

L'atto fuggente

Alla scoperta del mondo ultrarapido degli elettroni

di Mauro Nisoli

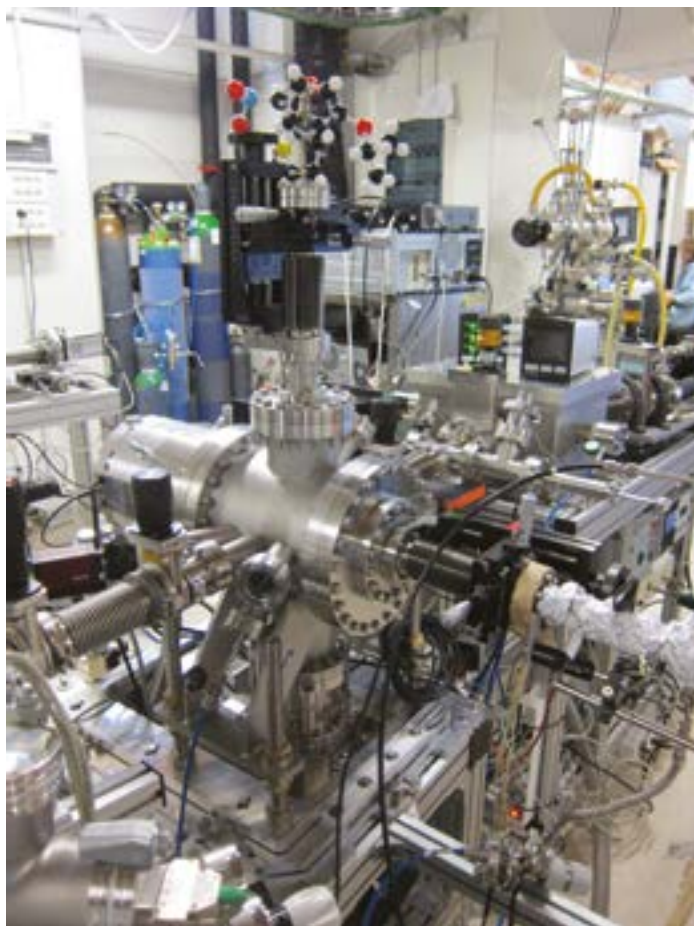


a.
Pierre Agostini, Ferenc Krausz e Anne L'Huillier ritratti durante la cerimonia ufficiale per il conferimento del premio Nobel per la fisica 2023.

Cosa succede dentro un atomo quando la luce lo colpisce? Come si muove un elettrone durante una reazione chimica? Fino a poco tempo fa, queste domande non potevano trovare risposta a livello sperimentale. Mancavano infatti gli strumenti adatti a investigare fenomeni elettronici che avvengono su intervalli di tempo così brevi. Oggi, grazie agli impulsi di luce più brevi mai generati, gli impulsi ad "attosecondi" (vd. fig. b p. 24), possiamo non solo osservare questi fenomeni, ma anche iniziare a controllarli. Un attosecondo è un miliardesimo di miliardesimo di secondo ($1 \text{ as} = 10^{-18} \text{ s}$). In un intervallo di tempo così breve, la luce percorre una distanza pari al diametro di un atomo d'oro. Su

questa scala ultrarapida si svolgono molti processi fondamentali, in particolare quelli governati dalla meccanica quantistica.

L'invenzione dei metodi sperimentali che hanno permesso di generare impulsi ad attosecondi e di utilizzarli per lo studio della dinamica degli elettroni nella materia è valsa il premio Nobel per la fisica 2023, assegnato a Pierre Agostini, Ferenc Krausz e Anne L'Huillier. Il riconoscimento ha premiato sia l'avanzamento sperimentale nella produzione di impulsi ultrabrevi, sia il loro impatto scientifico: tali impulsi rappresentano uno strumento che consente, per la prima volta, di osservare e controllare il movimento degli elettroni, le



b.
 Porzione dell'apparato sperimentale per misure ad attosecondi all'Attosecond Research Center del Dipartimento di Fisica del Politecnico di Milano.

particelle fondamentali che governano i processi chimici, elettrici e ottici della materia.

Misurare impulsi della durata di pochi attosecondi rappresenta una sfida formidabile, poiché si tratta di risolvere intervalli di tempo estremamente brevi, ben al di sotto delle capacità degli strumenti elettronici convenzionali e non accessibili nemmeno utilizzando le tecniche sviluppate per la misura degli impulsi a femtosecondi (vd. p. 30, ndr). Sono state sviluppate tecniche innovative basate sull'impiego della luce stessa come strumento di misura. Il metodo si fonda sull'uso di un secondo impulso, una porzione dell'impulso laser utilizzato per generare gli impulsi ad attosecondi, che agisce come una sorta di "riferimento" od "orologio ottico" rispetto all'impulso ad attosecondi da misurare. Focalizzando su un gas nobile i due impulsi con un ritardo temporale controllato tra loro, si induce l'emissione di elettroni la cui distribuzione energetica dipende dal ritardo stesso. L'analisi dell'evoluzione temporale dello spettro di fotoemissione consente di ricostruire con precisione le caratteristiche temporali degli impulsi ad attosecondi.

A partire dalla prima dimostrazione sperimentale di impulsi di durata inferiore al femtosecondo nel 2001, la scienza degli attosecondi ha avuto un impatto significativo sulla fisica atomica, molecolare e dello stato solido. L'introduzione di nuove tecniche spettroscopiche basate su impulsi ad attosecondi, affiancata dallo sviluppo di metodi teorici avanzati per l'interpretazione dei dati sperimentali, ha reso possibile l'osservazione e lo studio di fenomeni fisici fino ad allora inaccessibili, aprendo la strada a una comprensione più profonda della dinamica ultrarapida degli elettroni nei sistemi quantistici.

Tra le applicazioni più rilevanti vi è lo studio di come gli elettroni reagiscono quando la luce li espelle da un atomo. Per molto tempo si è creduto che questo processo fosse istantaneo: l'arrivo di un fotone bastava a liberare immediatamente un elettrone. Le misure rese possibili dagli impulsi ad attosecondi hanno però rivelato che non è così semplice: l'emissione avviene con un leggero ritardo, che racchiude preziose informazioni sulla dinamica elettronica e sulla struttura atomica. Dal punto di vista quantistico, questo ritardo, dell'ordine di pochi attosecondi, è dovuto allo sfasamento subito dalla funzione d'onda dell'elettrone, mentre attraversa il potenziale generato dall'atomo ionizzato.

In un esperimento pionieristico, il gruppo di Ferenc Krausz ha mostrato che, nel neon, gli elettroni provenienti dagli orbitali $2p$ emergono circa 20 as più tardi rispetto a quelli degli orbitali $2s$. Successivamente, il gruppo di Anne L'Huillier ha spinto queste osservazioni a un livello di precisione ancora maggiore, riuscendo a misurare con grande accuratezza i ritardi di fotoemissione, prima in argon e poi nuovamente in neon.

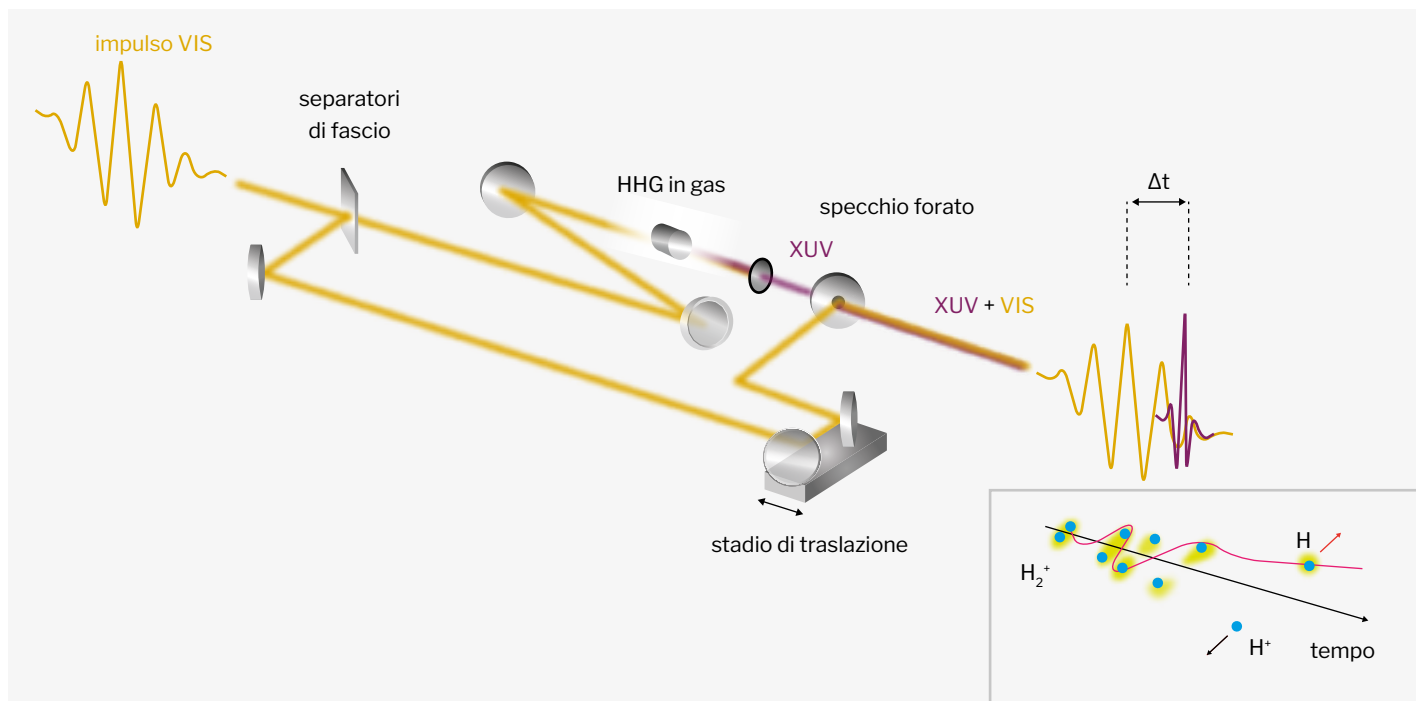
Oltre a osservare, la nuova sfida è controllare i sistemi quantistici. È possibile "pilotare" il comportamento degli elettroni, influenzare l'esito di una reazione chimica, dirigere il trasferimento di carica in una molecola o in un materiale con precisione temporale estrema? Sono questi i requisiti fondamentali per lo sviluppo dell'"attochimica", che mira a controllare le reazioni chimiche agendo direttamente sugli elettroni sulla scala temporale naturale delle dinamiche elettroniche.

La prima applicazione degli impulsi ad attosecondi allo studio della dinamica elettronica in molecole è stata realizzata al Politecnico di Milano, nell'ambito di una collaborazione internazionale. Impulsi ad attosecondi sono stati utilizzati per ionizzare molecole di idrogeno (H_2), mentre impulsi nell'infrarosso (IR) di pochi femtosecondi sondavano la dinamica elettronica generata. I risultati hanno dimostrato che è possibile controllare in modo diretto la posizione di un elettrone all'interno di una molecola su una scala temporale ultrarapida.

Un risultato particolarmente affascinante emerso dall'analisi teorica dell'esperimento è che, dopo la ionizzazione, il movimento dell'elettrone fra i due atomi di idrogeno può essere controllato agendo sull'elettrone espulso dall'impulso ad attosecondi. Questo controllo della localizzazione elettronica è possibile grazie a un fenomeno di *entanglement* quantistico tra l'elettrone emesso e lo ione molecolare (H_2^+) generato dalla ionizzazione. La presenza di tale correlazione suggerisce che l'*entanglement* tra fotoelettrone e ione possa essere un elemento ricorrente nei processi ultraveloci, aprendo prospettive interessanti verso un collegamento con il campo dell'informazione quantistica.

Un'importante implicazione tecnologica dello sviluppo dei metodi sperimentali introdotti dalla scienza ad attosecondi riguarda il settore della fisica dello stato solido. La capacità di controllare le proprietà fisiche dei solidi tramite impulsi

luminosi ultrabrevi rappresenta un importante obiettivo, di notevole interesse sia dal punto di vista della ricerca fondamentale che da quello tecnologico. In questo contesto, gli sviluppi più recenti nel settore degli impulsi ad attosecondi permettono di studiare i primissimi istanti dell'interazione tra luce e materia e di esplorare il limite ultimo di velocità con cui le cariche possono essere iniettate e modulate con la luce. Dal punto di vista tecnologico l'iniezione di carica in un semiconduttore mediante impulsi nella regione spettrale dell'IR di pochi femtosecondi potrebbe essere utilizzata per portare il materiale in uno stato conduttivo, realizzando commutatori ultraveloci in optoelettronica, un traguardo fondamentale che potrebbe consentire di aumentare la velocità limite dell'elaborazione dati e della codifica delle informazioni fino alla regione dei petahertz ($1 \text{ PHz} = 10^{15} \text{ Hz}$). La possibilità di generare e misurare impulsi luminosi della durata di pochi attosecondi ha aperto una nuova fase nella ricerca scientifica, in cui la luce non è più soltanto uno strumento di osservazione, ma diventa un mezzo per interagire e controllare direttamente i processi fondamentali della materia. Questi impulsi permettono di esplorare la dinamica degli elettroni su scale temporali estremamente brevi. L'accesso sperimentale a tali scale temporali consente una comprensione più profonda dei meccanismi alla base della chimica, della fisica dello stato solido e, più in generale, dei sistemi complessi.



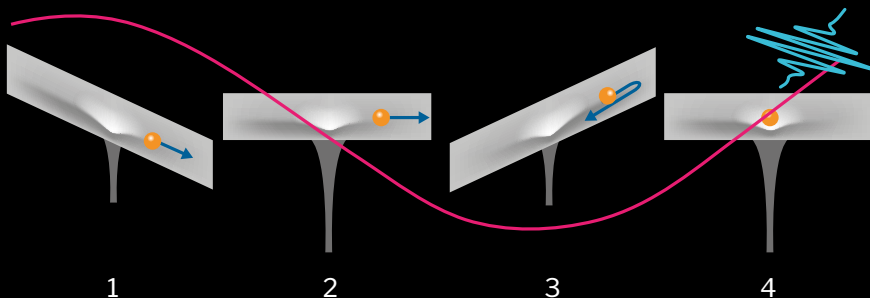
c. Gli impulsi di luce ad attosecondi consentono di osservare i movimenti ultraveloci degli elettroni nella materia. La figura mostra lo schema dell'apparato sperimentale utilizzato per misure di *pump-probe*, che combinano impulsi di pochi femtosecondi nel visibile (VIS) e impulsi ad attosecondi nell'estremo ultravioletto (XUV), ottenuti per mezzo della generazione di armoniche di ordine elevato (HHG). In particolare, è illustrata la prima applicazione degli impulsi ad attosecondi allo studio della dinamica elettronica in molecole. In questo esperimento, impulsi ad attosecondi ionizzano molecole di idrogeno H_2 in H_2^+ , mentre impulsi nel visibile (VIS) di pochi femtosecondi ne sondano la dinamica elettronica risultante. Il riquadro illustra in modo schematico l'evoluzione temporale della distribuzione di carica dopo la ionizzazione indotta dall'impulso ad attosecondi. Le zone verdi sono quelle in cui la distribuzione di carica dell'elettrone è maggiormente concentrata.

[as] approfondimento

Impulsi di luce

Qual è la durata minima di un impulso di luce? Esiste un limite fisico fondamentale: non è possibile produrre impulsi più brevi di un singolo ciclo ottico della luce, la cui durata è determinata dalla lunghezza d'onda λ secondo la relazione $T = \lambda / c$, con c che indica la velocità della luce. Per la luce visibile, la cui lunghezza d'onda varia tra 380 e 780 nanometri, la durata minima è quindi di circa 1-2 femtosecondi. Per superare la barriera del femtosecondo e generare impulsi ancora più brevi, è necessario usare luce con lunghezza d'onda minore, nella regione spettrale dell'estremo ultravioletto (XUV). La tecnica più comunemente utilizzata per generare impulsi in questo intervallo spettrale è chiamata "generazione di armoniche di ordine elevato" (HHG - High-Order Harmonic Generation in inglese), dimostrata sperimentalmente per la prima volta da Anne L'Huillier nel 1988. Tale tecnica è basata su effetti non lineari che si innescano quando impulsi laser ultrabrevi (da pochi femtosecondi a poche decine di

femtosecondi) vengono focalizzati su un gas nobile, come argon o neon, con intensità dell'ordine di 10^{13} - 10^{14} W/cm². A queste intensità il campo elettrico del laser può deformare il potenziale dell'atomo a tal punto da permettere all'elettrone più esterno di fuoriuscire ("ionizzazione tunnel"). Una volta liberato, l'elettrone viene accelerato dal campo elettrico del laser. Quando il campo elettrico inverte segno, nel mezzo ciclo successivo, l'elettrone può essere spinto nuovamente verso lo ione da cui era stato estratto e ricombinarsi con esso. A questo punto, l'energia cinetica accumulata durante il moto dell'elettrone viene rilasciata sotto forma di un breve impulso di luce ad alta energia (nella regione del XUV o dei raggi X molli), della durata di pochi attosecondi. Poiché questo processo, illustrato in modo schematico in fig. 1, si ripete periodicamente ogni mezzo ciclo ottico della radiazione incidente, si genera un treno di impulsi ad attosecondi.



1.

Illustrazione dei processi fisici che portano alla generazione di impulsi ad attosecondi. La linea rossa rappresenta un ciclo ottico del campo elettrico dell'impulso laser che viene focalizzato su un gas nobile e innesca il processo di generazione. L'elettrone più esterno (rappresentato come una pallina) viene liberato in prossimità di un massimo del campo elettrico tramite ionizzazione (1). L'elettrone estratto dapprima si allontana (2) e, in seguito all'inversione della polarità del campo (3), l'elettrone ritorna nella sua posizione iniziale, dove può ricombinarsi con lo ione da cui è partito dando luogo all'emissione di un impulso ad attosecondi (4).

Biografia

Mauro Nisoli è professore al Politecnico di Milano e responsabile dell'Attosecond Research Center presso il Dipartimento di Fisica. La sua attività di ricerca riguarda la generazione e l'impiego di impulsi ad attosecondi allo studio delle dinamiche ultraveloci degli elettroni nelle molecole e nella materia condensata.

10.23801/asimmetrie.2026.40.9