

Radioattività e sintesi dei nuclei

È noto che le proprietà chimiche degli elementi dipendono dal numero di elettroni che ruotano attorno al nucleo dell'atomo. Il nucleo stesso è composto da un certo numero di neutroni e da un numero di protoni identico a quello degli elettroni, in quanto in condizioni normali gli atomi sono neutri (non hanno carica elettrica netta).

Il numero dei neutroni invece non è fissato in generale ed accade che un dato elemento chimico possa corrispondere a nuclei con differenti neutroni, che vengono detti isotopi. Per esempio l'elemento chimico più semplice, l'idrogeno, ha 3 isotopi comuni: quello noto a tutti, propriamente detto idrogeno, nel cui nucleo non sono presenti neutroni; il deuterio, che ha un neutrone (nell'acqua c'è un atomo di deuterio ogni 5000 atomi di idrogeno); ed infine il trizio, il cui nucleo include 2 neutroni. Sebbene questi elementi abbiano tutte le stesse proprietà chimiche, essi hanno pesi molto diversi, in quanto un neutrone e un protone pesano circa 2000 volte un elettrone, mentre la loro differenza di massa è solo qualche volta più grande della massa dell'elettrone. Naturalmente, questi elementi hanno anche diverse interazioni e proprietà **nucleari** (cioè, relative al nucleo dell'atomo).

che se creiamo una certa quantità di trizio essa si trasformerà nel corso del tempo in un altro elemento (l'elio-3 per la precisione) emettendo allo stesso tempo un elettrone (cosicché la carica elettrica resta invariata) ed un anti-neutrino (che è una particella neutra, leggerissima e quasi invisibile). Questo fenomeno in cui il nucleo si trasforma è noto come radioattività (per la precisione di tipo beta) in quanto è stato per la prima volta scoperto e studiato per mezzo di un elemento chiamato radio. Un altro tipo di radioattività è quello in cui un nucleo si rompe spontaneamente in vari frammenti. Ad esempio, certi elementi come l'uranio si comportano in questo modo e scindendosi emettono energia cinetica. È il fenomeno della **fissione** nucleare. Grazie alla fissione, si può estrarre energia in modo controllato nei reattori nucleari. I fenomeni radioattivi mostrano come certe configurazioni del nucleo non siano le più convenienti dal punto di vista della energia del sistema; per questo motivo, il nucleo preferisce riorganizzarsi trovando una configurazione più stabile.

In certe situazioni è invece (energeticamente) conveniente che dei nuclei atomici si fondano per raggiungere una configurazione più stabile. Questo fenomeno è detto fusione nucleare. Un caso possibile è quello in cui 2 protoni si uniscono e formano 3 particelle: un nucleo di deuterio, un anti-elettrone (detto anche positrone, cioè un elettrone con carica +1) ed infine un neutrino. Questo processo può essere seguito dalla fusione di 2 nuclei di deuterio in un singolo nucleo di elio-4, che ha 2 protoni e 2 neutroni ed è molto stabile. Bisogna dire che un ciclo nucleare di questo tipo non

è mai stato riprodotto in laboratorio, ciononostante, abbiamo ottime ragioni di credere che una cosa del genere sia alla base della luminosità del nostro sole. Questa congettura è stata verificata attraverso una osservazione dettagliata del sole, cioè della sua luce, delle vibrazioni della superficie del sole, ed infine, tramite l'osservazione dei neutrini emessi dal sole. Queste particelle sono state osservate nel laboratorio del Gran Sasso in Italia e in quello di Baksan in Russia ed i risultati sono in buon accordo¹. Invece, il sogno di riprodurre la fusione nucleare sulla terra per produrre energia non è ancora stato a tutt'oggi realizzato.

È interessante notare a questo punto che la quantità totale di elio sintetizzata da tutte le stelle dell'universo, dal big-bang ad oggi, è molto più piccola di quella presente nell'universo. Questo fatto non configura però un dilemma, in quanto si ritiene che la sintesi dell'elio sia di natura **cosmica**, ovvero che sia avvenuta proprio durante il big-bang. Per quanto strano possa sembrare, una tale affermazione è stata elevata al rango di una teoria quantitativa e verificabile grazie a quello che sappiamo sulle interazioni nucleari, che ha recentemente ricevuto importanti conferme dalla osservazione della radiazione cosmica.

Un inciso: abbiamo già incontrato qualche **anti-particella**. La loro esistenza venne predetta da P.A.M. Dirac circa 80 anni fa, poco prima che fossero viste. Un argomento per intuire la ragione della loro esistenza è il seguente.

Consideriamo la reazione $pn \rightarrow pn$: un urto tra un protone ed un neutrone. L'urto avviene se il protone si converte in un neutrone emettendo (tramite una fluttuazione quantistica) un mesone π^+ che porta via energia ed impulso. Questo può essere assorbito dal neutrone che viene trasformato in un protone. La situazione di un secondo osservatore che si muova così velocemente da vedere gli eventi in ordine inverso sembrerebbe allora imbarazzante, in quanto la reazione $n \rightarrow \pi^+p$ viola palesemente la carica elettrica. L'imbarazzo svanisce se si ammette che questo secondo osservatore veda invece del π^+ la sua antiparticella, che partecipa alla reazione $n \rightarrow \pi^-p$. Una cosa del genere deve accadere ogni volta che l'ordine temporale viene invertito. Così in fisica si usa dire che le antiparticelle sono particelle che si propagano in direzione opposta nel tempo.

La questione della stabilità del protone

Appena dopo l'osservazione della radioattività e delle prime particelle elementari, sorse una questione solo apparentemente ingenua: *perché il protone è stabile?* Si potrebbe a prima vista pensare che non sia possibile concepire un protone instabile, ma questo non è vero: basta immaginare che un protone si trasformi in un anti-elettrone (positrone) e ad esempio un quanto di luce (fotone) oppure un mesone π^0 (il terzo mesone π , che in fisica moderna pensiamo come uno stato legato di quark ed anti-quark). Esattamente come per la radioattività

ordinaria, l'eccesso di massa verrebbe convertito in energia cinetica (cioè le particelle finali sarebbero emesse con grande velocità) e la carica elettrica del sistema resterebbe la stessa. Insomma, un processo ipotetico di questo tipo non sarebbe affatto assurdo. È un fatto che questo decadimento non sia osservato, ma questo potrebbe facilmente essere spiegato congetturando che avviene solo raramente: così, una volta proposta la questione resta aperta.

I primi che investigarono la questione della stabilità del protone si resero presto conto che un ipotetico decadimento deve essere molto lento. Venne suggerito infatti di elevare una tale osservazione a principio, postulando che il numero totale di protoni e neutroni, chiamato **numero barionico**, dovesse essere invariato in ogni reazione, così come il numero di cariche elettriche resta invariato. Fu congetturato che protoni e neutroni si possano trasformare gli uni negli altri nei processi radioattivi o nelle interazioni nucleari, ma che il loro numero totale debba restare lo stesso. Negli anni '60, vide la luce una teoria generale delle particelle elementari e delle loro interazioni ancor'oggi in auge, grazie agli studi di S. Glashow, S. Weinberg e A. Salam, premiati con il Nobel negli anni '80. Questa teoria, nota come *modello standard* descrive quasi tutte le cose che conosciamo sulle particelle e le loro interazioni; il Nobel vinto da C. Rubbia riguarda proprio una verifica cruciale di questo modello. Il modello standard prevede che il numero barionico sia conservato ad un ottimo grado di approssimazione

nei processi ordinari. Ci domandiamo allora: è questo un buon motivo per considerare risolta la questione della stabilità del protone?

Vari fisici teorici pensano che la risposta sia negativa. Non è difficile immaginare modelli alternativi a quello standard dove il protone non è stabile. Così il punto del contendere è quale sia il modello in miglior accordo con i dati, ovvero quale sia il modello meglio motivato. Cominciamo la discussione seguendo una linea di pensiero speculativa. Nel modello standard la materia è composta di 2 tipi di particelle: quelle come l'elettrone o il neutrino, che non sono presenti nei nuclei atomici, e quelle come i quarks, che formano i costituenti del nucleo (cioè i protoni ed i neutroni) legandosi a gruppi di tre. Allo stesso tempo ci sono quattro diversi tipi di forze in natura: la forza di gravità, quella elettromagnetica (che è responsabile per esempio dei legami chimici), la forza che produce i legami nucleari, detta forte, ed infine la forza debole, che causa i decadimenti radioattivi discussi sopra². Già dagli anni '80 i fisici teorici hanno proposto certe **estensioni del modello standard** nelle quali la differenza tra i due tipi di particelle e quella tra tre delle forze non è fondamentale (la gravità essendo lasciata a parte). Questi interessanti modelli sono dette *teorie unificate*. In questi modelli delle particelle e delle interazioni elementari il protone non è stabile, sebbene ci si aspetti che il suo decadimento sia estremamente lento.

Consideriamo adesso quali sono gli argomenti a favore di queste speculazioni. Sopra abbiamo ricordato che il modello standard delle particelle ed interazioni è in accordo con molte osservazioni - ma non tutte, in verità. In particolare, proprio i neutrini prodotti nel sole e osservati nei laboratori terrestri risultano essere in accordo con le aspettative ma solo se si comportano come predetto da B. Pontecorvo, ovvero, se cambiano di natura durante il loro viaggio dal centro del sole alla terra. Questo fenomeno, che si chiama **oscillazione dei neutrini**, è stato verificato osservando gli anti-neutrini prodotti dai reattori nucleari a distanze di centinaia di chilometri. Non sarei sorpreso se questi risultati venissero premiati con un Nobel nel prossimo futuro e bisogna subito aggiungere che il fenomeno delle oscillazioni dei neutrini *non è in accordo* con quello che ci aspettiamo sulla base del modello standard; in altre parole, il modello standard suggerisce la risposta sbagliata, che le oscillazioni non ci siano. Per contrasto, certi modelli unificati sono compatibili con il fatto che questo fenomeno avvenga e sia osservato. Bisogna dire a questo punto che ci sono parecchi (forse troppi?) modelli unificati nella letteratura scientifica, e non è chiaro che ce ne sia qualcuno che sia soddisfacente sotto ogni aspetto. Ma a mio personale avviso, questo non è altro che un segno della necessità di investire maggiori sforzi nello studio delle teorie unificate e di verificarle in ogni possibile aspetto.

Queste sono le principali considerazioni che suggeriscono che la **ricerca del decadimento del protone** sia ancor'oggi valida ed interessante.

Una intera generazione di esperimenti che sono stati condotti negli ultimi 20 anni non sono ancora riusciti a trovare evidenza di questo decadimento. Anzi, questi esperimenti stanno ottenendo limiti sempre più stringenti su questo processo. Per esempio, il limite sul decadimento del protone in anti-neutrini e mesoni K carichi (che è una particella simile al mesone π e composta da un quark di tipo “up” ed un anti-quark di tipo “strange”) atteso in una sottoclasse di teorie unificate, dette super-simmetriche, risulta valere l'impressionante cifra di 2×10^{33} anni. Questo significa che dopo aver osservato per un anno circa 10 mila tonnellate di acqua, non è stato osservato alcun evento di questo tipo (in pratica, per ottenere questo risultato è necessario osservare una quantità di materia o aspettare un lasso di tempo 10 volte più grande). Le ricerche di questo decadimento potrebbero essere continuate usando rivelatori di acqua, sebbene questo presenti un problema: ci sono altri eventi dovuti alle interazioni dei neutrini che sono naturalmente presenti nella atmosfera terrestre e che somigliano moltissimo agli eventi che ci interessa cercare; è quello che si chiama il problema del fondo sperimentale. Per questo Rubbia ha suggerito di usare un rivelatore di argon liquido invece che di acqua, dove gli eventi di decadimento potrebbero essere visti in maggior dettaglio evitando in larga misura il problema del fondo sperimentale. Una difficoltà cruciale, ovviamente, è quella di osservare una massa molto grande di un liquido criogenico per un lungo lasso di tempo. Presentiamo in fig.1 un confronto quantitativo ed ottimistico tra rivelatori di acqua e di argon, basato sull'ipotesi che il numero di eventi di segnale

e di fondo (assunto perfettamente noto) si comportino secondo la statistica di Poisson.

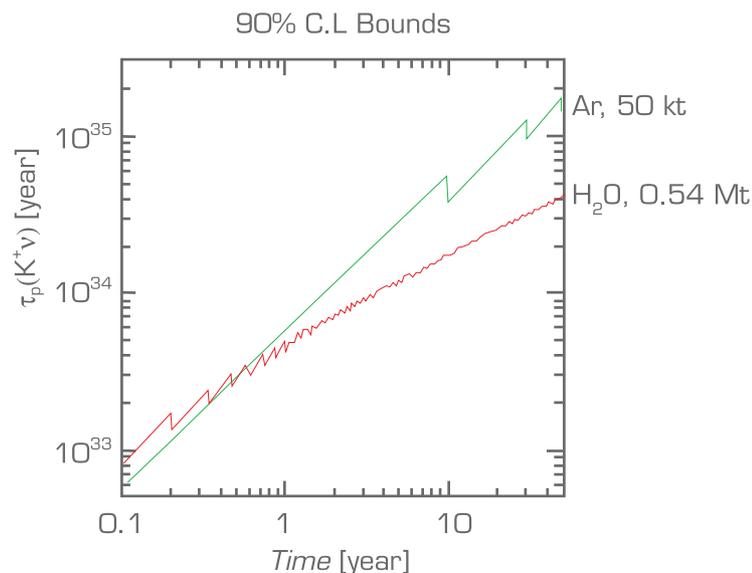


FIG. 1 Confronto delle sensibilità di 2 ipotetici rivelatori per il decadimento $p \rightarrow K\bar{\nu}$. Ogni “scalino” corrisponde ad un evento di fondo. La freccia verticale indica dove siamo in questo momento, grazie al rivelatore giapponese Super-Kamiokande con massa 25 kton, ora in funzione. Per il rivelatore ad acqua con massa 0.54 milioni di tonnellate (Mton) assumiamo una efficienza di rivelazione $\epsilon = 14.6\%$ e un “fondo” di $b = 14$ eventi/(Mton anno), che corrisponde alla somma dei 2 metodi usati da Super-Kamiokande. Per quello ad argon, con massa 50 mila tonnellate (kton), vale $\epsilon = 97\%$ e $b = 1$ evento/(Mton anno). Sembra di poter concludere che l'ipotetico rivelatore ad argon sia in grado di raggiungere un limite di 10^{35} anni. Per maggiori informazioni, si può consultare il sito della conferenza specializzata “Cryodet” svoltasi il 13 e 14 marzo 2006 presso i laboratori del Gran Sasso: <http://cryodet.Ings.infn.it/agenda/>.

La questione dell'origine della materia

Poichè sappiamo che esistono sia le particelle che le antiparticelle, sorge la domanda: perchè il nostro mondo è fatto di materia anzichè di antimateria? Gli astronomi non sono stati capaci di identificare alcun oggetto distante (stella o galassia) fatta di antimateria: insomma, sembra che il nostro universo sia fatto solo della stessa materia che vediamo intorno a noi. Inoltre, assumendo la correttezza del modello standard e della teoria dell'universo caldo (meglio nota come big-bang), si nota che il numero barionico dell'universo è molto più grande di quello che ci aspetteremmo se partissimo da condizioni iniziali simmetriche tra materia ed antimateria. A. Sakharov ha proposto negli anni '60 una interessante speculazione che potrebbe spiegare questo fatto: in uno dei primissimi momenti del big-bang, un qualche specifico processo fisico ha scelto la materia anzichè l'antimateria³. È interessante notare che il modello standard stesso si comporti in modo diverso alle basse energie che ci riguardano e alle alte energie che riguardano il big-bang; in particolare, alle alte energie esistono certi processi che sono capaci di modificare il numero totale di protoni e neutroni. Gli studi quantitativi hanno però dimostrato che questi processi, da soli, non sono in grado di realizzare il programma di Sakharov; di nuovo, siamo portati a considerare l'ipotesi che il modello standard non sia completo. Molti fisici teorici (tra i quali il sottoscritto) trovano impressionante il fatto che, proprio in certi modelli unificati, gli stessi aspetti che spiegano, le oscillazioni dei

neutrini siano utili per implementare il programma di Sakharov, ovvero, di generare la materia durante, l'evoluzione dell'universo. Così ci sembra che, a dispetto delle difficoltà, valga la pena di continuare ad investigare i modelli unificati nella speranza di capire la stabilità della materia intorno a noi e forse addirittura di svelare il mistero della sua origine.

¹ Una nota storica può risultare interessante. Nel diciannovesimo secolo, una controversia opponeva i migliori fisici dell'epoca a C. Darwin. Infatti, Lord Kelvin (noto per la scala delle temperature che porta il suo nome) sosteneva che il sole non potesse essere più vecchio di una decina di milioni di anni sulla base della termodinamica, mentre Darwin riteneva che la terra - ed il sole - dovessero essere molto più vecchi perchè l'evoluzione delle specie potesse aver luogo. I fisici avevano torto, ed erano messi fuori strada dal fatto di non conoscere l'energia nucleare, che è quella che permette al sole di continuare a brillare. Oggi sappiamo che il sole ha circa 5 miliardi di anni, e le rocce più antiche della terra hanno un'età dello stesso ordine; l'universo invece è 3 volte più vecchio.

² Per quelli che conoscono il modello standard precisiamo 1) che la forza gravitazionale non viene inclusa se non come teoria classica (il che sottintende uno dei problemi centrali della fisica moderna); 2) che la forza elettromagnetica e quella debole derivano da altre due forze fondamentali, dette l'isospin e l'iperparica debole; il numero delle forze, comunque, resta sempre quattro.

³ È evidente che un ipotetico processo di questo tipo deve essere capace di modificare il numero totale di protoni e di neutroni (il numero barionico), e così appartiene alla stessa famiglia di processi che possono portare al decadimento del protone.