

ALMA MATER STUDIORUM · UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

---

Scuola di Scienze  
Dipartimento di Fisica e Astronomia  
Corso di Laurea in Fisica

## La scoperta del neutrone

**Relatore:**  
**Prof. Paolo Finelli**

**Presentata da:**  
**Lucia Brandinelli**

Anno Accademico 2016/2017



“No ordinary Power being able to divide  
what God himself made one in the first Creation”

---

*Isaac Newton*

A Enzo, Gilberto, Pietro, Davide, Matteo.  
Gli uomini della mia vita.



# Ringraziamenti

Arrivata a questo traguardo ritengo fondamentale ringraziare.

Ringrazio i miei genitori, da cui ho imparato la passione per ciò che si vive, la condivisione con le persone vicine, li ringrazio perché non mi hanno mai chiesto di smettere altri impegni o di negare me stessa per poter andare un po' più veloce negli studi, ma mi hanno chiesto l'impegno e la responsabilità. Non sempre sono stata brava nel rispondere a queste richieste, ma con loro sperimento tutti i giorni l'amore indipendente da risultati, da visioni concordi, da fatiche che si vivono reciprocamente. Ritengo che la conquista di questo risultato importante sia davvero, prima di tutto, grazie a loro, a quanto mi amano e a quanto credono nella mia persona.

Ringrazio Matteo per la sua pazienza nel gestire i miei momenti di stress e di ansie, di paure e di tristezze, per la capacità che ha di amarmi dando importanza solo ai dettagli belli, di guardarmi con uno sguardo benevolo e ammirato, di vedere, per un dettaglio bello, tutto bello. Ringrazio per la sua presenza in tutto ciò che è importante per la mia vita.

Ringrazio i miei fratelli: è difficile a volte starsi vicini, è faticoso capire i momenti di tutti, capire quando si può parlare e quando bisogna stare zitti, e a volte invece è così piacevole ascoltare una chitarra che suona, un racconto infinito, un pianto, un'emozione regalata dopo un'esperienza, una chiacchiera notturna... I fratelli sono davvero la cosa più preziosa che si possa avere: voglio ringraziarli per l'esperienza che condividiamo, per la vita passata insieme e quella che solo si incrocia tra un impegno e un altro. Il confronto tra carriere scolastiche non è mai semplice da sostenere, eppure è grazie allo studio matto della Sara, l'enorme tenacia dell'Irene, la voglia di crescere di Pietro, la sfacciataggine e leggerezza con cui la Terri affronta la scuola, la capacità di farsi amare della Bianca anche tra i banchi, la grande curiosità di Davide, che io so di poter fare ogni volta meglio, di avere sempre qualcosa da imparare.

Ringrazio i miei nonni da cui mi sento amata alla follia e che farebbero qualsiasi cosa per i loro nipoti. Grazie per le loro preghiere prima di un esame e per la semplicità con cui mostrano di voler partecipare alla mia vita e alla mia felicità. Ringrazio tutti i parenti che, con gioia, condividono alcuni momenti importanti della vita.

Un grazie enorme va a Silvia e Caterina, amiche preziose per l'università, ma con cui si è condiviso davvero un pezzetto di vita. Avere amici "tra i banchi" è fondamentale

per riuscire ad andare avanti. Insieme a loro ringrazio tutti i miei compagni di corso, Lorenzo, Pedro, Bag, Ale, Federico, Francesco, Paso, William, Ale, Teo, Paris e tutti gli altri, con cui è stato sempre piacevole passare un pomeriggio di laboratorio o un pranzo o un gelato dopo una giornata faticosa.

Ringrazio i miei amici, i Tonni e le Sirene, la loro presenza nella mia vita è qualcosa di inspiegabilmente bello. La nostra amicizia, basata sulle esperienze di vita e sulla condivisione spesso di idee e riflessioni, è rara. Grazie perché sento di avere sempre qualcuno, anche al di fuori del mio ambito di studio, realmente interessato a come vada la mia carriera universitaria, parte fondamentale fino ad ora della mia vita.

Ringrazio il professore Paolo Finelli, che ha avuto pazienza con i miei ritardi e si è dimostrato pronto e disponibile sin da subito.

I miei ringraziamenti vanno alle persone che mi circondano, perché da sola non riuscirei nemmeno ad alzarmi la mattina. Grazie a chi mi vuole bene, a chi crede in me anche quando non sono io la prima a crederci.

# Sommario

La scoperta del neutrone è trattata dal punto di vista degli esperimenti e della mentalità con cui gli scienziati si affacciarono a questa nuova entità. È interessante vedere come questa particella presunta abbia ispirato per diversi anni i fisici.

Il primo capitolo evidenzia l'evoluzione storica di questo nuovo concetto, dalla prima volta che venne citato, nel 1899, fino alle ipotesi di Rutherford degli anni '20, più vicine alla realtà. Inizialmente il neutrone era visto come una molecola materiale dell'etere, onnipresente e composta da un elettrone positivo e uno negativo. Successivamente fu ipotizzato che potesse avere caratteristiche simili a quelle della luce perché si pensò non avesse massa. L'idea di un'entità neutra come doppietto di due elettroni con cariche opposte rimase per diversi anni. Rutherford aveva invece capito che il vero problema stava nella struttura dell'atomo e che una particella senza massa ha poco a che fare con il sistema protone-elettrone, di massa simile ad un atomo di idrogeno. Vennero ipotizzati, dopo la scoperta del nucleo, anche altri sistemi neutri, come l'insieme di una particella neutra e due elettroni oppure due atomi di idrogeno con due elettroni. Le cose iniziarono a farsi un po' più chiare quando Rutherford suggerì esistesse un atomo neutro con numero di massa 1 e numero atomico 0. Considerò in dettaglio le proprietà nuove che avrebbe dovuto avere: un campo esterno praticamente nullo, eccetto a distanze molto piccole e che conseguentemente poteva muoversi attraverso la materia.

Il secondo capitolo tratta dei tre esperimenti fondamentali che portarono alla scoperta della nuova particella. Gli esperimenti furono eseguiti da Bothe, insieme al suo studente Becker, dai coniugi Joliot e Curie e, infine, da Chadwick, che fu in seguito premiato per la scoperta del neutrone, sebbene ancora non fosse chiaro che esso fosse una particella elementare. Nella prima esperienza si rilevò una misteriosa radiazione capace di penetrare un grande spessore di materia; nella seconda si vide che aggiungendo uno strato di sostanza idrogenata questa radiazione dava origine ad un'ulteriore emissione, che si comprese essere formata da protoni ad alte velocità; nella terza Chadwick riprese le esperienze precedenti e le rianalizzò con strumenti migliori e giunse alla conclusione nota.

Il 1932 fu un anno importante per la fisica, che aprì una nuova era di ricerche nell'ambito del nucleo. Pochi anni dopo si combatté la seconda guerra mondiale che vide la creazione di una nuova arma, la bomba atomica, uno degli scenari che si aprirono a seguito di questa scoperta.



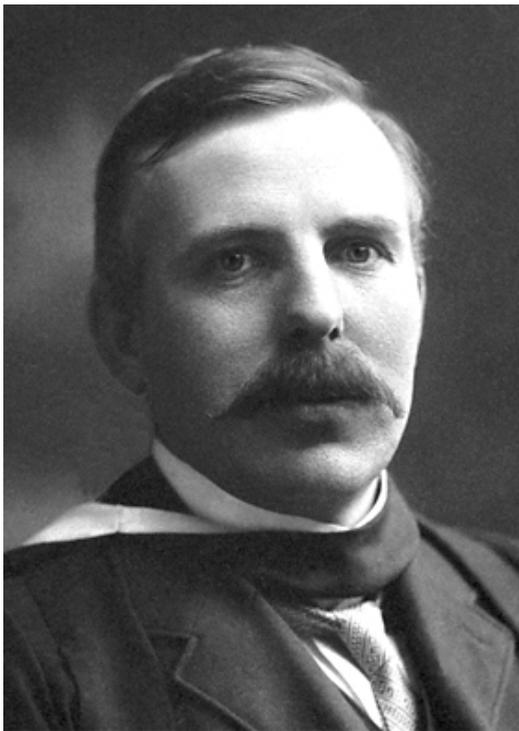
# Indice

<b>1</b>	<b>Introduzione storica</b>	<b>1</b>
	<b>Introduzione storica</b>	<b>1</b>
1.1	Preistoria “lontana” . . . . .	3
1.2	Preistoria “vicina” . . . . .	6
<b>2</b>	<b>Esperimenti</b>	<b>13</b>
	<b>Esperimenti</b>	<b>13</b>
2.1	Esperimento di Bothe e Becker . . . . .	13
2.2	Esperimento di Curie e Joliot . . . . .	20
2.3	Esperimento di Chadwick . . . . .	27
2.4	Ulteriori esperimenti . . . . .	37
<b>3</b>	<b>Conclusioni</b>	<b>45</b>
	<b>Conclusioni</b>	<b>45</b>
	<b>Appendice A: Riproduzione calcoli Chadwick</b>	<b>47</b>
	<b>Appendice B: Stima della massa del neutrone</b>	<b>51</b>
	<b>Bibliografia</b>	<b>53</b>



# Capitolo 1

## Introduzione storica



Ernest Rutherford (1871-1937); [13].

### Breve biografia di E. Rutherford

*Ernest Rutherford nacque il 30 agosto del 1871 in Nuova Zelanda, quarto di dodici fratelli. I suoi genitori erano meccanico e insegnante di scuola. Rutherford ricevette la sua prima educazione in una scuola statale e a sedici anni entrò nella Nelson Collegiate School. Fu premiato nel 1889 all'università e venne mandato a studiare in Nuova Zelanda al Canterbury College. Si laureò nel 1893 nella doppia laurea di matematica e scienze fisiche e continuò la sua carriera facendo il ricercatore. Si spostò, grazie all'ottenimento di un'ulteriore borsa di studio, al Trinity College a Cambridge, come ricercatore al Laboratorio Cavendish, sotto la supervisione di Thomson.*

*Anni dopo, dopo essere andato a Montreal e tornato (nel 1907), divenne professore di fisica a Cambridge. Le sue prime ricerche, in Nuova Zelanda, furono sulle*

*proprietà magnetiche del ferro esposto ad oscillazioni ad alte frequenze, in corrente alternata. Fu uno dei primi a fare esperimenti simili. Nel 1896 scrisse un articolo, "Magnetic Viscosity", che conteneva la descrizione di un apparato che misurava il tempo, capace di misurare gli intervalli di un centomillesimo di secondo. Durante il suo primo discorso a Cambridge inventò un rivelatore per le onde elettromagnetiche. Inizialmente lavorò con Thomson sul comportamento degli ioni osservati nei gas trattati con i raggi X e, successivamente, sulla mobilità degli ioni in relazione con la forza del campo elettrico e sull'effetto fotoelettrico. Nel 1898 relazionò l'esistenza dei raggi  $\alpha$  e  $\beta$  nelle radiazioni dell'uranio e indicò alcune loro proprietà. A Montreal continuò il suo lavoro occupandosi di corpi radioattivi, in particolare nell'emissione di raggi  $\alpha$ . Scoprì un nuovo gas nobile, isotopo del radon, il torio e ne studiò l'"emanazione". Nel 1900 collaborò con un altro scienziato, Soddy, nella creazione della teoria della disintegrazione, che riguardava i fenomeni radioattivi come processi atomici, e non nucleari. Insieme a Geiger trovò un metodo di rilevare una singola particella  $\alpha$  e di contarne il numero emesso da un raggio. Nel 1910 effettuò l'esperimento più noto che indagava lo scattering delle particelle  $\alpha$  incidenti verso un materiale. Grazie ad esso postulò il suo concetto di nucleo. Nel 1913 usò i raggi catodici per bombardare gli atomi di vari elementi e mostrò che la struttura interna corrisponde a un gruppo di linee che caratterizza l'elemento. Ad ogni elemento si può assegnare un numero atomico e delle proprietà riferite ad esso. Nel 1919 trovò che il nucleo di azoto poteva disintegrarsi con il bombardamento di una particella  $\alpha$  molto energetica, e durante questo processo venivano emessi dei protoni veloci e l'azoto si trasmutava in un isotopo dell'ossigeno. Ebbe molti riconoscimenti di merito. Fu una fonte di ispirazione, soprattutto al laboratorio Cavendish, dove altri ottennero Premi Nobel seguendo le ricerche cominciate da lui. Morì a Cambridge il 19 ottobre del 1937 e fu sepolto, secondo sua richiesta, in una navata dell'abbazia Westminster, vicino a Isaac Newton e Lord Kelvin [13].*

La preistoria del neutrone può essere divisa in due periodi: una preistoria lontana nel tempo (fino al termine dagli anni ottanta del diciannovesimo secolo) e una più vicina (negli anni precedenti l’effettiva scoperta).

## 1.1 Preistoria “lontana”

Apparve per la prima volta il termine “neutrone” nel 1899 in uno scritto di William Sutherland<sup>1</sup>, intitolato “Cathode, Lenard and Röntgen rays” e poi con Walther Nernst<sup>2</sup> nella quarta edizione del suo libro “Theoretische Chemie” del 1903 [1]. Negli anni precedenti erano stati scoperti i raggi X (1895), la radioattività dell’Uranio (1896) ed era stato realizzato il dispositivo a raggi catodici con elettroni ad alta velocità (1897) [1].

Sutherland stava cercando di spiegare i raggi X nell’ambito della teoria dell’etere, che allora si riteneva permeasse tutto l’universo e fosse il supporto del campo elettromagnetico; propose un etere composto da elettroni negativi e positivi, non massivi e che acquisivano massa grazie alla loro velocità, normalmente accoppiati a formare una sorta di molecola neutra [3]. Scrisse [1, pag. 27, §1.7]:

*“If electrons are distributed through aether, we suppose that in the aether, showing no electric charge, each negative electron is united with a positive electron to form the analogue of a material molecule which might conveniently be called neutron.”*<sup>3</sup>

Suppose che i raggi catodici fossero il risultato della frammentazione dei neutroni nel tubo catodico e che la conduzione dei metalli fosse il risultato della locale dissociazione del neutrone in elettroni. Utilizzò una simbologia appartenente alla musica: alla carica positiva corrispondeva il simbolo acuto, all’elettrone quello piatto, alla particella neutra era associato il simbolo naturale [7].

La sua teoria era assolutamente fantasiosa e priva di alcuna base empirica e venne presto dimenticata, ma il nome “neutrone” rimase e ricomparve con Nernst [3]: già nella seconda edizione del suo libro aveva discusso della conduzione elettrolitica nei liquidi introducendo due particelle elementari senza massa, che aveva chiamato elettrone positivo e negativo, e nella quarta edizione scrisse [1, pag. 27, §1.7]:

*“We suppose that neutrons are everywhere, like light-ether is. And we may add, that a volume, filled with these molecules, will be massless, electrically*

---

<sup>1</sup>fisico teorico e chimico australiano, nato in Scozia (1859-1911) [27].

<sup>2</sup>(1864-1941) chimico tedesco. Diede il suo contributo nel moderno campo della chimica fisica, all’elettrochimica, alla termodinamica, alla chimica dello stato solido e alla fotochimica [24].

<sup>3</sup>Se gli elettroni sono distribuiti nell’etere, possiamo supporre che nell’etere, che non mostra alcuna carica, ogni elettrone negativo sia unito con un elettrone positivo, formando l’analogo di una molecola materiale che ci conviene chiamare neutrone.

*polarizable, i. e. would have the same characteristics as is quoted by physics for light.*" <sup>4</sup>

Quest'ultima speculazione fu ripresa da Johannes Stark<sup>5</sup> in un capitolo di un articolo pubblicato nel 1904, "Vorgeslagene Erklärung der Radioaktivität" (Spiegazione proposta della radioattività), nel giornale di cui era l'editore. Nello stesso giornale Rutherford, tra il 1904 e il 1910, pubblicò una serie di articoli in cui si ipotizza il concetto di questa nuova particella, che evidentemente aveva già in mente, grazie al lavoro di Nernst e Stark. Eppure il concetto di Rutherford si avvicinò maggiormente a ciò che realmente è il neutrone, infatti suggerì che una particella senza massa ha poco a che fare con il sistema protone-elettrone, di massa effettivamente poco minore di un atomo di idrogeno.

Un altro importante passaggio derivò da una cornice di pensiero completamente differente: nel 1900 Paul Ulrich Villard<sup>6</sup> scoprì che gli atomi radioattivi emettono, oltre a raggi  $\alpha$  e  $\beta$ , anche raggi  $\gamma$  (risultato che venne poi sistematicamente catalogato da Rutherford). Questi nuovi raggi non venivano deflessi passando attraverso campi elettrici e magnetici e, perciò, non dovevano essere dotati di carica elettrica, avevano un potere altamente penetrante, ma potevano ionizzare i gas [1].

Un'osservazione importante che fece Rutherford fu [1, pag. 28, §1.6]:

*"a small uncharged particle moving through matter would probably not be absorbed as rapidly as a charged particle of the same mass and velocity."* <sup>7</sup>

Rutherford credeva che la vera domanda fosse la struttura dell'atomo, ovvero che il problema del neutrone nascesse perché dovevano esistere delle particelle elementari che costituissero il nucleo. Questo interrogativo assorbì completamente la sua ricerca: nei suoi tentativi di indagare il meccanismo della radioattività studiò l'impatto tra particelle  $\alpha$  e nuclei di azoto e trovò, nel 1917, che veniva espulso un nucleo di idrogeno e uno di ossigeno, concludendo quindi che gli elementi si trasmutavano in altri [7]. Si tratta della prima evidenza sperimentale della presenza del protone come costituente dei nuclei.

Nel 1907 Bragg<sup>8</sup> richiamò il concetto, con qualche modifica, che i raggi gamma fossero coppie di elettroni di segno opposto, anche dopo la scoperta che fossero semplicemente

<sup>4</sup>Supponiamo che i neutroni siano ovunque, come l'etere leggero. E possiamo aggiungere che un volume riempito con queste molecole sarà senza massa, elettricamente polarizzabile, cioè avrebbe le stesse caratteristiche che sono riconosciute alla luce dalla fisica.

<sup>5</sup>fisico tedesco (1874-1957). Ottenne il Premio Nobel per la fisica nel 1919 perché rilevò la separazione in multipletti delle righe spettrali condizionate da un campo elettrico, definito effetto Stark-Lo Surdo. Fu un fervente sostenitore del nazismo [28].

<sup>6</sup>fisico e chimico francese (1860-1934) [29].

<sup>7</sup>una piccola particella non carica che si muove attraverso la materia non dovrebbe essere assorbita rapidamente come una particella carica della stessa massa e velocità.

<sup>8</sup>fisico e cristallografo britannico (1890-1971). Nel 1915 ricevette il Premio Nobel per la fisica assieme a suo padre per gli studi condotti sull'analisi della struttura cristallina per mezzo dei raggi X divenendo il più giovane premiato a soli 25 anni [19].

dei raggi X ad altissima energia. Questa teoria fu abbandonata solamente quando fu osservata la diffrazione dei raggi X da parte di un cristallo [1].

Dalla scoperta della radioattività  $\gamma$  nel 1900, fino agli esperimenti di diffrazione nel 1912, venne considerata accanto alla teoria elettromagnetica anche una corpuscolare costituita da particelle pesanti dati da una coppia di elettroni [3]. Altri due autori, infatti, diedero la loro interpretazione su un “sistema neutro”: il primo fu Antonius van den Broek, (1870-1926), un avvocato tedesco interessato di fisica e in particolare al problema delle leggi di ordinamento del Sistema Periodico, il secondo, William Draper Harkins, (1873-1951) un professore di chimica all’Università di Chicago [1].

Van den Broek aveva ipotizzato, nel 1913, che il numero indicante il posto degli elementi nella Tavola fosse uguale alla metà del peso atomico, che coincideva con la carica del nucleo oltre che a quella degli elettroni circostanti la massa atomica, e che ci dovevano essere quindi degli elettroni nel nucleo positivo. Nel 1915 suggerì che ci fosse, nelle vicinanze del nucleo carico, un gruppo di particelle neutre consistenti nella combinazione di una particella  $\alpha$  con due elettroni, che davano origine alla radioattività. La situazione cambiò quando, nel 1920, lo spettrografo di massa di F. W. Aston<sup>9</sup> cominciò a funzionare senza problemi e gli elementi furono uno a uno analizzati. Un articolo pubblicato nel 1921 da van den Broek (“Zur Allgemeine Isotopie”) descriveva, quindi, il nucleo composto di un numero pari di particelle  $\alpha$ , gli “alfoni”, e di H (il nome dei protoni fu dato successivamente), che insieme agli elettroni, chiamate particelle  $\beta$ , potevano dare dei sistemi composti. Grazie ad essi elaborò una sua nuova versione della Tavola Periodica [1].

Harkins nel 1920 scrisse un lungo articolo dove suggeriva che la combinazione di due nuclei di idrogeno e due elettroni, che insieme costituivano la particella  $\mu$ , fosse un importante costituente dei nuclei più pesanti [1]. Scrisse [1, pag. 28, §1.6]:

*“If this  $\mu$  particle exist alone it forms the atom of an element of zero atomic number.”*<sup>10</sup>

Negli anni ’20 diventò fondamentale la ricerca della struttura del nucleo, tentando di conciliare sia i principi della meccanica classica sia i risultati delle misure effettuate con lo spettroscopio, con l’idea di un nucleo formato solo da elettroni e protoni [7].

Da questo momento in avanti possiamo parlare di storia “vicina”.

---

<sup>9</sup>chimico e fisico inglese (1877-1945). Nel 1922 ottenne il Premio Nobel per la chimica per la scoperta degli elementi non radioattivi, grazie al suo spettrografo di massa, e per l’enunciazione della regola degli isotopi [17].

<sup>10</sup>Se questa particella  $\mu$  esistesse da sola formerebbe l’atomo di un elemento di numero atomico nullo.

## 1.2 Preistoria “vicina”

L’apporto più significativo per l’introduzione del neutrone quale componente del nucleo atomico si deve a Ernest Rutherford, che nella sua “lezione Bakeriana” del 3 giugno 1920 tratteggiò lo stato delle conoscenze del momento dei nuclei atomici [3]. Sugerì esistesse, all’interno del nucleo atomico, una combinazione stretta tra un elettrone e un protone. Questo articolo cominciava con la trattazione degli angoli di deviazione nell’esperimento di diffusione delle particelle  $\alpha$  con nuclei di altri elementi, in cui si discuteva riguardo la differenza tra ciò che si era osservato e le predizioni attraverso la legge di repulsione tra particelle cariche di Coulomb. Successivamente si mostrava come, dai risultati, fosse possibile dedurre un valore ragionevole per le dimensioni del nucleo (circa  $10^{-4}$  m) [1]. Considerò, inoltre, il processo di trasmutazione, scoperto qualche anno prima in cui le particelle  $\alpha$  sono capaci di produrre nuclei di idrogeno dopo aver bombardato l’azoto, descritta dalla reazione nucleare:



e dedicò l’ultima parte dell’articolo alla struttura del nucleo [1]. In quest’ultima spiegò che il nucleo di un atomo è caratterizzato dal ‘numero di massa’  $A$ , numero intero più vicino al rapporto fra la massa dell’atomo e quella dell’atomo di idrogeno, e dal ‘numero atomico’  $Z$ , corrispondente al numero di elettroni atomici. Si conoscevano allora solo elettroni, di massa trascurabile e carica elettrica unitaria negativa, e protoni di carica unitaria positiva, per cui un nucleo caratterizzato dai numeri  $A$  e  $Z$  era necessariamente descritto come composto da  $A$  protoni, che fornivano la massa, e da  $A-Z$  elettroni, in modo da ridurre a  $Z$  unità la carica elettrica positiva dell’atomo [3].

Nella sua “lezione” Rutherford considerò che, essendo l’atomo neutro di idrogeno assunto come un nucleo di carica unitaria con un elettrone attaccato ad una certa distanza, e lo spettro dell’idrogeno imputato ai movimenti di questo elettrone rispetto alla distanza dal nucleo, fosse possibile che un elettrone si combinasse molto strettamente con un nucleo di idrogeno, formando una sorta di doppietto neutrale [1], un nucleo con  $A=2$  e  $Z=1$ , un isotopo pesante dell’idrogeno. Ipotizzò, inoltre, che potesse esistere anche un nucleo neutro con  $A=1$  e  $Z=0$  dato dall’unione di un elettrone con un protone [3]. Considerò in dettaglio le proprietà ‘nuove’ che questo atomo avrebbe dovuto avere, ovvero un campo esterno praticamente nullo, eccetto a distanze molto piccole, quindi vicine al nucleo, e che conseguentemente poteva muoversi attraverso la materia [1, pag 23, §1.5].

*“Its presence would probably be difficult to detect by spectroscopy, and it may be impossible to contain in a sealed vessel. On the other hand, it should enter readily the structure of atoms, and may either unite with the nucleus*

*or be disintegrated by its intense field, resulting possibly in the escape of a charged H atom or an electron or both.”*<sup>11</sup>

Se un atomo del genere fosse stato possibile, ci si aspettava che sarebbe stato prodotto, probabilmente in piccole quantità, nella scarica elettrica attraverso l'idrogeno, dove sono presenti in modo considerevole sia l'elettrone che il nucleo di idrogeno. L'esistenza di questo atomo sembrava necessaria nella spiegazione della struttura dei nuclei più pesanti, o per lo meno Rutherford suppose che la produzione di particelle cariche ad altissima velocità fosse difficile da vedere quanto una particella carica positivamente che raggiunga il nucleo di atomi pesanti, a dispetto del suo campo intenso [1].

Di fatto il fisico iniziò subito un programma sperimentale alla ricerca del neutrone, che a Cambridge non venne mai interrotto fino ai lavori del 1931 di Webster<sup>12</sup> e la scoperta di Chadwick [3], trattate nel capitolo a seguito.

Inizialmente, dopo la sua “lezione”, Rutherford chiese a un suo studente di cercare la produzione dei neutroni nella scarica elettrica attraverso l'idrogeno. Allora lo studente, J. L. Glasson, scrisse [1, pag 24, § 1.5]:

*“The entrance of a neutral particle would be much more easily effected, and the subsequent expulsion of negative electron would achieve the necessary increment of nuclear charge.”*<sup>13</sup>

Glasson, però, non trovò alcuna prova nell'esperimento di un possibile neutrone [7].

Successivamente allora Rutherford tentò, chiedendo aiuto a Chadwick, l'esperimento citato, ovvero la disintegrazione artificiale dell'azoto. Usò la tecnica degli scintillatori. Nel 1923, con l'approvazione di Rutherford, Chadwick esaminò l'emissione delle radiazioni gamma dalla formazione dei neutroni in una grande massa di idrogeno, usando una camera a ionizzazione e un contatore di Geiger. Qualche anno dopo, nel 1928, i due ripeterono l'esperimento usando due dei nuovi contatori Geiger-Müller [1]. Da questi esperimenti trassero delle conclusioni non corrette, ma estremamente vicine alla realtà [1, pag 24, § 1.5]:

*“During our work we looked for faint scintillations due to a radiation undeflected by a magnetic field.[...] The case of beryllium was interesting for two reasons. It did not emit protons under  $\alpha$  particles bombardment; and, though a false argument, the mineral beryl was known to contain an unusual*

---

<sup>11</sup>La sua presenza è probabilmente difficile da rilevare con lo spettroscopio, e può essere impossibile da tenere in un recipiente chiuso. Ma d'altra parte può entrare nella struttura degli atomi e può o unirsi al nucleo oppure essere disintegrato dal suo campo intenso, causando forse l'espulsione di un atomo di idrogeno carico o un elettrone o entrambi.

<sup>12</sup>ricercatore australiano di fisica.

<sup>13</sup>L'entrata di una particella neutrale sarebbe molto più facile da determinare, e conseguentemente l'espulsione di un elettrone negativo raggiungerebbe l'incremento necessario per la carica nucleare.

*amount of helium, suggesting that perhaps the Be nucleus split up under the action of cosmic radiation into two  $\alpha$  particles and a neutron.”*<sup>14</sup>

Chadwick allora tentò di bombardare il berillio con particelle  $\alpha$ , particelle  $\beta$  e con raggi  $\gamma$ , usando il metodo degli scintillatori per rivelare gli effetti, ma non trovò nulla [1].

Una domanda fondamentale nella ricerca della struttura del nucleo era come fosse possibile che cariche positive e negative potessero stare insieme. A questa questione tentò, successivamente, di dare una risposta, nel suo lavoro, George Gamow<sup>15</sup> [7, pag 857, § Nuclear Structure 1922-29]:

*“It has often been suggested that non-Coulomb attractive forces play a very important role inside atomic nuclei. We can make many hypotheses concerning the nature of these forces. They can be the attractions between the magnetic moment of the individual constituents of the nucleus or the forces engendered by electric and magnetic polarization. In any case these forces diminish very rapidly with increasing distance from the nucleus and only in the immediate vicinity of the nucleus do they outweigh the Coulomb force.”*<sup>16</sup>

Gamow sosteneva che fosse innaturale che la particella  $\alpha$ , assunta essere neutra e composta inoltre da due elettroni, perdesse questi ultimi, che cadevano nel nucleo, a causa della barriera di potenziale mentre la particella volasse via spinta dalla forza di Coulomb. Ipotizzò di dover guardare il problema da un punto di vista di onde meccaniche [7].

La natura delle forze dentro al nucleo rimase misteriosa, ma si sviluppò un nuovo modello fenomenologico del potenziale nucleare. Crebbero anche gli esperimenti in cui rimaneva inspiegato il comportamento degli elettroni nucleari, che, in combinazione con la metà dei protoni nucleari, consentivano di tenere conto sia della massa isotopica che del numero atomico. Gamow, nel suo libro ‘The Structure of the Atomic Nucleus’ scritto

---

<sup>14</sup>Durante il nostro lavoro cercavamo deboli scintillazioni dovute alla radiazione non deflessa dal campo magnetico. [...] Il caso del berillio era interessante per due ragioni. Non emetteva protoni sotto il bombardamento delle particelle  $\alpha$ ; e, anche se è un falso argomento, il minerale Be era conosciuto perché conteneva un’insolita quantità di elio, suggerendo che forse i nuclei di berillio si dividevano, sotto l’azione della radiazione cosmica, in due particelle  $\alpha$  e un neutrone.

<sup>15</sup>fisico, cosmologo e divulgatore scientifico russo naturalizzato statunitense (1904-1968). Ha lavorato su un gran numero di argomenti: fra cui il nucleo atomico, l’evoluzione stellare, la nucleosintesi stellare, la cosmologia, il decadimento alfa (spiegato grazie all’utilizzo dell’effetto tunnel). Ha contribuito inoltre in maniera importante alla comprensione dei sistemi di codificazione genetica utilizzati nella sequenza della catena elicoidale del DNA, da poco scoperta [22].

<sup>16</sup>È stato spesso suggerito che delle forze non coulombiane attrattive giochino un ruolo fondamentale all’interno del nucleo atomico. Possiamo fare alcune ipotesi sulla natura di queste forze. Possono essere l’attrazione tra il momento magnetico e i singoli costituenti del nucleo o le forze generate dalla polarizzazione elettrica e magnetica. In tutti i casi queste forze diminuiscono rapidamente con l’aumento della distanza dal nucleo e superano la forza di Coulomb solo nelle immediate vicinanze del nucleo.

nel 1930-1931, individuò alcuni problemi riferiti agli elettroni, in particolare rispetto alla statistica dello spin [7].

*“It (experiment) seems to show that the nuclear electrons do not count in the statistics of the system; either, for some reasons as yet unknown, the nuclear electrons must be described by symmetrical wave-function, or we must give up the idea of assigning space co-ordinates to the electrons inside the nucleus. At present nitrogen is the only element for which this difficulty has arisen, but it seems probable that it is true in general that the statistics of the nucleus depend only on the total number of protons in it. [...] It seems that nuclei with an even number of protons always have an even spin, while those with an odd number of protons have an odd spin. That indicates that the nuclear electrons do not make any contribution to the total angular momentum of nucleus.”*<sup>17</sup> [7, pag. 858, §Problem of Nuclear Electrons]

Nel 1930 ci fu un raduno di fisici a Tübingen, a cui Pauli non poté partecipare, ma per cui scrisse una lettera (Fig. 1.1), per spiegare la sua assenza. In questa lettera diede anche una spiegazione di quello che venne chiamato “neutrone di Pauli” [7, pag 858, § The Pauli Neutron]:

*“There could exist in the nuclei electrically neutral particles that I wish to call neutrons, which have spin 1/2 and obey the exclusion principle, and additionally differ from light quanta in that they do not travel with the velocity of light. The mass of the neutron must be of the same order of magnitude as the electron mass and in any case, not larger than 0.01 proton mass. The continuous  $\beta$  spectrum would then become understandable by the assumption that in  $\beta$  decay a neutron is emitted together with the electron in such a way that the sum of the energies of neutrons and electrons is constant”*<sup>18</sup>

---

<sup>17</sup>(L’esperimento) sembra mostrare che gli elettroni nucleari non contano nella statistica del sistema; oppure, per qualche ragione non ancora nota, gli elettroni nucleari devono essere descritti da una funzione d’onda simmetrica, o dobbiamo arrenderci all’idea di assegnare coordinate spaziali agli elettroni dentro al nucleo. Al momento l’azoto è l’unico elemento per cui è sorta questa difficoltà, ma sembra probabile che sia vero che la statistica dei nuclei dipenda solo dal numero totale di protoni. [...] Sembra che i nuclei con un numero pari di protoni abbiano sempre spin pari, mentre quelli con numero dispari di protoni abbiano spin dispari. Questo indica che gli elettroni nucleari non danno alcun contributo al momento angolare totale del nucleo.

<sup>18</sup>Possono esistere nei nuclei elettricamente neutri particelle che chiamerei neutroni, che hanno spin 1/2 e obbediscono al principio di esclusione, e in aggiunta differiscono dai quanti di luce perché non viaggiano alla velocità della luce. La massa del neutrone deve essere dello stesso ordine della magnitudine come la massa dell’elettrone  $e$ , in ogni caso, non maggiore di 0.01 volte la massa del protone. Lo spettro continuo  $\beta$  potrebbe diventare comprensibile con l’assunzione che nel decadimento  $\beta$  un neutrone è emesso insieme a un elettrone in modo che la somma delle energie del neutrone e dell’elettrone rimanga costante.

original - Photocopy of PLC 0393  
Abschrift/15.12.56 FM

Offener Brief an die Gruppe der Radioaktiven bei der  
Gauvereins-Tagung zu Tübingen.

Abschrift

Physikalisches Institut  
der Eidg. Technischen Hochschule  
Zürich

Zürich, 4. Dez. 1930  
Gloriastrasse

Liebe Radioaktive Damen und Herren,

Wie der Ueberbringer dieser Zeilen, den ich huldvollst  
ansuhören bitte, Ihnen des näheren auseinandersetzen wird, bin ich  
angesichts der "falschen" Statistik der N- und Li-6 Kerne, sowie  
des kontinuierlichen beta-Spektrums auf einen verweifelten Ausweg  
verfallen um den "Wechselsatz" (1) der Statistik und den Energiesatz  
zu retten. Nämlich die Möglichkeit, es könnten elektrisch neutrale  
Teilchen, die ich Neutronen nennen will, in den Kernen existieren,  
welche den Spin 1/2 haben und das Ausschliessungsprinzip befolgen und  
sich von Lichtquanten ausserdem noch dadurch unterscheiden, dass sie  
nicht mit Lichtgeschwindigkeit laufen. Die Masse der Neutronen  
müsste von derselben Grossenordnung wie die Elektronenmasse sein und  
jedemfalls nicht grösser als 0,01 Protonenmasse.- Das kontinuierliche  
beta-Spektrum wäre dann verständlich unter der Annahme, dass beim  
beta-Zerfall mit dem Elektron jeweils noch ein Neutron emittiert  
wird, derart, dass die Summe der Energien von Neutron und Elektron  
konstant ist.

Nun handelt es sich weiter darum, welche Kräfte auf die  
Neutronen wirken. Das wahrscheinlichste Modell für das Neutron scheint  
mir aus wellenmechanischen Gründen (näheres weiss der Ueberbringer  
dieser Zeilen) dieses zu sein, dass das ruhende Neutron ein  
magnetischer Dipol von einem gewissen Moment  $\mu$  ist. Die Experimente  
verlängen wohl, dass die ionisierende Wirkung eines solchen Neutrons  
nicht grösser sein kann, als die eines gamma-Strahls und darf dann  
 $\mu$  wohl nicht grösser sein als  $e \cdot (10^{-13} \text{ cm})$ .

Ich traue mich vorläufig aber nicht, etwas über diese Idee  
zu publizieren und wende mich erst vertrauensvoll an Euch, liebe  
Radioaktive, mit der Frage, wie es um den experimentellen Nachweis  
eines solchen Neutrons stände, wenn dieses ein ebensolches oder etwa  
10mal grösseres Durchdringungsvermögen besitzen würde, wie ein  
gamma-Strahl.

Ich gebe zu, dass mein Ausweg vielleicht von vornherein  
wenig wahrscheinlich erscheinen wird, weil man die Neutronen, wenn  
sie existieren, wohl schon längst gesehen hätte. Aber nur wer wagt,  
gemusst und der Ernst der Situation beim kontinuierliche beta-Spektrum  
wird durch einen Ausspruch meines verehrten Vorgängers im Amt,  
Herrn Debye, beleuchtet, der mir kürzlich in Brüssel gesagt hat:  
"O, daran soll man am besten gar nicht denken, sowie an die neuen  
Steuern." Darum soll man jeden Weg zur Rettung ernstlich diskutieren.-  
Also, liebe Radioaktive, prüfet, und richtet.- Leider kann ich nicht  
persönlich in Tübingen erscheinen, da ich infolge eines in der Nacht  
vom 6. zum 7. Dez. in Zürich stattfindenden Balles hier unabkömmlich  
bin.- Mit vielen Grüßen an Euch, sowie an Herrn Back, Euer  
untertänigster Diener

ges. W. Pauli

Figura 1.1: Lettera scritta da Pauli per motivare l'assenza al raduno dei fisici a Tubinga, 1930, in cui spiega la sua concezione di neutrone.

L'esistenza del neutrone era importante per poter salvare la conservazione dell'energia, che era in quel momento messa in discussione. Questa nuova particella avrebbe, infatti, risolto il problema dello spin nucleare e il problema dell'energia mancante nello spettro continuo degli elettroni.

In realtà Pauli parlava di una particella diversa, quella che Fermi battezzerà in seguito 'neutrino'.

Rutherford perse in questo periodo interesse rispetto al problema degli elettroni nel nucleo, mentre Chadwick non abbandonò la speranza di scoprire la verità [7]. Capì di aver bisogno di una fonte di polonio, elemento naturalmente molto radioattivo, ma poco fruibile per lui. Infatti fu grazie all'intercessione e alla generosità di alcuni colleghi che ricevette una buona quantità di polonio, proveniente dalle scorte di ospedali, che potesse permettergli di fare gli esperimenti che dimostrarono l'effettiva esistenza del neutrone.

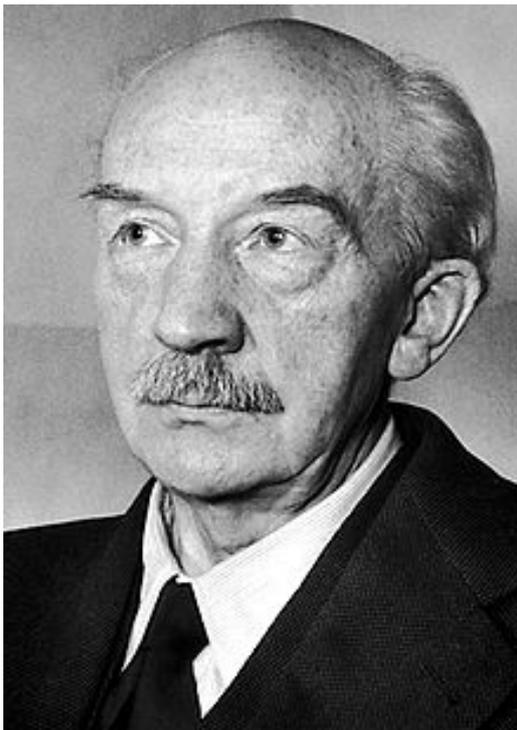
Infatti precedentemente Webster aveva tentato gli stessi esperimenti, ma per motivi pratici non era riuscito a vedere risultati: aveva utilizzato, infatti, una sorgente di polonio troppo scarsa e un elettroscopio poco sensibile [1].



# Capitolo 2

## Esperimenti

### 2.1 Esperimento di Bothe e Becker



Walther Wilhelm Georg Bothe  
(1891-1957); [18].

#### Breve biografia di W. Bothe

*Walther Bothe nacque l'8 gennaio del 1891 a Oranieburg, vicino a Berlino. Dal 1908 fino al 1912 studiò fisica presso l'Università di Berlino, dove fu il pupillo di Max Planck, e ottenne il suo dottorato poco prima della Prima Guerra Mondiale (1914-1918). Dal 1913 fino al 1930 lavorò al Physikalisch-Technische Reichsanstalt nella stessa città, diventando professore straordinario dell'Università. Nel 1930 fu nominato professore di fisica e direttore dell'istituto di fisica dell'Università di Giessen. Nel 1932 fu, poi, nominato direttore dell'istituto di fisica all'Università di Heidelberg, successore di Philipp Lenard, e nel 1934 all'istituto per la ricerca medica di Max Planck.*

*Alla fine della Seconda Guerra Mondiale, questo istituto fu convertito ad altri scopi, Bothe, allora, tornò al Dipartimento di Fisica dell'Università di Berlino, dove*

*insegnò fino a ch  una malattia inabilitante lo costrinse a smettere. Continu , per , a supervisionare il lavoro al Max Planck Institute fino alla sua morte, l'8 febbraio del 1957. Nel 1954 gli fu consegnato il Premio Nobel per "the coincidence method and his discoveries made therewith" [9].*

Nel 1930 a Berlino fu compiuto il primo passo verso la scoperta del neutrone: lo scienziato Bothe, insieme al suo studente Herbert Becker, al Physikalisch-Technische Reichsanstat, osserv  che esiste una radiazione penetrante che riesce a passare attraverso uno spessore di 200 mm di piombo [1].

Essi, infatti, stavano studiando l'irraggiamento di alcuni elementi leggeri (magnesio e alluminio) da parte delle particelle  $\alpha$ , dotate di grande energia, emesse da una sorgente di polonio, allora noto come radio F ( $Z=84$ ,  $A=210$ ), (Fig. 2.1). In questa reazione le particelle  $\alpha$  spesso interagiscono con i nuclei bersaglio producendo un protone e un raggio  $\gamma$ , come aveva scoperto Rutherford, quando ottenne per la prima volta la trasmutazione nucleare artificialmente indotta (la notazione utilizzata nel testo fa riferimento sempre a quella moderna, non ancora conosciuta dai fisici di quell'epoca) [6]:



Il setup dell'esperimento (Fig. 2.2) consisteva in un contatore di Geiger con diametro di 5 cm, un recipiente di metallo su cui appoggiare la sorgente di polonio di 3-7 mCi, in una posizione fissata, e un'asta verticale, alla cui estremit  inferiore era attaccato un sottile strato di sostanze che dovevano essere irradiate, ognuna messa in modo da coprire  $120^\circ$  del disco. Grazie alla rotazione dell'asta era possibile scegliere quale sostanza inserire tra la sorgente e la parte inferiore del recipiente, ovvero quale irraggiare con le particelle  $\alpha$ . Gli strati delle sostanze erano sufficientemente spessi da fermare le particelle  $\alpha$  incidenti e gli spessori della parete del contatore e del recipiente riuscivano ad assorbire i raggi X emessi dagli atomi delle sostanze irradiate. Tutto l'apparato era protetto dalla radiazione ambientale attraverso un cilindro di piombo spesso 5 centimetri [1].

La tecnica sperimentale prevedeva che, bombardando una sostanza con particelle  $\alpha$  emesse da una sorgente radioattiva, si formassero un fotone e un protone [6]. Osservarono, invece, che con nuclei di berillio, boro e litio veniva emessa una radiazione sconosciuta [6] e in special modo il primo tra questi elementi dava un effetto particolarmente marcato.

Bothe e Becker fecero pi  prove: posero degli strati di 1 o 2 cm di piombo, tra il recipiente e il contatore, ridussero l'energia delle particelle  $\alpha$  incidenti e interposero fogli di argento tra la sorgente e lo strato di berillio, infine per una variazione pi  fine introdussero aria ad una pressione conveniente dentro il recipiente di metallo [1]. Per ogni prova calcolarono la curva e il coefficiente di assorbimento. Poterono, cos , comparare le curve prodotte senza e con lo strato di piombo e notarono che la radiazione emessa nel

(Mitteilung aus der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt.)

## Künstliche Erregung von Kern- $\gamma$ -Strahlen.

Von **W. Bothe** und **H. Becker** in Charlottenburg.

Mit 11 Abbildungen. (Eingegangen am 23. Oktober 1930.)

Eine Reihe von Elementen und Verbindungen wurden mit den  $\alpha$ -Strahlen eines starken Poloniumpräparats bombardiert und auf sekundäre  $\gamma$ -Strahlen untersucht. Bei Li, Be, B, F, Mg und Al konnte eine  $\gamma$ -Strahlung nachgewiesen werden; die Ausbeuten sind ähnlich wie bei der Atomzertrümmerung (Ziffer 1 bis 5). Die Absorbierbarkeit der B- und Be-Strahlung wurde von der Größenordnung der härtesten radioaktiven  $\gamma$ -Strahlen befunden (Ziffer 6). Die von Slater angegebene harte Sekundärstrahlung des Bleis konnte nicht beobachtet werden (Ziffer 7). Der ungefähre Verlauf der Anregungsfunktion der Be-Strahlung wurde festgelegt (Ziffer 8). Eine deutliche Abhängigkeit der Härte der Be-Strahlung von der  $\alpha$ -Energie konnte nicht gefunden werden (Ziffer 9). Die B-Strahlung erwies sich als nicht merklich anisotrop (Ziffer 10). Die Entstehungsmöglichkeiten und der Zusammenhang zwischen  $\gamma$ -Strahlung und Atomzertrümmerung werden an Hand des Gamowschen Kernmodells diskutiert (Ziffer 11).

*1. Ziel und Anordnung der Versuche.* Die im folgenden zu beschreibenden Versuche erbringen den Nachweis, daß durch Beschießung mit  $\alpha$ -Strahlen in einigen Elementen eine Kern- $\gamma$ -Strahlung erregt werden kann. Weiter soll eine erste Übersicht über die Eigenschaften dieser Strahlungen gegeben werden.

Es ist von vornherein klar, daß die Intensität einer so erzeugten  $\gamma$ -Strahlung nur klein sein kann. Die Zahl der  $\gamma$ -Strahlen pro  $\alpha$ -Teilchen kann jedenfalls nicht wesentlich größer sein als die Zahl der Kerntreffer, welche ein  $\alpha$ -Teilchen bis zu seiner Abbremsung erfährt. Die Ausbeute an  $\gamma$ -Strahlen wird also höchstens vergleichbar sein mit den Ausbeuten an Atomtrümmern bei den zertrümmerbaren Elementen. Während es aber verschiedene Methoden gibt, um Atomtrümmer quantitativ zu zählen, sind alle Meßeinrichtungen für  $\gamma$ -Strahlen so unempfindlich, daß sie weniger als 1% der einfallenden  $\gamma$ -Quanten anzeigen. Hierin liegt die Schwierigkeit der Versuche, die nur dadurch überwunden werden kann, daß man starke  $\alpha$ -Strahlenquellen benutzt und die  $\alpha$ - und  $\gamma$ -Strahlen möglichst vollständig für die Messung ausnutzt.

Die aus diesem Gesichtspunkt gewählte Anordnung zeigt Fig. 1. *Z* ist ein Spitzenzähler von 5 cm Durchmesser, *P* ein Poloniumpräparat, bestehend aus einem Silberblech von  $1,0 \times 1,2 \text{ cm}^2$  Fläche, welches einseitig

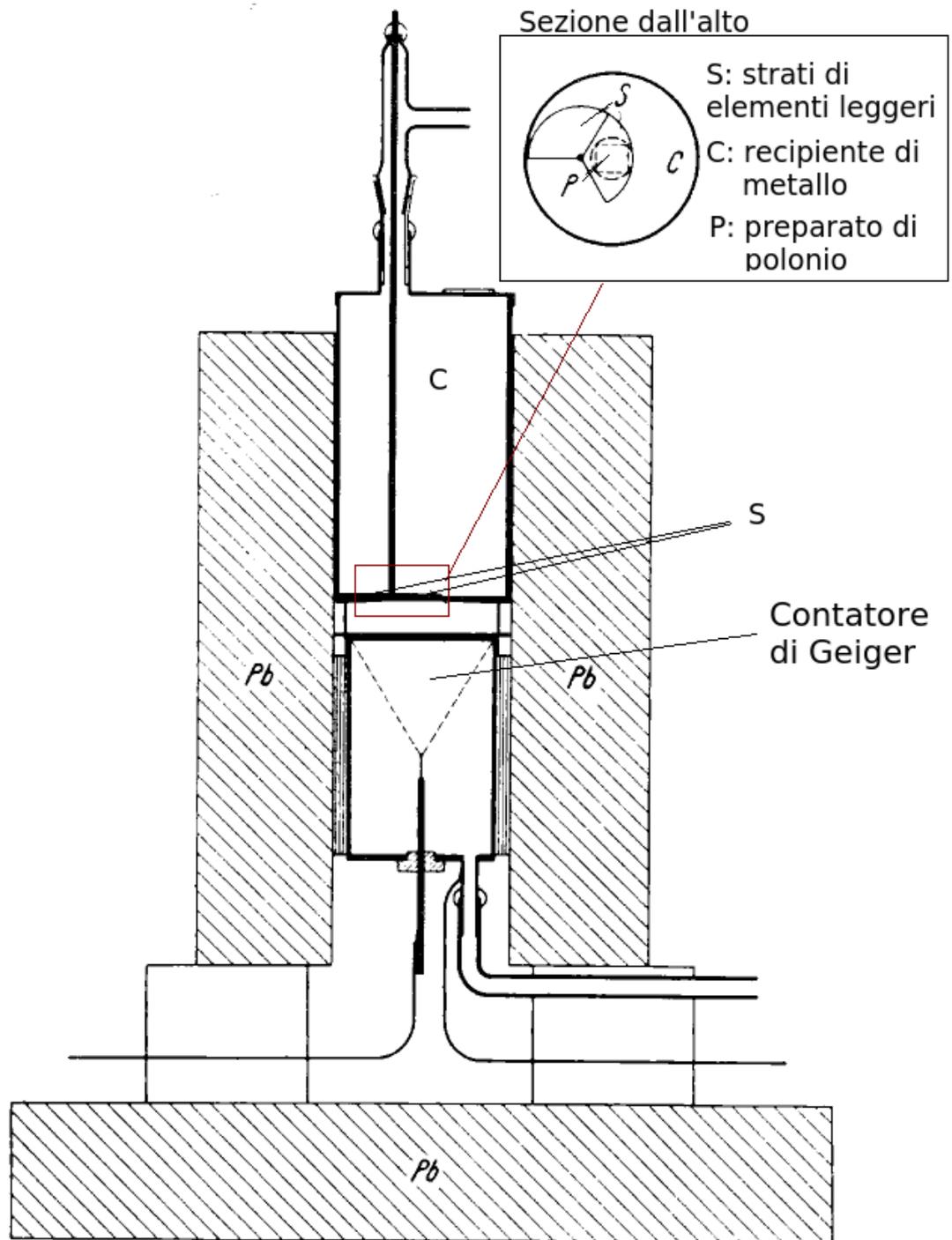
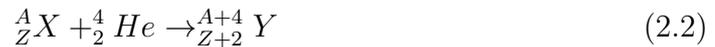


Figura 2.2: Setup dell'esperimento usato da Bothe e Becker nel 1930 per la scoperta di una radiazione penetrante emessa da fogli sottili di elementi leggeri bombardati con particelle  $\alpha$ ; [1].

secondo caso aveva un'energia maggiore di quella delle particelle  $\alpha$  incidenti e dell'energia dei raggi  $\gamma$  emessi da qualsiasi ordinaria sostanza radioattiva [16]. Le diedero il nome di “seconda radiazione”. La differenza dalla “prima” era che non veniva emesso il protone (un nucleo di idrogeno), ma una sorta di radiazione neutrale energetica: poteva infatti penetrare fogli di metallo, ma non venire deflessa da un campo magnetico come le altre particelle cariche elettricamente. L'unica cosa conosciuta fino a quel momento che potesse avere queste caratteristiche era la radiazione  $\gamma$ , così fu naturale l'interpretazione che i risultati mostrassero la mancanza di protoni come prova dell'emissione di raggi  $\gamma$  [6].

Gli scienziati considerarono due meccanismi possibili per la generazione della radiazione penetrante osservata:

- scattering anelastico;
- assorbimento da parte dei nuclei bersaglio con la formazione di nuovi nuclei secondo la relazione:



con elemento  $Y$  spesso prodotto negli stati eccitati e, quindi, decadente nei livelli più interni con emissione di fotoni ad alte energie [1].

Essi preferirono la seconda possibilità perché era in accordo con le misure del potere di penetrazione. Infatti nell'ottobre del 1931, a Roma, all'International Conference on Nuclear Physics, Bothe riferì nuove misure fatte sull'assorbimento, da parte di ferro e piombo, della seconda radiazione emessa dai nuclei di Be: i risultati di questo nuovo esperimento, fatto con condizioni geometriche migliori, rivelarono che il potere penetrante è tanto alto da richiedere un'energia doppia rispetto a quella delle particelle  $\alpha$  incidenti. Si parlò di Glatte Kernsynthese (semplice sintesi nucleare) e nel caso dell'elemento Be:



mentre per lo scattering anelastico esiste un limite superiore di energia dei fotoni emessi [1].

Il problema successivo fu determinare i coefficienti di assorbimento: vennero esaminati per Be e Li da Irène Curie, per il B da Frédéric Joliot e da Webster per Be e B [1].

Da questo primo passo fu possibile proseguire su due differenti linee di ricerca: cercando di spiegare l'assorbimento di una particella  $\alpha$  da parte di un nucleo di berillio e della successiva emissione di un fotone di energia così elevata, oppure usando la sorgente Po-Be per studiare l'interazione radiazione-materia ad energia intermedia tra quella dei raggi  $\gamma$  ordinari e quella dei raggi cosmici [16].

Il primo approccio fu indagato al laboratorio di Cavendish, a Cambridge, da Henry Webster<sup>1</sup>, con un interesse per il boro ( $B$ ) e il berillio ( $Be$ ), quest'ultimo si pensò poter

---

<sup>1</sup>ricercatore in fisica nucleare australiano.

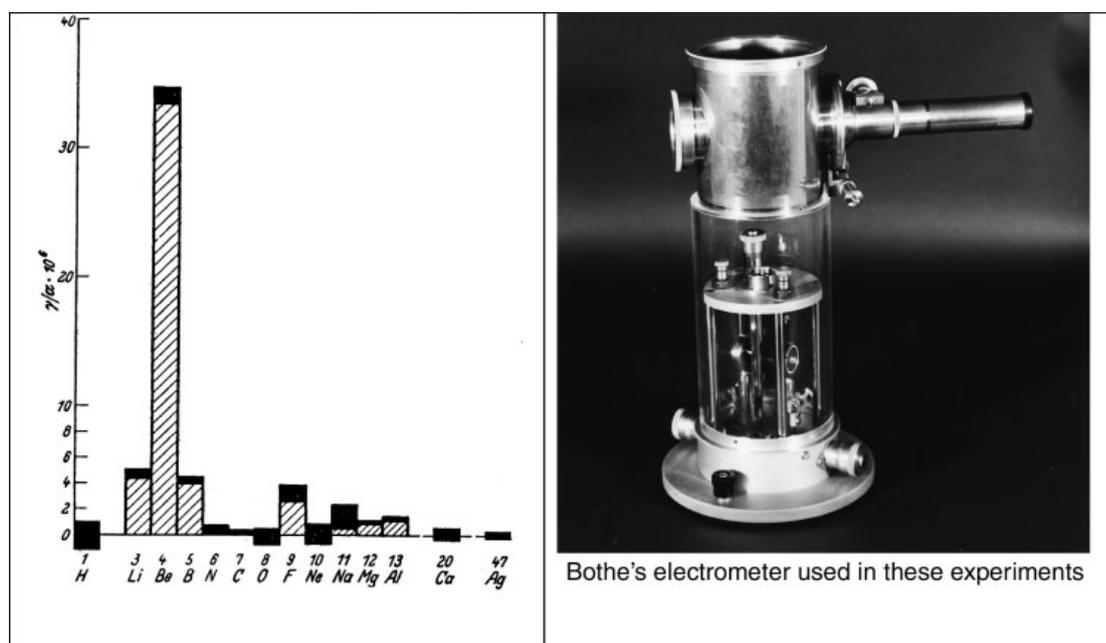


Figura 2.3: A sinistra il grafico del range di elementi esaminati sotto il bombardamento delle particelle  $\alpha$  che mostra la quantità di particelle emesse. A destra l'elettrometro usato da Bothe nel suo esperimento; [7].

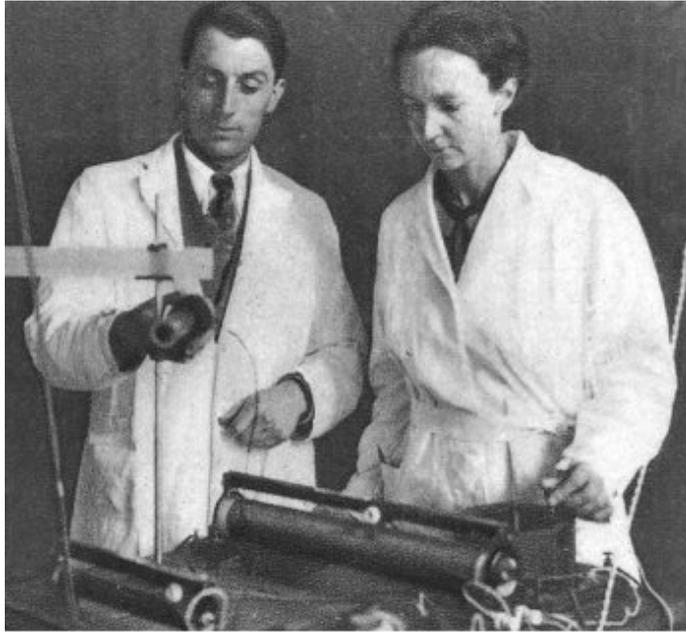
essere composto da due particelle  $\alpha$  e un neutrone [1]. Utilizzò due tipi di rivelatori: il contatore Geiger-Müller e la camera di ionizzazione ad alta pressione (80-95 atm). Trovò, nel caso del berillio (e del boro), che il processo responsabile per l'emissione del fotone ad alte energie dovesse essere la reazione (2.2) [1], ovvero la cattura della particella  $\alpha$  da parte del nucleo di berillio (o del boro) che emetteva un surplus di energia come radiazione [2]. All'inizio del 1932 fece un'altra importante osservazione: vide che la radiazione emessa dal berillio nella stessa direzione delle particelle  $\alpha$  incidenti è molto più penetrante di quella emessa nella direzione opposta. Mise in dubbio che la radiazione Po-Be fosse costituita di raggi  $\gamma$ . Fece nuovi esperimenti con una camera a nebbia, ma senza risultati significativi [16], questo probabilmente dovuto al fatto che non aveva apparati sperimentali adatti [2].

Ricapitolando: nel 1930 Bothe e Becker furono fondamentali per la scoperta della radiazione sconosciuta ed altamente penetrante, per questo ipotizzata neutra, chiamata "seconda radiazione", che differiva dalla prima per la mancanza dell'espulsione di protoni. Venne, quindi, associata alla radiazione  $\gamma$  che sembrava l'unica entità conosciuta che potesse corrispondere alle caratteristiche citate. Il meccanismo che presero in considerazione fu l'assorbimento della particella  $\alpha$  da parte dei nuclei bersaglio, che formava, così, nuovi nuclei. Cominciarono per questo a misurare i coefficienti di assorbimento. Que-

sta ricerca aprì la questione sulla spiegazione del fenomeno dell'assorbimento, che venne portata avanti al Cavendish Laboratory, inizialmente da Webster. Egli, convinto dalle esperienze che il processo fosse proprio quello dell'assorbimento, che generava un surplus di energia emesso come radiazione, nel 1932 fece un'importante osservazione: essa era più potente nella direzione collineare con l'urto, mentre più piccola in quella opposta. Misner, quindi, in dubbio che la radiazione fosse composta da fotoni, ma non riuscì a dare una risposta alla questione, che rimase aperta.

## 2.2 Esperimento di Curie e Joliot

### Breve biografia dei coniugi I. Curie e F. Joliot



Coniugi Irène Curie (1897-1956) e Frédéric Joliot (1900-1958) nel loro laboratorio; [14].

*Irène Curie nacque a Parigi e fu la primogenita di Pierre e Marie Curie. Irène Curie lavorò insieme alla madre durante la prima guerra mondiale, prestando servizio presso gli ospedali da campo, assistendola nell'esecuzione di lastre ai raggi X per i feriti di guerra. Riprese i suoi studi all'università di Parigi dopo la guerra e successivamente lavorò all'istituto che i suoi genitori avevano fondato.*

*Fu lì che condusse il suo lavoro insieme a Frédéric Joliot, che sposò nel 1926 [12]. Frédéric Joliot nacque a Parigi nel 1900. Fu uno tra i più noti uomini francesi del suo tempo in tutto il mondo. Si laureò nel 1923 in ingegneria. Fu professore al Collège de France e fu anche molto impegnato in politica. Joliot si unì ad altri pionieri dell'atomo (Einstein, Oppenheimer, Bohr, Sacharov...) che si ponevano domande circa le responsabilità della scienza, e verso la fine della sua vita, fu uno dei promotori dell'Appello di Stoccolma che chiedeva di vietare la bomba atomica. Nel 1944, alla Liberazione, era stato nominato direttore generale del Centre National de la Recherche Scientifique, poi, nel 1946, Alto Commissario per l'energia atomica. Nel dicembre 1948 portò a termine la prima pila atomica francese, ma nel 1950 il governo lo rimosse dall'alto incarico per la posizione assunta nel movimento dei partigiani della Pace (nell'aprile 1949, infatti, ne aveva inaugurato il Congresso mondiale a Parigi) e per il suo dichiarato atteggiamento di amicizia verso l'URSS. Nel novembre 1951 fu eletto presidente del Consiglio mondiale della pace. Morì 14 agosto 1958, a cinquantotto anni [4] [8]. Nel dicembre del 1935 i coniugi ricevettero*

*il Premio Nobel per la Chimica per la scoperta della radioattività artificiale. Entrambi morirono per l'esposizione troppo forte e prolungata ad elementi radioattivi [12].*

Il secondo approccio, ovvero quello che si poneva il problema di studiare l'interazione tra radiazione e materia ad energie intermedie, fu seguito a Parigi da Irène Curie e Frédéric Joliot. Questo fu il successivo contributo verso la scoperta della nuova particella: essi mostrarono che la radiazione misteriosa, se colpiva paraffina o altri composti contenenti idrogeno, provocava l'espulsione di protoni ad alta energia, (Fig. 2.4). Ciò non era del tutto in contrasto con l'ipotesi di radiazione  $\gamma$ , tuttavia un'analisi quantitativa dettagliata rendeva difficile accettare questa ipotesi.

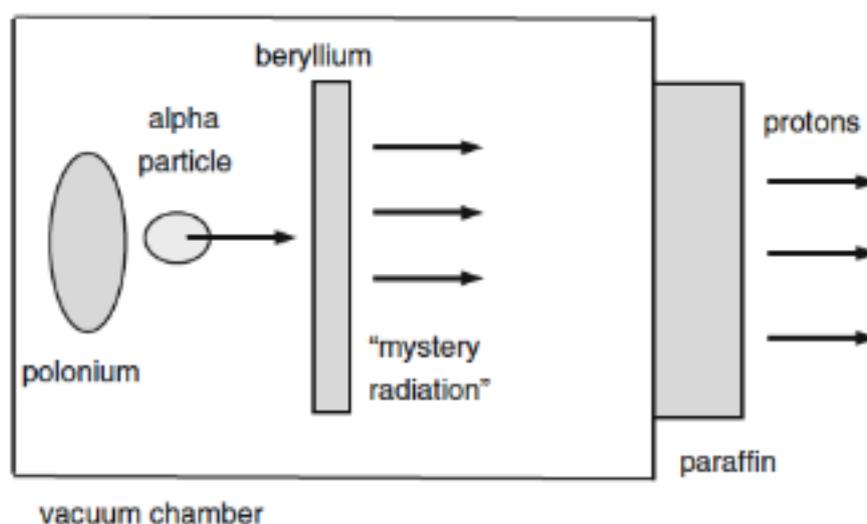


Figura 2.4: Schema dell'esperimento dei Joliot-Curie; [6].

Pensarono che i protoni con una certa alta energia potessero produrre una sorta di trasmutazione, per cercare una risposta, allora, idearono un esperimento in cui posero sottili strati di vari materiali in contatto con la parte alta della camera di ionizzazione, consistente in un foglio di alluminio [1]. Infatti l'energia, quindi la velocità, dei protoni poteva essere dedotta determinando lo spessore di un foglio di metallo posto davanti all'esperimento e quanto veniva penetrato dai protoni prima di fermarsi, oppure misurando quante coppie di ioni si creavano in un contatore di Geiger [5].

Il setup sperimentale usato dai coniugi fu il seguente (Fig. 2.5): usarono particelle  $\alpha$  derivanti dal Po di circa 100 mCi, una camera di ionizzazione come rivelatore, connessa

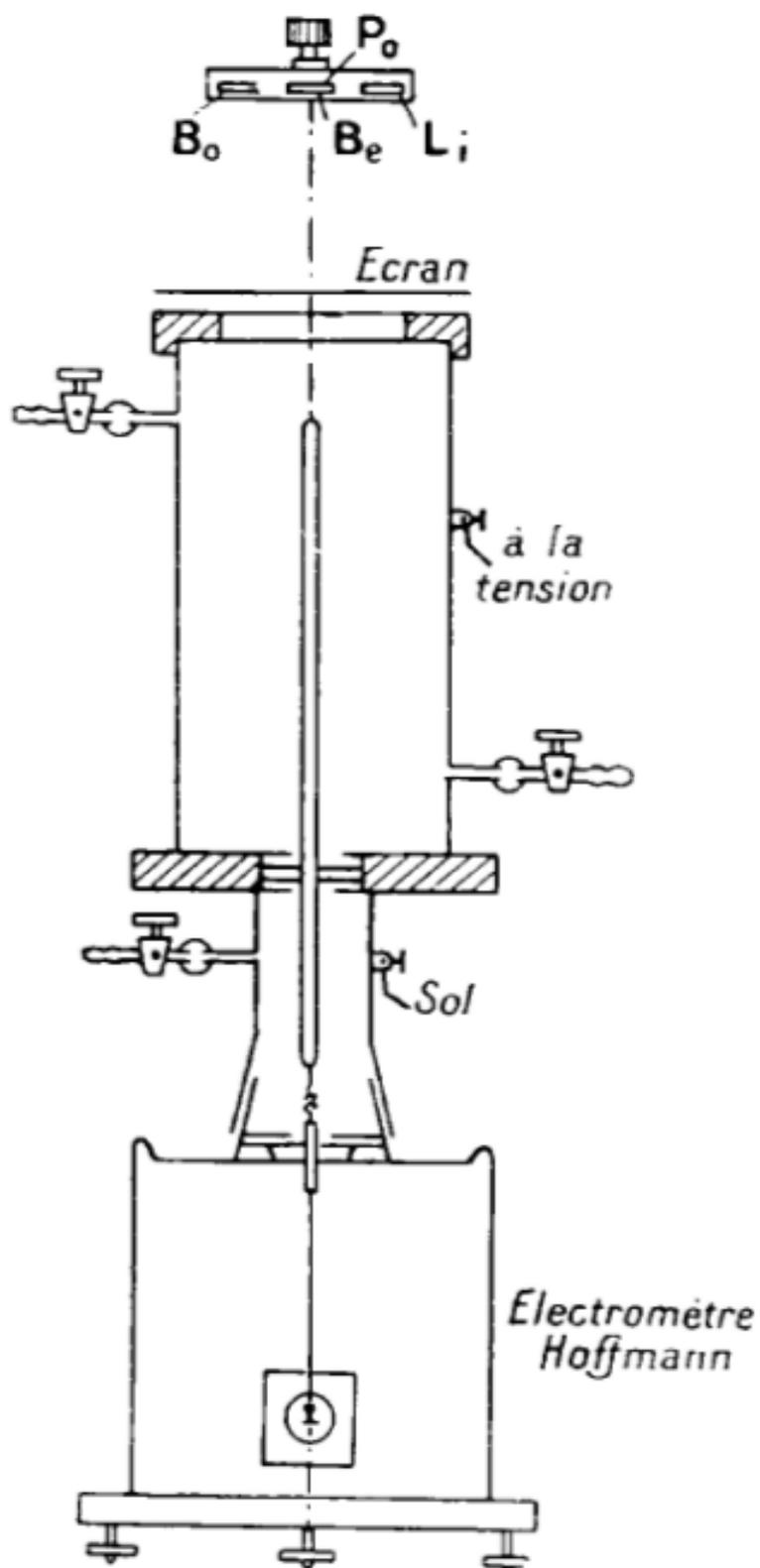


Figura 2.5: Setup dell'esperimento usato da Curie e Joliot nel 1931 per studiare la seconda radiazione scoperta da Bothe e Becker; [1].

ad un elettrometro di Hoffmann calibrato mediante i raggi  $\gamma$  emessi dal torio C' (Polonio). Gli scienziati trovarono così l'energia dei supposti raggi  $\gamma$  emessi:

- 0.6 MeV per il litio,
- 15-20 MeV per il berillio,
- 11 MeV per il boro.

Questi ultimi due risultati erano maggiori rispetto ai valori trovati da Bothe e Becker. Joliot e Curie sostennero allora che il processo responsabile dell'emissione dei fotoni di seconda radiazione non poteva essere uno scattering anelastico a così alte energie, per cui il processo doveva essere il decadimento (2.2) ipotizzato precedentemente. Curie notò che l'energia dei fotoni era in accordo con l'equazione (2.3) conoscendo le masse di He e C [1].

L'11 gennaio del 1932 Perrin presentò l'articolo dei coniugi all'Accademy of Science, (Fig. 2.6), in cui essi riportavano la possibilità che i fotoni ad alte energie potessero forse produrre qualche trasmutazione: infatti videro che con certi materiali (C, Al, Cu, Ag, Pb) non erano visibili cambiamenti, mentre con sostanze idrogenate, come la paraffina, si notava un incremento nella corrente di ionizzazione di un fattore due [1].

Videro che i protoni venivano emessi anche dall'acqua ("L'effet existe pour l'eau" (Fig. 2.7)), utilizzata come sostanza idrogenata nell'esperimento.

Per conoscere la natura di questa "terza radiazione" emessa dalle sostanze idrogenate tentarono inizialmente di defletterla con un campo magnetico, senza ottenere successo. Successivamente misurarono l'assorbimento di essa nell'argento e nell'alluminio e conclusero che questa ulteriore radiazione era un'espulsione di protoni la cui energia, determinata approssimativamente, è di 4.5 MeV per il berillio e di 2 MeV per il boro [1].

Per spiegare la produzione di protoni di rinculo dai raggi  $\gamma$ , osservarono che l'effetto assomigliava all'effetto Compton. Ipotizzando che essi venissero espulsi a causa dei raggi  $\gamma$  sulla paraffina applicarono le relazioni dell'effetto ai protoni per risalire alla energia minima necessaria per produrre protoni di rinculo con 4.5 MeV (o 2 MeV). Si vide (con la sorgente Po-Be) che i raggi di protoni prodotti potevano percorrere dai 26 ai 30 cm nella direzione del fascio incidente, che il percorso misurato a 45 gradi non era maggiore di 19 cm e indietro (a 135 gradi) era nullo. Applicando le leggi di conservazione dell'energia e della quantità di moto trovarono che i fotoni emessi dal Be (e dal B) dovevano aver energia almeno di 50 (e di 35) MeV [1]. Usarono allora come verifica la formula di Klein Nishina sui coefficienti di assorbimento degli elettroni e trovarono  $\sigma_e = 0,144 \times 10^{-25}$ , mentre per la diffusione sui protoni  $\sigma_p = 2,04 \times 10^{-31}$ . Conclusero che l'assorbimento di diffusione su un nucleo di H sarà dunque  $10^5$  volte inferiore che sull'elettrone [1]. Tale calcolo dell'energia minima di circa 50 MeV risultò in contrasto sia con il valore misurato direttamente da Bothe sia con la energia delle  $\alpha$  emesse dal Polonio da cui si origina il tutto (circa 5.25 MeV). Tutto ciò spinse i coniugi Joliot a ipotizzare di avere

*scrittura* Emission de protons de grande vitesse par les substances hydrogénées sous l'influence des rayons  $\gamma$  très pénétrants. Note de Mme Irene CURIE et M.F. JOLIOU présentée par M. Jean PERRIN.

Nous avons montré dans des Notes précédentes (1) que les rayonnements  $\gamma$  excités par les rayons  $\alpha$  du polonium dans le glucinium et dans le Bore ont des coefficients d'absorption massique bien plus faibles que celui des rayons les plus pénétrants des corps radioactifs [ $(\mu/g)_{Pb} = 0,013$  et  $(\mu/g)_{Pb} = 0,02$  respectivement]. Ces nombres correspondent à des énergies quantiques très élevées comprises entre celles des rayons les plus pénétrants des radioéléments et celles des rayons cosmiques ~~litt.~~.

Nous avons étudié ces rayonnements par l'ionisation qu'ils produisent dans une chambre montée sur un électromètre Hoffmann ; les rayons pénètrent dans la chambre à travers une feuille mince d'aluminium. Nous avons ~~observé~~ <sup>constaté</sup> que le courant d'ionisation produit par ces rayons filtrés par 1,5 cm de plomb reste sensiblement le même quand on place contre l'entrée de la chambre des écrans minces de substances très diverses (C, Al, Cu, Ag, Pb). Au contraire, le courant augmente notablement quand on interpose des écrans de substances contenant de l'hydrogène comme la paraffine, l'eau, la cellophane. L'effet le plus intense a été observé avec la paraffine ; le courant varie presque du simple au double dans ce cas. En plaçant des écrans minces d'aluminium entre la paraffine et la chambre, nous avons ~~observé~~ <sup>constaté</sup>

(1) Irene Curie, C.R. 193 (1931), 1412  
M.F. Joliot, C.R. 193 (1931), 1415.

que l'accroissement du courant était dû à un rayonnement complet et qu'il n'y avait pas de rayonnement  $\beta$ .

Figura 2.6: Prima pagina del manoscritto dai coniugi Joliot-Curie nel febbraio 1932, Comptes Rendus de l'Académie des Sciences.

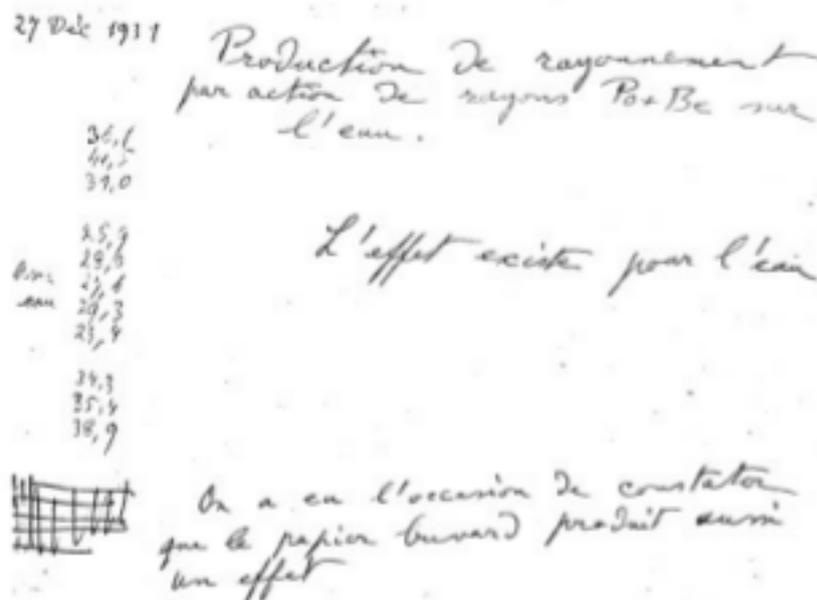


Figura 2.7: Manoscritto dei coniugi in cui documentano i risultati per l'acqua, usata come sostanza idrogenata nell'esperimento; [7].

scoperto una nuova forma di interazione tra la radiazione e la materia diversa dall'effetto Compton. Infatti pensavano di aver trovato una radiazione in grado di espellere protoni dalla paraffina, ma che energeticamente non tornava con l'effetto supposto: se quella radiazione era costituita da fotoni  $\gamma$ , questi non avrebbero mai avuto l'energia in grado di espellere protoni dalla materia. Con i fotoni sono possibili effetti Compton, ma questo effetto riguarda gli elettroni, un protone è circa 2000 volte più pesante per cui l'energia dei raggi  $\gamma$  e la sezione d'urto sono totalmente inefficaci [14]. Perciò assunsero che gli effetti osservati fossero dovuti ad un'interazione tra raggi  $\gamma$  e protoni, diversamente dall'effetto Compton [1].

Ricapitolando: i due coniugi mostrarono che questa nuova radiazione, che loro supposero essere di fotoni, se colpisce sostanze idrogenate causa l'espulsione di protoni ad alte energie. Questi protoni vennero chiamati "terza radiazione". Grazie a questo risultato calcolarono l'energia che dovevano avere i fotoni sui vari elementi per poter causare la radiazione, attraverso l'esperimento con il foglio di alluminio. Trovarono che il processo non poteva essere, definitivamente, uno scattering anelastico, ma proprio un processo di assorbimento della particella  $\alpha$ . Secondo Curie e Joliot doveva avvenire una sorta di trasmutazione con le sostanze idrogenate. Nacque quindi il problema di determinare la natura della terza radiazione: dato che non veniva deflessa, misurarono l'assorbimento

nell'argento e nell'alluminio, videro che l'effetto prodotto assomigliava all'effetto Compton, ma i valori non coincidevano. Così supposero di aver trovato una nuova interazione tra la radiazione e la materia. Quest'ultima questione rimase però insoluta e in dubbio.

## 2.3 Esperimento di Chadwick



Charles Chadwick (1891-1974); [11].

### Breve biografia di C. Chadwick

*James Chadwick nacque a Cheshire, in Inghilterra, il 20 ottobre 1891. Frequentò la Manchester High School, poi nel 1908 la Manchester University; si laureò alla School of Physics di Honors nel 1911 e trascorse i successivi due anni sotto il professor Rutherford nel Laboratorio Fisico di Manchester, dove lavorò su vari problemi di radioattività, acquisendo il suo diploma di laurea magistrale, nel 1913. Quello stesso anno ottenne una borsa di studio per lavorare presso la Physikalisch Technische Reichsanstalt di Charlottenburg sotto il professor H. Geiger, a Berlino.*

*Durante la prima guerra mondiale fu internato e dopo la guerra, nel 1919, ritornò in Inghilterra per riprendere il lavoro con Rutherford, che nel frattempo si era trasferito al Laboratorio Cavendish di Cambridge. Rutherford era riuscito a vedere la disintegrazione degli atomi di azoto bombardati con particelle alfa, con l'emissione di un protone. Chadwick, quindi, si unì nella ricerca per realizzare la trasmutazione di altri elementi leggeri bombardando con particelle alfa e studiando le proprietà e la struttura dei nuclei atomici. Nel 1923 divenne assistente direttore della ricerca nel Laboratorio Cavendish e nel 1927 fu eletto collega della Royal Society. Rimase a Cambridge fino al 1935, quando fu eletto alla Lione Jones Chair of Physics dell'Università di Liverpool. Dal 1943 al 1946 lavorò negli Stati Uniti come Capo della Missione Britannica collegato al Progetto Manhattan per lo sviluppo della bomba atomica. Ritornò in Inghilterra e nel 1948 si ritirò dalla fisica attiva. Dal 1957 al 1962 è stato membro part-time dell'Autorità Atomica del Regno Unito. Nel 1925 sposò Aileen Stewart-Brown di Liverpool. Ebbero due figlie e vissero a Denbigh, nel Galles del Nord [10].*

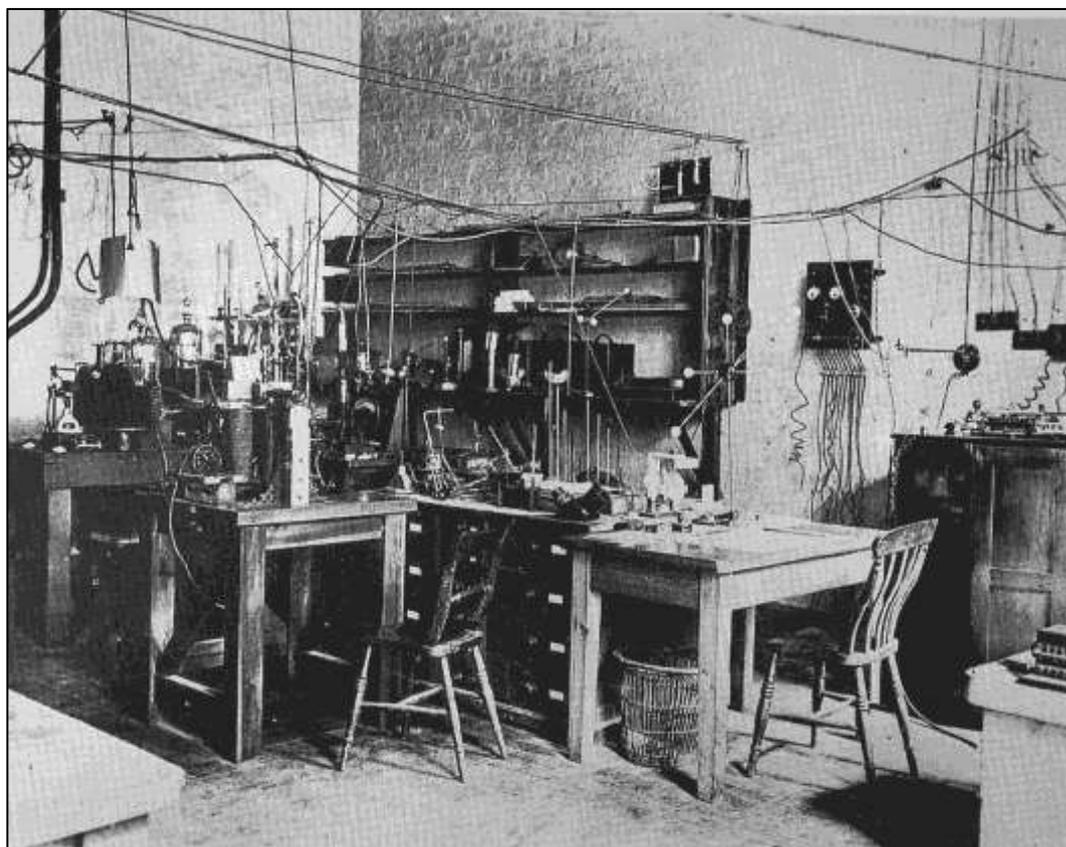


Figura 2.8: laboratorio di Chadwick.

Nel frattempo, a Cambridge, James Chadwick ritenne insostenibile l'interpretazione che la radiazione misteriosa fosse composta da fotoni. Da alcuni anni stava cercando i neutroni e sospettò che in entrambi gli esperimenti precedenti si fosse "inciampati" su di essi. Perciò riprodusse le esperienze e le rianalizzò, estendendo i lavori precedenti [6].

Nel ricreare l'esperimento di Joliot-Curie Chadwick utilizzò come sorgente di particelle  $\alpha$  il polonio depositato su un disco di argento di 1 cm di diametro, messo vicino a un disco di berillio puro di 2 cm di diametro, entrambi chiusi in un piccolo recipiente, che era possibile rimuovere (Fig. 2.5). La prima camera a ionizzazione utilizzata aveva un'apertura di 13 mm coperta da un foglio di alluminio di 4-5 cm di range in aria e 15 mm di spessore. Questa camera dava una media di 7 deflessioni all'ora, avendo un effetto naturale molto basso. Quando il recipiente era posto davanti alla camera di ionizzazione il numero di deflessioni aumentava immediatamente: con una distanza di 3 cm tra il berillio e il contatore, era circa 4 per minuto. Questo numero rimaneva pressoché uguale con fogli di metalli dello stesso spessore, fino a 2 cm di piombo: fu quindi chiaro che la deflessione era dovuta alla radiazione penetrante emessa dal berillio [2]. Quando venne

interposta una lastra di paraffina di circa 2 mm di spessore sul passaggio della radiazione, davanti al contatore, il numero di deflessioni registrate dall'oscilloscopio aumentò marcatamente. Posizionando, quindi, uno schermo assorbente di alluminio tra la paraffina e il contatore si otteneva la curva A in figura 2.9 [2].

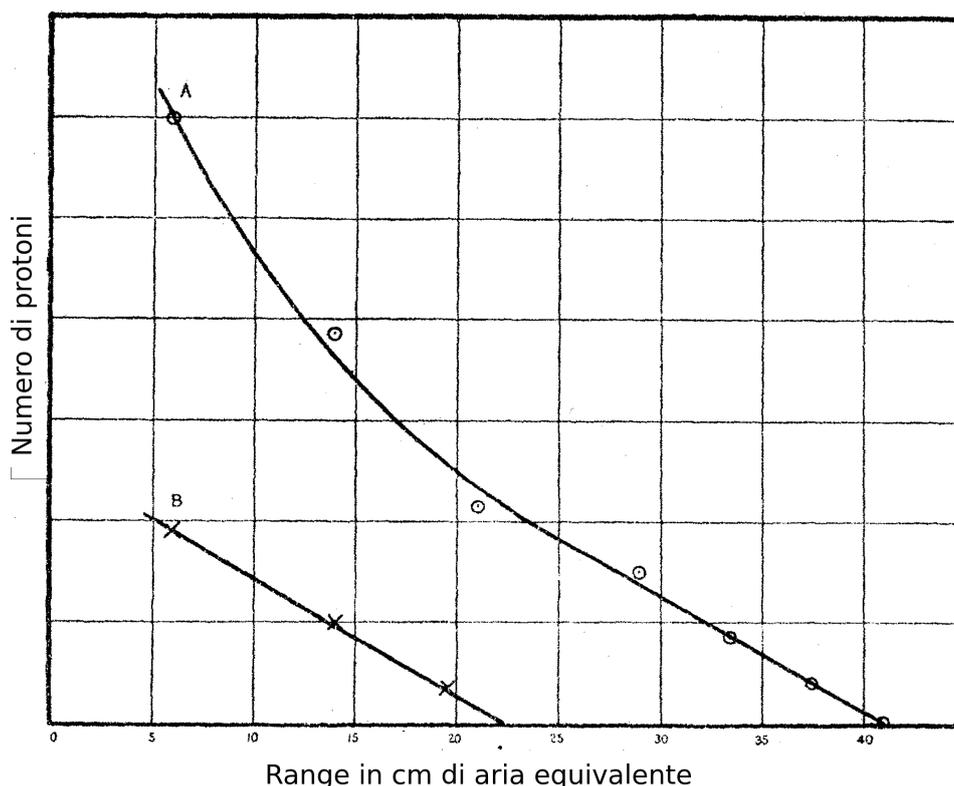


Figura 2.9: Curve di assorbimento nell'esperimento di Chadwick, la curva A rappresenta l'assorbimento nello stesso verso dell'incidenza delle particelle  $\alpha$ , mentre la curva B rappresenta l'assorbimento nel verso opposto; [2, p.700,§3].

Osservando il tipo di deflessione, proporzionale al numero di ioni prodotti nella camera, fu evidente che le particelle dovevano essere protoni. Dalla curva range-velocità dei protoni Chadwick vide che questi ultimi potevano avere fino a un massimo di velocità impartita dal berillio di  $3.3 \times 10^9$  cm/s, corrispondente all'energia di 5.7 MeV [2].

Il polonio decade, come descritto da questa relazione



producendo particelle  $\alpha$  con energia di circa 5.3 MeV, e in questo modo i supposti raggi  $\gamma$  possono avere un massimo di 16 MeV. Un'analisi più dettagliata mostrò che l'energia, con cui poi la radiazione colpisce i protoni nella paraffina, è di circa 14.6

MeV (calcoli in Appendice A). Il problema era che i protoni accelerati con il valore di energia cinetica calcolato da Chadwick, per la conservazione dell'energia e della quantità di moto, avrebbero richiesto 54 MeV di energia dei raggi  $\gamma$ , che invece è circa quattro volte più grande dell'energia che effettivamente hanno. Questa richiesta di un'energia sorprendentemente alta è la conseguenza del fatto che i fotoni non possiedano massa: la relatività mostra che le particelle senza massa hanno una quantità di moto inferiore rispetto a quella delle particelle materiali con stessa energia cinetica; solamente un raggio  $\gamma$  estremamente energetico può far rinculare un protone con energia cinetica di molti MeV [6].

I risultati di un'analisi della collisione tra un fotone e una particella materiale, tenendo conto della conservazione dell'energia-massa relativistica e della quantità di moto, mostrano che se i nuclei bersaglio hanno  $E_t$  come energia a riposo e sono accelerati da un'energia cinetica  $K_t$  per la quale colpiscono frontalmente un fotone di energia  $E_\gamma$  che rincula all'indietro, allora l'energia del fotone deve essere:

$$E_\gamma = \frac{1}{2}[K_t + \sqrt{2E_t K_t}] \quad (2.5)$$

Per un protone  $E_t$  è di circa 938 MeV, e con  $K_t$  di circa 5.7 MeV il valore di  $E_\gamma$  risulta di 54 MeV, come era richiesto [6]. Per le leggi di conservazione dell'energia e della quantità di moto applicate al processo di collisione tra una particella  $\alpha$  e un nucleo di berillio e la successiva emissione di un fotone dal residuo del nucleo  ${}^9_4\text{Be}$ , Chadwick derivò, conoscendo le masse degli elementi dell'equazione (2.3), un limite superiore di 14 MeV, il quale era incompatibile con il valore di 54 MeV dedotto dall'osservazione dell'energia del protone espulso [1].

Un altro indizio contro l'interpretazione con i fotoni fu che la radiazione del berillio era molto più intensa nella direzione concorde con le particelle  $\alpha$  rispetto a quella opposta, curva B in figura 2.9 (come già era stato osservato da Webster): se la radiazione fosse stata composta da fotoni avrebbe dovuto essere uguale in tutte le direzioni [6].

Chadwick tentò comunque un'altra esperienza (Fig. 2.10), che ideò per indagare un'ultima volta la remota possibilità che fossero davvero creati dei fotoni: utilizzò una camera a ionizzazione connessa ad un amplificatore lineare, in modo che si potesse misurare la ionizzazione prodotta da una singola particella pesante ionizzata [1]. Aggiunse un campione di gas di azoto, perché un nucleo di tale elemento se colpito da un fotone acquisisce un'energia cinetica di circa 450 keV. Dalla prima esperienza notò che una particella energetica che attraversava l'aria produceva coppie di ioni, e con una tale energia calcolò che dovevano crearsi circa 13000 coppie. Dopo aver eseguito l'esperienza, però, trovò che tipicamente si producevano 30000-40000 coppie di ioni, che necessitavano di un'energia cinetica maggiore di quella supposta, ovvero tra i 1.1 e 1.4 MeV. Questo valore derivava da raggi  $\gamma$  a ben più alta energia: circa 90 MeV, valore completamente inconsistente con i 54 MeV calcolati [6]. L'energia cinetica, quindi, trasferita agli atomi di azoto non corrispondeva alla stessa energia della prima radiazione se essa fosse stata

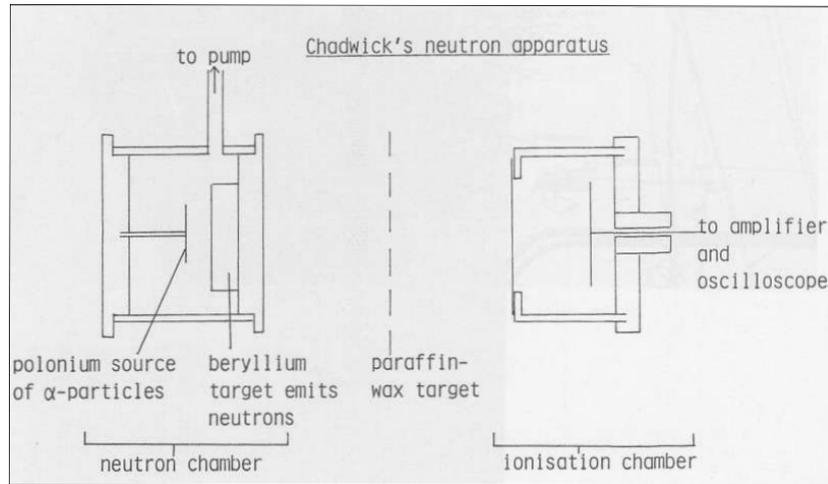


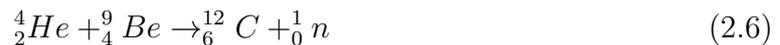
Figura 2.10: A sinistra la sorgente dei neutroni, a destra la camera di ionizzazione connessa con l'amplificatore lineare usato da Chadwick per l'osservazione della proiezione di singoli atomi di elementi leggeri da parte della radiazione secondaria scoperta da Bothe e Becker.

composta di fotoni [1]. Fu evidente che l'energia di 54 MeV era sufficiente per spiegare le collisioni con atomi di idrogeno, mentre in generale si deve assumere più grande l'energia per collisioni con atomi di massa maggiore [2].

Disse, allora, che o bisognava rinunciare alla conservazione dell'energia e della quantità di moto oppure adottare un'altra ipotesi sulla natura della radiazione [2, p.697,§3]:

*“It is evident that we must either relinquish the application of the conservation of energy and momentum in these collisions or adopt another hypothesis about the nature of the radiation.”*<sup>2</sup>

Il 27 febbraio del 1932, data fondamentale per la nuova particella, spedì la lettera all'editore di Nature in cui ipotizzava l'esistenza del neutrone (Fig. 2.12): si ritiene essere il suo certificato di nascita. Infatti suppose esistesse una particella materiale neutra di massa molto vicina a quella del protone e prese in considerazione urti elastici tra particelle con stesso ordine di grandezza di energia e massa, facendo quindi collisioni classiche frontali tra particelle. Ipotizzò che la relazione non fosse quella di Joliot-Curie (2.3) ma



dove n è il simbolo della nuova particella, con carica neutra (<sub>0</sub>) ma contando come un nucleone <sup>(1)</sup>. Nella sua interpretazione considerò che fosse prodotto <sup>12</sup>C e non <sup>13</sup>C.

<sup>2</sup>In queste collisioni è evidente che dobbiamo rinunciare all'applicazione della conservazione dell'energia e della quantità di moto oppure adottare un'altra ipotesi sulla natura della radiazione.

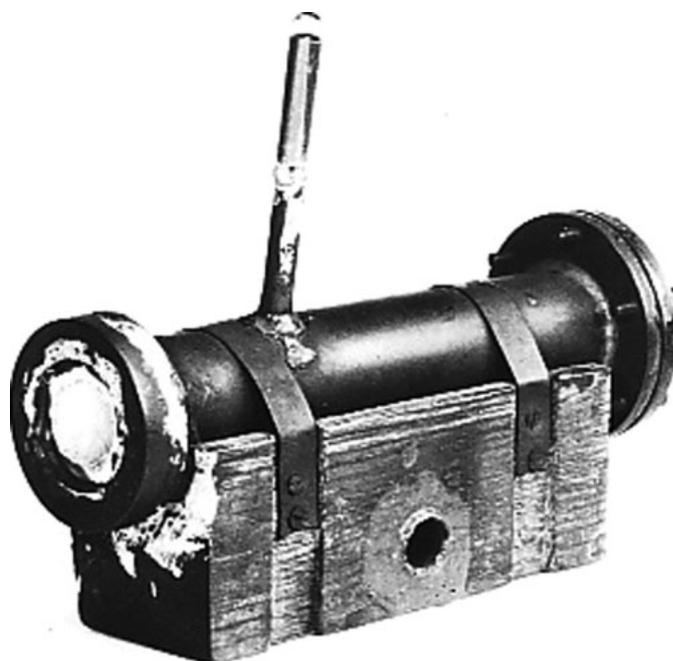


Figura 2.11: Camera di ionizzazione usata da Chadwick per investigare la natura della radiazione composta da protoni, [7].

Questa relazione mostra un processo diverso che è definito  $(\alpha, n)$ . Pensava che questa nuova particella fosse la combinazione di un elettrone con un protone, come un dipolo, e stimò la sua massa tra 1.005 e 1.008 unità di masse atomiche (oggi sappiamo che è 1.00866 uma). Mostrò che l'energia cinetica con cui veniva espulso era di circa 10.9 MeV, valore sufficientemente elevato per poter accelerare un protone di 5.7 MeV, anche dopo che il neutrone avesse sbattuto contro il bersaglio di berillio e contro i nuclei di paraffina, essendo passato attraverso la finestra del recipiente di metallo. Per confermare le sue ipotesi Chadwick calcolò l'energia cinetica che deve aver un neutrone, con 5.7 MeV che colpisce un nucleo di azoto, per far sì che quest'ultimo si muova ed era intorno ai 1.4 MeV, precisamente il valore misurato nell'esperimento delle coppie di ioni [6] (calcoli in Appendice B).

[2, p. 708, §General Remarks]:

*“The properties of penetrating radiation emitted from beryllium (and boron) when bombarded by the  $\alpha$ -particles of polonium have been examined. It is concluded that the radiation consists, not of quanta as hitherto supposed, but of neutrons, particles of mass 1, and charge 0. Evidence is given to show that the mass of the neutron is probably between 1.005 and 1.008. This suggests that the neutron consist of a proton and an elecrtion in close combination, the binding energy being about  $1$  to  $2 \times 10^6$  electron volts. From*

## Letters to the Editor

[The Editor does not hold himself responsible for opinions expressed by his correspondents. Neither can he undertake to return, nor to correspond with the writers of, rejected manuscripts intended for this or any other part of NATURE. No notice is taken of anonymous communications.]

## Possible Existence of a Neutron

It has been shown by Bothe and others that beryllium when bombarded by  $\alpha$ -particles of polonium emits a radiation of great penetrating power, which has an absorption coefficient in lead of about  $0.3 \text{ (cm.)}^{-1}$ . Recently Mme. Curie-Joliot and M. Joliot found, when measuring the ionisation produced by this beryllium radiation in a vessel with a thin window, that the ionisation increased when matter containing hydrogen was placed in front of the window. The effect appeared to be due to the ejection of protons with velocities up to a maximum of nearly  $3 \times 10^9 \text{ cm. per sec.}$  They suggested that the transference of energy to the proton was by a process similar to the Compton effect, and estimated that the beryllium radiation had a quantum energy of  $50 \times 10^6 \text{ electron volts.}$

I have made some experiments using the valve counter to examine the properties of this radiation excited in beryllium. The valve counter consists of a small ionisation chamber connected to an amplifier, and the sudden production of ions by the entry of a particle, such as a proton or  $\alpha$ -particle, is recorded by the deflexion of an oscillograph. These experiments have shown that the radiation ejects particles from hydrogen, helium, lithium, beryllium, carbon, air, and argon. The particles ejected from hydrogen behave, as regards range and ionising power, like protons with speeds up to about  $3.2 \times 10^9 \text{ cm. per sec.}$  The particles from the other elements have a large ionising power, and appear to be in each case recoil atoms of the elements.

If we ascribe the ejection of the proton to a Compton recoil from a quantum of  $52 \times 10^6 \text{ electron volts,}$  then the nitrogen recoil atom arising by a similar process should have an energy not greater than about 400,000 volts, should produce not more than about 10,000 ions, and have a range in air at N.T.P. of about 1.3 mm. Actually, some of the recoil atoms in nitrogen produce at least 30,000 ions. In collaboration with Dr. Feather, I have observed the recoil atoms in an expansion chamber, and their range, estimated visually, was sometimes as much as 3 mm. at N.T.P.

These results, and others I have obtained in the course of the work, are very difficult to explain on the assumption that the radiation from beryllium is a quantum radiation, if energy and momentum are to be conserved in the collisions. The difficulties disappear, however, if it be assumed that the radiation consists of particles of mass 1 and charge 0, or neutrons. The capture of the  $\alpha$ -particle by the  $\text{Be}^9$  nucleus may be supposed to result in the formation of a  $\text{C}^{13}$  nucleus and the emission of the neutron. From the energy relations of this process the velocity of the neutron emitted in the forward direction may well be about  $3 \times 10^9 \text{ cm. per sec.}$  The collisions of this neutron with the atoms through which it passes give rise to the recoil atoms, and the observed energies of the recoil atoms are in fair agreement with this view. Moreover, I have observed that the protons ejected from hydrogen by the radiation emitted in the opposite direction to that of the exciting  $\alpha$ -particle appear to have a much smaller range than those ejected by the forward radiation.

No. 3252, Vol. 129]

This again receives a simple explanation on the neutron hypothesis.

If it be supposed that the radiation consists of quanta, then the capture of the  $\alpha$ -particle by the  $\text{Be}^9$  nucleus will form a  $\text{C}^{13}$  nucleus. The mass defect of  $\text{C}^{13}$  is known with sufficient accuracy to show that the energy of the quantum emitted in this process cannot be greater than about  $14 \times 10^6 \text{ volts.}$  It is difficult to make such a quantum responsible for the effects observed.

It is to be expected that many of the effects of a neutron in passing through matter should resemble those of a quantum of high energy, and it is not easy to reach the final decision between the two hypotheses. Up to the present, all the evidence is in favour of the neutron, while the quantum hypothesis can only be upheld if the conservation of energy and momentum be relinquished at some point.

J. CHADWICK.

Cavendish Laboratory,  
Cambridge, Feb. 17.

## The Oldoway Human Skeleton

A LETTER appeared in NATURE of Oct. 24, 1931, signed by Messrs. Leakey, Hopwood, and Reek, in which, among other conclusions, it is stated that "there is no possible doubt that the human skeleton came from Bed No. 2 and not from Bed No. 4". This must be taken to mean that the skeleton is to be considered as a natural deposit in Bed No. 2, which is overlaid by the later beds Nos. 3 and 4, and that all consideration of human interment is ruled out.

If this be true, it is a most unusual occurrence. The skeleton, which is of modern type, with filed teeth, was found completely articulated down even to the phalanges, and in a position of extraordinary contraction. Complete mammalian skeletons of any age are, as field palaeontologists know, of great rarity. When they occur, their perfection can usually be explained as the result of sudden death and immediate covering by volcanic dust. Many of the more or less perfect skeletons which may be seen in museums have been rearticulated from bones found somewhat scattered as the result of death from floods, or in the neighbourhood of drying water-holes. We know of no case of a perfect articulated skeleton being found in company with such broken and scattered remains as appear to be abundant at Oldoway. Either the skeletons are all complete, as in the *Stenomylus* quarry at Sioux City, Nebraska, or are all scattered and broken in various degrees, as in ordinary bone beds. The probability, therefore, that the Oldoway skeleton represents an artificial burial is thus one that will occur to palaeontologists.

The skeleton was exhumed in 1913, and published photographs show that the excavation made for its disinterment was extensive. It is, therefore, very difficult to believe that in 1931 there can be reliable evidence left at the site as to the conditions under which it was deposited. If naturally deposited in Bed No. 2, the skeleton is of the highest possible importance, because it would be of pre-Mousterian age, and would be in the company of *Pithecanthropus* and the Piltown, Heidelberg, and Peking men, all of whose remains are fragmentary to the last degree. Of the few other human remains for which such antiquity is claimed, the Galley Hill skeleton and the Ipswich skeleton are, or apparently were, complete. The first of these was never seen *in situ* by any trained observer, and the latter has, we believe, been withdrawn by its discoverer. The other fragments, found long ago, are entirely without satisfactory evidence as to their mode of occurrence.

Figura 2.12: Lettera all'Editore di Nature da parte di Chadwick, che annunciava la scoperta del neutrone, 27 febbraio 1932; [1].

*experiments on the passage of the neutrons through matter the frequency of their collisions with electrons is discussed.”*<sup>3</sup>

Chadwick provò che la seconda radiazione può produrre il rinculo non solamente di sostanze idrogenate, ma anche di nuclei di altre sostanze (He, Li, Be, Ar, aria), semplicemente non era stato possibile vederlo, perché il range era troppo corto e rimaneva all'interno della camera di ionizzazione [2, pp. 695-696, §2].

Il 10 maggio di quello stesso anno, tre mesi dopo la lettera all'editore di Nature, l'esperimento venne pubblicato sul Proceedings of the Royal Society of London, (Fig. 2.13).

Chadwick si chiese, inoltre, se altri elementi emettessero neutroni, se bombardati da particelle  $\alpha$  e trovò, grazie ad ulteriori esperienze, che non c'erano altri casi comparabili al berillio e al boro. Alcuni effetti molto piccoli furono ottenuti con il fluoro e il magnesio. Sebbene non ci fossero molte prove, suppose che il neutrone fosse un comune costituente del nucleo, insieme al protone e alle particelle  $\alpha$ , e che quindi non fosse presente l'elettrone non combinato. Il vantaggio era che l'elettrone combinato con il protone perdeva le proprietà di spin e di momento magnetico all'interno del nucleo, e se ne poteva quindi calcolare la binding energy come differenza tra difetto di massa e la somma delle masse dei costituenti. Chadwick non era però certo che le particelle  $\alpha$  e i neutroni fossero le uniche particelle complesse all'interno del nucleo. Questo fatto venne ripreso da Feather in ulteriori esperimenti [2]. Un'importante ipotesi di Chadwick, che però in quel momento non prese realmente in considerazione fu [2, p.706, §General Remarks]:

“It is possible to suppose that the neutron may be an elementary particle.”<sup>4</sup>

Questa nuova particella è importante perché, essendo neutra, non subisce modificazioni da parte delle forze elettriche, e quindi non sente nemmeno l'effetto della barriera di Coulomb. Per questa scoperta nel 1935 fu assegnato a Chadwick il Premio Nobel per la fisica [6].

Ricapitolando: Chadwick non si convinse che la seconda radiazione potesse essere composta da fotoni, per cui ripercorse le esperienze precedenti cercando di evidenziare gli errori di questa ipotesi. Vide, attraverso la sua deflessione, che la terza radiazione

---

<sup>3</sup>Sono state esaminate le proprietà della radiazione penetrante emessa dal berillio (e dal boro) quando è bombardato dalle particelle  $\alpha$  di polonio. Si è concluso che la radiazione consiste, non in una radiazione gamma come si era supposto finora, ma di neutroni, particelle di massa 1, e carica 0. Si sono fornite prove che la massa sia tra 1.005 e 1.008. Questo suggerisce che il neutrone consista di un protone e un elettrone in stretta combinazione, l'energia di legame è di circa da 1 a  $2 \times 10^6$  eV. Da esperimenti sul passaggio dei neutroni attraverso la materia, viene discussa la frequenza delle loro collisioni con gli elettroni.

<sup>4</sup>È possibile supporre che il neutrone possa essere una particella elementare.

692

*The Existence of a Neutron.*

By J. CHADWICK, F.R.S.

(Received May 10, 1932.)

§ 1. It was shown by Bothe and Becker\* that some light elements when bombarded by  $\alpha$ -particles of polonium emit radiations which appear to be of the  $\gamma$ -ray type. The element beryllium gave a particularly marked effect of this kind, and later observations by Bothe, by Mme. Curie-Joliot† and by Webster‡ showed that the radiation excited in beryllium possessed a penetrating power distinctly greater than that of any  $\gamma$ -radiation yet found from the radioactive elements. In Webster's experiments the intensity of the radiation was measured both by means of the Geiger-Müller tube counter and in a high pressure ionisation chamber. He found that the beryllium radiation had an absorption coefficient in lead of about  $0.22 \text{ cm.}^{-1}$  as measured under his experimental conditions. Making the necessary corrections for these conditions, and using the results of Gray and Tarrant to estimate the relative contributions of scattering, photoelectric absorption, and nuclear absorption in the absorption of such penetrating radiation, Webster concluded that the radiation had a quantum energy of about  $7 \times 10^6$  electron volts. Similarly he found that the radiation from boron bombarded by  $\alpha$ -particles of polonium consisted in part of a radiation rather more penetrating than that from beryllium, and he estimated the quantum energy of this component as about  $10 \times 10^6$  electron volts. These conclusions agree quite well with the supposition that the radiations arise by the capture of the  $\alpha$ -particle into the beryllium (or boron) nucleus and the emission of the surplus energy as a quantum of radiation.

The radiations showed, however, certain peculiarities, and at my request the beryllium radiation was passed into an expansion chamber and several photographs were taken. No unexpected phenomena were observed though, as will be seen later, similar experiments have now revealed some rather striking events. The failure of these early experiments was partly due to the weakness of the available source of polonium, and partly to the experimental arrangement, which, as it now appears, was not very suitable.

\* 'Z. Physik,' vol. 66, p. 289 (1930).

† I. Curie, 'C. R. Acad. Sci. Paris,' vol. 193, p. 1412 (1931).

‡ 'Proc. Roy. Soc.,' A, vol. 136, p. 428 (1932).

Figura 2.13: Prima pagina dell'articolo pubblicato il 10 maggio del 1932 su Proceedings of the Royal Society of London; [2].

era effettivamente composta da protoni. Grazie ad essi poté determinare l'energia dei presunti fotoni, che avrebbero causato l'emissione dei protoni dalle sostanze idrogenate. I valori calcolati non coincisero con quelli attesi. Tentò un'altra esperienza in cui ancora non trovò corrispondenze. Suppose, allora, che, mantenendo la conservazione dell'energia e della quantità di moto, dovesse esistere una nuova particella neutra. Chadwick ipotizzò che fosse la combinazione stretta tra un protone e un elettrone e che si trovasse anche all'interno del nucleo, come costituente fondamentale. L'elettrone combinato perdeva le proprietà di spin e di momento magnetico, risolvendo così il problema dell'esistenza di cariche positive e negative all'interno del nucleo.

## 2.4 Ulteriori esperimenti

Ci si chiese se l'interpretazione originale fosse completamente sbagliata e quindi la radiazione misteriosa e penetrante fosse solamente composta da neutroni, oppure se ci fosse una componente di raggi  $\gamma$  ad energia elevata. La risposta venne data da Franco Rasetti<sup>5</sup>, successivamente al primo breve articolo di Chadwick. Osservò, infatti, con una camera di ionizzazione da una sorgente di neutroni Po-Be che rinculavano pochi protoni e nuclei di elio ( ${}^4_2\text{He}$ ). I protoni venivano proiettati dallo strato di paraffina posto intorno alla sorgente di neutroni al centro della camera di ionizzazione, mentre gli atomi di elio che rinculavano erano prodotti nel gas introdotto al posto dell'aria nella camera stessa. Per poter rivelare se la radiazione penetrante includesse raggi gamma oltre i neutroni, Rasetti utilizzò due contatori Geiger in caso di rivelazione di elettroni veloci prodotti dall'effetto Compton nella parte frontale della parete del primo contatore. Posizionando uno strato di alluminio assorbente tra i due contatori, Rasetti misurò il range degli elettroni di Compton rivelando la presenza di raggi  $\gamma$  ad energie fino a 10 MeV [1], (Fig. 2.14).

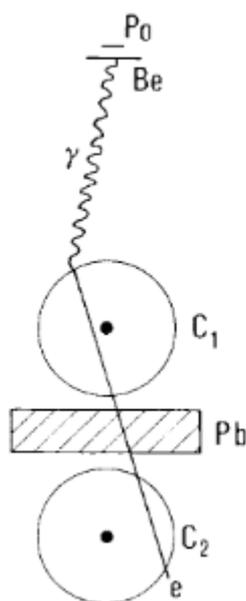


Figura 2.14: Schema dell'esperimento di Rasetti per misurare la penetrazione degli elettroni con effetto Compton prodotti dai fotoni emessi dagli elementi leggeri bombardati con le particelle  $\alpha$ ; [1].

Risultati simili furono ottenuti da Bothe e Becker che nello stesso tempo stavano utilizzando la medesima tecnica all'università di Giessen [1].

<sup>5</sup>fisico, paleontologo e botanico italiano (1901-2001) [26].

Un ulteriore esperimento fu quello di Norman Feather<sup>6</sup>, in cui prese in considerazione la collisione di neutroni con nuclei di azoto portati fuori da una camera ad espansione riempita di azoto. In un articolo, pubblicato nel Proceedings Royal Society, (Fig. 2.15), scrisse che le tracce dei nuclei che ricolavano avevano una lunghezza al massimo di 3.5 mm, in condizioni standard, ed erano ottenute con una frequenza considerevole, quasi quanto quella di un nuovo fenomeno osservato, ovvero coppie di tracce con origine comune. Quest'ultima evidenza fu presa come prova della disintegrazione del nucleo di azoto per mezzo della radiazione incidente, un'ulteriore dimostrazione dell'ipotesi della particolare natura del neutrone [1].

L'esperimento era composto da una camera ad espansione automatica e più grande delle precedenti, riempita con azoto (96% + 4% di ossigeno) con una sorgente di neutroni Po-Be posta in un contenitore cilindrico al centro della stanza. In 1460 coppie di fotografie stereoscopiche Feather trovò più di cento tracce di rinculo, circa trenta tracce di coppie di disintegrazione e cinquanta tracce di particelle, probabilmente protoni, proiettati dalla superficie del contenitore della sorgente.

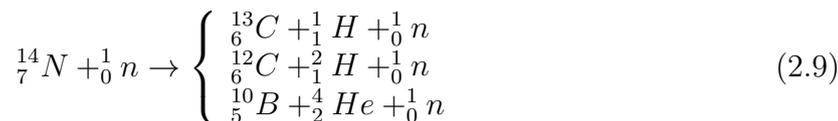
Una delle due tracce in coppia, di solito più corta, era dovuta al nucleo rimanente mentre l'altra alla particella carica emessa nella reazione. Su 32 misure, in 12 casi entrambi i nuovi nuclei e la particella dovuta alla disintegrazione erano completamente assorbite dalla camera, nei 20 rimanenti era invece possibile fissare un limite inferiore della lunghezza delle tracce e meno della metà delle prove in cui era visibile la biforcazione conteneva una possibile direzione dell'incidenza della radiazione primaria. Questa condizione di complanarità doveva essere necessariamente soddisfatta nel caso in cui la disintegrazione prendesse il posto della cattura della particella incidente. Nei pochi casi complanari la particella emessa era una particella  $\alpha$  e la reazione associata era:



che è la reazione inversa ( $\alpha, n$ ) a quella in cui i neutroni sono prodotti dal bombardamento delle particelle. Un caso complanare apparve in miglior accordo con un processo (n,p):



Feather suggerì che la deviazione dalla complanarità osservata potesse essere dovuta alla presenza nello stato finale anche di un neutrone e propose per questa interpretazione i seguenti processi di non-cattura:



Questo suggerimento diede origine ad una discussione sulla complanarità delle biforcazioni osservate, ovvero se fossero prodotte oltre alle reazioni a due corpi anche quelle a

---

<sup>6</sup>fisico nucleare inglese (1904-1978) [21].

*The Collisions of Neutrons with Nitrogen Nuclei.*

By N. FEATHER, Ph.D., Fellow of Trinity College, Cambridge.

(Communicated by J. Chadwick, F.R.S.—Received May 10, 1932.)

[PLATES 15 AND 16.]

*Introduction.*

Elsewhere in these 'Proceedings'\* experiments are described in which the radiations excited in certain light elements under  $\alpha$ -particle bombardment are examined in great detail by means of the valve counter. On the basis of such experiments in the case of beryllium Chadwick† was first led to suggest that the radiation, previously believed to be of the  $\gamma$ -ray type, in fact consisted of particles of zero resultant charge and unit mass. In the present paper a study of this radiation is described, in which the expansion chamber is employed.

Initially visual observations were made with a Shimizu chamber and the production in air of recoil atoms demonstrated.† A more detailed investigation has now been completed in which the usual photographic methods‡ have been employed. Curie and Joliot§ likewise used an expansion chamber in preliminary experiments to establish the ejection of protons from paraffin under the influence of the radiation from beryllium, and later published photographs|| of recoil tracks both of protons and helium nuclei. Similar photographs were published by Rasetti,¶ whilst Auger\*\* has also given examples of the tracks of protons produced in this way. Kirsch and Rieder†† have made more extensive experiments, using visual methods throughout. In certain cases electron tracks also were reported. This aspect of the problem is dealt with by Dee‡‡ in the paper next after this.

\* Chadwick, 'Proc. Roy. Soc.,' A, vol. 136, p. 692 (1932).

† 'Nature,' vol. 129, p. 312 (1932).

‡ Photographs were taken with a source of polonium and beryllium in the centre of an expansion chamber by Holoubek in 1927 ('Z. Physik,' vol. 42, p. 704 (1927)) and, with a different arrangement employing smaller solid angles, by Champion in 1931 (see Webster, 'Proc. Roy. Soc.,' A, vol. 136, p. 428 (1932)), but as far as is known no recoil track was observed in either case to originate in the gas.

§ 'C. R. Acad. Sci. Paris,' vol. 194, p. 708 (1932).

|| 'C. R. Acad. Sci. Paris,' vol. 194, p. 876 (1932).

¶ 'Naturwiss.,' vol. 20, p. 252 (1932).

\*\* 'C. R. Acad. Sci. Paris,' vol. 194, p. 877 (1932).

†† 'SitzBer. Akad. Wiss. Wien.' (*in course of publication*). Communication No. 288 (a) from the Radium Research Institute of Vienna.

‡‡ 'Proc. Roy. Soc.,' A, vol. 136, p. 727 (1932).

Figura 2.15: prima pagina dell'articolo pubblicato sul Proceedings Royal Society da Feather sull'esperimento di collisione tra neutroni e nuclei di azoto; [15].

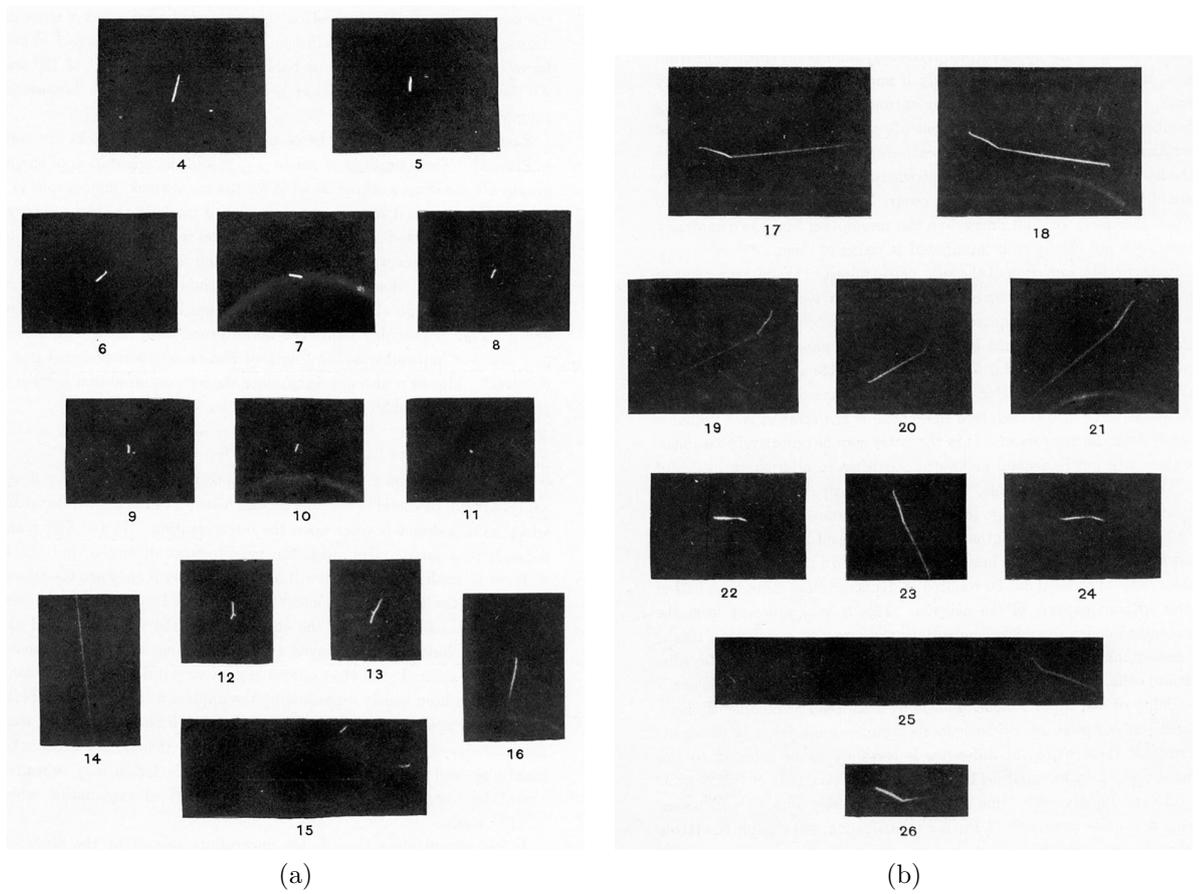


Figura 2.16: tracce delle particelle nelle lastre fotografiche indagate da Feather; [15].

tre corpi, dalla sorgente di neutroni Po-Be. La conclusione fu che con queste condizioni si verificavano solo per reazioni a due corpi [1].

Feather scoprì lo stesso tipo processo di disintegrazione nell'ossigeno, nel neon e nel ferro. Questi risultati sono importanti perché rappresentano il primo passo nella scoperta e l'investigazione di tutte le reazioni nucleari prodotte dai neutroni [1].

Furono, poi, investigati due tipi di collisione di particolare interesse: tra un neutrone e un protone e tra un neutrone e un elettrone [2].

La prima fu indagata usando una camera a pressione per misurare la diffusione dei neutroni dalla paraffina e da un liquido idrogenato. Questi esperimenti preliminari suggerirono che la collisione studiata è molto più frequente che una con altri elementi leggeri [2].

La seconda fu esaminata da Philip Ivor Dee<sup>7</sup> in due modi: con una camera di Wilson e con un contatore. Lo scienziato stava cercando la ionizzazione generale prodotta da un grande numero di neutroni che passavano attraverso la camera a nebbia e tracce corte degli elettroni, che potevano essere il risultato di una collisione molto vicina tra neutrone e elettrone [2].

Scrisse l'articolo 'Attempts to detect the interaction of neutrons with electrons', (Fig. 2.17), in cui spiegò la sua ricerca, che fece a Cambridge sotto la supervisione di Wilson. Nell'articolo spiegò che l'impatto potrebbe essere previsto ad una velocità di massimo  $6.6 \times 10^9$  cm/s, che è due volte la velocità del neutrone per una collisione lineare, corrispondente al massimo dell'energia del rinculo dell'elettrone di circa 13000 eV, che equivale al range di rinculo di 3.4 mm di aria in condizioni normali e a 350 coppie di ioni con una traccia di questa lunghezza. Dee discusse i risultati ottenuti su 351 fotografie stereoscopiche ottenute con la fonte di neutroni lasciatagli da Chadwick. Di queste furono registrate 29 tracce di atomi di azoto che rinculavano, e fu subito ovvio che la ionizzazione lungo una traccia di un neutrone fosse meno lunga di tre coppie di ioni per centimetro. Non furono osservate tracce da 3.4 mm di elettroni. Fu fatta una ricerca per tutti i range più piccoli, ottenendo solamente due tracce corte che soddisfassero le condizioni fissate. I range erano di 0.47 mm e 0.30 mm: fu, quindi, difficile stabilire le energie iniziali di questi elettroni [1].

Dee concluse che la probabilità di interazione tra un neutrone con un elettrone con la produzione di una traccia di un elettrone che rincula è meno dell'uno per cento della probabilità dell'interazione con i nuclei di azoto e che il raggio effettivo dell'interazione di un neutrone con un nucleo di azoto con produzione di un atomo di azoto che rincula è dell'ordine di  $5 \times 10^{-13}$ , per cui la ionizzazione lungo il cammino del neutrone è meno di uno ione ogni tre metri di aria [1].

Nell'esperimento con il contatore, invece, un fascio di neutroni passava attraverso un blocco di ottone spesso 2.5 cm e si misurava il range massimo dei protoni emessi dalla

---

<sup>7</sup>fisico nucleare britannico (1904-1983). Fu il responsabile dello sviluppo dell'aerotrasporto nella seconda guerra mondiale [20].

*Attempts to Detect the Interaction of Neutrons with Electrons.*

By P. I. DEE, M.A., Pembroke College, Cambridge.

(Communicated by J. Chadwick, F.R.S.—Received May 10, 1932.)

[PLATES 17-19.]

§ 1. *Introduction.*

The present paper contains an account of investigations made with a Wilson chamber on the penetrating radiation emitted by beryllium when the latter is bombarded by the  $\alpha$ -particles of polonium. Dr. Chadwick\* has suggested that this radiation consists of a stream of neutrons of unit mass and maximum velocity  $3.3 \times 10^9$  cm. per second. The neutrons in their passage through matter collide occasionally with the atomic nuclei and produce recoil atoms of short range and great ionising power. The recoil atoms of nitrogen have been studied in detail by Dr. Feather,† using an automatic expansion chamber, and the lengths of the recoil tracks are in agreement with the neutron hypothesis. It is of special interest to examine the interaction of the neutrons with electrons.

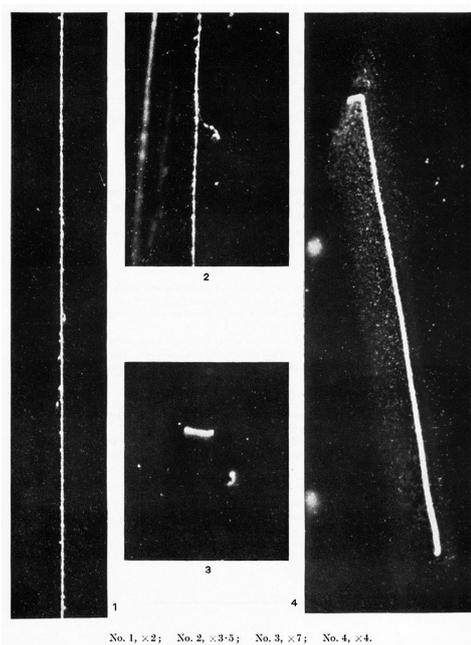
\* 'Nature,' vol. 129, p. 312 (1932).

† 'Proc. Roy. Soc.,' A, vol. 136, p. 709 (1932).

Figura 2.17: prima parte dell'articolo pubblicato sul Proceedings Royal Society da Dee sull'interazione dei neutroni con gli elettroni; [15].

paraffina. Questo era ottenuto dalla velocità massima dei neutroni dopo il passaggio attraverso l'ottone e veniva comparato con il massimo della velocità del fascio incidente. Non si osservò nessun cambio in velocità dei neutroni dovuto al passaggio. L'accuratezza dell'esperimento non era elevato, ma i risultati mostrarono che l'energia persa in questo modo attraverso l'ottone non supera i  $0.4 \times 10^6$  eV. Tale spessore di ottone corrisponde al cammino dell'elettrone in  $2 \times 10^4$  cm di aria, per cui in aria un neutrone perde, rispetto all'ottone, meno di 20 volte per centimetro nella collisione con l'elettrone, risultato concorde con la conclusione ottenuta nel metodo descritto precedentemente, ovvero che è molto raro il trasferimento di energia dal neutrone all'elettrone [2].

Gli esperimenti citati che vennero fatti e che portarono alla scoperta del neutrone rispettano, quindi, lo stesso schema, con alcune varianti, come ci mostra la figura 2.19. Essi infatti riguardano tutti lo studio della radiazione derivante dal bombardamento di particelle  $\alpha$  (emesse da una sorgente radioattiva) su strati di elementi leggeri, in particolare il berillio. Il caso di Bothe è il caso più semplice, senza ulteriori pezzi di esperimento, ma solo la rilevazione di una misteriosa radiazione che fuoriusciva dal piombo. Nel secondo caso dei coniugi Curie-Joliot, come nel terzo di Chadwick, è stato aggiunto uno

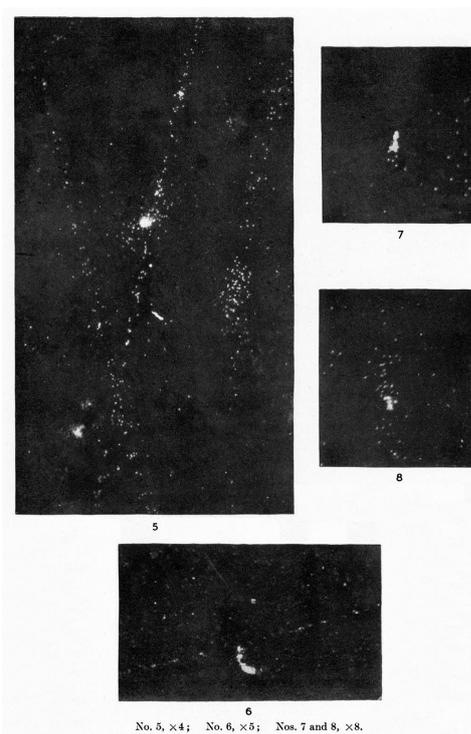


No. 1,  $\times 2$ ; No. 2,  $\times 3-5$ ; No. 3,  $\times 7$ ; No. 4,  $\times 4$ .

PLATE 17.

- FIG. 1.—Fast proton.
- FIG. 2.—One proton showing production of a recoil electron track. Had this been a direct collision the velocity of the proton would be  $3 \times 10^9$  cm. per second.
- FIG. 3.—A recoil nitrogen atom, which has suffered an early deflection. Also a short electron track.
- FIG. 4.—The disintegration of a nitrogen atom, the long branch probably being an  $\alpha$ -ray emitted and the short branch the recoil of the residual atom. The two dense spots on the left are due to the positive and negative ions of a nitrogen recoil atom, produced before the expansion.

(a)



No. 5,  $\times 4$ ; No. 6,  $\times 5$ ; Nos. 7 and 8,  $\times 8$ .

PLATE 18.

- FIG. 5.—Two fast electron tracks starting from the roof and the negative ions of a track which entered before the expansion.
- FIG. 6.—A fast  $\beta$ -ray, in poor focus, has produced a recoil electron of short range.
- FIGS. 7 and 8.—Short electron tracks produced in the chamber, not branches of a straight track.

(b)

Figura 2.18: tracce delle particelle nelle lastre fotografiche indagate da Dee; [15].

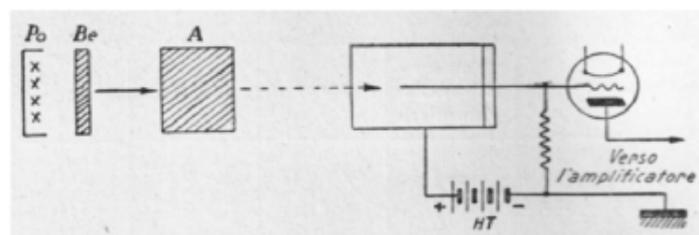
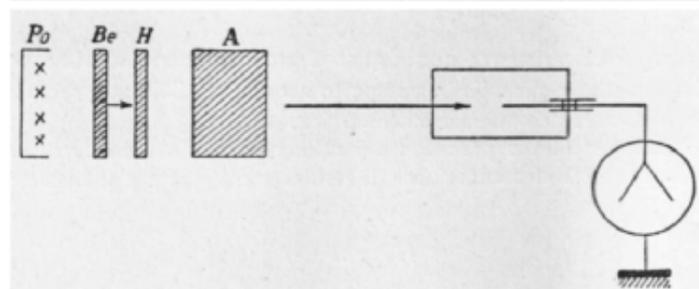
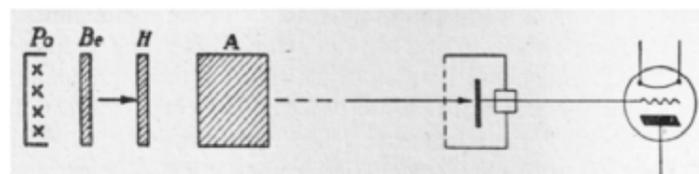
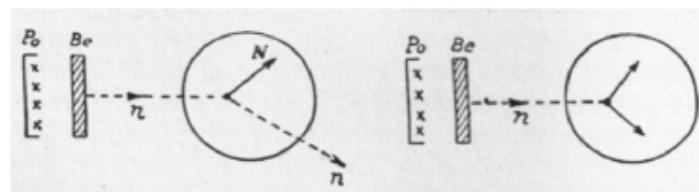
**Bothe and Becker****Curie and Joliot****Chadwick****Feather**

Figura 2.19: Schema riassuntivo degli esperimenti che portarono alla scoperta del neutrone.

strato di paraffina, ma la rilevazione è stata fatta con strumenti differenti. L'ultimo, quello di Feather, indaga le tracce che questa radiazione lascia su lastre fotografiche.

# Capitolo 3

## Conclusioni

Il neutrone diede improvvisamente senso agli esperimenti e alle teorie di quel momento, a quelli che sembravano risultati paradossali sulla statistica dello spin, sulla struttura del nucleo, sul confinamento degli elettroni in un così piccolo volume e sui momenti magnetici nucleari. Venne inaugurata una nuova generazione di esperimenti di fisica nucleare, dove il neutrone stesso era la particella di prova [7].

Le proprietà statistiche dell'elettrone divennero chiare: questo fatto fornì una chiave per meglio comprendere la natura esatta del neutrone. Siccome protoni ed elettroni sono entrambi fermioni, un nucleo composto da  $A$  protoni ed  $A-Z$  elettroni (in tutto da  $2A-Z$  fermioni) è un fermione se  $Z$  è dispari e un bosone se  $Z$  è pari. Precise misure di Rasetti dello spettro Raman della molecola di azoto facevano concludere che l'azoto ( $A=14$ ,  $Z=7$ ) era un bosone, contro le previsioni del modello a protoni-elettroni. La proprietà è invece consistente col fatto che l'azoto sia composto da 7 protoni e 7 neutroni, numero pari di fermioni. Questo risultato implica inoltre che il neutrone non sia composto da un protone ed un elettrone, ma sia una "particella elementare" per proprio conto, un fermione di spin  $1/2$  come gli elettroni ed i protoni. Presto Fermi mostrerà con la sua teoria del decadimento beta che il neutrone si disintegra in tre fermioni: un protone, un elettrone ed un anti-neutrino. Tutto diveniva chiaro e consistente con un modello nucleare secondo cui un nucleo di numeri  $A$  e  $Z$  è costituito da  $Z$  protoni ed  $A-Z$  neutroni [3].

Il primo a sviluppare questo modello fu Dmitri Ivanenko<sup>1</sup> in un articolo pubblicato su *Nature* nell'aprile del 1932, ma ad apprezzare a pieno l'importanza del nuovo paradigma furono Werner Heisenberg, Ettore Majorana<sup>2</sup> e Eugene Wigner<sup>3</sup>, che applicarono la

---

<sup>1</sup>(1904-1994) fisico teorico sovietico ucraino. Il suo contributo fu fondamentale per l'avanzamento di alcune discipline all'interno della fisica, quali la fisica nucleare, la teoria dei campi e la teoria della gravitazione [23].

<sup>2</sup>(1906-1938-presunta) fisico teorico italiano, scomparso in circostanze sconosciute [25].

<sup>3</sup>(1902-1995) fisico teorico e matematico ungaro-americano. Nel 1963 ricevette il Premio Nobel per la fisica per il contributo alla teoria del nucleo atomico e delle particelle elementari, in particolare per

meccanica quantistica alla descrizione delle proprietà nucleari. Poiché neutroni e protoni rimangono legati nel piccolissimo nucleo, è necessario che fra di essi si eserciti una forza in grado di contrastare la repulsione elettrostatica fra i protoni. I tre scienziati descrissero questa nuova forza in forme differenti, caratterizzate tutte da un cortissimo raggio d'azione; si tratta comunque del primo esempio di una forza che si esercita a livello delle particelle elementari e non possiede analogo classico: venne chiamata forza “nucleare” o “forte”. La risoluzione dei problemi del nucleo atomico conseguente alla scoperta del neutrone ebbe una grande importanza, non solo perché allargava la conoscenza di questi sistemi naturali, ma perché contribuì a consolidare il quadro concettuale della meccanica quantistica a teoria fondamentale del microcosmo. Infatti le difficoltà del modello a protoni ed elettroni nascevano volendo applicare ad esso le leggi quantistiche individuate a livello atomico. La distanza fra le dimensioni atomiche e quelle nucleari è dello stesso ordine di quella che separa il macrocosmo ed il mondo atomico [3].

Questa scoperta portò anche alla spiegazione degli isotopi. Fu, infatti, chiaro che il numero di protoni nel nucleo e il corrispondente numero di elettroni circostanti era costante e determinava le proprietà delle sostanze, mentre differiva il numero di neutroni e quindi la massa atomica [7].

Bothe commentò la scoperta di Chadwick in questo modo [7, pag. 862, §Bothe's Comments on Chadwick's Discovery]:

*“We were just standing before this puzzle when it was solved by others in a surprising way.”*<sup>4</sup>

La ragione per la quale questa scoperta fu un evento di grande importanza è che il neutrone non risente della barriera di Coulomb, essendo neutro, per cui grazie ad esso esiste un modo di bombardare i nuclei senza che ci sia repulsione, non importa l'energia cinetica del neutrone né il numero atomico dei nuclei bersaglio. I neutroni furono il passaggio verso l'ideazione dei reattori e delle bombe nucleari, anche se Chadwick a quel tempo pensò che non si potesse fare uso di questa particella neutra, [6, pag 54, §2.2]:

*“I am afraid neutrons will not be of any use to any one.”*<sup>5</sup>

In realtà ingegneri e fisici si resero presto conto che la reazione che avveniva era in grado di accelerare a grandi energie i protoni e produrre un'energia enorme e, in tempo di guerra, fu chiaro che questo processo avrebbe potuto cambiare le sorti del conflitto [6].

---

la scoperta e l'applicazione dei principi elementari della teoria delle simmetrie [30].

<sup>4</sup>Eravamo di fronte a questo rompicapo, quando esso fu risolto da altri in maniera sorprendente.

<sup>5</sup>Mi dispiace ma i neutroni non potranno essere utilizzati da nessuno.

# Appendice A: Riproduzione calcoli Chadwick

Decadimento del Polonio:



Questo processo avviene spontaneamente liberando un'energia di  $Q = 5.407$  MeV, da suddividere tra i nuclei di piombo e le 2 particelle  $\alpha$ . Le masse dei prodotti sono coinvolte in questa reazione con velocità non relativistiche, caratteristica importante nella nostra analisi.

Anche se la massa si crea o si distrugge, il momento deve conservarsi nella reazione, per questo motivo se inizialmente i nuclei di polonio sono fermi, dopo il decadimento, il piombo e i nuclei di elio devono rinculare in direzioni opposte. L'energia cinetica dei nuclei più leggeri prodotti deve essere

$$K_m = \frac{Q}{1 + \frac{m}{M}} \quad (3.2)$$

dove  $m$  e  $M$  sono rispettivamente le masse del nucleo più leggero e più pesante. Sappiamo che  $m/M \sim \frac{4}{206}$  perciò le particelle  $\alpha$  hanno un'energia di 5.3 MeV. La velocità di queste ultime è, quindi, circa  $0.05c$ , giustificato con l'assunzione di particelle non relativistiche. Inizialmente assumiamo che Bothe e Becker e i coniugi Joliot-Curie avessero dato una corretta interpretazione sul bombardamento del Be da parte delle particelle  $\alpha$  e, quindi, si creassero i raggi  $\gamma$ . Per conservare il numero di nucleoni coinvolti la reazione deve essere



I valori  $\Delta$  di questa reazione sono 2.425, 11.348 e 3.125 rispettivamente, perciò il valore  $Q$  è di 10.65 MeV; questa energia, insieme a quella delle particelle  $\alpha$  ( $\sim 5.3$ ), risulta al massimo di 16 MeV, ed è quella dei raggi  $\gamma$ .

Ora è necessario confrontare questo valore con quello calcolato: per l'energia dei raggi  $\gamma$  consideriamo la soluzione dell'equazione quadratica:

$$\alpha E_\gamma^2 + \epsilon E_\gamma + \delta = 0 \quad (3.4)$$

Infatti, considerando i nuclei A e B che si scontrano e producono C e  $\gamma$ , con masse  $m_A$ ,  $m_B$  e  $m_C$ , per la conservazione dell'energia risulta

$$K_A + (m_A + m_B)c^2 = K_C + m_Cc^2 + E_\gamma.$$

Per la conservazione della quantità di moto possiamo prendere  $p = \sqrt{2mK}$  (in meccanica classica) per le particelle con massa e per quelle senza massa, ovvero per i raggi  $\gamma$ , la quantità di Einstein  $p = \frac{E}{c}$ , in questo modo abbiamo

$$\sqrt{2m_A K_A} = \pm \sqrt{2m_C K_C} + \frac{E_\gamma}{c},$$

dove il segno positivo (o negativo) dice se la particella C si sta muovendo verso destra (o sinistra) dopo esser stata prodotta. Assumiamo che il raggio gamma vada nella stessa direzione delle particelle  $\alpha$ , quella di C è data dalla conservazione del momento e dell'energia. Sostituiamo le energie alle masse con l'equazione di Einstein, potendo così cancellare il fattore  $c$ :

$$\sqrt{2E_A K_A} = \pm \sqrt{2E_C K_C} + E_\gamma.$$

Vogliamo, per semplicità, eliminare la quantità  $K_C$ , perciò sostituiamo nella relazione

$$K_C = \left(\frac{E_A}{E_C}\right)K_A - \frac{\sqrt{2E_A K_A}E_\gamma}{E_C} + \frac{E_\gamma^2}{2E_C}$$

la quantità

$$K_C = E_A + E_B + K_A - E_C - E_\gamma$$

ottenendo un'equazione quadratica:

$$\alpha E_\gamma^2 + \epsilon E_\gamma + \delta = 0$$

dove

$$\alpha = \frac{1}{2E_C}$$

$$\epsilon = 1 - \frac{\sqrt{2E_A K_A}}{E_C}$$

$$\delta = \left(\frac{E_A}{E_C}\right)K_A - (E_A + E_B + K_A - E_C)$$

Quindi otteniamo

$$E_\gamma = \frac{-\epsilon \pm \sqrt{\epsilon^2 - 4\alpha\delta}}{2\alpha} \quad (3.5)$$

Delle due soluzioni si ritiene che quella con segno negativo non sia fisica, perché non porterebbe ad un valore positivo o nullo di  $K_C$ .

Assumiamo, quindi che A sia l'elio, B sia il berillio e C il carbonio, possiamo quindi calcolare  $\alpha$ ,  $\epsilon$  e  $\delta$ , conoscendo  $E_{He} = 3728.40228$  MeV,  $E_{Be} = 8394.79688$  MeV e  $E_C = 12112.55116$  MeV:

$$\begin{cases} \alpha = 4.12795 \times 10^{-5} MeV^{-1} \\ \epsilon = 0.983587 \\ \delta = -14.316590 MeV \end{cases}$$

Da questi valori, risolvendo la radice quadrata e tenendo il risultato positivo, ricaviamo  $E_\gamma = 14.55$  MeV, risultato leggermente inferiore ai 16 MeV stimati sulla base del valore  $Q$ , siccome i nuclei di carbonio trasportano una certa quantità di moto.

Successivamente i raggi  $\gamma$  colpiscono i protoni nei nuclei di paraffina, facendo in modo che possano muoversi liberamente. Una tale collisione è un problema sia relativistico che classico: infatti il raggio gamma ha proprietà relativistiche, mentre il protone classiche. Supponiamo che il raggio gamma colpisca inizialmente una particella ferma di massa  $m$ , la sua energia einsteiniana è  $E_m = mc^2$ , mentre l'energia cinetica per le collisioni classiche è indicata da  $K_m = \frac{mv^2}{2}$ . Si può avere il massimo della quantità di moto in avanti se, colpendo la particella, il raggio gamma rincula all'indietro dopo l'urto.

Prendiamo questo caso. L'energia del raggio gamma dopo la collisione è  $E_\gamma^*$  e abbiamo per la conservazione dell'energia

$$E_\gamma + E_m = E_\gamma^* + E_m + K_m \quad (3.6)$$

stiamo assumendo che l'urto non modifichi l'identità della particella. Considerando che  $p = E/c$  l'equazione della conservazione della quantità di moto è

$$E_\gamma/c = -E_\gamma^*/c + mv \quad (3.7)$$

dove  $v$  è la velocità della particella dopo l'urto e il segno negativo significa che il raggio  $\gamma$  rincula nella direzione opposta. Si rivelerà utile avere le espressioni classiche della quantità di moto e dell'energia cinetica in termini di energia risultante:

$$mv = \sqrt{2mK_m} = \frac{\sqrt{2mc^2K_m}}{c} = \frac{\sqrt{2E_mK_m}}{c} \quad (3.8)$$

e

$$K_m = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{(mc)^2v^2}{2c^2} = \frac{1}{2}E_m \left(\frac{v}{c}\right)^2 \quad (3.9)$$

sostituiamo  $mv$  nell'equazione (3.8), eliminando il fattore  $c$  al denominatore, troviamo così

$$E_\gamma = \frac{1}{2} \left( K_m + \sqrt{2E_mK_m} \right). \quad (3.10)$$

Se l'energia cinetica della particella colpita, ovvero il protone, può essere misurata possiamo usare quest'ultima espressione per capire quanta energia devono avere i raggi gamma

per causare il moto delle particelle. Per avere il valore di  $K_m$ , supponendo che  $E_\gamma$  sia nota, si considera la quadratica, che non ha una soluzione netta:

$$K_m + \left( \sqrt{2E_m} \right) \sqrt{K_m} - 2E_\gamma = 0. \quad (3.11)$$

È possibile risolvere approssimativamente la relazione soprastante, conoscendo l'energia dei raggi gamma ( $\sim 14.6$  MeV) e l'energia restante del protone (938 MeV - molto più piccola di quella dei raggi gamma per cui  $E_m \ll E_\gamma$ ), nel seguente modo:

$$\begin{aligned} \sqrt{K_m} &= \frac{-\sqrt{2E_m} + \sqrt{2E_m + 8E_\gamma}}{2} \\ \sqrt{K_m} &= \frac{-\sqrt{2E_m} [1 - \sqrt{1 + 4E_\gamma/E_m}]}{2} \end{aligned}$$

con  $4E_\gamma/E_m \ll 1$ , per questo motivo possiamo utilizzare lo sviluppo di Taylor

$$\sqrt{1+x} \sim 1 + x/2 - x^2/8 + \dots (x < 1)$$

chiamando  $4E_\gamma/E_m$   $x$ .

$$\begin{aligned} \sqrt{K_m} &\sim \frac{1}{2} \left\{ -\sqrt{2E_m} \left[ 1 - \left( 1 + 2\frac{E_\gamma}{E_m} - 2\frac{E_\gamma^2}{E_m^2} + \dots \right) \right] \right\} \\ &\sim \left\{ -\sqrt{2E_m} \left[ -\frac{E_\gamma}{E_m} + \frac{E_\gamma^2}{E_m^2} - \dots \right] \right\} \\ &\sim \sqrt{2E_m} \left( \frac{E_\gamma}{E_m} \right) \left\{ 1 - \frac{E_\gamma}{E_m} + \dots \right\} \end{aligned}$$

e cioè

$$K_m \sim 2 \left( \frac{E_\gamma^2}{E_m} \right) \left\{ 1 - 2\frac{E_\gamma}{E_m} + \dots \right\} \quad (3.12)$$

Una volta riprodotto l'esperimento di Joliot-Curie Chadwick trovò che il protone veniva espulso dalla paraffina con una velocità di  $3.3 \times 10^7$  m/s, ovvero  $v/c=0.11$ , quindi è corretto assumere di poter trattare classicamente i protoni. Dalla formula (3.9) si evince l'energia cinetica dei protoni espulsi di 5.7 MeV, ovvero esattamente il valore riportato da Chadwick nell'articolo all'editore su Nature. Dall'equazione (3.10) vediamo che i raggi gamma devono avere un'energia di circa 54.4 MeV, valore quattro volte più grande dei 14.6 MeV trovati da Joliot-Curie per la relazione proposta  $\alpha + {}^9\text{Be} \rightarrow {}^{13}\text{C}$ .

Per questo motivo Chadwick ideò un nuovo test per verificare ulteriormente se questi raggi gamma a 55 MeV di energia fossero in qualche modo creati dalla collisione  $\alpha$ -Be.

## Appendice B: Stima della massa del neutrone

Chadwick considerava il neutrone un doppietto elettrone/protone e cercò di stimarne la massa sperimentalmente, per poterla confrontare con il valore teorico predetto considerando i due componenti. Riteneva che una collisione tra protone e neutrone fosse simile all'urto tra due palle da biliardo, avendo essi masse simili. Infatti nell'articolo inviato alla rivista della Royal Society nel maggio '32 presentò alcune argomentazioni a favore del fatto che la radiazione del berillio avesse massa prossima a quella del protone. Per questo motivo era plausibile che un neutrone con energia di circa 11 MeV riuscisse ad accelerare un protone, impartendogli un'energia cinetica di  $\sim 5.7$  MeV anche dopo essere uscito dal bersaglio di berillio e passato attraverso il contenitore vuoto che incontra nel percorso verso la paraffina.

Come prova della sua ipotesi sulla natura del neutrone considerò nuovamente l'esperimento dell'azoto. Invece che la creazione di raggi gamma nella collisione tra le particelle  $\alpha$  e il berillio, ipotizzò che il prodotto fossero delle particelle neutre, che chiamò  $\mu$ . Esse, quindi, collidevano con una particella inizialmente in quiete di massa  $m$ , come in figura

La collisione può essere analizzata come il processo classico dell'urto elastico tra due punti materiali. Si consideri un neutrone di velocità  $v_\mu$  ed energia cinetica  $K_\mu$ . Dopo la collisione si avrà:

$$v_m = \left( \frac{2\mu}{\mu + m} \right) \quad e \quad K_m = \frac{4\mu m}{(\mu + m)^2} K_\mu. \quad (3.13)$$

dove  $v_m$  è la velocità di rinculo e  $K_m$  l'energia cinetica dopo l'urto. Considerando l'energia di 5.7 MeV quando esce il neutrone dal contenitore vuoto, risulta dalle formule che il nucleo dovrebbe muoversi con un'energia cinetica di  $56/225 = 0.249$ , ovvero 1.4 MeV. Questo valore è perfettamente in accordo con l'energia indicata dalle coppie osservate di ioni create dal rinculo dei nuclei di azoto.

Eseguito l'esperimento in eguali condizioni in atmosfera di idrogeno e poi di azoto, si calcola il rapporto tra le velocità:

$$\frac{v_H}{v_N} = \frac{m_N + m_\mu}{m_H + m_\mu} = \frac{\mu + 14}{\mu + 1}.$$

Da questo si ricava la massa della particella:

$$\mu = \frac{v_N m_N - v_H m_H}{v_H - v_N}.$$

I nuclei di rinculo lasciavano tracce fotografabili nella camera a nebbia e dalla loro lunghezza era possibile risalire alle velocità. Così facendo Chadwick ottenne  $v_H = 3.3 \times 10^7 \text{ m/s}$  e  $v_N \approx 4.7 \times 10^6 \text{ m/s}$ . Operando per sostituzione, con un errore del 10%, stimò  $\mu = 1.15$ .

Per effettuare una stima più precisa della massa del neutrone Chadwick esaminò poi il bilancio massa-energia direttamente nella prima reazione, quella da cui si origina il neutrone. Questo tipo di bilancio richiede però una buona conoscenza della massa nucleare del Be che, nel 1932, non era nota con sufficiente accuratezza. L'ostacolo venne aggirato utilizzando come bersaglio il Boro per il quale erano già note le masse nucleari (per le misure di Aston con lo spettrometro di massa).

Il Boro, dal punto di vista della emissione neutronica si comporta come il Berillio salvo una minore attività. La reazione è la seguente:



Chadwick da questi esperimenti stimò la massa della particella neutra tra 1.005 e 1.008 unità di massa.

Concluse osservando che tale valore è compatibile con l'ipotesi che il neutrone sia fatto da un protone ed un elettrone con un difetto di massa tra 1 e 2 MeV. I valori oggi accettati delle masse di protone e neutrone sono:  $m_p \sim 938,272 \text{ MeV}$  e  $m_n \sim 939,565 \text{ MeV}$ , con  $m_n - m_p = 1,293 \text{ MeV}$  e in unità di masse atomiche il valore moderno per il neutrone è 1.00866.

# Bibliografia

- [1] E. Amaldi, *From the discovery of the neutron to the discovery of nuclear fusion*, North-Holland Physics publishing, Amsterdam, 1984
- [2] J. Chadwick, *The existence of a neutron*, Proceedings of the Royal Society, London, 1932
- [3] A. Pascolini, 1932, “*annus mirabilis*” della fisica, INFN Notizie. Dai quark alle galassie n.10, aprile 2002
- [4] M. Pinault, *Frédéric Joliot-Curie*, Odile Jacob, Parigi, aprile 2000
- [5] B. C. Reed, *The physics of the Manhattan project*, Springer, Berlin, 2011
- [6] B. C. Reed, *The history and science of the Manhattan project*, Springer, Berlin, 2014
- [7] J. W. White, A. B. White, *The Neutron - The Curie Family’s Legacy*, Research school of Chemistry, Australian National University, Canberra, 26 maggio 2011
- [8] Enciclopedia Italiana, *Frédéric Joliot*, <http://www.treccani.it/enciclopedia/frederic-joliot-curie/>
- [9] Nobelprize.org, Nobel Media AB 2014, Web, *The Nobel Prize in Physics 1954*, 2 May 2017, [http://www.nobelprize.org/nobel\\_prizes/physics/laureates/1954/](http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1954/)
- [10] Nobelprize.org, Nobel Media AB 2014, Web, *James Chadwick - Biographical*, 2 May 2017, [http://www.nobelprize.org/nobel\\_prizes/physics/laureates/1935/chadwick-bio.html](http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1935/chadwick-bio.html)
- [11] Nobelprize.org, Nobel Media AB 2014, Web, *James Chadwick*, 2 May 2017, [http://www.nobelprize.org/nobel\\_prizes/physics/laureates/1935/chadwick-facts.html](http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1935/chadwick-facts.html)
- [12] Nobelprize.org, Nobel Media AB 2014, Web, *Irène Joliot-Curie - Facts*, 2 May 2017, [http://www.nobelprize.org/nobel\\_prizes/chemistry/laureates/1935/joliot-curie-facts.html](http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/chemistry/laureates/1935/joliot-curie-facts.html)

- [13] Nobelprize.org. Nobel Media AB 2014, Web, *Ernest Rutherford - Facts*, 3 Sep 2017, [http://www.nobelprize.org/nobel\\_prizes/chemistry/laureates/1908/rutherford-facts.html](http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/chemistry/laureates/1908/rutherford-facts.html)
- [14] R. Renzetti, *Dall'atomo al nucleo*, FISICA/MENTE, <http://www.fisicamente.net/A/index-1781.htm>
- [15] *Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, <http://rspa.royalsocietypublishing.org>
- [16] A. Russo, *La scoperta del neutrone e il Cavendish Laboratory*, AIF - Scuola di Storia della Fisica, 2005, <https://chimicando.files.wordpress.com/2010/02/russoneutrone1.ppt>
- [17] *Francis William Aston* [https://en.wikipedia.org/wiki/Francis\\_William\\_Aston](https://en.wikipedia.org/wiki/Francis_William_Aston)
- [18] *Walther Bothe* [https://it.wikipedia.org/wiki/Walther\\_Bothe](https://it.wikipedia.org/wiki/Walther_Bothe)
- [19] *William Lawrence Bragg* [https://it.wikipedia.org/wiki/William\\_Lawrence\\_Bragg](https://it.wikipedia.org/wiki/William_Lawrence_Bragg)
- [20] *Philip Ivor Dee* [https://en.wikipedia.org/wiki/Philip\\_Dee](https://en.wikipedia.org/wiki/Philip_Dee)
- [21] *Norman Feather* [https://en.wikipedia.org/wiki/Norman\\_Feather](https://en.wikipedia.org/wiki/Norman_Feather)
- [22] *George Gamow* [https://it.wikipedia.org/wiki/George\\_Gamow](https://it.wikipedia.org/wiki/George_Gamow)
- [23] *Dmistri Ivanenko* [https://en.wikipedia.org/wiki/Dmitri\\_Ivanenko#Scientific\\_contributions](https://en.wikipedia.org/wiki/Dmitri_Ivanenko#Scientific_contributions)
- [24] *Walther Nernst* [https://it.wikipedia.org/wiki/Walther\\_Nernst](https://it.wikipedia.org/wiki/Walther_Nernst)
- [25] *Ettore Majorana* [https://it.wikipedia.org/wiki/Ettore\\_Majorana](https://it.wikipedia.org/wiki/Ettore_Majorana)
- [26] *Franco Rasetti* [https://it.wikipedia.org/wiki/Franco\\_Rasetti](https://it.wikipedia.org/wiki/Franco_Rasetti)
- [27] *William Sutherland* [https://en.wikipedia.org/wiki/William\\_Sutherland\\_\(physicist\)](https://en.wikipedia.org/wiki/William_Sutherland_(physicist))
- [28] *Johannes Stark* [https://it.wikipedia.org/wiki/Johannes\\_Stark](https://it.wikipedia.org/wiki/Johannes_Stark)
- [29] *Paul Ulrich Villard* [https://it.wikipedia.org/wiki/Paul\\_Ulrich\\_Villard](https://it.wikipedia.org/wiki/Paul_Ulrich_Villard)
- [30] *Eugene Paul Wigner* [https://en.wikipedia.org/wiki/Eugene\\_Wigner](https://en.wikipedia.org/wiki/Eugene_Wigner)