



НЕГРІЙКО

Анатолій Михайлович — член-кореспондент НАН України, завідувач відділу лазерної спектроскопії Інституту фізики НАН України



ЯЦЕНКО

Леонід Петрович — академік НАН України, завідувач відділу когерентної і квантової оптики Інституту фізики НАН України

НОВІ ІНСТРУМЕНТИ, СТВОРЕНІ СВІТЛОМ

Нобелівська премія з фізики 2018 року

2 жовтня Нобелівський комітет при Королівській шведській академії наук оголосив рішення про присудження Нобелівської премії з фізики в 2018 р. трьом ученим, які працюють у галузі лазерної фізики. Половина премії дісталася американському досліднику Артуру Ашкіну (Arthur Ashkin) за «створення оптичного пінцета і його застосування в біологічних системах». Другу половину премії поділили між собою французький фізик Жерар Муру (Gérard Mourou) і канадська дослідниця Донна Стрікленд (Donna Strickland) «за метод генерації високоінтенсивних ультракоротких оптичних імпульсів».

Нобелівську премію з фізики 2018 року присуджено за проривні винаходи трьом ученим, які працюють у галузі лазерної фізики: Артуру Ашкіну (Arthur Ashkin) — за оптичні пінцети та їх застосування до біологічних систем, а також Жерару Муру (Gérard Mourou) і Донні Стрікленд (Donna Strickland) — за метод генерації високоінтенсивних ультракоротких оптичних імпульсів.

Артур Ашкін у віці 96 років став найстаршим за всю історію нобелівським лауреатом, а Донна Стрікленд — лише третьою за всю історію жінкою, удостоєною Нобелівської премії у галузі фізики. До того ж Донну Стрікленд було відзначено премією фактично за першу в її житті наукову роботу, опубліковану разом з її науковим керівником Жераром Муру в 1985 р.

Хто уважно стежить за рішеннями Нобелівського комітету, легко помітить, що лазер часто фігурує в роботах, за які присуджують цю високу нагороду, як інструмент, за допомогою якого було відкрито гравітаційні хвилі, створено мікроскоп надвисокої роздільної здатності, охолоджено до наднизьких температур атоми, здійснено маніпулювання окремими атомами та фотонами, надано метрологам нові методи вимірювання оптичних частот — перелік можна продовжувати й далі.

Що ж нового принесли людству нобелівські лауреати 2018 року? Як змінилося наше життя з появою цих проривних відкриттів?

Артур Ашкін, багаторічний співробітник Лабораторії Белла* у м. Холмдел (США), став дев'ятим нобелівським лауреатом, який працював у стінах цієї відомої лабораторії. Він народився 2 вересня 1922 р. у Нью-Йорку, в сім'ї вихідців з України з єврейськими коренями: його батько, Ісидор Ашкін (уроджений Ашкіназі), народився в Одесі і в 1909 р. емігрував разом зі своїм братом з Києва до США, а мати, Анна Ашкін, народилася у Східній Галичині.

Після закінчення школи у 1940 р. Артур Ашкін почав навчатися в Колумбійському університеті (Columbia University) та одночасно працював техніком у Колумбійській радіаційній лабораторії (Columbia's Radiation Lab), в якій розробляли магнетрони для армії. Тоді йшла Друга світова війна, і на другому курсі Артура Ашкіна призвали на військову службу, але він був переведений до резерву і продовжив у лабораторії Колумбійського університету роботу зі створення магнетрона для військових радарних установок.

Після закінчення війни Артур Ашкін завершив навчання у Колумбійському університеті, де в 1947 р. отримав ступінь бакалавра, а потім продовжив навчання на відділенні ядерної фізики Корнельського університету (Cornell University). Одним із його викладачів був знаменитий Річард Фейнман, майбутній нобелівський лауреат. У 1952 р. Артур Ашкін здобув ступінь доктора філософії Корнельського університету і того ж самого року розпочав свою 40-річну кар'єру в Lucent Technologies (яка пізніше увійшла до Bell Telephone Laboratories). Спочатку він працював у галузі мікрохвильового випромінювання, а в 1960–1961 рр. зацікавився лазерами і з 1963 р. очолив відділення лазерних досліджень. Його роботи й опубліковані в цей період статті стосувалися нелінійної оптики, оптичних волокон, параметричних генераторів і параметричних підси-

лювачів. Артур Ашкін з колегами зробив перші спостереження генерації лазерних гармонік, параметричного підсилення, ініціював дослідження нелінійно-оптичних явищ в оптичних волокнах і виявив фоторефракційний ефект, який сам пізніше називав своїм першим відкриттям. У 1967 р. він перейшов до лабораторії Bell Laboratories в м. Холмдел у Нью-Джерсі, де зайнявся розробленням лазерних пасток. У 1992 р. Артур Ашкін вийшов на пенсію, але продовжував брати участь у роботах лабораторії Bell Labs аж до її закриття в 2006 р.

Артуру Ашкіну належать слова: «Всі вивчали лазер. Я почав лазером працювати». На початку 1970-х років Артур Ашкін започаткував систематичні дослідження за допомогою лазера тиску світла — явища, теоретично передбаченого Дж. Максвеллом у другій половині XIX ст. та експериментально підтвердженого П.М. Лебедевим у 1900 р. Після винаходу лазерів, які дали можливість створювати потужні колімовані світлові пучки з добре контрольованими параметрами, вивчення тиску світла вийшло на новий рівень, значною мірою завдяки піонерським роботам Артура Ашкіна. Як результат, сьогодні в науковому середовищі багато хто вважає його батьком використання тиску лазерного випромінювання.

У своїх перших роботах з цього напрямку Артур Ашкін досліджував світловий тиск сфокусованого лазерного випромінювання на прозорі сферичні частинки розміром декілька мікрометрів. І хоча механізм тиску світла був загалом відомий, у його експериментах було виявлено нові закономірності, що стали основою для винаходу нового інструмента для маніпулювання об'єктами мікронного та субмікронного розміру — лазерного пінцета. Так, у першій його публікації на цю тему 1970 р. [1] було виявлено, що прозорі малі латексні сфери у воді, потрапляючи на край лазерного пучка, що поширювався горизонтально, переміщувалися до осі пучка — туди, де інтенсивність світла була максимальною. Пояснення, дане автором, ґрунтувалося на врахуванні неоднорідного поперечного розподілу інтенсивності світла в лазерному пучку, і проста схема заломлення

* Bell Laboratories, скорочено Bell Labs; колишні назви — AT&T Bell Laboratories, Bell Telephone Laboratories. У минулому Bell Labs була американською корпорацією, з 1996 р. стала дослідницьким підрозділом Lucent Technologies. Нині Bell Labs є дослідницьким центром корпорації Alcatel-Lucent.

світла латексною сферою, яка мала показник заломлення більший, ніж вода, показувала, що в такому пучку виникає сила, напрямлена по градієнту інтенсивності, яка і спрямовувала сферу на вісь пучка. На сферу діяла також сила, пов'язана з відбиванням і розсіюванням світла поверхнею сфери — неважко зрозуміти, що ця сила діяла у напрямі поширення лазерного пучка, вздовж його осі. Внаслідок дії цих двох сил сфера потрапляла у пастку — захоплювалася дією поперечної сили на осі пучка і притискала тиском світла, спричиненим розсіюванням на сфері, до прозорого вікна оптичної кювети, крізь яку поширювався лазерний промінь.

Проте для маніпулювання мікросферою, тобто для переміщення її в усіх напрямках, така схема була недостатньою. Тому в тій самій роботі [1] Артур Ашкін запропонував і реалізував схему утримання прозорої сфери двома сфокусованими лазерними пучками. Дійсно, якщо розглянути сили, що діють на сферу у сфокусованому пучку, можна легко помітити, що сила, яка діє у поздовжньому напрямі, спричинена в основному розсіюванням світла і пропорційна його інтенсивності після фокуса лінзи, де пучок починає розходитися, зменшуватиметься в міру віддалення латексної мікрочастинки від фокуса. Якщо назустріч першому пучку спрямувати такий самий лазерний пучок, сфокусований на спільній осі у точку, розташовану трохи далі від фокуса першого, то утвориться оптична пастка, де сили, що діють на частинку вздовж осі від зустрічних пучків, зрівняються і сфера буде захоплена силами світлового тиску (пам'ятаємо, що поперечні градієнтні сили у напрямі осі пучка продовжують діяти і від обох пучків додаються одна до одної). Так було сконструйовано першу оптичну пастку для захоплення і маніпуляції прозорими об'єктами мікронних розмірів.

Перед тим як перейти до розгляду подальших віх у створенні ефективного лазерного пінцета, зупинимося на висловленій у роботі [1] важливій ідеї щодо можливості застосування сил світлового тиску для створення оптичних пасток для атомів — ідеї, яка була

блискуче реалізована за участю самого А. Ашкіна та С. Чу і досліджена у великому циклі робіт з утримання нейтральних атомів силами світлового тиску. Як відомо, за розроблення методів охолодження і захоплення атомів лазерним світлом Нобелівську премію з фізики в 1997 р. було присуджено Стівену Чу (Steven Chu), Клоду Коен-Таннуджі (Claude Cohen-Tannoudji) і Вільяму Філіпсу (William Daniel Phillips).

Цікаво, що ідею щодо застосування сил світлового тиску для механічної дії на атоми висловлювали ще в 1962 р. українські вчені О.Я. Усиков, В.М. Конторович, Е.О. Канер та П.В. Бліох на засіданні вченої ради Інституту радіоелектроніки АН УРСР, а також у 1963 р. під час проведення школи з теоретичної фізики. Їхня пропозиція, захищена авторським свідоцтвом СРСР 1965 р., стосувалася використання лазерного випромінювання для здійснення світлового тиску на газ з метою реалізації селективної відкачки окремих компонент газової суміші. На жаль, з невідомих нам причин роботу, в якій вони виклали цю ідею [2], було опубліковано у науковій періодиці лише в 1972 р., вже після статті А. Ашкіна [1], в якій, зокрема, було описано подібну до запропонованої харків'янами схему насоса, дія якого основана на використанні світлового тиску.

Однак повернімося до лазерного пінцета. Вже через рік Артур Ашкін розробив першу версію однопучкової схеми пінцета, яка давала змогу здійснювати тривимірні маніпуляції частинками [3]. Для цього сфокусований лазерний промінь спрямовували вертикально вгору, і захоплена пінцетом прозора частинка утримувалася силами світлового тиску та гравітацією, яка урівноважувала вертикально напрямлену силу тиску розсіяного частинкою лазерного світла. Проте така схема не працювала в умовах низької гравітації або домінування брουνівського руху частинок.

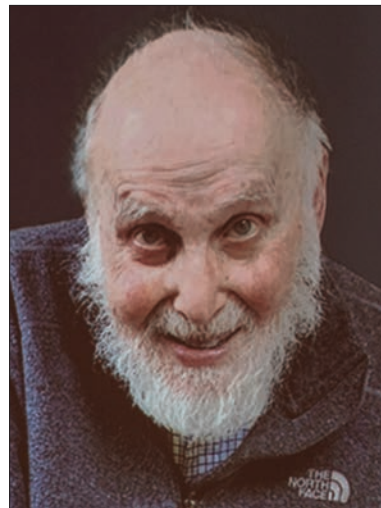
Для наступного кроку знадобилося півтора десятиліття. У 1986 р. Артур Ашкін з колегами створили першу однопучкову пастку, в якій утримання частинок здійснювалося винятково силами світлового тиску [4]. Удосконалення

конструкції полягало у створенні сильного по-здовжнього градієнта світлового поля, на до-повнення до існуючого поперечного градієнта, фокусуванням лазерного пучка за допомогою об'єктива з великою числовою апертурою. У такій схемі відразу за фокусом створюється значний поздовжній градієнт світлового поля, в якому виникає градієнтна сила, більша за величиною і протилежна за напрямом до сили тиску розсіяного світла на частинку. Ця градієнтна сила забезпечувала утримання частинки в напрямі вздовж осі пучка, повертаючи частинку в область за фокусом пучка при її відхиленні у поздовжньому напрямі під дією тиску розсіяного світла. Таким чином, світлове поле у сильно сфокусованому лазерному пучку утворює оптичну пастку, яка дає змогу захоплювати частинку і переміщувати її в будь-якому напрямі у просторі. Було показано, що у воді таким методом можна захоплювати прозорі частинки розмірами від десятків нанометрів до десятків мікрометрів і маніпулювати ними. Створену конструкцію було названо оптичним пінцетом.

Невдовзі Артур Ашкін відкрив нові можливості застосування розробленого ним унікального інструмента — захоплення і маніпулювання біологічними об'єктами, вірусами та живими клітинами. Він запропонував використовувати для цих експериментів випромінювання лазера ближнього інфрачервоного діапазону, запобігаючи в такий спосіб руйнуванню досліджуваних об'єктів концентрованим лазерним світлом, оскільки вони були прозорі для випромінювання цього діапазону.

Розроблений Артуром Ашкіним інструмент сьогодні широко застосовують у багатьох лабораторіях світу для вивчення мікросвіту біологічних об'єктів на раніше недосяжних масштабах.

Галуззю, в якій оптичні пінцети виявилися особливо цінними, стала кінетика і механіка молекулярних моторів. Ці мотори перетворюють хімічну енергію на лінійний або обертальний рух. Є, наприклад, група молекулярних моторів, що складається з лінійних білків, які відіграють істотну роль у внутрішньоклітин-



Артур Ашкін
(Arthur Ashkin)

ному транспорті, скороченні м'язів і поділі клітин. За допомогою оптичних пінцетів вдалося визначити траєкторії одиничних лінійних моторних білків з роздільною здатністю, достатньою для спостереження їх ступінчастого руху, і таким чином отримувати інформацію про розмір кроку і час паузи, вивчати роль флуктуацій. Видатним досягненням стало перше безпосереднє спостереження крокового руху кінезину, який транспортує клітинний вантаж по мікротрубках. Було виміряно розмір кроку величиною 8 нм, що відповідає довжині повторюваної одиниці вздовж мікротрубки, і максимальну силу, що виробляється молекулами кінезину, — близько 5 пН.

Дослідження на ще менших масштабах, зокрема динаміки одиничних молекул, стало можливим завдяки прив'язуванню молекул до «провідника» — мікрокульки з полістиролу, яку можна легко захопити пінцетом. Подальше зростання точності експериментів з оптичного захоплення значно розширило спектр молекулярних машин, доступних для вивчення. Визначною віхою стало досягнення такого розділення, за якого можна було розрізнити крок моторної РНК-полімерази на одну пару основ ДНК при копіюванні ДНК у мРНК в процесі транскрипції. Розмір такого кроку становив усього 3,4 Å, тобто був приблизно в 20 разів меншим від згаданого вище кроку кінезину.

В експериментах з оптичними пінцетами вивчали також процеси трансляції, в яких рибосоми синтезують білки на основі транскрипцій мРНК. Вони дали змогу простежити трансляцію кодона за кодомом однієї молекули мРНК однією рибосомою.

Ці та інші приклади ілюструють визначну роль оптичного захоплення для унікального розуміння механіки фундаментальних біомолекулярних процесів.

Як сказано в офіційному повідомленні Нобелівського комітету про наукові засади премії з фізики 2018 року, «виникнення фізичних методів зондування окремих молекул, таких як флуоресценція та флуоресцентний резонансний перенос енергії між окремими молекулами, атомно-силова мікроскопія, магнітний пінцет і оптичний пінцет, відкрили нове вікно, через яке ми можемо зазирнути до молекулярних основ біології. Ідея А. Ашкіна про використання радіаційного тиску для захоплення і маніпулювання малими частинками, його винахід оптичного пінцета і новаторські застосування цього методу до біологічних систем були центральними в цьому розвитку. Цей новаторський винахід випередив свій час: його потенціал ще буде розкриватися з подальшим вдосконаленням технологій застосування оптичних пінцетів, з розробленням масиву методів, які можуть бути використані в тандемі з ними».

Якщо Артур Ашкін у своєму видатному винаході використав унікальні можливості лазерів, створених раніше, то двоє інших нобелівських лауреатів 2018 р., Жерар Муру і Донна Стрікленд, здійснили прорив у лазерній фізиці й техніці, запропонувавши революційну технологію небаченого зростання потужності лазерного випромінювання на десять порядків.

Уже перший лазер, створений Теодором Мейманом у 1960 р., генерував відносно короткі інтенсивні імпульси світла тривалістю одиниці мілісекунд. Проте дуже швидко, через рік, тривалість лазерних імпульсів було скорочено до рекордних на той час величин — десятків наносекунд завдяки винайденню методу модуляції добротності резонатора лазера. Лазери

з модуляцією добротності, пізніше доповнені підсилювачами лазерного випромінювання, на десятиліття стали джерелами найпотужніших на Землі когерентних світлових імпульсів. Зростання потужності досягалося збільшенням енергії імпульсів, і кульмінацією такого підходу стала демонстрація у 2012 р. Національним комплексом лазерних термоядерних реакцій (National Ignition Facility — NIF) Ліверморської національної лабораторії імені Е. Лоуренса (Lawrence Livermore National Laboratory) генерації наносекундного лазерного імпульсу з енергією близько 1,85 млн Дж та потужністю 500 ТВт. Національний комплекс лазерних термоядерних реакцій має 192 окремих канали генерації лазерних променів, енергія яких поєднується в один імпульс, приблизно в мільярд разів потужніший, ніж імпульс першого лазера з модуляцією добротності. Слід зазначити, що будівництво комплексу, який займає десятиповерхову будівлю розміром з три футбольних поля, тривало 12 років і коштувало близько 3,5 млрд дол. США.

Проте повернімося до перших років лазерної ери. У середині 1960-х років було зроблено наступний революційний крок у техніці генерації коротких лазерних імпульсів — запропоновано метод синхронізації мод. Що таке моди лазера? Вважається, що лазер є джерелом монохроматичного випромінювання. Але тоді, якщо застосувати принцип невизначеності Гейзенберга до спектра випромінювання, який пов'язує ширину спектра імпульсу з його тривалістю співвідношенням оберненої пропорційності, виникає парадокс: ширина спектра монохроматичного випромінювання нехтовно мала, а отже, тривалість імпульсу має прямувати до нескінченності, інакше кажучи, до неперервної роботи лазера, а не до імпульсної. Насправді спектр випромінювання лазера не є монохроматичним (і для досягнення високої монохроматичності дійсно реалізують неперервний режим генерації у комплексі з іншими заходами). Як правило, одночасно генерується декілька (інколи дуже багато) електромагнітних коливань з дещо різними частотами, які, проте, лежать у спектральній області, де

активне середовище підсилює світло. Частота світлової хвилі окремої моди визначається характеристиками резонатора лазера, зокрема відстанню між його дзеркалами, а різниця частот сусідніх мод наближено визначається часом, необхідним світлу для повного обходу резонатора, і обернено пропорційна цьому часу. У режимі вільної генерації фази коливань окремих мод незалежні, і у результаті ми маємо світло, яке є наслідком суперпозиції багатьох гармонічних коливань з випадковими фазами. Наявність окремих мод проявляється у вигляді шумів, які породжуються інтерференцією, биттям окремих мод. Процес набуває кардинально іншого характеру, якщо створити умови, коли всі моди починають генерувати гармонійні коливання за однакової початкової фази, яку візьмемо для прикладу такою, що відповідає максимуму кожної моди. Тоді в початковий момент часу амплітуди коливань усіх мод додаються і їх сумарна амплітуда є максимальною. Далі, оскільки частоти коливань мод різні, в результаті їх інтерференції спостерігатиметься зменшення сумарної амплітуди аж до взаємного погашення в певні періоди. А через час, що дорівнює періоду повного обходу резонатора світлом, усі моди знову прийдуть до однакової фази і амплітуди їх коливань складуться в потужний короткий імпульс. Короткий, бо через невеликий проміжок часу коливання мод розфазуються і амплітуда знову зменшиться. Чим більше мод беруть участь у формуванні імпульсу, тим за короткий проміжок часу він спадатиме до рівня шуму, отже, тривалість імпульсу визначається шириною спектра генерації лазера і обернено пропорційна її значенню.

Розроблення методів синхронізації мод відкрило можливість генерації імпульсів з тривалістю аж до теоретичного мінімуму, який визначається тривалістю одного періоду світлових коливань і дорівнює 3 фс ($1 \text{ фс} = 10^{-15} \text{ с}$) для випромінювання з довжиною хвилі 1 мкм . Однак зменшення тривалості імпульсів супроводжувалося відповідним зростанням потужності лазера лише до певної межі, яка визначалася стійкістю оптичних матеріалів та

елементів. У разі перевищення певного рівня інтенсивності (потужності на одиницю площі) лазерного імпульсу внаслідок низки нелінійних ефектів елементи лазерів та лазерних підсилювачів руйнувалися, обмежуючи граничну потужність лазерних джерел. Подолання цього обмеження збільшенням поперечного перерізу пучка для зменшення інтенсивності потребувало високовартісної великогабаритної оптики, збільшувало розміри лазерних систем, і зрештою, лише унікальні установки, на зразок National Ignition Facility Ліверморської національної лабораторії з її поділом світлового потоку на 192 окремих пучки, могли забезпечити генерацію потужних коротких імпульсів. А оскільки розміри оптики не можна збільшувати на багато порядків, то і цей підхід дуже скоро вичерпав свої можливості. Починаючи з кінця 1960-х до середини 1980-х років потужність лазерних систем зростала дуже повільно, незважаючи на успіхи в генерації все коротших лазерних імпульсів.

У 1985 р. елегантний метод вирішення проблеми знайшли Жерар Муру та його аспірантка Донна Стрікленд, які працювали тоді в Рочестерському університеті (University of Rochester) — американському приватному дослідницькому університеті, серед випускників якого — 8 лауреатів Нобелівської премії. Їхня ідея полягала в застосуванні техніки підсилення коротких імпульсів попереднім збільшенням їх тривалості, «розтягуванням» у часі (stretching), наступним підсиленням подовжених імпульсів і зворотним їх скороченням у часі (compressing) зі збереженням енергії імпульсу та відповідним зростанням його потужності. Загальна схема такого підсилення з часовими перетвореннями тривалості імпульсів була відома раніше в техніці радіолокації, де розтягування і стискання імпульсів досягалося за допомогою використання дисперсійних елементів, які здійснювали так званий «чирп» (від англ. chirp — цвірінкання, щebetання — короткий різкий високий звук зі зміною-підвищенням чи зниженням тону), тобто частотнозалежну затримку компонент, які формують імпульс. Перенесення цієї техніки в оптичний



Жерар
Муру
(Gérard
Mourou)

діапазон потребувало застосування принципово іншої елементної бази порівняно з радіодіапазоном, і вперше це було зроблено в роботі нобелівських лауреатів 2018 р. Жерара Муру і Донни Стрікленд [5].

Перед тим як перейти до викладу досягнень нобеліатів, коротко про них самих.

Жерар Муру народився 22 червня 1944 р. в м. Альбертвіль у Франції. Вивчав фізику в університеті Гренобля (University of Grenoble), а потім в університеті імені П'єра і Марії Кюрі (Pierre and Marie Curie University) в Парижі, де в 1973 р. здобув ступінь доктора філософії. Пізніше він переїхав до США і в 1977 р. став професором Рочестерського університету, де разом із Донною Стрікленд вони й виконали роботи, за які їх було удостоєно Нобелівської премії з фізики 2018 р. На момент нагородження Жерар Муру був співробітником Мічиганського університету (University of Michigan) в Енн-Арборі (США) та Політехнічної школи ( cole Polytechnique) у Франції. Він є кавалером ордена Почесного легіону.

Жерар Муру – автор ідеї створення нової європейської інфраструктури Extreme Light Infrastructure (ELI). Об'єкти ELI планується розмістити на чотирьох ділянках. Три з них на сьогодні вже реалізуються в Чеській Республіці, Угорщині та Румунії, обсяг інвестицій перевищує 850 млн євро, переважно з Європейського фонду регіонального розвитку (ERDF).

У Дольні Бржежани (Doln  Vezany), неподалік від Праги, об'єкт ELI-Beamlines буде зосереджений переважно на розробленні короткоімпульсних вторинних джерел випромінювання та частинок. Джерело ELI Attosecond Light Pulse Source (ELI-ALPS) в угорському місті Сегед (Szeged) – унікальний об'єкт, який забезпечує джерела світла в надзвичайно широкому діапазоні частот у вигляді ультракоротких імпульсів з високою частотою повторення. Об'єкт ELI-NP в м. Магуреле (Magurele) в Румунії працюватиме над застосуванням лазерів у ядерній фізиці. Розташування четвертої установки ELI, потужність лазера якої перевищить потужність наявних установок ELI приблизно на порядок, поки що не визначили. Усі ці лазерні установки розроблено на основі принципів генерації ультракоротких інтенсивних лазерних пучків, винайдених Жераром Муру і Донною Стрікленд.

Донна Стрікленд народилася 27 травня 1959 р. в м. Гвельф, Онтаріо, Канада. Навчалася в Університеті МакМастера (McMaster University) в м. Гамільтон, провінція Онтаріо, а потім, зацікавившись лазерами та електрооптикою, продовжила докторантуру в Рочестерському університеті в США під керівництвом професора Жерара Муру, де разом з ним виконала піонерські роботи з підсилення чирпованих імпульсів. У 1989 р. здобула ступінь доктора філософії, згодом працювала в Принстонському університеті (Princeton University), а з 1997 р. працює в Університеті Ватерлоо (University of Waterloo) в Канаді, де керує групою з досліджень у галузі надшвидких лазерів, яка розробляє високоінтенсивні лазерні системи для нелінійних оптичних досліджень.

Новий метод підсилення коротких імпульсів вперше був реалізований Жераром Муру і Донною Стрікленд у 1985 р. [5]. Для збільшення тривалості імпульсу вони використали оптичний світловод завдовжки 1,4 км, у якому здійснювався чирп, тобто частотнозалежна затримка світлових коливань завдяки комбінованій дії дисперсії групової швидкості та самомодуляції фази. При цьому швидкість поширення світлових коливань лінійно змен-

шувалася з частотою — так званий лінійний позитивний чирп. Імпульси тривалістю 150 пс, частотою повторення 82 МГц та середньою потужністю 5 Вт генерувалися лазером на ітрій-алюмінієвому гранаті, допованому неодимом, і вводилися у світловод. Після проходження світловода середня потужність випромінювання зменшувалася до 2,3 Вт, а тривалість лазерних імпульсів подвоювалася до 300 пс. Розтягнуті імпульси підсилювалися в регенеративному підсилювачі на неодимовому склі так, що енергія імпульсу становила 2 мДж, і спрямовувалися на компресор світлових імпульсів, який був сформований з двох дифракційних ґраток, розташованих під кутом падіння 65° на відстані 25 см одна від одної у схемі, близькій до конфігурації Літрова. Така схема забезпечувала стискання лазерного імпульсу завдяки тому, що у ній реалізується негативний чирп, коли швидкість поширення світлових коливань лінійно зростає з частотою. Після подвійного проходження компресора тривалість імпульсу зменшувалася до 1,5 пс. Автори зазначили, що розроблений ними метод підсилення чирпованих імпульсів (Chirped Pulses Amplification — CPA) можна використати для підсилення будь-якого короткого імпульсу, який може бути розтягнутий завдяки дисперсії групової швидкості в одномодовому волокні. Імпульс потім можна підсилити і рекомпресувати до його попередньої тривалості у спосіб, абсолютно аналогічний техніці, яку застосовують у радіолокації.

Перше поліпшення техніки CPA відбулося дуже скоро після першої проривної публікації [5], коли волокно, яке застосовували для розтягування імпульсу, замінили парою дифракційних ґраток [6–8]. І невдовзі [9, 10] було успішно продемонстровано підсилення імпульсу з енергією 1 нДж до імпульсу з енергією 1 Дж, тобто на 9 порядків, у мільярд разів!

Винахід техніки CPA сприяв гігантському стрибку інтенсивності оптичних імпульсів — на 10 порядків за період з 1985 р. Такий прогрес у техніці генерації ультракоротких потужних лазерних імпульсів не міг не відкрити нові сторінки у їх застосуваннях.



Донна Стрікленд
(Donna Strickland)

Незабаром після винаходу CPA з'явилася абревіатура T^3 , яка означала настільний тераватний лазер. Типовими параметрами для перших систем Nd:скло були 1 Дж/імпульс і тривалість імпульсу близько 1 пс. Більш короткі імпульси, тривалістю менш як за 100 фс, було отримано з використанням лазера на титанаті сапфіру. Невдовзі з'явився проект петаватної лазерної системи, яку було реалізовано в Ліверморській національній лабораторії імені Е. Лоуренса в 1999 р. [11]. А вже у 2015 р. у світі функціонували, перебували на стадії будівництва або були заплановані до створення порядку 50 петаватних лазерів.

Сьогодні один петаватт (1 ПВт = 10^{15} Вт) уже не є верхньою межею. Вже зараз багато проектів, спрямованих на досягнення вищої потужності та інтенсивності, перебувають на різних стадіях створення. Наприклад, згаданий вище об'єкт ELI Beamlines у Чехії матиме лазерну систему потужністю 10 ПВт. Очікувана орієнтовна інтенсивність, що перевищує 10^{23} Вт/см², відкриває небачені раніше горизонти нової фізики.

Одна із систем комплексу ELI Beamlines розроблена Ліверморською національною лабораторією імені Е. Лоуренса. Цю унікальну лазерну систему L3-NAPLS вже урочисто введено в дію 2 липня 2018 р., і зараз вона виводиться на першу робочу точку 16 Дж у імпульсі тривалістю 27 фс за частоти повторення 3,3 Гц,

що еквівалентно піковій потужності $\sim 0,5$ ПВт після компресора імпульсів, а проектна потужність становить понад 1 ПВт.

Фізика сильних лазерних полів може відкрити вікно до нових екстремальних станів речовини, станів з домінуванням випромінювання, квантових станів за високих тисків, теплої щільної речовини, в якій потенціальна енергія взаємодії електронів і ядер та кінетична енергія електронів однакові за порядком величини, ультрарелятивістської плазми. Фізика високих енергій і густин має фундаментальне значення для лабораторних досліджень у галузі астрофізики та інерційного термоядерного синтезу.

Другий аспект, важливий для переднього краю фізики високих інтенсивностей, полягає в тому, що за допомогою технології CPA висока пікова потужність лазерів досягається завдяки скороченню імпульсів при помірних енергіях, так що лазерні установки високої потужності нового покоління забезпечують високу частоту повторення імпульсів за відносно невеликих габаритів класу T^3 та порівняно невеликої вартості, доступної для бюджетів університетів. Такі установки можуть ефективно конкурувати з гігантськими високовартісними унікальними комплексами на зразок ILF, які здійснюють лише один постріл за день.

Третім і дуже важливим практичним аспектом технології CPA стала можливість створення компактних і зручних потужних лазерних джерел ультракоротких імпульсів, придатних для широких практичних застосувань у промисловості та медицині, а також для фундаментальних фізичних досліджень.

Не зупиняючись на деталях, згадаємо деякі важливі галузі, в яких уже отримано нові фізичні ефекти за допомогою таких лазерів.

Режим сильного поля в ядерній фізиці визначає область лазерних інтенсивностей, коли напруженість світлового поля близька до значень внутрішньоатомних полів. У таких сильних лазерних полях спостерігаються нові особливості іонізації атомів, генерація високих лазерних гармонік та генерація світлових імпульсів, тривалість яких менша за період світлової хвилі лазера — атосекундних імпуль-

сів світла. Експериментальне спостереження таких надкоротких імпульсів відкриває новий розділ науки — атосекундну фізику.

Відомо, що технологія сучасних прискорювачів ґрунтується на застосуванні електромагнітних хвиль радіодіапазону, від 100 МГц до кількох гігагерців. Ця надійна і відпрацьована техніка забезпечує успіхи і фантастичні досягнення сучасних систем, проте їй притаманні недоліки, пов'язані з великою довжиною хвилі та малими градієнтами прискорювального поля. Тому сучасні прискорювачі, розраховані на високі енергії, мають значні габарити, що підвищує їх вартість і ускладнює застосування, наприклад, у медицині для променевої терапії.

У своїй нобелівській лекції Жерар Муру висловив кілька вражаючих перспективних передбачень щодо застосування високоінтенсивних ультракоротких лазерних імпульсів, що генеруються за технологією CPA, у нових технологіях прискорення заряджених частинок. Як відомо, ще у 1979 р. було продемонстровано можливість генерації за допомогою високоінтенсивного лазера плазмової хвилі, яка прискорює електрони до енергії порядку GeV на відстані 1 см. Створення лазерів за технологією CPA у поєднанні з цією ідеєю відкриває нові, раніше небачені можливості для техніки прискорення частинок. Так, Жерар Муру повідомив про можливість створення з використанням технології CPA прискорювача з параметрами Великого адронного колайдера на площі розміром з футбольне поле замість кільця діаметром 27 км за традиційними технологіями. Перехід у рентгенівський діапазон лазерної генерації потенційно дозволяє створити прискорювач з енергією порядку TeV, який може поміститися на кінчику пальця.

Компактні ефективні прискорювачі електронів і протонів затребувані в медицині — у променевій терапії, ізотопній та ядерній діагностиці.

За допомогою прискорювачів, створених на основі технології CPA, можна буде у перспективі розв'язати одну з головних проблем людства — ліквідацію радіоактивних відходів

ядерної енергетики, організувавши ланцюг перетворення радіоактивних ізотопів на стабільні, які не шкодять довкіллю.

Усе це перспективи майбутнього, можливо, далекого... Проте лазери, що генерують короткі потужні імпульси, слугують людям уже сьогодні. Обробка матеріалів за допомогою таких лазерів відзначається високою точністю та якістю завдяки мінімальному поширенню тепла протягом тривалості імпульсу та незначному викиду речовини за межі зони обробки. Точна обробка може бути застосована, наприклад, при створенні отворів для виготовлення стентів.

Сьогодні фемтосекундні лазери прийшли в офтальмологічні клініки. Їх інтенсивне випромінювання використовують в операціях

хірургічного лікування міопії та астигматизму в усьому світі.

На завершення можна сказати, що завдяки винайденню Жераром Муру та Донною Стрікленд техніки підсилення чирпованих імпульсів людство отримало новий інструмент, за допомогою якого вже створені й будуть створюватися надалі нові технології у промисловості та виробництві, розроблятимуться нові прискорювачі та прилади на їх основі для медицини, екології, фундаментальних досліджень, будуть відкриті нові сторінки фізики сильних лазерних полів.

Жерар Муру завершив свою нобелівську промову словами: «The best is yet to come!» — найкраще іще попереду! І ми приєднуємося до його думки.

REFERENCES

1. Ashkin A. Acceleration and trapping of particles by radiation pressure. *Phys. Rev. Lett.* 1970. **24**(4): 156. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.24.156>
2. Usikov A.Ya., Kontorovich V.M., Kaner E.O., Bliokh P.V. On the use of light pressure for selective pumping of gases. *Ukr. J. Phys.* 1972. **17**(2): 1245. [Усиков А.Я., Конторович В.М., Канер Э.О., Блиох П.В. Об использовании светового давления для избирательной откачки газов. *УФЖ*. 1972. Т. 17, № 2. С. 1245–1248.]
3. Ashkin A., Dziedzic J.M. Optical levitation by radiation pressure. *Appl. Phys. Lett.* 1971. **19**(8): 283. <https://doi.org/10.1063/1.1653919>
4. Ashkin A., Dziedzic J.M., Bjorkholm J.E., Chu S. Observation of a single-beam gradient force optical trap for dielectric particles. *Opt. Lett.* 1986. **11**(5): 288. <https://doi.org/10.1364/OL.11.000288>
5. Strickland D., Mourou G. Compression of amplified chirped optical pulses. *Opt. Commun.* 1985. **56**(3): 219. [https://doi.org/10.1016/0030-4018\(85\)90120-8](https://doi.org/10.1016/0030-4018(85)90120-8)
6. Martinez O.E. Grating and prism compressors in the case of finite beam size. *J. Opt. Soc. Am. B.* 1986. **3**(7): 929. <https://doi.org/10.1364/JOSAB.3.000929>
7. Martinez O.E. 3000 times grating compressor with positive group velocity dispersion: Application to fiber compensation in the 1.3-1.6 μm region. *IEEE J. Quant. Electron.* 1987. **23**(1): 59. <https://doi.org/10.1109/JQE.1987.1073201>
8. Pessot M., Maine P., Mourou G. 1000 times expansion/compression of optical pulses for chirped pulse amplification. *Opt. Commun.* 1987. **62**(6): 419. [https://doi.org/10.1016/0030-4018\(87\)90011-3](https://doi.org/10.1016/0030-4018(87)90011-3)
9. Maine P., Strickland D., Bado P., Pessot M., Mourou G. En route vers le Petawatt. *Rev. Phys. Appl. (Paris)*. 1987. **22**(12): 1657. <https://doi.org/10.1051/rphysap:0198700220120165700>
10. Maine P., Strickland D., Bado P., Pessot M., Mourou G. Generation of ultrahigh peak power pulses by chirped pulse amplification. *IEEE J. Quant. Electron.* 1988. **24**(2): 398. <https://doi.org/10.1109/3.137>
11. Perry M.D., Pennington D., Stuart B.C., Tietbohl G., Britten J.A., Brown C., Herman S., Golick B., Kartz M., Miller J., Powell H.T., Vergino M., Yanovsky V. Petawatt laser pulses. *Opt. Lett.* 1999. **24**(3): 160. <https://doi.org/10.1364/OL.24.000160>

A.M. Negriyko, L.P. Yatsenko

Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Ukraine (Kyiv)

NEW TOOLS CREATED BY LIGHT

Nobel Prize in Physics, 2018

On October 2, the Nobel Committee at the Royal Swedish Academy of Sciences announced the decision to award the Nobel Prize in Physics of 2018 to three scientists working in the field of laser physics. Half of the prize went to the American researcher Arthur Ashkin for “the creation of optical tweezers and its application in biological systems.” The second half of the award was shared amongst the French physicist Gérard Mourou and Canadian researcher Donna Strickland “for the method of generating high-intensity ultrashort optical pulses.”