

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

## ANTIATOMI E ANTIMOLECOLE: L'ANTIMATERIA DIVENTA "STABILE"

Come si è arrivati a creare l'antimateria e cosa si pensa di fare per renderla stabile e utilizzabile.

### Materia e antimateria

Da quando i primi sviluppi della moderna medicina nucleare hanno permesso di condurre esperimenti di tomografia per emissione di positroni (PET) [1], la nozione di antimateria ha lentamente raggiunto una dimensione molto familiare se non proprio quotidiana. Tecnicamente, l'antimateria è formata da antiparticelle, così come la sua versione simmetrica - la materia - è costituita di particelle. Quando parliamo di antimateria, dunque, stiamo parlando di antiparticelle, identiche alle particelle per massa e per spin, ma di carica elettrica opposta (vi sono poi particelle che sono considerate antiparticelle di se stesse come i fotoni o i fermioni di Majorana). Quando materia ed antimateria collidono il risultato è generalmente quello dell'annichilazione, un processo nel quale la massa è trasformata in pura energia. Questo è sicuramente ciò che avviene quando particella e relativa antiparticella vengono a contatto. La quantità di energia ottenuta è però infinitamente più piccola (ca.  $1 \times 10^{-10}$ ) di quella necessaria per creare (e mantenere) l'antimateria.

Dirac aveva previsto l'esistenza delle antiparticelle in una serie di lavori fondamentali a partire dal 1928 [2-4]. Già nel 1932 Anderson [5] riuscì a provare sperimentalmente l'esistenza (e la formazione) degli antielettroni, cioè dei positroni. Per avere la scoperta delle altre antiparticelle più massive, l'antiprotone e l'antineutrone, bisognò aspettare gli esperimenti di Segrè e Chamberlain del 1955. Dopo altri quaran-

t'anni, una collaborazione tra fisici di diversi Paesi ha permesso la creazione in un acceleratore del primo antiatomo neutro, costituito da un positrone in orbita intorno ad un nucleo formato da un solo antiprotone [6]. L'anti-idrogeno era però troppo "caldo" ed estremamente reattivo. Fu necessario aspettare qualche altro anno per renderlo più "tiepido" [7].

### L'idrogeno e i suoi fratelli

Quanti atomi di idrogeno esistono? O meglio, quanti diversi tipi di idrogeno esistono? La risposta è semplice se ci riferiamo agli isotopi noti dell'idrogeno (deuterio e trizio oltre all'idrogeno propriamente detto). Molto meno semplice è la risposta se tra le possibili combinazioni che definiscono il più semplice tra gli atomi includiamo altre entità che ci portano a considerare sistemi costituiti dall'abbinamento particella-

Tab. 1 - Atomi neutri paragonabili all'idrogeno elencati in ordine di massa crescente

Combinazione	Costituenti	Nome (Simbolo)
Particella-Antiparticella	$e^+e^-$	Positronio (Ps)
Particella-Antiparticella	$\mu^+e^-$	Muonio (Mu)
Particella-Particella	$p^+e^-$	Idrogeno (H) o Pròzio
Particella-Particella	$p^+\mu^-$	Idrogeno muonico
Antiparticella-Antiparticella	$p^-e^+$	Anti-idrogeno ( $\bar{H}$ )

Abbreviazioni: e=elettrone, p=protone,  $\mu$ =muone

particella, particella-antiparticella, e infine antiparticella-antiparticella. Vedremo nel seguito che in effetti è possibile parlare di atomi di idrogeno propriamente detti, cioè costituiti da protoni ed elettroni, così come di antiatomi di idrogeno, passando per sistemi più esotici ancorché relativamente stabili in determinate condizioni (Tab. 1).

## Muonio

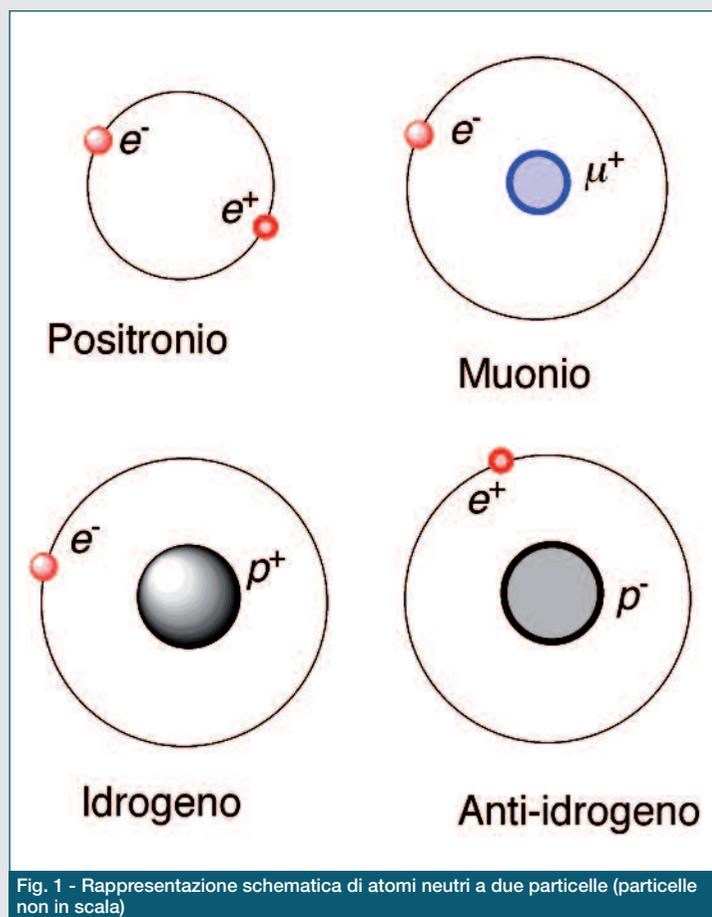
I muoni furono scoperti da Anderson e Neddermeyer a Caltech nel 1936 e la loro esistenza fu confermata l'anno seguente. Il *muone* ( $\mu^-$ ) è una particella elementare simile all'elettrone (stessa carica negativa unitaria, stesso spin) ma infinitamente più instabile dell'elettrone (tempo di emivita di 2,2  $\mu\text{s}$  vs. un tempo praticamente infinito). I muoni hanno una massa che è circa 200 volte quella dell'elettrone. Quando un muone sostituisce un elettrone in un atomo, l'atomo è detto muonico. Nel caso dell'idrogeno muonico, la massa dell'atomo è più grande rispetto a quella dell'idrogeno ma il suo raggio è molto più piccolo. Poiché un muone ha una massa di 105,7 MeV/c<sup>2</sup>, per creare un muone ci vuole un'energia paragonabile che può derivare solo da una reazione di fissione a singolo evento (non quelle che occorrono nei normali reattori). In realtà, sulla terra arrivano continuamente muoni prodotti dall'impatto dei raggi cosmici su atomi o molecole presenti nella parte alta dell'atmosfera e successivo decadimento dei pioni prodotti.

Come per l'elettrone, il Modello Standard prevede che esista un antimuone ( $\mu^+$ ) con uguale massa e spin ma con carica opposta a quella del muone. Quando un antimuone cattura nel suo campo gravitazionale un elettrone si trasforma in un atomo neutro detto *muonio* [8], di simbolo Mu [9]. Atomi formati da una particella ed una antiparticella sono instabili, sopravvivendo solo per un tempo molto breve. Nel caso del muonio il tempo di vita è infatti di soli 2  $\mu\text{s}$ , e per questa ragione può essere considerato il "secondo radioisotopo dell'idrogeno" oltre al trizio [10]. Pur sopravvivendo per così poco tempo, il muonio è in grado di diffondere all'interno di strutture cristalline come NaCl o KCl. La particolarità del muonio è inoltre quella che, essendo composto da soli leptoni, l'atomo presenta livelli energetici che, a differenza dell'idrogeno, si possono calcolare esattamente mediante l'elettrodinamica quantistica. Ancora oggi si cercano prove sperimentali dell'esistenza del cosiddetto "vero muonio", un atomo cioè costituito da un muone ( $\mu^-$ ) e da un antimuone ( $\mu^+$ ) [11].

## Positronio

L'altra combinazione particella-antiparticella che porta alla formazione di un atomo neutro metastabile paragonabile all'idrogeno, ma di massa notevolmente più ridotta sia rispetto ad H che a Mu, è quella costituita da un elettrone e da un positrone (Fig. 1). Un tale atomo è chiamato *positronio*, e il suo simbolo è Ps (Tab. 1).

Nello stato fondamentale il positronio può assumere uno di due stati in relazione al valore dello spin dell'elettrone e del positrone, quello di singoletto denominato para ( $p\text{-Ps}$ ) con  $S=0$  (energeticamente più stabile), e quello di tripletto denominato orto ( $o\text{-Ps}$ ) con  $S=1$ . I due tipi di



positronio decadono in ogni caso molto velocemente (vita media di 0,12 e 142 ns nel vuoto, rispettivamente) in una reazione di annichilazione tra particella e antiparticella che produce 2 ( $p\text{-Ps}$ ) o 3 ( $o\text{-Ps}$ ) fotoni gamma. L'esistenza del positronio fu ipotizzata nel 1934 e confermata sperimentalmente da Deutsch nel 1951 [12]. Ora è noto che il positronio si forma continuamente nell'interazione dei positroni con la materia. Questo è ciò che avviene in un esperimento PET: è dimostrato che più dell'80% dei raggi gamma prodotti nell'annichilazione dei positroni emessi dal radiofarmaco derivano dal decadimento di Ps (che ovviamente si deve essere prima formato) [13].

Gli studi sul positronio hanno permesso di determinare i suoi modi di decadimento, i tempi di decadimento, nonché le sue proprietà spettroscopiche ed i modi di interazione con gli atomi. Più recentemente, è stato possibile studiare le modalità di scattering di Ps. È risultato che la sezione d'urto totale è molto simile a quella di un elettrone libero che si muovesse alla stessa velocità [14]. Questo è sorprendente se si considera che Ps è neutro ed ha una massa doppia di quella dell'elettrone.

## Positronio molecolare

Il positrone è un probe unico per molti sistemi chimici. Le sue più recenti applicazioni sono in campo industriale nella caratterizzazione di polimeri, semiconduttori, leghe, superfici ed altro ancora. La sua chi-



# HIGHLIGHTS INNOVAZIONE

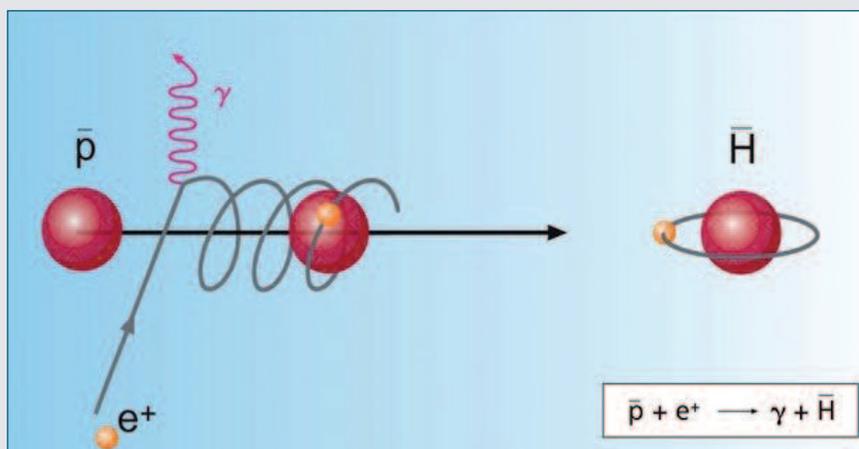


Fig. 2 - Uno dei possibili meccanismi di formazione di atomi di anti-idrogeno attraverso ricombinazione radiativa (immagine tratta da [www.weltderphysik.de](http://www.weltderphysik.de))

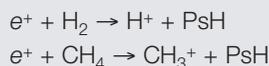
mica è ampia sia in fase gassosa che liquida. In effetti i derivati del positrone con atomi o molecole A vengono definiti *complessi* (indicati come  $\{e^+A\}$ ), e rappresentano solo degli addotti piuttosto instabili. Una recente review riporta la binding energy (BE) teorica del positrone con atomi di molti elementi. Tra quelli che risultano “legati” il valore di BE più elevato (0,84 eV) è previsto per  $\{e^+Ti\}$  [15].

Anche la chimica del positronio sembra essere piuttosto promettente: ne è testimonianza il Workshop Internazionale sul Positronio e sulla Chimica del Positronio, iniziato nel 1978 ed arrivato già alla decima edizione [16]. La formazione di derivati di Ps è abbastanza recente ed è legata alla disponibilità di sorgenti di positroni ad alto flusso. Nel caso del positronio si possono ottenere sia complessi  $\{PsA\}$ , che ioni (come  $Ps^-$ ), che vere molecole nelle quali Ps si comporta come un isotopo più leggero dell'idrogeno.

La specie molecolare  $Ps_2$ , cioè l'analogo di  $H_2$ , è stata teorizzata già a partire dal 1946 [17, 18] ma è stata osservata sperimentalmente solo nel 2007 [19]. La BE teorica della molecola è di soli 0,4 eV [18], e la sua struttura è stata oggetto di analisi teorica [20]. A causa della bassa stabilità del positronio e della difficoltà di ottenerne di “freddi”, l'osservazione di  $Ps_2$  è stata particolarmente difficile da raggiungere. Per prepararla si è dovuto ricorrere alla produzione di positronio orto all'interno di un solido cristallino. La scelta è caduta su un film di silice porosa: la molecola  $Ps_2$  si è quindi formata sulle pareti delle cavità interne del solido. Il confinamento degli o-Ps è stato decisivo perché ha rallentato i processi di self-quenching (da o-Ps a p-Ps), permettendo il percorso competitivo di formazione della molecola. Nelle intenzioni dei ricercatori il passaggio successivo sarà quello di cercare di ottenere una maggiore quantità di molecole prodotte e quindi una maggiore densità del gas. Il risultato dovrebbe essere un gas denso di materia-antimateria da cui potrebbe essere possibile ottenere un condensato di Bose-Einstein [19].

Un'altra forma molecolare contenente un positronio è quella denominata idruo di positronio, PsH. Sebbene l'idruo si potrebbe formare semplicemente nella collisione tra  $H_2$  e  $e^+$ , l'osservazione sperimentale della sua formazione è avvenuta nella collisione tra positroni e meta-

no [21]. La formazione di  $CH_3^+$  è la prova dell'avvenuta formazione di PsH. Un altro possibile prodotto della reazione è  $PsCH_3$ .



Altre molecole contenenti atomi di positronio sono state previste solo da un punto di vista teorico, come nel caso dell'acqua positronica  $Ps_2O$ .

## Anti-idrogeno

L'anti-idrogeno, un idrogeno composto di sole antiparticelle, è presunto “stabile” e questo fa ben sperare circa la possibilità di studiare in maniera precisa il problema

della simmetria materia-antimateria e della sua violazione apparente. In effetti, atomi di anti-idrogeno sono stati prodotti per la prima volta nel 1996 attraverso interazioni nucleo-antiprotoni [6] e più efficacemente nel 2002, mescolando direttamente antiprotoni e positroni a temperature molto basse (15 K) [7]. Da allora i metodi e le collaborazioni sono aumentate (le due più importanti sono ATRAP ed ALPHA presso il CERN), e lo scopo principale è diventato quello di produrre atomi di anti-idrogeno “freddi” e di tenerli confinati il più a lungo possibile [22-24] (Fig. 2).

Nel 2010 si è riusciti a produrre e intrappolare 38 atomi di anti-idrogeno ed il tempo di confinamento raggiunto è stato di ben 172 ms [25]. Contenere (cioè impedirne l'annichilazione) antiparticelle neutre e antiatomi è più difficile che nel caso di antiparticelle o nuclei con carica. I campi elettromagnetici che servono per confinare l'antimateria elettricamente carica sono infatti inefficaci su quella neutra. Gli atomi di anti-idrogeno possono essere confinati solo attraverso la debole interazione tra il debole momento di dipolo magnetico della molecola ed un campo magnetico esterno. In particolare, gli ultimi esperimenti hanno utilizzato trappole di Penning per ottenere il confinamento a bassa temperatura.

Negli ultimi mesi è stato realizzato un ulteriore passo avanti nella stabilizzazione dell'antimateria: i ricercatori del progetto ALPHA hanno prodotto atomi di anti-idrogeno mescolando circa 30.000 antiprotoni e due milioni di positroni (per esperimento) e riuscendo a confinare gli antiatomi prodotti per 1.000 secondi, un tempo considerato enorme [26]. In effetti, la limitazione più grande alla produzione di significative quantità di antimateria è quella relativa alla capacità produttiva di antiprotoni. Alla capacità attuale ( $10^7$  antiprotoni al minuto), al CERN sarebbero necessari circa un miliardo di anni per produrre una mole (cioè un grammo) di anti-idrogeno.

Nonostante queste limitazioni, molti sono i progetti ambiziosi che i ricercatori intendono perseguire. Il più immediato è quello relativo alla misura della frequenza della transizione elettronica 1s-2s (dallo stato fondamentale al primo stato eccitato) nell'anti-idrogeno. Il Modello Standard prevede infatti che questa frequenza sia la stessa nell'idro-

geno e nella sua controparte simmetrica, cioè nell'anti-idrogeno. Un'altra, e più ardua, impresa sarà quella di misurare il campo gravitazionale dei singoli atomi di antimateria. Quello che si vuole verificare è l'esistenza o meno di un'antigravità, se cioè l'antimateria "cade verso l'alto" o più banalmente si comporta come la materia [27].

Ci sarà spazio in futuro per la formazione di antimolecole? E saranno stabili come quelle che conosciamo? Al momento neanche i ricercatori più ottimisti del CERN se la sentono di dare risposte affermative [28] anche se non rinunciano a progetti ambiziosi come ELENA [29]. A noi non resta che tornare al nostro mondo in attesa che l'antimondo dimostri di essere altrettanto gradevole.

### Bibliografia

- [1] W.H. Sweet, G.L. Brownell, *Nucleonics*, 1953, **11**, 40.
- [2] P.A.M. Dirac, *Proc. R. Soc. Lond. A*, 1928, **117**, 610.
- [3] P.A.M. Dirac, *Proc. R. Soc. Lond. A*, 1930, **126**, 360.
- [4] P.A.M. Dirac, *Proc. R. Soc. Lond. A*, 1931, **133**, 60.
- [5] C.D. Anderson, *Science*, 1932, **76**, 238; *Phys. Rev.*, 1933, **43**, 491.
- [6] G. Baur *et al.*, *Phys. Lett. B*, 1996, **68**, 251.
- [7] M. Amoretti *et al.*, *Nature*, 2002, **419**, 456.
- [8] V.W. Hughes *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, 1960, **5**, 63.
- [9] W. H. Koppenol (IUPAC), *Pure Appl. Chem.*, 2001, **73**, 377.
- [10] C.J. Rhodes, *J. Chem. Soc., Perkin Trans.*, 2002, **2**, 1379.
- [11] S.J. Brodsky, R.F. Lebed, *Phys. Rev. Lett.*, 2009, **102**, 213401.
- [12] M. Deutsch, *Phys. Rev.*, 1951, **82**, 455.
- [13] C. Champion, C. Le Loirec, *Phys. Med. Biol.*, 2007, **52**, 6605.
- [14] S.J. Brawley *et al.*, *Science*, 2010, **330**, 789.
- [15] X. Cheng *et al.*, *Phys. Rev. A*, 2011, **83**, 032504.
- [16] 10<sup>th</sup> International Workshop on Positron and Positronium Chemistry (PPC10) 2011, Smolenice, Slovakia ([www.ppc10.sav.sk/](http://www.ppc10.sav.sk/)).
- [17] A.M. Wheeler, *Ann. New York Acad. Sci.*, 1946, **48**, 219.
- [18] E.A. Hylleraas, A. Ore, *Phys. Rev.*, 1947, **71**, 493.
- [19] D.B. Cassidy, A.P. Mills, *Nature*, 2007, **449**, 195.
- [20] D.M. Schrader, *Phys. Rev. Lett.*, 2004, **92**, 043401.
- [21] D.M. Schrader *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, 1992, **69**, 57.
- [22] G. Gabrielse, *Adv. At. Mol. Opt. Phys.*, 2005, **50**, 155.
- [23] G. Gabrielse, *Phys. Today*, 2010, March, 68.
- [24] N. Madsen *Phil. Trans. R. Soc. A*, 2010, **368**, 3671.
- [25] G.B. Andresen *et al.*, *Nature*, 2010, **468**, 673.
- [26] ALPHA Collaboration. G.B. Andresen *et al.* 2011, arXiv:1104.4982v1 (<http://arxiv.org/abs/1104.4982v1>).
- [27] <http://scicom.ucsc.edu/Q&A/2011/mills.php>.
- [28] [www.thenakedscientists.com/HTML/content/latest-questions/question/2891/](http://www.thenakedscientists.com/HTML/content/latest-questions/question/2891/).
- [29] <http://cdsweb.cern.ch/record/1206242>.

## La Società Chimica Italiana su Internet

**Sito web della Sci:** [www.soc.chim.it](http://www.soc.chim.it)

È anche attiva una mailing list all'indirizzo: [SCI-list@list.cineca.it](mailto:SCI-list@list.cineca.it)

**Altri siti attivi sono:**

**Gruppo Giovani:** [www.scigiovani.it](http://www.scigiovani.it)

**Sezione Campania:** [www.scicampania.unina.it/index.htm](http://www.scicampania.unina.it/index.htm)

**Sezione Lazio:** [www.soc.chim.it/sezioni/lazio](http://www.soc.chim.it/sezioni/lazio)

**Sezione Liguria:** [www.chimica.unige.it/sci/](http://www.chimica.unige.it/sci/)

**Sezione Lombardia:** [www.sci-lombardia.org/](http://www.sci-lombardia.org/)

**Sezione Veneto:** [www.chimica.unipd.it/sci/pubblica/](http://www.chimica.unipd.it/sci/pubblica/)

**Divisione di Chimica Ambientale e dei Beni Culturali:**  
[www.socchimdabc.it/](http://www.socchimdabc.it/)

**Divisione di Chimica Analitica:**  
[www.soc.chim.it/divisioni/chimica\\_analitica](http://www.soc.chim.it/divisioni/chimica_analitica)

**Divisione di Chimica Fisica:**  
[www.soc.chim.it/divisioni/chimica\\_fisica](http://www.soc.chim.it/divisioni/chimica_fisica)

**Divisione di Chimica Industriale:** [www.chimind.it/](http://www.chimind.it/)

**Divisione di Chimica Inorganica:** <http://dci.mfn.unipmn.it/>

**Divisione di Chimica Organica:**  
[www.soc.chim.it/divisioni/chimica\\_organica](http://www.soc.chim.it/divisioni/chimica_organica)

**Divisione di Chimica dei Sistemi Biologici:**  
[www.soc.chim.it/divisioni/chimbio](http://www.soc.chim.it/divisioni/chimbio)

**Divisione di Didattica Chimica:** [www.didichim.org/](http://www.didichim.org/)

**Divisione di Elettrochimica:**  
<http://users.unimi.it/scielettrochimica/>

**Divisione di Chimica Farmaceutica:**  
<http://dcf.frm.uniroma1.it/cgi-bin/home.pl>

**Divisione di Spettrometria di Massa:**  
[www.soc.chim.it/divisioni/spettrometria\\_di\\_massa](http://www.soc.chim.it/divisioni/spettrometria_di_massa)

**Gruppo Interdivisionale Catalisi:**  
[www.soc.chim.it/it/gruppi\\_interdivisionali/catalisi](http://www.soc.chim.it/it/gruppi_interdivisionali/catalisi)

**Gruppo Interdivisionale Chimica Computazionale:**  
[www.soc.chim.it/it/gruppi\\_interdivisionali/chimica\\_computazionale](http://www.soc.chim.it/it/gruppi_interdivisionali/chimica_computazionale)

**Gruppo Interdivisionale di Chimica Strutturale:**  
[www.chim.unipr.it/chimica/link.htm](http://www.chim.unipr.it/chimica/link.htm)

**Gruppo Interdivisionale di Green Chemistry:**  
<http://www-2.unipv.it/photochem/greenchemistry/>