

EMILIO SEGRE (*)

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

Nel precedente discorso Amaldi vi ha illustrato il lavoro compiuto a Roma specialmente nell'ambito neutronologico. In parallelo e intrecciato con esso per un certo periodo si svolse anche un lavoro radiochimico. Purtroppo Oscar D'Agostino che sarebbe la persona più qualificata per descriverlo nei dettagli sia tecnici che psicologici, non è più con noi. Cercherò quindi di darne un racconto, tenendo conto anche delle complicate ramificazioni e interazioni a cui esso dette luogo.

Nelle prime settimane del nostro lavoro riconoscevano senza difficoltà, usando i classici metodi dei traccianti isotopici, che le reazioni prodotte dai neutroni erano del tipo (n, p) e (n, α) che davano luogo a elementi con Z inferiore di una o due unità allo Z del bersaglio, nonché altre reazioni che producevano un isotopo radioattivo del bersaglio, e quindi erano probabilmente (n, γ) ovvero $(n, 2n)$. Tutto ciò fu dimostrato tra la fine di marzo e l'aprile del 1934.

Bombardando l'uranio si presentava un caso interessante: la reazione (n, γ) , che era la sola che avevamo trovato con elementi un po' pesanti, doveva dar luogo a un U^{239} che per radioattività beta avrebbe formato un isotopo di un nuovo elemento di numero atomico 93. Tutto ciò è corretto ed avviene effettivamente, ma, come sapete, c'era ben altro in più. Per noi allora era chiaro solo che si doveva provare a vedere quello che accadeva bombardando l'uranio. Ricordo che Rasetti era specialmente insistente in proposito e infatti già il 10 maggio, circa 2 mesi dopo l'inizio del lavoro, c'è una comunicazione in materia.

Si trovò subito che il bombardamento dell'uranio dava luogo a fenomeni complessi. Bisogna ricordare intanto che l'uranio e il torio presentavano problemi tecnici seri. La loro attività naturale era paragonabile a quella indotta dalle no-

(*) Socio dell'Accademia, Department of Physics, University of California, Berkeley e Università di Roma, La Sapienza, Roma.

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

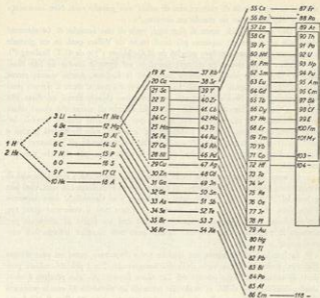


Fig. 1 b

Meltnet e Curie e Joliot, forse al nostro seguito, come le peccorelle di Dante. Ancora più strano è che Bohr non si sia risentito in materia perché egli da molti anni (1) aveva considerato la possibile formazione di una nuova famiglia di terre rare per riempimento delle orbite *Sf* anche se il numero atomico previsto per l'inizio della famiglia non era corretto. Per di più in un articolo di Aristid von Grosse apparso nel *Journal of Chemistry* del 1935, si dice chiaramente che questi misteriosi transuranici potrebbero essere sia simili al renio che parte di una nuova famiglia analoga a quella delle terre rare. Devo dire che mi sono meravigliato quando ho letto questo lavoro alcune settimane fa. Mi è giunto come una sorpresa eppure devo averlo letto a suo tempo o più probabilmente ci sfuggì per-

(1) Vedi per es. N. Bohr, *Nobel Lecture*, 1923 o il suo articolo « *Atom* » nella *Encyclopedia Britannica* (1926).

ché era in un giornale di chimica che di solito non guardavo. Non rammento però se von Grosse ce ne mandò un estratto.⁽²⁾

L'idea degli attinidi, come si dice oggi, ossia di una famiglia di 14 elementi simili alle terre rare, fu espressa più tardi anche da Villars però in un giornale uruguayano che nessuno vedeva nonché da M.G. Mayer⁽³⁾ e da G.T. Seaborg⁽⁴⁾.

L'altro grave errore fu di non prendere sul serio il lavoro di Ida Noddack⁽⁵⁾ che, tutto sommato, aveva preveduto la fissione. Anche questo errore fu condiviso dai tedeschi e francesi. La ragione per cui non si dette il dovuto peso ai commenti della Noddack non mi sono del tutto chiare. Fermi mi disse che era stato tratto in inganno da valori errati del difetto di massa che erano allora in circolazione. La mia impressione, almeno per me e altri comuni mortali, inclusi Hahn e Meitner è che si fosse abituati a vedere solo frammenti piccini e che non ci si aspettasse altro. Frisch dice che Bohr, quando gli parlarono della fissione, dopo la scoperta di Hahn, si batté la testa come per dire che non poteva credere di essere stato così cieco.

Ci sono anche taconiti, che credo veridici, affermantì che i grossi impulsi di ionizzazione prodotti dai frammenti di fissione siano effettivamente stati visti ben prima del 1939 a Zurigo nell'Istituto di Scherrer e al Cavendish, dove imperava Rutherford, che non era uno che dormisse. A Roma non li vedemmo quasi per un accidente, perché avevamo coperto l'uranio con un foglio di alluminio per fermare le particelle alfa naturali. Vederli però non significa interpretarli correttamente...

Inoltre la Natura, onesta, ma qualche volta dispettosa, come mi pare dicesse Einstein, aveva in riserva varie difficoltà insospettate. Tra i più abbondanti prodotti di scissione ci sono isotopi del Tc, allora sconosciuto, che peraltro è assai simile, chimicamente al Re, in modo che cercando un elemento 93 con le proprietà di un Ekarenio si trovava Tc, che veniva interpretato come 93. Per di più i veri transuranici sono chimicamente simili alle terre rare che a loro volta sono tra i prodotti di scissione più abbondanti. Sembra quasi che tutto fosse congegnato per trarre in inganno chimici meno valenti e puliti di come furono, alla fine, dopo tre anni di sbagli, Otto Hahn e Fritz Strassmann.

Fin dal principio del lavoro dell'uranio quando vedemmo che le radioattività erano complicate, si pensò che magari transuranici di vita breve potessero per successive emissioni alfa finire verso il radio ($Z = 88$) o magari anche a Z inferiori. Quindi ci sforzammo di verificare l'assenza di elementi pesanti dall'uranio al piombo usando al solito traccianti. Riuscimmo così a escludere ogni elemento superiore al Pb.

Il risultato è corretto, ma oggi appare curioso perché si può pensare avrem-

(2) A. v. GROSSE: « J. Amer. Chem. Soc. », 57, 440 (1935). Vedi anche: G.E. VILLARS: « Boletín de la Facultad de Ingeniería, Montevideo », 5, 231 (1938), Chem. Abstr. 2003-4, 1939.

(3) M. GOFFERT-MAYER: « Phys. Rev. », 69, 184 (1941).

(4) G.T. SEABORG: « Chem. Eng. News », 23, 2120 (1941).

(5) I. NODDACK: « Angew. Chemie », 47, 633 (1934).

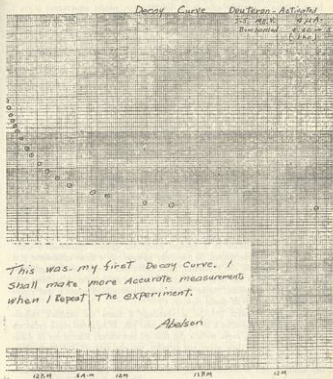


Fig. 2 - Curva di decadimento dell'U bombardato con deutoni ottenuta da P. Abelson nel luglio del 1936.

mo dovuto essere tratti in inganno da isotopi del Ba scambiandoli per Ra. Hahn e Meitner fecero questo errore per un lungo periodo e alla fine fu proprio lo studio del cosiddetto Ra, che in realtà era Ba, che portò alla scoperta della fissione. Noi non si fece lo stesso sbaglio, molto facile e quasi naturale per un buon chimico e evitabile solo da un superchimico, perché separavamo prima i cosiddetti transuranici con varie reazioni, che eliminavano il Ba, e poi dimostravamo che essi non potevano avere numeri atomici compresi tra quelli del Pb e dell'U. Hahn e Meitner invece cercavano il Ra direttamente nell'U irradiato e credevano di trovarlo, perché osservavano il Ba prodotto di fissione e lo scambiavano per Ra.

Una delle nostre reazioni chiave per separare i « transuranici » era la precipitazione di MnO_2 , mediante $NaClO_2$, da una soluzione nitrica di U irradiato a cui avevamo aggiunto come trascinatore un sale manganoso. Questa reazione violenta e rapida era stata scovata da D'Agostino in dispense di chimica analitica del Prof. Auger, padre del famoso fisico.

La nostra procedura è stata recentemente ripetuta dal Dr. Franco Baroncelli dell'ENEA con tempi di irradiazione e di osservazione simili a quelli da noi usati nel 1934. Egli ha trovato che il metodo usato trascina Mo^{99} che si mette in equilibrio radioattivo con Tc^{99} e assieme danno le vite medie da noi riportate. Nel precipitato di biossido di manganese ci sono anche altre sostanze meno importanti, come Te. Il Tc^{99} simula bene un ekarenio. (*)

Naturalmente la radioattività trascinata col biossido di manganese è solo piccola parte della radioattività totale, un fatto importantissimo, di cui ci eravamo accorti nel 1934, ma a cui non demmo il debito peso.

Coll'idea che ci fossero relazioni genetiche tra tutte le attività osservate si fecero esperimenti per verificare se le sostanze idrogenate agivano egualmente o differenzialmente sulle varie attività. Si trovò che agivano più o meno egualmente e si interpretò il risultato, che è corretto, come indicazione di una relazione genetica. Invece esso dipende dal fatto che tutte le sostanze provengono dalla stessa reazione primaria, la fissione! Anche qui si vede il miscuglio di errori e cose giuste che sembra il destino di queste ricerche. (*)

Nell'anno scolastico 1935-36 la situazione a Roma era cambiata radicalmente. Rasetti, D'Agostino e io non ci eravamo più; D'Agostino aveva preso un altro lavoro che non aveva nulla a che fare col precedente; Rasetti era in America e io a Palermo, dove avevo una cattedra, ma non sorgenti di neutroni. Solo Fermi e Amaldi erano rimasti a Roma; non erano di piccolo peso, ma lo studio dei neutroni lenti li assorbiva completamente. Per di più lo studio dell'uranio sembrava in buone mani perché era perseguito da Hahn, Meitner e Strassmann a Berlino, nonché dal Curie-Joliot a Parigi; gli italiani spariscono dalla scena.

(*) Ringrazio il Dr. F. Baroncelli per avermi comunicato i risultati della sua indagine prima della pubblicazione.

(*) Velasi E. FERRARI: *Note e Memorie*, Vol. 1, p. 704, 748 e 765.

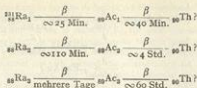


FIG. 4 - Tre isotopi del Ra ipotizzati da Hahn, Meitner e Strassmann: «Naturw.», 26, 756 (1938). Il lavoro conclude «In conseguenza dell'irradiazione neutronica del nucleo di uranio si sono trovati finora 16 isotopi diversi con numero atomico compreso tra 88 e 90 nonché 92 e 96».

ranici con interposte lunghe serie di particelle alfa. Era roba piuttosto incredibile e loro stessi ne dubitavano fortemente.

A Parigi Irène Curie e Savitch (*) si erano concentrati su un'attività di 3,5 h che riuscivano a isolare abbastanza bene usando La come trascinatore. In una comunicazione del 1937 essi dicevano: «Nell'insieme le proprietà di $\text{Ra}_{3,5\text{h}}$ sono quelle del La da cui sembra finora che sia impossibile separarlo per frazionamento». Avevano ragione perché il corpo era effettivamente un isotopo del La. Però tale era la forza delle idee sbagliate che avevano contemporaneamente anche detto «Sembra quindi che questo corpo non possa essere che un elemento transuranico possedente proprietà assai differenti dagli altri elementi transuranici conosciuti, un'ipotesi che solleva difficoltà di interpretazione». Se avessero sospettato le vere proprietà chimiche dei transuranici le cose gli si sarebbero impasticciate ancora di più e forse avrebbero preso il La di fissione per Np! Sembra del resto che I. Curie abbia detto a Hevesy che sembrava che nell'uranio irradiato ci fossero tutti gli elementi chimici! Gran verità!

Hahn e Strassmann vollero ripetere gli esperimenti della Curie. Al principio pensarono che il corpo di 3,5 h fosse un isotopo dell'Ac, ma ben presto gli nacquerò dubbi e ripresero lo studio del loro ipotetico Ra, e alla fine furono forzati a riconoscere che era Ba (**). Da buoni tedeschi avranno esclamato, come Faust nel dramma di Goethe quando vide uscire Mefistofele dal cane che si aggirava nel suo studio: «Das also war des Pöbel's Kern».

E' la forza di questo esperimento incontestabile che portò immediatamente alla interpretazione del fenomeno come fissione.

Hahn comunicò la presenza del Ba (che chiama «merkuerdig», degna di attenzione, strana) in una lettera privata alla Meitner, datata 19 dicembre 1938.

(*) I. CURIE, P. SAVITCH: «Comp. Rendus», 206, 906 (1938).

(**) O. HAHN, F. STRASSMANN: «Naturwiss.», 27, 11, 89 (1939).

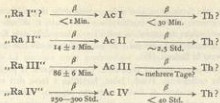


Fig. 5 - La vera natura dei prodotti ottenuti dal bombardamento neutronico dell'uranio. Hahn e Strassmann: « Naturw. », 26, 14 (1939). I « Ra » sono isotopi del Ra; Ac è La Th è Ce.

Lise Meitner era stata costretta a fuggire in gran fretta dalla Germania, perché, dopo l'invasione della sua nativa Austria, Hitler poteva metterla da un momento all'altro in un campo di concentramento e Hahn e altri amici fidati non avevano potuto fare altro che aiutarla a mettersi in salvo. Lise uscì dalla Germania via Olanda e andò poi in Svezia. Hahn seguì a comunicarle subito tutti i risultati delle ricerche cominciate insieme.

Il 10 dello stesso mese Fermi aveva ricevuto il premio Nobel a Stoccolma. In quella occasione aveva detto ^(*): « Abbiamo tentato fin dalla primavera del 1934 di isolare chimicamente i portatori di alcune di queste attività (dell'uranio bombardato con neutroni) col risultato che alcuni di essi non sono isotopi dell'uranio e di nessuno degli elementi più leggeri dell'uranio, fino al numero atomico 80. Abbiamo concluso che uno o più di essi sono elementi di numero atomico maggiore di 92. A Roma siamo soliti chiamare il 93 e 94 ausonio e esperio rispettivamente. Si sa che O. Hahn e Lise Meitner hanno investigato a lungo e con gran cura i prodotti di decadimento dell'uranio irradiato e sono riusciti a trovare tra di essi sostanze con numeri atomici fino a 96 ». Fermi aveva sempre avuto una certa diffidenza sui transuranici e si era rifiutato di dar loro un nome. A Roma, dati i tempi non mancarono i suggerimenti di « Littorio »; Corbino, col suo spirito arguto e prontissimo, rispose subito « Non mi pare opportuno; hanno una vita media solo di qualche decina di minuti ». Ausonio e esperio erano nomi usati quasi per scherzo, memori del polonio, gallio, germanio ecc.

Fermi venne a sapere della scoperta della fissione solo ai primi di gennaio del 1939, quando Bohre portò la notizia in America. Essa si propagò come un fulmine ed entro pochi giorni venne verificata in vari laboratori, compreso Berkeley dove io ero, fin dal luglio del 1938. Il buon Abelson aveva esaminato un po' prima con uno spettrografo a raggi X la radiazione emessa dall'uranio irra-

(*) E. Fermi: *Note e Memorie*. Vol. I, p. 1039 (Roma 1962). Il testo originale in inglese è stato tradotto da E. Segrè.

diato (questo solo fatto dà un'idea della potenza delle sorgenti ottenute col ciclotrone) e credeva di averci trovato linee della serie L di un transuranico ($Z = 96$); poté subito constatare che erano invece linee della serie K del tellurio. Se le avesse misurate meglio fin dal principio e riflettuto alla loro intensità forse avrebbe scoperto la fissione. ⁽¹⁾

Come è solito per scoperte importanti, una volta aperta la porta, si aprono viste su molte conseguenze. Frisch, Joliot, McMillan e forse altri videro immediatamente che i prodotti di fissione potevano separarsi fisicamente facendoli emergere da un sottile strato di uranio irradiato. ⁽²⁾ Con questo sistema l'attività era divisa in rimbaltante e non rimbaltante. I transuranici avrebbero dovuto restare tra i prodotti non rimbaltanti. Usando questo metodo di separazione analizzai l'attività non rimbaltante e ne studiai le proprietà chimiche. Trovai che essa aveva le proprietà di una terra rara. Il risultato sperimentale era corretto; e infatti era la prima volta che si vedevano le vere proprietà chimiche del 93. Feci però un grave errore: cercai una relazione genetica tra l'uranio 239, che era il prodotto formato per cattura neutronica dall'uranio, con vita di 23 min e l'attività non rimbaltante con vita di 6 ore, e non la trovai. Conclusi pertanto che quello che vedevo era una vera terra rara che non rimbaltava perché i frammenti erano abbastanza pesanti da essere fermati nello spesso strato finito dell'uranio. Il conseguente lavoro pubblicato mi ha sempre lasciato con sentimenti opposti ⁽³⁾: è buono perché dà il risultato importante delle proprietà chimiche del 93, chiave a tutte le successive ricerche sui transuranici, ma è fondamentalmente sbagliato. Sembra che l'uranio sia dedito a tendere trabocchetti ai poveri fisici e chimici... Qualche mese più tardi McMillan e Abelson fecero un'esperienza in cui dimostravano completamente il primo vero transuranico. ⁽⁴⁾

Non mi resta che da aggiungere poche parole per collegarmi al successivo lavoro americano di Fermi.

Dopo la scoperta della scissione la possibilità di una reazione a catena era palese. Ma dal dire al fare c'è di mezzo il mare. Bisognava dimostrare che all'atto della scissione venivano emessi neutroni, e quanti? Poi bisognava misurare molte sezioni d'urto e riconoscere quale isotopo si scindeva sotto l'azione di neutroni lenti. Bohr suggerì subito U^{235} . Fermi più prudente voleva una prova sperimentale. Dunning e Nier la dettero.

Una volta partita l'impresa della reazione a catena tutto il lavoro teorico compiuto a Roma sui neutroni lenti acquistò nuovo valore. Bastava aggiungere un termine alle equazioni già sviluppate da Fermi per avere i fondamenti della teoria del reattore. La pratica era resa difficile soprattutto dalla insufficienza dei materiali e dalla loro impurezza.

⁽¹⁾ P. ABELSON: «Phys. Rev.», 55, 418 (1939).

⁽²⁾ E. McMILLAN: «Phys. Rev.», 55, 510 (1939).

⁽³⁾ E. SUGAR: «Phys. Rev.», 55, 1104 (1939).

⁽⁴⁾ E. McMILLAN and P. ABELSON: «Phys. Rev.», 57, 1185 (1940).

Il lavoro della pila strettamente parlando non è parte di ciò che ricordiamo oggi, ma è ad esso intimamente connesso. Tra le ragioni del successo americano ha certo gran peso la preparazione di Fermi risalente al periodo romano.

Anche lo studio dei transuranici ha contribuito dando un potente motivo alle ricerche sul plutonio come combustibile alternativo all'U²³⁵.