ARTURO RUSSO(*) - A. SANTAMARIA(**)

La scoperta del neutrone (***)

Riassunto - Nella sua *Bakerian Lecture* del 1920 E. Rutherford formulò per la prima volta l'ipotesl dell'esistenza di una particella neutra quale componente stabile del nucleo atomico. Anche se presto si rivelò che tale ipotesi era fondata su una interpretazione errata dei dati sperimentali, la ricerca di una particella nucleare neutra non fu abbandonata al *Cavendish Laboratory* e arrivò a conclusione nel 1932 con la scoperta del neutrone da parte di J. Chadwick. Tale risultato fu reso possibile grazie alla scoperta, da parte dei tedeschi W. Bothe e H. Becker, di una radiazione fortemente penetrante emessa dal berillio in seguito al bombardamento con particelle alfa da polonio. Lo studio di tale radiazione, interpretata come una radiazione gamma di alta energia, fu intrapreso in Francia da F. Joliot e I. Joliot-Curie, i quali scoprirono che essa era capace di proiettare in avanti, con grande energia, i nuclei degli atomi di idrogeno (protoni). I due fisici francesi, anche sulla scorta dei risultati di R. Millikan sui raggi cosmici, pure considerati come una radiazione gamma di altissima energia, suggerirono dapprima che tale fenomeno fosse dovuto ad effetto Compton su protoni e quindi ad un nuovo tipo di interazione dei raggi gamma con la materia. Chadwick, al contrario, si rese subito conto che si trattava di un fenomeno facilmente spiegabile se si supponeva che la radiazione del berillio contenesse particelle neutre di massa simile a quella del protone. Una serie di esperimenti condotti nell'arco di poche settimane lo convinsero della validità di tale ipotesi e lo portarono ad annunciare la scoperta della nuova particella. Nei due anni successivi fu dimostrato che il neutrone non era una particella composta di un protone e di un elettrone, come originariamente ipotizzato da Rutherford e ribadito dallo stesso Chadwick dopo la sua scoperta, bensì una vera e propria particella elementare che permetteva di fondare su nuove basi lo studio dei fenomeni nucleari.

The Discovery of the Neutron

Abstract - In his *Bakerian Lecture* of 1920, E. Rutherford suggested for the first time the hypothesis of the existence of a neutral particle among the stable components of the atomic nucleus. This hypothesis soon proved to be based on a wrong interpretation of the experimental results; the search for such a neutral particle, however, was not abandoned at the *Cavendish Laboratory*, and it finally led J. Chadwick to the discovery of the neutron in 1932. This result was made possible by the discovery, by the German physicists W. Bothe and H. Becker, that a radiation of great penetrating power was emitted by beryllium when bombarded by the alpha particles from polonium. A study of this radiation, interpreted as a high energy gamma radiation, was undertaken in France by F. Joliot and I. Joliot-Curie. They discovered that it was capable to project forward with high energy the nuclei of hydrogen atoms (i.e. protons). The two French physicists, on the basis of the results of R. Millikan on cosmic rays, also considered as gamma rays of very high energy, interpreted this phenomenon first as due to Compton effect on protons and then as a new kind of interaction of gamma rays with matter. Chadwick, on the contrary, soon realized that it was easy to explain this phenomenon suggesting that the beryllium radiation included neutral particles with a mass similar to that of the proton. A series of experiments, performed in a few weeks, convinced him of the validity of this hypothesis and led him to announce the discovery of the new particle. In the following two years, it was proven that the neutron was not a compound particle, made of a proton and an electron in close association, as originally suggested by Rutherford and claimed by Chadwick himself after his discovery, but a real elementary particle whose properties provided a new basis for the study of nuclear phenomena.

(*) Istituto di Fisica, Università di Palermo.
(**) CNR-IEREN, Palermo.
(***) Lavoro dedicato al Professor G.B. Marini-Bettòlo, Uno dei XL, in occasione del 75° compleanno.

La scoperta del neutrone liberò il nucleo atomico dall'imbarazzante presenza degli elettroni, portando così la fisica nucleare oltre la soglia della maturità a poco più di vent'anni di distanza dalla nascita ad opera di Ernest Rutherford con il suo modello di atomo planetario. E fu proprio il più stretto collaboratore di Rutherford al Cavendish Laboratory di Cambridge, James Chadwick, a scoprire la nuova particella, nei primi mesi di quell'anno 1932 che, a buon diritto, è stato definito l'*Annus Mirabilis* della fisica nucleare. L'anno si era aperto con la scoperta del deuterio da parte di H. Urey, alla Columbia University; in Febbraio arrivò il neutrone; in Aprile, J. Cockroft e E. Walton, anch'essi al Cavendish, ottennero la prima disintegrazione nucleare prodotta da protoni accelerati artificialmente, seguiti qualche mese dopo da E. Lawrence, a Berkeley, con il suo ciclotrone; in Agosto le fotografie di raggi cosmici di C. Anderson, nel laboratorio di Millikan a Cal Tech, rivelarono per la prima volta l'esistenza di un elettrone positivo (positrone). Si apriva una nuova stagione per la fisica nucleare, che avrebbe portato rapidamente questo campo d'indagine al primo posto nell'attenzione dei ricercatori e dei loro finanziatori.[1]

All'inizio degli anni '30 i fisici concordavano sul fatto che i costituenti elementari della materia fossero il protone e l'elettrone, portatori rispettivamente della carica elementare positiva e negativa ma il primo di massa circa 1800 volte maggiore del secondo. Per rendere conto, quindi, della massa e della carica di un nucleo (A,Z) occorreva ipotizzare che questo contenesse A protoni e A-Z elettroni: la presenza nel nucleo di tali particelle era confermata dall'emissione di protoni dai nuclei leggeri per effetto del bombardamento con particelle alfa, e dall'emissione di elettroni nel decadimento beta. Gruppi di quattro protoni e due elettroni potevano associarsi nel nucleo a formare la struttura particolarmente stabile della particella alfa.[2]

L'accordo generale sulla presenza di elettroni all'interno del nucleo non poteva nascondere, peraltro, le grandi difficoltà e contraddizioni che, soprattutto a partire dal 1926, tale ipotesi presentava sul piano teorico: difficoltà che toccavano aspetti fondamentali quali il principio di conservazione dell'energia e il legame quantistico tra spin e statistica.[3] In questa situazione, che sembrava precludere la possibilità di usare la meccanica quantistica per spiegare la struttura dei nuclei e il decadimento beta, N. Bohr ritenne che la descrizione dei fenomeni nucleari richiedesse una nuova rivoluzione concettuale, una «nuova fisica» in cui, in particolare, si dovesse ri-

[1] C. Weiner, *1932 - Moving into the new physics*, «Physics Today», Maggio 1972, 40-49. Cfr. anche C. Weiner, *Institutional setting for scientific change: episodes from the history of nuclear physics*, in *Science and Values*, A. Thackray & E. Mendelsohn eds., New York 1974, 187-212. Interessanti testimonianze di alcuni dei protagonisti sono in *Nuclear Physics in Retrospect: Proceedings of a Symposium on the 1930s*, R.H. Stuewer ed., Minneapolis 1979. Un'ampia rassegna degli sviluppi della fisica nucleare a partire dalla scoperta del neutrone è E. Amaldi, *From the discovery of the neutron to the discovery of nuclear fission*, «Physics Reports», *111* (1984), 1-332.

[2] Per un quandro delle idee sulla struttura nucleare nel periodo immediatamente precedente la scoperta del neutrone, cfr. R. Rutherford, J. Chadwick, D.C. Ellis, *Radiations from Radioactive Substances*, Cambridge University Press, 1930; G.C. Gamow, *Constitution of Atomic Nuclei and Radioactivity*, Oxford University Press, 1931.

[3] R.H. Stuewer, *The nuclear electron hypothesis*, in *Otto Hahn and the Rise of Nuclear Physics*, W.R. Shea ed., Dordrecht, 1983, 19-67.

nunciare alla validità del principio di conservazione dell'energia nei fenomeni subatomici.[4] Venuto a conoscenza delle idee del fisico danese, Rutherford gli inviò una lettera in cui, citando Shakespeare, così esprimeva il suo commento:

> Ho sentito dire che sei sceso sul sentiero di guerra con il proposito di travolgere la Conservazione dell'Energia, sia a livello microscopico che macroscopico. Io preferisco aspettare e vedere prima di esprimere un'opinione, ma sento che vi sono più cose in cielo e in terra di quante ne sognamo nella nostra filosofia».[5]

Rutherford amava dire dei teorici che «a loro piace giocare con i simboli mentre noi, qui al *Cavendish*, riveliamo i fatti reali della natura».[6] Tra questi fatti egli si aspettava il segnale di una particella la cui esistenza aveva ipotizzato nel 1920, nella *Bakerian Lecture* tenuta alla Royal Society.[7]

Sembra che alcuni anni dopo la scoperta del neutrone, Frédérick Joliot riconobbe che non aveva letto la *Bakerian Lecture* di Rutherford del 1920 e che se lo avesse fatto, lui e sua moglie Irène Curie avrebbero probabilmente identificato il neutrone prima di Chadwick.[8] È difficile crederlo. Se è vero, infatti, che proprio in quella *Lecture* fu avanzata per la prima volta, su una base empirica adeguata, l'ipotesi dell'esistenza di una particella neutra quale componente stabile del nucleo atomico, è anche vero che la conferma di quella ipotesi arrivò solo dodici anni più tardi, a conclusione di un programma sperimentale che solo nell'ambiente del Cavendish poteva coerentemente approdare a tale risultato. La tradizione scientifica che, nel 1919, Rutherford aveva portato nel laboratorio che era stato di J. Maxwell, di Lord Rayleigh e di J.J. Thomson, era caratterizzata infatti da un solido programma di ricerca sulla fisica dei nuclei e da un approccio sperimentale che privilegiava lo studio dei fenomeni indotti dal bombardamento con radiazioni alfa. Il mondo fenomenico in cui si era formata la cultura scientifica dei collaboratori di Rutherford, e in particolare di Chadwick, era un mondo in cui nuclei e particelle pesanti di origine nucleare si urtavano producendo diffusioni elastiche o disintegrazioni con emissione di nuove particelle. Questo aspetto caratterizza la specificità del lavoro al Cavendish Laboratory rispetto a quello svolto in quegli stessi anni nei pochi altri laboratori (a Parigi, a Berlino, a Vienna) in cui si studiavano i fenomeni nucleari, e spiega in particolare come l'interpretazione di Chadwick dei risultati degli esperi-

[4] J. Bromberg, *The impact of the neutron*, «Historical Studies in the Physical Sciences», Vol. 3, Philadelphia, 1971, 307-341.

[5] E. Rutherford, lettera a N. Bohr, 19 Novembre 1929, cit. in Stuewer, *Nuclear electron hypothesis*, cit. (n. 3), p. 40.

[6] P.M.S. Blackett, *Rutherford*, «Notes and Records of the Royal Society», *27* (1972), 57; p. 58.

[7] E. Rutherford, *Nuclear constitution of atoms*, (Bakerian Lecture), «Proceedings of the Royal Society», *A 97* (1920), 374-400.

[8] A.S. Eve, *Rutherford*, Cambridge 1939, cit. in A. Pais, *Inward Bound, Of Matter and Forces in the Physical World*, Oxford, 1986, p. 399.

menti di Joliot e Curie sia stata immediatamente diversa da quella datane dalla coppia di fisici francesi.[9]

È interessante notare che l'ipotesi iniziale di Rutherford si fondava su una interpretazione dei risultati sperimentali che in seguito si rivelò sbagliata. Tema della *Lecture* del 1920 era la struttura del nucleo atomico alla luce dei risultati degli esperimenti di collisione e di disintegrazione nucleare prodotti da particelle alfa.[10] In particolare era stato osservato che, per effetto dell'urto di tali particelle, dai nuclei degli atomi di ossigeno e di azoto venivano emessi due tipi di particelle: le une, a lungo *range*, erano certamente dei protoni; le altre, a più corto *range*, sembravano essere particelle di carica positiva doppia e massa pari a 3 unità di massa atomica. La conclusione di Rutherford era che, insieme ai protoni ed alle particelle alfa, anche queste particelle costituivano dei componenti dei nuclei atomici. Il protone e l'elettrone restavano i veri costituenti elementari della materia. La particella alfa e la nuova particella, costituita da 3 protoni e 1 elettrone, rappresentavano strutture particolarmente stabili che conservavano la loro individualità all'interno dei nuclei. A questo punto Rutherford proseguiva:

> Se questa ipotesi è corretta, sembra molto probabile che un elettrone possa anche legarsi a due protoni e possibilmente anche ad un solo protone. Nel primo caso, ciò implica la possibile esistenza di un atomo di massa circa 2 [unità di massa atomica] e carica unitaria, e questo può essere considerato come un isotopo dell'idrogeno. Nel secondo caso, si ha l'ipotesi della possibile esistenza di un atomo di massa 1 e carica nucleare nulla. Un struttura atomica di questo tipo non sembra per nulla impossibile. Secondo le conoscenze attuali, l'atomo neutro di idrogeno è visto come un nucleo di carica unitaria [protone] con un elettrone legato ad una certa distanza, e lo spettro dell'idrogeno è attribuito ai movimenti di questo elettrone. In certe condizioni, però, può accadere che un elettrone si leghi molto più strettamente ad un protone, formando una sorta di doppietto neutro. Un tale atomo avrebbe delle proprietà del tutto nuove. Il suo campo esterno sarebbe praticamente nullo, tranne che nelle immediate vicinanze, e di conseguenza esso potrebbe muoversi liberamente attraverso la materia. Probabilmente sarebbe difficile rivelare la sua presenza mediante lo spettroscopio, e potrebbe essere impossibile confinarlo in un recipiente chiuso. D'altro canto, esso dovrebbe entrare facilmente nella struttura degli atomi, con la possibilità sia di unirsi con il nucleo sia di essere disintegrato a causa del suo campo intenso, con la possibile emissione di un atomo di idrogeno carico o di un elettrone o di entrambi.[11]

[9] Per una descrizione del Cavendish Laboratory intorno al 1930 cfr. M. Oliphant, *Rutherford: Recollections of the Cambridge Days*, Amsterdam 1972; *Cambridge Physics in the Thirties*, J. Hendry ed., Bristol 1984.

[10] E. Rutherford, *Collision of α particles with light atoms*, «Philosophical Magazine», *37* (1919), 537-587.

[11] E. Rutherford, *Bakerian Lecture*, cit. (n. 7), p. 396.

L'esistenza di una tale struttura stabile, sottolineava il direttore del Cavendish, rendeva possibile spiegare la formazione dei nuclei degli elementi pesanti come successiva aggregazione di particelle neutre costituite da combinazioni di più doppietti neutri, laddove l'aggiunta di particelle cariche avrebbe richiesto velocità molto elevate per superare l'intenso campo repulsivo. Rutherford usò in seguito la parola neutrone per indicare il suo «doppietto neutro», un termine già usato da W. Nernst nel 1903.[12]

Come si è detto, l'ipotesi di partenza si rivelerà sbagliata: lo stesso Rutherford, insieme a Chadwick, dimostrò infatti che le particelle di massa 3 e carica 2 erano in realtà delle particelle alfa provenienti dalla sorgente radioattiva.[13] L'idea dell'esistenza di una particella neutra, formata dalla stretta associazione di un protone e di un elettrone, non fu però abbandonata da Rutherford, anche se solo in una occasione vi fece riferimento pubblicamente negli anni successivi.[14] In particolare questa idea continuò ad essere argomento di discussione tra lui e Chadwick, che già era stato collaboratore di Rutherford a Manchester e quindi era arrivato al Cavendish nel 1920, subito dopo la *Bakerian Lecture*. Ecco come lo stesso Chadwick ricorda queste discussioni:

> Era durante i periodi di attesa prima di cominciare a contare [le scintillazioni] che egli mi esponeva lungamente le sue idee sul problema della struttura nucleare, e in particolare sulla difficoltà di capire come potessero formarsi nuclei complessi se le sole particelle elementari disponibili erano il protone e l'elettrone, e quindi la necessità di invocare l'aiuto del neutrone. Egli riconosceva francamente che si trattava in gran parte di pura speculazione e quindi, data la sua contrarietà ad ogni speculazione non suffragata da una qualche base sperimentale, raramente parlava sull'argomento al di fuori di discussioni private. [...] Egli non aveva abbandonato l'idea e mi aveva completamente convertito.[15]

Negli anni successivi, Rutherford and Chadwick non mancarono di cercare, e di far cercare dai loro giovani collaboratori, le prove sperimentali dell'esistenza del neutrone: alcuni di questi esperimenti, pur portando a risultati negativi, meritarono l'onore della pubblicazione;[16] altri furono «così disperati e così complicati da sembrare appartenere ai giorni dell'alchimia».[17]

[12] W. Nernst, *Theorestische Chemie*, Stuttgart, 1903, p. 391.

[13] E. Rutherford, J. Chadwick, *On the origin and nature of long-range particles observed with sources of Radium C*, «Philosophical Magazine», *48* (1924), 509-526.

[14] E. Rutherford, *Structure of the radioactive atom and origin of the α-rays*, «Philosophical Magazine», *4* (1927), 580-605.

[15] J. Chadwick, *Some personal notes on the discovery of the neutron*, in *Cambridge Physics*, cit. (n. 11), 42-45, p. 42.

[16] J.L. Glasson, *Attempts to detect the presence of neutrons in discharge tube*, «Philosophical Magazine», *42* (1921), 596-600; J.K. Roberts, *The relation between the evolution of heat and the supply of energy during the passage of an electric discharge through hydrogen*, «Proceedings of the Royal Society», *A 102* (1922), 72-88.

[17] J. Chadwick, *Personal notes*, cit. (n. 15), p. 42.

La linea di attacco che sembrava più promettente era quella di cercare i neutroni eventualmente emessi in seguito alla disintegrazione di nuclei leggeri bombardati con particelle alfa, in particolare quei nuclei che non emettono protoni in seguito alla disintegrazione. Un elemento interessante da questo punto di vista era il berillio: oltre a non emettere protoni, infatti, il nucleo del berillio, di peso atomico 9 e carica 4, poteva essere composto di due particelle alfa e di un neutrone. Così Chadwick provò a bombardare il berillio non soltanto con raggi alfa ma anche con raggi beta e con raggi gamma, cercando inutilmente sullo schermo fluorescente deboli scintillazioni prodotte da una radiazione non deviata da un campo magnetico. In realtà, come vedremo, Chadwick non disponeva di sorgenti di particelle alfa sufficientemente intense né dei rivelatori adatti.

Proprio il berillio costituì il cardine su cui questa linea di ricerca perseguita al Cavendish, interessata alla radiazione alfa ed alla disintegrazione artificiale dei nuclei, si intrecciò con un'altra linea di ricerca che emergeva in quegli anni nei laboratori impegnati nello studio della radioattività e dei fenomeni nucleari: quella relativa alle proprietà della radiazione gamma ed alla sua interazione con la materia. Nel 1929, S. Rosenblum aveva scoperto la struttura fine dello spettro delle particelle alfa, e cioé il fatto che queste vengono emesse in gruppi di energia ben definita.[18] L'anno successivo, G. Gamow aveva fornito una spiegazione di questo fenomeno, ipotizzando che le particelle alfa fossero emesse con energie corrispondenti a diversi livelli energetici nucleari e che la differenza fosse compensata dall'emissione simultanea di un quanto gamma.[19] Nello stesso tempo si era scoperto che anche i protoni emessi da nuclei leggeri in seguito a bombardamento alfa presentavano diverse energie. Chadwick aveva osservato questo fenomeno con l'alluminio in alcuni esperimenti effettuati nel 1925-26, i cui risultati furono però pubblicati solo nel 1929.[20] W. Bothe e H. Fränz, a Berlino, pubblicarono nel 1928 i risultati ottenuti bombardando il boro con le particelle alfa del polonio, che mostravano la complessità dello spettro dei protoni emessi.[21] L'idea di cercare se, anche in questo caso, veniva emessa contemporaneamente una radiazione gamma era immediata.

L'investigazione di questo tipo di fenomeno richiedeva però una diversa tecnica sperimentale rispetto a quella usuale al Cavendish. Qui infatti le sorgenti di radiazione usate erano normalmente derivate dal radio e dal thorio e la tecnica di rivelazione cara a Rutherford era quella basata sul conteggio delle scintillazioni prodotte dalle particelle cariche su uno schermo di solfuro di zinco. I limiti di tale metodo sono così riassunti da Chadwick:

[18] S. Rosenblum, *Structure fine du spectre magnetique des rayons α du Thorium C*, «Comptes Rendus de l'Académie des Sciences», *188* (1929), 1401-1403.

[19] G. Gamow, *Fine structure of α-rays*, «Nature», *126* (1930), 397.

[20] E. Rutherford, J. Chadwick, *Energy relations in artificial disintegrations*, «Proceedings of the Cambridge Philosophical Society», *25* (1929), 186. Intervista di Chadwick con C. Weiner, 15-21 Aprile 1969, tracrizione presso il Center for History of Physics, American Institute of Physics, New York, p. 36-37.

[21] W. Bothe, H. Fränz, *Atomtrümmer, reflektierte α-Teilchen und durch α-Strahlen erregte Röntgenstrahlen*, «Zeitschrift für Physik», *49* (1928), 1-26.

> Il metodo delle scintillazioni, sebbene semplice e potente, ha certi svantaggi che non possono essere evitati. La fatica del conteggio delle scintillazioni è tale che gli osservatori devono essere controllati con cura, e si può permettere loro di contare solo per periodi di tempo limitati, fino a un totale di circa 6 ore alla settimana. L'accumulazione dei risultati con il metodo delle scintillazioni è pertanto lungo e noioso. Inoltre, non si può ottenere alcuna registrazione permanente delle scintillazioni.[22]

Oltre a tali inconvenienti, gli schermi di solfuro di zinco erano praticamente insensibili alla radiazione gamma e un cambiamento di tecnica si imponeva quindi, nel momento in cui si voleva passare dall'osservazione delle particelle cariche a quella della radiazione gamma. Solo a partire dalla seconda metà degli anni '20 Patrick Blackett riuscì a perfezionare la camera di Wilson in modo da farne uno strumento utile per la fisica nucleare, mentre i metodi di conteggio elettrici (camere di ionizzazione e contatori Geiger) arrivarono solo alla fine del decennio.[23]

Insieme all'uso di nuove tecniche di rivelazione si poneva anche il problema della sorgente di radiazione alfa. Il radio e il thorio, infatti, oltre a emettere particelle alfa, sono forti emettitori gamma e questa radiazione si sovrapponeva, mascherandola inevitabilmente, all'eventuale radiazione gamma emessa dai nuclei bersaglio. La situazione cambiava radicalmente potendo disporre di polonio, l'elemento radioattivo scoperto da Marie Curie e battezzato con il nome della sua patria. Il polonio, infatti, emette una quantità di radiazione gamma trascurabile ed il suo uso quale sorgente alfa permette quindi di studiare, senza gli inconvenienti dovuti ad una forte radiazione di fondo, l'eventuale emissione gamma da parte dei nuclei bersaglio. L'Institut du Radium di Parigi era particolarmente ricco di sorgenti radioattive, a partire dal preziosissimo grammo di radio donato a M. Curie dalle donne americane, e non mancava di bravi radiochimici per la loro preparazione e purificazione.[24] In particolare, grazie al lavoro di F. Joliot e di I. Curie, l'Institut possedeva certamente la più grande quantità di polonio disponibile in un laboratorio di ricerca (200 millicuries).[25] Nello stesso tempo, i due fisici francesi avevano sviluppato una buona padronanza tecnica sia della camera di ionizzazione che della camera di Wilson. All'avanguardia nel campo della radiochimica, il laboratorio parigino,

[22] J. Chadwick, J. Constable, E. Pollard, *Artificial disintegration by* α-particles, «Proceedings of the Royal Society», *A 131* (1931), 463-489, p. 464.

[23] P. Blackett, *The ejection of protons from nitrogen nuclei, photographed by the Wilson method*, «Proceedings of the Royal Society», *A 107* (1925), 349-360; *An automatic cloud chamber for the rapid production of α-ray photographs*, «Journal of Scientific Instruments», *4* (1927), 433; F. Ward, C. Wynn-Williams, H. Cave, *The rate of emission of α particles from radium*, «Proceedings of the Royal Society», *A 125* (1929), 713-730; C. Wynn-Williams, F. Ward, *Valve methods of reconding single α particles in the presence of powerful ionizing radiations*, «Proceedings of the Royal Society», *A 131* (1931), 391-409.

[24] E. Curie, *Madame Curie*, Paris 1938, p. 257-267.

[25] I. Curie, F. Joliot, *Préparation des sources de polonium de grande densité d'activité*, «Journal de Chimie Physique», *28* (1931), 201-205; M. Goldsmith, *Frédéric Joliot-Curie*, London 1976; p. 38; P. Blackett, *Jean Frédéric Joliot, 1900-1958*, «Biographical Memoirs of Fellows of the Royal Society», *6* (1960), 87-105, p. 89.

mancava però della solida tradizione di ricerca nel campo della fisica nucleare che caratterizzava il Cavendish Laboratory di Rutherford.

Il problema del polonio fu risolto al Cavendish grazie ad una circostanza casuale. Uno dei ricercatori del laboratorio, Norman Feather, aveva trascorso un periodo di studio presso il Dipartimento di Fisica della John Hopkins University, a Baltimora, negli Stati Uniti, dove aveva conosciuto il responsabile della gestione del radio al Kelly Hospital. Questo ospedale privato disponeva di 5 grammi radio in soluzione, da cui si traevano ogni giorno circa 700 millicurie di radon che veniva sigillato dentro un contenitore di vetro per esser quindi usato a scopo medico. I magazzini dell'ospedale possedevano centinaia di conteniori di questo tipo, dalla radioattività ormai troppo debole per l'uso medico ma, allo stesso tempo, troppo elevata per potere essere gettati via. In tali contenitori si era formato tanto polonio quanto ce n'era a Parigi e il direttore dell'ospedale fu ben lieto di regalarne molti al Cavendish, dove fu possibile estrarre il polonio da usare come sorgente «pulita» di particelle alfa.[26]

Avendo finalmente a disposizione il polonio, Chadwick e i suoi collaboratori si misero al lavoro. In particolare, H. Webster fu incaricato di studiare l'emissione di radiazione gamma stimolata da bombardamento alfa, un compito che si rivelerà più lungo del previsto e i cui risultati saranno pubblicati solo all'inizio del 1932: ci torneremo in seguito. Lo stesso Chadwick, insieme a J. Constable ed a E. Pollard, si occupò di studiare la struttura spettrale dei protoni emessi dalla disintegrazione dei nuclei leggeri allo scopo ricavare informazioni circa la struttura e i livelli energetici dei nuclei stessi.[27] Essi non mancarono di bombardare anche il berillio e, come ricordò in seguito Chadwick, «per un certo tempo breve ma eccitante pensammo di avere trovato una qualche evidenza del neutrone».[28]

Le novità sul berillio arrivarono invece da Berlino, dove Walter Bothe e Hans Becker pubblicarono nel 1930 i primi risultati di esperimenti sull'emissione gamma stimolata da bombardamento alfa.[29] Essi avevano analizzato tutti gli elementi dal litio all'ossigeno, il magnesio, l'alluminio e l'argento, trovando un effetto positivo per boro, magnesio e ossigeno (com'era da aspettarsi visto che tali elementi si disintegrano con emissione di protoni) e anche, sorprendentemente, per il berllllo. In questo caso la radiazione emessa risultava molto più penetrante di quella emessa dagli altri elementi e addirittura più penetrante della radiazione gamma del radio. Il calcolo dell'energia della radiazione, a partire dal suo potere penetrante, dava valori dell'ordine della decina di milioni di elettron-Volt, un risultato imbarazzante perchè si trattava di un'energia maggiore di quella delle particelle alfa incidenti. La spiegazione possibile era che la particella alfa fosse assorbita dal nucleo di berillio,

[26] N. Feather, *The experimental discovery of the neutron*, in *Cambridge Physics*, cit. (n. 9), 31-41.

[27] J. Chadwick, J. Constable, E. Pollard, *Artificial disintegration by α-particles*, «Proceedings of the Royal Society», *A 131* (1931), 463-489.

[28] J. Chadwick, *Personal notes*, cit. (n. 15), p. 44. Di tale ricerca sul berillo, che, come si è detto, non emette protoni per bombardamento alfa, non si parla nell'articolo pubblicato.

[29] W. Bothe, H. Becker, *Künstliche Erregung von Kernen-γ-strahlen*, «Zeitschrift für Physik», *66* (1930), 289-306.

con la successiva emissione, da parte del nuovo nucleo così formatosi, di una grande quantità energia sotto forma di quanto gamma.[30]

Si trattava indubbiamente di un fenomeno nuovo, il cui interesse stava non soltanto nella scoperta di una nuova proprietà dei nuclei atomici ma anche nel fatto che l'associazione polonio-berillio offriva una sorgente di raggi gamma di energia molto più elevata di quella delle ordinarie sostanze radioattive, permettendo così di studiare l'interazione tra la radiazione gamma e la materia ad energie fino ad allora inaccessibili. Proprio in quel periodo, esperimenti condotti con raggi gamma di alta energia avevano rivelato che, oltre alla normale diffusione Compton da parte degli elettroni periferici degli atomi, questi subivano un assorbimento aggiuntivo che non poteva che essere attribuito all'interazione col nucleo.[31] L'uso della sorgente polonio-berillio permetteva di indagare questo fenomeno ad energia più elevata e ricavare così ulteriori informazioni circa la struttura dei nuclei.

Si aprivano pertanto due diverse prospettive nel considerare il fenomeno scoperto da Bothe e Becker: la prima guardava al processo di emissione, cercando di rendere conto dell'assorbimento della radiazione alfa da parte dei nuclei di berillio e della successiva emissione della radiazione gamma; la seconda guardava a quest'ultima come oggetto sperimentale nel contesto di un diverso ambito fenomenico, considerando la sorgente polonio-berillio non diversamente da una qualunque sostanza radioattiva emettitrice gamma. Vedremo come queste due diverse prospettive porteranno Chadwick da una parte e Curie e Joliot dall'altra a guardare con occhi diversi allo stesso fenomeno.

Disponendo di una intensa sorgente di polonio, I. Curie e F. Joliot non potevano non investigare il fenomeno scoperto da Bothe e Becker. Alla fine di Dicembre 1931 essi comunicarono all'Académie des Sciences i risultati ottenuti bombardando il litio, il berillio e il boro, e confermarono che bombardando i nuclei di questi elementi si aveva l'emissione di una radiazione gamma di grande potere penetrante. L'energia della radiazione, calcolata a partire dal suo coefficiente di assorbimento risultava dell'ordine di 15-20 MeV nel caso del berillio e di circa 11 MeV nel caso del boro e cioé, come venne esplicitamente sottolineato, intermedia tra quella dei più energetici raggi gamma da sostanze radioattive e quella dei raggi cosmici.[32]

Quest'ultima affermazione merita un commento. Proprio nei giorni in cui i due fisici francesi facevano i loro esperimenti, l'americano Robert Millikan, in visita

[30] W. Bothe, *Erwungene Kernprozesse*, «Physikalische Zeitschrift», *32* (1931), 661-662.

[31] C.Y. Chao, *The absorption coefficient of hard γ -rays*, «Proceedings of the National Academy of Sciences», *16* (1930), 431-433; G.T.P. Tarrant, *The absorption of hard monochromatic γ-radiation*, «Proceedings of the Royal Society», *128* (1930), 345-359; L. Meitner, H.H. Hupfled, *Uber das Absorptiongesetz für kurzwellige γ-strahlung*, «Zeitschrift f. Physik», *67* (1931), 147-168. Come sarà chiaro dopo gli esperimenti di P. Blackett e G. Occhialini del 1932-33, questo «assorbimento nucleare» corrisponde alla produzione di coppie; M. De Maria, A. Russo, *The discovery of the positron*, «Rivista di Storia della Scienza», *2*:2 (1985), 237-286.

[32] I. Curie, *Sur le rayonnement nucleaire excité dans le glucinium et dans le lithium par les rayons du polonium*, «Comptes Rendus de l'Académie des Sciences», *193* (1931), 1412-1414; F. Joliot, *Sur l'excitation des rayons nucleaires du bore par les particules α. Energie quantique du rayonnement γ du polonium*, ibidem, 1415-1417. Entrambe queste comunicazioni furono presentate alla seduta dell'Académie del 28 Dicembre 1931.

in Europa, tenne una conferenza all'Institut Poincaré di Parigi sui risultati delle sue ricerche sui raggi cosmici.[33] Qui egli presentò alcune fotografie in camera di Wilson che aveva appena ricevuto dal suo giovane collaboratore Carl Anderson e che mostravano come l'interazione dei raggi cosmici con la materia produceva l'emissione di particelle positive e negative e non solo gli elettroni che ci si sarebbe aspettati come prodotto dell'interazione Compton.[34] Sulla base dei risultati circa il ruolo dei nuclei nell'assorbimento dei raggi gamma e nella convinzlone che i raggi cosmici non fossero altro che fotoni di altissima energia, la conclusione di Millikan era che questi ultimi interagissero essenzialmente con i nuclei degli atomi e che, per effetto dell'interazione, fossero liberati protoni ed elettroni.[35] Il quadro fenomenologico relativo all'interazione della radiazione gamma con la materia sembrava assumere così una precisa coerenza: a bassa energia essi interagiscono principalmente con gli elettroni esterni dell'atomo (effetto fotoelettrico ed effetto Compton); al crescere dell'energia comincia a farsi sentire l'effetto dell'interazione con i nuclei; quando l'energia raggiunge gli altissimi valori dei raggi cosmici l'interazione è principalmente con i nuclei. Il passo successivo, per uno sperimentale, era ovvio: studiare l'interazione della radiazione gamma da polonio-berillio con la materia per verificare tale quadro in una regione di energia intermedia.

Questo fecero Joliot e Curie, usando una camera di ionizzazione associata ad un elettrometro per cercare i protoni emessi in seguito alle interazioni nucleari di questa radiazione. Essi scoprirono però un fenomeno del tutto nuovo, che fu comunicato all'Académie des Sciences l'11 Gennaio 1932: l'emissione di protoni si aveva solo se la radiazione incideva su sostanze idrogenate (paraffina, cellophane, acqua) e sembrava dovuta quindi non ad un fenomeno di disintegrazione ma piuttosto ad un processo di urto analogo a quello tipico dell'effetto Compton.[36] In questo caso un elettrone di un orbita periferica di un atomo viene messo in moto dall'urto di un fotone incidente, nel caso del fenomeno scoperto dalla coppia Curie-Joliot era il nucleo di un atomo di idrogeno (protone) ad essere proiettato in avanti, con un'energia di circa 4,5 MeV nel caso della radiazione polonio-berillio e di circa 2 MeV nel caso della radiazione polonio-boro. Ecco le conclusioni che essi formulavano circa la loro scoperta:

> L'interpretazione del fenomeno è resa difficile dal fatto che non si può stimare con precisione l'energia dei fotoni emessi dal berillio e dal boro. Se

[33] R. Millikan, *Sur les rayons cosmiques*, «Annales de l'Institut Henri Poincaré», *3* (1933), 447-464. La conferenza fu tenuta il 20 Novembre 1931.

[34] C. Anderson, lettera a R. Millikan, 3 Novembre [1931], *Millikan Papers,* California Institute of Technology, cartella 22.3 (copia in microfilm presso il National Museum of American History, Washington).

[35] Come Anderson scoprì poco meno di un anno dopo, le tracce di particelle positive erano dovute in realtà non a protoni ma ad elettroni positivi (positroni): cfr. M. De Maria, A. Russo, *The discovery of the positron*, cit. (n. 31).

[36] I. Curie, F. Joliot, *Emission de protons de grande vitesse par le substances hydrogénées sous l'influence des rayons* γ *très pénétrants*, «Comptes Rendus de l'Académie des Sciences», *194* (1932), 273-275.

si suppone che i fotoni possono comunicare ai protoni una parte della loro energia mediante un processo analogo all'emissione di elettroni per effetto Compton, si trova che l'energia della radiazione del berillio e del boro sarebbe rispettivamente dell'ordine di 50 MeV e di 35 MeV. Il fatto che vi sia una grande differenza tra questi valori e quelli dati in precedenza (15-20 MeV e 11 MeV) non è una ragione sufficiente per rigettare questa ipotesi, considerando i grandi errori che si possono commettere quando si calcola l'energia di una radiazione gamma molto penetrante a partire dal suo coefficiente di assorbimento Quale che sia l'interpretazione che si può dare di questo fenomeno, è probabile che esso si verifichi con ogni radiazione elettromagnetica di energia molto elevata, in particolare con i raggi cosmici, se essi sono di natura elettromagnetica».[37]

Il passo successivo fu quello di studiare il fenomeno anche con una camera di Wilson e nello stesso tempo misurare con precisione l'assorbimento dovuto a questo nuovo processo. I risultati furono presentati all'Académie il 22 Gennaio e rendevano necessaria una nuova interpretazione.[38] In primo luogo si era osservato che la radiazione del berillio produceva, oltre alla proiezione di protoni, anche la proiezione di elettroni di alta energia, presumibilmente per effetto Compton; in secondo luogo il confronto tra questa radiazione e la radiazione gamma del TorioC'' mostrava che l'assorbimento della prima da parte dei nuclei di idrogeno era estremamente elevato; infine si era visto che anche nuclei di elio erano messi in movimento dalla radiazione, suggerendo quindi che «il fenomeno della proiezione di nuclei di atomi da parte della radiazione gamma di alta energia è probabilmente un fenomeno generale».[39]

L'ipotesi che si trattasse di effetto Compton su protoni non reggeva più, in quanto era facile calcolare, tramite la formula di Klein-Nishina, che la probabilità di tale processo era troppo piccola per spiegare il grande assorbimento osservato. Così, concludono gli autori, l'assorbimento «per proiezione di nuclei atomici» corrisponde ad un nuovo modo di interazione della radiazione gamma con la materia, che si aggiunge a quelli già noti, effetto fotoelettrico ed effetto Compton, e all'assorbimento per diffusione nucleare messo in luce dagli esperimenti recenti.

In quegli stessi giorni, dall'altro lato della Manica, Chadwick aveva già raggiunto una conclusione radicalmente differente. Come si è detto, nel 1930 egli aveva incaricato H. Webster di studiare l'emissione di radiazione gamma stimolata da bombardamento alfa, usando sia dei contatori Geiger-Müller che delle camere di ionizzazione. In un primo tempo il giovane ricercatore aveva avuto delle difficoltà, data la bassa intensità della sorgente di polonio e la poca familiarità nell'uso dei contatori Geiger-Müller. Successivamente Webster poté compiere uno studio sistematico, bombardando diversi elementi.[40]

[37] Ibidem, p. 274-275.

[38] I. Curie, F. Joliot, *Effet d'absorption de rayons γ de très haute frequence par projection de noyaux légers*, «Comptes Rendus de l'Académie des Sciences» *193* (1931), 708-711.

[39] Ibidem, p. 710.

[40] H.C. Webster, *The artificial production of nuclear γ-radiation*, «Proceedings of the Royal Society», *A 136* (1932), 428-453.

Ancora una volta il berillio diede i risultati più accurati e più interessanti. Egli trovò infatti che la radiazione emessa dal berillio nella stessa direzione delle particelle alfa incidenti era molto più penetrante di quella emessa nella direzione opposta. Era difficile immaginare un processo all'interno del nucleo capace di dare origine a raggi gamma con questo tipo di asimmetria; molto più immediata sembrava un'ipotesi che considerasse un urto tra particelle e forse qui stava finalmente la prova, lungamente cercata, che dai nuclei di berillio, in seguito al bombardamento alfa, fuoriuscissero neutroni. Chadwick suggerì a Webster di guardare al fenomeno con una camera di Wilson e quest'ultimo chiese al collega F.C. Champion, un esperto di questo strumento, di prendere alcune fotografie con la camera predisposta in modo da registrare la traccia della debole ionizzazione che si credeva il neutrone dovesse lasciare lungo il suo percorso. Non si trovò nulla e Webster fu costretto a concludere che «È giustificabile, almeno fino ad oggi, assumere che la radiazione [del berillio] è di natura elettromagnetica».[41] Lo strano fenomeno messo in luce dai suoi esperimenti restò cosi senza una spiegazione convincente.

Chadwick contava di riprendere lui stesso questa linea di ricerca ma ne fu impedito da altri impegni, finché, alla fine di Gennaio 1932, non arrivò il fascicolo dei *Comptes Rendus* con il primo articolo di Curie e Joliot che riportava la notizia del nuovo, sorprendente fenomeno connesso alla radiazione del berillio e l'interpretazione che ne davano i due fisici francesi in termini di effetto Compton. Il seme era caduto su un terreno ormai pronto a riceverlo:

> Non molti minuti più tardi arrivò Feather nella mia stanza per parlarmi di questo articolo, ed era stupito quanto lo ero io. Un pò più tardi, quella stessa mattina, ne parlai con Rutherford. [...] Non appena gli dissi del fenomeno osservato da Curie-Joliot e della loro interpretazione, vidi la sua meraviglia crescere finché esclamò: «Non ci credo». Un commento cosi poco meditato era del tutto estraneo al suo carattere, e nella mia lunga associazione con lui non ricordo un'altra occasione simile. Dico questo per mettere in evidenza l'effetto fortemente stimolante dell'articolo di Curie-Joliot. Ovviamente Rutherford concordava sul fatto che bisognava credere alle osservazioni; la spiegazione però era un'altra storia».[42]

Per chi aveva cercato a lungo una particella neutra (quindi di elevato potere penetrante) e di massa simile a quella del protone (quindi capace di proiettarlo in avanti in seguito ad un urto), e che non era mai stato del tutto convinto della natura elettromagnetica della radiazione del berillio, il fenomeno che a Parigi era stato visto come l'effetto Compton di una radiazione gamma di alta energia non poteva non offrire immediatamente l'immagine dell'urto di una particella su un'altra. A queste considerazioni va aggiunto il fatto che al Cavendish si era molto scettici sull'interpretazione di Millikan circa la natura e le proprietà di interazione dei raggi cosmici. Dopo Parigi, lo scienziato americano aveva tenuto una conferenza anche

[41] Ibidem, p. 440. Cfr. l'intervista di Chadwick, cit. (n. 20), p. 71-72.
[42] J. Chadwick, *Personal notes*, cit. (n. 15), p. 45.

a Cambridge ma la forza delle sue argomentazioni era bilanciata dal peso dei risultati degli esperimenti di W. Bothe e W. Kolhorster e di B. Rossi, che suggerivano che la radiazione cosmica fosse di natura corpuscolare.[43] Blackett aveva ascoltato con interesse la relazione di Rossi al recente Congresso di Fisica Nucleare tenutosi a Roma (Ottobre 1931) e il giovane assistente di Rossi, G. Occhialini, lavorava con lui al Cavendish da alcuni mesi. Infine, la problematica relativa all'interazione tra la radiazione gamma e la materia, che pure era oggetto del lavoro di due giovani ricercatori del Cavendish, L.H. Gray e G.P.T. Tarrant, era abbastanza marginale rispetto agli indirizzi più seguiti nel laboratorio e comunque fuori dagli interessi di Chadwick.[44] Per quest'ultimo, era la natura della radiazione del berillio il problema da risolvere, non l'interazione gamma-materia.

Grazie al lavoro di Webster e dello stesso Chadwick la strumentazione era già pronta e dai tubi spenti del Kelly Hospital era ormai possibile trarre la sorgente di polonio ad alta intensità che era necessaria: «Pochi giorni di intenso lavoro bastarono a dimostrare che questi strani effetti erano dovuti ad una particella neutra e permisero di misurare la sua massa: il neutrone postulato da Rutherford nel 1920 si era infine rivelato».[45] Il 17 Febbraio Chadwick inviò una nota preliminare a *Nature*,[46] il 23 ne parlò ad una riunione del *Kapitza Club* di Cambridge, il circolo scientifico organizzato nell'abitazione del fisico russo P.L. Kapitza;[47] il giorno dopo ne scrisse a Niels Bohr, inviandogli una copia della lettera a *Nature*;[48] il 28 Aprile ne discusse ad una riunione della Royal Society;[49] e finalmente, il 10 Maggio, inviò un lungo articolo ai *Proceedings of the Royal Society* insieme ad altri due dei suoi più stretti collaboratori.[50]

In primo luogo Chadwick si preoccupa di dimostrare l'insostenibilità dell'ipotesi per cui il fenomeno-osservato da Curie e Joliot sarebbe dovuto ad effetto Compton. L'energia richiesta sarebbe, infatti, dell'ordine di 50 MeV mentre supponendo un processo del tipo:

$$\alpha + Be_9 \rightarrow C_{13} + \gamma$$

[43] W. Bothe, W. Kolhörster, *Das Wesen der Höhenstrahlung*, «Zeitschrift für Physik», *56* (1929), 751-777; B. Rossi, *Sull'origine della radiazione corpuscolare penetrante nell'atmosfera*, «Nuovo Cimento», *8* (1931), 49-70; *Uber den Ursprung der durchdringenden Korpuscularstrahlung der Atmosphäre*, «Zeitschrift für Physik», *68* (1931), 64-84.

[44] Per questi aspetti cfr. M. De Maria, A. Russo, *The discovery of positron*, cit. (n. 31).

[45] J. Chadwick, *Personal notes*, cit. (n. 15), p. 45.

[46] J. Chadwick, *Possibile existence of a neutron*, «Nature», *129* (1932), 312 (lettera datata 17 febbraio 1932).

[47] Programma del *meeting* 302 del *Kaptiza Club*, 23 Febbraio 1932, in «Archive for the History of Quantum Physics».

[48] J. Chadwick, lettera a N. Bohr, 24 Febbraio 1932, *Bohr Scientific Correspondence*, in «Archive for the History of Quantum Physics».

[49] *Discussion on the structure of atomic nuclei*, «Proceeding of the Royal Society», *A 136* (1932), 735-762; il contributo di Chadwick è a p. 744-748.

[50] J. Chadwick, *The existence of the neutron*, «Proceedings of the Royal Society», *A 136* (1932), 692-708; N. Feather, *The collision of neutrons with nitrogen nuclei*, ibidem, 709-727; P.I. Dee, *Attempts to detect the interaction of neutrons with electrons*, ibidem, 727-734.

L'energia del fotone non può essere maggiore di circa 14 MeV. A ciò si aggiunge una ulteriore contraddizione messa in evidenza dagli esperimenti dello stesso Chadwick. Egli trovò infatti che, oltre ai nuclei di idrogeno, anche nuclei più pesanti erano proiettati in avanti dalla radiazione del berillio, con una energia molto maggiore di quella che ci si sarebbe dovuti aspettare dall'urto con un fotone da 50 MeV. In generale si trovava che quanto maggiore era la massa del nucleo messo in movimento tanto maggiore doveva essere l'energia del quanto incidente. È evidente, questa la conclusione di Chadwick, «che l'ipotesi fotonica può essere sostenuta solo se si abbandona la conservazione dell'energia e del momento».[51]

Il secondo passo è quello di dimostrare che l'ipotesi che la radiazione del berillio sia composta di neutroni può rendere conto coerentemente dei fenomeni osservati. In questo caso la reazione di formazione sarebbe la seguente:

$$\alpha + Be_9 \rightarrow C_{12} + n$$

un processo del tutto analogo a quello della disintegrazione artificiale con la differenza che, invece di protone viene emesso neutrone. Il bilancio energetico di questo processo permette di calcolare che la velocità del neutrone non può essere superiore a circa $3{,}9 \times 10^9$ cm/sec e quindi, avendo la stessa massa, questa è anche la velocità massima con cui un protone può essere proiettato in avanti: sperimentalmente si trovava infatti che la velocità massima dei protoni proiettati in avanti dalla radiazione era $3{,}3 \times 10^9$ cm/sec. Un'analoga concordanza si trovava nel caso della proiezione dei nuclei di altri elementi.

Chadwick poté anche rendere conto degli elettroni emessi dalla radiazione del berillo, un fenomeno già osservato a Parigi e confermato dopo la pubblicazione della lettera di Chadwick a *Nature*. Per spiegare i due diversi fenomeni — proiezione di elettroni e di protoni ad alta energia — i francesi avevano suggerito che la radiazione del berillo fosse composta di due componenti: fotoni e neutroni.[52] Secondo Chadwick, raggi gamma possono essere prodotti insieme ai neutroni attraverso un processo del tipo:

$$\alpha + Be_9 \rightarrow C_{12}^* + n$$

$$C_{12}^* \rightarrow C_{12} + \gamma$$

in cui il nucleo di carbonio viene creato in uno stato eccitato e decade successivamente con l'emissione di un fotone, analogamente all'emissione radioattiva di raggi alfa o all'emissione stimolata di protoni. Si avrebbero cioè due gruppi di neutroni

[51] J. Chadwick, *Possible existence*, cit. (n. 46), p. 312.

[52] I. Curie, F. Joliot, *Projections d'atomes par les rayons très pénétrants excités dans les noyaus légers*, «Comptes Rendus de l'Académie des Sciences», *194* (1932), 876-877; P. Auger, *Sur la projection de noyaux légers par les rayonnements ultra-pénétrants de radioactivité provoquée. Trajectoires photographiées par la méthode de Wilson*, ibidem, 877-879;. I. Curie, F. Joliot, *Sur la nature du rayonnement pénétrant excité dans les noyaux légers par les particules* α, ibidem, 1229-1232. La stessa conclusione fu raggiunta da Becker e Bothe, «Naturwissenschaften», *20* (1932), 349.

di energia diversa ed una radiazione gamma di energia pari alla differenza in energia tra i due gruppi. In ogni caso l'energia dei fotoni non può essere superiore a quella massima dei neutroni, pari all'energia massima dei protoni osservati e cioè 5,7 MeV.

Chadwick suggerisce anche che occasionalmente vi possa essere un processo del tipo:

$$\alpha + Be_9 \rightarrow C_{13} + \gamma$$

In questo caso, come si è visto, l'energia del fotone deve essere dell'ordine di 10 MeV. Entrambi tali valori, sottolinea Chadwick, si accordano con le osservazioni dei francesi e con quelle di Webster.

Non v'era alcun dubbio per Chadwick, che il neutrone da lui scoperto non era altro che la particella composta ipotizzata da Rutherford 12 anni prima: «Noi possiamo supporre che il protone e l'elettrone formino un piccolo dipolo, oppure possiamo considerare l'immagine più attraente di un protone immerso in un elettrone».[53] La stessa idea venne ribadita da Chadwick un anno dopo nella sua *Bakerian Lecture* e, sia pure con maggiore perplessità, nella relazione al settimo Congresso Solvay.[54] Oltre alla forza della tradizione pesava per Chadwick l'evidenza sperimentale che gli forniva per la massa del neutrone un valore leggermente inferiore alla somma delle masse di un protone e di un elettrone, corrispondente ad un'energia di legame dell'ordine di 1-2 MeV.

Naturalmente il neutrone composto non risolveva le contraddizioni dovute agli elettroni nucleri, riproponendo tutte le difficoltà connesse allo spin e alla statistica. Una visione diversa, quella di un neutrone inteso come una particella elementare vera e propria, fu avanzata, subito dopo la pubblicazione della scoperta di Chadwick, dal fisico russo D. Iwanenko, dell'Istituto Fisico-Tecnico dell'Università di Leningrado, il quale propose un modello di nucleo composto di soli protoni e neutroni, considerati entrambi come particelle elementari di spin 1/2.[55] La stessa idea fu avanzata da un altro scienziato lontano dalla tradizione scientifica del Cavendish, l'italiano Ettore Majorana, il quale però aspettò un anno prima di pubblicare la sua originale teoria circa la struttura dei nuclei.[56]

Le due concezioni, in realtà, continuarono a coesistere, non senza confusione e contraddizioni, ancora per due anni, strette tra i problemi relativi allo spin e alla statistica (che suggerivano il neutrone come particella elementare), quelli relativi al decadimento beta (che sembrava richiedere la presenza di elettroni nucleari), e il valore errato della massa trovato da Chadwick.[57] Questa contraddizione attraver-

[53] J. Chadwick, *Existence*, cit. (n. 50), p. 702.

[54] J. Chadwick, *The neutron* (Bakerian Lecture), «Proceedings of the Royal Society», *A 142* (1933), 1-25; *Diffusion anomale des particules α Transmutation des éléments par des particules α. Le neutron*, in «Structure et Proprieté des Noyaux Atomiques, Rapports et Discussions du Septième Conseil de Physique», Paris 1934, 81-112 (in particolare pp. 102-103).

[55] D. Iwanenko, *The neutron hypothesis*, «Nature», *129* (1932), 798; *Sur la constitution des noyaux atomiques*, «Comptes Rendus de l'Académie des Sciences», *195* (1932), 439-441.

[56] E. Majorana, *Über die Kerntheorie*, «Zeitschrift für Physik», *82* (1933), 137-145. Cfr. E. Segré, *Enrico Fermi, Fisico*, Bologna 1987, p. 72-73.

[57] Cfr. Stuewer, *Nuclear eletron hypothesis*, cit. (n. 3).

sa significativamente anche la famosa «trilogia» di Heisenberg del 1932, che se da un lato tratta per la prima volta il problema della struttura nucleare in termini di interazione tra protoni e neutroni, dall'altro continua a considerare il neutrone come una struttura composta.[58] La strada per la soluzione doveva necessariamente attraversare il nodo del decadimento beta e della validità della conservazione dell'energia nei fenomeni nucleari. E questo ci porta ovviamente a Copenhagen.

Niels Bohr trovò la lettera di Chadwick che gli annunciava la scoperta del neutrone al ritorno da un breve periodo di vacanza nelle montagne bavaresi. Nella sua risposta egli si dice «profondamente interessato» e si affretta ad invitare il fisico Inglese al tradizionale convegno sui principali problemi della fisica che si organizzava ogni anno a primavera nel suo istituto a Copenhagen.[59]

Chadwick non vi poté partecipare, ma la sua particella fu oggetto non soltanto delle discussioni scientifiche tra Bohr, Heisenberg e gli altri convenuti, ma anche della rappresentazione teatrale che, sulla falsariga del *Faust* di Goethe, i giovani ricercatori dell'Istituto misero in scena per rappresentare il dramma della fisica del loro tempo.[60]

Protagonista ne è il neutrone, ma non quello di Rutheford e Chadwick bensì quello proposto dal fisico austriaco W. Pauli, per la prima volta in una lettera del Dicembre 1930 e da allora oggetto di dibattito nella corrispondenza tra i fisici e nelle discussioni informali ai convegni scientifici.[61] Si trattava di una particella neutra, di massa nulla (o comunque piccolissima) e di spin 1/2, emessa dal nucleo contemporaneamente all'elettrone nel decadimento beta in modo da salvare il principio di conservazione dell'energia che Pauli, a differenza di Bohr, non era disposto a sacrificare. Nella farsa rappresentata a Copenhagen, il diabolico Mefistofele-Pauli cerca di convincere lo scettico Faust-Ehrenfest ad accettare appunto questa particella.

Informati della scoperta di Chadwick, gli autori furono costretti ad aggiungere un finale, «Apoteosi del vero neutrone» in cui lo sperimentale Wagner-Chadwick presenta la sua creatura mentre il coro mistico intona il canto:

Adesso realtà
un tempo visione.
Che classicità,
grazia e precisione!
Accolta con cordialità,
onorata nei canti,
Eterna Neutralità
portaci con te![62]

[58] W. Heisenberg, *Über den Bau der Atomkerne*, «Zeitschrift für Physik», *77* (1932), 1-11; *78* (1932), 158-164; *80* (1932), 587-596. Cfr. Bromberg, *Impact of Neutron*, cit. (n. 4). Cfr. anche L. Brown, D. Moyer, *Lady or tiger? - The Meitner - Hupfeld effect and Heisenberg's neutron theory*, «American Journal of Physics», *52* (1984), 130-136.

[59] N. Bohr, lettera a Chadwich, 25 Marzo 1932, *Bohr Scientific Correspondence*, in «Archive for the History of Quantum Physics».

[60] Il testo è riportato in appendice al libro di G. Gamow, *I Trent'anni che Sconvolsero la Fisica*, Bologna 1985 (ed. orig. *Thirty Years That Shook Physics*, New York, 1966).

[61] L.M. Brown, *The idea of the neutrino*, «Physics Today», Settembre 1978, 23-28.

[62] Gamow, *Trent'anni*, cit. (n. 60), p. 197.

Come è noto, Enrico Fermi proporrà la parola italiana neutrino (piccolo neutrone) per indicare la particella di Pauli, e nello stesso tempo presenterà una teoria per il decadimento beta fondata sull'idea di un nuovo tipo di interazione universale.[63] Formulata alla fine del 1933, la teoria di Fermi si può dire che chiuda questa fase di grandi scoperte sperimentali e di profonde incertezze teoriche. Al Congresso Solvay di quell'anno tutti gli aspetti delle nuove scoperte furono analizzati nelle diverse relazioni e lungamente discussi dai principali protagonisti. In particolare Joliot e Curie avevano portato nuovi dati sperimentali che mostravano come la masa del neutrone fosse significativamente più grande di quella del protone.[64] Inoltre, nel corso della discussione seguita alla relazione di Heisenberg, Pauli presentò ancora una volta la sua ipotesi del neutrino quale componente del decadimento beta e Fermi ne fu fortemente influenzato.[65] Con la sua teoria gli elettroni furono finalmente espulsi dal nucleo, il principio di conservazione dell'energia fu confermato e l'interazione debole fece il suo ingresso nella fisica moderna. Con l'introduzione, l'anno successivo, della teoria di H. Yukawa sulle forze nucleari, la nuova generazione di fisici disporrà di tutti gli elementi per una nuova fase di ricerca.[66]

[63] E. Fermi, *Tentativo di una teoria dei raggi β*, «Nuovo Cimento», *11* (1934), 1-19; *Versuch einer Theorie der β-strahlen*, «Zeitschrift für Physik», *88* (1934), 161-177.

[64] I. Curie, F. Joliot, *Rayonnement pénétrant des atomes sous l'action des rayon α*, in «Structure et Proprieté», cit. (n. 54), 121-156; p. 156. Chadwick confermerà a sua volta questo risultato grazie all'esperimento sulla fotodisintegrazione del deutone compiuto insieme a M. Goldhaber: Chadwick, Goldhaber, *A 'nuclear photo-effetc': disintegration of the diplon by gamma-rays*, «Nature», *134* (1934), 237-238.

[65] Structure et Proprieté, cit. (n. 54), p. 324-325.

[66] H. Yukawa, *On the interactions of elementary particles*, «Proceedings of the Physico-Mathematical Society of Japan», *17* (1935), 48-57. Su Yukawa v. L. Brown, *Yukawa's prediction of the meson*, «Centaurus», *25* (1981), 71-132.