

## Cos'è un protone (o un neutrone) (14/10/09)

Torniamo al modellino semplice di atomo che ciascuno di noi ha in mente fin dai tempi della scuola: un piccolo sistema solare con il nucleo al posto dell'astro centrale, e gli elettroni come pianeti. Eseguiamo uno zoom sul nucleo, di cui sappiamo che contiene quasi tutta la massa dell'atomo (più del 99,9%): un'altra cosa che abbiamo imparato è che esso è composto di protoni e neutroni, aventi quasi la stessa massa, ma che differiscono tra loro per la carica elettrica. Quella dei protoni è positiva e bilancia esattamente quella negativa degli elettroni in orbita attorno al nucleo, mentre i neutroni sono privi di carica elettrica. I fisici si riferiscono indifferentemente a protoni e neutroni come "nucleoni".

In questo modellino, c'è una cosa non detta, ma che sembra emergere in modo implicito: i nucleoni sono "individui" diversi tra loro, come sferette rigide, e tali restano. Ma non è così. Aumentiamo un po' lo zoom, e osserviamo l'eventuale struttura interna di un neutrone, poiché già da un certo indizio sappiamo che una struttura interna dev'esserci: il neutrone ha un campo magnetico malgrado sia privo di carica elettrica, e ciò fa pensare a cariche elettriche in movimento, al suo interno, che si bilanciano dal punto di vista elettrico, ma non da quello magnetico. Così è.

Un neutrone è composto da un quark "up", con carica elettrica  $+2/3$  rispetto a quella dell'elettrone, e due quark "down", ciascuno dei quali ha una carica elettrica  $-1/3$ , per cui la somma totale delle cariche elettriche è zero. Ma, poiché i quark si muovono a una velocità non troppo distante da quella della luce, il loro "balletto" produce il campo magnetico. La forza che attira tra loro questi tre quark è enorme, ed essi non riescono ad allontanarsi molto tra loro prima di essere richiamati indietro, e ciò fornisce una certa identità a ciascun neutrone. Questo nuovo modello del neutrone ci fa immediatamente comprendere che l'immagine del nucleone come una sferetta rigida è priva di significato. Il neutrone è piuttosto la regione di spazio all'interno della quale i tre quark si muovono, poiché le forze nucleari forti agenti tra di loro impediscono che si allontanino più di tanto. È come definire le dimensioni di un paese, isolato dagli altri da grandi distanze come avviene nel centro degli Stati Uniti, non tanto in base a quelle geografiche del comune, ma piuttosto a quelle del traffico veicolare dovuto alla gente che lavora dentro e attorno al paese. Per esempio: il pullman scolastico sta molto tempo fermo accanto alla scuola, ma a una cert'ora fa un giro per il paese e anche per i dintorni. Analogamente avviene per il camion della spazzatura, e così pure per le massaie che vanno al supermercato, un po' fuori dell'abitato. La gente va in ufficio, magari nella zona industriale, fuori del paese, e torna indietro la sera, per cui ci sarà un centro abitato mediamente più denso, ma dei bordi un po' sfrangiati, meno popolati, o popolati solo saltuariamente, e noi fisseremo una dimensione media del paese prendendo in considerazione, per esempio, la regione all'interno della quale si svolge il 99% del traffico. Questo può essere un modello più efficace per rappresentarci mentalmente un nucleone.

Adesso, immaginiamo che il paese, anziché essere isolato, si trovi a una distanza non eccessiva da un altro paese. In questo caso, ci aspetteremo che le persone di ciascun paese, pur gravitando essenzialmente su quello in cui hanno l'abitazione, a volte si spostino dall'uno all'altro e tornino indietro. Per esempio, qualcuno lavorerà in un ufficio nel paese vicino, o qualcuno andrà a fare acquisti al centro commerciale dell'altro paese, e così via. Dunque, anche in questo caso potremo definire due paesi sempre in base al traffico veicolare, ma magari dovremo contentarci di definirli in base al 90% degli spostamenti, e non più in base al 99% come prima, perché ci sarà un 10% degli spostamenti che si svolge tra i due centri abitati, che sono in "interazione" tra loro.

L'analogia con un nucleo atomico composto di una coppia di nucleoni regge: se un nucleone non è isolato (per esempio: se consideriamo un nucleo composto di un neutrone e un protone), ci sarà saltuariamente uno scambio di quark tra le due particelle. Questo scambio è marginale, poiché la forza nucleare tende a impedire che i quark se ne escano dalla propria particella, ma saltuariamente può avvenire, e questo scambio di quark porta con sé la forza che tiene assieme i nucleoni nel nucleo.

Da quanto abbiamo detto, comunque, dovrebbe essere chiara una cosa: la forza tra due nucleoni è appena una pallida eco della forza nucleare forte, che dispiega tutta la sua potenza solo all'interno di ciascun nucleone. La forza che tiene assieme i nucleoni nel nucleo è solo una "sbavatura" di quella nucleare forte. Per esempio, prendiamo due protoni. Ciascuno di essi è composto di due quark "up" e uno "down", cosicché la carica elettrica risultante è +1. Riusciremo a metterli assieme da soli, in un solo nucleo composto di due protoni? La risposta è negativa, poiché la forza di repulsione elettrostatica tra queste due particelle, aventi la stessa carica elettrica, supera, sebbene di poco, quella attrattiva dovuta alle "sbavature" della forza nucleare forte che agisce all'interno di ciascun protone. Dunque, non può esistere un nucleo atomico stabile costituito di due protoni e basta. Cosa succede, invece, se avviciniamo un protone e un neutrone? Che non c'è forza elettrostatica di repulsione, mentre le sbavature di quella nucleare forte sono sempre presenti, e dunque le due particelle si attaccano fortemente le une alle altre (sarebbe meglio dire: c'è una minima compenetrazione tra le regioni di spazio di pertinenza di ciascun nucleone) ed ecco che abbiamo formato un nucleo di deuterio.

A questo punto, cosa succede se avviciniamo al deuterio un secondo protone? I due protoni continueranno a respingersi tra loro come prima per via della forza elettrostatica ma, tra le residue sbavature nucleari tra i due, e le sbavature nucleari che il neutrone esercita su entrambi, la somma totale delle forze è tale, per cui riusciamo a stabilizzare un nucleo formato di due protoni e un neutrone: l'Elio 3. Meglio ancora quando avvicineremo un nuovo neutrone, il quale agirà come "collante" aggiuntivo, e finalmente avremo un nucleo di Elio 4.

Completiamo il salotto di oggi spiegando perché non può esistere un nucleo formato solo di due neutroni, che sembrerebbe la situazione più favorevole dal punto di vista energetico. Un quark "down" è un po' più pesante di un quark "up" e, se nessuno glielo impedisce, decade in un quark "up" liberando anche un elettrone e un antineutrino. Il motivo è il solito: qualunque sistema tende alla minima energia, e un quark più leggero ha meno energia di uno più pesante. Infatti, un neutrone isolato decade in un protone, più elettrone e antineutrino, in una decina di minuti. In una coppia di neutroni, c'è una tale sovrabbondanza di quark "down" che questa disintegrazione diventa quasi istantanea, ed ecco, perciò, che non possiamo metterli assieme e farli restare uniti. Se ci provassimo, per disintegrazione otterremmo subito un nucleo di deuterio.

Insomma: un nucleo atomico non può avere troppi protoni rispetto ai neutroni, perché i neutroni fanno da "collante" rispetto alla repulsione elettrostatica. D'altra parte, non può avere troppi neutroni rispetto ai protoni, perché altrimenti i neutroni decaderebbero in protoni. In media, i nuclei atomici leggeri (fino al ferro circa) contengono più o meno lo stesso numero di protoni e neutroni, mentre quelli più pesanti hanno qualche neutrone in più per fare "collante", ma senza esagerare. Tanto vero che, al crescere della dimensione dei nuclei, si cominciano a trovare sempre più spesso quelli spontaneamente radioattivi e, oltre un certo limite, sono radioattivi tutti. L'uranio è il nucleo più pesante che si trova in natura non perché sia stabile, ma solo perché la sua radioattività è molto debole, e perciò dura miliardi di anni.