.Умова, з молекулярної фізики та критичного стану речовини М.П.Авенаріуса, а також перші теоретичні узагальнення ймовірнісних уявлень М.М.Пирогова, М.М.Шиллера, М.Смолуховського та Т.О.Афанасьєвої-Еренфест.

6. Вперше відтворено наукові біографії фізиків-теоретиків Т.О.Афанасьєвої-Еренфест та М.М.Пирогова. Зокрема, виявлено, що Т.О.Афанасьєва-Еренфест є уродженкою Києва та у 1927–1928 рр. викладала у Кримському педагогічному інституті (Сімферополь).

7. Обґрунтовано, що початок систематичних досліджень у галузі статистичної фізики в Україні в 30-ті рр. ХХ ст. був пов'язаний з науково-педагогічною діяльністю в Харківському фізико-технічному інституті та Харківському університеті видатного фізика, засновника теоретичної школи Л.Д.Ландау, перш за все з його роботами з теорії фазових переходів II роду, теорії плазми та статистичної теорії ядра.

8. На основі раніше невідомих архівних джерел висвітлено діяльність одного з маловідомих учнів Л.Д.Ландау харківського періоду — завідувача кафедри теоретичної механіки Харківського університету та теоретичного відділу Інституту радіофізики і електроніки НАН України В.Л.Германа, який розв'язав ряд важливих задач статистичної радіофізики, побудував статистичні теорії розсіяння, поглинання та поширення радіохвиль.

9. Встановлено, що розгортання широкомасштабних досліджень у галузі статистичної фізики в Україні було пов'язано з виходом у 1946 р. фундаментальної монографії М.М.Боголюбова “Проблеми динамічної теорії у статистичній фізиці”, ідеї якої були сприйняті науковою спільнотою та набули інтенсивного розвитку в Україні.

10. Вперше доведено, що центрами досліджень у галузі статистичної фізики в Україні були Харківський, Дніпропетровський та Донецький фізико-технічні інститути, Інститут математики, Інститут фізики, Інститут теоретичної фізики, Інститут металофізики, Інститут фізики конденсованих систем, Інститут проблем матеріалознавства, Інститут фізики напівпровідників, Фізико-технічний інститут низьких температур, Інституті радіофізики та електроніки, Український науково-дослідний гідрометеорологічний інститут, Харківський, Київський, Одеський та Львівський університети, а також наукові школи академіків НАН України Л.Д.Ландау, В.І.Данилова, М.М.Боголюбова, О.І.Ахієзера, І.М.Ліфшиця, О.Г.Ситенка, В.Г.Бар'яхтара, І.Р.Юхновського, С.В.Пелетмінського, професора О.З.Голика.

11. Встановлено, що ключовими теоретичними результатами в галузі розвитку методів статистичної фізики, одержаними в Україні в 30—60-ті рр. ХХ, стали: кінетичне рівняння у випадку кулонівської взаємодії, статистична теорія ядра, теорія фазових переходів II роду (Л.Д.Ландау, 1936—1937 рр.), ідея ієрархії часів релаксації, метод ланцюжків рівнянь для функцій розподілу, поширення методів статистичної фізики на квантову теорію поля та теорію елементарних частинок (М.М.Боголюбов, 1946—1965 рр.), передбачення ефекту пучкової нестійкості плазми (О.І.Ахієзер, Я.Б.Файнберг, 1948), теорії неупорядкованих систем та флуктуаційних рівнів (І.М.Ліфшиць, 1964—1967); метод колективних змінних у класичному й квантовому випадках та статистична теорія фазових переходів (І.Р.Юхновський, 1958—кінець 60-х рр. ХХ ст.); узагальнення методу скороченого опису на широкий клас динамічних систем, побудова нерівноважної крупноструктурної ентропії системи взаємодіючих частинок (С.В.Пелетмінський, 60-ті —початок 70-х рр. ХХ ст.); обґрунтування нерівноважної статистичної механіки нескінченних систем, еволюційний підхід до кінетичних рівнянь для квантової статистики (Д.Я.Петрина, кінець 60-х рр. ХХ ст.).

12. Доведено, що в галузі застосування математичного апарату статистичної фізики до конкретних фізичних задач у 30—60-ті рр. ХХ в Україні ключовими стали



наступні результати: теорія кристалізації та переохолодження рідин (В.И.Данилов, 1934—1956 рр.), мікроскопічні теорії надплинності та надпровідності (М.М. Боголюбов, 1947—1957 рр.); електронна теорія металів (І.М.Ліфшиць, друга половина 50-х рр. ХХ ст.); теорія магнітоакустичного резонансу (1956), вивчення фазових переходів у магнетиках (О.І.Ахієзер, В.Г.Бар'яхтар, С.В.Пелетмінський, 60ті рр. ХХ ст.); розробка доменної структури у феро- та антиферомагнетиках (В.Г. Бар'яхтар, 60-70-ті рр. ХХ ст.), створення ймовірнісного підходу до теорії плазми (О.Г.Ситенко, 60-ті рр. ХХ ст.); мікроскопічна теорія розчинів електролітів (М.Ф. Головка, кінець 60—початок 70-х рр. ХХ ст.); застосування методів статистичної фізики у проблемах фізики металів та сплавів (С.Д.Герцрікен, Г.В.Курдюмов, В.М. Свечников, А.А.Смирнов, М.О.Кривоглаз, А.Г.Лесник, 5060ті рр. ХХ ст.); теорія критичних явищ в індивідуальних рідинах та розчинах (О.З.Голик, 5070-ті рр. ХХ ст.); статистична теорія рідин (Й.З.Фішер, 60-ті рр. ХХ ст.).

13. Вперше з урахуванням результатів численних інтерв'ю, взятих у академіків НАН України І.Р.Юхновського та С.В.Пелетмінського, їх колег та учнів (академік НАН України В.Г.Бар'яхтар, члени-кореспонденти НАН України М.Ф. Головка, І.М.Мриггод, Е.Г.Петров, Ю.В.Слюсаренко, К.М.Степанов; доктори наук В.В.Красильников, О.Й.Соколовський, О.М.Тарасов, кандидати наук О.Л.Іванків, О. В.Пацаган, В.В.Ігнатюк) ідентифіковано неформальні творчі колективи, керовані академіками НАН України І.Р.Юхновським та С.В.Пелетмінським, з науковими школами в галузі статистичної фізики. Реконструйовано творчі портрети лідерів, стиль та методи спілкування з учнями, персональний склад шкіл та внесок у науку.

## Список використаних джерел

1. Гельфер Я.М. История и методология термодинамики и статистической физики / Я.М.Гельфер. — М.: Высшая школа, 1981. — 536 с.
2. Гельфер Я.М. Законы сохранения / Я.М.Гельфер. — М.: Наука, 1967. — 263 с.
3. Brush S.G. Kinetic theory. 1. The nature of gases and heat / S.G.Brush. — N.Y.: Pergamon press, 1965. — 181 p.
4. Brush S.G. Kinetic theory. 2. Irreversible processes / S.G.Brush. — N.Y.: Pergamon press, 1966. — 243 p.
5. Brush S.G. Kinetic theory: The Chapman-Enskog solution for moderately dense gases / S.G.Brush. — 1972. — Oxford: Pergamon press. — Vol.3. — 283 p.
6. Brush S.G. The kind of motion we call heat: a history of gases in the XIX century / S.G.Brush. — Book 1: Physics and the atomists. — Amst. Etc.: North—Holland, 1986. — XIX. — 299 p.
7. Физика XIX—XX вв. в общенаучном и социокультурном контекстах. Физика XIX века / В.П.Визгин, О.В.Кузнецова, О.А.Лежнева и др. — М.: Наука, 1995. — 280 с.
8. Кузнецова О.В. История обоснования статистической механики / О.В. Кузнецова. — М.:Наука, 1988. — 184 с.
9. Кузнецова О.В. Атомистические концепции строения вещества в XIX веке / О.В.Кузнецова. — М.:Наука, 1983. — 160 с.
10. Вдовиченко Н.В. Развитие фундаментальных принципов статистической физики в первой половине XX века / Н.В.Вдовиченко. — М.: Наука, 1986. — 159 с.
11. История отечественной математики: в 4-х т. — К.:Наука. думка, 1970.
12. Монтролл Э. К 100-летию статистической механики / Э.Монтролл // Успехи физ. наук. — 1965. — Т.87. — С.341—347.
13. Базаров И.П. Методологические проблемы статистической физики и термодинамики / И.П.Базаров. — М.: Изд-во МГУ, 1979. — 87 с.
14. Мякишев Г.Я. От динамики к статистике / Г.Я.Мякишев. — М.: Знание, 1983. — 64 с.
15. Гухман А.А. Об основаниях термодинамики / А.А.Гухман— М.: Мир, 1964 . — 456 с.
16. Каратеодори К. Об основах термодинамики / К. Каратеодори // Развитие современной физики. — М.: Наука, 1964. — 330 с.
17. Лавенда Б. Статистическая физика. Вероятностный подход / Б.Лавенда. — М.: Мир, 1999. — 432 с.
18. Климонтович Ю.Л. Динамический и статистический методы в теории неравновесных процессов / Ю.Л.Климонтович // Труды Математ. Ин-та АН СССР. — 1989. — Т.191. — С.151—161.
19. Бриллюэн Л. Термодинамика, статистика и информация / Л.Бриллюэн // Успехи физ. наук. — 1962. — Т.77. — С.338.
20. Ястржембский А.С. Термодинамика и история ее развития / А.С. Ястржембский. — М.;Л.:Энергия, 1966. — 667 с.

21. Маковельский А.О. Древнегреческие атомисты / А.О.Маковельский. — Баку: Изд-во АН Азерб.ССР. — 401 с.
22. Рожанский И.Д. История естествознания в эпоху эллинизма и Римской империи / И.Д.Рожанский. — М.:Наука, 1988. — 448 с.
23. Зубов В.П. Развитие атомистических представлений до начала XIX в / В.П. Зубов.— М.: Наука, 1965. — 371 с.
24. Кузнецов О.В. Атомистическая концепция строения вещества в XIX веке / О.В.Кузнецов. — М.: Наука, 1983. — 160 с.
25. Кузнецов Б.Г. Очерки физической атомистики XX века / Б.Г.Кузнецов. — М.: Наука, 1966. — 192 с.
26. Кедров Б.М. Три аспекта атомистики: [в 3-х кн.] / Б.М.Кедров — М.:Наука, 1969
27. Трифонов Д.Н. Возникновение и развитие современной атомистики. / Д.Н. Трифонов // Физика XX века: Развитие и перспективы. — М.Наука, 1984. — С.93—135.
28. Ахиезер А.И. От квантов света до цветных кварков / А.И.Ахиезер, Ю.П. Степановский. — К.: Наук. думка, 1993. — 121 с.
29. Ахиезер А.И. Элементарные частицы / А.И.Ахиезер, М.П. Рекало. — М. Наука, 1986. — 256 с.
30. Рабинович А.В. Нелинейная физика. Стохастичность и структуры / А.В. Рабинович, М.И. Гапонов-Грехов. — Физика XX века: Развитие и перспективы. — М.Наука, 1984. — С.219—280.
31. Лакур П. Историческая физика: [в 2-х т.] / П.Лакур, Я.Аппель. — М.; Л. : ГИЗ, 1929.
32. Розенбергер Ф. История физики: [в 3-х т.] / Ф.Розенбергер. — М.;Л.: ГТТИ, 1934.
33. Дорфман Я.Г. Всемирная история физики (с древнейших времен до конца XVIII в.) / Я.Г.Дорфман. — М.: Наука, 1974. — 352 с.
34. Дорфман Я.Г. Всемирная история физики (с начала XIX ст. до середины XX века) / Я.Г.Дорфман. — М: Наука, 1979. — 317 с.
35. Кудрявцев П.С. Курс истории физики / П.С.Кудрявцев. — М.:Просвещение , 1982. — 448 с.
36. Спасский Б.И. История физики: [в 2-х ч.] / Б.И. Спасский. — М.:Высшая школа, 1977.
37. Льюис М. История физики / М.Льюис. — М.: Мир, 1970. — 464 с.
38. Лауэ М. История физики / М.Лауэ. — М.: Гостехиздат, 1956. — 229 с.
39. Таннери П. Исторический очерк развития естествознания в Европе. 1300—1900 / П.Таннери. — М.; Л.: Гос. Техн.-теор. изд-во, 1934. — 235 с.
40. Тредер Г.Ю. Эволюция основных физических идей / Г.Ю.Тредер. — К. :Наук. думка, 1988. — 368 с.
41. Эйнштейн А. Эволюция физики / А.Эйнштейн, Л. Инфельд // Собрание научных трудов. — М.:Наука, 1965—1967. — Т.4. — С.357—543.
42. Кузнецов Б.Г. Развитие физических идей от Галилея до Эйнштейна в свете современной науки / Б.Г.Кузнецов— М.Наука, 1966. — 519 с.

43. Кордун Г.Г. История физики. Короткий курс. / Г.Г.Кордун— К: Вища школа, 1974. — 221 с.
44. Шманько І.І. Нариси з історії фізики з елементами краєзнавства / І.І. Шманько, Л.І. Золотун. —Ужгород: Мистецька лінія, 2001. — 135 с.
45. Дягилев Ф.М. Из истории физики и жизни ее творцов / Ф.М.Дягилев. — М.: Просвещение, 1986. — 254 с.
46. Ансельм А.И. Очерки развития физической теории в первой трети XX века / А.И.Ансельм. — М: Наука, 1986. — 244 с.
47. Храмов Ю.А. История физики / Ю.А.Храмов. — К.: Феникс, 2006. — 1176 с.
48. Агабатов Х.А. История физики / Х.А.Агабатов. — М.: Учпедгиз, 1960. — 208 с.
49. Андриевский К.Н., История и методология физики. Ч.1. / К.Н.Андриевский, Э.Г.Шипатов. — Ульяновск, 2000. — 204 с.
50. Акоста В. Основы современной физики / В.Акоста, К.Кован, Б.Грэм. — М.: Просвещение, 1981. — 495 с.
51. Ахієзер О.І. Еволюція фізичної картини світу / О.І.Ахієзер. — Київ: Наук. думка, 1973. — 90 с.
52. Ахиезер А.И. Развивающаяся физическая картина мира / А.И.Ахиезер. — Харьков: ННЦ ХФТИ, 1998. — 338 с.
53. Кузнецов И.В. Избранные труды по методологии физики / И.В.Кузнецов. — М.Наука, 1975. — 296 с.
54. Артюх А.Т. Категориальный синтез теории / Артюх А.Т. — К.: Наук. думка, 1967. — 154 с.
55. Храмова В.Л. Категориальный синтез теоретического знания / В.Л. Храмова. — К.: Наук. думка, 1984. — 295 с.
56. Кузнецов В.И. Проблема универсалий в физическом познании / В.И. Кузнецов. — К.: Наук. думка, 1987. — 171 с.
57. Гудков Н.А. Идея «великого синтеза» в физике / Н.А.Гудков. — К.: Наук. думка, 1990. — 212 с.
58. Физика сегодня и завтра. Прогнозы науки: [сб. ст.]. — Л.:Наука,1973. — 329 с.
59. Физика XX века: Развитие и перспективы : [сб. ст.]. — М.Наука, 1984. — 331 с.
60. Пікашова Т.Д. Основи історії науки і техніки / Пікашова Т.Д., Шашкова Л. О. — К.: ІЗМН, 1997. — 399 с.
61. Бесов Л.М. Історія науки і техніки / Л.М.Бесов. — Харків: НТУ “ХПІ”, 2005. — 376 с.
62. Философская энциклопедия: в 5 т. — М.:Изд-во «Советская энциклопедия», 1960—1970.
63. Философский энциклопедический словарь. — М.:Изд—во «Советская энциклопедия», 1989. — 815 с.
64. Філософський енциклопедичний словник. — К.: Абрис, 2002. — 742 с.
65. Бернал Дж. Наука в истории общества / Дж.Бернал. — М.: Изд-во иностр. лит., 1956. — 735 с.

66. Поппер К. Логика научного исследования / К. Поппер // Логика и рост научного знания: Пер. с англ. / Сост., общая ред. и вступ. статья В.Н. Садовского. – М.: Прогресс, 1983. – С.46–264.
67. Лакатос И. Доказательства и опровержения. Как доказываются теоремы / И. Лакатос. – М.: Наука, 1967. – 152 с.
68. Лакатос И. Фальсификация и методология научно-исследовательских программ / И. Лакатос. – Пер. с англ. прим. и предисловие В. Поруса. М.: Медиум, 1995. – 236 с.
69. Лакатос И. История науки и ее рациональные конструкции / И. Лакатос // Структура и развитие науки. — М.: Прогресс, 1978. – С.204–269.
70. Фейерабенд П. Ответ на критику / П. Фейерабенд // Структура и развитие науки. — М.: Прогресс, 1978. – 420 с.
71. Фейерабенд П. Наука в свободном обществе / П. Фейерабенд // Избранные труды по методологии науки / Пер. с англ. и нем. А.Л. Никифорова. — М.: Прогресс, 1986. — С. 323–362.
72. Койре А. Очерки истории философской мысли. О влиянии философских концепций на развитие научных теорий / А. Койре. – Под ред. А.П. Юшкевича. – М.: Прогресс. – 1985. – 286 с.
73. Койре А. От замкнутого мира к бесконечной Вселенной. / А. Койре. – Пер. с англ. К. Голубович и др. – М.: Логос, 2001. 274 с.
74. Кун Т. Структура научных революций / Т. Кун — М.: Прогресс, 1975. – 287 с.
75. Кун Т. Вторичные размышления о парадигме / Т. Кун // Научные теории: структура и развитие. — М.: Прогресс, 1975.
76. Тлумин С. Концептуальные революции в науке / С. Тлумин // Структура и развитие науки. Из Бостонских исследований по философии науки. М., Прогресс, 1978. – С. 170–190.
77. Тлумин С. Человеческое понимание / С. Тлумин. — М.: Прогресс, 1984. – 327 с.
78. Пуанкаре А. О науке / А. Пуанкаре. — М.: Наука, 1990. — 736 с.
79. Кузнецов Б.Г. Идеалы современной науки / Б.Г. Кузнецов. — М.: Наука, 1983. — 255 с.
80. Александров А.Д. Проблемы науки и позиция ученого / А.Д. Александров. — Л.: Наука, 1988. — 510 с.
81. Кириллин В.А. Страницы истории науки и техники / В.А. Кириллин. — М.: Наука, 1986. — 511 с.
82. Павленко Ю.В. Цивілізаційні трансформації та фундаментальні зрушення в розвитку природознавства / Ю.В. Павленко // Наука та наукознавство. — 2004. — №2. — С.80—94.
83. Горохов В.Г. Концепции современного естествознания / В.Г. Горохов. — М.: Инфра-М, 2003. — 409 с.
84. Воронов В.К. Основы современного естествознания / В.К. Воронов, М.В. Гречнева, Р.З. Сагдеев. — М.: Высш. шк, 1999. — 248 с.
85. Горелов А.А. Концепции современного естествознания / А.А. Горелов. — М.: Центр, 1997. — 208 с.

86. Грушевицкая Т.Г. Концепции современного естествознания / Т.Г. Грушевицкая, А.П.Садохин. — М.: ЮНИТИ, 2003. — 670 с.
87. Дубнищева Т.Я. Концепции современного естествознания / Т.Я.Дубнищева . — Новосибирск: ЮКЭА, 1999. — 832 с.
88. Жигалов Ю.И. Концепции современного естествознания / Ю.И.Жигалов. — М.: Гелиос АРВ, 2002. — 272 с.
89. Канке В.А. Концепции современного естествознания / В.А.Канке. — М.: Логос., 2003. — 367 с.
90. Карпенков С.Х. Концепции современного естествознания / С.Х.Карпенков. — М.: Академический проспект, 2003. — 693 с.
91. Концепции современного естествознания / под ред В.Н.Лавриненко, В.П. Ратникова. — М.: ЮНИТИ—ДАНА, 2003. — 303 с.
92. Концепции современного естествознания / Самыгин С.И., Басаков М.И., Голубинцев В.О. и др. — Ростов-н/Д: Феникс, 1997. — 448 с.
93. Найдыш В.М. Концепции современного естествознания / В.М.Найдыш. — М.: Гардарики, 2003. — 475 с.
94. Грядовой Д.И. Концепции современного естествознания / Д.И.Грядовой. — М.: Единство, 2003. — 237 с.
95. Кузнецов В.И. Естествознание / В.И.Кузнецов, Г.М.Идлис, В.Н.Гутина. — М.: АГАР, 1996. — 384 с.
96. Природознавство в Україні до початку ХХ ст. в історичному, культурному та освітньому контекстах / Ю.В.Павленко, С.П.Руда, С.А.Хорошева, Ю.О.Храмов. — К.: Видавничий дім “Академперіодика”, 2001. — 420 с.
97. З історії української науки і техніки: Хрестоматія-посібник / уклад. В.І. Онопрієнко, А.А.Коробченко, О.Я.Пилипчук, С.П.Руда, Л.П.Яресько — Київ: Сектор історії та методології освіти, науки і техніки АН Вищої школи України, 1999 . — 172 с.
98. Храмов Ю.О. Наукова робота з фізики на Україні до Великої Жовтневої соціалістичної революції / Ю.О. Храмов // Нариси з історії природознавства і техніки. — 1977. — Вип.23. — С.55—69.
99. Храмов Ю.А. Краткая история развития физики на Украине / Ю.А. Храмов // Очерки истории естествознания и техники. — 1991. — Вып.39. — С.11—19.
100. Храмов Ю.А. Развитие исследований по физике на Украине в институтах (1926—1976). Ч.1. / Храмов Ю.А. — Киев, 1978. — (Препринт Ин-та теор. физики)
101. Храмов Ю.А. Развитие исследований по физике на Украине в физических институтах (1926—1976). Ч.2. — Киев, ИТФ, 1978. — (Препринт / НАН Украины, Ин-т теор. физики).
102. Развитие физики в СССР. Советская наука и техника за 50 лет: В 2 кн. / Гл. ред. — Л.А.Арцимович, зам. гл. ред. Л.С.Полак. — М.: Наука, 1967.
103. Научное сообщество физиков СССР. 1950—1960—гг.: документы, воспоминания, исследования. Вып.1 / РАН, Ин-т ист. естеств. и техники им. С.И. Вавилова; Сост. В.П. Визгин, А.В. Кессених. — СПб.: Изд-во РХГА, 2005. — 720 с.
104. Наука и техника СССР. 1917—1987. Хроника. — М.:Наука, 1987. — 759 с

105. Блохинцев Д.И. Пути развития теоретической физики в СССР / Д.И. Блохинцев // Успехи физ. наук. — 1947. — Т.33. — С.285—293.
106. Йоффе А.Ф. Развитие радянської фізики / А.Ф.Йоффе // Досягнення радянських фізиків. Хрестоматія. — К.: Рад.школа, 1950. — С.24—37.
107. Вернадский В.И. О научной работе в Крыму в 1917—1921 гг. / В.И. Вернадский // Наука и ее работники. — СПб, 1921. — №1. — С.3—12.
108. Френкель Я.И. Теоретическая физика в СССР за 30 лет / Я.И. Френкель // Успехи физ. наук. — 1947. — Т.33. — С.294—317.
109. Пасічник М.В. Розвиток фізики на Україні за 40 років Радянської влади / М.В.Пасічник // Укр. фіз. журн. — 1957. — Т.2. — № 3. — С.197—210.
110. Вальтер А.К. Досягнення в галузі фізики на Україні за 40 років Радянської влади / А.К.Вальтер, Б.Г.Лазарев, К.Д.Синельников // Розвиток науки в Українській РСР за 40 років. — К.: Вид—во АН УРСР, 1957. — С.127—148.
111. Савчук В.С. У истоков Украинской ассоциации физиков (из переписки А. Г.Гольдмана и Г.Г.Де Метца) / В.С. Савчук // Очерки истории естествознания и техники. — 1991. — Вып.39. — С.72—77.
112. Фок В.А. Квантовая физика и философские проблемы / В.А. Фок // Вопросы философии. — 1971. — № 3.
113. Бояринцев В.И. Проблема причинности в физике / В.И.Бояринцев // Тр. Донецк. Политехн. ин-та. — 1960. — Т.57, вып.1. — С.21—39.
114. Нуссенцвейг Х.М. Причинность и дисперсионные соотношения / Х.М. Нуссенцвейг. — М.: Мир, 1976. — 462 с.
115. Спасский Б.И. К истории теоремы Карно / Б.И.Спасский, Ц.С.Сараганов // Успехи. физ. наук. — 1969. — Т.99, вып.2. — С.347—352.
116. Беллони Л. Заметки о пути, приведшем Э.Ферми к статистике Ферми-Дирака / Л. Беллони // Успехи физ. наук. — 1982. — Т.136. — С.167—173.
117. Онсагер Л. Электрические свойства льда / Л. Онсагер, М. Дюпюи // Термодинамика необратимых процессов. — М.: Изд-во иностр. лит-ры, 1962. — С. 317—340.
118. Пригожин И. Неравновесная статистическая механика / И.Пригожин. — М.: Мир, 1964. — 312 с.
119. Смирнов Г.В. Под знаком необратимости / Г.В.Смирнов. — М., 1977. — 121 с.
120. Хайтун С.Д. Механика и необратимость / С.Д.Хайтун. — М.: Янус, 1996. — 448 с.
121. Зубарев Д.Н. Научное творчество Дж.Гиббса / Д.Н. Зубарев // Термодинамика. Статистическая механика [Текст] / Дж. В. Гиббс ; отв. ред. Д.Н. Зубарев, сост. У. И. Франкфурт. — М. : Наука, 1982. — М.Наука, 1982. — С.550—573.
122. Кипнис А.Я. К истории термодинамического учения Гиббса / А.Я. Кипнис // Вопросы истории естествознания и техники. — 1959, вып.8. — С.127—131.
123. Хайтун С.Д. История парадокса Гиббса / С.Д.Хайтун. — М., 1986. — 164 с.
124. Гольдберг М.М. Термодинамика Гиббса и генезис ее развития / М.М. Гольдберг. — М., 1972.

125. Гельфер Я.М. Парадокс Гиббса и тождественность частиц в квантовой механике / Я.М.Гельфер, В.Л.Любошиц, М.И.Подгорецкий. — М.: Наука, 1975. — 272 с.
126. Базаров И.П. О дополнительности в квантовой механике и статистической физике / И.П. Базаров // История и методология естественных наук. — М.: Изд-во МГУ, 1981. — Вып. XXVI. — С.44—46.
127. Базаров И.П. Ошибки и заблуждения в термодинамике / И.П.Базаров, В.В. Толмачов // История и методология естественных наук. — М.: Изд-во МГУ, 1981. — Вып. XXVI. — С.34—43.
128. Фишер И.З. Статистическая теория жидкостей / И.З.Фишер. — М: Физматгиз, 1961. — 280 с.
129. Чандрасекар С. Стохастические проблемы в физике и астрономии / С. Чандрасекар. — М.: Изд-во иностр. лит-ры, 1947. — 168 с.
130. Синай Я.Г. Теория фазовых переходов. Строгие результаты / Я.Г.Синай. — М.:Наука,1980. — 207 с.
131. Стенли Г. Фазовые переходы и критические явления / Г.Стенли. — М.: Мир, 1973. —424 с.
132. Фльори П. Фазовые переходы / П. Фльори // Успехи физ. наук. — 1982. — 138. — С.129—150.
133. Гуров К.П. Основания кинетической теории. Метод Н.Н.Боголюбова / К. П.Гуров. — М.: Наука, 1966. — 351 с.
134. Ковров В.П. Концепция квазисредних Н.Н.Боголюбова в теории неупорядоченных систем / В.П.Ковров, А.М. Курбатов // Тр. МИАН СССР. — 1989. — Т.191. — С.89—100.
135. Холево А.С. Вероятностный и статистический аспект квантовой теории / А.С.Холево. — Ижевск: Ин-т компл. иссл., 2003. — 410 с.
136. Хинчин А.Я. Математические основания статистической механики / А.Я. Хинчин. — М.; Л.: Гостехтеоретиздат, 1943. — 128 с.
137. Афанасьева-Эренфест Т.А. Итоги кинетической теории / Т.А.Афанасьева-Эренфест // Журн. эксперим. и теорет. физики. — 1931. — Т.1. — С.305—313.
138. Компанеец А.С. Законы физической статистики. Ударные волны. Сверхплотное вещество / А.С.Компанеец. — М.: Наука, 1976. — 140 с.
139. Рабинович М.И. Стохастические автоколебания и турбулентность / М.И. Рабинович // Успехи физ. наук. — 1978. — Т.125, вып.1. — С.123—168.
140. Мухин Р.Р. К истории развития нелинейной динамики / Р.Р.Мухин // Научное сообщество физиков СССР. — 1950—1960 гг.: документы, воспоминания, исследования. — СПб: РХГА, 2005. — С.433—470.
141. Шустер Г. Детерминированный хаос / Г.Шустер. — М.: Мир, 1988. — 240 с.
142. Косевич А.М. Введение в нелинейную физическую механику / А.М. Косевич, А.С.Ковалев. — К.: Наук. думка, 1989. — 304 с.
143. Пригожин И. Неравновесная статистическая механика / И.Пригожин. — М.: Мир, 1964. — 312 с.
144. Пригожин И. От существующего к возникающему / И.Пригожин. — М.: Наука, 1985. — 327 с.



145. Николис Г. Самоорганизация в неравновесных системах: От диссипативных структур к упорядоченности через флуктуации / Г. Николис, И. Пригожин – М.: Мир, 1979. – 512 с.
146. Пригожин И. Современная термодинамика от тепловых двигателей до диссипативных структур / И.Пригожин, Д.Кондепуди. — М.: Мир, 2002. — 461 с.
147. Пригожин И. Порядок из хаоса: Новый диалог человека с природой. / И. Пригожин, И.Стенгерс – М.:Прогресс, 1986. – 431 с.
148. Пригожин И. Конец определенности. Время, хаос и новые законы Природы / И.Пригожин. — Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика» 2000. – 208 с.
149. Глендсдорф П. Термодинамическая теория структуры, устойчивости и флуктуаций / П.Глендсдорф, И.Пригожин. — М.: Мир, 1973. — 207 с.
150. Пригожин И. Новое открытие времени / И.Пригожин // Вопросы истории естествознания и техники. — 1989. — №1. — С.3—16.
151. Пригожин И. Постигание реальности / И.Пригожин // Природа. — 1997. — №4. — С.4—11.
152. Кернер Б.С. Самоорганизация в активных распределенных средах / Б.С. Кернер, В.В. Осипов // Успехи физ. наук. — 1990. — Т.160, вып.9. — С.1—73.
153. Буданов В. Синергетичні стратегії в освіті / В.Буданов // Вища освіта України. — 2003. — №2. — С.46—52.
154. Пуанкаре А. О науке / А.Пуанкаре. — М.: Наука, 1990. — 736 с.
155. Лоренц Г.А. Статистические идеи в термодинамике / Г.А.Лоренц. — М.: ГТТИ, 1935. — 192 с.
156. Лоренц Г.А. Старые и новые проблемы физики / Г.А.Лоренц. — М.: Наука, 1970. — 372 с.
157. Герц Г. Из первых лет квантовой физики / Г.Герц // Успехи физ. наук. — 1977. — Т.122. — С.497—511.
158. Планк М. Единство физической картины мира / М.Планк. — М.: Наука, 1966. — 286 с.
159. Бор Н. Атомная физика и человеческое познание / Бор Н. — М.:Изд-во иностр. лит., 1961. — 152 с.
160. Борн М. Физика в жизни моего поколения / М.Борн. — М.: Изд-во иностр. лит., 1963. — 535 с.
161. Шредингер Э. Новые пути в физике: Статьи и речи / Э.Шредингер. — М.: Наука, 1971. — 427 с.
162. Дирак П. Эволюция физической картины мира / П.Дирак // Элементарные частицы. — М.: Наука, 1965. — С.123—139.
163. Дирак П. Воспоминания о необычайной эпохе / П.Дирак. — М.: Наука, 1979. — 317 с.
164. Гейзенберг В. Философские проблемы атомной физики / В.Гейзенберг. — М.:Изд-во иностр. лит-ры, 1953. — 117 с.
165. Ланжевен П. Физика за последние 20 лет / Поль Ланжевен. — Л.: ВСНХ, 1938. — 261 с.
166. Ланжевен П. Физика прерывности / П.Ланжевен//Избр. произведения. — М.:Изд-во иностр. лит-ры, 1949. — С.256—257.

167. Вайскопф В. Статистическая теория ядерных реакций: пер. с англ. / В. Вайскопф. — М.: Изд-во иностр. лит-ры, 1952. — 96 с.
168. Вайскопф В. Физика в XX столетии / В.Вайскопф. — М.: Атомиздат, 1977. — 269 с.
169. Вайскопф В. Как мы выросли вместе с теорией поля / В. Вайскопф // Успехи физ. наук. — 1982. — Т.138. — С.455—475.
170. Зоммерфельд А. Пути познания в физике / А.Зоммерфельд. — М.: Наука, 1973. — 318 с.
171. Де Бройль. Л. Революция в физике / Л.Де Бройль. — М: Атомиздат, 1965. — 227 с.
172. Кац М. Вероятность и смежные вопросы в физике / М.Кац. — М.: Мир, 1965. — 407 с.
173. Ахиезер А.И. Методы статистической физики / А.И.Ахиезер, С.В. Пелетминский. — М.: Наука, 1977. — 367 с.
174. Каганов М.И. Вехи истории физики твердого тела / М.И.Каганов, В.Я. Френкель. — М.: Знание, 1981. — 64 с.
175. Френкель Я.И. На заре новой физики / Я.И.Френкель. — Л.: Наука, 1970. — 384 с.
176. Каганов М.И. Микро... и макро... / М.И.Каганов— М.: Знание, 1986. — 64 с.
177. Капіца П.Л. Про надтекучість рідкого гелію—II: Доповідь на загальних зборах Академії наук СРСР у Москві 27 вересня 1943 р. / П.Л.Капіца // Досягнення радянських фізиків. Хрестоматія. — К.: Рад.школа, 1950. — 322 с.
178. Гольдман О.Г. Фізика на Україні у 10-ту річницю радянської України / Гольдман О.Г. // Вісник природознавства. — 1927. — №5-6 (листопад—грудень). — С. 257—272.
179. Гольдман О.Г. Наукові праці з фізики радянської України / О.Г.Гольдман // Укр. фізичні записки — 1928. — Т.1. — Зш.3. — С.59—65.
180. Гольдман О.Г. Теми, що розробляються у фізичних лабораторіях України / О.Г. Гольдман // Укр. фізичні записки. — 1928. — Т.2. — Зш.1. — С.67—68.
181. Обзор физики в современном ее состоянии: Вступительная лекция, прочитанная 6-го сентября 1893 г. проф. Голицына Б.Б. / Б.Б.Голицын // Оттиск из учебных записок Имп.Юрьевского Университета. — 1893. — №3. — 30 с.
182. Гольдгаммер Д. Столетие физики / Д.Гольдгаммер. — Санкт-Петербург, 1902. — 16 с.
183. Осиповский Т.Ф. Рассуждения о пользе наук. О пространстве и времени. / Т.Ф.Осиповский // Речи, говоренные в торжественном собрании Харьковского университета. — Харьков, 1807.
184. Вальтер А.К. Досягнення в галузі фізики на Україні за 40 років радянської влади / А.К.Вальтер, Б.Г.Лазарев, К.Д.Синельников // Розвиток науки в Українській РСР за 40 років. — К.: Вид—во АН УРСР. — С.127—147.
185. Павленко А.М. Передова роль учених нашої країни в розвитку молекулярної фізики / А.М. Павленко // Вісник АН УРСР. — 1948. — №10(146). — С.73—87.

186. Коновалов В.М. Основні етапи розвитку термодинаміки та вклад вітчизняної науки / В.М. Коновалов, Г.Г. Кордун // Наукові записки Київ. Держ. Педагогічн. Ін-ту. Фізико-математична серія. – 1956. — С.129—154.
187. Коновалов В.М. Історичний нарис розвитку термодинаміки / В.М. Коновалов, Г.Г. Кордун // Нариси з історії техніки. – 1961. — Вип 7. — С.27–43.
188. Хижняк З.І. Києво—Могилянська академія. Історичний нарис. / З.І. Хижняк. – Київ, Видавничий дім «КМ Академія», 2001. – 20 с.
189. Хижняк З.І. Історія Києво—Могилянської академії / З.І.Хижняк, В.К. Маньківський. – Київ: Видавничий дім «КМ Академія». 2003. – 184 с.
190. Матеріали до історії Острозької академії (1576-1636): Біобібліогр. довідник / АН УРСР. Археограф. комісія; Ін-т історії. Відп. ред. О.М.Дзюба. – К., – 1990. – 216 с.
191. Київський політехнічний інститут. Нарис історії (КПІ—100 років). — Київ: Київський політехнічний інститут, 1995. — 320 с.
192. 50 лет харьковскому физико-техническому институту. — К.: Наук.думка, 1978. — 320 с.
193. Харьковский физико—технический институт. — К.: Наук. думка, 1978. — 143 с.
194. Институт металлофизики. — Киев:Наук.думка, 1985. — 36 с.; Институт металлофизики им. Г.В.Курдюмова. — Киев: Наук.думка, 2000. — 174 с.
195. Институт полупроводников. — К.: Наук. думка, 1985. — 152 с.
196. Институт проблем материаловедения АН УССР. — К.: Наук. думка, 1985. — 32 с.
197. Zagorodny A.G. 40 years of M.M.Bogolyubov institute for theoretical physics of the national academy of science of Ukraine / A.G.Zagorodny // Ukrainian Journal of Physics. — 2006. — V.51. — №1. — P.103—108.
198. Институт радиофизики и электроники им. А.Я.Усикова НАН Украины. 50 лет. — Харьков, ИРЭ НАНУ, 2005. — 612 с.
199. Институт теоретической физики АН УССР. — Киев: Наук. думка, 1986. — 104 с.
200. Загородний. А.Г. 40 лет институту теоретической физики им. Н.Н. Боголюбова Национальной академии наук Украины // Укр. физ. журн. — 2006. — Т. 51. — №1. — С.103—108.
201. Таньшина А.В. Институт теоретической физики имени А.И.Ахиезера ( исторический очерк) / А.В.Таньшина. — Харьков: Квант, 2006. — 112 с.
202. Объединенный институт ядерных исследований. Дубна, 1956—1981. — Дубна: Объединенный институт ядерных исследований, 1981. — 227 с.
203. Багалея Д.И. Краткий очерк истории Харьковского университета за первые сто лет его существования (1805—1905) / Д.И.Багалея, М.Ф.Сумцов, В.П. Бузескул. – Харьков: Типография Адольфа Дарре, 1906. – 339 с.
204. Харьковский государственный университет им. А.М.Горького за 150 лет. — Харьков, изд-во Харьковского университета, 1955. — 386 с.
205. Фізико-математический факультет Харьковского университета за первые сто лет существования (1805—1905) / Под ред. И.П. Осипова, Д.И.Багалия. — Харьков: Изд. Харьков. ун—та, 1908 — 248 с.

206. Розвиток науки в Київському університеті за 100 років. — Київ: Вид-во Київ. ун-ту, 1935. — 202 с.
207. Киевский университет. 1834—1984. — К.: Изд-во Киев. ун-та, 1984. — 203 с.
208. Історія Київського університету. — К.: Наукова думка, 1959. — 630 с.
209. Наука в Київському національному університеті ім. Тараса Шевченка на зламі тисячоліть. — К.: Київ. ун-т, 2002. — 330 с.
210. Нариси історії Київського університету. — К.: Наша культура і наука, 2004. — 439 с.
211. Улітко А.Т. Розвиток математики і механіки на механіко-математичному факультеті Київського університету за 150 років / А.Т.Улітко // Вісник Київ. ун-ту. — 1983. — Сер.25. — С.3—26.
212. Граціанська Л.М. Математики Київського університету / Л.М.Граціанська . — К., 1967. — 47 с.
213. До 100—річчя кафедри теоретичної фізики. // Вісник Київ. ун-ту. Серія Фізика. — 1976. — №17. — С.122—127.
214. Поляков М.В. Класичний університет: еволюція, сучасний стан, перспективи / М.В.Поляков, В.С.Савчук. — К.: Генеза, 2004. — 416 с.
215. Жмудський О.З. Наукові дослідження з фізики у вузах України/ О.З. Жмудський // Укр. фіз. журн. — 1963. — Т.8. — №4. — С.405—417.
216. У Президії Академії наук УРСР: Про розвиток наукових досліджень з фізики в університетах УРСР // Доповіді АН УРСР. — 1965. — №5. — С.677—678.
217. Дмитренко Г.В. Дослідження в галузі фізичних наук в Київському державному університеті за 40 років / Г.В.Дмитренко // Наук. записки Київ. ун-ту. — 1959. — Т.18, вип 3. — (Збірник фізичного факультету. — №10). — С.5—17.
218. Полякова Н.Л. Фізика в Харьковском университете от его основания до великой октябрьской социалистической революции / Н.Л.Полякова // Труды физического отделения физико-математического факультета Харьковского государственного университета. — 1955. — Т5. — С.5—50.
219. Полякова Н.Л. Фізика в Харьковском университете с 1917 по 1930 год / Полякова Н.Л. // Труды физического отделения физико-математического факультета Харьковского государственного университета. — 1955. — Т5. — С.57—62.
220. Сеньків М.Т. Наукові дослідження на фізичному факультеті Львівського університету / М.Т.Сеньків // Вісник Льв. Ун-ту. — Сер. фіз., хім. і мех.-мат. — 1968 . — С.3—7.
221. Климишин І.А. Про розвиток фізики у Львівському університеті (до 300—річчя його заснування) / І.А.Климишин // Вісник Льв.ун-ту ім.Івана Франка. Сер. фіз. — 1962. — Вип 1 (8). — С.3—9.
222. Кирилов Є.А. Фізика в Одеському університеті ім. І.І.Мечнікова / Кирилов Є.А., Поліщук Д.І., Сьора Т.Я. // Укр.фіз.журн. — 1958. — Т3. — №1. — С. 3—9.
223. Штрум Л.Я. Теоретична фізика в Київському державному університеті / Л.Я.Штрум // Розвиток науки в Київському університеті за 100 років. — К.: Вид-во Київ. Ун-ту. — 1935. — С.22—33.

224. Маркевич О.П. Наука і наукові працівники в Київському державному університеті за 112 років його існування. 1834—1946 / О.П.Маркевич // Наук. записки Київ. ун—ту. — 1946. — Т.5, вип.1. — С.9—64.
225. Рання історія академії наук України (1918—1921) / Храмов Ю.О., С.П. Руда, Ю.В.Павленко, В.А.Кучмаренко. — Київ: «Манускрипт», 1993. — 248 с.
226. Історія Національної Академії наук України в суспільно—політичному контексті. 1918—1998 / Кульчицький С.В., Павленко Ю.В., Руда С.П., Храмов Ю.О. — Київ: «Фенікс», 2000. — 527 с.
227. Історія Академії наук. 1918—1923: Документи і матеріали / Упоряд: В.Г. Шмельов (ст. упор.) та ін.— К.: Наук. думка, 1993. — 376 с.
228. Барьяхтар В.Г. Исследования по физике в Академии наук Украинской ССР за годы советской власти 2. / В.Г.Барьяхтар, Ю.А.Храмов // Укр. физ. журн. — 1987. — Т.32. — №12. — С.1765—1781.
229. Радовский М. Сессия отделения физико-математических и химических наук Академии наук УССР по вопросам физики / М.Радовский // Успехи физ. наук. — 1948. — Т.25, вып.2. — С.284—291.
230. Науковий щорічник Київ. ун-ту за 1959 р. — К., 1960. — 328 с.
231. Науковий щорічник Київ. ун-ту за 1960 р. — К., 1961. — 263 с.
232. Науковий щорічник Київ. ун-ту за 1957 р. — К., 1958. — 551 с.
233. Науковий щорічник Київ. ун-ту за 1958 р. — К., 1959. — 415 с.
234. Науковий щорічник Київ. ун-ту за 1961 р. — К., 1962. — 248 с.
235. Лейпунский А.И. Отчет о работе украинского физико-технического института / А.И.Лейпунский // Известия Академии наук СССР. — 1937. — № 3. — С.363—377.
236. Павленко Ю.В. Дело «УФТИ». 1935—1938 / Ю.В.Павленко, Ю.Н.Ранюк, Ю.А.Храмов.. — Київ: «Фенікс», 1998. — 324 с.
237. Школы в науке: Сборник / Под ред. С.Р.Микулинского, М.Г.Ярошевского, Г. Креба, Г. Штейнера. — М.: Наука, 1977. — 523 с.
238. Ланге К.А. Организация управления научными исследованиями / К.А. Ланге. — Л.: Наука, 1971. — 248 с.
239. Храмов Ю.А. Школы в науке / Ю.А. Храмов // Вопросы истории естествознания и техники. — 1982. — №3. — С.54—67.
240. Храмов Ю.А. Научный лидер и его характерные черты / Ю.А.Храмов // Науковедение и информатика // 1986. — Вып.27. — С.81—91.
241. Храмов Ю.А. Научные школы в структуре потенциала науки / Ю.А. Храмов // Научно-технический потенциал: структура, динамика, эффективность. — Киев: Наук. думка, 1987. — 348 с.
242. Храмов Ю.А. Научные школы в физике / Ю.А.Храмов. — Киев: Наук. думка, 1987. — 400 с.
243. Храмов Ю.А. История формирования и развития физических школ на Украине / Ю.А.Храмов. — К.: Фенікс, 1991. — 216 с.
244. Френкель Я.И. Кинетическая теория жидкостей / Френкель Я.И. — М.: Изд-во АН СССР, 1945. — 592 с.
245. Боголюбов М.М. Лекції з квантової статистики / М.М.Боголюбов. — К.: Рад.школа, 1949. — 227 с.

246. Боголюбов Н.Н. О некоторых статистических методах в математической физике / Н.Н.Боголюбов. — К.: Изд-во АН УССР, 1945. — 137 с.
247. Боголюбов Н.Н. Проблемы динамической теории в статистической физике / Н.Н.Боголюбов — М. - Л: Гос. Техн.-Теоретич. изд., 1946. — 119 с.
248. Боголюбов Н.Н. Новый метод в теории сверхпроводимости / Н.Н. Боголюбов, В.В.Толмачов, Д.В.Ширков. — М.: Из-во АН СССР. — 1958. — 128 с.
249. Бардин Дж. Новое в изучении сверхпроводимости / Дж.Бардин, Дж. Шриффер. — М.: Физматгиз, 1962. — 171 с.
250. Ландау Л.Д. Статистическая физика / Л.Д.Ландау, Е.М.Лифшиц. — М.: Наука, 1964. — 568 с.
251. Данилов В.И. Строение и кристаллизация жидкостей / В.И.Данилов. — К.: Изд-во АН УССР, 1956. — 568 с.
252. Кривоглаз М.А. Теория упорядочивающихся сплавов / М.А.Кривоглаз, А. А.Смирнов. — М.: Физматгиз, 1958. — 388 с.
253. Ситенко А.Г. Электромагнитные флуктуации в плазме / А.Г.Ситенко. — Харьков: Изд-во Харьк. Ун-та, 1965. — 184 с.
254. Зоммерфельд А. Термодинамика и статистическая физика / А. Зоммерфельд. — М.: Изд-во иностр. лит. — 1955. — 479 с.
255. Климонтович Ю.Л. Статистическая физика. — М.: Наука, 1982. — 608 с.
256. Куни Ф. Статистическая физика и термодинамика / Куни Ф. — М.: Наука, 1981. — 352 с.
257. Балеску Р.. Равновесная и неравновесная статистическая механика: в 2-х т. / Балеску Р. — М.: Мир, 1978.
258. Хилл Т. Статистическая механика. Принципы и избранные приложения: Пер. с англ. / Хилл Т. — М.: Изд-во иностр. лит-ры, 1960. — 488 с.
259. Исихара А. Статистическая физика / А.Исихара — М.: Мир, 1973. — 471 с.
260. Хуанг К. Статистическая механика / К.Хуанг. — М.: Мир, 1971. — 520 с.
261. Хир К. Статистическая механика, кинетическая теория и стохастические процессы / К.Хир. — М.: Мир, 1976. — 600 с.
262. Радушкевич Л.В. Курс статистической физики / Л.В.Радушкевич. — М.: Просвещение, 1966. — 420 с.
263. Леонтович М.А. Введение в термодинамику. Статистическая физика / М. А.Леонтович — М.: Наука, 1983. — 416 с.
264. Френкель Я.И. Статистическая физика / Я.И.Френкель. — М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1948. — 760 с.
265. Терлецкий Я.П. Статистическая физика / Я.П.Терлецкий. — М.: Высшая школа, 1973. — 280 с.
266. Левич В.Г. Введение в статистическую физику / В.Г.Левич. — М.: ГИТТЛ, 1954. — 528 с.
267. Уленбек Дж. Лекции по статистической механике / Дж.Уленбек, Дж.Форд. — М.: Мир, 1965. — 307 с.
268. Физический энциклопедический словарь: в 5 т. — М.: Советская энциклопедия, 1960–1966.
269. Физический энциклопедический словарь. — М.: Советская энциклопедия, 1983. — 928 с.

270. Физическая энциклопедия: в 5 т. — М.: Советская энциклопедия, 1988–1999.
271. The encyclopedia of physics, edited by Robert M. Bescanson. — New York, 1985.
272. 25 years of non-equilibrium statistical mechanics: proceeding of the XIII Sitges Conference, held in Sitges, Barcelona, Spain. — 13-17 June 1994. — Springer-Verlag Berlin—Heidelberg, 1995 — 387 p. — (Lecture notes in Physics, Vol.445).
273. Chaos: the interplay between stochastic and deterministic behavior: proceedings of the XXXI Winter School of Theoretical Physics (Karpacz, Poland/ 13—24 February 1995.—Springer, 1995. — 571 p.). — (Lecture notes in Physics, Vol.457).
274. Розвиток фізичної науки в Україні 1917—1967. Бібліографічний покажчик: у 3-х частинах. — К.:Наук.думка, 1969—1970.
275. Видання Академії наук УРСР (1919—1967). Фізико-технічні та математичні науки. — Київ, 1970. — 782 с.
276. История естествознания. Литература, опубликованная в СССР (1948—1975). Библиографический указатель. — М.: Изд-во АН СССР. — 1972—1984.
277. Институт истории естествознания и техники (краткий обзор). — М.: Наука, 1981. — 131 с.
278. Николай Николаевич Боголюбов: Материалы к биобиблиографии ученых СССР. — Москва: Изд-во АН СССР, 1959. — 50 с.
279. Борис Иеремиевич Веркин / АН УССР; [сост. А.П.Кириченко, Н.С. Васильченко, Л.С.Овчарова; авт. вступ. ст. И. М. Дмитренко, Ю. А. Кириченко, В. Г. Манжелей, И. В. Свечкарев; отв. ред. В. Г. Манжелей]. — Киев : Наук. думка, 1989. — 81 с.
280. Александр Сергеевич Давыдов. — К.Наук. думка, 1982. — 55 с.
281. Олексій Григорович Ситенко. — К.Наук.думка, 1997. — 92 с.
282. Ігор Рафаїлович Юхновський / НАН України; Інститут фізики конденсованих систем / М.А.Кориневський (відп.ред.), Надія Яківна Гривнак (уклад.), М.Ф. Головка (авт.вступ.ст.). — К. : Наукова думка, 1995. — 84 с.
283. Полак Л.С. Людвиг Больцман / Л.С.Полак. — М.:Наука, 1987.
284. Франкфурт У.И. Джозайя Уиллард Гиббс. 1839—1903. / У.И.Франкфурт, А.М. Френк. — М.: Наука, 1964. — 279 с.
285. Хайтун С.Д. История парадокса Гиббса / С.Д.Хайтун. — М.:Наука, 1986.— 168 с.
286. Франкфурт У.И. Гельмгольц. 1821—1894 / У.И.Франкфурт, А.В. Лебединский, А.М.Френк.— М.: Наука, 1966. — 319 с.
287. Бородинский В.М. Сади Карно / В.М.Бородинский. — М.:Наука, 1993. — 160 с.
288. Пайс А. Научная деятельность и жизнь Альберта Эйнштейна / А.Пайс. — М.: Наука, 1989. — 560 с.
289. Быков Г.В. Амедео Авогадро / Г.В.Быков. — М.: 1970. — 184 с.
290. Плачинда В.П. Микола Дмитрович Пильчиков / В.П.Плачинда (1857—1908). — К., 1983. — 195 с.
291. Мороз О.П. Жажда истины (книга о П.Эренфесте) / О.П.Мороз. — М.:Знание, 1984. — 1984. — 200 с.

292. Френкель В.Я. Пауль Эренфест. (1880—1933) / В.Я.Френкель. — М.: Атомиздат, 1971. — 144 с.
293. Klein Martin J. Paul Ehrenfest. The Making of a Theoretical Physicist: Vol 1 / Martin J. Klein. — North-Holland Physics Publishing, 1970 — 330 с.
294. Богдан Верес. Сонячна теорема : документальна повість про М.М. Боголюбова / Богдан Верес. — К.: Дніпро, 1975. — 183 с.
295. Боголюбов А.Н. Н.Н.Боголюбов. Жизнь. Творчество / А.Н.Боголюбов. — Дубна, 1996. — 182 с.
296. Ливанова А.М. Л.Д.Ландау / А.М.Ливанова. — М.: Знание, 1978. — 192 с.
297. Ландау-Дробанцева К.Т. Академик Ландау. Как мы жили / К.Т.Ландау-Дробанцева. — М.: Захаров, 2003. — 284 с.
298. Бессараб М.Я. Ландау. Страницы жизни / М.Я.Бессараб. — М.: Моск. рабочий, 1978. — 232 с.
299. Каганов М.И. Школа Ландау: что я о ней думаю / М.И.Каганов. — Троицк: Тровант. — 1998. — 368 с.
300. Усиков А.Я. Мгновения жизни (страницы истории физической науки в Харькове): фотоальбом / текст А.Я.Усиков, фотоэтюды Д.А.Гай. — Киев: Мистецтво, 1990.
301. Розвиток науки в західних областях Української РСР за роки радянської влади. 1939—1989. — К.:Наук.дкмка, 1990. — 304 с.
302. Савчук В.С. Нариси з історії фізичних досліджень на Дніпропетровщині (1917—1945): Навч.посібник / В.С.Савчук. — Дніпропетровськ: ДДУ, 1997. — 68 с.
303. Ейнштейн А. Мариан Смолуховский / Альберт Ейнштейн // Собрание научных трудов: в 4 т. — М.:Наука, 1967. — Т.4. — С.36—38.
304. Боголюбов Н.Н. Людвиг Больцман / Н.Н.Боголюбов, Ю.В.Саночкин // Успехи физ. наук. — 1957. — Т.61, вып.1. — С.7—15.
305. Гольдман А.Г. Михаил Петрович Авенариус и киевская школа экспериментальной физики / А.Г. Гольдман // Успехи физ. наук. — 1951. — Т.XLIV, вып.4. — С.586—609.
306. Максвелл, Дж.К. Статьи и речи [Текст] / Дж.К. Максвелл.— [пер. с англ., сост., авт. примеч. У. И. Франкфурт]. — М.: Наука, 1968. — 422 с.
307. Франкфурт У.И. Роль Максвелла в развитии кинетической теории газов / У.И.Франкфурт // Дж. Максвелл. Статьи и речи. — М.: Наука, 1968. — С.369—371.
308. Шушурин С.Ф. Максвелл и статистический метод в физике / С.Ф. Шушурин // Максвелл и развитие физики XIX—XX веков. — М: Наука, 1985. — С. 166—177.
309. Кузнецова О.В. Развитие молекулярно-кинетических идей Максвелла русскими физиками конца XIX—начала XX в. / О.В. Кузнецова // Максвелл и развитие физики XIX—XX веков. — М: Наука, 1985. — С.177—184.
310. Кузнецова О.В. Максвелл и границы применимости II начала термодинамики/ О.В. Кузнецова // Максвелл и развитие физики XIX—XX веков. — М: Наука, 1985. — С.158—166.
311. Кравец И.Н. Т.Ф.Осиповский—выдающийся русский философ-материалист и естествоиспытатель / И.Н. Кравец // Вопросы философии. — 1951. — №5. — С.111—120.



312. Мигулин В.В. Л.И.Мандельштам и становление советской физики (к 100 —летию со дня рождения) / В.В.Мигулин // Природа. — 1979. — №5. — С.44—54.
313. Горелик Г.Е. Эренфест и проблема физического пространства / Г.Е. Горелик // Исследования по истории механики. — 1983. — С.245—260.
314. Кирпичев М.В. Роль отечественных ученых в развитии учения о подобии / М.В.Кирпичев // Труды по истории техники. — 1954, вып.7. — М.: Изд-во АН СССР. — С.12—19.
315. Свиридонов М.Н. Развитие понятия энтропии в работах Т.А.Афанасьевой —Эренфест / М.Н.Свиридонов // История и методология естественных наук. — 1971, вып.10. — С.112—129.
316. Косоногов Й.Й. Николай Николаевич Шиллер / Й.Й. Косоногов // Журнал Рус. физ. – хим. об—ва, ч. Физ. — 1911. — Т.43. — Вып 9, отд.1. — С.445.
317. Габович О.М. Першовідкривач теплового руху атомів і молекул (до 130—річчя М.Смолуховського) / Габович О.М. // Вісник НАН України. — 2002. — №5. — С.60—67.
318. Де Метц Г.Г. Памяти Ф.Н. Шведова / Г.Г. Де Метц // Физическое обозрение. — 1906. — Т.7.— №1.
319. Савчук В.С. Андрей Эдуардович Малиновский / В.С.Савчук // Очерки истории естествознания и техники. — 1989. — Вып.36. — С.124—128.
320. К 80-летию со дня рождения академика Н.Н.Боголюбова // Укр. мат. журн . — 1989. — Т.41. — №9. — С.1155.
321. Владимиров В.С. Николай Николаевич Боголюбов: к 80-летию со дня рождения / В.С.Владимиров, А.А.Логунов, С.П.Новиков // Успехи. мат. наук. — 1989. — Т.44, вып.5. — С.5—12.
322. Амбарцумян В.А. Николай Николаевич Боголюбов. К 70-летию со дня рождения / В.А.Амбарцумян, Н.Г.Басов, А.А.Логунов // Успехи физ. наук. — 1979. — Т.128, вып.4. — С.733—737.
323. Николай Николаевич Боголюбов: к 60-летию со дня рождения // Атомная энергия. — 1969— Т.27, вып.2. — С.89—90.
324. Николай Николаевич Боголюбов: к 50—летию со дня рождения // Журн. эксперим. и теорет. физики. — 1959. — Т.37, вып.2. — С.333—335.
325. Давыдов А.С. Николай Николаевич Боголюбов. К 70-летию со дня рождения / А.С.Давыдов, О.С.Парасюк, Д.Я.Петрина // Укр. физ. журн. — 1979. —Т. 24—№8. — С.1073—1075.
326. К 80-летию со дня рождения Н.Н.Боголюбова // Теорет. и мат. физика. — 1979— Т.40, №2. — С.147—154.
327. Логунов А.А. Николай Николаевич Боголюбов / А.А.Логунов, В.С. Владимиров. К 70 -летию со дня рождения // Успехи физ. наук. — 1979. — Т.128, вып.4. — С.732—737.
328. Митропольський Ю.А. Творчий вклад академіка М.М.Боголюбова у розвиток математики, нелінійної механіки та теоретичної фізики / Ю.А. Митропольський, В.Г.Бар'яхтар, Д.Я.Петрина // Вісник АН УРСР, 1985. — №11. — С.9—21.
329. Покровский А. Дубна: адреса сотрудничества:беседа с дважды героем Соц. Труда, директором Объединенного института ядерных исследований,

академиком Н.Н.Боголюбовым / А.Покровский // Правда, 1981. — 24 марта.

330. Верес Б. Секрет академика Н.Н.Боголюбова / Б.Верес // Знання та праця. — 1979. — №8. — С.10—11.

331. Кулешов С., Сисакян А. Одной лишь думы власть... (К 70-летию академика Н.Н.Боголюбова) / С.Кулешов, А.Сисакян // Комсомольская правда. — 1979. — 21 августа.

332. Лебеденко М.М. Ученый / М.М.Лебеденко // Культура и жизнь. — 1967. — №10. — С.34—35.

333. Логунов А.А. Философия нелинейности / А.А.Логунов // Советская Россия. — 1989. — 20 августа.

334. Радунская И.Л. Вблизи абсолютного нуля / И.Л.Радунская // Огонек. — 1958. — №19. — С.13.

335. Боголюбов Н.Н. (мл.) Николай Николаевич Боголюбов. Очерк научной деятельности / Н.Н.Боголюбов (мл.), Д.П.Санкович // Физика элементарных частиц и атомного ядра. — 1993. — Т.24, вып.5. — С.1224—1293.

336. 60-річчя академіка І.Р.Юхновського // Вісник АН УРСР. — 1985. — №8. — С.110.

337. 70-річчя академіка І.Р.Юхновського // Укр. фіз. журн. — 1985. — Т.30. — №8. — С.1273—1274.

338. Сергей Владимирович Пелетминский (к 70-летию со дня рождения) // Электромагнитные явления. — 2001. — Т.2—№1(5). — С.149—150.

339. Данилов В.И. Некролог // Журн. эксперим. и теорет. физики. — 1954. — 27, вып.6. — С.657—659.

340. Данилов В.И. 1902—1954. Некролог // Проблемы металловедения и физики металлов. — 1955. — Сб.4. — С.7—12.

341. Відкриття меморіальної дошки на честь академіка НАН України В.І. Данилова // Вісник АН УРСР. — 1983. — №6. — С.97.

342. 75-летие академика АН УССР А.А.Смирнова // Металлофізика. — 1983. — Т.5. — №6. — С.115.

343. 70-річчя академіка АН УРСР А.А.Смирнова // Вісник АН УРСР. — 1978. — №12. — С.90.

344. Пам'яті А.А.Смирнова // Вісник АН України. — 1993. — №3. — С.110.

345. Голик А.З.: к 70-летию со дня рождения // Физика жидкого состояния. — 1976, вып.4. — С.142—144.

346. Голик А.З.: к 60-летию со дня рождения // Укр. физ. журн. — 1966. — Т. 11. — С.349—350.

347. Голик А.З. : к 60-летию со дня рождения // Акустический журнал. — 1966 . — Т.12, вып.4. — С.494—495.

348. Bulavin L.A. Professor I.Z.Fisherpr's scientific legacy/ L.A.Bulavin, N.P. Malomuzh // Journal of Molecular Liquids. — 2001. — Т.93. — Р.1—3.

349. Воспоминания о Н.Н.Боголюбове: математик, механик, физик. — Дубна:ОИЯИ, 1994. — 215 с.

350. Воспоминания о Л.Д.Ландау / Отв. ред. И.М.Халатников. — М.:Наука, 1988. — 352 с .

351. Ахиезер А.И. Очерки и воспоминания / А.И.Ахиезер. — Харьков: «Факт», 2003. — 431с.
352. Воспоминания об Олександре Сергеевиче Давыдове / Отв. ред. В.М. Локтев. — К.:Ин-т теорет. фізики НАН України, 2002. — 289 с.
353. Формули життя і творчості академіка Юхновського. Есе, інтерв'ю, хроніка. — Львів, 2000. — 160 с.
354. Воспоминания о П.Еренфесте // Еренфест. П. Относительность, кванты, статистика: Сб. статей. — М.:Наука, 1972. — 359 с.
355. Юленбек Г.Е. Воспоминания о профессоре П.Эренфесте / Юленбек Г.Е. // Успехи физ.наук. — 1957. — Т.LXII, вип.3. — С.365—370.
356. Иоффе А.Ф. Дополнения к «Воспоминаниям о профессоре П.Эренфесте Г.Е.Юленбека» / А.Ф.Иоффе // Успехи физ. наук. — 1957. — Т.LXII, вип.3. — С.371—372.
357. Ахиезер А.И. Воспоминания о Якове Ильиче Френкеле / А.И. Ахиезер // Физика низких температур. — 1994. — Т.20. — №2. — С.194—197.
358. Юхновський І.Р. Вибрані праці. Фізика / І.Р.Юхновський, передмова І. Мриглод, М.Головка, О.Іванків, М.Козловський, І. Стасюк, М.Токарчук. — Вид-во університету „Львівська політехніка”, 2005. — 858 с.
359. Національна академія наук України. Персональний склад. 1918—2003. / уклад. В.М.Палій, Ю.О.Храмов.— К.: “Фенікс,—2003. — 300 с.
360. Храмов Ю.А. Физики. Биографический справочник / Ю.А.Храмов. — К:Наук. думка, 1977. — 509 с.
361. Gray H.J. A New Dictionary of Physics / Gray H.J, Alan Isaacs. — Longman Group Limited, 1975. — 619 с.
362. Millar D. Dictionary of Scientists / D.Millar. — Cambridge University Press, 1996. — 378 с.
363. Notable Twentieth-Century Scientists: 4 vols / editor McMurray, Emyly J. — Detroit (USA): Gale Research, 1995.
364. Twentieth Century Physics: 3 vols / editor Laurie M.Brown, Abraham Pais, Brian Pippard. Institute of Physics Publishing ( Bristol) and The American Institute of Physics press (New York), 1995.
365. Dictionary of scientific biography. — New York, Scriber, 1970—1980.
366. Хто є хто. Довідник. Професори Національного технічного університету “Київський політехнічний інститут”. — К.: Освіта, 1998. — 155 с.
367. Вихованці Харківського університету. Біобібліографічний довідник / Б.П. Зайцев, В.І.Кадєєв, С.М.Куделко та інші. — Харків: “Авто—Енергія”, 2004. — 250 с.
368. Почесні члени і доктори університету Св.Володимира / Автори-упор. В.А. Короткий, Т.В.Табенська, Ю.В.Цимбал.- К.: Либідь, 2005. —327 с.
369. Биографический словарь деятелей естествознания и техники. — В. 2-х т. — М.: Сов.энциклопедия, 1958—1959.
370. Венгеров С.А. Критико-биографический словарь русских писателей и ученых от начала русской образованности до наших дней: в 2-х т. / С.А.Венгеров.— М.: 1915—1918.
371. Голин Г.М. Классики физической науки (с древнейших времен до начала XX в. ) / Г.М.Голин, С.Р.Филонович— М.: Высшая школа, 1989. — 576 с.

372. Соколовская З.К. 400 биографий ученых / З.К.Соколовская. — М.: Наука, 1988. — 458 с.
373. Основатели кинетической теории материи: сб. работ. — М.-Л.:ОНТИ, 1937. — 220 с.
374. Второе начало термодинамики: сб. работ ( Карно С., Клаузиус Р., Томсон-Кельвин В., Больцман Л., Смолуховский М.) / под ред А.К.Тимирязева — М. – Л.: Гостехтеориздат, 1934. – 312 с.
375. Проблемы теоретической физики: сборник, посвящ. Н.Н.Боголюбову в связи с его 60-летием. — М.: Наука, 1969. — 380 с.
376. Проблемы современной статистической физики: — Сб. науч. тр. / Отв. ред. Н.Н.Боголюбов. – К.: Наук. думка, 1985. — 288 с.
377. Методы Монте-Карло в статистической физике: сб. статей. — М.: Мир, 1982. — 400 с.
378. Лагарьков А.Н. Метод молекулярной динамики в статистической физике / А.Н.Лагарьков, В.М.Сергеев // Успехи физ. наук. — 1978. — Т.125, вып.3. — С.410—448.
379. Н.Н.Боголюбов (мл.). Математические методы статистической механики модельных систем / Н.Н.Боголюбов (мл.), Б.И.Садовников, А.С.Шумовский.. — М.:Наука, 1989. — 295 с.
380. Особова справа академіка НАН України В.І.Данилова // Архів Президії НАН України. — Ф.251Р. — Оп.№2. — Од.зб. — №256.
381. Особова справа академіка НАН України А.А.Смирнова // Архів Президії НАН України. — Ф.251Р. — Оп.№622. — Од.зб. — №34.
382. Особова справа професора А.А.Смирнова // Архів НТУУ “КПІ”. — Ф.Р—308. — Оп.№14. — Од.зб. — №174.
383. Особова справа академіка НАН України О.Г.Ситенка // Архів Президії НАН України. — Ф.251Р. — Оп.№632—А. — Од.зб. — №18.
384. Особова справа академіка НАН України І.М.Лифшиця // Архів Президії НАН України. — Ф.251Р. — Оп.№609—Б. — Од.зб. — №9.
385. Особова справа члена-кореспондента НАН України А.Г.Лесника // Архів Президії НАН України. — Ф.251Р. — Оп.№631. — Од.зб. — №30.
386. Особова справа професора О.З.Голика // Архів Київського університету. — Спр.№.1978—11.
387. Особова справа професора А.М.Федорченка // Архів Київського університету. — Спр.№.1961—109.
388. Особова справа професора С.Д.Герцрікена // Архів Київського університету. — Спр.№.1994—132.
389. Особова справа професора Ю.І.Шиманського // Архів Київського університету. — Спр.№.1998—135.
390. Особова справа доктора фізико-математичних наук В.Л.Германа за 1962—1964 рр. // Архів Інституту радіофізики та електроніки НАН України. — Ф.1—Оп. №2—Л. — Од.зб.№114.
391. Звіт Інституту фізики АН УРСР про роботу за 1947 р. // Архів Президії НАН України. — Ф.251Р. — Оп.2—Од.зб. — № 38.
392. Архів Д.А.Граве // Інститут рукопису ЦНБ НАН України. — ХХ. — 137.

393. Архів Президії НАН України // Ф.251Р. — Оп.№2. — Од.зб.№67. — Л. 139—141.
394. Архів Президії НАН України // Ф.251Р. — Оп.№12. — Од.зб.№10. — Л.3—4.
395. Архів Президії НАН України // Ф.251Р. — Оп.№6. — Од.зб.№7. — Л.138—140.
396. Газета «Новое время». — СПб, 1897. — 6 січня // Газетний відділ ЦНБ НАН України.
397. Форостяна Н.П. Історичні аспекти у вивченні молекулярної фізики в середніх загальноосвітніх навчальних закладах України: Дис... канд. пед. наук: 13.00.02 / Форостяна Нінель Петрівна, Національний педагогічний ун-т ім. М.П. Драгоманова. — К., 2002. — 225 с.
398. Садовий М.І. Теоретичні і методичні основи становлення і розвитку фундаментальних ідей дискретності та неперервності в курсі фізики загальноосвітньої школи: Дис... д-ра пед. наук: 13.00.02 / Садовий Микола Ілліч, Національний педагогічний ун—т ім. М.П. Драгоманова. — К., 2001. — 516 с.
399. Свиридонов М.Н. Эволюция понятия причинности в физике: Автор. дис. на соиск. уч. степ. канд. физ—мат. наук. / М.Н.Свиридонов, МГУ физ. фак. — М.: 1974. — 24 с.
400. Эренфест Пауль и Иоффе Абрам Федорович. Научная переписка. 1907—1933г. — Л., Наука, 1973. — 309 с.
401. Balescu R. Statistical mechanics / R.Balescu. // The encyclopedia of physics, edited by Robert M. Bescanson: New York : Van Nostrand Reinhold Co., 1985. — 1378 p.
402. Климонтович Ю.Л. Статистическая физика / Ю.Л.Климонтович. — М.: Наука, 1982. — 608 с.
403. Ландау Л.Д. Статистическая физика: ч.1. (Сер. Теорет. физика. —Т.5) / Л. Д.Ландау, Е.М.Лифшиц. — М.:Наука, 1976. — 584 с.
404. Куни Ф. Статистическая физика и термодинамика / Ф.Куни. — М.:Наука, 1981. — 351 с.
405. Балеску Р. Равновесная и неравновесная статистическая механика / Р. Балеску: в 2-х т. — М.:Мир, 1978.
406. Хилл Т. Статистическая механика / Т.Хилл. — М.:Изд-во иностр. лит., 1960. — 485 с.
- 407 Исихара А. Статистическая физика / А.Исихара. — М.:Мир,1973. — 471 с.
408. Хуанг К. Статистическая механика / К.Хуанг. — М.: Мир, 1966. — 520 с.
409. Хир К. Статистическая механика, кинетическая теория и стохастические процессы / Хир К. — М.:Мир, 1976. — 600 с.
410. Украинская Советская Энциклопедия [Текст] : в 12-ти томах / Ред. М.П. Бажан. — К. : Советская энциклопедия, 1978—1985. — Т.10.
411. Радущкевич Л.В. Курс статистической физики / Л.В.Радущкевич. — М.: Просвещение, 1966. — 420 с.
412. Леонтович М.А. Введение в термодинамику. Статистическая физика / М.А. Леонтович. — М.:Наука, 1983. — 416 с.
413. Френкель Я.И. Статистическая физика / Я.И.Френкель. — М.;Л.: Изд-во АН СССР, 1948. — 760 с.

414. Терлецкий Я.П. Статистическая физика / Я.П.Терлецкий. — М.: Высш. школа, 1973. — 278 с.
415. Румер Ю.Б., Рывкин М.Ш. Термодинамика. Статистическая физика и кинетика / Ю.Б.Румер, М.Ш.Рывкин. — М.: Наука, 1972. — 400 с.
416. Левич В.Г. Введение в статистическую физику / В.Г.Левич. — М.:ГИТТЛ, 1954. — 528 с.
417. Уленбек Дж., Форд Дж. Лекции по статистической механике / Дж. Уленбек, Дж.Форд. — М.:Мир,1965. — 307 с.
418. Гиббс Дж.. Основные принципы статистической механики / Дж.Гиббс. — М. — Л., Гостехиздат, 1946. — 203 с.
419. Киттель Ч. Элементарная статистическая физика / Ч.Киттель. — М.; Л.:Изд-во иностр. лит, 1960. — 278с.
420. Лаплас П.С. Изложение системы мира / Лаплас П.С. — Л.: Наука, 1982. — 376 с.
421. Винер Н. Кибернетика и общество/ Н.Винер. Перевод Е.Г.Панфилова. Общая редакция и предисловие Э.Я.Кольмана. — М.: Изд-во иностр. лит, 1958. — 196 с.
422. Боголюбов Н.Н. (мл.). Математические методы статистической механики модельных систем / Н.Н.Боголюбов (мл.), Б.И.Садовников, А.С.Шумовский / М.:Наука, 1989. — 295 с.
423. Краткая философская энциклопедия. — М.: Прогресс, 1994. — 576 с.
424. Новейший философский словарь / Сост. А.А. Грицанов. — Минск :Изд-во Скакун В.М ., 1999. — 896 с.
425. Философский словарь / Под ред. И.Т. Фролова. — 7-е изд., перераб. и доп. — М.: Республика, 2001. — 719 с.
426. Эйнштейн А. Собрание научных трудов: в 4-х т. / Эйнштейн А. — М.:Наука, 1965–1967.
427. Пригожин И. Время, хаос, квант / И.Пригожин, И.Стенгерс. М: УРСС, 2003. — 240 с.
428. Минченко Л.С. Физика Эйлера / Л.С.Минченко // Тр. Ин-та истории естествознания и техники АН СССР. — 1957. — Т.19. — С.221—270.
429. Ломоносов М.В. Полное собрание сочинений: в 10 т.: / М.В.Ломоносов. — М.;Л.: Изд-во АН СССР, 1950—1959.
430. Дальтон Д. Сборник работ по атомистике / Д.Дальтон. — М.;Л.:ГНТИХЛ, 1940. — 244 с.
431. Файерштейн М.Г. О роли Авогадро в истории развития учения о молекуле / М.Г.Файерштейн // Тр. Ин-та истории естествознания и техники АН СССР. — 1960. — Т.31. —С.3—14.
432. Meger O. Kinetische Theorie der Gase / O.Meger. — Breslau,1877. — 28 S.
433. Amonton G. // Mém. De l'Acad. Royale des Sciences. — 1702. — P.155.
434. Gay-Lussac J. // Ann. Chim. Phys. — 1802. — Т.43. — P.137—175.
435. Gay-Lussac J. // Ostwald's Klassiker. — Leipzig. — 1902. — №.44.
436. Деларош Ф., Бепар Ж. // Ann. Chim. Phys. — 1813. — V.85. — P.72.
437. Philosophical Transactions (4). — 1788. — V.78. — P.43.

438. Biot J. *Traité de physique expérimentale et mathématique: 4 vols* / J.Biot. — Paris: Deterville, 1816.
439. Gay-Lussac J. *Premier Essai pour déterminer les variations de température queprouvent les gas en changeant de densité, et considérations sur leur capacité pour le calorique* / J. Gay-Lussac // Mach E. *Die Prinzipien der Wärmelehre.* — Leipzig, 1900. — 508 с.
449. Poisson S. // *J. l'Ecole Polytechnique.* — 1808. — V.14. — P.360.
441. Laplas P. // *Ann. Chim. Phys.* — 1816. — V.3. — P.238—241.
442. Desormes et Clément // *J.Phys., Chim., D'Hist. Nat. Et des Arts.* — 1829. — V.89. — 321.
443. Дюлонг П. // *Ann. Chim. Phys.* — 1829. — 12. — P.113.
444. Дюлонг П., Пти А. // *Ann. Chim. Phys.* — 1819. — 10. — P.395.
445. Krönig A. *Grundzüge einer Theorie der Gase* / A. Krönig // *Pogg. Ann.* — 1856. — V.99— S.318.
446. Krönig A. // *Ann. Phys. Chem.* — 1856. — V.99. — S.315.
447. Maxwell J. *Illustrations of the Dynamical Theory of Gases* / J.Maxwell // *Phil. Mag.* — 1860. — V.4. — Ser.19. — №124. — P.19—32; (Рус.перев. Максвелл Д.К. *Пояснения к динамической теории газов* / Д.К. Максвелл // *Основатели кинетической теории материи.* Под ред.А.К.Тимирязева. — М.;Л.: ГОНТИ, 1937. — С.183—220.)
448. Maxwell J. *On the theory of heat* / J.Maxwell. — London.:Longmans, Geen and Co, 1871. — 54 p.
449. Maxwell J. *On the dinamical theory of gases* / J. Maxwell // *Phil. Mag.* — 1866 . — V.4. — Ser.32. — № 217. — P.390—393.
450. Boltzmann L. *Ueber die Beziehungzwischen dem zweiten hauptatzes der mechanischen Wärmetheorie und Wahrscheinlichkeitsrechnung/* L. Boltzmann // *Wien. Ber.* — 1877. — Bd.76. — S.373.
451. Gibbs J. *Collected Works: in 2 vols* / J.Gibbs. — New York: Longmans, Green , 1928.
452. Gibbs J. *On the fundamental formula of statistical mechanics, with applications to astronomy and thernmodinamics* / Gibbs J. // *Proc. Amer. Acad. Arts Sci.,* 1884. — V. 33. — P.57—58.
453. Darwin Ch. *On the partition of energy* / Ch.Darwin, R.Fowler // *Phil. Mag.* — 1922. — V.44. — P.450—479; 823—842.
454. Darwin Ch., Fowler R. // *Proc. Cambridge Phil. Soc.* — 1922. — V.21. — P. 262—273.
455. Фаулер Р., Гуггенгейм Э. *Статистическая термодинамика* / Р.Фаулер, Э. Гуггенгейм. — М.:Изд-во иностр. лит., 1949. — 612 с.
456. Planck M. // *Verhandl. Dtsch. Phys. Ges.* — 1900. — 2. — P.237—245 (// *Ann. Phys.* — 1901. — Bd.4. — P.553.)
457. Einstein A. *Ueber die von der molekular—kynetischen Theporie der Wärme geordnete Bewegung von in ruhenden Flüigigkeiten suspendierten Teilchen* / A. Einstein // *Ann. Phys.* — Ser.4. — 1905. — V.17. — S.549.
458. Perrin J. // *Conptes Rendus Acad. Sci. Paris.* — 1908. — V.147. — P.697— 970.

459. Svedberg Th. // Z. Elektrochem. — 1906. — Bd.12. — S.853—860.
460. Smoluchovski M. von. Zur Kinetischen Theorie der Brownschen Molecularbewegung und der Suspensionen / M. Smoluchovski // Ann.Phys. — 1906. — V.21. — S.756—780. (Рус. перевод. К кинетической теории броуновского молекулярного движения и суспензий // Брауновское движение / Под ред.Б.И. Давыдова. — Л.:ОНТИ, 1936. — С.133—165).
461. Bose S.N. Plancks Gesetz und Lichtquantenhypothes / S.N. Bose // Z.Phys. — 1924. — Bd.26. — P.178 — 181.
462. Dirac P.A.M. // Proc. Roy. Soc. (London). A. — 1926. — V.112. — P.661.
463. Fermi E. // end. Acc. Lincei. — 1926. — V.3(6). — P.145—149.
464. Fermi E. // Rend. Accad. Lincei. — 1923. — V.32. — № 2. — P.395—398.
465. Bardeen J. Microscopic theory of superconductivity / J.Bardeen, L.Cooper, J. Shrifffer // Phys.Rev. — 1957. — V.106. — P.162.
466. Боголюбов Н.Н. О новом методе в теории сверхпроводимости. I. / Н.Н. Боголюбов. — Препринт ОИЯИ ЛТФ Р—94. — Дубна, 1957, октябрь. — 16 с. (То же: //Журн. эксперим. и теорет. физики. — 1958. — Т.34, вып.1 — С.58—73.)
467. Feynman R.P. Application of Quantum Mechanics to Liquid Helium / Feynman R.P. // Progress in Low Temperature Physics. — V.1. — Amsterdam: North—Holland, 1955. — P.17—53.
468. Осиповский Т.Ф. Рассуждения о динамической системе Канта. — Речи, говоренные в торжественном собрании Харьковского университета 30 августа 1813 года. — Харьков: Типография ун—та, 1807. — С.3.
469. Пирогов Н.И. Сочинения: в 2-х т. / Н.И.Пирогов. — Киев: Изд-во Пироговского товарищества, 1916.
470. Столетов А.Г. Собрание сочинений: в 3-х т. / А.Г. Столетов. — М.; Л.:Гостехиздат, 1939—1947.
471. Надеждин А.И. Этюды по сравнительной физике / Надеждин А.И. — (Передисловие М.П.Авенариуса) . — Киев, 1886.
472. Авенариус М.П. Об электрических разностях металлов при различных температурах / М.П.Авенариус. — С.-Пб, 1866.
473. Авенариус М.П. Об электровозбудительной силе термоэлектрических элементов с точки зрения механической теории тепла/ М.П.Авенариус // Изв. Киев. ен-та. — 1870. — С.1—5.
474. Avenarius M. Ueber innere latente Wärme / M.Avenarius // Ann. Phys. — 1874. — Bd.227(2). — P.303—316.
475. Авенариус М.П. Критическое состояние тел / М.П.Авенариус // Журн. элемент. математики. — 1884. — Т.1. — №5. — С.14.
476. Avenarius M. Volumveränderung einer Flüssigkeit durch Temperatur und Druck / Avenarius M. // Bulletin de l'Acad. Imp. des sc. de St. Petersburg. — V.24. — 1877. — С. 525—533.
477. Авенариус М.П. Расширение жид кости / М.П.Авенариус. — Киев, 1877. — 11 с.
478. Зайончевский В.И. Определение упругости паров некоторых жидкостей при высоких температурах / В.И. Зайончевский // Изв. Киев. ун-та. — Т.3. — 1878. — №4. — С.21—49; №8. — С.29.



479. Малков М.П. Справочник по глубокому охлаждению / М.П.Малков, К.Ф. Павлов. — М.:Гостехиздат, 1947. — 411 с.
480. Кей Д. Справочник физика-экспериментатора / Д.Кей, Т.Лэби. — Москва, 1949. — 299 с.
481. Страус О.Е. О критической температуре и критическом давлении воды / О.Е.Страус // Журн. Рус. физ.- хим. Об-ва. Ч. Физ. — 1882. — Т.14. — С.510—517.
482. Nadéjdine A. La détermination de la température critique dans les tubes opaques / A. Nadéjdine // Bulletin de l'Acad. Imp. des sc. de St. Petersburg. — 1886. — V.30. — №5. — P.327—330.
483. Надеждин А.И. К вопросу о температуре абсолютного кипения / А.И. Надеждин // Журн. Рус. физ.-хим. об-ва. Ч. Физ. — 1883. — Т.14. — С.157—162.
484. Надеждин А.И. К вопросу о критической температуре изомеров и гомологических рядов / А.И.Надеждин // Журн. Рус. физ.-хим. об-ва. ч. физ. — 1883. — Т.15. — С.25—30.
485. Надеждин А.И. Несколько слов по поводу статьи г. Павлевского “Ueber die kritischen Temperaturen einiger Flüssigkeiten” / А.И.Надеждин // Журн. Рус. физ.-хим. об-ва. ч.Физ. — 1884. — Т.16. — С.74—75.
486. Надеждин А.И. О теплоемкости жидкостей / Надеждин А.И. // Журн. Рус. физ.- хим. об-ва. Ч. Физ. — 1884. — Т.16. — С.222—237.
487. Листування О.Г.Столетова // Архів бібліотеки ім.О.Г.Столетова Фізичного інституту Московського університету
488. Надеждин А.И. Физические исследования. — Киев, 1887.
489. Авенариус М.П. // Журн. Рус. физ. - хим. об-ва. Ч. Физ. — 1884. — 16. — С.402—403.
490. Умов Н.А. Избранные сочинения / Н.А.Умов. — М.;Л.: Гостехиздат, 1950. — 553 с.
491. Умов Н.А. Диффузия водного раствора поваренной соли / Н.А. Умов // Записки Новороссийского общества естествоиспытателей. — 1888. — Т.14, вып.1. — С.1.
492. Грузинцев А.П. О двойном лучепреломлении в связи со светорассеянием / Грузинцев А.П. / Грузинцев А.П. // Сообщ. Харьков. мат. Об-ва. Сер.2. — 1882, вып. 1. — Приложения. — С.3—82.
493. Глебова А.М. Наукова та педагогічна діяльність О.П.Грузинцева / А.М. Глебова // Нариси з історії природознавства і техніки. — 2005. — Вип.45. — С.20—38.
494. Измайлов Н.А. Академик Н.Н.Бекетов—основоположник физической химии / Н.А. Измайлов // Успехи химии. — 1952. —Т.21, вып.8. — С.996—1011.
495. Андреасов Л.М. Жизнь и деятельность профессора И.П.Осипова /Л.М. Андреасов // Тр. науч.-исслед. Ин-та химии и химич. фак-та Харьк. ун-та. — 1954. — Т.11. — С.261—265.
496. Смолуховский М. Средний путь газовых молекул и его связь с теорией диффузии / М Смолуховский // Брауновское движение / Под ред.Б.И.Давыдова. — Л.:ОНТИ, 1936. — С.117—132. (M.Smoluchovski // Bull. intern. de l'Ac.de Scienc. de Cracovie. — 1906. — P.202)

497. Смолуховский М. К кинетической теории броуновского молекулярного движения и суспензий / М.Смолуховский // Брауновское движение/Под ред.Б.И. Давыдова. — Л.:ОНТИ, 1936. — С.133—165 (M.v.Smoluchovski // Ann.d.Phys. — 1906. — Vd.21. — S.756—780)
498. Смолуховський М. (біографія) // Брауновское движение / Под ред.Б.И. Давыдова. — Л.:ОНТИ, 1936. — С.417—418.
499. R.Brown // Pogg. Ann. — 1828. — V.14. — S.294
500. Эйнштейн А. О движении взвешенных в покоящейся жидкости частиц, требуемом молекулярно-кинетической теорией теплоты / А.Эйнштейн // Собрание научных трудов. — Т.3. — М.: Наука, 1966. — С.108—117. (A.Einstein // Ann. Phys. — 1905. — Vd.17. — S.549—560.)
501. Эйнштейн А. К теории броуновского движения / А. Эйнштейн // Собрание научных трудов. — Т.3. — М.: Наука, 1966. — С.118—127. (A.Einstein // Ann. Phys. — 1906. — Vd.19. — S.371—381.)
502. Смолуховский М. Доступные наблюдению молекулярные явления, противоречащие обычной термодинамике (доклад на съезде в Мюнстере в 1912 г.) // Брауновское движение / Под ред. Б.И.Давыдова. — Л.:ОНТИ, 1936. — С.166—198. (M.Smoluchowski // Z. Phys. — 1912. — Vd.13. — S.1069—1079.)
503. Смолуховский М. Три доклада о диффузии, броуновском молекулярном движении и коагуляции коллоидных частиц (доклады сделаны в Геттингене 20—22 июня 1916 г.) / М.Смолуховский // Брауновское движение / Под ред. Б.И.Давыдова. — Л.:ОНТИ, 1936. — С.332—416. (M.Smoluchowski // Z. Phys. — 1916. — Vd.17. — S.557—571, 585—599.)
504. Смолуховский М. Границы применимости второго начала теории теплоты (доклад в Геттингене в 1913 г.) / М.Смолуховский // Брауновское движение / Под ред. Б.И.Давыдова. — Л.:ОНТИ, 1936. — С.199—204. (M.Smoluchowski // Z. Phys. — 1913. — 14. — S.261—262.)
505. Смолуховский М. Молекулярная статистика эмульсий и ее связь с броуновским движением / М. Смолуховский // Брауновское движение /Под ред.Б.И. Давыдова. — Л.:ОНТИ, 1936. — С.226—255. (M.Smoluchowski // Sitz. — Ber. Ak. d. Wissensch. Wien (II a). — 1914. — T.123. — S.2381—2405.)
506. Смолуховский М. Несколько примеров броуновского молекулярного движения под действием внешних сил / М. Смолуховский // Брауновское движение / Под ред.Б.И.Давыдова. — Л.:ОНТИ, 1936. — С.205—225. (M.Smoluchovski // Bull. intern. de l'Ac.de Scienc. de Cracovie (A). — 1913. — P.418—434.)
507. Смолуховский М. Броуновское молекулярное движение под действием внешних сил и его связь с обобщенным уравнением диффузии / М.Смолуховский // Брауновское движение / Под ред. Б.И.Давыдова. — Л.:ОНТИ,1936. — С.319—331. (M.Smoluchovski // Ann. Phys. — 1915. — T.48. — S.1103—1112.)
508. Шиллер Н.Н. О втором законе термодинамики и об одной его новой формулировке / Н.Н. Шиллер // Отчеты и протоколы физ. — мат. об-ва при ун-те Св. Владимира. —1897. — С.1
509. Шиллер Н.Н. Основные законы термодинамики / Н.Н. Шиллер // Обзоры заседаний секции физики на XI съезде русских естествоиспытателей и врачей. — Киев, 1903. — С.195.

510. Шиллер Н.Н. Конспект по термодинамике. Литографированное издание / Н.Н. Шиллер. — Харьков, 1905
511. Шиллер Н.Н. Замечания о втором законе термодинамики / Н.Н. Шиллер. — М., 1910. — Отд. оттиск.
512. Шиллер Н.Н. // Отчеты и протоколы физ.-мат. об-ва при ун-те Св. Владимира. — 1899. — С.8.
513. Ehrenfest P. Begriffliche Grundlagen der statistischen Auffassung in der Mechanik / P. Ehrenfest, T. Afanassjeva—Ehrenfest // Encyklopadie der mathematischen Wissenschaften". — V4. — P. 32. — Leipzig, 1911. — S.3—90.
514. Афанасьева—Эренфест Т.А. // Журн. Рус. физ. — хим. об-ва. Ч. физ. — 1908. — Т.40, вып 8. — С.277.
515. Афанасьева—Эренфест Т.А. Необратимость, односторонность и II начало термодинамики / Афанасьева—Эренфест Т.А. // Журн. прикл. физики. — 1928. — Т. 5, вып 3—4. — С.3—30.
516. Пирогов Н.Н. Применимость II начала термодинамики к системам, на которые действуют внешние силы / Н.Н. Пирогов // Журн. Рус. физ.-хим. об-ва. Ч. Физ. — 1887. — Т.19, вып.4. — С.100—120.
517. Пирогов Н.Н. // Журн. Рус. физ.-хим. об-ва. Ч. Физ. — 1887. — Т.19, вып. 5. — С.157—176.
518. Пирогов Н.Н. О законе Больцмана / Н.Н. Пирогов // Журн. Рус. физ.-хим. об-ва. Ч. Физ. — 1890. — Т.22. — С.44.
519. Пирогов Н.Н. Основание термодинамики / Н.Н. Пирогов // Журн. Рус. физ. — хим. об-ва. Ч. Физ. — 1890. — Т.22, вып.5. — С.173.
520. Ursell H.D. // Proc. Cambridge Phil. Soc. — 1928. — V.23 — P.685.
521. Mayer J.E. // Journ. Chem. Phys. — 1937. — V5. — P.67.
522. Yvon J. La Theorie Statistique des Fluides et l'Equation d'Etat / J. Yvon // Adualites scientifiques et industrielles. — NO.203. — Paris, 1935.
523. Yvon J. Fluctuations en Densite / J. Yvon. — Paris: Hermann, 1937. — 62 p.
524. Born M., Green H.S. // Proc. Roy. Soc. (London). — 1946. — A188. — P.19; 1947. — A189. — P.103; 1947. — A190. — P.445; 1947. — A191. — P.168, // 1948. — A192. — P.166.
525. Born M. A General Kinetic Theory of Liques / M. Born, H.S. Green. — Cambridge, 1949.
526. Kirkwood J.G. The statistical mechanical theory of transport processes/ J.G. Kirkwood // Journ. Chem. Phys. — 1941. — V.9. — P.514; Journ. Chem. Phys. — 1942. — V.10. — P.394; Journ. Chem. Phys. — 1946. — V.14. — P.180—201.; Journ. Chem. Phys. — 1947. — V.15. — P.71—91.
527. Mayer J.G. // Journ. Chem. Phys. — 1947. — V.15. — P.187.
528. Крылов Н.С. Работы по обоснованию статистической физики / Н.С. Крылов. — М.-Л. Изд-во АН СССР, 1950. — 208 с.
529. Onsager L. // Phys. Rev. — 1931. — V.37. — №4. — P.405; 1931. — V.38. — №12. — P.2265.
530. Casimir H.B.G. // Rev. Mod. Phys. — 1945. — V.17. — P.343.
531. Casimir H.B.G. // Philips Res. Rep. — 1945. — V.1. — P.185.

532. Meixner J. // *Ann. Phys.* — 1941. — V.39. — P.333; 1942. — V.41. — P.409; 1943. — V.43. — P.244.
533. Meixner J. // *Z. Phys.Chem.* — 1943. — B53. — S.235.
534. Prigogine I. *Etude thermodynamique des phénomènes irréversibles* / I. Prigogine. — Liég: Desoer, 1947. — 148 с.
535. Ахиезер А.И. Учитель и друг / А.И.Ахиезер // *Воспоминания о Л.Д. Ландау.* — М.:Наука, 1988. — 352 с.
536. Гинзбург В.Л. Замечательный физик / В.Л. Гинзбург // *Воспоминания о Л. Д. Ландау.* — М.: Наука, 1988. — 352 с.
537. Ахиезер А.И. Харьковская школа теоретической физики / А.И. Ахиезер // *Укр. физ. журн.* — 1985. — V30. — №5. — С.645—661.
538. Ландау Л.Д. *Собрание трудов* / Л.Д.Ландау. — М:Наука, 1969. — 2 т.
539. Ландау Л.Д. К теории фазовых переходов. II / Л.Д. Ландау // *Журн. эксперим. и теорет. физики.* — 1937. — 7. — С.627
540. Ландау Л.Д. К теории аномалий теплоемкости / Ландау Л.Д. // *Z. Phys. Sow.* — 1935. — V8. — S.113
541. Ландау Л.Д. Кинетическое уравнение в случае кулоновского взаимодействия/ Ландау Л.Д. // *Журн. эксперим. и теорет. физики.* — 1937. — V.7. — С.203.
542. Ландау Л.Д. О колебаниях электронной плазмы / Л.Д.Ландау // *Журн. эксперим. и теорет. физики.* — 1946. — Т.16. — С.574—586.
543. Власов А.А. О вибрационных свойствах электронного газа / А.А. Власов // *Журн. эксперим. и теорет. физики.* — 1938. — Т.8. — С.291—318.
544. Ахиезер А.И. О взаимодействии пучка зряженных частиц с электронной плазмой / А.И.Ахиезер, Я.Б. Файнберг // *Докл. АН СССР.* — 1949. — Т.69. — С.555—556.
545. Ландау Л.Д. К статистической теории ядер / Ландау Л.Д. // *Журн. эксперим. и теорет. физики.* — 1937. — Т.7. — С.819
546. Лифшиц Е.М. Лев Давидович Ландау / Е.М. Лифшиц // *Воспоминания о Л. Д. Ландау.* — М.: Наука, 1988. — 352 с.
547. Халатников И.М. Как создавалась школа Ландау / И.М.Халатников // *Воспоминания о Л.Д. Ландау.* — М.: Наука, 1988. — 352 с.
548. Особова справа доктора фізико-математичних наук В.Л.Германа за 1962—1964 рр. // *Архів Ін-ту радіофізики та електроніки НАН України.* — Ф.1. — Оп. №2. — Од.зб.№114.
549. Герман В.Л. О поляризации и интенсивности света, рассеянного вблизи квадрупольной линии / В.Л.Герман // *Журн. эксперим. и теорет. физики.* — 1939. — №9, вып.12. — С.1415—1424.
550. Герман В.Л. Поляризация света, рассеянного возбужденными атомами / В.Л.Герман // *Докл. АН СССР.* — 1944. — Т.42. — №4. — С.168—171.
551. Герман В.Л. Об интеркомбинационных переходах в спектрах сложных молекул / В.Л.Герман // *Докл. АН СССР.* — 1945. — Т.48. — С.260—263.
552. Герман В.Л. Некоторые теоремы об анизотропных средах / В.Л.Герман // *Докл. АН СССР.* — 1945. — Т.48. — №2 — С.95—98.

553. Герман В.Л. О возможном объяснении эффекта Бриджмена – повышения прочности всесторонним равномерным давлением / В.Л.Герман // Докл. АН СССР. — 1946. — Т.51. — №9. — С.671–674.
554. Герман В.Л. До гідродинаміки кавітаційної рідини / В.Л.Герман, М.Я. Азбель // Доп. АН УРСР. — 1954. — №2. — С.115–118.
555. Герман В.Л. К гидро- и газодинамической теории смазки / В.Л.Герман, И. Е. Тарапов // Ученые записки Харьков. ун-та. — 1957. — Т.25. — С.101–106.
556. Усиков О. Я. Дослідження вбирання та розсіювання міліметрових хвиль в опадах / О.Я.Усиков, Л.В.Герман, І.Х. Ваксер // Український фізичний журнал. — 1961. — Т.6, № 5. — С. 618–641.
557. Боголюбов Н.Н. Sur l'approximation des fonctions par les sommes trigonometriques / Н.Н.Боголюбов // Докл. АН СССР. А. — 1930. — №6. — С. 147–152.
558. Боголюбов Н.Н. Sur l'approximation trigonometrique des fonctions dans l'intervalle infini / Н.Н. Боголюбов // Изв. АН СССР. — 1931. — №1/2. — С.23–54; 149–160.
559. Крилов М.М. Загальна теорія міри в нелінійній механіці / М.М.Крилов, М.М.Боголюбов// Зб. праць з нелінійної механіки. — К.: Вид—во АН УРСР, 1937. — С.55—122.
560. Боголюбов М.М. Про деякі ергодичні властивості суцільних груп перетворень / М.М. Боголюбов // Наук. зап. Київ. держ. ун-ту. — 1939. — Т.4, вип. 5. — С.45–52.
561. Боголюбов М.М. Про рівняння Фоккера-Планка, що виводяться в теорії пертурбацій методом, оснований на спектральних властивостях пертурбаційного гамільтоніана / М.М.Боголюбов, М.М. Крилов // Зап. кафедри мат. фізики Ін-ту буд. механіки АН УРСР. — 1939. — Т.4. — С.5—80.
562. Крилов М.М. Наслідки дії статистичної зміни параметрів на рух динамічних консервативних систем протягом досить тривалих періодів часу / М.М. Боголюбов, М.М. Крилов // Зб. праць з нелінійної механіки. — К.: Вид-во АН УРСР, 1937. — С. 119—135.
563. Крилов М.М. Про деякі проблеми ергодичної теорії стохастичних систем / М.М.Боголюбов, М.М. Крилов // Зап. кафедри мат. фізики Ін-ту буд. механіки АН УРСР. — Київ: АН УРСР. — 1939. — С.243—287.
564. Крылов Н.Н. Инвариантные и транзитивные меры в нелинейной механике / Н.Н.Крылов, Н.Н.Боголюбов // Мат. сборник. — 1936. — С.707—711.
565. Крылов Н.Н. La theorie generale de la mesure dans son application a letude des systems de la mecanique non linearic / Н.Н.Крылов, Н.Н.Боголюбов // Ann. Math. — 1937. — Т.38. — Р.65.
566. Боголюбов Н.Н. О некоторых статистических методах в математической физике / Н.Н.Боголюбов. — Киев: АН УССР, 1945. — 139 с.
567. Боголюбов М.М. Про рівняння Фоккера-Планка, що виводяться в теорії пертурбацій методом, оснований на спектральних властивостях пертурбаційного гамільтоніана / М.М.Боголюбов, М.М. Крилов // Зап. кафедри мат. фізики Ін-ту буд. механіки АН УРСР. — 1939. — Т.4. — С.5—80.

568. Пригожин И. Неравновесная статистическая механика / И.Пригожин. — М.: Мир, 1964. — 314 с.
569. Van Hove L. // *Physica*. — 1955. — Т.21. — P.512.
570. Боголюбов Н.Н. О некоторых математических вопросах теории статистического равновесия / Н.Н.Боголюбов, Б.И.Хацет // Докл. АН СССР. — 1949. — Т.66. — №3. — С. 321—324.
571. Боголюбов Н.Н. Математическое описание равновесного состояния классических систем, основанное на каноническом формализме / Н.Н.Боголюбов, Д. Я.Петрина, Б.И. Хацет // Теорет. и мат. физика. — 1969. — Т.1. — №2. — С.251—274.
572. Боголюбов Н.Н. Кинетические уравнения в квантовой механике / Н.Н. Боголюбов, К.П.Гуров // Журн. эксперим. и теорет. физики. — 1947. — Т.17, вып.7. — С.614—628.
573. Гуров К.П. Основания кинетической теории. Метод М.М.Боголюбова / К. П.Гуров. — М.:Наука, 1966. — 351 с.
574. Толмачев В.В. О новом методе в теории сверхпроводимости. 2. / В.В. Толмачев, С.В. Тябликов // Журн. эксперим. и теорет. физики. — 1958. — Т.34. — Вып.1. — С.66—72.
575. Боголюбов Н.Н. Волновая функция системы взаимодействующих бозе-частиц / Н.Н.Боголюбов, Д.Н.Зубарев. // Журн. эксперим. и теорет. физики. — 1958. — Т.28. — Вып.2. — С.129—139.
576. Боголюбов Н.Н. К теории сверхтекучести / Н.Н. Боголюбов // Изв. АН СССР. Сер. Физика. — 1947. — Т.11. — №1. — С.77—90.
577. Боголюбов Н.Н. Энергетические уровни неидеального бозе—эйнштейновского газа / Н.Н. Боголюбов // Вестн. Моск. ун-та. — 1947. — Т.7. — С. 43—56.
578. Капица П.Л. Вязкость жидкого гелия ниже  $\lambda$ —точки / П.Л. Капица // Докл.АН СССР. — 1938. — Т.18. — С.21—27.
579. Kapitza P. Viscosity of Liquid Helium below the  $\lambda$ —point / Kapitza P. // *Nature*. — 1938. — V.141. — P.74.
580. Allen J.F. Flow of Liquid Helium II / J.F.Allen, A.D.Missener // *Nature*. — 1938. — V.141. — P.75.
581. Капица П.Л. Проблемы жидкого гелия. (Докл. на общем собрании АН СССР 28 декабря 1940 г.) / П.Л.Капица // Эксперимент, теория, практика. — М. : Наука, 1974. — 288 с.
582. Tisza J.W // *Nature*. — 1938. — V.141. — P.913.
583. London H. // *Proc. Roy.Soc. A*. — 1939. — V.171. — P.484.
584. Ландау Л.Д. Теория сверхтекучести гелия II / Л.Д. Ландау // Журн. эксперим. и теорет. физики. — 1941. — Т.11, вып.6. — С.592—614.
585. Fyınman R.P. Application of Quantum Mechanics to Liquid Helium / R.P. Fyınman // *Progress in Low Temperature Physic: in 6 vols / editor C.J.Gorter*.— Amsterdam: North—Holland, 1955. — V.1. — P.17—53.
586. Фейнман Р. Статистическая механика / Р.Фейнман. — М.: Мир, 1975. — 412 с.

587. Боголюбов Н.Н. Кинетические уравнения в теории сверхтекучести / Н.Н. Боголюбов // Журн. эксперим. и теорет. физики. — 1948. — Т.18, вып. 7. — С.622—630.

588. Боголюбов Н.Н. К вопросу о гидродинамике сверхтекучей жидкости / Н.Н. Боголюбов — Дубна:ОИЯИ,1963. — Препринт ОИЯИ Р—1395.

589. Боголюбов Н.Н. Кинетические уравнения в квантовой механике / Н.Н. Боголюбов, К.П. Гуров // Журн. эксперим. и теорет. физики. — 1947. — Т.17, вып.7. — С.614—628.

590. Боголюбов Н.Н. Метод теории возмущений вырожденного уровня в полярной модели металла / Н.Н.Боголюбов, С.В.Тябликов // Вестн. Моск. ун-та. — 1949. — №3. — С.35—48.

591. Боголюбов Н.Н. Об одном применении теории возмущений к полярной модели металла / Н.Н.Боголюбов, С.В. Тябликов // Журн. эксперим. и теорет. физики. — 1949. — Т.19, вып.3. — С.251—255.

592. Боголюбов Н.Н. Приближенный метод нахождения низших энергетических уровней электронов в металлах / Н.Н.Боголюбов, С.В.Тябликов // Журн. эксперим. и теорет. физики. — 1949. — Т.19, вып.3. — С.256—258.

593. Боголюбов Н.Н. Лекции по квантовой статистике. Вопросы статистической механики квантовых систем / Н.Н.Боголюбов. — К.: Рад. школа, 1949. — 228 с.

594. Бонч-Бруевич В.Л. Метод функций Грина в статистической механике / В.Л.Бонч-Бруевич, С.В.Тябликов. — М.Физматгиз, 1961. — 312 с.

595. Боголюбов Н.Н. Асимптотически точное решение для модельного гамильтониана теории сверхпроводимости / М.М.Боголюбов, Д.Н.Зубарев, Ю.А. Церковников // Журн. эксперим. и теорет. физики. — 1960. — Т.39, вып.1(7). — С. 120—129.

596. Беляев С.Т. Энергетический спектр неидеального бозе-газа / С.Т.Беляев // Журн. эксперим. и теорет. физики. — 1958. — Т.34. — С.433—446.

597. Особова справа академіка НАН України Данилова Віталія Івановича // Архів Президії НАН України. — Ф.251. — Оп.2. — Спр.№ 256.

598. В.И.Данилов (1902—1954): Некролог // Проблемы металловедения и физики металлов. — 1955. — Сб.4. — С.7—12.

599. В.И.Данилов: Некролог // Сб. науч. тр. Лаборатории металлофизики АН УССР. — 1954. — №5. — С.3—9.

600. Відкриття меморіальної дошки на честь академіка НАН України В.І. Данилова // Вісник АН УРСР. — 1983. — №6. — С.97.

601. Центральний державний архів виконавчих органів вищої влади та управління України. — Ф.806. — Оп.1., т.1. — Од.зб.1512.

602. Радченко И.В. О В.И. Данилове и начале физических исследований в Днепропетровске / И.В.Радченко // Архів Музею історії Дніпропетровського національного університету.

603. Данилов В.И. Применение рентгеновских лучей к исследованию жидкого состояния / В.И.Данилов // Рентгенография в применении к исследованию материалов. — М.;Л.: ОНТИ, 1936. — С.82. — 102.

604. Данилов В.И. О структуре жидкой ртути вблизи точки кристаллизации / В.И.Данилов, В.Е. Неймарк // Журн. Эксперим. и Теорет. Физики. — 1935. — Т5, вып. 8. — С.724—728.

605. Данилов В.И. Кристаллизация пиперина в ультразвуковом поле / В.И. Данилов, Е.Е.Плужник, В.М. Теверовский // Журн. экспер и теорет. физики. — 1939. — Т9., вып.1. — С.66—67.

606. Данилов В.И. Рассеяние рентгеновских лучей в жидкостях / В.И.Данилов. — М.:Л.: ОНТИ, 1935. — 140 с.

607. Данилов В.И. О структуре жидких металлов вблизи точки кристаллизации / В.И.Данилов, И.В. Радченко // Журн. эксперим. и теорет. физики. — 1937. — Т.7, вып.9/10. — С.1153—1157.

608. Данилов В.И. Рассеяние рентгеновских лучей в жидких эктевтических сплавах / В.И.Данилов, И.В. Радченко // Журн. эксперим. и теорет. физики. — 1937. — Т.7, вып.9/10. — С.1158—1160.

609. Спогади канд. фіз.-мат. наук В.Є.Неймарка // Архів Музею історії Дніпропетровського національного університету.

610. Спогади докт. фіз.-мат. наук, професорки Д.С.Каменецької // Архів Музею історії Дніпропетровського національного університету.

611. Лифшиц И.М. К теории регулярных возмущений / И.М.Лифшиц // Докл. АН СССР. — 1945. — Т.48. — С.83—86.

612. Лифшиц И.М. О макроскопическом описании явления двойникования кристаллов / И.М.Лифшиц // Журн. эксперим. и теорет. физики. — 1948. — Т.18. — С.1134—1142.

613. Лифшиц И.М. Несколько соображений о двойниковании кальцита / И.М. Лифшиц, И.В. Обреимов // Изв. АН СССР, сер. Физ. — 1948. — Т.12. — С.65—68.

614. Лифшиц И.М. Гальваномагнитные характеристики металлов с открытыми поверхностями Ферми. II. / И.М.Лифшиц, В.Г.Песчанский // Журн. эксперим. и теорет. физики. — 1960. — Т.38. — С.188—200.

615. Лифшиц И.М. О тепловых свойствах цепных и слоистых структур при низких температурах / И.М.Лифшиц // Журн. эксперим. и теорет. физики. — 1952. — Т.22. — С.475—484.

616 Лифшиц И.М. О теплоемкости тонких пленок и игл при низких температурах / И.М.Лифшиц // Журн. эксперим. и теорет. физики. — 1952. — Т.22. — С.471—475.

617. Лифшиц И.М. О структуре энергетического спектра и квантовых состояний неупорядоченных конденсированных систем / И.М.Лифшиц // Успехи физ. наук. — 1964. — Т.83. — С.617—658.

618. Лифшиц И.М. О структуре энергетического спектра примесных зон в неупорядоченных твердых растворах / И.М.Лифшиц // Журн. эксперим. и теорет. физики — 1963. — Т.44, вып.5. — С.1723—1744.

619. Лифшиц И.М. Введение в теорию неупорядоченных систем / И.М. Лифшиц, С.А.Гредескул, Л.А.Пастур. — М.:Наука, 1982. — 360 с.

620. Юхновский И.Р. Применение коллективных переменных и учет короткодействующих сил в теории систем заряженных частиц / И.Р.Юхновский // Журн. эксперим. и теорет. физики . — 1958. — Т.34, вып.2. — С.379—389.



621. Юхновський І.Р. Статистичний оператор та колективні змінні. I. перетворення зміщення / І.Р. Юхновський // Укр. фіз. журн. — 1964. — Т.9. — №7. — С.702—714.
622. Юхновский И.Р. Метод смещений и коллективных переменных / И.Р. Юхновский, М.В. Ваврух // Материалы II Всесоюзного совещания по статистической физике. — Киев, 1971. — Препринт ИТФ—71—32Р. — С.10—13.
623. Bohm D., General theory of collective coordinates / D.Bohm // The Many Body Problem, Les Houches. — Session 1958. — N.Y.: John Wiley & Sons, Inc., 1958. — P. 401.
624. Yevick G.J., Perkus J.K. // Phys. Rev. — 1956. — V.101. — P.1186—1192.
625. Боголюбов Н.Н., Зубарев Д.Н. // Журн. эксперим. и теорет. физики. — 1955. — Т.28. — С.129.
626. Зубарев Д.Н. // Докл. АН СССР. — 1954. — Т.95. — С.757.
627. Р.Л.Стратонович // Докл. АН СССР. — 1957. — Т.115. — С.1097.
628. J.Hubbard // Phys.Rev.Lett. — 1959. — Т.3. — P.77.
629. Юхновский И.Р. Фазовые переходы второго рода. Метод коллективных переменных / И.Р.Юхновский. — К.: Наук. думка, 1985. — 252 с.
630. Формули життя і творчості академіка Юхновського: Есе, інтерв'ю, хроніка / За ред. В.Й.Здоровага. — Львів., 2000. — 160 с.
631. Юхновский И.Р. Обоснование формы базисного распределения вблизи точки фазового перехода в модели Изинга / И.Р.Юхновский, Ю.К. Рудаковский // Докл АН СССР. — 1977. — Т.233. — №4. — С.597—582.
632. Пелетминский С.В. Метод асимптотических операторов в статистической механике. I. / С.В.Пелетминский, В.И.Приходько // Теорет. и мат. физика, 1972. — Т.12. — №1. — С.88—103.
633. Пелетминский С.В. Метод асимптотических операторов в статистической механике. II. / С.В.Пелетминский, В.И. Приходько // Теорет. и мат. физика, 1972. — Т.12. — №2. — С.283—291.
634. Ласкин Н.В. Статистическая механика систем в случайных полях / Н.В. Ласкин, С.В.Пелетминский, В.И.Приходько. — Киев, 1977. — 36 с. — (Препринт ИТФ 77—133Р).
635. Пелетминский С.В. К квантовой теории кинетических и релаксационных процессов / С.В.Пелетминский, А.А. Яценко // Теорет. и мат. физика, 1967. — Т.53. — вып.4(10). — С.1327—1335.
636. Вирченко Ю.П., Пелетминский С.В. Квантовые вириальные разложения в теории кинетических уравнений / Ю.П.Вирченко, С.В.Пелетминский // Теорет. и мат. физика, 1976. — Т.27. — №1. — С. 94—101.
637. Пелетминский С.В. Низкочастотная асимптотика электродинамических функций Грина / С.В.Пелетминский, В.С.Щелоков // Теорет. и мат. физика, 1975. — Т.25. — №1. — С.71—80.
638. Пелетминский С.В. Низкочастотная асимптотика функций Грина в методе сокращенного описания / С.В.Пелетминский, А.И.Соколовский, В.С. Щелоков. — Препринт ИТФ. — 75—129Р. — К., 1975. — 21 с.
639. Пелетминский С.В. Уравнение гидродинамики сверхтекучей бозе—жидкости в модели со слабым взаимодействием / С.В.Пелетминский, А.И.

Соколовский, В.С.Щелоков. — Киев, 1975. — 33 с. — (Препринт ИТФ—75—130Р).

640. Вирченко Ю.П. Неравновесная энтропия системы взаимодействующих частиц в приближении малой плотности / Ю.П.Вирченко, С.В.Пелетминский. — К., 1976. — 26с. — (Препр. / АН УССР. Ин-т теор. физики; ИТФ—76—140 Р).

641. Пелетминский С.В. К вопросу о построении неравновесной энтропии / С. В.Пелетминский, А.И. Соколовский // Теорет. и мат. физика . — 1974. — Т.20. — №1. — С.85—94.

642. Пелетминский С.В. Неравновесная энтропия и определение произведения обобщенных функций / С.В.Пелетминский, А.И. Соколовский // Теорет. и мат. физика — 1974. — Т.20. — №3. — С.381—389.

643. Пелетминский С.В. Метод производящего функционала для спиновых переменных / С.В.Пелетминский, А.А.Яценко. — К., 1972. — 23 с. — (Препр. / АН УССР. Ин-т теор. физики; ИТФ—72—30 Р).

644. Красильников В.В. Кинетические уравнения для электронов и статических примесных центров / В.В.Красильников, С.В.Пелетминский, А.А. Яценко. — Харьков, 1979. — 19 с. — (Препр. ХФТИ АН УССР. 79—5.).

645. Пелетминский С.В. К теории сверхтекучей ферми—жидкости / С.В. Пелетминский, В.В.Красильников, А.А.Яценко, А.А. Рожков // Физика элемент. частиц и атомн. ядра. — 1988. — Т.19, вып. 6. — №4. — С.1440—1466.

646. Ахиезер А.И. О ферми-жидкостной модели сверхпроводимости при наличии связанных состояний фермионов / А.И.Ахиезер, С.В.Пелетминский, А.А. Яценко. — Киев, 1990. — 9 с. — (Препр. АН УССР. — Ин-т теор. физики. — ИТФ — 90—28 Е).

647. Ахиезер А.И. Поля и фундаментальные взаимодействия / А.И.Ахиезер, С. В. Пелетминский — К: Наук. думка, 1986. — 552 с.

648. Ахиезер А.И. Теория фундаментальных взаимодействий / А.И.Ахиезер, С. В.Пелетминский. — К: Наук. думка, 1993. — 570 с.

649. Герасименко В.І., Загородній А.Г. Дмитро Якович Петрина / В.І. Герасименко, А.Г. Загородній // Збірник праць Інституту математики НАН України. — 2007. — Т.4. — №3. — С.7—8.

650. Petrina D.Ya. Stochastic Dynamics and Boltzmann Hierarchy / D.Ya.Petrina — Proceedings of Institute of Mathematics of NAS of Ukraine. Mathematics and Applications. — 2008. — Vol. 74. — 400 p.

651. Петрина Д.Я. О решениях кинетических уравнений Боголюбова. Квантовая статистика / Д.Я.Петрина // Теорет. и мат. физика. — 1972. — Т.13, №3. — С. 391—405.

652. Petrina D.Ya. Mathematical foundations of quantum statistical mechanics / D. Ya.Petrina. — Kluwer Acad.Publ. — 1995. — 461 с.

653. Петрина Д.Я., Герасименко В.И., Малышев П.В. Математические основы классической статистической механики / Д.Я.Петрина, В.И.Герасименко, П.В. Малышев. — К: Наук. думка, 1985. — 264 с. (Переклад : Petrina D.Ya. Mathematical foundations of classical statistical mechanics / D.Ya.Petrina, V.I.Gerasimenko, P.V. Malyshev. — London: Gordon and Breach. — 1989. — 356 p.; Друге видання: Petrina D .Ya. Mathematical Foundations of Classical Statistical Mechanics. Continuous systems / D .Ya.Petrina, V.I.Gerasimenko, P.V.Malyshev. — London and N.Y.: Taylor and Francis

Sci. Publ., Second ed. —2002. — 352 p.)

654. Cercignani C., Gerasimenko V., Petrina D.Ya. Many-particle Dynamics and Kinetic Equations / C.Cercignani, V.Gerasimenko, D.Ya Petrina, Kluver Acad. Publ. – Plenum Publ. — 1997. — 252 p.

655. Герасименко В.И., Петрина Д.Я. Эволюция состояний бесконечных систем классической статистической механики / В.И.Герасименко, Д.Я. Петрина // Успехи мат. наук. — 1983. — Т.38. — №5. — С.3—58.

656. Петрина Д.Я., Герасименко В.И. Математические проблемы статистической механической системы упругих шаров / Д.Я.Петрина, В.И. Герасименко // Успехи мат. наук. — 1990. — Т.45, № 3. — С. 135—182.

657. Петрина Д.Я., Эволюция состояния бесконечных систем классической статистической механики / Д. Я.Петрина, В.И. Герасименко // Сов. науч. обзоры. Сер. С.: Математ. физика — 1985. —Т.5. — С. 1—51. (на англ. яз.).

658. Петрина Д.Я. Термодинамический предел для решений уравнений Боголюбова / Д.Я.Петрина, В.И.Герасименко, П.В. Малышев // Сов. Науч. Обзоры. Сер. С.: Математ. физика. — 1988. — Т.7. — С. 281—337. (на англ. яз).

659. Gerasimenko V.I. The generalized kinetic equation generated by the BBGKY hierarchy / V.I.Gerasimenko, D.Ya. Petrina // Укр. физ. журн. — 1998. — Т.43 — №6/7. — P. 697—702.

660. Петрина Д.Я. Уравнения для коэффициентных функций матрицы рассеяния / Д.Я.Петрина, С.С.Иванов, А.Л.Ребенко. — М.: Наука, 1979. — 296 с.

661. Петрина Д.Я. S-матрица в конструктивной теории поля / Д.Я.Петрина, С. С.Иванов, А.Л. Ребенко // Физика элемент. частиц и атомн. ядра. — 1976. — Т.7, вып. 3. — С. 647—686.

662. Петрина Д.Я. Уравнение Кирквуда—Зальцбурга для коэффициентных функций матрицы рассеяния / Д.Я.Петрина, В.И. Скрипник// Теорет. и мат. физика. — 1971. —Т.8. — №3. — С.369—380.

663. Петрина Д.Я. О модельном гамильтониане теории сверхпроводимости / Д .Я.Петрина, В.П.Яцишин // Теорет. и мат. физика. — 1972 . — Т.10. — №2. — С.283—300.

664. Петрина Д.Я. Задача Коши для кинетических уравнений Боголюбова / Д. Я.Петрина, А.К. Видыбида // Тр. Мат. ин—та АН СССР. — 1975. — Т.136. — С.370—378.

665. Петрина Д.Я. Математическое описание эволюции бесконечных систем классической статистической физики. Локально возмущенные одномерные системы / Д.Я. Петрина // Теорет. и мат. физика. — 1979. — Т.38, № 2. — С. 230—250.

666. Боголюбов Н.Н. Избранные труды. В 3-х т. / Н.Н.Боголюбов. — Киев: Наук.думка, 1969—1971.

667. Oppenheimer J.R. // Phys.Rev. — 1930. — V.35. — P.461,562,939.

668. Waller I. // Z. Phys. — 1930. — Bd.59. — S.168;.62. — S.673.

669. Euler E. // Ann. Phys. — 1936. — Bd.25. — P.398.

670. Weisscopf V.E. // Kgl. Danske.Vid. Selskab. — 1936. — V.14. — P.6.

671. Weisscopf V.E. // Kon. Dansk. Vid. Mat. — Fys. Medd. — 1936. — Bd.15. — №6. — S.5—6, 34.

672. Stuckelberg E.C. // Ann. Phys. — 1935. — Bd.21. — S.367.

673. Stueckelberg E.C. // *Helv. phys. acta.* 1938. — V.9. — P.225.
674. Lamb W., Retherford R. // *Phys. Rev.* — 1947. — V.72. — P.241.
675. Bethe H. // *Rev. Mod. Phys.* — 1947. — V.27. — P.253.
676. French J.B., Weiscopef V.F. // *Phys.Rev.* — 1949. — 75. — P.1240.
677. Kroll N.M., Lamb W.E. // *Phys.Rev.* — 1949. — 75. — P.338.
678. Томонага С. Развитие квантовой электродинамики / С.Томонага // *Успехи физ. наук.* — 1967. — Т.91. — С.61.
679. Swinger J. // *Phys.Rev.* — 1948. — Т.74. — P.1439.; 1951. — Т.82. — P.914. (рус. перевод в сборнике // *Новейшее развитие квантовой электродинамики.* — М.: Изд—во иностр. лит., 1954. — С.115.)
680. Swinger J.W. *Selected Papers on Quantum Electrodynamics* / J.Swinger — Dover, 1958.
681. Schwinger J.W. // *Phys.Rev.* — 1948. — V.74. — P.146; 1949. — V.75. — P.651; 1949. — V.76. — P.790; 1951. — V.82. — P.664, 914; 1953. — V.91. — P.713; *Proc. Nat. Acad. Sci.* — 1951. — V.37. — P.452.
682. Feynman R.P. // *Rev. Mod. Phys.* — 1948. — V.20. — P.367; *Phys. Rev.* — 1948. — V.74. — P.939, 1430; 1949. — V.76. — P.749, 769; *Phys. Rev.* — 1949. — V.76. — P.749, 769; 1950. — V.80. — P.440.
683. Dyson F. // *Phys. Rev.* — 1949. — V.75. — P.486, 1736.
684. Tomonaga S. // *Proc. Theor. Phys.* — 1946. — V.1. — P.27.
685. Koba Z., Tomonaga S. // *Proc. Theor. Phys.* — 1948. — V.3. — P.290.
686. Kanazawa S., Tomonaga S. // *Proc. Theor. Phys.* — 1948. — V.3. — P.276.
687. Koba Z., Tati T., Tomonaga S. // *Proc. Theor. Phys.* — 1947. — V.2. — P.101.
688. Heisenberg W. Die "Beobachtbaren Grossen" in der Theorie der Elementarteilchen // *Z.Phys.* — 1943. — V.120. — S.513.
689. Wightman A.S. Fields as operator-valued distributions in relativistic quantum field theory / A.S.Wightman, L.Garding. // *Ark.f.Fys.* — 1964. — V.28. — P.129.
690. Боголюбов Н.Н. К вопросу об основных уравнениях релятивистской квантовой теории поля / Н.Н. Боголюбов // *Докл. АН СССР.* — 1951. — Т.81. — №5. — С.757—760.
691. Боголюбов Н.Н. Об одном классе основных уравнений релятивистской квантовой теории поля / Н.Н.Боголюбов // *Докл. АН СССР.* — 1951. — Т.81. — №6. — С.1015—1018.
692. Боголюбов Н.Н. Уравнения в вариациях квантовой теории поля / Н.Н. Боголюбов // *Докл. АН СССР.* — 1952. — Т.82. — №2. — С.217—220.
693. Боголюбов Н.Н. Условие причинности в квантовой теории поля / Н.Н. Боголюбов // *Изв. АН СССР.* — сер. физ. — 1955. — Т.19. — №2. — С.237—246.
694. Боголюбов Н.Н. Вопросы квантовой теории поля / Н.Н.Боголюбов, Д.В. Ширков // *Успехи физ. наук.* — 1955, вып.2. — С.149—214.
695. Боголюбов Н.Н. Введение в теорию квантованных полей / Н.Н.Боголюбов, Д.В.Ширков. — М.:Физматгиз, 1957. — 442 с.
696. Боголюбов Н.Н. Основы аксиоматического подхода в квантовой теории поля / Н.Н.Боголюбов, А.А.Логунов, И.Т.Тодоров. — М.: Наука, 1969. — 424 с.
697. Stueckelberg E.C.G. Relativistic quantum theory for finite time intervals / E.C. G. Stueckelberg // *Phys. Rev.* — 1951. — V.81. — P.130.

698. Stueckelberg E.C.G. / E.C.G.Stueckelberg, D. Rivier Causalite et structure de la Matrice S // *Helv. phys. acta.* — 1950. — V.23. — P.215.
699. Stueckelberg E.C.G., Green J. // *Helv. Phys. Acta.* — 1951. — V.24. — P.153.
700. Медведев Б.В. Степени роста матричных элементов в аксиоматическом методе / Б.В.Медведев, М.К. Поливанов // *Журн. эксперим. и теорет. физики.* — 1961. — Т.41. — С.1130.
701. Медведев Б.В. К аксиоматическому построению матрицы рассеяния. Т.1. / Б.В.Медведев, М.К. Поливанов — Дубна, 1964 — С.77—139.
702. Боголюбов Н.Н. К теории умножения причинных сингулярных функций / Н.Н.Боголюбов, О.С. Парасюк // *Докл. АН СССР.* — 1955. — Т.100. — №1. — С.25—28.
703. Боголюбов Н.Н. О вычитательном формализме при умножении причинных сингулярных функций / Н.Н.Боголюбов, О.С. Парасюк // *Докл. АН СССР.* — 1955. — Т.100. — №3. — С.429—432.
704. Bogoliubov N.N. Uber die Multiplication der Kausalfunktionen in der Quantentheorie der Felder / Bogoliubov N.N., O.S.Parasiuc. // *Acta Mathematica.* — 1957. — 97. — P.227.
705. Ферми Э. . Научные труды: в 2-х т. / Э. Ферми. Под общей редакцией Б. Понтекорво. Редакторы-составители: Б. Понтекорво и В. Н. Покровский. (Серия «Классики науки».) М: Наука, 1972.
706. Нишиджима К. Фундаментальные частицы / К.Нишиджима. — М.: Мир, 1965. — 462 с.
707. Gell-Mann M. The Eightfold Way / M.Gell-Mann, Y.Ne'eman. — New York.: W.A.Benjamin, 1964. — 168 с.
708. Bjorken J.D., Glashow S.L. // *Phys. Lett.* — 1964. — V.11. — P.255.
709. Amati D. et al. // *Phys. Lett.* — 1964. — V.11. — P.190.
710. Maki Z., Ohnuki Y. // *Progr. Theor. Phys.* — 1964. — V.132. — P.144.
711. Hara Y. // *Phys. Rev. B.* — 1964. — V.134. — P.701.
712. Greenberg O., Messiah AML. Symmetryzation postulate and its experimental foundation // *Phys.rev. B.* — 1964. — V.136. — №1. — P.248—267. (Received 7 March 1963, reised manuscript received 10 June 1964).
713. Greenberg O. Selection rules for parafields and the absence of para particles in nature / O.Greenberg, AML. Messiah // *Phys. Rev. B.* — 1965. — V.138. — №5. — P. 1155. (Received 7 March 1963, reised manuscript received 2 September 1964).
714. Greenberg O. Spin and unitary-spin independence in a paraquark model of barions and mesons / O. Greenberg // *Phys. Rev. Lett.* — 1964. — V.13. — №20. — P. 598—602. (Received 27 October 1964).
715. Боголюбов Н.Н., Струминский Б.В., Тавхелидзе А.Н. К вопросу о составных моделях в теории элементарных частиц / Н.Н.Боголюбов, Б.В. Струминский, А.Н.Тавхелидзе. — Дубна, 1965. — Препринт ОИЯИ Д—1968. — 12 с.
716. Han M.Y., Nambu Y. Threetreplet model with double SU(3) Symmetry / M.Y. Han, Y. Nambu // *Phys. Rev. B.* — 1965. — V.139. — №4. — P.1006—1010. (Received 27 October 1964.)

717. Релятивистски инвариантные уравнения для составных частиц и формфакторы / Н.Н.Боголюбов, Нгуен Ван Хъеу, Д.Стоянов, Б.В.Струминский, А.Н.Тавхелидзе, В.П.Шелест — Препринт ОИЯИ. — Д—2075 ЛТФ . — Дубна, 1965.

718. Петрина Д.Я. О невозможности построения нелокальной теории поля с положительным спектром оператора энергии-импульса / Д.Я.Петрина // Укр.мат. журн. — 1961. — Т.13, № 4. — С. 109—111.

719. Петрина Д.Я. Представление Мандельстама и теорема непрерывности / Д. Я. Петрина // Журн. эксперим. и теорет. физики. — Т.1964. — Т.46, вып. 2. — С. 544—554.

720. Петрина Д. Я. Термодинамический предел в системах стат. механики с факторизованным взаимодействием / Д.Я.Петрина, Н.Н.(мл.)Боголюбов, А.М. Курбатов // В кн. "Советс. научн. обзоры", сер. С: мат. физ, 1980.

721. Petrina D.Ya. New Second Branch of Spectra of the BCS Hamiltonian and "Pseudo—Gap" / D.Ya. Petrina // Ukr. Math. J. — 2005 —Т,57, №11, — P. 1508—1534.

722. Петрина Д.Я. Аналитические свойства парциальных волн амплитуды рассеяния в теории возмущений / Д.Я.Петрина // Докл. АН СССР. — 1962. — Т.144, № 4. — С. 755—758.

723. Петрина Д.Я. Аналитические свойства амплитуды рассеяния на потенциале на первом „нефизическом” листе / Д.Я. Петрина // Журн. эксперим. и теорет. физики. — 1963. — Т.44, вып. 1. — С. 151—156.

724. Фущич В.И. Симметрия в задачах математической физики / В.И.Фущич // Теоретико—алгебраические исследования в математической физике. — К.: Ин-т математики АН УССР, 1982. — С. 6—27.

725. Фущич В.И., Никитин А.К. Симметрия уравнений Максвелла. — К: Наук. думка, 1893. — 220 с.

726. Фущич В.И. О релятивистском инвариантном массовом операторе / В.И. Фущич // Укр. физ. журн. — 1968. — 13. — №3. — С.363—372.

727. Фущич В.И. О некоторых точных решениях нелинейных уравнений Даламбера, Лиувилля, Дирака и уравнения Эйконала / В.И.Фущич // Теоретико-групповые методы в физике. — М.: Наука, 1983. — Т.2. —С. 407—414.

728. Фущич В.И. Симметричный анализ и точные решения нелинейных уравнений математической физики / В.И.Фущич, В.М.Штеленъ, М.И.Серов. — К:Наук. думка, 1986. — 321 с.

729. Фущич В.И., Никитин А.К. Симметрия уравнений квантовой механики / В.И.Фущич, А.К.Никитин. — М.: Наука, 1990. — 400 с.

730. Шелест В.П. Модели сильно взаимодействующих элементарных частиц / В.П.Шелест, Г.М.Зиновьев, В.А.Миранский. — Т.1—2. — М.:Атомиздат. — 1973—1976.

731. Шелест В.П. Лекции о структуре и свойствах адронов / В.П.Шелест. — М.: Атомиздат. — 1976. — 248 с.

732. Шелест В.П. Новый круг: Структура элементарных частиц / В.П.Шелест. — М.:Атомиздат. — 1978. — 144с.

733. Кобушкин А.П. Дуальная амплитуда для процессов с участием фотонов / А.П. Кобушкин // Письма в журн. эксперим. и теорет. физики. — 1971. — Т.13, вып. 7. — С.387—391.

734. Кобушкин А.П., Огава Н., Фузие К., Чепилко М.М. Квантовая механика на римановом многообразии / А.П.Кобушкин, Н.Огава, К.Фузие, М.М. Чепилко // Ядерная физика. — 1990. — Т.52, вып.3(9). — С.772—778.
735. Shelest V.P., Jenkovszky L.L., Kukhtin V.V. // Fortschr. Phys. — 1973. — V. 21(9). — P.427.
737. Енковски Л.Л. Описание неупругих процессов в дуальных моделях / В.П. Шелест, Л.Л. Енковски // Успехи физ. наук. — 1973. — Т.111, вып.1. — С.87—108.
737. Бугрий А.И. / А.И.Бугрий, Л.Л.Енковски, Н.А. Кобылинский. Рассеяние на большие углы в "ДАМА" // Ядерная физика. — 1973. — Т.17. — С. 614—620.
738. Зиновьев Г.М. Асимптотические свойства амплитуды электрон-протонного рассеяния и правила сумм для швингеровского члена / Г.М.Зиновьев, В. А. Миранский // Теорет. и мат. физика. — 1972. — Т.10. — С. 204—208.
739. Зиновьев Г.М. Структура протона и сверхтонкое расщепление в атоме водорода / Г.М.Зиновьев, Б.В.Струминский, Р.Н.Фаустов, В.Л. Черняк // Ядерная физика. — 1970. — Т.11, вып.6. — С. 1284—1297.
740. Миранский В.А. Инфракрасные сингулярности и подавление бозонов в безмассовой калибровочной теории / В.А.Миранский, Ю.А.Ситенко, П.И.Фомин // Ядерная физика. — 1977. — Т.25. — №6. — С.1301—1803.
741. Гусынин В.П. О динамической реализации линейной  $\sigma$ —модели в квантовой хромодинамике / В.П.Гусынин, В.А. Миранский // Ядерная физика. — 1983. — Т.37. — №1. — С.202—208.
742. Бугрий Г.В. / Г.В.Бугрий, В.П.Гусынин, В.А.Миранский, Ю.А. Ситенко Динамические массы кварков в квантовой хромодинамике // Ядерная физика. — 1981. — Т.34, вып.5. — С.1384—1391.
743. Енковски Л.Л. Конечно-энергетические и КХД-правила сумм / Л.Л. Енковски, Б.В. Струминский // Теорет. и мат. физика. — 1983. — Т.57. — №1. — С. 41—44.
744. Струминский Б.В., Демченко Г.П. Инклюзивные реакции в дуальной резонансной модели / Б.В.Струминский, Г.П. Демченко // Составные и дуальные модели. — К: Наук.думка, 1971. — С.42—57.
745. Струминский Б.В. 25 лет гипотезы кварков / Б.В. Струминский // Юбилей науки. — К: Наук. думка, 1990. — 480 с.
746. Ментковский Ю.Л. Частица в ядерно-кулоновском поле: (Строгая теория) / Ю. Л.Ментковский. — М.: Энергоатомиздат, 1982. — 215 с.
747. Федорченко А.М. Перетворення поздовжньої плазмової хвилі в електромагнітну на межі плазма-діелектрик / А.М. Федорченко // Укр. фіз. журн. — 1968. — Т.13. — №6. — С.1034—1035.
748. Федорченко А.М. Вступ до курсу статистичної фізики та термодинаміки / А.М.Федорченко. — К.:Вища школа,1973. — 187 с.
749. Федорченко А.М. Абсолютная конвективная неустойчивость в плазме и твердых телах / А.М.Федорченко, Н.Я.Коцаренко. — М.: Наука, 1981. — 176 с.
750. Коцаренко Н.Я. Выделение и усиление разностной частоты в плазменном волноводе с электронным пучком / Н.Я.Коцаренко, А.М.Федорченко // Радиотехника и электроника. — 1967. — Т.12. — №12. — С.2162—2170.

751. Kamerlingh Onnes H. // *Comm. Phys. Lab. Univ. Leiden.* — 1911. — №119, 120, 122.
752. Meissner W., Ochsenfeld R. // *Naturwiss.* — 1933. — V.21. — P.787.
753. London H., London F. // *Proc. Roy. Soc. London. A.* — 1935. — V.149. — P. 71.
754. London F. // *Phys. Rev.* — 1948. — V.74. — P.562.
755. Гинзбург В.Л. / В.Л.Гинзбург, Л.Д. Ландау // *Журн. эксперим. и теорет. физики.* — 1950. — Т. 20. — С.1064–1089.
756. Pippard A.B. // *Proc. Roy. Soc. London. A.* — 1953. — V.216. — P.547.
757. Frolich H. Theory of the superconducting state.1. The ground state at the absolute zero of temperature / H.Frolich // *Phys. Rev.* — 1950. — V.79. — P.845—856.
758. Bardeen J. // *Phys. Rev.* — 1950. — 80. — P.567.
759. Bardeen J. Electron—vibration interactions and superconductivity / J. Bardeen // *Rev. Mod. Phys.* — 1951. — V.23. — №3. — P.261—270.
760. Bardeen J., Pines D. // *Phys. Rev.* — 1955. — V.99. — P.1104.
761. Maxwell E. // *Phys. Rev.* — 1950. — V.78. — P.477.
762. Reynolds C.A., Serin B., Wright W.H, Nesbit L.B. // *Phys. Rev.* — 1950. — V .78. — P.487.
763. Schafroth M.R. // *Phys. Rev.* — 1954. — V.96. — P.1142.
764. Schafroth M.R., Blatt J.M., Butler S.T. // *Helv. phys. acta.* — 1957. — V.30. — P.93.
765. Keesom W.H., van der Ende J.W. // *Comm. Phys. Lab.Univ. Leiden.* — 1932. — 219b.
766. Rutgers A.J. // *Physica.* — 1934. — V.1. — P.1055—1058.
767. Gorter C.J. // *Arch. Mus. Teyler.* — 1933. — V.7. — P.378.
768. Gorter C.J., Casimir B.G. // *Z. Phys.* — 1934. — V.35. — P.963.
769. Pontius R.B. // *Phil. Mag.* — 1937. — V.24. — P.787.
770. Shoenberg D. // *Proc.Roy.Soc. London. A.* — 1940. — V.175. — P.49
771. Laurman E., Shoenberg D. // *Proc.Roy.Soc. London. A.* — 1949. — V.198. — P.560.
772. Cooper L.N. Bound electron pairs in a degenerate fermi gas / L.N. Cooper // *Phys. Rev.* — 1956. — V.104. — №4. — P.1189—1150.
773. Bardeen J. Microscopic theory of superconductivity / J.Bardeen, L.N.Cooper, J . Schriffier // *Phys. Rev.* — 1957. — V.106. — P.162.
774. Bardeen J. / J.Bardeen, L.N.Cooper, J. Shriffier // *Phys. Rev.* — 1957. — V.108 . — P.1175.
775. Valatin J.G. // *Nuovo cim.* — V.1958. — 7. — P.843.
776. Боголюбов Н.Н. О новом методе в теории сверхпроводимости. I. / Н.Н. Боголюбов Препринт Р. — 94 ОИЯИ ЛТФ. — Дубна, 1957, октябрь. — 16 с. (То же: // *Журн. эксперим. и теорет. физики.* — 1958. — 34, вып.1. — С.58—65.)
777. Боголюбов Н.Н. // *Nuovo cim.* — 1958. — V.7. — P.794.
778. Боголюбов Н.Н. О принципе компенсации и методе самосогласованного поля / Н.Н. Боголюбов // *Успехи физ. наук.* — Т.1959. — 67, вып.4. — С.549.
779. Боголюбов Н.Н. Новый метод в теории сверхпроводимости / Н.Н. Боголюбов, В.В.Толмачев, Д.В.Ширков. — М.: Изд—во АН СССР, 1958. — 128 с.



780. Толмачев В.В., Тябликов С.В. // Журн. эксперим. и теорет. физики. — 1958. — Т.34. — С.66.
781. Боголюбов Н.Н. К теории фазового перехода / Н.Н.Боголюбов, Д.Н. Зубарев, Ю.А.Церковников. — Дубна, 1957. (Препринт ОИЯИ Р—110)
782. Боголюбов Н.Н. Вопросы теории сверхтекучести бозе- и ферми-систем / Н.Н. Боголюбов // Вестник АН СССР. — 1958. — Т.28. — С.25—29.
783. Anderson P.W. // Phys. Rev. — 1958. — V.7. — P.843; 1959. — T.112. — P. 1900.
784. Namby Y. // Phys.Rev. — 1959. — V.115. — P.795.
785. Pines D., Schriffer J. // Nuovo sim. — 1958. — V.10. — P.496.
786. Радунская И. Вблизи абсолютного нуля / И. Радунская // Огонек. — 1958. — №19. — С.13.
787. Боголюбов Н.Н. К вопросу о модельном гамильтониане в теории сверхпроводимости / Н.Н.Боголюбов. — Дубна, ЛТФ. — С.1—90. (Препринт ОИЯИ. — Р—511).
788. Боголюбов Н.Н.(мл.) Метод исследования модельных гамильтонианов / Н. Н.Боголюбов (мл.). — М.Наука, 1974. — 176 с.
789. Боголюбов Н.Н. Квазисредние в задачах статистической механики /Н.Н. Боголюбов.— Дубна, 1961. — 34 с. (Препринт ОИЯИ Р—1451)
790. Боголюбов Н.Н. О принципе ослабления корреляций и методе квазисредних /Н.Н.Боголюбов. — Дубна, ЛТФ,1961 (Препринт ОИЯИ Д—549)
791. Вайнберг С. Идейные основы единой теории слабых и электрослабых взаимодействий . С. Вайнберг // Успехи физ. наук. — 1980. — Т.132, вип.2. — С.201—217.
792. Golgstone J. Field Theories of Superconductor Solutions / J. Golgstone //Nuovo sim. — 1961. — V.19. — №.1. — P.154—162.
793. Higgs P.W. Spontaneous Symmetry Breakdown without Masseles Bosons / P. W. Higgs // Phys. Rev. — 1066. — V.145. — №.4. — P.1156—1163.
794. Боголюбов Н.Н., Тябликов С.В. Запаздывающие и опережающие функции Грина в статистической физике / Н.Н.Боголюбов, С.В. Тябликов // Докл. АН СССР. — 1959. — V.126. — №1. — С.53—56.
795. Frohlich J. The Pure Phases (Harmonic Functions) of Generalised Processes and Symmetry Breaking / J. Frohlich // Bull. Amer. Math. Soc. — 1978. — V.84. — №2. — P.165—192.
796. Dyson F.J. Phase Transitions in Quantum Spin Systems with Isotopic and Non —Isotopic Interactions / F.J.Dyson, E.H.Lieb, B. Simon // J. Statist. Phys. — 1978. — V. 18. — P.335—383.
797. Санкович Д.П. Гауссова динамичность и фазовые переходы в системах с непрерывной симметрией / Д.П.Санкович // Теорет. и мат. физика. — 1989. — Т.79. — №3. — С.460—471.
798. Bogoliubov N.N. Upper Bound on the Two-Point Correlation Function of a System of Coupled Anharmonic Oscillators / N.N.Bogoliubov, D.P. Sancovich // Mod. Phys. Lett. B. — 1991. — V.5. — №.1. — P.51—56.
799. Боголюбов Н.Н. Об одном вариационном принципе в задаче многих тел / Н.Н. Боголюбов // Докл. АН СССР. — 1958. — Т.119. — №2. — С.244—246.

800. Боголюбов Н.Н. Об одном вариационном принципе в проблеме многих тел / Н.Н.Боголюбов, В.Г. Соловьев // Докл. АН СССР. — 1959. — Т.124. — №5. — С.1011—1014.
801. Петрина Д.Я. О модельном гамильтониане теории сверхпроводимости / Д.Я.Петрина, В.П. Яцишин// Теорет. и мат. физика. — 1972. — Т.10. — №2. — С.283—300.
802. Боголюбов Н.Н. К вопросу о сверхтекучести в теории ядерной материи / Н.Н. Боголюбов // Докл. АН СССР. — 1958. — Т.119. — №.1. — С. 52—55.
803. Belyaev S.T. // Selected Topics in Nuclear Theory. — Vienna: Int. Atomic Agency, 1963. — P.291.
804. Soloviev V.G. Non—rotational collective states of deformed even—even nuclei (Коллективные неротационные состояния деформированных четно—четных ядер) / V.G. Soloviev // Atomic Energy Rev. — 1965. — Т.3. — №3. — P.117—194.
805. Соловьев В.Г. Теория атомного ядра: квазичастицы и фононы / В.Г. Соловьев. — М.: Энергоиздат, 1989. — 302 с.
806. Baranger M. // Phys. Rev. — 1960. — V.120. — P.957.
807. Bednorz J.G. Possible high T<sub>c</sub> superconductivity in the Ba—La—Cu—O system / J.G.Bednorz, K.A.Muller // Z. Phys. B. — 1986. — Bd.64. — S.189—194.
808. Bogolubov N.N. On the theory of Superconductivity in a Model of Oxide Metals / N.N.Bogolubov, V.L.Aksenov, N.M. Plakida // JINR Comm. — D17—88—76. — Dubna, 1988.
809. Боголюбов Н.Н. К вопросу о существовании сверхпроводимости в модели Хаббарда / Н.Н.Боголюбов, В.А. Москаленко // Теорет. и мат. физика. — 1991. — Т. 86. — №1. — С.16—30.
810. Боголюбов Н.Н. Сверхпроводящее состояние в модели Хаббарда / Н.Н. Боголюбов, В.А.Москаленко // Докл. АН СССР. — 1991. — Т.316. — №5. — С.1107—1111.
811. Николис Г. Самоорганизация в неравновесных системах / Г.Николис, И. Пригожин — М.: Мир, 1979. — 512 с.
812. Хакен Г. Синергетика / Хакен Г. — М.: Мир, 1980. — 404 с.
813. Лифшиц И.М. К теории эффекта де Хааса-ван Альфена для частиц с произвольным законом дисперсии / И.М.Лифшиц, А.М. Косевич // Докл. АН СССР. — 1954. — Т.96. — №5. — С.963—966.
814. Лифшиц И.М. К теории магнитной восприимчивости металлов при низких температурах / И.М.Лифшиц, А.М. Косевич // Журн. эксперим. и теорет. физики. — 1955. — 29, вып.6. — С.730—742.
815. Лифшиц И.М. Об определении поверхности Ферми и скоростей электронов в металле по осцилляции магнитной восприимчивости / Лифшиц И.М., Погорелов А.В. // Докл. АН СССР. — 1954. — Т.96. — С.1143—1146.
816. Лифшиц И.М. К теории магнитной восприимчивости тонких слоев металлов при низких температурах / И.М.Лифшиц, А.М.Косевич // Докл. АН СССР. — 1953. — Т.91. — №4. — С.795—798.
817. Косевич А.М. Эффект де Хааса-ван Альфена в тонких слоях металлов / А. М.Косевич, И.М. Лифшиц // Журн. эксперим. и теорет. физики. — 1955. — Т.29, вып.6. — С.743—747.

818. Лифшиц И.М. Об осцилляциях термодинамических величин для вырожденного Ферми—газа при низких температурах / А.М.Косевич, И.М. Лифшиц // Изв. АН СССР. Сер. физич. — 1955. — Т.19. — С.395—403.

819. Лифшиц И.М. Об аномалии электронных характеристик металла в областях больших давлений / И.М.Лифшиц // Журн. эксперим. и теорет. физики. — 1960. — Т.38. — С.1569—1572.

820. Ахиезер А.И. К теории релаксационных процессов в ферродиелектриках при низких температурах / А.И.Ахиезер, В.Г.Барьяхтар, С.В. Пелетминский // Журн. эксперим. и теорет. физики. — 1959. — Т.36. — Вып.1. — С.216—224.

821. Ахиезер А.И. О поведении ферромагнетиков и антиферромагнетиков в быстро осциллирующем магнитном поле / А.И.Ахиезер, С.В. Пелетминский // Физика твердого тела. — 1968. — Т.10. — №11. — С.3301—3309.

822. Ахиезер А.И. Связанные магнитоупругие волны в ферромагнетиках и ферроакустический резонанс / А.И.Ахиезер, В.Г.Барьяхтар, С.В. Пелетминский // Журн. эксперим. и теорет. физики. — 1958. — Т.35. — Вып.1(7). — С.228—236.

823. Ахиезер А.И. Кинетика черного излучения / А.И.Ахиезер, С.В. Пелетминский // Докл. АН СССР. — 1971. — Т.200. — №6. — С.1317—1320.

824. Ахиезер А.И. Спиновые волны / А.И.Ахиезер, В.Г.Барьяхтар, С.В. Пелетминский. — М.:Наука, 1967. — 368 с.

825. Барьяхтар В.Г. Кинетика слабонеоднородных состояний в системах многих частиц / В.Г.Барьяхтар, С.В.Пелетминский. I. — Препринт ИТФ. — 69—66. — К., 1969. — 55 с.

826. Пелетминский С.В. К кинетике пространственно-неоднородных состояний / С.В.Пелетминский, В.Д. Цуканов // Теорет. и мат. физика. — 1971. — Т. 6. — №2. — С.238—247.

827. Ситенко А.Г. Флуктуации и нелинейное взаимодействие волн в плазме / А.Г.Ситенко. — К.: Наук. думка, 1977. — 248 с.

828. Ситенко О.Г., Мальнев В.М. Основы теории плазмы / О.Г.Ситенко, В.М. Мальнев. — К.:Наук.думка, 1994. — 374 с.

829. Ситенко А.Г. Метод моментов в перенормированной теории турбулентности плазмы / А.Г.Ситенко, П.П.Сосенко // Укр. физ. журн. — 1987. — Т. 32. — №5. — С.702—707.

830. Павленко В.Н. Эховые явления в плазме и плазменных средах / В.Н. Павленко, А.Г.Ситенко. — М.:Наука, 1988. — 128 с.

831. Ситенко А.Г. О колебаниях электронной плазмы в магнитном поле / А.Г. Ситенко, К.Н. Степанов // Журн. эксперим. и теорет. физики. — 1956. — Т.31. — С. 642—651.

832. Sitenko A.G. On the phenomenological description of electromagnetic fluctuations in turbulent plasmas / A.G.Sitenko, A.G.Zagorodny // Укр. фіз. журн. — 1995. — Т.40. — №5. — С.390—402.

833. Statistical properties and relaxation of dusty plasmas / Sitenko A.G., Zagorodny A.G., Yu.I.Chutov, P.Schram, V.N.Tsytoovich // Plasma Phys. Control. Fusion. — 1996. — 38. — №12A. — P.A105. — A120.

834. Филиппов А.В., Загородний А.Г., Паль А.Ф., Старостин А.Н., Момот А.И. Кинетическое описание экранирования заряда макрочастиц в неравновесной плазме

- // Письма в журн. эксперим. и теорет. физики. — 2006. — Т.86. — №12. — С. 873.
835. Экранировка заряда микрочастицы в плазме с внешним источником ионизации / А.В.Филиппов, А.Г.Загородний, А.Ф.Паль, А.Н. Старостин // Письма в журн. эксперим. и теорет. физики. — 2005. — Т.81. — №4. — С. 180.
836. Загородний А.Г. Сверхизлучение электронов в магнитном поле и нерелятивистский гиротрон / А.Г.Загородний, П.И.Фомин, А.П.Фомина // Доп. НАНУ. — 2004. — №4. — С.71—80.
837. Загородній А.Г. Діелектрична проникність заповненої плазми за наявності порошинок різних розмірів / А.Г.Загородній, А.І. Момот // Вісн. Київ. ун —ту. Сер. фіз. — мат. науки. — 2003. — №1. — С. 350—358.
838. Zagorodny A.G. Stationary velocity and charge distributions in dusty plasma / . A.G.Zagorodny, P.P.J.M.Schram, S.A. Trigger // Phys. Rev. Lett. . — 2000. — V.84. — P .3594—3597.
839. Загородний А.Г. Плотность энергии теплового излучения в неоднородных прозрачных средах / А.Г.Загородний, А.С.Усенко, И.П. Якименко // Журн. эксперим . и теорет физики. — 1993. — Т.104, вып. 9. — С.2937.
840. Загородний А.Г. Крупномасштабные флуктуации в ограниченных плазменно—молекулярных системах / А.Г.Загородний, Ю.Л.Климонтович, И.П. Якименко // Теорет. и мат. физика. — 1988. — Т.75. — №1. — С. 70—85.
841. Статистическая теория плазменно-молекулярных систем / Ю.Л. Климонтович, Х.Вильгельмссон, И.П.Якименко, А.Г.Загородний. — М.: УРСС, 1990 . — 224 с.
842. Юхновский И.Р. Статистическая теория классических равновесных систем / И.Р.Юхновский, М.Ф.Головко. — К.:Наук. думка, 1980. — 372 с.
843. Юхновский И.Р. Мембранное опреснение и статистическая физика / И.Р. Юхновский, С.С.Духин, В.Я. Антонченко // Вісн. АН УРСР. — 1979. — №12. — С. 84—85.
844. Гріднєв В.Н. Інститут металофізики АН УРСР / В.Н.Гріднєв. // Укр. физ. журн. — 1958. — Т.3. — №1. — С.10—15
845. Физтех—60. Люди и судьбы. — Днепропетр. ун-т, 2000. — 420 с.
846. Курдюмов Г.В. Днепропетровский физико-технический институт / Г.В. Курдюмов, А.Э. Малиновский // Науч.-исслед. Ин-ты тяжелой пром. — ОНТИ НКТП. — 1936.
847. Курдюмов Г.В. Фазовые превращения в сплавах / Г.В.Курдюмов // Рентгенография в применении к исследованию материалов. — М.;Л.:ОНТИ НКТП, 1936.
848. Курдюмов Г.В. Явления закалки и отпуска стали / Г.В.Курдюмов. — М. :Металлургиздат, 1960. — 64 с.
849. Курдюмов Г.В. / Л.М.Утевский, Р.И.Энтин. Превращения в железе и стали. — М.: Наука, 1977
850. Особова справа члена-кореспондента НАН України Лесника Андрія Герасимовича // Архів Президії НАН України. — Ф.251. — Оп.632. — Спр.№ 18.
851. Лесник А.Г. Модели межатомного взаимодействия в статистической теории сплавов / А.Г.Лесник. — М.: Физматгиз, 1962. — 87 с.

852. Лесник А.Г. Статистическая трактовка магнитных свойств. Ч. I / А.Г. Лесник // Физика металлов и материаловедение. — 1969. — Т.27. — №6. — С.1000.
853. Лесник А.Г. Статистическая трактовка влияния неоднородностей анизотропии на ферромагнитный резонанс / А.Г. Лесник / Физика металлов и материаловедение. — 1969. — Т.28. — №1. — С.84.
854. Лесник А.Г. Наведенная магнитная анизотропия / А.Г.Лесник. — К.:Наук. думка, 1976. — 160 с.
855. С.Д.Герцрикен, Н.Н.Новиков // Вісник Київського ун—ту, сер.фіз. та хім. — 1958. — №1, вип.1
856. Герцрикен С.Д., Новиков Н.Н. // Укр. фіз. журн. — 1959. — Т.4. — С.640.
857. Герцрикен С.Д., Новиков Н.Н. // Изв. вузов, фізика. — 1960. — №2.
858. Герцрикен С.Д., Новиков Н.Н., Горидько М.Я. // Укр. фіз. журн. — 1961. — Т.6. — №2.
859. Герцрикен. С.Д., Рєво А.Д. // Укр. фіз. журн. — 1961. — 6. — №3.
860. Ткаченко Ф.К. // Укр. фіз. журн. — 1961. — 6. — №4.
861. Герцрикен С.Д., Дяхтяр И.Я. Диффузия в металлах и сплавах в твердой фазе / С.Д.Герцрикен, И.Я.Дяхтяр. — М.: Гостехиздат, 1960. — 564 с.
862. Смирнов А.А. Теория окисления сплавов / А.А. Смирнов // Журн. эксперим. и теорет. физики. — 1944. — Т.14. — С.46.
863. Смирнов А.А. Теория гальваномагнитных эффектов в упорядочивающихся сплавах / А.А.Смирнов // Изв.АН СССР. — 1947. — Т.11. — С. 507.
864. Смирнов А.А. Теория сплавов внедрения / А.А.Смирнов.— М.: Наука, 1979. — 380 с.
865. Смирнов А.А. Теория диффузии атомов в сплавах / А.А.Смирнов, М.А. Кривоглаз // Успехи физ. наук. — 1955. — Т.3. — С.55.
866. Смирнов А.А. Теория электросопротивления сплавов / А.А.Смирнов. — Киев: Изд-во АН УССР, 1960.
867. Смирнов А.А. Молекулярно-кинетическая теория металлов / А.А. Смирнов. — М.:Наука, 1966. — 488 с.
868. Смирнов А.А. Физика металлов (современные представления о природе металлов) / А.А.Смирнов. — М.:Наука, 1971 . — 112 с.
869. Олександр Захарович Голик: до 70—річчя від дня народження // Укр. фіз. журн. — 1979. — С.1060.
870. Олександр Захарович Голик: некролог. // Укр. фіз.журн . — 1991. — 36. — №.6. — С.959.
871. Особова справа професора О.З.Голика // Арх. Київ. ун-ту. — Спр.№ 1978 —11.
872. Голик А.З. Строение и свойства вещества в жидком состоянии / А.З. Голик // Тр. Ин-та физики АН УССР. — 1955, вып.6. — С.70—82.
873. Голик А.З. // В сб. Термодинамика и строение растворов. — М.: Изд-во АН СССР, 1959.
874. Теплофизические свойства жидкостей. — М.:Наука, 1976. — 159 с.
875. Голик А.З. Уравнение состояния реальных газов / А.З.Голик. — Киев:Изд-во Киев.ун-та, 1961. — 45 с.

876. Голик О.З., І.Ф.Классен // Укр. физ. журн. — 1959. — Т.4. — №4.
877. Голик О.З., Казанський В.М. // Укр. физ. журн. — 1959. — Т.4. — №5.
878. Голик О.З., Шиманський Ю.І., Кобійчук Н.М. // Укр. физ. журн. — 1958. — Т.3. — №4. — С.537.
879. Голик О.З., Шиманська О.Т. // Укр. физ. журн. — Т.4. — №6.
880. Шиманський Ю.І. // Вісник Київського ДУ, сер. фіз. і хім. — 1959. — №2, вип. 1.
881. Шиманська О.Т. // Укр. физ. журн. — 1960. — 5. — №4.
882. Голик О.З., Чолпан П.П. // Укр. физ. журн. — 1960. — 5. — №2.
883. Голик О.З., Чолпан П.П. // Укр. физ. журн. — 1960. — 5. — №6.
884. Скрышевский А.Ф. // Металлургия и топливо. — 1960. — №6.
885. Голик А.З. Исследование скорости распространения и поглощения ультразвука в n-парафинах вдоль кривой равновесия жидкость—пар / А.З.Голик, Ю. И.Кузовков, О.В.Тарасенко // Теплофизические свойства жидкостей. — М.:Наука, 1976. — С.13—16.
886. Овсиенко Д.Е. О природе образования дислокационной структуры в металлических кристаллах при росте из расплава/ Д.Е. Овсиенко // Рост и несовершенства металлических кристаллов. — Киев:Наук. Думка, 1966. — С.164—169.
887. Скрышевский А.Ф. Рентгенографическое исследование некоторых растворов // Строение и физические свойства вещества в жидком состоянии. — Киев: Изд-во Киев. ун-та, 1961. — 86 с.
888. Скрышевский А.В. Структурный анализ жидкостей и аморфных тел / А.В. Скрышевский. — М.:Высш. школа, 1980. — 328 с.
889. Радченко И.В. Строение жидких металлов / И.В. Радченко // Успехи физ. наук. — 1957. — Т.61, вып.2. — С.249—276.
890. Радченко И.В. Модельное изучение жидкого состояния / И.В.Радченко, Ф.К.Шестаковский // Строение и физические свойства вещества в жидком состоянии. — Киев: Изд-во Киев. ун-та, 1954. — С.45—61.
891. Широков М.Ф., Фишер И.З. // Астрономический журнал. — 1962. — Т.39. — С.899
892. Фишер И.З. // Докл. АН УССР. — 1964. — Т.158. — С.1075.
893. Фишер И.З. // Укр. физ. журн. — 1964. — Т.9. — С.379.
894. Коваленко Н.П., Фишер И.З. // Журн. физич. химии. — 1966. — Т.40. — С.649.
895. Фишер И.З., Красный Ю.П. // Укр. физ. журн. — 1966. — Т.10. — С.104; 1967. — 12. — С.10.
896. Красный Ю.П., Фишер И.З.// Укр. физ. журн. — 1967. — Т.12. — С.463.
897. Коваленко Н.П., Фишер И.З.// Журнал физич. химии. — 1968. — Т.42. — С.2207.
898. Комаров Л.И., Фишер И.З.// Укр. физ. журн. — 1967. — Т.12. — С.15
899. Институт физики. — К.:Наук. думка, 1979. — 118 с.
900. Пекар С.И. Автолокализация электрона в диэлектрической инверсионно оляризуемой среде / С.И. Пекар // Журн. эксперим. и теорет. физики. — 1946. — Т.16, вып.4. — С.335—340.

901. Давыдов А.С. Теория поглощения света молекулярными кристаллами / А.С. Давыдов // Изв. АН СССР. — Сер. Физ. — 1948. — Т.12. — №5. — С.608—610.
902. Машкевич В.С. Введение в квантовую электронику спектрально-неоднородных сред / В.С.Машкевич, Л.П.Годенко. — Киев, Наук. думка. — 1978. — 186 с.
903. Данилов В.И. Рассеяние рентгеновских лучей в жидкостях / В.И.Данилов. — М.;Л.: ОНТИ, 1935. — 140 с.
904. Финкельштейн Б.Н. Мои встречи с физиками / Б.Н.Финкельштейн// Сталь. — 1962. — №31.
905. Професор Фінкельштейн замітає сліди // Зоря. — 1937. — №150 (3 липня).
906. Иоффе А.Ф. Советская физика за 20 лет / А.Ф. Иоффе // Журн. эксперим. и теорет. физики. — 1937. — Т.7. — №1. — С.1189—1193.
907. Курдюмов Г.В.Фазовые превращения в сплавах // Рентгенография в применении к исследованию материалов. — М.;Л.:ОНТИ НКТП, 1936
908. Особова справа проф.Смирнова А.А. // Архів Київського університету. — Ф.Р—308. — Оп.№14. — Спр.№174.
909. Лейпунский А.И. Отчет о работе украинского физико-технического института / А.И. Лейпунский // Известия Академии наук СССР. — 1937. — №3. — с.363—377.
910. Йоффе А.Ф. Розвиток радянської фізики / А.Ф.Йоффе // Електричество. — 1948. — №1. (То же: Досягнення радянських фізиків. Хрестоматія. — К.: Рад. школа, 1950. — 322 с.)
911. Пинес Б.Я. // Успехи физ. наук. — 1962. — Т.26. — №3.
912. Пинес Б.Я., Иванов И.Г. // Физика твердого тела. — 1960—Т.2. — С.959
913. Пинес Б.Я., Сиренко А.Ф. // Физика металлов и металловедение. — 1959. — 7. — С.766.
914. Пинес Б.Я., Сиренко А.Ф. // Физика металлов и металловедение. — 1960. — Т.10. — С.382.
915. Пинес Б.Я., Сиренко А.Ф. // Изв. вузов, черная металлургия. — 1960. — №2. — С.81.
916. Пинес Б.Я., Сиренко А.Ф. // Изв. вузов, черная металлургия. — 1960. — №5. — С.121.
917. Усиков А.Я. Экспериментальное и теоретическое исследование поглощения и рассеяния миллиметровых волн в осадках / А.Я.Усиков, В.Л.Герман, И.Х. Ваксер // Тр. отд. радиофизики ФТИ АН УССР. — 1954. —№ 2. — С.3—39.
918. Ваксер И.Х. Влияние затухания и рассеяния радиоволн миллиметрового диапазона в дожде на радиолокационную наблюдаемость / И.Х.Ваксер, А.Я. Усиков // Тр. ИРЭ АН УССР. — 1955. —№ 3. — С.36—61.
919. Усиков О.Я. Дослідження вбирання та розсіювання міліметрових хвиль в опадах / О.Я.Усиков, Л.В.Герман, І.Х. Ваксер // Український фізичний журнал. — 1961. — Т.6, № 5. — С.618—641.
920. О распространении электромагнитных колебаний см диапазона над морем при наличии атмосферного волновода и в условиях повышенной рефракции / С.Я.Брауде, В.Л.Герман, О.И.Е.стровский, И.М.Безуглый, В.И.Амосов, П.В.Блиох,

Ф.С.Санин, Я.Л. Шамфаров // Мор. вестник – 1950. – № 3. – С.3—103.

921. Герман В.Л. Про розсіяння електромагнітних хвиль в іоносфері і тропосфері на неоднорідностях, викликаних турбулентними пульсаціями / В.Л. Герман // Укр. фіз. журнал. – 1958. – Т.3, № 5. – С.595—610.

922. Канер Э.А. Распространение электромагнитных волн в среде со случайными неоднородностями над идеально проводящей поверхностью / Э.А. Канер, Ф.Г. Басс // Изв. ВУЗов. Радиофизика. – 1959. – Т.2, № 4. – С.553—564.

923. Флуктуации электромагнитных волн в тропосфере при наличии поверхности раздела / Ф.Г.Басс, С.Я.Брауде, Э.А.Канер, А.В.Мень // Успехи физ. наук. – 1961. — Т.73, № 1. – С.89—119.

924. Басс Ф.Г. Флуктуации фазы и амплитуды при сверхдальнем распространении электромагнитных волн над земной поверхностью / Ф.Г.Басс, Э.А. Канер // Изв. ВУЗов. Радиофизика. – 1961. — Т.4, № 2. – С.377—379.

925. Рассеяние волн коротковолнового диапазона взволнованной поверхностью моря / Брауде С. Я., Островский И.Е., Шамфаров Я.Л., Тургенев И.С., Мень А.В. Игравков А.И. // Радоокеанографические исследования морского волнения. – К: Изд-во АН УССР, 1962. –С.96—113.

926. Брауде С.Я. Флуктуации радиоволн различной частоты в тропосфере / С. Я.Брауде, Э.А. Канер // Изв. ВУЗов. Радиофизика. – 1962.— Т.5, № 2. – С.246—254.

927. Блюх П.В. Сжатие импульса излучения в диспергирующей среде со случайными неоднородностями / П.В.Блюх // Изв. ВУЗов. Радиофизика. – 1964.— Т.7, № 3. – С.460—470.

928. Флуктуации сверхдлинных волн в волноводе Земля—ионосфера / В.Г. Безродный, П.В.Блюх, Р.С.Шубова, Ю.М.Ямпольский. – М.: Наука, 1984. – 144 с.

929. Усиков А.Я. Линзовый эффект атмосферы земли / А.Я.Усиков, П.В. Блюх // Геомагнетизм и аэрономия. – 1962. — Т.2, № 2. – С.293—304.

930. Блюх П.В. Гравитационные линзы / П.В.Блюх, А.А.Минаков. – Киев: Наук. думка, 1989. – 240 с.

931. Чаевский Е.В. Распределение потоков энергии, создаваемых системой случайных монохроматических источников / Е.В. Чаевский // Радиотехника и электроника. – 1966. – Т.11, № 11. – С.1927—1933.

932. Штагер Е.А. Рассеяние на телах сложной формы / Е.А.Штагер, Е.В. Чаевский. – М.: Сов радио, 1974. – 240 с.

933. Басс Ф.Г. Рассеяние волн на статистически неровной поверхности / Ф.Г. Басс, И.М.Фукс. – М.: Наука, 1972. – 424 с.

934. Экспериментальное изучение распространения радиоволн двухмиллиметрового диапазона на короткой надводной трассе / Балан М.Г., Беспечный С.Б., Горбач Н.В. и др. – Харьков, 1979. – 27 с. – (Препр. АН УССР. Ин-т радиофизики и электрон.; № 132).

935. Кулемин Г. П. Особенности обратного рассеяния сантиметровых и миллиметровых радиоволн морской поверхностью при малых углах скольжения / Г. П.Кулемин, В.И.Луценко – Харьков, 1984. – 36 с. – (Препр. АН УССР. Ин-т радиофизики и электрон.; № 237).

936. Лобкова Л.М., Мишарева Н.И., Лкьянчук А.Г. и др. // Изв. ВУЗов. Радиофизика. – 1981. — Т.24, № 1. – С.27—33.



937. Кулемин Г. П. Рассеяние миллиметровых радиоволн поверхностью Земли под малыми углами / Г.П.Кулемин, В.Б.Разказовсий. – К: Наук. думка, 1987.
938. Лобкова Л.М. Распространение радиоволн над морской поверхностью / Л. М.Лобкова. – М.: Радио и связь, 1991. – 256 с.
939. Шифрин Я.С. Статистика поля линейной антенны / Я.С.Шифрин. – Харьков: АРТА, 1962. – 118 с.
940. Шифрин Я.С. Вопросы статистической теории антенн / Я.С.Шифрин. – М.: Советское радио, 1970. – 384 с.
941. Ширман Я.Д. Основы теории обнаружения радиолокационных сигналов и измерения их параметров / Я.Д.Ширман, В.Н.Голиков. – М.: Советское радио, 1963. – 278 с.
942. Ширман Я.Д. Теории и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех / Я.Д.Ширман, В.Н.Манжос. – М.: Радио и связь, 1981. – 405 с.
943. Фалькович С.Е. Прием радиолокационных сигналов на фоне флуктуирующих помех / С.Е.Фалькович. – М.: Советское радио, 1961. – 312 с.
944. Фалькович С. Е., Хомяков Э.М. Статистическая теория измерительных радиосистем / С. Е.Фалькович, Э.М.Хомяков. – М.: Радио и связь, 1981. – 288 с.
965. Фалькович С.Е., Понамарев В.И., Шкварко В.И. Статистическая теория измерительных радиосистем / С.Е.Фалькович, В.И.Понамарев, В.И. Шкварко Под ред. С. Е. Фальковича. – М.: Радио и связь, 1989. – 293 с.
946. Буйков М.В. Метод кинетического уравнения в теории облаков / М.В Буйков // Труды Всесоюзного метеорологического совещания. – 1963. – Т.5. – С. 122–128.
947. Проблеми фізики хмар і активних впливів на метеорологічні процеси. / А. В.Силаєв, В.П.Баханов, Р.А. Баханова та ін. За ред. Силаєва А.В. – К: Наук, думка, 2004. – 350 с.
948. Особова справа Федорченка А.М. // Архів Київ. Ун-ту. — Од. Зб. №1994 — №132.
949. Особова справа професора Ю.І.Шиманського // Архів Київ. ун-ту. — Од. Зб. №1998. — №135.
950. Булавін Л.А. Критичні явища в рідинах / Л.А.Булавін. — К.: РВЦ „Київський університет”, 1997.
951. Булавін Л.А., Забашта Ю.Ф. Фізична механіка полімерів / Л.А.Булавін, Ю .Ф.Забашта — К.: РВЦ „Київський університет”, 1999.
952. Степин В.С. Важно, чтобы работа не прекращалась: интервью / В.С. Степин. – интервью ведет Т.Касавин // Вопросы философии. — 2004. — №9. — С.16 —71.
953. Богомолец А.А. Избранные труды / А.А.Богомолец. — В 3-х т. — К: Изд-во АН УССР, 1956—1958.
954. Борн М. Размышления и воспоминания физика / М.Борн. — М.:Наука, 1977. — 280 с.
955. Вавилов С.И. Собрание сочинений / С.И.Вавилов. — В 4-х т. — М.: Изд-во АН СССР, 1954—1956.

956. Капица П.Л. Эксперимент. Теория. Практика / П.Л.Капица. — М.: Наука, 1974. — 288 с.
957. Лебедев П.Н. Собрание сочинений. Сер. Классики науки / П.Н.Лебедев. — М.: Изд-во АН СССР, 1963. — 127 с.
958. Оствальд В. Великие люди / В.Оствальд. — С.-Пб., 1910. — 398 с.
959. Семенов Н.Н. Наука и общество: Статьи и речи / Н.Н.Семенов. — М.: Наука, 1973. — 479 с.
960. Зербино Д.Д. Научная школа как феномен / Д.Д.Зербино. — К.: Наук. думка, 1994. — 135 с.
961. Очерки истории и теории развития науки. — М.: Наука, 1969.
962. Добров Г.М. Наука о науке / Г.М.Добров — К.: Наук. думка, 1970. — 320 с.
963. Кара-Мурза С.Г. Проблемы организации научных исследований / С.Г. Кара-Мурза. — М.: Наука, 1981 — 205 с.
964. Карцев В.П. Социальная психология науки и проблемы историко-научных исследований / В.П.Карцев . — М.: Наука, 1984. — 308 с.
965. Бойко Е.С. Школа академика А.А.Андропова / Е.С.Бойко. — М.: Наука, 1983 — 200 с.
966. Мирская Е.З. Научные школы как форма организации науки / Е.З. Мирская // Наука и науковедение. — 2002. — №3. — С.8—24.
967. Александр Ильич Ахиезер. — К: Наук. думка, 1981. — 44 с. (Биобиблиография ученых Укр. ССР)
968. Ахиезер А.И. О поглощении звука в твердых телах / А.И.Ахиезер // Журн. эксперим. и теорет. физики. — 1938. — Т.8, вып.12. — С.1318—1329.
969. Электродинамика плазмы / Под ред. А.И.Ахиезера. — М.: Наука, 1974. — 719 с.
970. Барьяхтар В.Г. Распределение звуковых волн в магнитоупорядоченных кристаллах со спиральной магнитной структурой / В.Г.Барьяхтар, К.Б.Власов, Стефановский Е.П. // Физика твердого тела. — 1973. — Т.15, вып.12.
971. Барьяхтар В.Г. К теории метамагнитных переходов / В.Г.Барьяхтар, И.М. Витебский, Д.А. Яблонский // Физика твердого тела. — 1977. — Т.19, вып.7.
972. Барьяхтар В.Г. Теория образования зародышей при магнитных фазовых переходах первого рода между парамагнитной и магнитоупорядоченной фазами / В. Г.Барьяхтар, И.М.Витебский, Д.А. Яблонский // Физика твердого тела. — 1977. — Т. 19, вып.2.
973. Цилиндрические магнитные домены / В.Г.Барьяхтар, В.В.Ганн, Ю.И. Горобец и др. // Успехи физ. наук. — 1977. — Т.121, вып.4. — С.593—628.
974. Академик Илья Михайлович Лифшиц. — М.: Знание, 1987. — 64 с.
975. Азбель М.Я. К теории циклотронного резонанса в металлах / М.Я.Азбель, Э.А. Канер // Журн. экспер. и теор. физики. — 1956. — Т.30, вып.4. — С.811—814.
976. Лифшиц И.М. Теория квантового циклотронного резонанса в металлах / И.М.Лифшиц, М.Я.Азбель, А.А.Слуцкий // Журн. эксперим. и теорет. физики. — 1962. — Вып 4(10). — С.1464—1478.
977. К микроскопической теории сверхтекучих жидкостей / Н.Н.Боголюбов (мл.), М.Ю.Ковалевский, А.М. Курбатов и др. // Успехи физ. наук. — 1989. — Т.159.

— №4. — С.585—620.

978. Свидзинский А.В. Пространственно-неоднородные задачи теории сверхпроводимости / А.В.Свидзинский. — М.:Наука, 1982. — 309 с.

979. Гончар Н.С. Конденсация и кристаллизация / Н.С.Гончар. — К.: Наук. думка, 1991. — 197 с.

980. Петрина Д.Я. Аналитические свойства парциальных волн амплитуды рассеяния в теории возмущений / Д.Я. Петрина // Докл. АН СССР. — 1962. — Т.144, № 4. — С. 755—758.

981. Петрина Д.Я. Аналитические свойства амплитуды рассеяния на потенциале на первом „нефизическом” листе / Д.Я. Петрина // Журн. эксперим. и теорет. физики. — 1963. — Т.44, вып. 1. — С. 151—156.

982. Статистический подход к вычислению резонансных ширин и множественности в дуальных моделях / М.И.Горенштейн, Г.М.Зиновьев, В.И. Макаров, В.А.Миранский, В.П. Шелест // Письма в Журн. exper. и теор. физики. — 1972. — Т.15, вып. 11. — С.686—689.

983. Ігор Рафаїлович Юхновський (Бібліографія вчених України) / НАН України; Інститут фізики конденсованих систем / М.А. Кориневський (відп.ред.), Надія Яківна Гривнак (уклад.), М.Ф. Головка (авт.вступ.ст.). — К.: Наук. думка, 1995. — 84 с.

984. До 60-річчя від дня народження І.Р.Юхновського // Укр. фіз. журн. — 1985. — Т.30. — №8. — С.1273—1274.

985. 60-річчя академіка І.Р.Юхновського // Вісн. АН УРСР. — 1985. — №8. — С.110.

986. 70-річчя академіка І.Р.Юхновського // Вісн. АН УРСР. — 1995. — №9—10. — С.102—103.

987. Mryglod I. Yukhnovskii's contribution to the development of new methods of statistical physics / I. Mryglod // Book of abstracts of the International Conference “Statistical Physics 2005: Modern Problems and New Applications.28—30 August 2005, Lviv, Ukraine”. — P.42.

988. Юхновський І.Р. Вибрані праці. Фізика. / І.Р. Юхновський/ – Передмова: І.Мриглюд, М.Головка, О.Іванків, М.Козловський, І.Стасюк, М.Токарчук. — Вид-во ун-ту “Львівська політехніка”, 2005. — 858 с.

989. Архів Президії НАН України. — Ф.251Р. — Оп.№2. — Од. Зб. № 67. — Л.139—141.

990. Архів Президії НАН України. — Ф.251Р. — Оп.№12. — Од. Зб. № 10. — Л.3—4.

991. Архів Президії НАН України. — Ф.251Р. — Оп.№6. — Од. Зб. №7. — Л.138—140.

992. Наукова рада з проблеми „Фізика м'якої речовини”: Короткий підсумок діяльності у період до 2006 року. — НАН України, Відділення фізики і астрономії. — Львів; Київ, 2006. — 104 с.

993. Stell G., Lebowitz J.L. // J.Chem.Phys. — 1968. — V.49. — P.3706.

994. Anderson H.C., Chandler D. // J.Chem.Phys. — 1970. — V.53. — P.547.

995. Юхновский И.Р., Бигун Г.И. Электронный газ при низких температурах в методе смещений и коллективных переменных / И.Р.Юхновский, Г.И. Бигун //

Матер. II Всесоюз. совещ. по стат. физике. — Киев, 1971. — С.8—9.

996. Юхновский И.Р., Петрашко Р.Н. Асимптотика бинарной функции распределения нормальных ферми—систем / И.Р.Юхновский, Р.Н.Петрашко. — Киев, 1972. — 37 с. — (Препр. / АН УССР. Ин—т теор. физики; ИТФ—72—2Р).

997. Юхновский И.Р., Петрашко Р.Н. Исследование бинарной функции распределения вырожденного электронного газа на малых расстояниях / И.Р. Юхновский, Р.Н. Петрашко // Теорет. и мат. физика. — 1973. — Т.17. — №2. — С. 250—262.

998. Юхновский И.Р., Вакарчук И.А. Применение метода смещений и коллективных переменных к системам взаимодействующих бозе-частиц. Ч1. / И.Р. Юхновский, И.А. Вакарчук — К., 1972. — 36 с. — (Препр. / АН УССР. Ин—т теор. физики; ИТФ—72—135Р).

999. Юхновский И.Р. Квантово-статистическая теория неупорядоченных систем / И.Р.Юхновский, З.А.Гурский. — К.: Наук. думка, 1991. — 228 с.

1000. Юхновский И.Р. Представление коллективных переменных для модели Изинга / Юхновский И.Р., Рудавский Ю.К. // Укр.физ.журн. — 1977. — Т.22, №1. — С.50—59.

1001. Юхновский И.Р. Расчет критических показателей трехмерной модели Изинга / И.Р.Юхновский, М.П.Козловский, В.А.Коломиец. — К: Наук. думка, 1981. — 32 с. — (Препр. / АН УССР. Ин-т теор. физики; ИТФ—81—104Р).

1002. Юхновський І.Р. Мікроскопічна теорія фазових переходів у тривимірних системах / І.Р.Юхновський, М.П.Козловський, І.В.Пилюк. — Львів: Євросвіт, 2001. — 592 с.

1003. Юхновский И.Р. Исследование приближенных рекуррентных соотношений  $n$ —компонентной модели для больших значений параметров разбиения  $s$  / И.Р.Юхновский, И.М.Мриглод. — К.: Наук. думка, 1984. — 23 с. — (Препр. / АН УССР. Ин—т теор. физики; ИТФ—84—36Р).

1004. Юхновский И.Р. Интегрирование статистической суммы системы двухчастичных кластеров в методе коллективных переменных. Рекуррентные соотношения / И.Р.Юхновский, Н.А.Кореневский. — К: Наук. думка, 1984. — 29 с. — (Препр. / АН УССР. Ин—т теор. физики; ИТФ—84—59Р).

1005. Моделювання процесів вакансійного розбухання, міграції водню й гелію в лавиноподібних паливомісних матеріалах (ЛПВМ). Теплові клини в ЛПВМ / І.Р. Юхновський, П.А.Глушак, О.С.Захар'яш, М.В. Токарчук // Проблеми Чорнобиля. — 2002, вип.11. — С.11—22.

1006. Сергій Володимирович Пелетмінський (до 75-річчя від дня народження) // Укр. фіз. журн. — 2006. — Т.51. — №5. — С.527—528.

1007. Матеріали до обрання С.В.Пелетмінського у члени-кореспонденти та у академіки НАН України // Архів відділу наукових і керівних кадрів Президії НАН України.

1008. Ахиезер А.И., Пелетминский С.В. О применении методов квантовой теории поля к исследованию термодинамических свойств газа электронов и фотонов / А.И.Ахиезер, С.В. Пелетминский // Журн. эксперим. и теорет. физики. — 1960. — Т.38, вып.6. — С.1316—1322.

1009. Пелетминский А.С. К теории пространственно-периодического конденсата в модели слабонеидеального бозе-газа / Пелетминский А.С., Пелетминский С.В., Слюсаренко Ю.В. // Теорет. и мат. физика. — 2000. — Т.125. — № 1. — С.152—176.
1010. Пелетминский С.В. Об уравнениях движения сингулярностей / С.В. Пелетминский, Э.Г.Петров, А.А. Яценко // Укр. физ. журн. — 1966. — Т.11. — №2. — С. 124—132.
1011. Пелетминский С.В. Влияние теплопроводности на высокочастотные свойства ферромагнетиков / С.В.Пелетминский, Э.Г. Петров // Физика твердого тела . — 1966. — Т.8. — №10. — С.2951—2957.
1012. Пелетминский С.В. Об уравнениях для матрицы плотности подсистем с конечным числом степеней свободы // С.В.Пелетминский, Э.Г. Петров. — Киев, 1968. — С. 1—11. — (Препр. / АН УССР. Ин-т теор. физики; ИТФ—68—20 Р).
1013. Пелетминский С.В. Гидродинамика сверхтекучей жидкости в модели со слабым взаимодействием / С.В.Пелетминский, Н.М.Лавриненко, Ю.В. Слюсаренко // Физика низких температур. — 1983. — Т.9. — № 8. — С.795—803.
1014. Пелетминский С.В. К теории релаксационных процессов в антиферромагнетиках / С.В.Пелетминский, Ю.В. Слюсаренко// Укр. физ. журн. — 1989. — Т.34. — №8. — С.1216—1219.
1015. Пелетминский С.В. Метод собственных функций интеграла столкновений Больцмана в кинетической теории длинноволновых флуктуаций / С.В. Пелетминский, Ю.В. Слюсаренко // Теорет. и мат. физика — 1996. — Т.106. — № 3. — С.469—488.
1016. Пелетминский А.С. О фазовых переходах в ферми-жидкости I. Переходы, связанные с нарушением вращательной симметрии в импульсном пространстве / А.С.Пелетминский, С.В.Пелетминский, Ю.В. Слюсаренко // Физика низких температур. — 1999. — Т.25. — №3. — С.211—221.
1017. Пелетминский А.С. О фазовых переходах в ферми-жидкости. II. Переход , связанный с нарушением трансляционной инвариантности / А.С.Пелетминский, С. В.Пелетминский, Ю.В.Слюсаренко // Физика низких температур. — 1999. — Т.25. — № 5. —С.417—431
1018. Пелетминский С.В. К теории кинетических уравнений для частиц, взаимодействующих с веществом / С.В.Пелетминский , А.Н. Тарасов // Укр. физ. журн. — Т.1981. — Т.26. — №3. — С.473—479.
1019. Боголюбов Н.Н.(мл.). К микроскопической теории сверхтекучих жидкостей / Н.Н.Боголюбов (мл.), М.Ю.Ковалевский , А.М.Курбатов , С.В. Пелетминский , А.Н. Тарасов // Успехи физ. наук. — 1989. — Т.159, вып.4. — С.585—620.