

Francesco Neve
Dipartimento di Chimica e Tecnologie Chimiche
Università della Calabria
f.neve@unical.it

CENT'ANNI DI ATOMO

A cento anni di distanza dalla formulazione della teoria quantistica dell'atomo e del cosiddetto modello planetario di Bohr-Rutherford le sorprese non sono ancora finite. Perlomeno sul versante sperimentale.

Quest'anno ricorre un anniversario molto importante per la storia della fisica e della chimica. Nel luglio 1913 compariva un lungo articolo in tre parti a firma del fisico danese Niels Bohr, all'epoca poco meno che trentenne [1]. Questa data rappresenta la nascita della teoria quantistica dell'atomo, una naturale, e per niente scontata, conseguenza della rivoluzionaria teoria dei quanti di Planck [2] (Fig. 1). Quel quadro teorico forniva una giustificazione delle osservazioni sperimentali e creava uno strumento per l'interpretazione dello spettro di emissione degli atomi. Come tutti sappiamo, la teoria non era affatto perfetta e rappresentava solo l'inizio di un lungo percorso teorico che si concluse con la Conferenza di Como del 1927 (dove erano presenti tutti i fisici più importanti tranne Einstein) e con la pubblicazione del famoso lavoro su *Nature* "Il postulato quantistico e i recenti sviluppi della teoria atomica" [3]. Quest'ultimo in realtà era una riformulazione più estesa della Lettera a *Nature* di tre anni prima [4].

Atomi gonfiati

Gli atomi stabili godono di una stabilità "mostruosa". Il nucleo esercita la sua tremenda forza di attrazione sugli elettroni e questi sono liberi di muoversi solo nelle im-

mediate vicinanze del nucleo stesso; tuttavia non su orbite né fisse né circolari come aveva previsto Bohr (Fig. 2).

Tutti sappiamo che la probabilità di trovare elettroni di un atomo a distanze molto grandi non è nulla, eppure la possibilità pratica di stabilizzare atomi in cui gli elettroni (o anche uno solo di essi) siano a distanze migliaia di volte più grandi di quelle a riposo è praticamente vicina a zero. Figuriamoci quando si pensi ad elettroni 100.000-1.000.000 di volte più lontani dal nucleo.

Se esistessero, atomi del genere sarebbero enormi se confrontati con gli atomi della nostra quotidianità, così grandi da essere visibili quasi a



Fig. 1 - Max Planck (sinistra), Niels Bohr (centro) ed Ernest Rutherford

FLASHBACK

PAGINE DI STORIA

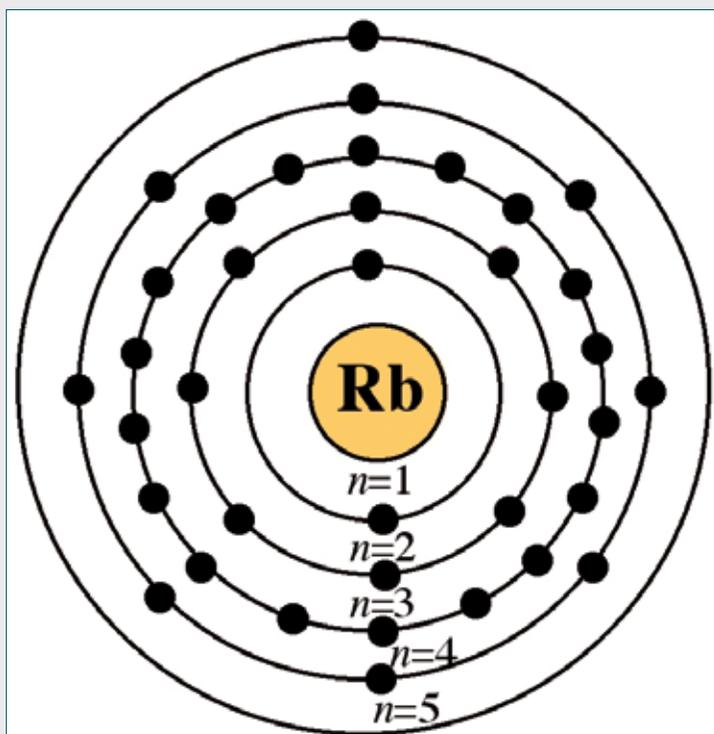


Fig. 2 - Struttura elettronica dell'atomo di Rb (Z=37) secondo il modello di Bohr

Tab. 1 - Proprietà di stati di Rydberg di atomi idrogenoidi e dipendenza da n^a

Proprietà	Dipendenza	$n=10$	$n=100$	$n=1000$
Raggio medio	$a_0 n^2$	5,3 nm	0,53 μm	53 μm
Periodo del moto orbitale	$\tau_0 n^3$	0,15 ps	0,15 ns	0,15 μs
Separazione tra livelli adiacenti	$2Rn^{-3}$	200 cm^{-1}	0,2 cm^{-1}	$2 \times 10^{-4} \text{cm}^{-1}$
Polarizzabilità	$\propto n^7$	0,2	$0,2 \times 10^7$	$0,2 \times 10^{14}$

^a a_0 e R sono il raggio di Bohr (0,0529 nm) e la costante di Rydberg; $\tau_0 = 1,518 \times 10^{-16} \text{s}$

occhio nudo, e sarebbero destinati a essere più che effimeri. Studiati per la prima volta da Amaldi e Segrè [5], sono i cosiddetti *atomi di Rydberg*, nei quali uno (o più) elettrone di valenza è eccitato ad un valore di numero quantico principale n molto elevato ($n = 30-300$). Tali atomi, a lungo cercati e oggi più studiati che mai per i computer quantistici del futuro [6], sono instabili sulla Terra ma riescono a sopravvivere in formazioni gassose interstellari o nei plasm. È ad essi che si possono ricondurre diverse emissioni nella regione delle onde radio provenienti da lontane galassie. Ad esempio, l'emissione dell'idrogeno da uno stato di Rydberg $n=76$ verso il livello $n=75$ è osservata dagli astronomi a $\nu = 14,68999 \text{ GHz}$ ed è chiamata $H76\alpha$ [7].

Le eccezionali proprietà degli atomi (o stati) di Rydberg - tempo di sopravvivenza lungo, enormi dimensioni, grande momento di dipolo, moto traslazionale estremamente lento, ecc. - ne fanno i candidati ideali per lo studio di particolari fenomeni collettivi. In particolari condizioni (ad esempio a bassissima T), gli atomi di Rydberg possono costituire aggregati o clusters dando origine a quella che viene chiamata *materia di Rydberg*. Molto recentemente è apparsa nella letteratura specializ-

zata una dimostrazione dell'esistenza di *molecole di Rydberg* [8, 9]. Si tratta di entità in cui due atomi di Rydberg o un atomo di Rydberg e un atomo classico sono tenuti insieme da un'interazione di legame a carattere elettrostatico.

Nel tempo i fisici sono riusciti a realizzare atomi con uno o più elettroni di Rydberg [10], utilizzando generalmente elementi alcalini o alcalinoterosi facilmente riducibili allo stato atomico gassoso. La particolarità degli atomi di Rydberg è che le loro interessanti proprietà dipendono da n in una maniera molto semplice (Tab. 1). Ad esempio, se il raggio orbitale varia con n^2 , il numero di livelli di energia in un piccolo range di energia varia come n^5 . Questo comporta che un'eventuale transizione $n \rightarrow (n-1)$ per un valore di n molto elevato comporterebbe una variazione di energia estremamente piccola se confrontata con una del tipo $n(2) \rightarrow n(1)$ o $n(3) \rightarrow n(2)$. Dal punto di vista fisico viene detto che gli atomi di Rydberg si comportano come un atomo di idrogeno perché l'elettrone di Rydberg è così distante dal nucleo che l'interazione nucleo-elettrone è assimilabile a quella tra un elettrone e uno ione di carica +1 (e cioè con la stessa carica nucleare di un singolo protone).

In un recente esperimento un elettrone del potassio è stato portato a $n \sim 300$ mediante l'uso di un laser molto preciso [11]. Questo elettrone, che si muove su un'orbita kepleriana quasi-circolare, ha una velocità enormemente più bassa rispetto a quella in un atomo a riposo (il periodo dell'orbita kepleriana è $\sim 4 \text{ ns}$), e può essere guidato nel suo moto mediante impulsi elettromagnetici rapidissimi e sincronizzati con il moto orbitale dell'elettrone localizzato. Dal momento che tale condizione può essere mantenuta in maniera praticamente indefinita, si può convenire sul fatto che si sia trattato di riprodurre quasi un atomo di Bohr. Nel 2012 lo stesso gruppo di ricerca è andato oltre riuscendo a spostare pacchetti d'onda (la versione quanto-meccanica di particelle classiche che si muovono su un'orbita stazionaria) da una condizione iniziale $n \sim 305$ ad una finale di $n \sim 600$ nell'80% degli atomi di potassio a

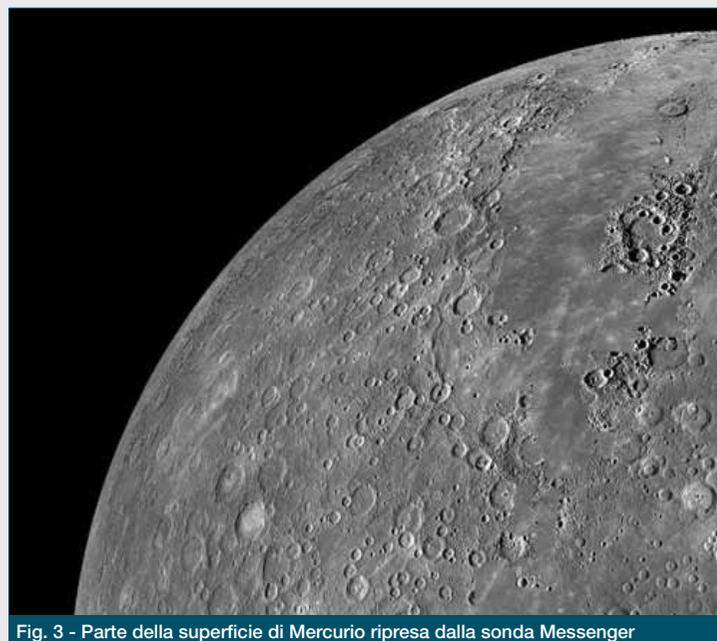


Fig. 3 - Parte della superficie di Mercurio ripresa dalla sonda Messenger

cui era stato applicato un campo elettrico sinusoidale 1-D di periodo di oscillazione crescente [12]. Secondo gli autori, il successo dell'esperimento è un buon viatico per la futura creazione di atomi eccitati a due elettroni di Rydberg con tempi di vita sufficientemente lunghi.

Atomi svuotati

Se la formazione degli atomi di Rydberg riguarda l'eccitazione di elettroni di valenza, enormi energie sono richieste per creare vuoti nella struttura elettronica degli atomi, cioè per ionizzare elettroni di core. Si tratta cioè di ricreare condizioni estreme simili a quelle che ad esempio si pensa si realizzino quando ioni pesanti espulsi dal Sole vanno a colpire la superficie di pianeti privi di atmosfera (come Mercurio, v. Fig. 3) danneggiandola profondamente [13].

Quando gli ioni (ad alta carica positiva) trasportati dal vento solare arrivano a brevissima distanza dalla superficie inducono la ionizzazione degli atomi superficiali. Lo ione impattante attrae cioè elettroni superficiali che vanno a popolare i livelli di energia più alti, lasciando i suoi livelli elettronici di core temporaneamente vuoti. Per un brevissimo istante l'atomo diventa più grosso e praticamente neutro. Ma in circa 100 fs i buchi creati nei livelli elettronici di core vengono immediatamente colmati dagli elettroni eccitati presenti nei livelli più esterni e l'atomo letteralmente scoppia. Atomi "vuoti" (*hollow atoms*) di questo tipo sono cioè delle sorti di palle di fuoco, nei quali gli elettroni dei livelli più esterni ricadono rapidamente nei livelli interni, con rilascio violento di fotoni o elettroni veloci (o di entrambi) in un gigantesco effetto Auger [14].

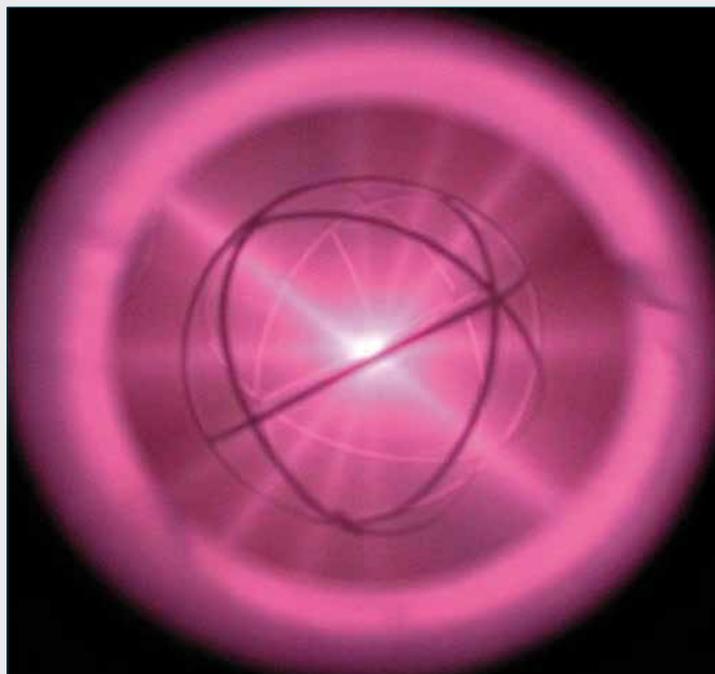
Ma quanta energia è richiesta per svuotare selettivamente gli atomi di parte degli elettroni di core? Se un generatore di raggi X per applicazioni mediche è in grado di rimuovere un singolo elettrone dai livelli elettronici interni di un atomo, oggi un laser a raggi X della classe SLAC (un laser a elettroni liberi in grado di generare e concentrare in un singolo impulso una potenza dell'ordine di 10^{10} - 10^{15} W) è in grado di spogliare un atomo dei suoi elettroni interni in un solo colpo prima di annichilirlo del tutto. Questo è quello che è successo a Stanford, California, nel 2009 ad atomi di neon sottoposti al laser SLAC del laboratorio NLA (National Linear Accelerator) [15] e riconfermato quest'anno da un team internazionale [16].

Un controllo accurato della potenza del laser e della durata dell'impulso permettono ormai di raggiungere situazioni molto ben definite che vanno, ad esempio, dalla ionizzazione di due elettroni nel livello *K* ($n=1$) o *L* ($n=2$) di atomi di Al con la formazione di hollow atoms *KK* o *KL* [17], fino alla ionizzazione spinta di atomi di Xe. Questi ultimi sono stati spogliati dei loro 36 elettroni di core ($Xe = [Kr]4d^{10}5s^25p^6$) fino a raggiungere lo stato di carica Xe^{36+} [18].

Il futuro dell'atomo

Naturalmente è estremamente difficile prevedere cos'altro si potrà fare all'atomo oltre a gonfiarlo, spremere, fargli il *peeling* profondo o superficiale, ecc. Uno dei desideri più confessati è quello di costringerlo a fondersi con altri atomi, magari senza bisogno di tanta energia. C'è già chi suggerisce dove farlo [19], e cioè all'interno di una molecola di C_{60} se solo si riuscisse a scoprire come farlo.

Vedremo cosa ci riserveranno i prossimi cento anni.



Bibliografia

- [1] N. Bohr, *Phil. Mag.*, 1913, **26**, 1.
- [2] M. Planck, *Verh. Dtsch. Phys. Ges. (Berlin)*, 1900, **2**, 202; 237.
- [3] N. Bohr, *Nature*, 1928, **121**, 580.
- [4] N. Bohr, *Nature*, 1925, **116**, 809.
- [5] E. Amaldi, E. Segrè, *Nuovo Cimento*, 1934, **11**, 145.
- [6] Wu et al. *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.*, 2013, **46**, 185502.
- [7] A.E. Lilley, P. Palmer, *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, 1968, **16**, 143.
- [8] K.R. Overstreet et al., *Nature Physics*, 2009, **5**, 581.
- [9] A. Browaeys, P. Pillet, *Nature Physics*, 2010, **6**, 941.
- [10] U. Eichmann et al., *Phys. Rev. Lett.*, 1990, **64**, 274.
- [11] J.J. Mestayer et al., *Phys. Rev. Lett.*, 2008, **100**, 243004.
- [12] B. Wyker et al., *Phys. Rev. Lett.*, 2012, **108**, 043001.
- [13] E. Kallio et al., *Planet. Space Sci.*, 2008, **56**, 1506.
- [14] H. Winter, F. Aumayr, *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.*, 1999, **32**, R39.
- [15] L. Young et al., *Nature*, 2009, **466**, 56.
- [16] L.J. Frasinski et al., *Phys. Rev. Lett.*, 2013, **111**, 073002.
- [17] J. Colgan et al., *Phys. Rev. Lett.*, 2013, **110**, 125001.
- [18] B. Rudek et al., *Nature Photon.*, 2012, **6**, 858.
- [19] F.A. Gareev, I.E. Zhidkova, arXiv:nucl-th/0505021, 2005.