

EDOARDO AMALDI (\*)

## A cinquant'anni dalla radioattività artificiale provocata da neutroni (\*\*)

### Parte I

**RISUNTO.** L'autore riferisce sulle fasi principali delle ricerche fatte dal gruppo di Fermi, all'Istituto di Fisica di Via Panisperna, fra il 1934 e il 1936. Dopo aver ricordato la scoperta, da parte di Fermi, della radioattività artificiale provocata da neutroni (marzo 1934), l'autore descrive l'attacco sistematico fatto da Fermi e collaboratori alla maggior parte degli elementi del sistema periodico e la dimostrazione che le reazioni generate dai neutroni emessi dalle sorgenti Ra + Be sono di tre tipi:  $(n, \alpha)$ ,  $(n, p)$  ed  $(n, \gamma)$ .

Nell'ottobre dello stesso anno 1934 il gruppo di Fermi scopre che i neutroni passando attraverso a un mezzo contenente nuclei leggeri, in particolare protoni, perdono energia e che i neutroni lenti così prodotti sono notevolmente più efficaci del neutroni veloci nel dar luogo a processi  $(n, \gamma)$ .

Lo studio dei neutroni lenti porta quindi in breve tempo alla scoperta di nuclei dotati di sezione d'urto anormalmente grande per il processo  $(n, \gamma)$ .

A questo punto Fermi e vari altri autori mostrano che questo risultato può venir interpretato nell'ambito del modello del nucleo a particella singola, facendo uso di considerazioni piuttosto elementari di meccanica quantistica.

Moon e Tillman a Londra, dimostrano che il processo di rallentamento dei neutroni procede fino a ridurre la loro energia pari a quella corrispondente all'agitazione termica degli atomi del mezzo usato per il loro rallentamento, mezzo detto più tardi moderatore. Tale risultato viene confermato (estate-autunno 1935) da varie esperienze meccaniche fatte a Roma, Copenhagen e New York.

Un'analisi dettagliata delle curve di assorbimento dei neutroni lenti porta, nel novembre 1935, alla scoperta che molti nuclei mostrano assorbimenti selettivi che ricordano le righe di risonanza dello spettro ottico degli atomi. Questo fenomeno trova la sua spiegazione in un nuovo modello di nucleo basato sul concetto di *nucleo composto* introdotto da Niels Bohr (gennaio 1936), e la sua rappresentazione quantitativa nella « *formola a un solo livello* » di Breit e Wigner (febbraio 1936), simile, sotto molti aspetti, alla ben nota formula della dispersione ottica.

(\*) Socio dell'Accademia, Dipartimento di Fisica, Università di Roma « La Sapienza », Roma.

(\*\*) Relazione presentata al Convegno « I neutroni e loro applicazioni » nel cinquantesimo della scoperta della radioattività da neutroni, (Roma, 4-5 giugno 1984).

1 - La scoperta della radioattività artificiale indotta da neutroni.<sup>(1)</sup>

All'inizio degli anni trenta all'Istituto di Fisica, diretto da Orso Mario Corbino, vi erano state varie conversazioni di Corbino stesso con Enrico Fermi, professore di fisica teorica, e Franco Rasetti, professore di spettroscopia, sulla opportunità di abbandonare gradualmente la fisica atomica, campo in cui l'Istituto era stato attivo per anni, e di concentrare lo sforzo di ricerca sulla fisica nucleare. I vari membri dell'Istituto si erano quindi adoperati per apprendere diverse tecniche sperimentali relative a questo nuovo campo di attività sia in sede che recandosi presso istituti di ricerca stranieri.

Un'occasione molto favorevole per attuare tale programma fu data dalla scoperta della radioattività artificiale prodotta da particelle  $\alpha$  fatta da Frédéric Joliot e Irène Curie e apparsa alla metà di gennaio 1934 sui *Comptes Rendus* della Accademia delle Scienze di Parigi [2]. Poco tempo dopo, e precisamente all'inizio di marzo 1934, Fermi proponeva a Rasetti di cercare di osservare effetti analoghi provocati da neutroni, facendo uso della sorgente di  $\text{Po}\alpha + \text{Be}$  che Rasetti aveva preparato non molto tempo prima. Vari elementi venivano così irradiati con neutroni e subito dopo esaminati con un contatore di Geiger e Müller ma i risultati erano negativi, presumibilmente per mancanza di intensità.

Poiché si era non lontani da Pasqua, Rasetti partì per le vacanze in Marocco, mentre Fermi continuò a fare gli esperimenti ed ebbe l'idea che per osservare una attività indotta da neutroni non era necessario usare una sorgente di  $\text{Po}\alpha + \text{Be}$ . Una sorgente ben più intensa di  $\text{Rn}\alpha + \text{Be}$  poteva essere impiegata altrettanto bene, dato che le forti attività beta e gamma del Rn e dei suoi discendenti (assenti nel caso del Po) non erano di ostacolo alla osservazione di effetti ritardati. Fermi ben conosceva le sorgenti di radon (Rn), in quanto gli erano già state fornite precedentemente dal Professor Giulio Cesare Trabacchi (capo del Laboratorio Fisico dell'Istituto di Sanità Pubblica [3] per una ricerca che aveva condotto con Rasetti su di uno spettrometro per taggi gamma [4].

Tutto quel che si doveva fare era preparare una sorgente di questo tipo consistente in una ampollina di vetro riempita di radon e polvere di berillio.

Non appena Fermi ebbe la nuova sorgente (contenente circa 30 mCi di Rn) cominciò a bombardare sistematicamente gli elementi in ordine di numero atomico crescente, cominciando dall'idrogeno, seguito dal litio, boro, carbonio, azoto e ossigeno, ma ottenne in tutti i casi un risultato negativo. Finalmente egli riuscì ad ottenere un effetto osservabile nel suo contatore di Geiger e Müller quando bombardò il fluoro e l'alluminio.

Questi risultati e la loro interpretazione come dovuti a processi  $(n, \alpha)$  furono annunciati da Fermi in una lettera alla Ricerca Scientifica datata 25 marzo 1934 [5].

<sup>(1)</sup> L'argomento di queste relazioni è stato in gran parte trattato in varie sedi [1], cosicchè il compito dei relatori è oggi principalmente quello di cercare di riassumere in un tempo piuttosto breve quanto è già stato scritto.

Lo stesso titolo « Radioattività indotta da bombardamento di neutroni I » mostra la sua intenzione di cominciare uno studio sistematico del fenomeno che avrebbe portato alla pubblicazione di una serie di analoghe note.

Fermi voleva procedere nel lavoro il più rapidamente possibile e perciò chiese a Segré ed a me di aiutarlo negli esperimenti, come risulta anche dai ringraziamenti alla fine della seconda lettera all'Editore della Ricerca Scientifica in cui egli riferisce i risultati preliminari ottenuti in vari altri elementi (Si, P, Cl, Fe, Ca, As, Ag, Te, J, Cr, Ba) [6]. Contemporaneamente un cablogramma fu mandato a Rasetti per chiedergli di rientrare al più presto dalle sue vacanze.

Il lavoro di gruppo fu immediatamente organizzato in modo molto efficiente. Fermi, aiutato pochi giorni dopo da Rasetti, faceva buona parte delle misure e dei calcoli, Segré procurava le sostanze da irradiare e la strumentazione necessaria e in breve tempo fu coinvolto nel lavoro chimico. Io mi occupavo della costruzione dei contatori di Geiger e Müller e di ciò che oggi chiamiamo l'elettronica. La divisione di queste attività non era però in alcun modo rigida e ciascuno di noi partecipava a tutte le fasi del lavoro.

Ci rendemmo subito conto che avevamo bisogno di un chimico di professione. Fortunatamente riuscimmo quasi immediatamente a convincere Oscar D'Agostino [7] a lavorare con noi. Egli aveva lavorato nel laboratorio di Trabacchi ma nel 1934 si trovava con una borsa di studio a Parigi, nel laboratorio di Madame Curie, per imparare la radiochimica. Era tornato a Roma per qualche giorno durante le vacanze di Pasqua, ma noi gli mostrammo il nostro lavoro e, su richiesta di Fermi, decise di rimanere a lavorare con noi.

I risultati ottenuti durante le due prime settimane furono riassunti da Fermi in una lettera a Nature [8].

## 2 - L'attacco sistematico agli elementi del sistema periodico degli elementi.

Durante i mesi di aprile-luglio 1934 il gruppo di Fermi pubblicò in rapida successione una serie di risultati sperimentali [9]. Sessanta elementi (oltre al torio e all'uranio di cui parlò Emilio Segré) furono irraggiati con neutroni e in trentacinque (più due) di questi fu scoperto almeno un nuovo corpo radioattivo. Il numero totale dei nuovi nuclidi, con le loro vite medie caratteristiche, ammontava a quarantasei (più almeno due nel torio e almeno quattro nell'uranio). In sedici casi fu identificata la natura chimica del prodotto della reazione con la tecnica dei portatori radioattivi (radioactive carrier).

I risultati furono riassunti in un lavoro esteso [10] presentato da Lord Rutherford alla Royal Society come chiarirò meglio nel seguito. Maggiori dettagli furono dati in alcuni lavori apparsi su Il Nuovo Cimento [11].

Le sorgenti usate in tutte queste ricerche erano del tipo di quella mostrata nella Fig. 5, ma contenevano quantità di radon fino a circa 25 volte maggiori di quelle usate inizialmente da Fermi. Nella Fig. 6 è mostrato un tipico contatore di Geiger e Müller dell'epoca e nella Fig. 3 una fotografia del laboratorio con la

trocoide usata da Amaldi e Segré [11c] per stabilire il segno della carica degli elettroni emessi.

I risultati nel loro complesso erano sufficientemente abbondanti da permettere di cominciare a fare una classificazione delle reazioni nucleari prodotte dai neutroni delle nostre sorgenti, il cui spettro si estendeva da energie molto basse fino a circa 6-7 milioni di elettronvolt.

Questo esame sistematico mostrò che tutti gli elementi, indipendentemente dal loro numero atomico, potevano venir attivati. I nuclidi prodotti erano talvolta isotopi del nucleo bombardato, tal'altra avevano numero atomico più basso per 1 o 2 unità.

Questi ultimi casi erano chiaramente dovuti a reazioni di produzione del tipo  $(n, p)$  o  $(n, \alpha)$ , interpretazione che trovava conferma nel fatto che essi venivano osservati solo in elementi con  $Z \leq 30$ . Per valori di  $Z$  più elevati la penetrabilità della barriera elettrostatica di potenziale, che deve venir attraversata dalla particella carica uscente dal nucleo, è così bassa che la corrispondente sezione d'urto risulta trascurabile con i neutroni delle sorgenti da noi usate.

La produzione di radionuclidi isotopi del nucleo bombardato si osservava invece per qualunque valore di  $Z$ . Non era però facile stabilire se si trattasse di processi  $(n, 2n)$  o di processi di cattura radiativa, cioè  $(n, \gamma)$ . I processi  $(n, 2n)$  sembravano esclusi in quanto presumibilmente sufficientemente endoenergetici da non poter aver luogo con i neutroni delle nostre sorgenti. La interpretazione in termini di processi  $(n, \gamma)$  sembrava, d'altra parte, anche insoddisfacente in quanto a quell'epoca il nucleo veniva ancora concepito come una boca di potenziale e un processo  $(n, \gamma)$  presupponeva che il neutrone irraggiasse, sotto forma di uno o più fotoni, una parte notevole della sua energia nel breve tempo ( $10^{-22}$ s) che esso impiega ad attraversare un nucleo. Tutti i calcoli di questo tipo davano un valore circa mille volte più piccolo di quello osservato.

Nel nostro lavoro sui Proceedings della Royal Society [10] noi discutemmo queste difficoltà ma esprimemmo una chiara preferenza per la interpretazione in termini di processi  $(n, \gamma)$ .

Ai primi di luglio del 1934 Segré ed io ci recammo a Cambridge portando con noi il manoscritto del lavoro esteso che consegnammo a Lord Rutherford che provvide alla sua presentazione alla Royal Society. Nei due mesi trascorsi a Cambridge visitammo il famoso Cavendish Laboratory ed entrammo in rapporto di amicizia con T. Bjerger e C.H. Westcott che erano i soli che in quel laboratorio lavorassero sulla radioattività indotta da neutroni. Furono questi autori, seguendo un suggerimento di Segré, che diedero una prova definitiva della correttezza della interpretazione in termini di processi  $(n, \gamma)$  nel caso di una debole attività di 10 h di periodo osservata nel Na [12]. Tornati a Roma, insieme a D'Agostino, Segré ed io completammo la dimostrazione di Bjerger e Westcott mostrando che questa attività a lungo periodo era effettivamente dovuta ad un isotopo del sodio [13].

Ho insistito su questo problema particolare in quanto la dimostrazione che i neutroni subiscono la cattura radiativa da parte dei nuclei con una sezione d'urto

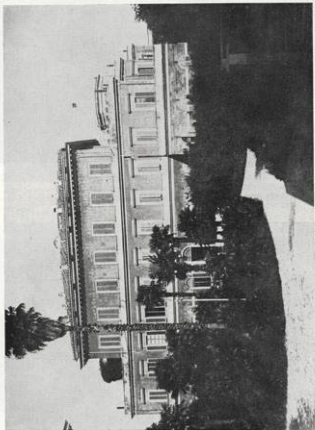


Fig. 1 - Istituto di Fisica di Via Panisperna, eretto fra il 1877 e il 1889 da Pietro Blaserna, primo direttore dell'Istituto di Fisica dell'Università di Roma.



Fig. 2 - Orso Mario Corbino (1896-1937) direttore dell'Istituto di Fisica dell'Università di Roma dal 1918 al 1937. Fotografia presa attorno alla metà degli anni trenta.



Fig. 3 - Enrico Fermi (1901-1954), nel 1927.



Fig. 4 - A sinistra: Giulio Cesare Trabacchi (1884-1939), capo del laboratorio fisico dell'Istituto di Sanità; a destra: Lodovico Zanchi (n. 1889), prima uomo di fiducia di Blaserna, poi segretario e factotum di Corbino, e amministratore dell'Istituto di Fisica per circa settant'anni.

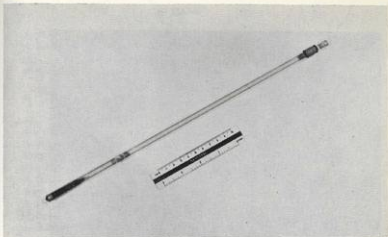


Fig. 5 - Sorgente di neutroni  $Rn\alpha + Be$  usata dal gruppo di Fermi. Essa consiste nell'ampollina di vetro lunga meno di 2 cm visibile a sinistra in basso. Il lungo tubo di vetro serve solo per il maneggio della sorgente stessa.

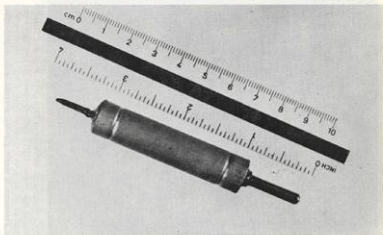


Fig. 6 - Contatore di Geiger e Müller usato da Fermi e collaboratori per la misura della radioattività beta.



Fig. 7 - Laboratorio dell'Istituto di Fisica di Via Panisperna. Si noti il supporto della ricezione (11c) e l'elettronica usata per amplificare e registrare gli impulsi di un contatore di Geiger e Miller, costruito esatto la schematura di pannello cilindrica posta sul tavolo in primo piano a destra.

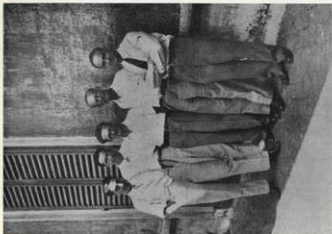


Fig. 8 - Da sinistra a destra: O. D'Agostino, E. Segre, E. Amaldi, F. Rasetti, E. Fermi, su di una terrazza dell'Istituto di Via Panisperna, fine giugno 1934.



considerevole costituisce una parte importante della prova che il « modello a particella singola » del nucleo, ancora usato a quell'epoca, era del tutto inadeguato per descrivere anche processi nucleari particolarmente semplici quali sono quelli che coinvolgono solo particelle neutre sia entranti che uscenti dal nucleo.

### 3 - La scoperta dei neutroni lenti.

In settembre 1934, il gruppo di Fermi decise di cercare di costruire una scala (in unità arbitrarie) di attivazione dei vari elementi irraggiati in condizioni standard ben definite. Questo lavoro fu assegnato a me e a Pontecorvo, uno dei nostri studenti più bravi, che si era laureato nel luglio '34, ed aveva cominciato a lavorare con noi dopo le vacanze estive.

Noi incontrammo però notevoli difficoltà in quanto la attivazione di un ben determinato elemento dipendeva dai materiali posti nelle vicinanze della sorgente di neutroni e del campione irraggiato. Lo studio di questo problema portò verso la fine di ottobre 1934, alla scoperta della azione delle sostanze idrogenate sui processi ( $n, \gamma$ ).

Questo effetto fu immediatamente interpretato da Fermi come dovuto al rallentamento subito dai neutroni in seguito a una successione di urti elastici contro i protoni del mezzo circostante, combinato con un aumento subito dalla sezione d'urto dei processi ( $n, \gamma$ ) al decrescere della energia dei neutroni [14].

Solo molti anni più tardi fu introdotto il nome di « moderatore » per indicare il mezzo impiegato per il rallentamento dei neutroni.

Poco tempo dopo fu scoperto che alcune sostanze come il B, Cl, Co, Y, Rh, Ir, Ag Cd, ecc., hanno una elevata sezione d'urto per cattura radiativa  $\sigma_c$ . Le condizioni geometriche delle nostre misure erano ancora piuttosto cattive ma ciononostante i risultati erano sufficienti per riconoscere che in alcuni casi  $\sigma_c$  era fra  $10^3$  e  $10^4$  volte maggiore della sezione d'urto geometrica dei nuclei.

Una attenzione speciale fu rivolta alla comprensione della natura dei processi coinvolti nella cattura dei neutroni lenti in alcuni casi speciali come il boro [15] e il cadmio [16, 17] caratterizzati da una elevata sezione d'urto non seguita da una apprezzabile attivazione. Questi esperimenti costituiscono i primi passi dello sviluppo dei vari rivelatori dei neutroni lenti basati sul processo ( $n, \alpha$ ) nel boro, e dell'impiego del cadmio come materiale particolarmente conveniente per schermare e canalizzare i neutroni lenti.

La interpretazione di queste sezioni d'urto per cattura anomalmente grandi richiede chiaramente la meccanica quantistica come fu mostrato da Fermi [16] e da vari altri autori [18]. Per particelle di velocità così bassa che la loro lunghezza d'onda  $\lambda$  è molto più grande del raggio R del nucleo contro cui esse urtano, il limite superiore per la sezione d'urto non è  $\pi R^2$  ma  $\lambda^2/4\pi$  moltiplicato per un fattore numerico minore ma, almeno in alcuni casi, prossimo a 1.

Considerazioni analoghe portarono Fermi e gli altri autori a prevedere, sem-

pre facendo uso del modello a particella singola, che  $\sigma$ , doveva seguire per tutti i nuclei la legge universale

$$\sigma_v = \frac{k}{v}$$

dove  $v$  è la velocità del neutrone e  $k$  una costante diversa da nucleo a nucleo e che in certi nuclei può assumere valori particolarmente elevati.

Queste considerazioni erano dunque sufficienti per dare una spiegazione delle sezioni d'urto per cattura anomalmente elevate che erano state osservate in molti nuclei.

Un problema che aveva attratto l'attenzione di Fermi fin da principio era quello di stabilire se nel processo di rallentamento i neutroni raggiungessero o meno l'energia di agitazione termica del moderatore. Un esperimento in tal senso fatto dal gruppo di Roma diede risultato negativo, ma ripreso poco dopo, a Londra, da Moon e Tillman [19], in condizioni studiate con più cura, permise di stabilire che i neutroni vengono effettivamente termalizzati.

I risultati ottenuti dal gruppo di Roma durante l'autunno 1934 e l'inverno 1934-35 furono riassunti in un lavoro esteso che fu nuovamente presentato da Lord Rutherford ai Proceedings della Royal Society [16].

Prima e durante l'estate 1935 due esperimenti meccanici eseguiti a Roma [20] e a Copenhagen [21], confermarono che i neutroni lenti raggiungevano velocità molto basse e in qualche modo aprirono la via alla costruzione, da parte del gruppo della Columbia University [22] del primo selettore di velocità meccanico, basato sullo stesso principio impiegato per la misura della velocità di fasci atomici e molecolari.

#### 4 - La scoperta delle risonanze neutroniche.

Dopo l'estate 1935 il gruppo di Roma era in gran parte disperso e Fermi ed io rivolgemmo la nostra attenzione ad alcuni risultati di Bjerge e Westcott [23] e di Moon e Tillman [24] che avevano osservato che l'assorbimento dei neutroni lenti da parte di un elemento mostrava una debole dipendenza dall'elemento che veniva usato come rivelatore. Questi risultati erano in chiara contraddizione con la teoria corrente dell'assorbimento dei neutroni da parte dei nuclei, la quale, come ho detto sopra, prevedeva per tutti i nuclei una sezione d'urto per cattura radiativa inversamente proporzionale alla velocità del neutrone. Tale legge doveva essere valida entro un intervallo di energia sufficientemente largo da coprire integralmente quello relativo ai neutroni lenti.

Fermi ed io ripetemmo ed estendemmo le misure dei due gruppi inglesi misurando il coefficiente di assorbimento di 11 diversi elementi combinati in tutti i modi possibili con 7 rivelatori e confermammo la regola generale che il coefficiente di assorbimento di un dato elemento è maggiore quando si usa lo stesso elemento come rivelatore.

Poiché nel frattempo il gruppo della Columbia University aveva mostrato con il selettore di velocità che i neutroni assorbiti dal cadmio sono dotati, almeno in gran parte, di energia termica, Fermi ed io procedemmo a ripetere gli stessi esperimenti sui neutroni lenti filtrati da uno spesso foglio di cadmio.

In tal modo, durante il mese di novembre 1935, mostrammo che in queste condizioni l'effetto di autoassorbimento menzionato sopra era considerevolmente rafforzato in vari elementi come il Rh, Ag e I. Questo risultato era una indicazione che molti nuclei hanno delle righe di assorbimento che giacciono ancora nella regione dei neutroni lenti ma al di sopra della energia termica.

Durante l'inverno 1935-36 facemmo uno studio sperimentale sistematico degli assorbimenti selettivi osservati nel Rh, Ag e I e dei neutroni dotati delle corrispondenti energie, riuscendo così a chiarire vari problemi.

Misurammo la sezione d'urto elastica neutrone-protone sia nella regione termica che in quella epitermica, e trovammo che esse differiscono per un fattore poco superiore a 3 e Fermi sviluppò la teoria di questo effetto dovuto al legame chimico del protone nella molecola del moderatore.

Misurammo la lunghezza di diffusione dei neutroni termici in paraffina e determinammo la sezione d'urto per cattura radiativa del neutrone da parte del protone e Fermi mostrò che il processo era dovuto ad una transizione di dipolo magnetico.

Riuscimmo a valutare l'energia delle risonanze osservate nel Rh, Ag e I con due metodi. Il primo basato sul valore quadratico medio della distanza raggiunta nel moderatore da un neutrone nel processo di rallentamento che riduce la sua energia dal valore iniziale a quello corrispondente ad una ben determinata risonanza; l'altro, usato anche da altri autori [25], basato sull'ipotesi della validità della legge  $1/v$  nel boro, ipotesi formulata indipendentemente da Frisch, Placzek, e da Weeks, Livingston e Bethe [26]. Trovammo così che tutte le risonanze osservate erano comprese fra 1 e 10 eV.

Finalmente, nel febbraio 1936, misurammo la larghezza delle risonanze più importanti del Rh, Ag e I e trovammo che esse erano tutte dell'ordine di 1/10 elettronvolt.

I risultati sperimentali furono nuovamente pubblicati in una serie di lettere alla Ricerca Scientifica e riassunti in un lavoro esteso apparso su La Ricerca Scientifica e sulla Physical Review [27]; il lavoro teorico fatto da Fermi fu pubblicato in un'ampia memoria apparsa solo su La Ricerca Scientifica [28]. Oltre a molti altri importanti risultati, essa contiene una trattazione praticamente completa dei problemi relativi al rallentamento e diffusione dei neutroni in un moderatore.

Nel frattempo due lavori teorici relativi a questo insieme di fenomeni erano apparsi sulla stampa internazionale. Il primo era stato presentato da Niels Bohr alla Accademia delle Scienze danese il 26 gennaio 1936 ed era apparso nel fascicolo di Nature del 29 febbraio [29]. Esso conteneva la proposta di un nuovo modello di nucleo secondo cui la cattura del neutrone incidente dà luogo alla formazione di un « nucleo composto » in uno stato eccitato la cui vita media è

sufficientemente lunga per spiegare le righe sottili osservate nella regione epitermica.

L'altro lavoro, dovuto a Breit e Wigner [30], era stato ricevuto dalla *Physical Review* il 15 febbraio 1936 e conteneva la derivazione della ben nota « formula ad un livello di Breit e Wigner », che descrive l'assorbimento dei neutroni lenti in un nucleo dotato di un solo livello risonante.

La fisica nucleare aveva dunque fatto un passo avanti molto notevole giungendo a cambiamenti sostanziali delle concezioni stesse relative alla struttura dei nuclei e al meccanismo di gran parte delle loro trasformazioni.

#### BIBLIOGRAFIA

- [1] (a) ENRICO FERMI: *Note e Memorie*. 2 Vol. *Accademia Nazionale dei Lincei* e *The University of Chicago Press*, Roma: Vol. 1 (1962): Italia 1921-1938; Vol. 2 (1965): USA 1939-1954.  
— (b) E. SGRÒ: *Enrico Fermi, fisico*. Zanichelli, Bologna 1971.  
— (c) E. AMALDI: *Personal Notes on Neutron Work in Rome in the 30's*. In: *History of Twentieth Century Physics*, C. Weiner (ed.) *Academic Press*, New York and London (1977) 294-325.
- [2] F. JULIOT, I. CURIE: *Un nouveau type de Radioactivité*. « *Compt. Rend. Acad. Sci.* », 198 (1934) 254-256; « *Nature (London)* », 133 (1934) 201-202; *Séparation chimique des nouveaux radioéléments émetteurs d'électrons positifs*. « *Compt. Rend. Acad. Sci.* », 198 (1934) 559-561.
- [3] G.C. TRABACCHI (1884-1959) assistente e collaboratore di O.M. Corbino, fu più tardi direttore del Laboratorio di Fisica dell'Istituto Superiore di Sanità. Egli disponeva di un impianto per il radon per uso medico, che per altro non veniva usato sempre in maniera completa. Egli poté così fornire generosamente a Fermi e collaboratori le sorgenti di neutroni di  $Rn + Be$  per circa due anni e mezzo, rendendo in tal modo possibile il lavoro sui « neutroni » svolto in quegli anni all'Istituto di Fisica dell'Università di Roma. Trabacchi fu un notevole progettista e costruttore di strumenti fisici e contribuì a varie ricerche che vanno dalla fotoelasticità alla dosimetria e alla fisica nucleare.
- [4] E. FERMI, F. RASETTI: *Uno spettrometro per raggi gamma*. « *Ric. Scient.* », 4(2) (1933) 299-302 e p. 549-552 del Rif. [1a].
- [5] E. FERMI: *Radioattività provocata da bombardamento di neutroni I*. « *Ric. Scient.* », 3(1) (1934) 293 e p. 645-646 del Rif. [1a].
- [6] E. FERMI: *Radioattività provocata da bombardamento di neutroni II*. « *Ric. Scient.* », 3(1) (1934) 330-331 e p. 647-648 del Rif. [1a].
- [7] OSCAR D'AGOSTINO (1901-1975) dopo aver lavorato nel gruppo di Fermi, entrò al principio del 1936, nell'Istituto Nazionale di Chimica del CNR, che lasciò nel novembre 1938 per prendere un posto nel Laboratorio Fisico dell'Istituto Superiore di Sanità, ove rimase fino alla fine della sua attività. A parte i suoi contributi al lavoro del gruppo di Fermi, D'Agostino dedicò la sua lunga carriera di chimico a problemi di considerevole interesse pratico. Esempi tipici sono i suoi lavori sui radionuclidi presenti nella atmosfera e nei cibi (con particolare riguardo al latte e al formaggio) dovuti all'esplosione di bombe atomiche di prova nella atmosfera.

- [8] E. FERMI: *Radioactivity Induced by Neutron Bombardment*. «Nature (London)», 133 (1954) 1937, data 10 aprile 1954. Vedi anche p. 702-703 del Rif. [1a].
- [9] E. FERMI, E. AMALDI, O. D'AGOSTINO, F. RASETTI, E. SEGRÉ: *Radioattività  $\beta$  provocata da bombardamento di neutroni III*. «Ric. Scient.», 3(1) (1954) 452-455 e p. 649-650 del Rif. [1a]; *Radioattività provocata da bombardamento di neutroni IV*. *Ibidem*, 3(1) (1954) 652-653 e p. 651-652 del Rif. [1a]; *Radioattività provocata da bombardamento di neutroni V*. *Ibidem*, 3(2) (1954) 21-22 e p. 653-654 del Rif. [1a].
- [10] E. FERMI, E. AMALDI, O. D'AGOSTINO, F. RASETTI, E. SEGRÉ: *Artificial Radioactivity Produced by Neutron Bombardment*. «Proc. Roy. Soc.», A146 (1934) 483-500 ricevuto il 23 luglio 1934 e p. 732-747 del Rif. [1a].
- [11] (a) E. FERMI: *Radioattività provocata da bombardamento di Neutroni*. «Nuovo Cimento», 11 (1934) 429-441 e p. 715-724 del Rif. [1a].  
 — (b) E. AMALDI, E. FERMI, F. RASETTI, E. SEGRÉ: *Nuovi radioelementi prodotti con bombardamento di neutroni*. «Nuovo Cimento», 11 (1934) 442-451 e p. 725-731 del Rif. [1a].  
 — (c) E. AMALDI, E. SEGRÉ: *Segno ed energia degli elettroni emessi da elementi attivati con neutroni*. «Nuovo Cimento», 11 (1934) 452-460.
- [12] T. BIRGE, C.H. WESTCOTT: *Radioactivity Induced by Neutron Bombardment*. «Nature (London)», 134 (1934) 286.
- [13] E. AMALDI, E. SEGRÉ, O. D'AGOSTINO: *Radioattività provocata da bombardamento di neutroni VI*. «Ric. Scient.», 3(2) (1954) 381-382.
- [14] E. FERMI, E. AMALDI, B. PONTECORVO, F. RASETTI, E. SEGRÉ: *Azione di sostanze idrogenate sulla radioattività provocata da neutroni I*. «Ric. Scient.», 5(2) (1954) 282-283, data 22 ottobre 1954 e p. 757-758 del Rif. [1a].
- [15] (a) E. AMALDI, O. D'AGOSTINO, E. FERMI, B. PONTECORVO, F. RASETTI, E. SEGRÉ: *Radioattività provocata da bombardamento di neutroni VIII*. «Ric. Scient.», 6(1) (1955) 123-125 e p. 663-664 del Rif. [1a]; (b) E. AMALDI: *Nuove radioattività provocate da neutroni. La disintegrazione del boro*. «Nuovo Cimento», 12 (1955) 223-231. Conclusioni simili furono raggiunte alla stessa epoca da: J. CHADWICK, M. GOLDHABER: *Disintegration by Slow Neutrons*. «Nature (London)», 155 (1955) 65; «Proc. Camb. Phil. Soc.», 51 (1955) 612-616.
- [16] E. AMALDI, O. D'AGOSTINO, E. FERMI, B. PONTECORVO, F. RASETTI, E. SEGRÉ: *Artificial Radioactivity Produced by Neutron Bombardment II*. «Proc. Roy. Soc.», A149 (1935) 522-538 e p. 765-794 del Rif. [1a].
- [17] F. RASETTI: *Über die bei Einfangen von langsamen Neutronen Emissionen  $\gamma$ -Strahlen*. «Zeit. f. phys.», 97 (1935) 64-69.
- [18] F. FERRIN, W.M. ELSASSER: *Théorie de la capture effective des neutrons par certains noyaux*. «Compt. Rend. Acad. Sci. Paris», 200 (1935) 450-452; «J. Phys. Radium», 6 (1935) 194-202; F. FERRIN: *Mécanisme de la capture des neutrons lents par les noyaux légers*. «Compt. Rend. Acad. Sci. Paris», 200 (1935) 1749-1751; G. BUCK, L.H. HORSLEY: *Nonelastic Collision Cross Section for Slow Neutrons*. «Phys. Rev.», 47 (1935) 510; H.A. BETHE: *Theory of Disintegration of Nuclei by Neutrons*. «Phys. Rev.», 47 (1935) 747-759.
- [19] P.B. MOON, J.R. TILLMAN: *Evidence on the Velocity of Slow Neutrons*. «Nature (London)», 135 (1935) 904.
- [20] E. AMALDI, O. D'AGOSTINO, E. FERMI, B. PONTECORVO, E. SEGRÉ: *Radioattività provocata da bombardamento di neutroni X*. «Ric. Scient.», 6(1) (1955) 381-384 e p. 669-673 del Rif. [1a].

- [21] O.R. FRISCH, E.T. SORENSEN: *Velocity of Slow Neutrons*. «*Nature (London)*», 116 (1935) 258.
- [22] J.R. DUNNING, G.B. PIERAM, G.A. FINE, D.P. MITCHELL, E. SUDRÉ: *Velocity of Slow Neutrons by Mechanical Velocity Selector*. «*Phys. Rev.*», 48 (1935) 704.
- [23] T. BIRGE, C.H. WESTCOTT: *On the Slowing Down of Neutrons in Various Substances Containing Hydrogen*. «*Proc. Roy. Soc.*», A150 (1935) 709-729.
- [24] J.R. TILLMAN, B.P. MOON: *Selective Absorption of Slow Neutrons*. «*Nature (London)*», 136 (1935) 66-67.
- [25] H.H. GOLDSMITH, F. RASSETTI: *Experiments on Residual Neutrons*. «*Phys. Rev.*», 49 (1936) 891; *On the Resonance Capture of Slow Neutrons*. *Ibidem*, 50 (1936) 328-331.
- [26] G. PLACIER, O. FRISCH: *Capture of Slow Neutrons*. «*Nature (London)*», 137 (1936) 357; D.F. WEEKS, M.S. LIVINGSTON, H.A. BETHE: *A Method of Determination of the Selective Absorption of Slow Neutrons*. «*Phys. Rev.*», 49 (1936) 471-473.
- [27] E. AMALDI, E. FERMI: *Sopra l'assorbimento e la diffusione dei neutroni lenti*. «*Ric. Scient.*», 7(1) (1936) 454-503 e p. 841-891 del Rif. [1a]; *On the Absorption and the Diffusion of Slow Neutrons*. «*Phys. Rev.*», 50 (1936) 899-928 e p. 822-945 del Rif. [1a].
- [28] E. FERMI: *Sul moto dei neutroni nelle sostanze idrogenate*. «*Ric. Scient.*», 7(2) (1936) 13-52 e p. 943-979 del Rif. [1a]. Per la traduzione in inglese vedi p. 980 del Rif. [1a].
- [29] N. BOHR: *Neutron Capture and Nuclear Constitution*. «*Nature (London)*», 137 (1936) 344-348.
- [30] G. BREIT, E. WIGNER: *Capture of Slow Neutrons*. «*Phys. Rev.*», 49 (1936) 519-531.