

УДК [514-027.22] (043.2)

Педін А. В.

Мартинюк В. В.

Генерація аттосекундних імпульсів світла: сучасні методи та дослідження електронної динаміки

Вінницький національний технічний університет

Анотація:

У доповіді розглянуто сучасні фізичні методи генерації аттосекундних імпульсів світла, які були відзначені Нобелівською премією 2023 року. Описано експериментальні протоколи, теоретичні основи (модель трьох кроків, високочастотне генерування гармонік), методи вимірювання імпульсів та приклади застосування для вивчення електронної динаміки в атомах і молекулах.

Ключові слова: Аттосекунда, високочастотне генерування гармонік, триступенева модель, часовий дозвіл, Нобелівська премія

Abstract:

This report reviews modern physical methods for generating attosecond light pulses, honored by the 2023 Nobel Prize. It describes experimental protocols, theoretical foundations (three-step model, high-harmonic generation), pulse measurement techniques, and applications for studying electron dynamics in atoms and molecules.

Keywords: Attosecond, high-harmonic generation, three-step model, temporal resolution, Nobel Prize

Вступ

У 2023 році Нобелівську премію з фізики було присуджено П'єру Агосіні, Ференцу Краушу та Анні Луїльє за експериментальні методи генерації аттосекундних імпульсів світла для дослідження електронної динаміки в матеріях. Ці імпульси тривалістю близько 10^{-18} с дозволяють відстежувати рух електронів всередині атомів і молекул з незрівнянно високою часовою роздільною здатністю.

Основи високочастотного генерування гармонік (HHG)

Високочастотне генерування гармонік (High-Harmonic Generation) виникає при взаємодії інтенсивного фемтосекундного лазерного імпульсу з газом благородних елементів. У класичному описі за моделлю трьох кроків електрон спочатку тунелює з атома під дією сильної електричної поля, потім прискорюється полем, і при поверненні рекомбінує з ядром, випромінюючи фотон високої енергії.

Триступенева модель описується такими етапами: 1) тунелювання (tunnel ionization), 2) рух в електричному полі лазера, 3) рекомбінація та випромінювання гармонік. Формула для максимального енергійного зрізу (cut-off) гармонік: $\hbar\omega(\max) \approx I_p + 3.17 U_p$, де I_p — енергія іонізації, $U_p = e^2 E_0^2 / (4m\omega_0^2)$ — середня пуассонова енергія електрона в лазерному полі.

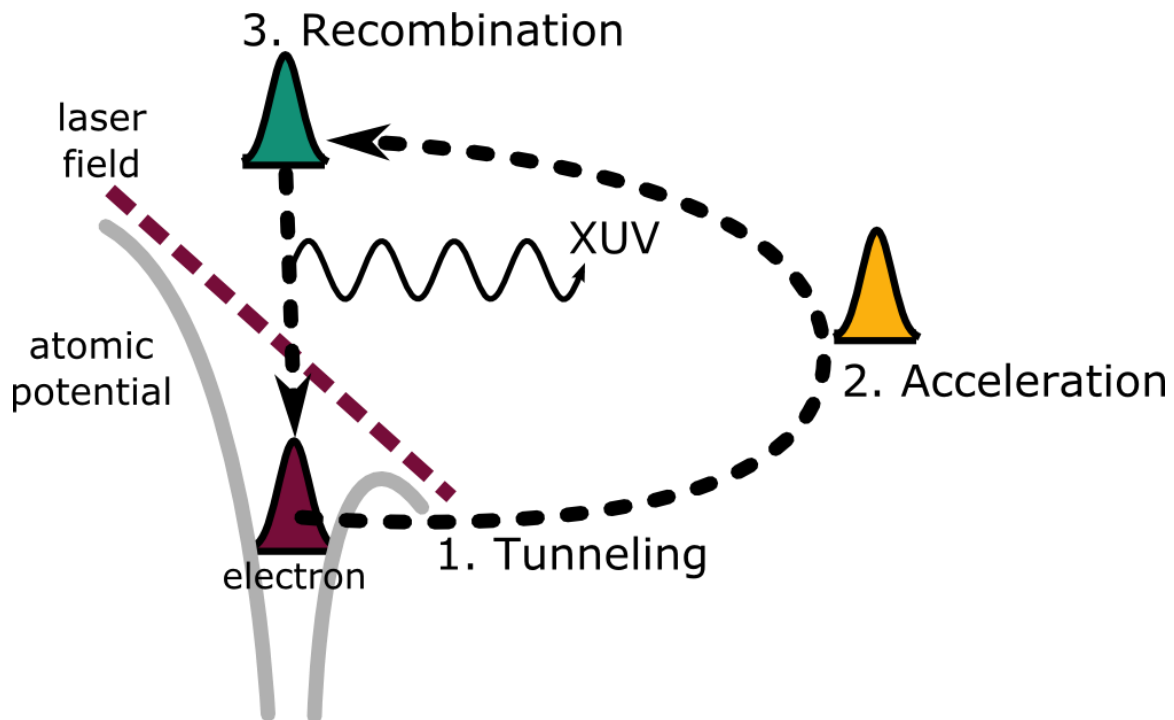
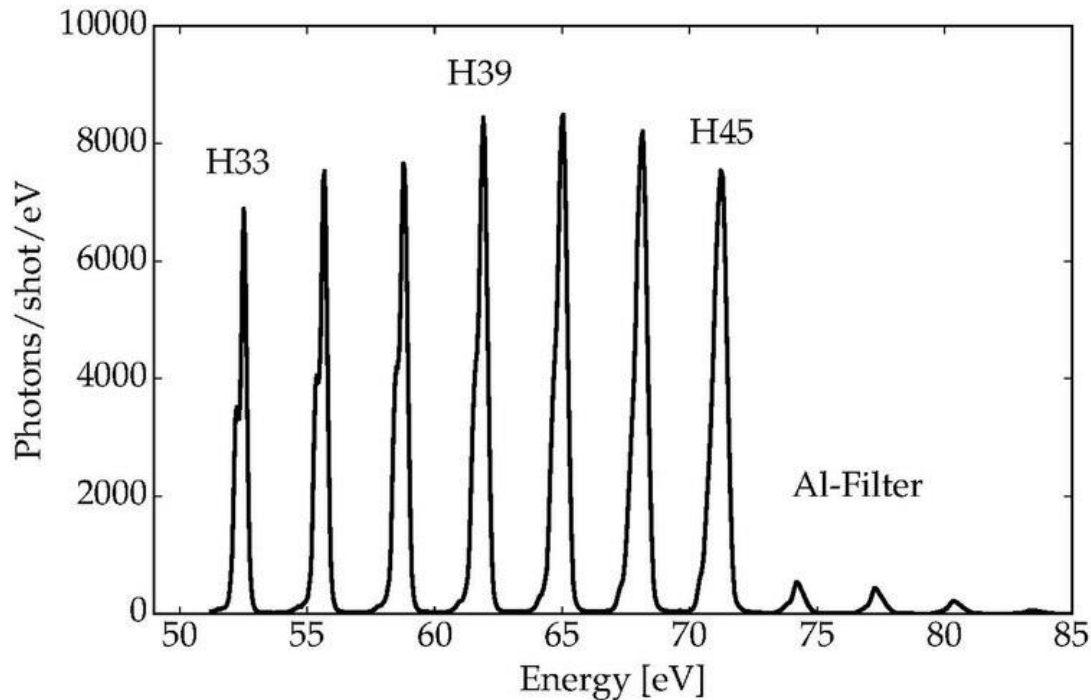


Схема трьохступеневої моделі HHG

Графік спектра HHG зазвичай має плато гармонік з приблизно однаковою інтенсивністю до зрізу, після чого різко падає. Такий спектр дозволяє синтезувати короткі імпульси в часовій області при узгодженні фаз різних гармонік.



Спектр високих гармонік з плато та зрізом

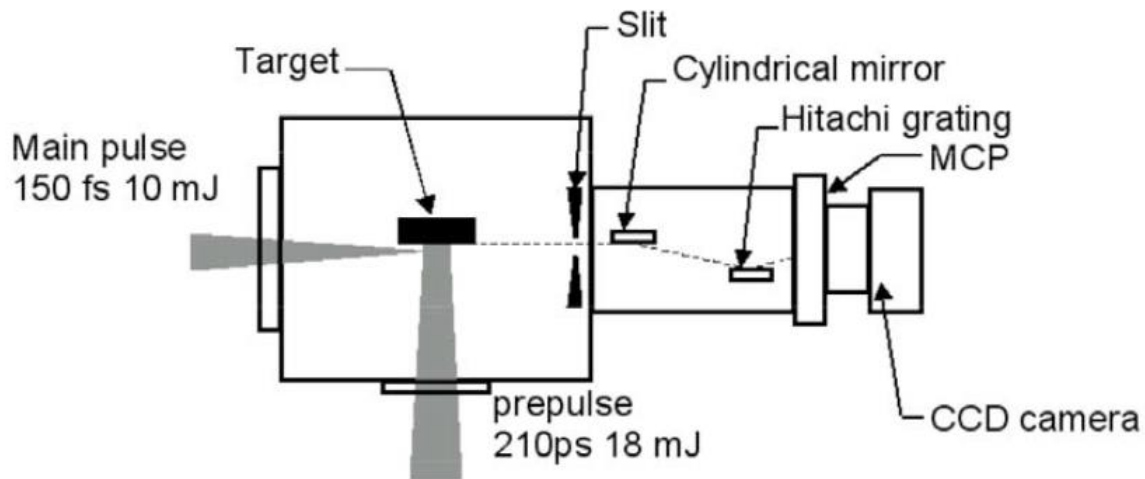
Генерація аттосекундних імпульсів

Для отримання ізольованих аттосекундних імпульсів використовують високочастотне генерування гармонік (HHG) у газі з додатковими часовими «воротами» (gating). Без gating HHG породжує потяг імпульсів щосекунди в кожному оптичному циклі, тому необхідно звузити часовий інтервал рекомбінації електронів до менш ніж одного циклу. Найпоширеніші методи: Polarization Gating (через зміну поляризації імпульсу в часі), Two-Color Gating (змішування фундаментального поля і його другої гармоніки для асиметрії поля) або їх комбінація (Double Optical Gating). Існують також підходи на основі різкого наростання/спаду інтенсивності (Amplitude Gating) чи природне «гейтоване» завершення HHG внаслідок виснаження нейтрального газу (Ionization Gating). Кожен метод вимагає налаштування форми огинаючої, контролю поляризації і синхронізації фаз.

Ключовим фактором є стабілізація Carrier–Envelope Phase (CEP) для few-cycle імпульсів: зміщення фази несучої відносно огинаючої визначає момент

максимальної амплітуди поля і, відповідно, час ефективної рекомбінації. Тому лазери оснащують $f-2f$ інтерферометрією та feedback-лінком для збереження сталої СЕР. Паралельно контролюють фазове узгодження HHG у газовій камері шляхом вибору тиску й довжини взаємодії, а також положення фокуса. Як газ обирають Ne, Ar чи He залежно від бажаного діапазону енергій: густина іонізації та дисперсія середовища впливають на ефективність.

Після генерації XUV-гармонік застосовують фільтри (наприклад Al), мультишарові дзеркала чи монохроматори для відокремлення потрібного спектрального діапазону. Ізольований імпульс перевіряють методами attosecond streaking або RABBITT, аналізуючи часову форму через зміну спектра фотоелектронів у присутності синхронізованого IR-пульсу. Технічно потрібна висока стабільність лазера (температурна й вібраційна ізоляція), точне стискання імпульсу до few-cycle і контроль параметрів поляризації. Завдяки цьому можна отримати одиночний аттосекундний сплеск достатньої якості для вивчення ультракоротких процесів у атомах, молекулах і твердих тілах.



Установка HHG

Методи вимірювання аттосекундних імпульсів

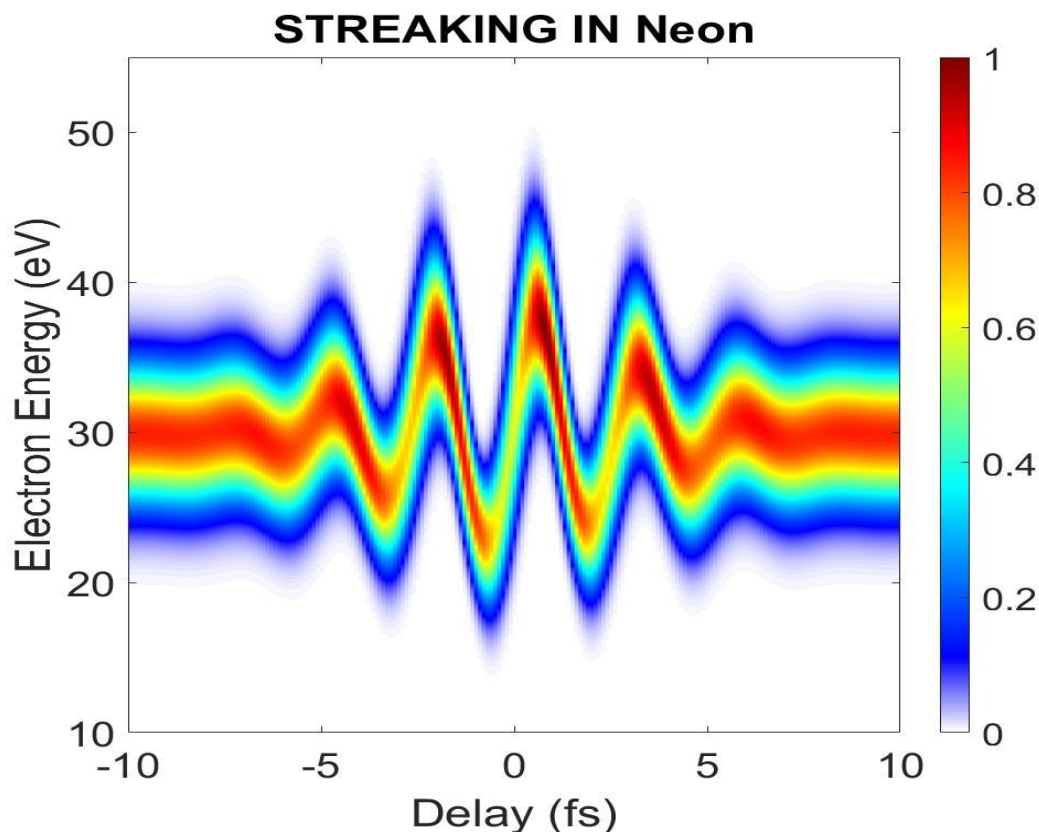
Одним із ключових методів для характеристики ізольованих аттосекундних імпульсів є аттосекундне стрікування (attosecond streaking). Суть методу полягає в тому, що спочатку XUV-імпульс іонізує електрон із атому чи молекули, а потім у присутності добре синхронізованого IR-поля цей електрон додатково взаємодіє з коливанням поля, що змінює його кінцеву енергію. Оскільки модація енергії залежить від фази IR-поля в момент емісії, аналіз розподілу фотоелектронів по енергії дозволяє реконструювати часову форму XUV-імпульсу з аттосекундною роздільною здатністю.

Технічна реалізація вимагає дуже точної синхронізації між XUV-аттосекундним імпульсом та сильним IR-пробним полем (probe pulse). Зазвичай IR-пульс є

частиною тієї ж лазерної системи, з якої генерується HHG, і стабілізується по CEP, щоб уникнути фазових зсувів між серією реплікат імпульсів. Експериментально: аттосекундний XUV проходить через газову мішень, іонізовані електрони потрапляють у поле затриманого IR-пульсу, що додає або віднімає імпульс залежно від моменту генерації. Детектор (електронний спектрометр) фіксує енергетичний спектр фотоелектронів під різними часовими затримками IR-пульсу відносно XUV. З отриманих енергетичних змін (streaking trace) за допомогою зворотних алгоритмів (наприклад, FROG-CRAB чи Phase Retrieval by Omega Oscillation Filtering) відновлюють часовий профіль XUV-імпульсу та визначають його тривалість і фазу.

Ключові аспекти методу: по-перше, амплітуда IR-поля має бути достатньою, щоб викликати помітне зміщення енергії електронів, але не настільки сильною, щоб руйнувати ступінь іонізації чи вводити надмірну нелінійність; по-друге, необхідна висока стабільність лазерного джерела та точне керування затримкою між імпульсами в межах десятків або сотень аттосекунд. Аналіз отриманих даних вимагає врахування початкового спектра фотоелектронів (залежить від енергії XUV) і сили IR-поля: класичний модельний опис дає, що імпульс Δp електрона $= -\int E_{IR}(t') dt'$ від моменту іонізації до детектора, що переводиться в зміну кінетичної енергії. Завдяки серії вимірювань при різних часових затримках можна побудувати карту “енергія vs. час” і витягти часовий профіль імпульсу.

Практично, attosecond streaking дозволяє не лише виміряти тривалість імпульсу, але й відстежити час затримки електронної емісії з різних орбіталей або в різних матеріалах (attosecond delays), що дає глибоке розуміння ультракоротких електронних процесів у атомах, молекулах і твердих тілах. Метод потребує добре налагодженого вакуумного середовища, точного калібрування електронного спектрометра та ретельного контролю просторових і часових параметрів лазерної системи. Це робить attosecond streaking одним із найпотужніших інструментів сучасної ультракороткої оптики.



Інший підхід — RABBITT (Reconstruction of Attosecond Beating By Interference of Two-photon Transitions), де аналізується інтерференція сусідніх гармонік при іонізації і вимірюється різниця фаз для відновлення часової структури імпульсу.

Дослідження електронної динаміки

Аттосекундні імпульси дозволяють відстежувати ультракороткі електронні процеси в різних системах — від окремих атомів і молекул до кристалів і нанооб'єктів. Завдяки тривалості на рівні десятків або сотень аттосекунд можна «заморозити» рух електронів і вивчити, як формується зарядова хвиля, як відбувається розподіл заряду під час хімічної реакції, а також як змінюється електронна структура в матеріалі під дією сильного поля. Крім того, аттосекундні імпульси використовують для дослідження когерентних явищ, коли декілька електронів взаємодіють одночасно, створюючи кореляційні ефекти, важливі для розуміння фотохімічних і фотофізичних механізмів.

Експериментальні підходи зазвичай базуються на схемах pump-probe: перший (pump) імпульс XUV іонізує або збуджує систему, а затриманий IR- чи UV-пробний (probe) імпульс викликає подальшу емісію або модулює вже іонізовані електрони. Змінюючи часову затримку між імпульсами, фіксують фотоелектронний спектр або інші сигнали (наприклад, іонні фрагменти), що дозволяє

реконструювати часову еволюцію електронної хвилі. Такі вимірювання можуть показати, за який час відбувається розрив хімічного зв'язку, як мігрує заряд усередині молекули або як формуються короткоживучі збуджені стани.

Приклади експериментів включають:

- **Відстеження розриву зв'язку:** XUV-імпульс іонізує молекулу, після чого спостерігають за змінами фотоелектронного спектра або розподілом іонних фрагментів із різними часовими затримками, щоб визначити часову шкалу розриву та утворення нових зв'язків.
- **Когерентна зарядова міграція:** у великих молекулах аттосекундний імпульс може запустити переміщення електронного заряду всередині молекули, а наступні пробні імпульси вимірюють, як швидко і в якому напрямку ця хвиля рухається, що важливо для фотохімії та фотобіології.
- **Електронні кореляції у кластерах або наносистемах:** серія аттосекундних імпульсів дає змогу спостерігати, як взаємодіють електрони в скупченні атомів або наночастинках, виявляючи швидкоплинні кореляційні ефекти.

Технічно такі дослідження потребують стабільності лазерної системи, точної синхронізації імпульсів (СЕР-стабілізація), чистого вакууму і чутливих електронних або іонних детекторів. Отримані дані дають уявлення про механізми ультракоротких процесів, що є ключовим для розробки нових матеріалів, керування хімічними реакціями у реальному часі та фундаментального розуміння електронної динаміки.

Приклади застосування і перспективи

Аттосекундна фізика відкриває нові можливості в різних галузях:

- Фундаментальна фізика: дослідження електронних кореляцій, квантових переходів.
- Хімія: управління хімічними реакціями в реальному часі.
- Матеріалознавство: вивчення ультракоротких явищ у напівпровідниках.
- Технології: розвиток ультрашвидкої електроніки та оптоелектроніки.
- .

У майбутньому очікують подальше скорочення тривалості імпульсів до зепто- або й уостосеконд діапазонів для дослідження ще коротших процесів, наприклад, рух нуклонів у ядрі атома.

Висновки

Генерація аттосекундних імпульсів світла є ключовим досягненням сучасної оптики та фізики, що відкриває двері до дослідження електронних процесів з надзвичайно високою часовою роздільною здатністю. Експериментальні методи, відзначені Нобелівською премією 2023 року, заклали основу для нових відкриттів у фундаментальних і прикладних дослідженнях.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Nisoli M., Sansone G. “Attosecond pulses: generation and applications” [Електронний ресурс]. URL: <https://arxiv.org/abs/0712.0055>.
2. Wikipedia “Attosecond physics” [Електронний ресурс]. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Attosecond_physics.
3. Krausz F., Ivanov M. “Attosecond physics” [Електронний ресурс]. URL: <https://journals.aps.org/rmp/abstract/10.1103/RevModPhys.81.163>.
4. Wikipedia “Carrier-envelope phase” [Електронний ресурс]. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Carrier-envelope_phase.

Педін Андрій Володимирович — студент групи 2КН-246, факультет Комп'ютерні науки, Вінницький національний технічний університет, pedinandriy@gmail.com.

Науковий керівник: **Мартинюк Володимир** Валерійович — д.пед.н., доцент, професор кафедри фізики, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95, e-mail: gyrav16@gmail.com.

Pedin Andrii Volodimirovich — student of group 2KH-246, Faculty of Computer Science, Vinnytsia National Technical University, pedinandriy@gmail.com.

Supervisor: **Martyniuk Volodymyr Valeriyovych** — Doctor of Pedagogical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Physics, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, Khmelnytske Shosse, 95, e-mail: gyrav16@gmail.com.