

La scoperta del neutrone

Nel 1930 gli scienziati tedeschi Walther Bothe e Herbert Becker avevano scoperto che bombardando con particelle α di un preparato radioattivo di polonio atomi di elementi leggeri come boro e berillio si producevano misteriose radiazioni molto penetranti, capaci di trapassare agevolmente uno spessore di piombo di oltre dieci centimetri. A quell'epoca le più potenti fra le radiazioni note erano i raggi γ , i raggi cioè emessi dai materiali radioattivi ed usati, per esempio, per distruggere i tessuti cancerosi. Osservazioni successive condotte in altri paesi avevano accertato che tali radiazioni erano più penetranti di qualsiasi tipo di raggio γ fino ad allora conosciuto e che la loro energia poteva arrivare fino a 10 MeV².

Le caratteristiche di queste strane radiazioni destarono molto interesse fra i fisici del tempo. Tra coloro i quali si dedicarono a tale problema ci furono il fisico francese F. Joliot e sua moglie Irene Curie, figlia dei famosi coniugi Curie. Per studiare la natura delle radiazioni essi utilizzarono una camera di ionizzazione³ in grado di rivelare particelle ionizzanti. Interponendo sulla traiettoria blocchi di piombo via via più spessi mostrarono che i raggi possono passare facilmente attraverso la materia penetrando 10 e anche 20 cm di piombo. Ma i protoni di eguale velocità sono fermati da uno spessore di piombo di appena un quarto di millimetro: la nuova radiazione, conclusero i Joliot, non può essere costituita da protoni. Ma ci fu una seconda scoperta, anche più sbalorditiva. Ponendo nella camera di ionizzazione sottili strisce di una qualche sostanza contenente idrogeno (per esempio paraffina) l'intensità misurata dalla camera di ionizzazione aumentava anziché diminuire. Evidentemente i raggi misteriosi espellevano protoni dagli atomi di idrogeno e li spingevano a forte velocità attraverso la camera di ionizzazione. Le energie di questi protoni erano pari a circa 5 MeV. Applicando i principi di conservazione della quantità di moto e dell'energia, essi furono in grado di stabilire che l'energia occorrente ad un ipotetico raggio γ per trasferire 5 MeV ad un protone in un'unica collisione, doveva ammontare a ben 50 MeV. Ma tale valore era troppo superiore ai 10 MeV che caratterizzavano le radiazioni sconosciute come in precedenza era stato accertato sperimentalmente. Inoltre, il numero di protoni che venivano generati, era molto più alto di quello prevedibile in base all'ipotesi che la

radiazione fosse costituita da raggi γ .

Queste due discrepanze lasciavano interdetti i fisici. Davanti ad essi si aprivano due possibilità: o abbandonare i principi di conservazione dell'energia e della quantità di moto, oppure ipotizzare l'esistenza di un nuovo tipo di radiazione. Ora, se vi sono dei principi generali i cui i fisici non vogliono

¹ I raggi α sono nuclei di elio (due protoni + due neutroni), i raggi β sono elettroni, i raggi γ sono fotoni energetici.
² eV (elettrovolta) è l'unità di misura dell'energia usata in fisica delle particelle. Corrisponde all'energia acquistata da un elettrone accelerato dalla differenza di potenziale di un Volt ed equivale quindi a $1,606 \cdot 10^{-19}$ Joule
³ Una camera di ionizzazione è costituita da un recipiente chiuso, riempito di gas in cui vi sono due elettrodi a diverso potenziale; uno degli elettrodi, normalmente la parete è ad un potenziale V negativo; l'altro elettrodo (collettore) è connesso a terra tramite una resistenza di alto valore ai capi della quale è disposto un voltmetro. Una particella ionizzante entrando nella camera produce per ionizzazione coppie di ioni, quelli negativi vanno sul collettore producendo una corrente ai capi della resistenza che viene rivelata dal voltmetro. Dal valore della tensione si può risalire alla carica elettrica portata dagli ioni e quindi all'energia della particella ionizzante.

$$V^p = \frac{m + m^p}{2mv} \quad (3)$$

$$V^N = \frac{m + m_N}{2mv} = \frac{m + 14m^p}{2mv} \quad (4)$$

Entrambe queste le relazioni contengono ancora due incognite, m e v . Dividendole però membro a membro, l'incognita v si elide e si trova

$$\frac{m + 14m^p}{m + m_N} = \frac{V^p}{V^N} = \frac{m + m^p}{m + m_N} \quad (5)$$

che contiene una sola incognita, m . Risolvendola si ha

$$m = m^p \frac{14V^N - V^p}{V^p - V^N} = m^p \frac{(14 \cdot 4,7 \cdot 10^6 - 3,3 \cdot 10^7) m/s}{(3,3 \cdot 10^7 - 4,7 \cdot 10^6) m/s} = 1,16m^p$$

In seguito misure più precise stabilirono che la massa del neutrone è assai prossima a quella del

protone (la supera di appena l'uno per mille).

Dopo aver dimostrato l'esistenza della nuova particella e averne misurato la massa, Chadwick la battezzò neutrone. In effetti non era un nome nuovo; da anni i fisici studiavano la possibile esistenza di una particella elettricamente neutra, di massa pari a quella del protone. E in quanto all'origine di una particella simile l'ipotesi più seducente era questa: che un elettrone si combinasse con un protone, formando una struttura stabile e neutra, qualcosa di simile ad un atomo di idrogeno compresso. Ebbene, questa struttura puramente immaginaria, era già stata chiamata "neutrone" da Rutherford una dozzina di anni prima della scoperta di Chadwick. Oggi noi sappiamo che un neutrone non è affatto la combinazione di un protone e di un elettrone, ma è in realtà una delle particelle fondamentali con una sua esistenza autonoma.

Bibliografia

The Project Physics Course - *Unita 6 - Il nucleo* - Zanichelli, 1977 (pag. 44-48)
 D. J. Hughes - *Fisica del neutrone* - Einaudi, 1960 (pag. 23-26)
 M. Giuliozzi - *Storia della Fisica* - Bollati Boringhieri, 2005 (pag. 964-969)
 U. Amaldi - *Fisica: idee ed esperimenti*, vol. I - Zanichelli, 2001 (pag. 270-271)

$$\left\{ \begin{aligned} mV^2 &= m \left(\frac{m}{mv - m^p V^p} \right)^2 + m^p V^2 \\ V &= \frac{m}{mv - m^p V^p} \end{aligned} \right.$$

$$\begin{aligned} mV^2 &= \frac{m}{m^2 V^2 + m^p V^2} - 2vm^p V^p + m^p V^2 \\ \frac{m}{m^2 V^2 + m^p V^2} &= 0 \\ V^p &= \frac{m}{2vm^p} \end{aligned}$$

$$V^p = \frac{m}{2vm^p} = \frac{\frac{m}{m^2} + m^p}{2vm^p}$$

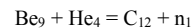
rinunciare, questi sono proprio la conservazione dell'energia e la conservazione della quantità di moto. Questi principi infatti si sono dimostrati così basilari per il pensiero scientifico che veramente non si saprebbe come sostituirli.

I coniugi Joliot-Curie trovandosi di fronte a queste difficoltà sfiorarono dunque la scoperta del neutrone, ma non la colsero perché ritenevano che le particelle "elementari" fossero solamente quelle ammesse dalla scienza del tempo: fotoni, elettroni, protoni e raggi α .

Nel 1932, il fisico inglese James Chadwick risolse l'enigma avanzando un'ipotesi alternativa circa la natura della radiazione. Alla fine di febbraio infatti comparve sulla rivista scientifica inglese *Nature* una breve lettera dal titolo ancora prudente: *Possible Existence of a Neutron*, che giustamente è considerata come l'atto di nascita del neutrone. Ecco quanto egli scrive in un successivo e più completo articolo dal titolo più convinto "L'esistenza del neutrone":

"Se facciamo l'ipotesi che la radiazione non sia costituita da fotoni, bensì da particelle con massa quasi uguale a quella del protone, allora spariscono tutte le difficoltà connesse con tali tipi di collisioni, e questo riguardo sia alla frequenza degli eventi sia al trasferimento di energia. Inoltre per spiegare il grande potere di penetrazione della radiazione, dobbiamo assumere che non possieda carica."

Logicamente, ragionava Chadwick, i protoni erano messi in rapido movimento da una particella di massa simile alla loro. Secondo il principio di conservazione della quantità di moto l'energia che si trasferisce in un urto è massima quando le particelle collidenti hanno la medesima massa: il caso di due palle da biliardo, per esempio. Così, presupponendo la radiazione misteriosa composta di tali particelle, non sarebbe stato necessario attribuir loro una energia altissima. Non solo: ma l'enorme forza di penetrazione della particella poteva spiegarsi presupponendola priva di carica elettrica. In tal caso infatti i campi elettrici degli atomi non avrebbero avuto nessuna influenza sul moto della carica. Ma quando e dove hanno origine i neutroni? Chadwick propose un meccanismo analogo a quello indicato da Rutherford per la disintegrazione artificiale mediante bombardamento con particelle α . Il neutrone si trova come costituente del nucleo e viene espulso in seguito all'urto con una particella. Precisamente, una particella α , urtando contro un nucleo di berillio, ne viene catturata e subito dopo il nuovo nucleo espelle un neutrone, trasformandosi in un nucleo di carbonio. Indicando con n_1 il neutrone si avrebbe la seguente reazione nucleare



Queste nuove particelle quindi, non avendo carica elettrica, possono penetrare attraverso un notevole spessore di materiale come il piombo, senza perdere energia. Quando i neutroni attraversano la paraffina, occasionalmente può avvenire una collisione frontale con i nuclei dell'idrogeno. I protoni di rinculo possono perciò venire osservati, grazie alla ionizzazione che producono.

Il ragionamento che porta alla determinazione della massa del protone è straordinariamente lineare e sarà utile ripeterlo. Chadwick giunse alla conclusione che il neutrone dovesse avere massa all'incirca

pari a quella del protone, basandosi sulle leggi di conservazione dell'energia e della quantità di moto, e supponendo che gli urti fossero perfettamente elastici. In altre parole, Chadwick applicò al mondo delle particelle le leggi della fisica "classica", quelle stesse semplicissime leggi che governano l'urto fra due palle da biliardo.

Vediamo nel dettaglio il procedimento. Chadwick misurò la velocità massima v_p dei protoni emessi dalla paraffina e ottenne il risultato $v_p = 3,3 \cdot 10^7$ m/s⁴. Come abbiamo detto suppose che questi protoni fossero dei nuclei di idrogeno che acquistavano velocità perché colpiti dalle misteriose particelle neutre emesse dal berillio.

Dalla teoria degli urti sappiamo che i protoni con velocità massima sono prodotti quando si verificano contemporaneamente due condizioni:

- 1) le particelle neutre escono dal berillio con la loro velocità massima che indichiamo con v ;
- 2) l'urto tra la particella neutra e il nucleo di idrogeno è centrale, in modo che le particelle si muovano sulla stessa retta (come quando nel gioco delle bocce si "sboccia").

Se ciò accade l'urto è elastico ed è descritto dal seguente sistema:

$$\begin{cases} mv = mV + m_p v_p \\ \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}mV^2 + \frac{1}{2}m_p v_p^2 \end{cases} \quad (1)$$

dove m è la massa del neutrone, m_p la massa del protone, V è la velocità del neutrone dopo l'urto (il protone nella paraffina è fermo).

Purtroppo il sistema contiene tre grandezze non misurabili (la massa del neutrone m , la velocità del neutrone prima dell'urto v e dopo l'urto V) e quindi non è risolvibile.

Per superare questo problema Chadwick prese in esame un urto con un altro atomo determinando la velocità massima dei protoni quando le particelle neutre emesse dal berillio bombardano non la paraffina ma un recipiente contenente azoto. Essendo il nucleo dell'atomo di azoto 14 volte più pesante del nucleo dell'atomo di idrogeno misurò una velocità inferiore, precisamente $v_N = 4,7 \cdot 10^6$ m/s.

Indicando con m_N la massa del nucleo di azoto e con V_f la velocità finale del neutrone si otterrà il seguente sistema analogo al (1)

$$\begin{cases} mv = mV_f + m_N v_N \\ \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}mV_f^2 + \frac{1}{2}m_N v_N^2 \end{cases} \quad (2)$$

A questo punto bisogna fare un po' di conti. Dalla (1) si ricava v_p e dalla (2) in modo analogo v_N (dove la massa del nucleo dell'atomo di azoto m_N si conosce e vale come abbiamo detto $14m_p$)

⁴ La velocità è circa un decimo di quella della luce per cui si possono ancora usare le formule di meccanica classica.