

The Nobel Prize in Physics 2023

nobelprize.org/Nobel_prize_lessons



Ill. Niklas Elmehed ©
Nobel Prize Outreach
Pierre Agostini
Prize share: 1/3



Ill. Niklas Elmehed ©
Nobel Prize Outreach
Ferenc Krausz
Prize share: 1/3



Ill. Niklas Elmehed ©
Nobel Prize Outreach
Anne L'Huillier
Prize share: 1/3

2023/10/3

Open the World of Electrons

The Nobel Prize in Physics 2023 was awarded to
Pierre Agostini, Ferenc Krausz and Anne L' Huillier
“for experimental methods that generate attosecond pulses of
light for the study of electron dynamics in matter”

光脈衝中的電子

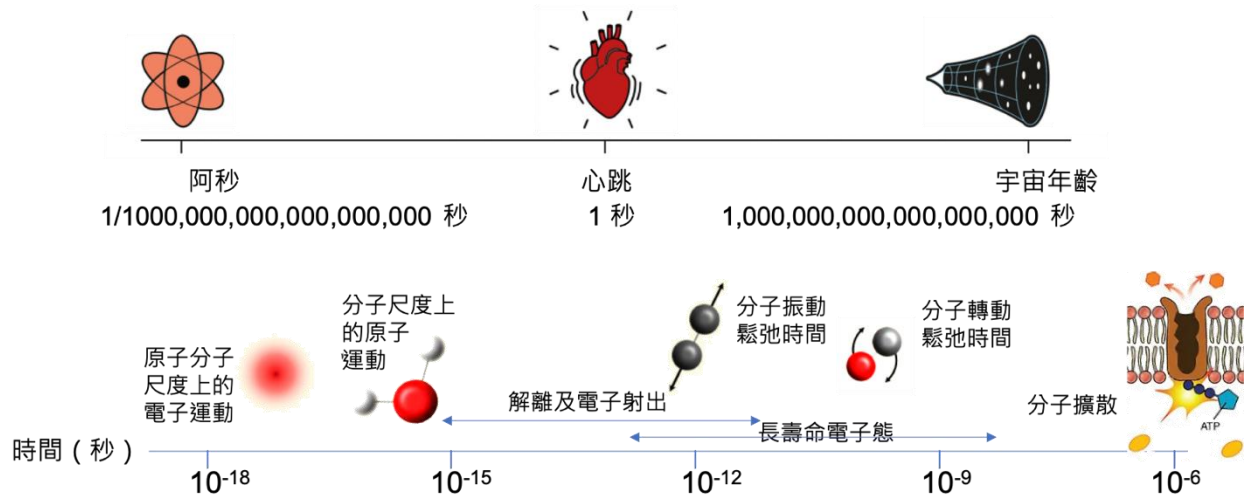
● 生活中的高速攝影

如圖一所示，相較於我們的心臟每跳動一下大約持續 1 秒的時間，宇宙的年齡大約是很長的 10^{18} 秒，相反的，阿秒 (attosecond) 指的是 10^{-18} 秒的極短時間。很多的原子分子間的反應過程就是在我們無法想像的極短時間內發生的。其實，在我們的日常生活中也有很多快速發生的現象，例如小小的蜂鳥每秒拍翅 80 次，但我們只能夠感覺到嗡嗡作響的聲音跟模糊不清的動作；馬兒在賽馬比賽衝刺時，四隻腳到底是一前一後左右交錯或是前後並行的奔跑？又例如，在牛奶不小心灑出並滴落到桌上的那一刻，飛濺起的液體是否有獨特的樣貌變化？對於人的感知而言，快速的運動的過程是模糊的，我們需要利用技術性的竅門才能捕捉或刻劃這些短暫的瞬間，而高速攝影及閃光燈即可以捕捉到稍縱即逝的詳細影像。所以要清楚拍攝到蜂鳥在飛行時的高度聚焦照片，需要的曝光時間必須遠少於一次拍翅的時間。事件發生的愈快，要捕捉瞬間影像的拍照時間就要愈短，這就是為什麼超短脈衝光束的產生會有劃時代的影響力。

● 科學家的成就

2023 諾貝爾物理獎頒發給三位科學家：Pierre Agostini，Ferenc Krausz 以及 Anne L' Huillier，表彰他們藉由產生極短的光脈衝，對於原子或分子中的電子在高速移動或者能量改變的過程實現精準量測的貢獻。

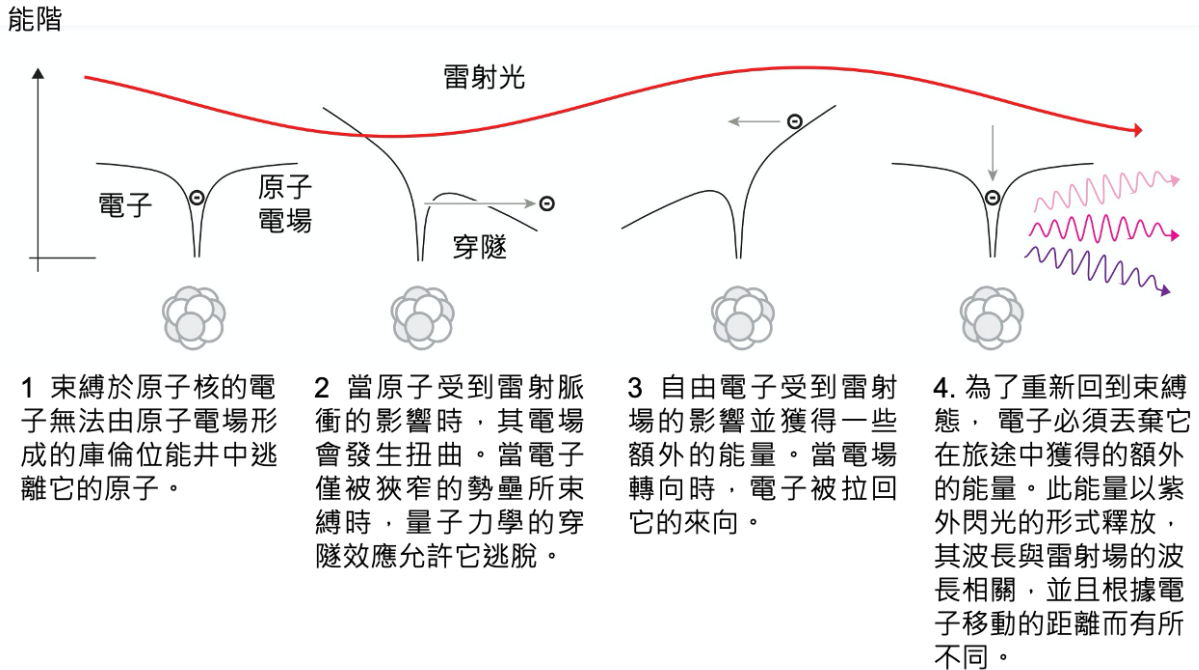
在 1987 年，L' Huillier 與她在法國實驗室的同事發現藉由光和原子的交互作用，通過惰性氣體的紅外雷射束可以產生更多、更強的泛波 (overtones)。所謂泛波指的是那些頻率為原始波頻率的整數倍的波。我們可將泛波比擬成賦予聲音特別性質的泛音，讓我們能聽出同樣音符由吉他與鋼琴演奏之差異。科學家的創新實驗成為有史以來捕捉最短瞬間



圖一 原子分子動力學的時間尺度

的關鍵。L' Huillier 在 1990 年代的一系列文章中繼續探索這個效應，她的貢獻讓人們得以從理論上理解此一現象，為後續的研究奠定了重要的基礎。

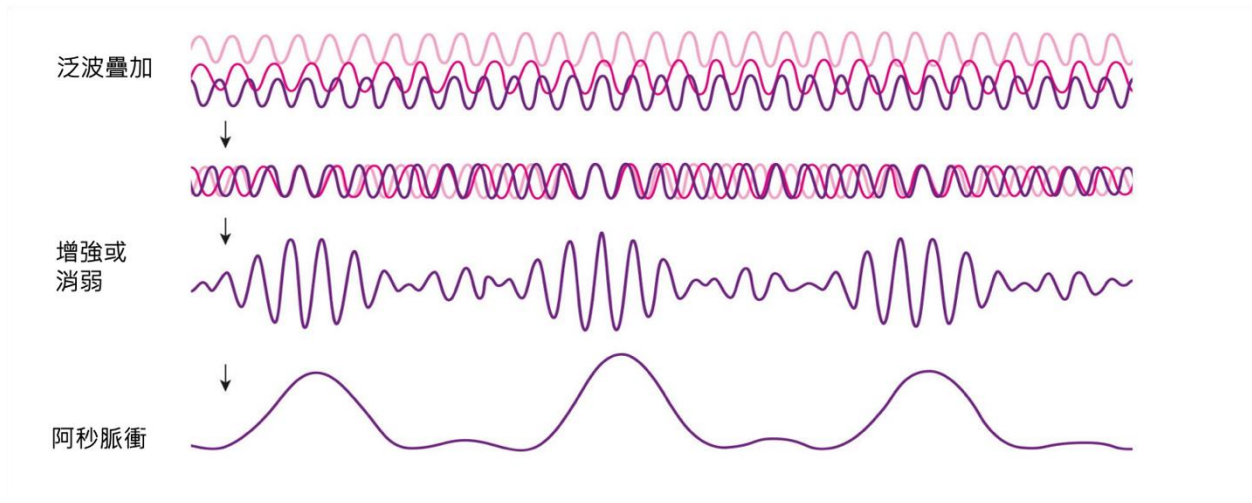
在 2001 年，Agostini 與在法國的研究團隊成功的產生一系列的就像火車車廂一般的光脈衝，而每一個脈衝寬度僅有 250 阿秒。在同一個時期，Krausz 與他在奧地利的研究團隊正進行能選擇單一脈衝的另一種技術，就像是某些車廂從火車脫軌並切換到另一個軌道。他們成功分離的脈衝長度是 650 阿秒。團隊用它來追蹤並研究電子從原子脫離的過程。



圖二 雷射光與氣體原子的交互作用

● 產生阿秒雷射光的原理

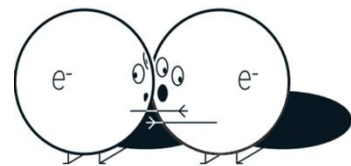
如圖二所示，當雷射光進入氣體並影響它的原子，便會引起電磁振動、進而扭曲原子核周圍用來束縛電子的電場，使得電子有機會逃離原子。然而，由於光場的持續振動，當它反向時，電子將被拉回原子核，並以光脈衝的形式釋放出在短暫旅程中收集到的來自雷射光場的額外能量。這些由電子發射出的光脈衝即為實驗中產生的泛波。如圖三所示，泛波間彼此的交互作用使得光在波峰重合時變得更強，但在一個週期的波峰與另一個週期的波谷重合時變弱。在 L' Huillier 的實驗中，泛波的重合產生一系列脈衝寬度大約為幾百阿秒的紫外光脈衝。透過光與許多不同原子的交互作用，科學家就能得到有著不同特定波長的光波。而藉由將“脈衝列車”與原始雷射脈衝的延遲部分重疊並觀察泛波的相位變化，這個過程讓 Agostini 測量出列車中脈衝的持續時間。



圖三 藉由泛波的疊加產生超短脈衝

● 超短脈衝光的應用

阿秒物理的研究和持續發展中的實驗技術實現了快速變化過程的瞬間捕捉，讓我們得以進入電子的世界。阿秒脈衝讓我們得以測量電子被拉扯離開原子所需的時間，以及檢驗這個時間與電子和原子核束縛的關係。我們可以重建分子與材料中的電子從一側至另一側或一地至另一地的震盪分布---在之前我們僅能夠以平均測量值描述它們的位置。阿秒脈衝的使用讓科學家可以研究物質更細微的性質，並辨識不同的事件。因此，這些超短脈衝已被運用至探索由電子主導的物理和化學反應背後的機制，並從電子學到醫學都有潛在的應用。例如，將阿秒脈衝用於推動分子並放出可測量的訊號；因為分子的訊號有特殊的結構，可以當作揭露分子身分的指紋，這樣的特性將有助於實現精準醫學診斷的應用。



導讀人--- 應用物理暨化學系電子物理組 官文絢 • 林奎輝