

**ВОВК**

**Руслан Володимирович** — член-кореспондент НАН України, декан фізичного факультету Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна

**ПОЙДА**

**Володимир Павлович** — доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри експериментальної фізики фізичного факультету Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна

**ЛИМАР**

**Валентин Іванович** — старший викладач кафедри фізичної оптики фізичного факультету Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна

## ФІЗИКИ ЗАЗИРНУЛИ... В ПРИВАТНЕ ЖИТТЯ ЕЛЕКТРОНІВ

### Нобелівська премія з фізики 2023 року

*Цього року Нобелівську премію з фізики присуджено трьом дослідникам: П'єру Агостіні (Pierre Agostini) з Університету штату Огайо (США), Ференцу Краушу (Ferenc Krausz) з Інституту квантової оптики Макса Планка та Мюнхенського університету Людвіга Максиміліана (Німеччина), а також Енн Л'Юїє (Anne L'Huillier) з Лундського університету (Швеція) за «експериментальні методи, які генерують атосекундні імпульси світла для вивчення динаміки електронів у матерії». Лауреати виконали основоположні фізичні експерименти, спрямовані на отримання гранично коротких лазерних імпульсів, що привело до зародження нового наукового напрямку — атосекундної фізики, метою якої є вивчення та розвиток методів вимірювання й контролю швидкоплинних явищ електронної динаміки в атомах речовини. З іншого боку, залишається актуальною більш технічна експериментальна проблема, пов'язана з генерацією окремих високоенергетичних атосекундних лазерних імпульсів, придатних для подальшого використання як джерела надшвидкої накачки досліджуваних зразків.*

**Ключові слова:** Нобелівська премія з фізики 2023 року, П'єр Агостіні, Ференц Крауш, Енн Л'Юїє, атосекундні лазерні імпульси, динаміка електронів, електрон-іонна реколізія.

**Атосекундна фізика.** Завдяки зусиллям трьох фізиків, П'єра Агостіні, Ференца Крауша та Енн Л'Юїє, які віднині вже здобули світове визнання, вдалося зазирнути в таємничене життя-буття електронів. Як зазначено у пресрелізі Нобелівського комітету, ці вчені розробили «експериментальні методи генерації атосекундних лазерних імпульсів для вивчення електронної динаміки всередині речовини». Науковий доробок цьогорічних нобелівських лауреатів з фізики «забезпечує людство новими інструментами для дослідження світу електронів усередині атомів чи молекул... із використанням надкоротких лазерних імпульсів, які застосовні для вимірювань швидких процесів електронного руху та обміну енергією».

Наукова спільнота так високо оцінила наукові здобутки П'єра Агостіні, Ференца Крауша і Енн Л'Юїє тому, що до їхніх відкриттів усе, що відбувається з електронами в речовині, було таємницею «за сімома печатками».

У 1925 р. фундатори сучасної квантової механіки Нільс Бор і Вернер Гейзенберг сформулювали концепцію квантового стрибка — практично миттєвого переходу електронів з одного енергетичного рівня на інший всередині збудженого атома. Тоді вважали, що експериментально «відстежити» процес такого переходу неможливо через його надзвичайно малу тривалість. Проте сьогодні у рамках атосекундної фізики, «занурившись» у дослідження поведінки електрона в речовині, світова наука отримала чимало можливостей для вивчення різноманітних фундаментальних фізичних процесів і явищ та створення новітніх технологій, які ще донедавна сприймалися як творча вигадка письменників-фантастів.

Усі ми знаємо, що об'єкт, який швидко рухається, дуже важко сфотографувати. Як правило, використовуючи звичайний спосіб фотозйомки, за допомогою оптичного чи цифрового фотоапарата ми отримуємо нечітке, змазане або ж розмите зображення предмета. Для того щоб отримати чітке зображення предметів, що рухаються з великою швидкістю, або для фіксації різних етапів процесів, що відбуваються дуже швидко, є спеціальні методи — або застосовують «швидкісні» фотокамери, або освітлюють об'єкт фотозйомки короткочасними стробоскопічними спалахами світла, щоб зробити його освітленим, видимим не весь час зйомки, а лише протягом деякого невеликого проміжку часу, меншого, ніж тривалість процесу, який потрібно сфотографувати.

Дещо подібну, але все-таки набагато складнішу проблему маємо і з електроном в атомі чи молекулі. Його швидкість руху становить більш як 50 км/с, а квантова природа цієї мікрочастинки принципово виключає можливість отримати будь-яке чітке зображення. Однак, використовуючи дуже короткі, атосекундні лазерні імпульси світла ( $1 \text{ as} = 10^{-18} \text{ c}$ ), фізикам вдається розрізнити окремі етапи процесу перебудови просторової структури електронної хмари під час переходу електрона всередині атома чи молекули речовини.

Отже, використання саме атосекундних лазерних імпульсів, як виявилось, є принципово



Фото: Ohio State University

### **П'єр Агостіні (Pierre Agostini) —**

*французько-американський фізик-експериментатор, відомий винаходом методу RABBIT для характеристики атосекундних світлових імпульсів, почесний професор Університету штату Огайо (США).*

*П'єр Агостіні народився в Тунісі 23 липня 1941 р. Ступінь бакалавра здобув у 1959 р. в національній військовій школі Притане в Ла-Флеш (Франція), потім вивчав фізику в Університеті Екс-Марсель, де згодом здобув ступінь магістра, а в 1968 р. — PhD ступінь з оптики за роботу, присвячену багаточастотним діелектричним фільтрам для ультрафіолету.*

*Після здобуття докторського ступеня до 2002 р. був дослідником у Центрі ядерних досліджень Сакле Комісаріату з атомної енергії Франції (CEA), працював у лабораторії Жерара Мейнфрея і Клода Мануса, досліджуючи багаточастотну іонізацію за допомогою потужного лазера. Саме там у 1979 р. вперше було спостережено надпорогову іонізацію в ксеноні. У 2001 р. Агостіні разом з Гармом Гертом Мюллером з Нідерландського фонду фундаментальних досліджень матерії (FOM) вдалося створити серію імпульсів тривалістю 250 атосекунд. У 2002–2004 рр. був запрошеним фахівцем у Брукгейвенській національній лабораторії (штат Нью-Йорк), а з 2005 р. став професором фізики в Університеті штату Огайо (США). У 2012 р. група вчених, до якої входив і Агостіні, вперше показала рух атомів усередині молекули за допомогою камери для надшвидкої зйомки.*

*П'єр Агостіні — член Оптичного товариства Америки (OSA) «за лідерство в розробленні інноваційних експериментів, які дають нове розуміння динаміки нелінійного відгуку атомів і молекул під дією сильних інфрачервоних лазерних імпульсів» (2008), лауреат премії Гюстава Рібо Французької академії наук (1995), премії Гей-Люссака—Гумбольдта (2003), премії Вільяма Меггерса зі спектроскопії Оптичного товариства Америки (2007).*

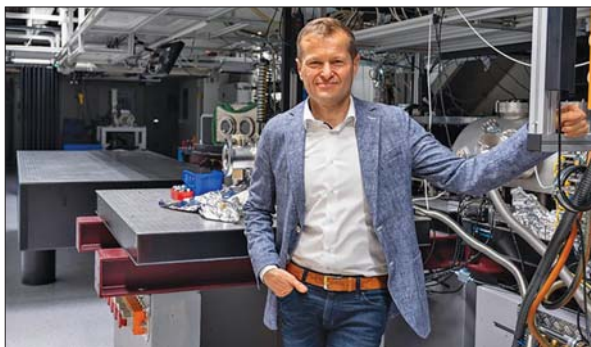


Фото: Daniel Gerst / Max Planck Institute of Quantum Optics

### **Ференц Крауш (Ferenc Krausz) —**

австрійський фізик угорського походження, один із піонерів атосекундної фізики.

Народився 17 травня 1962 р. у м. Мор в Угорщині. З 1981 по 1985 р. вивчав теоретичну фізику в Університеті Етвеша Лоранда та електротехніку в Технічному університеті Будапешта. Дослідницьку роботу розпочав в Інституті фізики Будапештського університету технології та економіки. Ступінь доктора філософії здобув у 1991 р. у Віденському технічному університеті (Австрія) і залишився працювати там спочатку доцентом, а з 1999 р. — професором кафедри електротехніки.

У 2003 р. Ференца Крауша було призначено директором Інституту квантової оптики Макса Планка (Німеччина), з 2004 р. він очолює також кафедру експериментальної фізики в Університеті Людвіга Максиміліана в Мюнхені.

У 2006 р. став співзасновником і одним з директорів Мюнхенського центру передової фотоніки (MAP). У 2015 р. заснував Центр перспективних лазерних застосувань у Мюнхені і став співзасновником Центру молекулярного дактилоскопування в Будапешті в 2019 р.

Ференц Крауш — іноземний член-кореспондент Австрійської академії наук (2003), іноземний член Угорської академії наук (2007), член Оптичного товариства Америки (OSA) (2009), іноземний член Російської академії наук (2011), член Європейської академії (2012), член Німецької національної академії наук Леопольдина (2016).

Він лауреат премії Фріца Кольрауша Австрійського фізичного товариства (1994), премії Карла Цейса (1998), премії Вітгенштейна (2002), премії Юліуса Шпрінгера з прикладної фізики (2003), премії Лейбніца (2006), премій з квантової електроніки IEEE (2006), премій за прогрес Королівського фотографічного товариства Великої Британії (2006), премії Отто Хана (2013), міжнародної премії короля Фейсала (2013), премії Clarivate Citation з фізики спільно з Полом Коркумом (2015), премії BBVA Foundation Frontiers of Knowledge Award (2022), премії Вольфа з фізики спільно з Енн Л'Юїє і Полом Коркумом за «новаторський внесок у науку про надшвидкі лазери та атосекундну фізику» (2022).

важливим для вивчення процесу електронного переходу.

Однак повернемося до витоків і з'ясуємо, звідки бере свій початок атосекундна фізика.

Історія атосекундної фізики розпочалася в другій половині 1980-х років в одній з лабораторій інституту, який пізніше став підрозділом Університету Парижа в Сакле у Франції. Там молода дослідниця Енн Л'Юїє разом зі своїми співробітниками вивчала процес багатофотонної іонізації атомів аргону. Дія потужного (близько  $10^{13}$  Вт/см<sup>2</sup>) лазерного інфрачервоного випромінювання приводила до перевипромінювання світла атомами газу на серії більш високих частот. Такий результат свідчив про народження фотонів, кожний з яких мав енергію більшу, ніж енергія світлових частинок, які «запускали» процес. Усі ці частоти були обертонами вихідної лазерної частоти, подібно до повторення ноти на музичному інструменті, але на вищих октавах. Група Енн Л'Юїє спільно з Полом Коркумом (Paul Corkum) із Національної дослідницької ради в Оттаві (Канада) невдовзі дала пояснення фізичного механізму, завдяки якому газ генерував вищі гармоніки.

Фактично це стало відкриттям нового фізичного явища, яке було названо **реколізією**. При взаємодії лазерної хвилі з атомом аргону її електричне поле, яке здатне іонізувати атом, звільняє електрон і віддаляє його від «батьківського» іона. Але якщо частота лазерного випромінювання є «правильно налаштованою», осцилююче поле лазерної хвилі швидко змінює свій напрямок на зворотний і штовхає електрон знову до «батьківського» іона, поки ці мікрочастинки ще не «забули» одна одну. При поверненні електрон має енергію більшу, ніж енергія, яку було витрачено під час іонізації. І саме ця енергія виділяється у вигляді фотонів більш високої частоти. Зрозумівши, що ці фотони можна використати для генерації екстремально коротких імпульсів світла, Енн Л'Юїє започаткувала програму наукових досліджень, спрямованих на підвищення інтенсивності випромінювання вищих гармонік.

Принципову схему процесу електронно-іонної реколізії наведено на рисунку. Слід зазна-



чити, що саме тоді, коли реколізія відбувається в межах одного напівперіоду світлової хвилі, і формується атосекундний імпульс світла ультрафіолетового діапазону.

Започатковані Енн Л'Юїє наукові дослідження в Університеті Париж-Сакле продовжувалися, і в 2001 р. дослідницька група, але вже під керівництвом П'єра Агостіні, вперше досягла успіху в перетворенні описаного вище світла обертонів в імпульси атосекундного масштабу. Агостіні зі співробітниками досліджував серії імпульсів із тривалістю кожного по 250 атосекунд. При цьому важливо підкреслити, що саме П'єр Агостіні розвинув експериментальну методику вимірювання тривалості імпульсів і вперше підтвердив, що вони відбуваються в атосекундному режимі.

А в 2003 р. наукова група під керівництвом Енн Л'Юїє, яка тоді вже працювала в Лундському університеті, змогла побити цей своєрідний світовий рекорд, створивши найменші на той час лазерні імпульси довжиною всього 170 атосекунд.

**Лазерний фокус.** Слід зазначити, що, попри значущість досягнення, всі перші успішні експерименти з генерації атосекундних лазерних імпульсів мали один істотний недолік — імпульси надто «поспішали» один за одним. Для використання таких імпульсів у дослідженнях з вивчення фізичних явищ атосекундного часового масштабу потрібно було навчитися генерувати окремі, так звані ізолювані, атосекундні імпульси. Техніку генерації дуже коротких лазерних імпульсів, тривалістю близько кількох тисяч атосекунд, тобто у фемтосекундному діапазоні, досліджував Ференц Крауш. Наприкінці 1990-х років у співпраці з групою Мауро Нісолі (Mauro Nisoli) з Політехнічного університету м. Мілан (Італія) йому вдалося згенерувати окремі ізолювані імпульси. В експериментах, проведених у 2001 р., було реалізовано генерацію високих гармонік з утворенням імпульсів із рекордною на той час тривалістю 650 атосекунд. Тобто йому вперше вдалося подолати бар'єр у 1000 атосекунд (1 ас = 1000 фс). Саме експериментальна методика Ференца Крауша стала



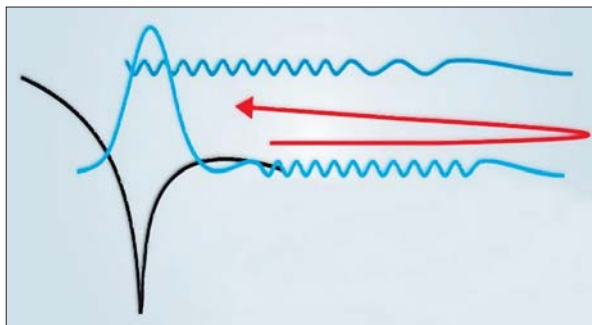
Фото: Lund University

**Енн Л'Юїє (Anne L'Huilier)** —

французько-шведський фізик, професор ядерної фізики в Лундському університеті (Швеція). Її експериментальні й теоретичні дослідження заклали основи нового наукового напрямку — атохімії.

Народилася 17 серпня 1958 р. в Парижі. У 1980 р. здобула ступінь бакалавра з математики у Вищій нормальній школі в Парижі, ступінь магістра з теоретичної фізики та математики — в Університеті П'єра і Марії Кюрі, потім почала працювати в Центрі ядерних досліджень Сакле Комісаріату з атомної енергії Франції (СЕА), де в 1986 р. захистила дисертацію на ступінь PhD, зосередившись на експериментальній фізиці. Як постдок працювала в Технологічному інституті Чалмерса (Гетеборг, Швеція), потім в Університеті Південної Каліфорнії (Лос-Анджелес, США), у 1993 р. була запрошеною фахівцем у Ліверморській національній лабораторії Лоуренса (Каліфорнія, США). З 1994 р. постійно працює в Лундському університеті (Швеція), з 1997 р. — на професорській посаді.

Енн Л'Юїє — член Американського фізичного товариства (1997), член Шведської академії наук (2004), член Нобелівського комітету з фізики (2007–2015), почесний доктор Університету П'єра та Марії Кюрі (2013), почесний доктор Єнського університету (2015), іноземний член Національної академії наук США (2018), член-кореспондент Австрійської академії наук (2021), член Оптичного товариства Америки (OSA) (2023). Має багато наукових нагород, зокрема вона — лауреат премії Йорана Густафссона з фізики (1998), премії Юліуса Шпрінгера (2003), премії L'Oréal — ЮНЕСКО «Для жінок у науці» (2011), премії Карла Цейса (2013), медалі Блеза Паскаля (2013), премії за фундаментальні аспекти квантової електроніки та оптики Європейського фізичного товариства (2019), премії Макса Борна Оптичного товариства Америки (2021), премії BBVA Foundation Frontiers of Knowledge Award (2022), премії Вольфа з фізики спільно з Ференцом Краушем і Полом Коркумом (2022).



Принципова схема електрон-іонної реколізації. На початковому етапі інтенсивний імпульс когерентного інфрачервоного світла «перекошує» атомарну чи молекулярну потенціальну яму (темна лінія), в якій перебуває електрон. Це дає можливість хвильовій функції зв'язаного електрона (синя лінія, гауссіан) тунелювати і трансформуватися у хвильовий пакет континууму. Пакет потрапляє під вплив циклу коливань лазерного поля за напівкласичною траєкторією (позначена червоним): спочатку він віддаляється від атома, а потім, навпаки, прискорюється зворотним полем у напрямку до нього, повторно взаємодіючи з «рідним» іоном. Концептуально процес є подібним до оптичної інтерферометрії: інтерферують дві взаємно когерентні частини хвильової функції електрона — у зв'язаному та вільному тунельно-іонізованому станах. Співвідношення довжин хвиль відповідає тому, яке показано на рисунку

першою придатною для застосування в дослідженнях фізичних процесів відповідного часового масштабу.

У наступні роки група Крауша успішно виконала ще кілька піонерських експериментів у галузі атосекундної фізики. Наприклад, дослідники вивчали швидкість атомарного фотоелектричного ефекту, коли світло вибиває електрони з атома. Розуміння того, що цей ефект досить складний і, відповідно, не є миттєвим, існувало у фізиці вже достатньо давно, але тільки в рамках атосекундної фізики з'явилася можливість здійснити вимірювання його реальної тривалості.

Було проведено експерименти, спрямовані на вивчення взаємодії світла не лише з окремими атомами, а й з молекулами чи навіть з рідинами і твердими тілами. Атосекундні імпульси дали можливість встановити, що від-

бувається в той момент, коли з молекули вибивається електрон і вона стає іонізованою: залишкові електрони молекули збурюються та перепорядковуються. За словами Мауро Нісолі, «така електронна перебудова всередині молекули відбувається набагато раніше, ніж ядра атомів, що складають молекулу, встигають відчути якісь зміни в цій електронній структурі».

Зараз вчені намагаються розширити сферу досліджень до атохімії: вони планують використати імпульси світла для стимулювання процесів формування та розриву хімічних зв'язків, їх певної упорядкованої послідовності, якщо неспонтанний перебіг таких процесів виявляється можливим.

**Про подальші перспективи використання атосекундних лазерів.** Наразі було б важко та необачно перелічувати всі можливості застосування винаходу й побудови атосекундних лазерів. Очевидно, що з плином часу вони набудуть більш чіткого статусу і дозволять зробити ще чимало добрих справ для людства на додаток до тих, про які вже було згадано вище.

Вже сьогодні атосекундні лазерні імпульси використовують для вивчення міграції електронів і змін електронної густини у складних молекулах під дією електромагнітного випромінювання, зокрема видимого світла. Атосекундні лазери ефективно застосовують у фотохімії, яка вивчає кінетику хімічних реакцій, що відбуваються під дією електромагнітного випромінювання.

Однак про одне з незвичних і певною мірою парадоксальних застосувань слід сказати окремо. Йдеться про створення нових провідників електрики. Так, за допомогою атосекундних лазерів можна зафіксувати, як речовина з діелектрика на нетривалий час перетворюється на провідник, а потім знову стає... діелектриком! Про такі метаморфози писали фантасти і мріяли вчені-романтики, а нині це реальність світової науки. Наприклад, якщо на кремній посвітити коротким лазерним імпульсом, він перетворюється з діелектрика на провідник. Коли імпульс зникає, відбувається зворотне «магічне» перетворення провідника на діелек-

трик. Незавжди передбачати, що таке «диво» може знайти широке й ефективне застосування для пришвидшення роботи різноманітних сучасних електронних гаджетів, а також для створення високошвидкісних оптико-електричних перемикачів.

Окремо варто відзначити один із потенційно пріоритетних медичних напрямів: атосекундні імпульси можна використовувати для ідентифікації молекул під час діагностування різноманітних захворювань, наприклад онкології легень. Однак ця можливість має поки що гіпотетичний характер і є скоріше темою для досліджень, тут не варто поспішати з обнадійливими прогнозами та обіцянками.

«Мотивація цих досліджень полягала в їх надзвичайно фундаментальному змісті — чи можемо ми створити короткі світлові імпульси і як ми зможемо їх використати? — сказала Енн Л'Юїє під час своєї пресконференції. — Потрібен був час для того, щоб зрозуміти можливість їх застосування у медицині, індустрії напівпровідників чи в хімії».

Отже, зараз ми вже можемо говорити про широкі та доволі привабливі перспективи застосування атосекундних лазерів. Вони будуть корисними в дослідженнях хімічних і біологічних процесів, у науці про матеріали, в усіх тих сферах, де постає завдання отримати знання про динаміку поведінки електронів усередині атомів чи молекул речовини, яка може перебувати в найрізноманітніших умовах.

**Деякі цікаві факти.** Енн Л'Юїє стала п'ятою жінкою, яка здобула Нобелівську премію з фізики. Раніше цю премію отримували Марія Склодовська-Кюрі (1903), Марія Гепперт-Маєр (1963), Донна Стрікленд (2018), Андреа Міа Гез (2020). «Це просто фантастика. Я читала лекцію, коли мені зателефонували, тому взяла слухавку лише з третього чи четвертого разу. Після того, як я дізналася про присудження премії, останні пів години лекції далися мені вкрай важко. Я не можу красиво говорити,

частково й тому, що вкрай зворушена цією новиною», — розповіла журналістам Енн Л'Юїє, коли дізналася про те, що стала нобелівським лауреатом.

Минулого року Енн Л'Юїє здобула також премію Вольфа з фізики, ставши другою жінкою в історії, яка отримала цю нагороду. Першою була американський фізик китайського походження Ву Цзяньсюн у 1978 р. «Гадаю, настав час жінкам отримувати більше таких відзнак. Я надавала підтримку та наставляла жінок протягом усієї своєї кар'єри, але особливо в останнє десятиліття. Думаю, що така допомога важлива, оскільки жінки у фізиці вразливіші, ніж чоловіки. На щастя, я бачу, що ці проблеми вирішуються», — зазначила Енн Л'Юїє в інтерв'ю для наукового журналу «Physics».

За словами вченої, на заняття фізикою її надихнули викладачі в магістратурі, зокрема Клод Коен-Таннуджі, лауреат Нобелівської премії з фізики за 1997 р.

У 2001 р. П'єр Агостіні зі співробітниками отримав серію імпульсів із тривалістю 250 атосекунд, у 2003 р. група Енн Л'Юїє побила цей рекорд, створивши найкоротший лазерний імпульс — 170 атосекунд, а в 2008 р. Ференц Крауш та його колеги з Інституту квантової оптики Макса Планка потрапили до Книги рекордів Гіннеса за генерацію найкоротшого спалаху світла, який тривав усього 80 атосекунд.

У лютому 2022 р. Енн Л'Юїє, Ференц Крауш і Пол Коркум отримали престижну премію Вольфа з фізики за новаторський внесок у науку про надшвидкі лазери та атосекундну фізику.

Після оголошення лауреатів Нобелівської премії з фізики за 2023 р. Ференц Крауш в ефірі радіо Deutschlandfunk заявив, що свою частину грошової винагороди він планує передати через некомерційну благодійну організацію Science4People, яку він створив минулого року, на відновлення українських шкіл, що постраждали внаслідок російської воєнної агресії.

Ruslan V. Vovk

*V.N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, Ukraine*

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9008-6252>

Volodimir P. Poyda

*V.N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, Ukraine*

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7970-7145>

Valentin I. Lyumar

*V.N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, Ukraine*

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5567-1512>

## PHYSICISTS PEEKED... INTO THE PRIVATE LIFE OF ELECTRONS

Nobel Prize in Physics 2023

This year the Nobel Prize in Physics was awarded to three researchers: Pierre Agostini from Ohio State University (USA), Ferenc Krausz from Max Planck Institute of Quantum Optics and Ludwig-Maximilians-Universität München (Germany), and Anne L'Huillier from Lund University (Sweden) “for experimental methods that generate attosecond pulses of light for the study of electron dynamics in matter”. The laureates conducted fundamental physical experiments aimed at obtaining extremely short laser pulses, which led to the emergence of a new scientific field – attosecond physics, the purpose of which is the study and development of methods for measuring and controlling the rapid electronic dynamics phenomena in the atoms of matter. On the other hand, a more technical experimental problem related to the generation of separate high-energy attosecond laser pulses, suitable for further use as sources of ultrafast pumping of the studied samples, remains relevant.

**Keywords:** Nobel Prize in Physics 2023, Pierre Agostini, Ferenc Krausz, Anne L'Huillier, attosecond laser pulses, electron dynamics, electron-ion recollision.

**Cite this article:** Vovk R.V., Poyda V.P., Lyumar V.I. Physicists peeked... into the private life of electrons. *Visn. Nac. Akad. Nauk Ukr.* 2023. (12): 26–32. <https://doi.org/10.15407/visn2023.12.026>