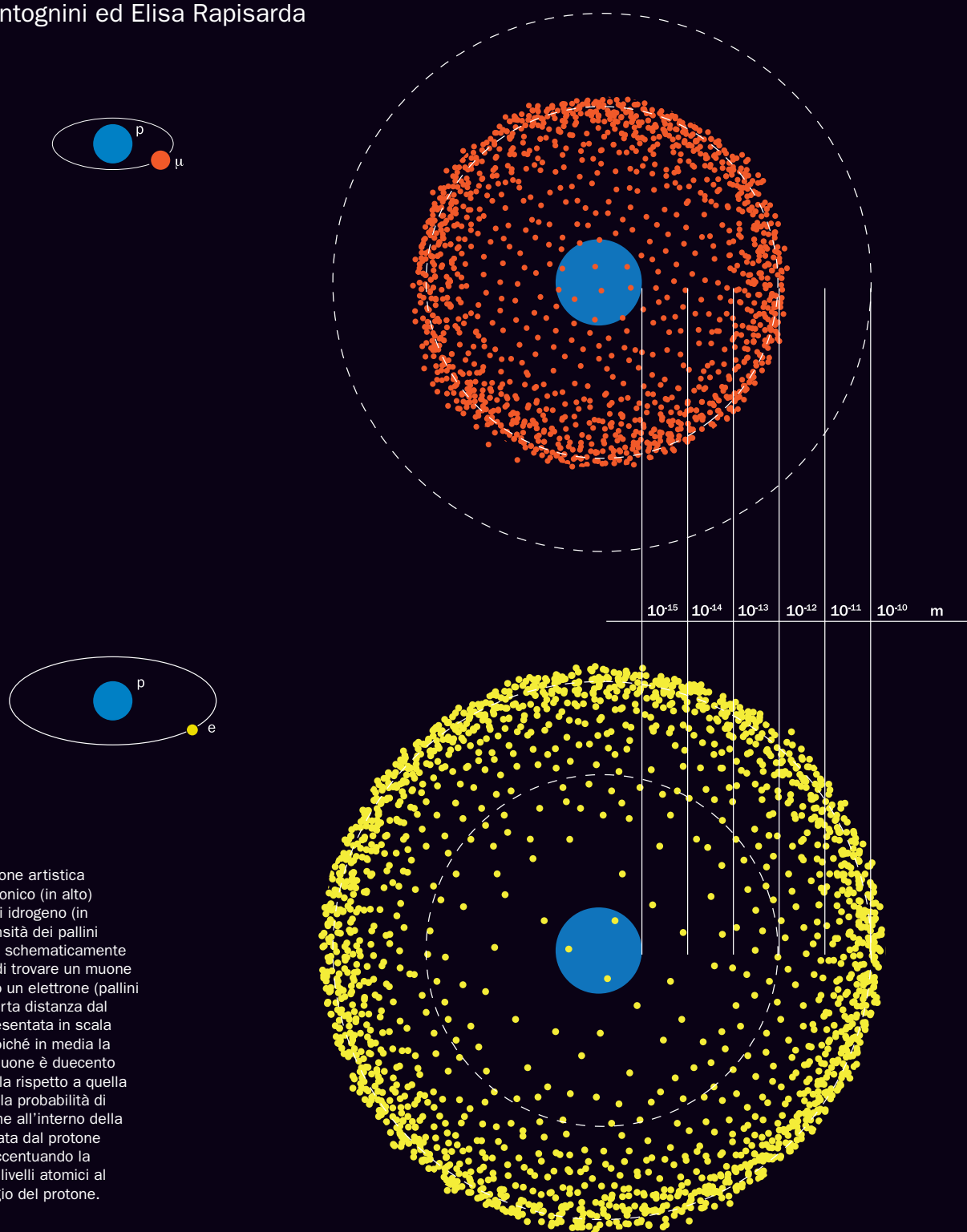


A stretto raggio

Dalla spettroscopia muonica al raggio del protone

di Aldo Antognini ed Elisa Rapisarda



a.
Rappresentazione artistica dell'atomo muonico (in alto) e dell'atomo di idrogeno (in basso). Le densità dei pallini rappresentano schematicamente le probabilità di trovare un muone (pallini rossi) o un elettrone (pallini gialli) a una certa distanza dal protone rappresentata in scala logaritmica. Poiché in media la distanza del muone è duecento volte più piccola rispetto a quella dell'elettrone, la probabilità di trovare il muone all'interno della regione occupata dal protone è maggiore, accentuando la sensibilità dei livelli atomici al valore del raggio del protone.



Un atomo è formato da un nucleo (carico positivamente) attorno cui orbitano gli elettroni. Che cosa succederebbe se al posto degli elettroni intorno al nucleo orbitassero dei muoni negativi? Non è fantascienza, ma qualcosa che i fisici riescono davvero a creare in laboratorio: è l'atomo "muonico", un atomo esotico in cui al posto dell'elettrone c'è un muone negativo legato dalla forza elettromagnetica al nucleo.

Il muone, infatti, è una particella fondamentale come l'elettrone, i neutrini e i quark e interagisce in maniera simile all'elettrone: stessa interazione elettromagnetica, stessa interazione debole e nessuna interazione forte. Però è 200 volte più pesante dell'elettrone. Poiché i raggi orbitali sono inversamente proporzionali alla massa della particella che si muove attorno al nucleo, l'orbita del muone in un atomo muonico è 200 volte più piccola dell'orbita di un elettrone in un analogo atomo elettronico (cioè un atomo ordinario). Il muone orbita quindi molto vicino al nucleo e i suoi livelli energetici sono fortemente influenzati dalla struttura nucleare. Un parametro nucleare come la dimensione del nucleo può allora essere determinato dalla misura molto precisa

dei livelli energetici dell'atomo muonico e dal loro confronto con le previsioni teoriche. Queste sono estremamente accurate dal momento che l'atomo muonico è un sistema a due corpi, la cui interazione è nota.

Perché si formi un atomo muonico in laboratorio è necessario che un muone, attraversando la materia, perda tutta la sua energia cinetica in modo da poter essere catturato nel potenziale elettrostatico del nucleo. Questo è del tutto analogo a ciò che successe in natura, trecentomila anni dopo il Big Bang, agli elettroni che costituirono i primi atomi ordinari. Gli atomi muonici si formano in stati altamente eccitati. Nel decadere da un livello energetico eccitato allo stato fondamentale, il muone emette raggi X (fotoni) caratteristici dell'atomo, con energie che, a seconda della carica nucleare, possono raggiungere anche diversi MeV. L'osservazione di questi raggi X fu la prima prova sperimentale della formazione degli atomi muonici. Sebbene le prime osservazioni fossero effettuate utilizzando i muoni dei raggi cosmici, solamente la disponibilità in laboratorio di intensi fasci di muoni consente di raggiungere un'alta precisione sperimentale. La misura dei raggi X muonici fu un campo di

b.
Visione aerea del Paul Scherrer Institut, nei pressi di Zurigo (in Svizzera), dove ancora oggi la fisica degli atomi muonici viene coltivata assiduamente.

ricerca estremamente attivo dagli anni '50 fino agli anni '80 presso grandi laboratori come il Cern, la Columbia University, la University of Chicago, il Los Alamos e il Paul Scherrer Institut (Psi). Sebbene questa intensa attività sia giunta a una fine negli anni '80, in concomitanza, da un lato, con la chiusura di grandi canali di produzione di fasci di muoni come il sincrociclone del Cern e il ciclone di Chicago e, dall'altro, con il sempre più diffuso interesse verso le collisioni ad alta energia, la fisica degli atomi muonici continua a essere coltivata ed è ancora molto vivace al Psi.

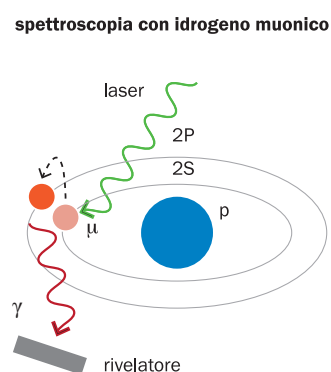
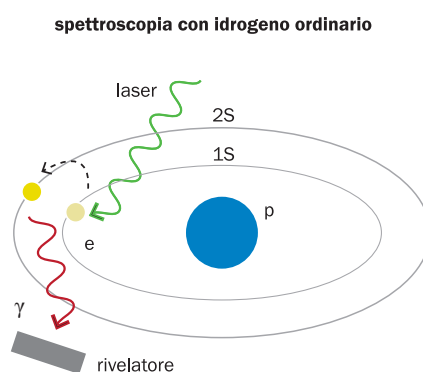
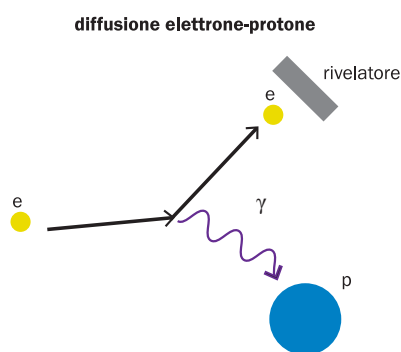
Il lavoro sperimentale di quegli anni portò alla misura dei raggi X muonici di quasi tutti gli elementi stabili, eccetto i più leggeri, l'idrogeno, l'elio e il litio, e poche altre eccezioni. Le prime misure furono effettuate usando scintillatori. Successivamente, l'avvento di rivelatori al germanio permise un significativo miglioramento dell'accuratezza e della precisione di rivelazione degli spettri energetici muonici consentendo, a sua volta, un notevole avanzamento nella comprensione dell'atomo muonico e dei relativi effetti nucleari. Oggi, il progetto muX al Psi mira a estendere

questa tecnica a elementi instabili sfruttando la disponibilità di spettrometri gamma ad alta efficienza di rivelazione e sviluppando un nuovo metodo di produzione degli atomi muonici. Sempre al Psi, la collaborazione Crema a partire dal 2000 ha sviluppato una tecnica pionieristica, basata sulla spettroscopia laser, che permette la misura delle transizioni energetiche in atomi muonici leggeri. Con tale tecnica la collaborazione ha ricavato con successo il raggio del protone, misurando la transizione tra due livelli denominati 2S e 2P nell'atomo di idrogeno muonico. In questo esperimento, un impulso laser viene utilizzato per indurre la transizione del muone dal livello atomico 2S al livello 2P, dal quale il sistema decade spontaneamente nello stato fondamentale emettendo un raggio X. Tale processo avviene solamente se la frequenza del laser è uguale alla frequenza della transizione atomica. Questa può dunque essere determinata con grande precisione osservando il picco dei raggi X emessi. La dimensione finita del protone (il nucleo dell'idrogeno) introduce una piccolissima correzione nei livelli atomici e nelle frequenze di

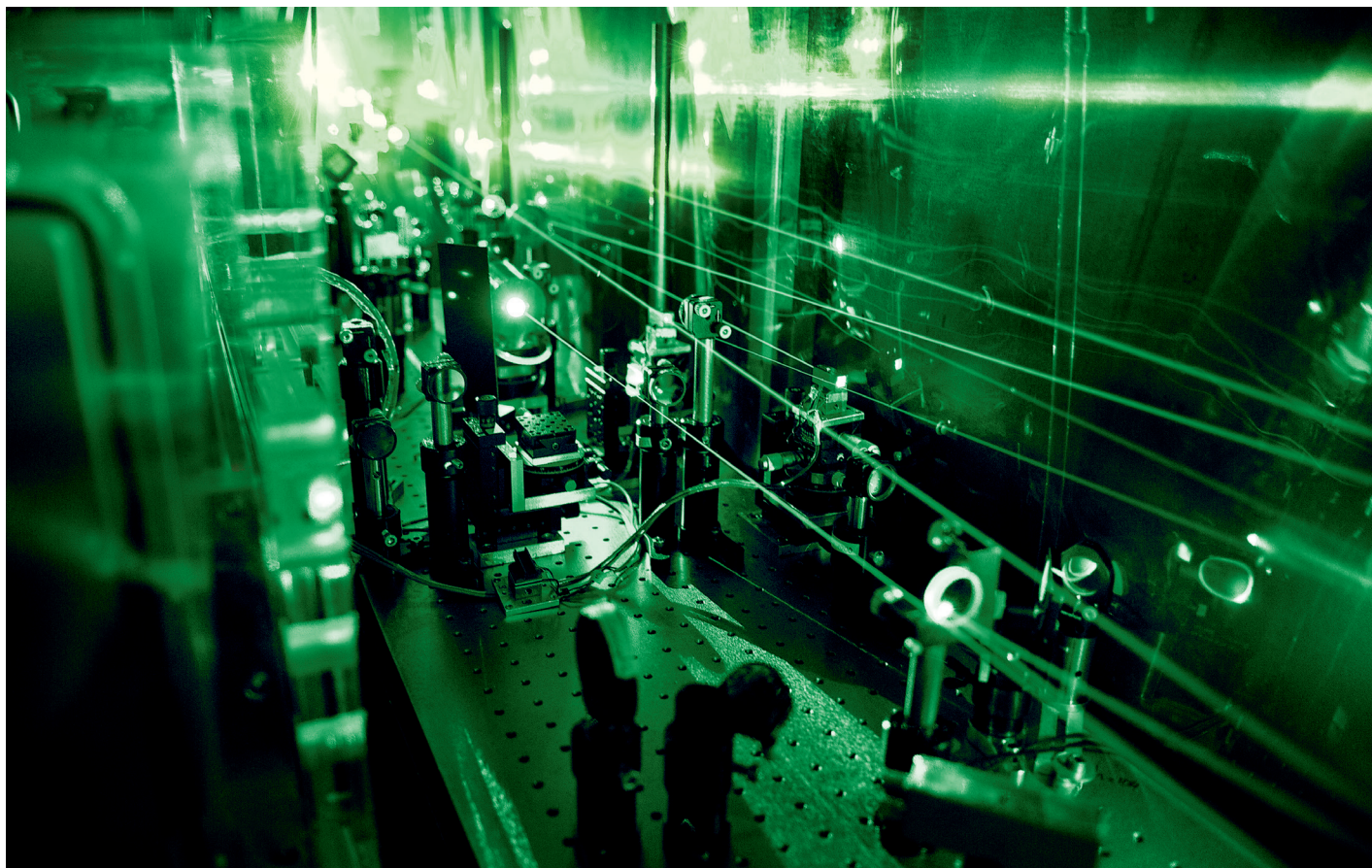
transizione, proporzionale al quadrato del raggio del protone. Tale correzione è dovuta al fatto che la funzione d'onda della particella orbitante (l'elettrone nell'idrogeno ordinario, il muone nell'idrogeno muonico) penetra nella regione di spazio occupata dal protone. Poiché, come abbiamo detto, il muone è mediamente più vicino al protone rispetto all'elettrone, l'effetto è più accentuato nell'idrogeno muonico. Questo sistema è dunque più sensibile al raggio del protone e permette di determinare il suo valore con maggiore precisione.

La spettroscopia laser dell'idrogeno muonico messa a punto al Psi si va ad aggiungere così agli altri due metodi sperimentali utilizzati per determinare il raggio del protone (vd. fig. c).

L'approccio storico consiste nell'utilizzare processi di diffusione di elettroni su un bersaglio di idrogeno. Fu la misura precisa della distribuzione angolare degli elettroni a rivelare che il protone non è un oggetto puntiforme, bensì un sistema composito. Per questa scoperta Robert Hofstadter ebbe il premio Nobel nel 1961. L'altro metodo per determinare il raggio del protone consiste appunto nella spettroscopia laser di alta precisione



c.
I tre metodi per determinare il raggio del protone: la diffusione di elettroni su protoni (nuclei di idrogeno), lo studio della transizione tra i livelli 1S-2S negli atomi di idrogeno ordinari e lo studio della transizione 2S-2P negli atomi muonici.



dell'atomo di idrogeno. Poiché l'influenza della dimensione del protone sui livelli energetici dell'atomo d'idrogeno elettronico è minima, un'alta precisione sperimentale è necessaria, tale da stimolare lo sviluppo di tecnologie laser innovative culminate col premio Nobel a Theodor Hänsch nel 2005.

Il valore del raggio del protone ottenuto dalla spettroscopia muonica, pari a $0,84087 \pm 0,00039$ fermi (un "fermi", in onore di Enrico Fermi, è un milionesimo di miliardesimo di metro, chiamato anche "femtometro"), è un ordine di grandezza più preciso rispetto a quello determinato con le altre due tecniche, grazie alla maggiore sensibilità dell'atomo muonico agli effetti nucleari. Tuttavia esso è in significativo disaccordo (per ben 6 sigma, vd. in *Asimmetrie* n. 22 p. 4, ndr) con i valori ottenuti dagli altri due metodi (il valore ottenuto dalla diffusione di elettroni su idrogeno, per esempio, è pari a $0,879 \pm 0,008$ femtometri), il che ha originato quello che dal mondo scientifico è stato denominato il *proton radius puzzle*.

Nuovi calcoli dei livelli atomici, ipotesi di fisica al di là del modello standard e revisioni della complessa struttura del protone sono stati proposti al fine di spiegare questa discrepanza, che però rimane tuttora irrisolta. Dal punto di vista sperimentale ambiziosi progetti sono in fase di realizzazione, fra cui la misura della struttura "iperfine" dell'idrogeno muonico. Tre collaborazioni sono impegnate in questo sforzo, una guidata da un gruppo di ricercatori dell'Infn al Rutherford Laboratory (UK), una presso il Psi e un'altra nel laboratorio Riken in Giappone.

d.

Il laser del Paul Scherrer Institut impiegato per misurare il raggio del protone con la spettroscopia muonica.

Biografia

Aldo Antognini è ricercatore del Paul Scherrer Institut (Psi) e insegna al Politecnico di Zurigo (Ethz). Sin dal dottorato si occupa della spettroscopia laser di atomi muonici, dello sviluppo di laser ad alta energia e di nuovi fasci di muoni a bassa energia. Dal 2017 è titolare di un Erc Consolidator Grant.

Elisa Rapisarda è fisico nucleare sperimentale al Paul Scherrer Institut (Psi). Ha conseguito il PhD nel 2006 e ha poi lavorato presso l'Università di Catania, la Kuleuven in Belgio e presso l'esperimento Isolde del Cern. La sua principale attività di ricerca riguarda la struttura nucleare di nuclei radioattivi.

Link sul web

<https://www.psi.ch/>

DOI: 10.23801/asimmetrie.2017.23.7