

Original article

In print article


<https://doi.org/10.26565/2222-5617-2023-39-06>

UDC 537.87

PACS numbers: 42.65.Ky; 42.65.Re

ФІЗИКА: ПОДІЇ ТА ІМЕНА

НОБЕЛІВСЬКА ПРЕМІЯ З ФІЗИКИ 2023

В.К. Бердута, Р.В. Вовк 

Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, майдан Свободи, 4, 61022 Харків, Україна

E-mail: rvvovk2017@gmail.com

Надійшла до редакції 12 жовтня 2023 р. Переглянуто 15 листопада 2023 р.

Прийнято до друку 17 листопада 2023 р.

Лауреатами Нобелівської премії з фізики 2023 року стали три дослідники: П'єр Агостіні (Університет штату Огайо, США), Ференц Крауш (Інститут квантової оптики Макса Планка і Мюнхенський університет Людвіга-Максиміліана, Німеччина) та Енн Л'Юїльє (Лундський університет, Швеція). Премію присуджено за розробку експериментальних методів, застосування яких дозволяє генерувати гранично короткі (атосекундні) лазерні імпульси світла для вивчення динаміки електронів у речовині. У статті подано відомості про науковий доробок цього річних нобелівських лауреатів, що «забезпечує людство новими інструментами для дослідження світу електронів усередині атомів чи молекул». Надано опис основоположних фізичних експериментів, якими лауреати започаткували новий науковий напрям — атосекундну фізику. За її розвитку світова наука отримала немало можливостей для вивчення різноманітних фундаментальних фізичних процесів і явищ, а також створення новітніх технологій, короткий огляд яких наведено в роботі. Надано опис відкритого лауреатами нового фізичного явища, яке було названо електронно-іонною реколізією.

Ключові слова: *Нобелівська премія з фізики 2023 року, атосекундна фізика, надкороткі лазерні імпульси, динаміка електронів, електронно-іонна реколізія.*

Як цитувати: *В.К. Бердута, Р.В. Вовк. Нобелівська премія з фізики 2023. Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Фізика». Вип. 39. 2023, 67–72. <https://doi.org/10.26565/2222-5617-2023-39-06>*

In cites: *V.K. Berduta, R.V. Vovk. Nobel prize in physics 2023. Journal of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series Physics. Iss. 39, 2023, 67–77. <https://doi.org/10.26565/2222-5617-2023-39-06> (in Ukrainian).*

ФІЗИКИ ЗАЗИРНУЛИ... У ПРИВАТНЕ ЖИТТЯ ЕЛЕКТРОНІВ

Два в одному?

Зусиллями трьох фізиків, П'єра Агостіні, Ференца Крауша та Енн Л'Юїльє, які вже віднині здобули світове визнання, вдалося зазирнути в утаємничене життя-буття електронів, а саме: вони створили надкороткі лазерні імпульси, які здатні відслідковувати та фіксувати процеси всередині атомів і молекул. Звісно, таке досягнення наукова спільнота світу удостоїла Нобелівської премії. Оцінка праці фізиків висока, адже донині все те, що відбувалося з електронами у речовині, перебувало під сьома печатками.

Щоб відкрити сакральні печатки, докладалося чимало зусиль не одним поколінням науковців, проте — марно, але край необхідно. Оскільки «занурившись» в дослідження поведінки електрона в речовині світова наука отримала б чимало можливостей, які ще донедавна вважалися творчою вигадкою письменників-фантастів.

І ось надзвичайна подія таки сталася й віднині є закономірним явищем фізики, яке з часом набуде, образно кажучи, такої ж звичності, як земне тяжіння.

Окрім того, вчені, торуючи шлях до мікросвіту, який, як відомо, має здатність ділитися до безкінечності, цілком ґрунтовно натякнули й на те, що час, як неперервна величина, також має приховані, ще малодосліджені властивості ділитися до безкінечності, утворюючи нові терміни такої одиниці як секунда. Словом, мали за мету одне, а натрапили фактично на два відкриття, від усвідомлення яких навіть переконаний прагматик може стати невинним романтиком, оскільки горизонти пізнання світу не очікувано стають широкими й ваблять кожного, обіцяючи нові диво-відкриття. Приміром, матерія — а відтепер і час — здрібнюється до безкінечності, залишаючи невтомному досліднику... порожнечу!

А все розпочалося з того, що вищезгаданий трійці фізиків, які невтомно працювали над створенням надзвичайно коротких імпульсів світла, які б можна було використовувати для вимірювання швидких процесів електронів всередині атомів та молекул. Щоб уявити складність задуму фізиків, варто нагадати, у світі електронів зміни відбуваються настільки блискавично, що їх вимірюють кількома десятими часток атосекунди. Слід пояснити, що атосекунда настільки коротка, що в секунді їх стільки ж, скільки секунд сплигло з того часу, коли створився Всесвіт!..

Авжеж, задум сміливий, але доволі складний і, на перший погляд, недосяжний. Та все ж таки, завдяки наполегливості, П'єру Агостіні, Ференцу Краушу та Енн Л'Юїльє цьогорічним лауреатам Нобелівської премії таки поталанило отримати ультракороткі

світлові імпульси, які вимірюються саме в атосекундах! Неймовірно, але, як то кажуть, факт.

Що ж далі? Насамперед світова наука отримала неймовірно, фантастичну можливість використовувати такі імпульси для отримання зображень процесів усередині... атомів та молекул. Тобто, надто мала величина — атосекунда — змогла прочинити важку браму за сімома печатками й перед науковцями світу відкрилися до цього часу невідомі та дивовижні процеси всередині атомів та молекул.

Цьогорічні лауреати провели експерименти, які демонструють метод отримання імпульсів світла, які є досить короткими, щоб зафіксувати зображення процесів всередині атомів і молекули. Природний часовий масштаб атомів неймовірно короткий. У молекулі атоми можуть рухатися і перетворюватися за мільйонні частки мільярдної частки секунди, фемтосекунди. Ці рухи можна вивчати за допомогою найкоротших імпульсів, які можна створити за допомогою лазера. Але коли цілі атоми рухаються, часовий масштаб визначається їхніми великими і важкими ядрами, які надзвичайно повільні порівняно з легкими та рухливими електронами.

Коли електрони рухаються всередині атомів або молекул, вони роблять це настільки швидко, що зміни розмиваються за фемтосекунду. У світі електронів положення та енергії змінюються зі швидкістю між одиницею і кілька сотень атосекунд, де атосекунда дорівнює одній мільярдній мільярдній секунди. Атосекундні імпульси дають змогу виміряти час, який потрібен електрону, щоб відтягнутися від атома, і перевірити, як час, який на це потрібний, залежить від того, наскільки міцно зв'язаний електрон з ядром атома. Можна реконструювати, як коливається розподіл електронів з одного боку в інший або з іншого місця в інше в молекулах і матеріалах; раніше їхня позиція могла бути визначена лише як середне.

Та це лише перший крок, ступивши який, вже неможливо зупинитися на шляху до визначеної мети. Образно кажучи, ледь прочинена брама у світ атомів та молекул дала можливість фізикам П'єру Агостіні, Ференцу Краушу та Енні Л'Юїльє не лише побачити на власні очі те, про що мріяли філософи античності, не кажучи вже про плеяду батьків-засновників квантової механіки, а й зафіксувати все те, що відбувається всередині атома та молекул.

За рахунок чого їм це вдалося?! Вони розробили методи генерації надзвичайно коротких імпульсів світла. Вони настільки короткі, що вимірюються, як вже було вище зазначено, атосекундами — це свого роду світовий рекорд часу. І саме завдяки надто короткому проміжку секунди, вчені отримали можливість фільмувати поведінку електрона у речовині.

Наразі важко переоцінити це досягнення. Можна бути впевненим, що з плином часу відкриття надаватиме все нові й нові можливості для науки та різних сфер виробництва. Саме на цьому й наголосили представники комітету Нобелівської премії: «Три лауреати Нобелівської премії з фізики 2023 року отримали визнання за їхні експерименти, які дали людству нові інструменти для дослідження світу електронів усередині атомів та молекул. Вони продемонстрували спосіб створення надзвичайно коротких імпульсів світла, які можуть бути використані для вимірювання швидких процесів, за яких електрони переміщуються або змінюють енергію», — наголошується у прес-релізі Нобелівського комітету. За словами експертів, відкриття лауреатів не лише допоможе науці розкривати механізми, керовані електронами, а й застосовуватиметься на практиці в електроніці, де важливі розуміння та контроль за поведінкою електронів у матеріалі, а також у медицині, де під час діагностування з метою розпізнавання молекулярного складу, можна буде використовувати атосекундні імпульси.

НЕ СТАВСЯ ДО СЕКУНД ЗВЕРХНЬО

Отже, коли інтрига винаходу розкрита, справедливо було б, бодай стисло, розповісти про тернистий шлях до мети трьох науковців. З чого все розпочиналося? Що саме надихнуло на пошуки, умови яких не були такими обнадійливими?

Енн Л'Юїльє є професором атомної фізики Лундського університету (Швеція). На початку наукової діяльності вона вивчала теоретичну фізику та математику, але пізніше змінила напрямок на експериментальну фізику. У 1987 році Енн Л'Юїльє виявила, що при проходженні інфрачервоного лазерного випромінювання через благородний газ (група хімічних елементів) з'являється безліч різних обертонів світла. Кожен з них є світловою хвилею із заданою кількістю циклів для кожного циклу лазерного променя. Вони викликані взаємодією лазерного світла з атомами газу. Саме він дає електронам додаткову енергію, яка випромінюється у вигляді світла.

Це спостереження надихнуло Енн Л'Юїльє на подальше дослідження цього явища, заклавши основу для подальших відкриттів. У 2003 році вона разом зі своєю групою здолала світовий рекорд, створивши найменший лазерний імпульс довжиною всього 170 атосекунд.

Пер Агостіні – фізик-експериментатор. Він працює в університеті штату Огайо (США). У 2001 році Агостіні досліджував серію послідовних світлових імпульсів, кожен з яких тривав лише 250

атосекунд.

Ференц Крауш займається експериментальною фізикою у Мюнхенському університеті Людвіга-Максиміліана. Вивчав теоретичну фізику, електротехніку. Разом з групою вчених згенерував та виміряв перший атосекундний світловий імпульс, таким чином зробив власний внесок у зародження нової галузі фізики – атофізики. У ході експерименту було виділено одиночний світловий імпульс тривалістю 650 атосекунд.

ЯК ФІЛЬМУЄТЬСЯ КІНО ПРО ЖИТТЯ ЕЛЕКТРОНА В РЕЧОВИНІ?

Слід нагадати, що у світі електронів зміни відбуваються за надзвичайно короткий проміжок часу, а саме: за кілька десятих атосекунди, а це (тільки уявіть!) становить одну квінтільйонну частину секунди, або ж 0,000000000000000001 секунди. Погодьтеся, масштаби та цифри вражають! Окрім того, в таких, надто стислих проміжках часу, варто виконати необхідну роботу, яка б пролила світло на чимало темних плям у фізиці.

То ж щоб зафіксувати зміни електронів, методів, які існували в арсеналі науки, було недостатньо. Через те перед лауреатами Нобелівської премії постало завдання знайти спосіб генерації надзвичайно коротких імпульсів світла, які можна було б за їхнім переконанням, використовувати для спостереження руху електронів в атомах або молекулах у режимі реального часу. Це відіграє ключову роль у розумінні загальних фізичних явищ або хімічних реакцій на атомному рівні. Такі атосекундні імпульси можна використовувати для створення своєрідної відеокамери для запису фільмів усередині атомів та молекул у мегауповільненому режимі.

СВЯЩЕННИЙ ГРААЛЬ У ФІЗИЦІ ЗНАЙШЛИ?

«Абсолютно всі процеси у світі розпочинаються з електронного переходу. Це священний Грааль, завдяки якому ми зможемо контролювати початковий час молекулярної реакції, а отже, у майбутньому контролювати і самі реакції», – мовила Енн Л'Юїльє під час церемонії оголошення результатів. — «Однак для того, щоб зняти такий фільм, потрібно було перш за все придумати такий принцип, за допомогою якого можна висвітлити атоми в молекулах. Щоб це обернулося реальністю, а не мрією варто було опанувати таку операцію як швидко вмикати та вимикати світло. Складність полягає в тому, що ні людина, ні механіка, а ні електроніка не спроможні опанувати таку швидкість, щоб так швидко включити і вимкнути світло. Для цього потрібні певні пристрої. І навіть уся та електроніка, яка була винайдена та впроваджена на той час, не могла забезпечити

необхідної тривалості імпульсів. Потрібен був новий принцип отримання таких коротких спалахів світла. Нам на допомогу прийшли потужні лазери, які можуть іонізувати атоми».

Приміром, щоб сфотографувати мотоцикліста під час перегонів та при подоланні перешкод на трасі й отримати нерозпливчаті, позбавлені чіткості світлини, потрібно встановити на апаратурі надто коротку витримку. Нагадаємо, що витримка — це період часу, на який буде відкриватися затвор фотоапарата під час зйомки. У ці частки секунд світло отримує доступ до матриці апарату. Якщо вона занадто тривала, то рухомі люди або предмети в кадрі вийдуть «змазаними», мають втрачену чіткість, розпливчатість. Саме в цьому й полягало ноу-хау лауреатів. Вони висвітлити надто короткими спалахами речовину і зробили знімок електрона. Також можна запустити хімічну реакцію й зафіксувати відео про рух електронів — і все це стало можливим завдяки атосекундним лазерам.

«Камера з короткою витримкою є найближчою звичною аналогією основної концепції атосекундної фізики. Коротка витримка гарантує, що матриця камери піддається впливу зовнішнього світу тільки протягом короткого інтервалу часу, що дозволяє робити чіткі фотографії об'єктів, що швидко рухаються. Однак навіть мікросекундний час експозиції найшвидшої у світі камери, здатної «заморозити рух» кулі, в мільярд разів повільніший, щоб зафіксувати електронні рухи всередині атомів, молекул чи наносхем», — розповів професор Крауш про свої дослідження виданню «GlobeNews».

Він упевнений, що вивчення та управління рухами електронів у перспективі дозволить довести швидкість обробки інформації до швидкості світла.

ТО ПРОВІДНИК, ТО ІЗОЛЯТОР, А МОЖЕ ЛКУВАТИ ОНКОЛОГІЮ

Наразі важко та необачно перелічувати усі можливості застосування цього винаходу. Можна бути впевненим, що з часом вони набудуть чіткого й непохитного статусу й зроблять чимало добрих справ для людства.

Проте про одне із незвичних, можна сказати, парадоксальних застосувань, слід стисло розповісти. Мова йдеться про створення нових провідників електрики. Так, за допомогою атосекундних лазерів можна зафіксувати, як речовина з ізолятора може на нетривалий час стати провідником, а потім знову обернутися...ізолятором! Про такі метаморфози писали письменники-фантасти та мріяли вчені-романтики, а нині — це реальність світової науки.

Приміром, якщо на кремній посвітити коротким лазерним імпульсом, він перетворюється з діелектрика на провідник. Коли імпульс зникає, то відбувається

таке собі магічне перетворення провідника в діелектрик. Таке «диво» може знайти широке та ефективне застосування в роботі комп'ютерів з метою пришвидшення їхньої роботи.

За допомогою цього відкриття можна керувати хімічною реакцією, якщо знати, як електрон зміщується з одного кінця молекули до іншого. За допомогою спалахів світла можна направити електрон у потрібні місця молекули. Виконуючи таку роботу, можна легко та суттєво покращити роботу сонячних батарей.

Варто зазначити один з потенційно пріоритетних напрямків: атосекундні імпульси можна використовувати для ідентифікації молекул під час діагностування різних захворювань, наприклад, онкології легень.

Однак, ця можливість має гіпотетичний, скоріше дослідницький статус. Й не варто квапитися з доволі переконливими прогнозами та обіцянками. Попереду ще чимало дослідницької роботи. Це пояснюється тим, що ми має справу з дослідними зразками техніки, а відтак говорити про цілеспрямоване застосування ще рано.

Тим часом, уже нині атосекундні лазери можна застосовувати у дослідженнях під час вивчення будь-яких хімічних та біологічних процесів, у науці про матеріали, у всіх сферах, де постає завдання отримати інформацію про динаміку електронів, зокрема, як вони поведуться за різних умов.

ХТО ВОНИ, ЛАУРЕАТИ?

Парижанка Енн Л'Юїльє стала п'ятою жінкою, яка отримала Нобелівську премію з фізики. Раніше премії удостоїлися Марія Склодовська-Кюрі (1903), Марія Гепперт-Майер (1963), Донна Стрікланд (2018) та 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 півгодини лекції далися мені вкрай важко. Я не вмію красиво говорити, частково тому, що я вкрай зворушена цією новиною», — розповіла журналістам Л'Юїльє, коли дізналася про те, що стала Нобелівським лауреатом.

Це не єдина її нагорода: у 2022 році Л'Юїльє здобула премію Вольфа з фізики, ставши другою жінкою в історії, яка заслужила цю нагороду. Першою була американський фізик китайського походження Ву Цзяньсюн у 1978 році.

«Гадаю, що настав час жінкам отримувати більше таких призів. Я надавала підтримку та наставництво жінкам протягом усієї своєї кар'єри, але особливо в останнє десятиліття. Я думаю, що така допомога важлива, тому що жінки у фізиці вразливіші, ніж

чоловіки. На щастя, я бачу, що ці проблеми вирішуються», – розповіла Енн в інтерв'ю для наукового журналу «Physics».

За словами вченої, на заняття надшвидкою фізикою її надихнули викладачі у магістратурі, включаючи лауреата Нобелівської премії з фізики Клода Коен-Таннуджі.

Нині Л'Юїльє працює в університеті Лунда у Швеції. Вона очолює групу атосекундної фізики, яка вивчає рух електронів у реальному часі. У 2003 році вона та її група побили світовий рекорд з найменшим лазерним імпульсом у 170 атосекунд.

Наступний лауреат – П'єр Агостіні. Він теж народився у Франції. 1968 року вчений отримав докторський ступінь в Університеті Екс-Марсель. Після цього він став науковим співробітником у Центрі Париж-Саклі Французької комісії з альтернативної енергетики та атомної енергії (CEA), де обіймав різні посади до 2002 року. Потім він працював як запрошений спеціаліст в Університеті Південної Каліфорнії, а в 2005 році Агостіні був прийнятий в Університет штату Огайо професором фізики.

У 2001 році Агостіні вдалося створити та дослідити серію послідовних світлових імпульсів, у яких кожен імпульс тривав лише 250 атосекунд. У 2012 році він увійшов до групи вчених з університетів штатів Огайо та Канзас, якій вдалося вперше відобразити рух атомів усередині молекули за допомогою камери для надшвидкої зйомки. Він також винайшов метод «RABBIT» для характеристики атосекундних світлових імпульсів.

І ще один лауреат — Ференц Крауш. Він народився в Угорщині. Закінчив Будапештський технологічний університет і залишився в ньому професором на довгі роки, після чого 2003 року був призначений директором Інституту квантової оптики Макса Планка в Гарлінгу (Німеччина).

Крауш та його дослідницька група першими створили та виміряли світловий атосекундний імпульс. Це започаткувало атосекундну фізику.

У 2008 році Крауш та його колеги з Інституту квантової оптики Макса Планка потрапили до Книги рекордів Гіннеса за найкоротший спалах світла у світі. Згенерований ними світловий імпульс тривав всього 80 атосекунд, або 0,0000000000000000008 секунди.

У лютому 2022 року професор Крауш отримав престижну премію Вольфа з фізики за новаторський внесок у науку про надшвидкі лазери та атосекундну фізику. Грошовий приз \$100 тисяч він передав заснованій ним благодійній організації Science4People.

Фізична сутність вирішуваної лауреатами Нобелівської премії 2023 року наукової проблеми та їх особистий внесок у її становлення та вивчення

відображені в публікаціях [1–37].

КОНФЛІКТ ІНТЕРЕСІВ

Автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів.

REFERENCES

1. W. Heisenberg. *Z. Physik*, 33, 879 (1925). <https://doi.org/10.48550/arXiv.2108.03119>
2. <https://www.nobelprize.org/prizes/chemistry/1999/summary>
3. A. L'Huillier, L.A. Lompre, G. Mainfray and C. Manus. *Phys. Rev. Lett.*, 48, 1814 (1982). <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.48.1814>
4. M. Ferray, A. L'Huillier, X.F. Li, L.A. Lompre, G. Mainfray and C. Manus. *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.*, 21, L31 (1988).
5. T.W. Hänsch. *Opt. Commun.*, 80, 71 (1990).
6. Gy. Farkas and Cs. Tóth. *Phys. Lett. A*, 168, 447 (1992).
7. S.E. Harris, J.J. Macklin and T.W. Hänsch. *Opt. Commun.*, 100, 487 (1993).
8. A. L'Huillier, K.J. Schafer and K.C. Kulander. *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.*, 24, 3315 (1991). <https://doi.org/10.1088/0953-4075/24/15/004>
9. J.L. Krause, K.J. Schafer and K.C. Kulander. *Phys. Rev. Lett.*, 68, 3535 (1992). <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.68.3535>
10. K.C. Kulander, K.J. Schafer and J.L. Krause. *Dynamics of Short-Pulse Excitation, Ionization and Harmonic Conversion, Proceedings of a NATO Advanced Research Workshop on SILAP (Super-Intense Laser-Atom Physics)*, 12 (13), eds. B. Piraux, A. L'Huillier and K. Rzazewski, Plenum Press, New York (1993).
11. P. Agostini, F. Fabre, G. Mainfray, G. Petite and N.K. Rahman. *Phys. Rev. Lett.*, 42, 1127 (1979). <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.42.1127>
12. P. B. Corkum. *Phys. Rev. Lett.* 71, 1994 (1993). <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.71.1994>
13. A. McPherson, G. Gibson, H. Jara, U. Johann, T.S. Luk, I.A. McIntyre, K. Boyer and C.K. Rhodes. *J. Opt. Soc. Am.*, B 4, 595 (1987). <https://opg.optica.org/josab/abstract.cfm?URI=josab-4-4-595>
14. M. Lewenstein, Ph. Balcou, M. Yu. Ivanov, A. L'Huillier and P.B. Corkum. *Phys. Rev. A* 49, 2117 (1994). <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.49.2117>
15. P. Antoine, A. L'Huillier and M. Lewenstein. *Phys. Rev. Lett.*, 77, 1234 (1996). <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.77.1234>
16. P. Salières, A. L'Huillier, P. Antoine and M. Lewenstein. *ArXiv quantph/9710060* (1997). <https://doi.org/10.48550/arXiv.quant-ph/9710060>
17. M. Bellini, C. Lyngå, A. Tozzi, M.B. Gaarde, T.W. Hänsch, A. L'Huillier, and C.-G. Wahlström. *Phys. Rev. Lett.*, 81, 297 (1998). <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.81.297>
18. J.M. Schins, P. Breger, P. Agostini, R.C. Constantinescu, H.G. Muller, G. Grillon, A. Antonetti and A. Mysyrowicz. *Phys. Rev. Lett.*, 73, 2180 (1994). <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.73.2180>
19. P.B. Corkum, N.H. Burnett and M.Y. Ivanov. *Opt. Lett.*, 19, 1870 (1994). <https://doi.org/10.1364/OL.19.001870>
20. K.J. Schafer and K.C. Kulander. *Phys. Rev. Lett.*, 78, 638 (1997). <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.78.638>

21. M. Nisoli, S. De Silvestri, O. Svelto, R. Szipöcs, K. Ferencz, Ch. Spielmann, S. Sartania and F. Krausz. *Opt. Lett.*, 22, 522 (1997). <https://doi.org/10.1364/OL.22.000522>
22. Ch. Spielmann, N.H. Burnett, S. Sartania, R. Koppitsch, M. Schnürer, C. Kan, M. Lenzner, P. Wobrauschek and F. Krausz. *Science*, 278, 661 (1997). <https://doi.org/10.1126/science.278.5338.661>
23. P.M. Paul, E.S. Toma, P. Breger, G. Mullot, F. Augé, Ph. Balcou, H.G. Muller and P. Agostini. *Science*, 292, 1689 (2001). <https://doi.org/10.1126/science.1059413>
24. M. Hentschel, R. Kienberger, Ch. Spielmann, G.A. Reider, N. Milosevic, T. Brabec, P. Corkum, U. Heinzmann, M. Drescher and F. Krausz. 414, 509 (2001). <https://doi.org/10.1038/35107000>
25. M. Schultze, M. Fiess, N. Karpowics, J. Gagnon, M. Korbman, M. Hofstetter, S. Neppl, A.L. Cavalieri, Y. Komninos, Th. Mercouris, C.A. Nicolaides, R. Pazourek, S. Nagele, J. Feist, J. Burgdörfer, A.M. Azzeer, R. Ernstorfer, R. Kienberger, U. Kleineberg, E. Goulielmakis, F. Krausz and V.S. Yakovlev. *Science*, 328, 1658 (2010). <https://doi.org/10.1126/science.1189401>
26. L.R. Moore, M.A. Lysaght, J.S. Parker, H.W. van der Hart and K.T. Taylor. *Phys. Rev., A* 84, 061404(R) (2011). <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.84.061404>
27. J.M. Dahlström, T. Carette and E. Lindroth. *Phys. Rev. A* 86, 061402(R) (2012). <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.86.061402>
28. J. Feist, O. Zatsarinny, S. Nagele, R. Pazourek, J. Burgdörfer, X. Guan, K. Bartschat and B.I. Schneider. *Phys. Rev., A* 89, 033417 (2014). <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.89.033417>
29. M. Isinger, R.J. Squibb, D. Busto, S. Zhong, A. Harth, D. Kroon, S. Nandi, C.L. Arnold, M. Miranda, J.M. Dahlström, E. Lindroth, R Feifel, M. Gisselbrecht and A. L'Huillier. *Science*, 358, 893 (2017). <https://doi.org/10.1126/science.aao7043>
30. A. Marian, M.C. Stowe, J.R. Lawall, D. Felinto and J. Ye. *Science*, 306, 2063 (2004). <https://doi.org/10.1126/science.1105660>
31. J.L. Miller. *Physics Today*, 71 (1), 18 (2018). <https://doi.org/10.1063/PT.3.3809>
32. I. Jordan, M. Huppert, D. Rattenbacher, M. Peper, D. Jelovina, C. Perry, A. von Conta, A. Schild and H.J. Wörner. *Science*, 369, 974 (2020). <https://doi.org/10.1126/science.abb0979>
33. A.L. Cavalieri, N. Müller, Th. Uphues, V.S. Yakovlev, A. Baltuška, B. Horvath, B. Schmidt, L. Blümel, R. Holzwarth, S. Hendel, M. Drescher, U. Kleineberg, P.M. Echenique, R. Kienberger and F. Krausz. *Nature*, 449, 1029 (2007). <https://doi.org/10.1038/nature06229>
34. M. Zigman, M. Huber, K. Kepesidis, L. Voronina, F. Fleischmann, E. Fill, J. Hermann, I. Koch, T. Kolben, G.B. Schulz, F. Jokish, N. Reinmuth, W. Gesierich, J. Behr, N. Harbeck, M. Reiser, C.G. Stief and F. Krausz. *Ann. Oncol.*, 33, S580 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.annonc.2022.07.122>
35. I.P. Christov, R. Bartels, H.C. Kapteyn and M.M. Murnane. *Phys. Rev. Lett.*, 86, 5458 (2001). <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.86.5458>
36. P. Eckle, A.N. Pfeiffer, C. Cirelli, A. Staudte, R. Dörner, H.G. Muller, M. Büttiker and U. Keller. *Science*, 322, 1525 (2008). <https://doi.org/10.1126/science.1163439>
37. R. Borrego-Varillas, M. Lucchini and M. Nisoli. *Rep. Progr. Phys.*, 85, 066401 (2022). <https://doi.org/10.1088/1361-6633/ac5e7f>

NOBEL PRIZE IN PHYSICS 2023

V.K. Berduta, R.V. Vovk

V.N. Karazin Kharkiv National University, 4 Svobody Sq., 61022 Kharkiv, Ukraine
E-mail: rvvovk2017@gmail.com

Received on October 12, 2023. Reviewed on November 15, 2023.
Accepted for publication on November 17, 2023.

The laureates of the 2023 Nobel Prize in Physics are three researchers: Pierre Agostini (The Ohio State University, USA), Ferenc Krausz (Max Planck Institute of Quantum Optics, Garching and Ludwig-Maximilians-Universität München, Germany), and Anne L'Huillier (Lund University, Sweden). The prize was awarded for developing experimental methods that allow the generation of extremely short (attosecond) laser light pulses to study the dynamics of electrons in matter. The paper presents information about the scientific achievements of this year's Nobel laureates, which "give humanity new tools for exploring the world of electrons inside atoms and molecules." The paper describes the fundamental physical experiments that launched the new scientific field of attosecond physics. With its development, world science has gained many opportunities to study various fundamental physical processes and phenomena, as well as to create cutting-edge technologies, a brief overview of which is provided in the paper. A description of the new physical phenomenon discovered by the laureates, which was called electron-ion recollision, is given.

Key words: *Nobel Prize in Physics 2023, attosecond physics, ultrashort laser pulses, electron dynamics, electron-ion recollision.*