

ENRICO FERMI E LA PRESUNTA SCOPERTA DEI TRANSURANICI

MATTEO LEONE E NADIA ROBOTTI

Università di Genova

Nella sua Nobel Lecture, tenuta il 12 dicembre 1938, intitolata *Artificial radioactivity produced by neutron bombardment*, Enrico Fermi riassunse i risultati delle esperienze che lo condussero nel 1934 alla scoperta della radioattività artificiale indotta da neutroni. Gli esperimenti di Fermi consistevano in misure dell'attività prodotta dal bombardamento di campioni di vari elementi della tavola periodica mediante neutroni da sorgenti Radon-Berillio. Nel maggio del 1934, oggetto delle misure di attività, da parte di Fermi e dei suoi collaboratori, furono in particolare gli elementi di alto numero atomico, quali il Torio e l'Uranio. Come ricorda Fermi

Se bombardati con neutroni, [il Torio e l'Uranio] danno luogo a una radioattività piuttosto intensa, e in entrambi i casi la curva di decadimento dell'attività indotta mostra che si è avuta produzione di diversi elementi attivi di diversa vita media. Sin dalla primavera del 1934 tentammo di isolare chimicamente i portatori di queste attività, col risultato che alcune delle attività dell'uranio risultarono non essere dovute né a isotopi dell'uranio stesso, né a elementi più leggeri dell'uranio, fino al numero atomico 86. Concludemmo che i responsabili di tali attività fossero uno o più elementi di numero atomico maggiore di 92; a Roma eravamo soliti chiamare gli elementi 93 e 94 rispettivamente Ausonio ed Esperio. È noto che O. Hahn e L. Meitner hanno studiato molto attentamente ed estesamente i prodotti di decadimento dell'uranio irradiato, e sono stati in grado di rintracciare tra di essi elementi fino al numero atomico 96¹.

Dieci giorni dopo la Nobel Lecture, la scoperta da parte di Fermi di questi elementi «transuranici» venne confutata da Otto Hahn e Fritz Strassmann e interpretata in termini di un'avvenuta disintegrazione del nucleo di Uranio in due grossi frammenti. Prima che la Nobel Lecture venisse data alle stampe, Fermi precisò quindi in nota al suo testo, che la scoperta di Hahn e Strassmann «rende necessario riesaminare tutta la questione degli elementi transuranici, poiché molti di essi potrebbero essere dovuti alla disintegrazione dell'uranio»².

Nel seguito, avvalendoci dei quaderni di laboratorio di Fermi conservati presso la Domus Galilæana in Pisa e il Fondo «Oscar D'Agostino» in Avellino, esamineremo

¹ E. Fermi, *Artificial radioactivity produced by neutron bombardment. Nobel Lecture, December 12, 1938*, in *Physics 1922-1941, Nobel Lectures*, Elsevier, Amsterdam-London-New York 1965. Si veda anche E. Fermi, *Note e memorie (Collected Papers), Volume 1, Italia 1921-1938*, Accademia Nazionale dei Lincei and the University of Chicago Press, Roma-Chicago 1962, pp. 1037-1043.

² Ivi, p. 1037.

mo il processo che portò Fermi nel 1934 a «identificare» gli elementi «transuranici» nonché i successivi tentativi tesi a smentire tale identificazione. Come è noto, nessuno di tali tentativi ebbe successo³, e solo nel 1938, con l'osservazione di Hahn e Strassmann, divenne chiaro che la storia della *presunta* scoperta degli elementi «transuranici» era anche la storia della *mancata* scoperta della *fissione nucleare*.

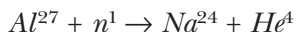
Radioattività indotta da bombardamento di neutroni

Il 15 gennaio 1934, Frédéric Joliot and Irène Curie annunciarono all'Académie de Science di Parigi l'avvenuta scoperta della radioattività artificiale, consistente nell'emissione di elettroni positivi da parte di radioisotopi non esistenti in natura, formati previo bombardamento di elementi leggeri con particelle α^4 .

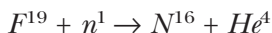
In data 25 marzo 1934, Fermi inviò una lettera a «La Ricerca Scientifica», quindicinale del CNR, ove si riferiva «sopra alcune esperienze destinate ad accertare se un bombardamento di neutroni non determini dei fenomeni di radioattività susseguente analoghi a quelli osservati dai coniugi Joliot con bombardamento di particelle α^5 ».

La sorgente di neutroni utilizzata da Fermi era costituita da un tubetto di vetro contenente polvere di Berillio e Radon. Come rivelatore era utilizzato un contatore Geiger-Müller la cui parete esterna è formata da una foglia d'Alluminio, di spessore di circa 0,2 mm «tale quindi da permettere l'ingresso di eventuali raggi β nel contatore»⁶. L'aspettativa di Fermi, alla luce dell'esperienza di Joliot e Curie (che aveva posto in luce l'emissione di elettroni positivi), era infatti quella di registrare un'eventuale presenza di particelle elettroniche.

Gli elementi da irradiare venivano sottoposti per un tempo variabile da alcuni minuti ad alcune ore alle radiazioni della sorgente Radon-Berillio. Successivamente, i campioni irradiati venivano rapidamente posti vicino al contatore. I primi elementi a dare esito positivo furono l'Alluminio (circa 12 minuti) e il Fluoro (con tempo di dimezzamento di circa 10 secondi). L'Alluminio darebbe luogo alla reazione



e il Na^{24} così formato «sarebbe un nuovo elemento radioattivo e si trasformerebbe in Ca^{24} con emissione di una particella β ».⁷ Dal Fluoro si avrebbe invece la reazione



³ Nel 1937, H.A. Bethe, in quella che può considerarsi come la prima esposizione organica della fisica nucleare nel suo complesso, scrisse a questo proposito che le attività evidenziate per la prima volta da Fermi «sono certamente dovute a elementi di numero atomico 93, 94, 95 ecc.» (M.S. Livingston e H.A. Bethe, *Nuclear Physics – C. Nuclear Dynamics, Experimental*, in «Rev. Mod. Phys.», 9, 1937, p. 366).

⁴ F. Joliot e I. Curie, *Un nouveau type de radioactivité*, in «C. R. Acad. Sci. Paris», 198, 1934, pp. 254-56.

⁵ E. Fermi, *Radioattività indotta da bombardamento di neutroni*, in «Ric. Scient.», 5(1), 1934, p. 283.

⁶ *Ibidem*.

⁷ *Ibidem*.

ovvero, «si formerebbe un azoto di peso 16 che, emettendo successivamente una particella β può trasformarsi in O^{16} »⁸.

Il caso dell'Uranio

Da questo primo lavoro, Fermi proseguì l'attività di irraggiamento su altri elementi della tavola periodica incominciando ad avvalersi di collaboratori, come evidenziato dalla seconda lettera a «La Ricerca Scientifica», a firma del solo Fermi, dove si ringraziano Edoardo Amaldi, Emilio Segrè e Oscar D'Agostino.

Tra fine aprile e inizio maggio 1934, Fermi (congiuntamente ad Amaldi, D'Agostino, Franco Rasetti e Segrè) giunse a irradiare l'Uranio. Il 10 maggio 1934, egli comunicò a «La Ricerca Scientifica» i risultati di questo irraggiamento.

L'Uranio liberato dai prodotti dotati di attività β che lo accompagnano e susseguentemente irradiato dà un effetto intenso con più periodi: uno di circa 1 minuto, uno di 13 minuti oltre a periodi più lunghi non ancora esattamente determinati. I raggi β corrispondenti al periodo di 13 minuti sono notevolmente penetranti.

Si è cercato di riconoscere con operazioni chimiche se l'elemento che si disintegra col periodo di 13 minuti fosse un isotopo di qualcuno degli elementi più pesanti. Possiamo escludere immediatamente che si tratti di un isotopo dell'U (92) e del Th (90) perché il principio attivo si separa facilmente da questi due elementi. Più difficile è la prova che non si tratti di un isotopo del Pa (91) dato che manca una sostanza radioattiva β adatta per queste prove, isotopa del Pa. Ci siamo dovuti servire per questo dell'UX₂ [Pa²³⁴] il quale ha un periodo di soli 70 secondi e perciò costringe a eseguire le operazioni chimiche molto rapidamente. Tuttavia operando in circa 2 minuti siamo riusciti a separare insieme a Mn, il principio attivo dell'U senza che venisse trascinata altro che una piccola frazione dell'attività di UX₂ che si sarebbe dovuta avere tenendo conto del decadimento di questa sostanza. Una tale separazione effettuata precipitando con il NaClO₃ il MnO₂ da una soluzione nitrica fortemente acida è ugualmente completa anche in presenza di Ce e La. Ciò sembrerebbe escludere che il principio attivo abbia numero atomico 89 data l'analogia di questo elemento con le terre rare. La stessa reazione sembra anche escludere che si tratti di un isotopo del Ra (88) e tanto più di un ekacesio (87) o di un'emanazione (86).

Questo insieme di conclusioni che stiamo cercando di suffragare con ulteriori esperienze fa sorgere spontanea l'ipotesi che il principio attivo dell'U possa avere numero atomico 93 (omologo del renio); il processo in questa ipotesi potrebbe consistere in una cattura del neutrone da parte dell'U con una formazione di un U²³⁹ il quale subirebbe successivamente delle disintegrazioni β ⁹.

Il 3 giugno 1934, a circa un mese di distanza dalla prima comunicazione riguardante l'Uranio, Orso Mario Corbino, direttore dell'Istituto di Fisica di Roma, tenne un discorso su «Prospettive e risultati della fisica moderna», presso l'Accademia

⁸ *Ibidem.*

⁹ E. Amaldi, O. D'Agostino, E. Fermi, F. Rasetti ed E. Segrè, *Radioattività beta provocata da bombardamento di neutroni III*, in «Ric. Scient.», 5(1), 1934, pp. 452-53.

Nazionale dei Lincei. In tale discorso, che vasta eco ebbe sulla stampa dell'epoca¹⁰, egli riassumeva i risultati recentemente ottenuti da Fermi e collaboratori. Facendo riferimento agli esperimenti condotti in Francia, da Joliot e Curie, dichiarò:

L'esperienza dei due fisici francesi è stata ripresa a Roma dal professor Fermi, ricorrendo al bombardamento con neutroni anziché con particelle alfa. I risultati sono stati di gran lunga più copiosi e brillanti; poiché anziché mostrarsi attivi soltanto tre o quattro elementi, ben 45 sui 62 finora [irradiati] hanno dato risultati positivi; in particolare si è potuta mettere in evidenza l'azione esercitata sugli elementi pesanti che avevano resistito finora a ogni tentativo di disintegrazione artificiale, dimostrandosi vulnerabile persino l'uranio che rappresenta l'estremo della serie degli elementi conosciuti¹¹.

Sempre all'interno del suo discorso, Corbino accennò alla possibilità che a Roma fosse stato prodotto e osservato, per la prima volta, un elemento transuranico:

Il caso dell'uranio, avente numero atomico 92, è particolarmente interessante. Sembra che esso, dopo [aver] assorbito il neutrone, si converta rapidamente, per emissione di un elettrone, nell'elemento di posto immediatamente più alto della serie, cioè in un elemento nuovo avente il numero 93, cui corrisponde una carica maggiore di quella di tutti gli elementi esistenti. Anche il nuovo elemento è radioattivo e subisce ulteriori disintegrazioni ancora non sicuramente definite. Per la posizione che esso occupa, la legge di Mendelejeff attribuisce al nuovo elemento delle proprietà chimiche analoghe a quelle del manganese e del renio, ed effettivamente le reazioni chimiche che ne permettono la separazione sono conformi al comportamento previsto. [...] La ricerca è [però] così delicata da giustificare la prudente circospezione del Fermi nel continuare le indagini prima di annunciare la scoperta definitiva. Per quello che può valere la mia opinione sull'andamento di queste indagini, che ho quotidianamente seguite, credo di poter concludere che la produzione di questo nuovo elemento è già sicuramente accertata. Il risultato ottenuto, cioè la creazione dell'elemento 93, è di grande importanza. Da quando fu trovato l'uranio la scoperta di un nuovo elemento chimico aveva per effetto di colmare le lacune rimaste dentro la serie dei corpi semplici, la quale conservava come estremi insuperati l'idrogeno (1) e l'uranio (92). Nel caso del nuovo elemento 93 si tratta invece della fabbricazione artificiale di un elemento nuovo, situato al di fuori della serie degli elementi conosciuti sulla Terra¹².

Tre giorni dopo (6 giugno), i soli Fermi, Rasetti e D'Agostino indirizzarono un'altra lettera alla rivista del CNR «sulla possibilità di produrre elementi di numero atomico maggiore di 92»¹³. In essa si esplicitava che, previa separazione degli ordinari prodotti di decadimento dell'Uranio, emergono curve di decadimento β di periodi di 10 secondi, 40 secondi, 13 minuti e «almeno altri due più lunghi». Si precisava l'impossibilità di stabilire se si trattasse di processi alternativi o in catena, e si focalizzava l'attenzione sul periodo di 13 minuti «che per ragioni pratiche si

¹⁰ Cfr. ad esempio la prima pagina del «Secolo XIX», 4 giugno 1934 (*Le esperienze dell'accademico Fermi hanno strappato un segreto ai misteri dell'atomo*).

¹¹ O. M. Corbino, *Prospettive e risultati della fisica moderna*, in «Ric. Scient.», 5(1), 1934, pp. 609-19.

¹² *Ibidem*.

¹³ E. Fermi, F. Rasetti e O. D'Agostino, *Sulla possibilità di produrre elementi di numero atomico maggiore di 92*, in «Ric. Scient.», 5(1), 1934, pp. 536-37.

presenta il più conveniente». Risultando ripetute e confermate le separazioni da U, Pa, Th, essendo effettuata la separazione da Ra e Ac, aggiunti sotto forma di Ms Th 1 e Ms Th 2 (in aggiunta a Ba e La), e posto che le condizioni di precipitazione di MnO_2 siano regolate in modo tale che il precipitato si formi in presenza di Pb e Bi inattivi senza trascinarli e portando con sé invece l'attività di 13 minuti, gli autori giungevano alla conclusione che

sembra doversi escludere che l'attività di 13^m sia dovuta a un isotopo di U(92), Pa(91), Th(90), Ac(89), Ra(88), Bi(83), Pb(82). Il suo comportamento esclude anche Ekacesso(87) ed Emanazione(86). Da questo complesso di prove negative sembra plausibile considerare la possibilità già enunciata che il numero atomico dell'elemento in questione sia maggiore di 92. Se fosse un elemento 93, esso sarebbe omologo del Manganese e del Renio. Questa ipotesi è confermata in qualche misura dal fatto osservato che attività di 13^m è trascinata da un precipitato di solfuro di Renio insolubile in HCl. Tuttavia, poiché molti elementi pesanti precipiterebbero in questa forma, questa prova non può considerarsi molto dimostrativa¹⁴.

Il 16 giugno, «Nature» pubblicava una lettera del solo Fermi, di contenuto sostanzialmente analogo alla precedente lettera inoltrata a «La Ricerca Scientifica»:

Sembrava valesse la pena rivolgere particolare attenzione agli elementi pesanti radioattivi torio e uranio, siccome la generale instabilità dei nuclei in questo range di peso atomico poteva permettere il raggiungimento di successive trasformazioni. Per questa ragione un'analisi di questi elementi fu intrapresa dallo scrivente in collaborazione con F. Rasetti e O. D'Agostino¹⁵.

Le ricerche condotte confermavano un fatto ormai noto e cioè che tutti gli elementi con numero atomico superiore allo zinco, per i quali era stata osservata e controllata, attraverso prove chimiche, una trasmutazione radioattiva, avvenivano sempre con formazione di un isotopo dell'elemento di partenza.¹⁶ In questo modo, attraverso la successiva emissione β , l'elemento instabile si trasformava in un nucleo di carica $Z+1$. Era interessante, a questo punto, conoscere il comportamento del Torio e dell'Uranio perché i loro eventuali prodotti artificiali di trasmutazione, avrebbero dovuto produrre nuovi isotopi instabili di elementi noti o addirittura nuovi elementi. Ovviamente la particolarità di utilizzare sostanze che presentavano una radioattività naturale imponeva una preventiva purificazione degli elementi.

Per le prove di determinazione delle vite medie veniva usato un miscuglio di ossidi che si otteneva per calcinazione del nitrato di Uranile $[UO_2(NO_3)_2]$, mentre, per le prove chimiche veniva usato indifferentemente o questo prodotto solido oppure una soluzione concentrata di nitrato di Uranile depurato. Descriviamo bre-

¹⁴ Ivi, p. 537.

¹⁵ E. Fermi, *Possible production of elements of atomic number higher than 92*, in «Nature» 133, 1934, pp. 898-99.

¹⁶ O. D'Agostino ed E. Segrè, *Radioattività provocata nel torio e nell'uranio per bombardamento con neutroni*, in «Gazz. Chim. It.», 65, 1935, pp. 1088-1098.

vemente qual era il procedimento di depurazione del nitrato, dai prodotti naturali di disintegrazione, aventi attività beta. Il nitrato di Uranile veniva disciolto in acqua e successivamente si precipitava solfato di Bario (presumibilmente aggiungendo acido solforico e poi nitrato di Bario), facendo in tal modo precipitare il Radio, omologo chimico del Bario. A questo punto, alla soluzione filtrata, veniva aggiunto acido fluoridrico, nitrato di Cerio e nitrato di Lantanio. Il precipitato, di questi ultimi due, veniva allontanato per filtrazione (l'acido fluoridrico reagisce con il Lantanio e il Cerio in soluzione formando i rispettivi fluoruri di Lantanio e di Cerio che precipitano portando con sé gli omologhi Attinio e Torio). L'operazione veniva ripetuta diverse volte, permettendo così di ridurre la quantità di Fluoro presente in soluzione, e completando l'allontanamento dei beta emettitori. Per ultimo la soluzione di nitrato di Uranile in presenza di acido nitrico e di tracce di acido fluoridrico veniva calcinata provocando la formazione degli ossidi dei quali abbiamo già detto precedentemente.

I «transuranici» e l'Archivio Fermi della Domus Galilæana

Alla Domus Galilæana di Pisa sono conservati i documenti originali relativi all'attività scientifica che Enrico Fermi svolse in Italia a partire dagli anni del Liceo (1918) fino alla sua partenza per gli Stati Uniti (1938). Tale materiale (che include quaderni di appunti, quaderni di laboratorio, schede con registrazione di dati sperimentali, manoscritti e dattiloscritti, corrispondenza e documenti vari) venne raccolto da Edoardo Amaldi presso l'Istituto di Fisica dell'Università di Roma e donato alla Domus Galilæana nel 1956 «for future generations, beside other documents of men who have also honored mankind with their thoughts and experiments». Questo archivio, rimasto a tutti gli effetti «sepolto» per quasi cinquant'anni, è stato recentemente oggetto di un lavoro di catalogazione, in occasione delle commemorazioni per il centenario della nascita del fisico italiano¹⁷.

Fonti primarie di cruciale importanza sulla questione dei transuranici sono, tra i documenti conservati alla Domus: il Quaderno di laboratorio «A» e le schede di misura prestampate (in particolare quelle catalogate come «R2»).

Una prima analisi, che è possibile condurre sulla base di queste fonti, riguarda le misure effettuate nei giorni dall'8 al 10 maggio 1934 (giorno in cui veniva data comunicazione, per la prima volta, della radioattività indotta nell'uranio¹⁸) riportate sul Quaderno «A». A pagina 21 del Quaderno, in corrispondenza della data 8 maggio, Fermi e collaboratori scrivevano: «*MnO₂ precip. da U irradiato 140'sorg.* 7-

¹⁷ M. Leone, N. Robotti e C.A. Segnini, *Fermi Archives at the Domus Galilæana in Pisa*, in «Physis», 37, 2000, pp. 501-33.

¹⁸ Amaldi *et al.*, *Radioattività beta* cit., pp. 452-53. Dalla disamina di questi documenti emerge che, sebbene l'effettivo ciclo di misure sull'uranio cominciò l'8 maggio (i cui risultati confluirono due giorni dopo nella sopra citata lettera a «La Ricerca Scientifica»), alcuni esperimenti di irraggiamento dell'Uranio furono condotti già il 28 aprile, e quindi prima del «beginning of May» riferito da Segrè in uno dei suoi saggi biografici su Fermi (E. Segrè, *Fermi and Neutron Physics*, in «Rev. Mod. Phys.», 27, 1955, pp. 257-63; p. 259).

Cont. 2- U purif. da UX₁ [²³⁴Th], con Ce+La e HF [acido fluoridrico] 3 ore prima.» Di seguito venivano riportate le misure rilevate al contatore, corrispondenti al periodo di 13 minuti, citato nell'articolo del 10 maggio.¹⁹

Per tentare una separazione dell'attività di 13 minuti dal nitrato di uranile essi ricorrevano al seguente processo: gli ossidi sottoposti a irradiazione venivano disciolti in una soluzione di acido nitrico. Si aggiungeva nitrato manganoso [Mn(NO₃)₂] e poi clorato sodico (NaClO₃) alla soluzione bollente (per aumentare la velocità della reazione), che faceva precipitare il Manganese sotto forma di biossido trascinando con sé l'attività²⁰.

Sempre nella lettera del 10 maggio 1934, dopo aver precisato che «i raggi beta corrispondenti al periodo di 13 minuti sono notevolmente penetranti», gli autori si concentrarono sulla ricerca dell'elemento responsabile del periodo di 13 minuti. A questo proposito è importante osservare che il Manganese avrebbe avuto per omologo inferiore un elemento di numero 93. Tale situazione aveva portato Fermi e i suoi collaboratori a concentrare le loro ricerche *proprio* sull'attività con periodo di 13 minuti perché *questo* gli avrebbe permesso la scoperta di un nuovo elemento transuranico.

Sempre nel Quaderno «A», alla pagina 22 si legge: «c.s. [come sopra; biossido di manganese separato da uranio irradiato] (1000 impulsi UX₁ aggiunti nell'HNO₃) in pres. di Zr». In questo caso essi irradiavano ossido di Uranio depurato e successivamente aggiungevano acido nitrico in presenza di Torio (234) il quale emette β con un tempo di dimezzamento di circa 24 giorni (molto diverso quindi da quello di 13 minuti che cercavano di identificare). Infatti, se

alla soluzione di nitrato di uranile, prima purificato radioattivamente e quindi irradiato coi neutroni, si aggiungeva una certa quantità di un ordinario elemento dotato di attività β, tale da dare un migliaio di impulsi per minuto al contatore [...] si riesce a dimostrare che l'attività indotta, riconoscibile dal suo periodo caratteristico, può essere separata chimicamente dalla attività aggiunta. [In questo modo] è ragionevole ammettere che le due attività non siano dovute a isotopi [dello stesso elemento]²¹.

La presenza dello Zirconio (omologo del Torio) serviva come verifica nella separazione chimica. A pagina 23 scrivevano: «c. s. 1000 impulsi UX₁ aggiunti prima dell'irradiaz». In questo caso osservavano un leggero aumento dell'attività dovuto, probabilmente, al fatto che la soluzione veniva irradiata per 10 minuti (mentre in precedenza lo era solamente per 6 minuti) e anche per la presenza del Torio nella fase di irraggiamento.

In data 9 maggio (a pagina 24 del Quaderno) venivano effettuate una serie di tre misure successive in presenza di osmio. Nella prima il «Mn precipit. come solfuro dal filtrato della separazione dell'Os» presentava una attività quasi confrontabile con quella del fondo naturale, mentre, nella seconda, il «Residuo precipitato di

¹⁹ In una scheda di laboratorio (R5) dello stesso 8 maggio, si introduce il neologismo «Ausonio» a indicare l'elemento transuranico avente Z = 93, origine dell'attività da 13 minuti.

²⁰ D'Agostino e Segrè, *Radioattività provocata* cit., p. 1094.

²¹ Fermi, Rasetti e D'Agostino, *Sulla possibilità di produrre* cit., pp. 536-37.

Os della separazione precedente» con 18,3 conteggi al minuto poteva rappresentare una debole attività che si accompagnava all'Os (il quale ha come omologo inferiore l'elemento 94: a questo proposito si veda Tab. 1). Nella terza misura il «Residuo portato a secco delle separaz. dell'Os e Mn» veniva registrato un valore di 9,2 (conteggi al minuto) anch'esso estremamente basso per poter essere considerato un valore attendibile²². A pagina 25 del Quaderno incominciavano una serie di misure volte ad accertare se l'attività di 13 minuti fosse presente in elementi di numero atomico minore di 92. L'evidenza rappresentata da tali misure permetteva di escludere che l'attività appartenesse all'Attinio (89), al Torio (90)²³ e probabilmente anche al Protoattinio (91). Successivamente: «carbonato di Mn precip. con Na_2CO_3 da U irradiato.» In questo modo, però, tutti i carbonati insolubili del secondo gruppo seguivano l'attività e si rendeva quindi necessaria una ulteriore verifica per poter escludere la loro presenza e in particolare quella del Radio. Il 10 maggio 1934 (pagina 27 del Quaderno), proseguendo l'analisi incominciata a pagina 25 scrivevano: «l'U precip. con MnO_2 in presenza di Ce+La+Ba irrad 40 [minuti]». Questa misura permetteva di escludere che l'attività seguisse il Bario e quindi il suo omologo inferiore, cioè il Radio. Poche ore più tardi la misura veniva ripetuta nelle medesime condizioni. Le uniche differenze osservate riguardavano il tempo di irraggiamento (40 minuti nel primo caso e 60 minuti nel secondo) e la durata del trattamento chimico prima dell'esposizione al contatore. «Per l'attività di 13 minuti [il rendimento] si riesce a mantenerlo costante intorno al 15% dell'attività totale»²⁴. Nonostante il suo cattivo rendimento, «la reazione del biossido di manganese ci ha permesso di riconoscere che [l'attività] non poteva attribuirsi a un isotopo né dell'uranio, né degli altri elementi che precedono l'uranio fino al piombo incluso»²⁵.

Un risultato particolarmente interessante, ma contraddittorio, si osserva a pagina 29 in due misure eseguite tra la sera del 10 maggio e la mattina del giorno seguente. Nella prima il biossido di Manganese veniva sciolto in acido cloridrico e a questa soluzione si aggiungeva Bario (probabilmente tramite cloruro di Bario). A questo punto, usando acido solforico, essi precipitavano il Bario come solfuro (BaSO_4) e lo portavano al contatore. Dalle misure riportate si osservava una attività debolmente decrescente nei 40 minuti di misurazioni. Nella seconda, ripetendo lo stesso procedimento (l'unica differenza risultava essere il tempo di irraggiamento, 15 ore in questo caso), dichiaravano: «dalla soluzione si è precipitato BaSO_4 ; questo si è dimostrato completamente inattivo».

Purtroppo non è stato ancora possibile comprendere il motivo per il quale Fermi e i suoi collaboratori ottennero risultati così diversi partendo da una stessa base

²² Queste tre misure possono essere così riassunte: al campione, irradiato e portato in soluzione, veniva aggiunto Osmio. Successivamente l'Osmio veniva separato come composto insolubile e portato al contatore (misura 2). Alla soluzione restante, si aggiungeva Manganese per poi farlo precipitare come solfuro (misura 1). Il prodotto finale di quest'ultima separazione veniva portato a secco (misura 3).

²³ A questo fine era stato aggiunto anche lo Zirconio che è omologo del Torio, oltre ad appartenere alle terre rare.

²⁴ E. Amaldi, O. D'Agostino, E. Fermi, F. Rasetti ed E. Segrè, *Radioattività provocata da bombardamento di neutroni V*, in «Ric. Scient.», 5(2), 1934, pp. 21-22.

²⁵ D'Agostino e Segrè, *Radioattività provocata cit.*, p. 1095.

1 H																	2 He
3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	(43)	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
55 Cs	56 Ba	57-71 La-Lu	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	(85)	86 Rn
(87)	88 Ra	89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	(93)	(94)	(95)	(96)	(97)	(98)	(99)	(100)				
↓																	
57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	(61)	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu			

Tab. 1 La tavola periodica nel 1934. In colore blu sono indicati gli elementi risultati inattivi a bombardamento con neutroni. In rosso sono indicati gli elementi attivabili e in verde gli elementi di dubbia attivabilità. Si noti come il Renio (Re) e l'Osmio (Os) risultassero omologhi degli ipotetici elementi transuranici aventi rispettivamente $Z = 93$ e $Z = 94$.

di analisi. La nostra ragione di interesse per tale elemento (il Bario) è legata al fatto che sarà proprio grazie alla sua individuazione, in un processo analogo a quello realizzato da Fermi, che Lise Meitner, nel 1939, interpreterà tale risultato come dovuto alla «fissione» del nucleo atomico dell'uranio.

Elemento 93: le critiche di Aristide Von Grosse e Meyer Agruss

Poco dopo la pubblicazione dei risultati di Fermi, due chimici del Kent Chemical Laboratory di Chicago, A. Von Grosse e M. Agruss, contestarono l'interpretazione dei transuranici e formularono l'ipotesi che l'attività di 13 minuti fosse dovuta a un isotopo dell'elemento $Z=91$ (Protoattinio). In una lettera inviata in data 7 luglio 1934 alla rivista «Physical Review», essi predissero che, secondo la legge di Mendeleev, era possibile stabilire le proprietà dell'elemento 93, o «eka-renio (En)».

Il suo ossido più elevato, En_2O_7 , è sicuramente stabile nelle condizioni vigenti negli esperimenti di Fermi [...]. Queste considerazioni ci hanno indotto a ripetere alcuni degli esperimenti di Fermi, utilizzando il protoattinio come indicatore. Abbiamo scoperto che l'elemento 91 dà reazioni identiche all'elemento 93 di Fermi. L'elemento 91 precipita da una soluzione fortemente acida di nitrato di uranile, aggiungendo clorato di sodio, esattamente come il 93 di Fermi. Realizzando il medesimo esperimento con renio, abbiamo trovato che rimaneva tutto in soluzione e, come riferito sopra, ci attendiamo il medesimo comportamento analitico dell'eka-renio. Prevediamo che il prodotto da 13 minuti di Fermi si manifesti anche in altre reazioni dell'elemento 91, tra le quali la più caratteristica è la precipita-

zione, unitamente allo zirconio, tramite acido fosforico da una soluzione fortemente acida (20-30% di HCl o HNO₃). L'affermazione di Fermi secondo cui il prodotto da 13 minuti non coincide con l'elemento 91 si basa su esperimenti col suo isotopo *brevium* (UX₂) che, sfortunatamente, per via della sua brevissima vita media (T = 68 sec), introduce delle difficoltà nelle operazioni chimiche. Siamo perciò indotti a concludere che (a meno che non venga fornita evidenza contraria) il prodotto dell'uranio avente tempo di dimezzamento di 13 minuti sia un nuovo isotopo dell'elemento 91²⁶.

Von Grosse e Agruss conclusero la loro lettera osservando che, a dispetto dell'evidenza concernente il presunto elemento 93, «non dubitiamo che in futuro si avranno successi nella sintesi di nuovi elementi radioattivi artificiali, tramite bombardamento nucleare»²⁷.

Pochi mesi dopo, però, l'ipotesi dell'isotopo del Protoattinio risultava confutata. In data 11 dicembre 1934, infatti, Von Grosse e Agruss riferirono che

seguendo il nostro suggerimento E. Fermi ha controllato se i suoi radioelementi artificiali precipitassero con fosfato di zirconio, essendo la co-precipitazione una reazione tipica dell'elemento 91. Fermi ha trovato che il precipitato di fosfato di zirconio è inattivo e che suoi prodotti attivi restano in soluzione. Questo risultato è la prima chiara evidenza che i prodotti di Fermi non sono isotopi dell'elemento 91²⁸.

Il 22 dicembre, prima dell'effettiva pubblicazione del lavoro di Von Grosse e Agruss, Hahn e Meitner pubblicarono quella che risultava essere evidenza in favore dell'interpretazione di Fermi²⁹. Secondo Hahn e Meitner, infatti, l'attività da 13' poteva essere separata dal Protoattinio in 2 modi: da un lato, con solfuro di Platino si aveva precipitazione dell'attività, mentre il Protoattinio rimaneva completamente in soluzione; dall'altro lato, con fosfato di Zirconio l'attività rimaneva in soluzione mentre il Protoattinio precipitava. Gli stessi Fermi e collaboratori, il 15 febbraio 1935, riferirono i risultati dell'esperimento suggerito da Grosse:

Abbiamo sciolto l'ossido di uranio in soluzione al 25% di HCl. Poi abbiamo aggiunto alla soluzione nitrato di zirconio e acido fosforico. Il precipitato di fosfato di zirconio è risultato inattivo. Dopo dieci separazioni del zirconio, abbiamo precipitato un solfuro dalla soluzione filtrata, e raccolto l'attività nel solfuro col solito risultato. Secondo Von Grosse e Agruss, questa reazione deve considerarsi prova della non identità del portatore dell'attività con un isotopo del protoattinio³⁰.

Degli esperimenti condotti da Fermi e collaboratori (in particolare Rasetti e D'Agostino) in seguito all'ipotesi di Von Grosse e Agruss, esiste traccia tra le sche-

²⁶ A. Von Grosse e M. Agruss, *The Chemistry of Element 93 and Fermi's Discovery*, in «Phys. Rev.», 46, 1934, p. 241.

²⁷ *Ibidem*.

²⁸ A. Von Grosse e M. Agruss, *The Identity of Fermi's Reactions of Element 93 with Element 91*, in «J. Am. Chem. Soc.», 57, 1935, pp. 438-39.

²⁹ O. Hahn e L. Meitner, *Über die künstliche Umwandlung des Urans durch Neutronen*, in «Naturwiss.», 23, 1935, p. 37.

³⁰ E. Amaldi, O. D'Agostino, E. Fermi, B. Pontecorvo, F. Rasetti, ed E. Segrè, *Artificial Radioactivity Produced by Neutron Bombardment. II*, in «Proc. Roy. Soc.», 149, 1935, pp. 522-58.

de di laboratorio conservate presso la Domus Galilæana, in particolare tra le schede appartenenti al registro «R5». Segnaliamo, nello specifico, le schede seguenti:

Data: 15.11.1934

Sostanza: «Uranio (circa 1.0 gr. Metallo)»

Operazioni chimiche: «precipitato fosfato Zr dalla sol residuata si è prec. il solfuro di Pb»

Osservazioni: «Il fosfato di Zr è stato portato al contatore dopo circa 12' dalla fine dell'irradiazione. Il solfuro di Pb è stato port. al cont. dopo 26' dalla fine della irradiazione»

Data: 22.11.1934

Sostanza: «Uranio gr. 8 metallo»

Operazioni chimiche: «dalla sol. si è prec. lo zirconio in pres. di 3000 impulsi di $UX_1 + UX_2$. Dalla sol. residuata si è separato il solfuro di Pb»

Osservazioni: «il primo precipitato di PbS si è misurato all'elettrometro: vedi curva annessa»

Data: 1.12.1934

Sostanza: «Uranio (circa 3 gr. metallo)»

Condizioni di irradiazione: «allo stato di ossido»

Operazioni chimiche: «Si è disciolto in HCl: dalla sol. acida (20%) si è precipitato il fosfato di Zr. Dalla sol. residuata (150 cc diluita a 1 litro) si è prec. il solfuro di Pb»

È interessante constatare che sulle medesime prove di precipitazione con fosfato di Zirconio, e sul fatto che l'attività rimaneva in soluzione, esiste un riferimento esplicito all'interno del Quaderno di laboratorio di O. D'Agostino, denominato «Chimie Radioactive», conservato presso il «Fondo D'Agostino» in Avellino³¹, e classificato col codice 2¹³. In corrispondenza della data 9-13.11.1934, è infatti possibile leggere:

Si è fatta una prova tostissima. L'uranio dep. col carbonato è stato irradiato 20' in paraffina. Si è sciolto in H₂O contenente il 25 ÷ 30 [%] di HCl e si sono messi 4 ÷ 5 cc di sol. Zr(NO₃)₄ (1 cc = 50 mgr.) – e 6 cc di una sol. di H₃PO₄ (1 cc = 250 mgr.).

Si è prima prec. un poco di zirconio poi nella sol. bollente si è versato l'uranio irradiato.

Si è filtrato (stentatamente) il prec. di fosfato (separazione completa. 2 filtri, filtrazione lenta) – e poi si è portato al contatore in 12': 14 botti!!! (Becquerel).

Dalla stessa sol. neutralizzata [...] con NH₃ si è prec. il PbS e portato al contatore (Becquerel) in 25': 150 botti iniziali ridotti a 80 dopo 20'.

Elemento 93: le critiche di I. Noddack

Un'altra critica all'interpretazione di Fermi e collaboratori fu quella sollevata dalla chimica tedesca Ida Tacke Noddack. In un suo lavoro inviato il 10 settembre 1934 alla rivista «Die Naturwissenschaften», la Noddack osservava che Fermi aveva

³¹ Su questo fondo si veda: G. Acocella, F. Guerra e N. Robotti, *Enrico Fermi's Discovery of Neutron-Induced Artificial Radioactivity: The Recovery of His First Laboratory Notebook*, in «Phys. Persp.», 5, 2003, in corso di stampa.

escluso la presenza di elementi con $82 \leq Z \leq 92$ e «nel fare ciò, non è chiaro perché non consideri l'elemento polonio (84) [...] e perché si fermi al piombo».

Secondo la Noddack il procedimento chimico usato da Fermi non consentiva di escludere molti elementi leggeri, e quindi «Fermi avrebbe dovuto confrontare il nuovo radioelemento con tutti gli elementi noti. È noto dalla chimica analitica che molti elementi sono precipitati dal biossido di manganese». Inoltre, seguendo il metodo di Fermi, ma aggiungendo alla soluzione originale alcuni milligrammi di numerosi elementi di basso numero atomico, si osservava che per gran parte di essi la quasi totalità della quantità originale («nahezu quantitativ») è presente nella soluzione finale³². Noddack giunse quindi a proporre una spiegazione che sembra richiamare quella che, dal 1939, sarà nota come «fissione nucleare».

Si può assumere altrettanto a ragione che quando i neutroni sono usati per produrre disintegrazioni nucleari, abbiano luogo alcune reazioni nucleari [*Kernreaktionen*] distintamente nuove, mai osservate in precedenza col bombardamento dei nuclei atomici median- te protoni o particelle α . In passato si è osservato che le trasmutazioni dei nuclei hanno luogo solo con l'emissione di elettroni, protoni o nuclei di elio, in modo tale che gli elementi pesanti cambiano solo di poco la loro massa e si producono elementi vicini. Quando nuclei pesanti sono bombardati con neutroni, è concepibile che il nucleo si spezzi in diversi fram- menti più grandi [*größere*] i quali sarebbero quindi isotopi di elementi noti ma non neces- sariamente prossimi all'elemento irradiato³³.

Le obiezioni della chimica tedesca furono sostanzialmente ignorate da Fermi e collaboratori. L'unica citazione su fonti a stampa dell'epoca risulta infatti essere un articolo di Segrè e D'Agostino dove le obiezioni della Noddack sono dissolte (e quindi ignorate) all'interno di quelle di Von Grosse e Agruss:

Von Grosse e Agruss e Ida Noddack hanno criticato queste nostre prove tentando di dedurre da esperienze eseguite sopra sostanze non irradiate con neutroni che l'attività con periodi di 13' e di 100' sono dovute a isotopi di elementi a numero atomico inferiore a 92 e in particolare a isotopi del protoattinio. Nonostante che tutto il complesso delle nostre esperienze escludesse questa possibilità, abbiamo ripetuto, dopo l'obiezione di Von Grosse, tutti i vecchi esperimenti confermandoli³⁴.

È importante tuttavia osservare che le obiezioni della Noddack furono ignorate anche da Hahn e Meitner. Come scrisse Ida Noddack, nel 1939, dopo la scoperta della fissione,

O. Hahn e L. Meitner hanno continuato le ricerche di Fermi. [...] nella loro prima pubblicazione essi dissero [...] in accordo con Fermi, che molto probabilmente si trattava di ele- menti al di là dell'uranio. Essi assunsero, come Fermi in precedenza, che si potessero otte-

³² Tra essi il Niobio, i cui isotopi radioattivi sappiamo oggi essere presenti tra i prodotti di fissione.

³³ I. Noddack, *Über das Element 93*, in «Angew. Chem.», 47, 1934.

³⁴ D'Agostino e Segrè, *Radioattività provocata* cit., p. 1096.

neri solo elementi vicini all'uranio. Essi non hanno citato la mia critica degli esperimenti di Fermi né nella loro prima pubblicazione, né in una delle loro numerose successive pubblicazioni sulla trasformazione artificiale dell'uranio mediante neutroni³⁵.

A questo punto ci si può chiedere quali furono le motivazioni del mancato riscontro dato all'ipotesi della Noddack. Tra le possibili spiegazioni si può ricordare l'assenza, nel 1934, di un modello teorico all'interno del quale fosse giustificata la fissione del nucleo in frammenti di grandi dimensioni. A questo proposito si ricordi che, nel 1939, la stessa Noddack scrisse che «O. Hahn ha rifiutato una citazione del mio lavoro evidentemente perché riteneva insensata la mia ipotesi che l'uranio potesse decadere in frammenti più grandi, in quanto ai teorici di allora una tale reazione nucleare appariva impossibile»³⁶.

Conclusioni

Dall'analisi delle fonti archivistiche conservate presso il Fondo Fermi della Domus Galilæana e dal loro confronto con le fonti a stampa disponibili si possono trarre alcune conclusioni.

In primo luogo, se da un lato è confermato che il ciclo vero e proprio di esperimenti sull'Uranio cominciò l'8 maggio 1934, alcuni esperimenti di irraggiamento furono condotti già il 28 aprile, prima cioè di quanto riferito in letteratura secondaria.

Dai quaderni e dalle schede di laboratorio emerge che Fermi e collaboratori sin da subito propendettero per l'ipotesi che l'attività da 13' i fosse attribuibile a un elemento avente $Z = 93$. Gli esperimenti decisivi iniziarono l'8 maggio 1934, e già il giorno stesso essi esplicitamente introdussero il neologismo «Ausonio» per l'ipotizzato nuovo elemento chimico. Questo contrasta con le «riserve», pubbliche e private, citate in letteratura³⁷.

Per quanto concerne le reazioni all'ipotesi dei transuranici, Fermi e collaboratori pubblicarono i risultati degli esperimenti di risposta alle obiezioni di Von Grosse e Agruss solo dopo analoghi esperimenti realizzati da Hahn e Meitner. La disamina delle schede di laboratorio fornisce, per la prima volta, un quadro dettagliato dell'iter sperimentale seguito, della collocazione temporale (novembre-dicembre 1934) e dei risultati ottenuti.

Infine, non emergono espliciti riferimenti del gruppo Fermi al lavoro della Noddack, fuorché in un'unica citazione in una fonte a stampa, dove, tuttavia, vengono affrontate solo le obiezioni di Von Grosse e Agruss.

³⁵ I. Noddack, *Bemerkung zu den Untersuchungen von O. Hahn, L. Meitner und F. Strassman über die Produkte, die bei der Bestrahlung von Uran mit Neutronen entstehen*, in *Angew. Chem.*, 27, 1939, pp. 212-13.

³⁶ Ivi, p. 212.

³⁷ L. Fermi, *Atoms in the Family*, University of Chicago Press, Chicago 1954; E. Segrè, *Enrico Fermi Physicist*, University of Chicago Press, Chicago 1970.

Le risposte a queste obiezioni, come si è visto, confortavano Fermi e collaboratori nell'idea di avere scoperto nuovi elementi chimici che stavano al di fuori della tavola periodica a quel tempo nota, i «transuranici». In realtà, quest'idea ha fatto sì che il problema dell'Uranio fosse ampiamente studiato negli anni successivi, soprattutto in Germania (in particolare da O. Hahn, L. Meitner e F. Strassmann) e Francia (I. Curie e P. Savitch). Sarà proprio da questo studio che emergeranno gli elementi a favore di una nuova interpretazione delle osservazioni inizialmente fatte da Fermi e collaboratori, aprendo così la via alla scoperta della *fissione nucleare*.