Rendiconti
Accademia Nazionale delle Scienze detta dei XL
Memorie e Rendiconti di Chimica, Fisica, Matematica e Scienze Naturali
140° (2022), Vol. III, fasc. 1, pp. 163-171
ISSN 0392-4130 • ISBN 978-88-98075-51-5

La collocazione degli Attinidi nella Tavola Periodica: una ricostruzione storica

FRANCO CALASCIBETTA

Museo P. Levi, Sapienza Università di Roma
E.mail: franco.calascibetta@uniroma1.it

Abstract – The article reconstructs the history of the discovery of the elements from Actinium to Lawrencium, known by the overall name of "actinides", and their location in the periodic system, which has changed since the mid-40s of the twentieth century thanks to research by G. Seaborg. We will focus in particular on the work of this scientist and the researchers who worked in the group he directed and on the theoretical considerations underlying his studies, that earned him the award of the Nobel Prize for Chemistry in 1951.

Keywords: Actinides, Periodic Table, Seaborg

Riassunto – Nell'articolo è ricostruita la storia della scoperta degli elementi dall'Attinio al Laurenzio, conosciuti col nome complessivo di attinidi, e della loro collocazione nel sistema periodico, mutata, a partire dalla metà degli anni '40 del XX secolo, ad opera di G. Seaborg. Ci soffermeremo in particolare sull'opera di questo scienziato e dei ricercatori che operarono nel gruppo da lui diretto e sulle considerazioni teoriche alla base della sua ricerca, che gli valsero come noto l'attribuzione del premio Nobel per la Chimica nel 1951.

Parole chiave: Attinidi, Tavola Periodica, Seaborg

I primi attinidi scoperti: Torio e Uranio

Gli elementi del sistema periodico dall'Attinio (Ac, Z = 89) al Laurenzio (Lr, Z = 103) sono, come noto, indicati col nome complessivo di Attinidi.[1] All'epoca della Tavola Periodica pubblicata nel 1871 da D. Mendeleev [10] di essi se ne conoscevano soltanto 2, il Torio (Th, Z = 90) e l'Uranio (U, Z = 92). Essi erano stati scoperti rispettivamente nel 1829 da Jöns Jacob Berzelius e nel 1789 da Martin Heinrich Klaproth, che individuò per primo l'Uranio, anche se

[1] La IUPAC sin dal 1985 raccomandò di utilizzare attinoidi anziché attinidi, poiché il suffisso -ide normalmente indica (in inglese) uno ione negativo (chloride, cyanide etc.). Tuttavia, a causa dell'uso corrente, il nome attinidi resta consentito. Ho preferito in questo articolo utilizzare la denominazione meno aggiornata, in quanto è quella che si trova negli articoli che esamineremo, trattandosi per lo più di pubblicazioni precedenti gli anni '80 del XX secolo.

Reihen	Gruppe I. — R^2O	Gruppe II. — RO	Gruppe III. — R^2O^3	Gruppe IV. RH^4 RO^2	Gruppe V. RH^3 R^2O^5	Gruppe VI. RH^2 RO^3	Gruppe VII. RH R^2O^7	Gruppe VIII. — RO^4
1	H=1							
2	Li=7	Be=9,4	B=11	C=12	N=14	O=16	F=19	
3	Na=23	Mg=24	Al=27,3	Si=28	P=31	S=32	Cl=35,5	
4	K=39	Ca=40	—=44	Ti=48	V=51	Cr=52	Mn=55	Fe=56, Co=59, Ni=59, Cu=63
5	(Cu=63)	Zn=65	—=68	—=72	As=75	Se=78	Br=80	
6	Rb=85	Sr=87	?Yt=88	Zr=90	Nb=94	Mo=96	—=100	Ru=104, Rh=104, Pd=106, Ag=108
7	(Ag=108)	Cd=112	In=113	Sn=118	Sb=122	Te=125	J=127	
8	Cs=133	Ba=137	?Di=138	?Ce=140	—	—	—	— — — —
9	(—)	—	—	—	—	—	—	
10	—	—	?Er=178	?La=180	Ta=182	W=184	—	Os=195, Ir=197, Pt=198, Au=199
11	(Au=199)	Hg=200	Tl=204	Pb=207	Bi=208	—	—	
12	—	—	—	Th=231	—	U=240	—	— — — —

Fig. 1. Tavola Periodica di D. Mendeleev del 1871: vedi [10].

non riuscì in effetti ad isolarlo come elemento puro. Berzelius, per l'elemento da lui scoperto, indicò il nome di Torio, in onore della divinità scandinava Thor, mentre il nome di Uranio venne attribuito da Klaproth facendo riferimento al pianeta, scoperto da William Herschel pochi anni prima. I pesi atomici con cui essi comparivano nella Tavola Periodica di Mendeleev del 1871 erano 231 per il Torio e 240 per l'Uranio. Erano i più alti rispetto a tutti gli elementi allora conosciuti e Mendeleev li pose nella riga 12 della sua Tabella, rispettivamente nei gruppi IV e VI, lasciando tra i due un elemento che egli prevedeva dovesse essere ancora scoperto (Fig. 1). La ragione di questa collocazione la possiamo comprendere leggendo le pagine, relative ai due elementi, presenti nel *Trattato di Chimica* che Mendeleev pubblicò in più edizioni a partire dal 1871. Ad esempio nella traduzione inglese del 1897, basata sulla VI edizione russa [11], egli associava il Torio allo Zirconio e assegnava ai suoi composti silicato, ossido e cloruro rispettivamente le formule $ThSiO_4$, ThO_2, $ThCl_4$. Erano quindi le sue proprietà chimiche ed in primis la sua valenza ad indicare la sua collocazione nel IV gruppo[2]. Analogamente per l'Uranio erano le deboli proprietà acide del suo ossido a massima valenza UO_3 e l'esistenza di un sale sodico $Na_2U_2O_7$, del tutto analogo nel comportamento a $Na_2Cr_2O_7$ a spingere Mendeleev a porre l'elemento nel VI gruppo della sua Tavola[3].

[2] Vedi [11] Vol. II, pag. 148.
[3] Vedi [11] Vol. II, pag. 297.

Attinio e Protoattinio

Gli studi sull'emissione naturale di luce, calore e altre radiazioni, iniziati alla fine del XIX secolo, portarono, come noto, innanzi tutto alla scoperta di due nuovi elementi, Polonio e Radio. In realtà tali studi permisero in pochi anni l'individuazione di una quarantina di specie chimiche, dotate di analoghe proprietà ed ugualmente instabili. Esse però andavano ad occupare solo una dozzina di caselle del sistema periodico. La spiegazione dell'esistenza dei cosiddetti isotopi radioattivi fu opera di molti scienziati, tra i quali Kazimierz Fajans e Frederic Soddy. La storia completa di questo susseguirsi di ricerche è estremamente intrecciata [17]. Ai nostri fini interessa però in particolare ricordare che in tale ambito furono scoperti due elementi della famiglia degli attinidi, l'Attinio (Ac, Z = 89) e il Protoattinio (Pa, Z = 91).

La scoperta dell'Attinio è da alcuni attribuita a Friedrich Oscar Giesel, che nel 1902 per primo lo isolò, mentre altri considerano pienamente attendibile l'identificazione che del nuovo elemento fece nel 1899 un collaboratore dei Curie, Andrès Debierne, che gli diede il nome di Attinio, traendolo da una parola del greco antico (ακτίς, ακτίνος) che significa "raggio".

L'isotopo 234 del Protoattinio venne identificato per la prima volta nel 1913 da Kazimierz Fajans, che lo chiamò *brevium* per la sua instabilità (questo isotopo presenta un tempo di dimezzamento di poche ore). L'isotopo 231, molto più stabile, venne identificato alcuni anni dopo da Otto Hahn e Lisa Meitner, che diedero all'elemento il nome di Protactinium, in quanto esso era l'imme-

diato precursore dell'Attinio nella catena di decadimento dell'Uranio 235.

I due nuovi elementi furono posti nella Tavola Periodica nella settima serie rispettivamente al III e V gruppo. In particolare il Protoattinio andava ad inserirsi nella casella che Mendeleev aveva lasciato vuota tra Torio ed Uranio. La ragione di tale collocazione risiedeva ancora una volta nelle proprietà chimiche dei due elementi. Ad esempio, in un classico trattato di Chimica inorganica del periodo [9], per l'Attinio si ricordava come esso fosse in natura trovato spesso insieme agli elementi trivalenti dei lantanidi ed in particolare insieme al Lantanio, col quale formava sali isomorfi.[4] Per il Protoattinio, si ricordava come gli stessi O. Hahn e L. Meitner lo avevano separato dai residui silicei, rimasti dopo il trattamento prolungato e ripetuto della pechblenda con acido nitrico, grazie all'aggiunta di un sale di Tantalio: le sue reazioni erano così simili a quelle del Tantalio che «*i due elementi si associavano insieme alla fine delle operazioni come compagni inseparabili*».[5] Mettere Attinio e Protoattinio, rispettivamente nel gruppo del Lantanio e del Tantalio, era perfettamente coerente con le proprietà dei due nuovi elementi.

Per illustrare ciò, in Fig. 2 riportiamo una Tavola Periodica pubblicata nel 1927 su Scientific American [6]. L'autore, B. Smith Hopkins, aveva, pochi mesi prima, rivendicato, insieme ad altri [5], la scoperta dell'elemento di numero atomico 61, uno dei pochi che, in base agli studi di H. C. J. Moseley, risultavano ancora mancanti nella lista degli elementi chimici. Per l'elemento essi avevano proposto il nome di Illinio. Tale rivendicazione si sarebbe rivelata in seguito inattendibile, in quanto dell'elemento 61 esistono solo isotopi instabili, con tempi di dimezzamento troppo piccoli per poter restare, sia pure in tracce, in minerali presenti in natura. Lo stesso accade per l'elemento 43, del quale anni prima era stata pure annunciata la scoperta da parte di scienziati tedeschi, che lo avevano denominato Masurio. Di entrambe queste presunte scoperte troviamo traccia in Fig. 2. Hopkins, accettando queste due rivendicazioni, così concludeva:

«*Si stanno cercando i due elementi mancanti, i numeri 85 e 87, e l'annuncio della loro scoperta può arrivare da un momento all'altro. Potrebbero forse incontrarsi difficoltà insolite nella ricerca di questi elementi poiché può essere che si tratti di elementi radioattivi, soggetti a decadimento molto rapido. Dobbiamo approfondire questa linea, affascinante ma complicata, Quando questi due ritardatari verranno aggiunti alla nostra lista di elementi conosciuti, la nostra Tabella degli elementi costitutivi della Natura diventerà completa*».

Oltre l'Uranio: considerazioni teoriche

Se Hopkins nella chiusa del suo articolo non mostrava interesse rispetto alla possibilità di arrivare ad elementi oltre l'Uranio, occorre dire che in quegli anni altri scienziati si posero invece la domanda se essi fossero comunque prevedibili. Questo lo ritroviamo sopratutto in ricerche teoriche volte a calcolare, con l'ausilio della quantomeccanica, la stabilità energetica di configurazioni polielettroniche intorno al nucleo di un atomo.

Possiamo partire da Bohr e dare uno sguardo alla particolare Tavola che egli pubblicò nel 1923 [1] (vedi Fig. 3). In essa notiamo come per Bohr, analogamente al sesto periodo del sistema periodico, contenente gli elementi dal Cesio (Cs, Z = 55) all'Emanio (oggi Radon Rn, Z = 86), anche il settimo periodo avrebbe dovuto comprendere 32 elementi, da quello, ancora da scoprire, con Z = 87 fino ad un gas nobile con Z = 118. Ciò faceva ipotizzare anche in questo periodo l'esistenza di un gruppo, analogo a quello delle cosiddette terre rare (oggi lantanidi) in cui il riempimento di sottolivelli elettronici interni avrebbe comportato una notevole somiglianza nelle proprietà chimiche dei costituenti. Se osserviamo la Figura 3, in essa le terre rare erano racchiuse in un rettangolo e un rettangolo corrispondente venne abbozzato, tratteggiato, da Bohr, a partire da due posizioni oltre l'Uranio.

Un altro esempio di previsione di conformazione elettronica esterna per elementi oltre l'Uranio, basata su calcoli quantomeccanici, la ritroviamo in un breve articolo del 1933 [18]. Gli autori, utilizzando stavolta la notazione delle orbite elettroniche a noi perfettamente familiare, ipotizzavano che sarebbe stato solo con l'elemento con Z = 93 che si sarebbe dovuto porre un primo elettrone in un orbitale *5f*, e solo con tale elemento avrebbe avuto quindi inizio una serie di 14 elementi analoghi ai lantanidi, in cui, come noto, sono i 7 orbitali *4f* ad essere gradualmente riempiti. Mi limito a questi due esempi, tra i diversi che in quel periodo potrebbero essere trovati,[6] solo per sottolineare come fosse l'apparentemente perfetta collocazione di Attinio, Torio, Protoat-

[4] Vedi [9], Vol, IV, pag. 131.

[5] Vedi [9], Vol, IV, pag. 135-136.

[6] Una più ampia rassegna di tale ricerche la si può trovare in una ricostruzione storica molto più tarda ad opera di G.T. Seaborg [16].

Group	O	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII		
Type Formula		R_2O	RO	R_2O_3	RO_2 H_4R	R_2O_5 H_3R	RO_3 H_2R	R_2O_7 HR			
Series 1		H 1 1.008									
2	He 2 4.00	Li 3 6.94	Be 4 9.1	B 5 10.85	C 6 12.005	7 N 14.008	8 O 16	9 F 19.0			
3	Ne 10 20.2	Na 11 23.00	Mg 12 24.32	Al 13 26.97	Si 14 28.1	15 P 31.04	16 S 32.06	17 Cl 35.46			
4	A 18 39.9	K 19 39.10	Ca 20 40.07	Sc 21 45.1	Ti 22 48.1	V 23 51.0	Cr 24 52.0	Mn 25 54.93	Fe 26 55.84	Co 27 58.97	Ni 28 58.68
4a		29 Cu 63.57	30 Zn 65.37	31 Ga 70.1	32 Ge 72.5	33 As 74.96	34 Se 79.2	35 Br 79.92			
5	Kr 36 82.92	Rb 37 85.45	Sr 38 87.63	Y 39 89	Zr 40 90.6	Cb 41 93.1	Mo 42 96.0	Ma 43 ?	Ru 44 101.7	Rh 45 102.9	Pd 46 106.7
5a		47 Ag 107.88	48 Cd 112.40	49 In 114.8	50 Sn 118.7	51 Sb 121.8	52 Te 127.5	53 I 126.92			
6	Xe 54 130.2	Cs 55 132.81	Ba 56 137.37	RARE EARTHS 57-71	Ct-Hf 72 178.6	Ta 73 181.5	W 74 184.0	Re 75 ?	Os 76 190.9	Ir 77 193.1	Pt 78 195.2
6a		79 Au 197.2	80 Hg 200.6	81 Tl 204.0	82 Pb 207.2	83 Bi 209.0	84 Po 210	85			
7	Rn 86 222	87	Ra 88 226	Ac 89	Th 90 232.12	Pa 91	U 92 238.2				

RARE EARTHS	La 57 139.0	Ce 58 140.25	Pr 59 140.9	Nd 60 144.3	Il 61 146 ?	Sm 62 150.4	Eu 63 152.0		
Gd 64 157.3	Tb 65 159.2	Dy 66 162.5	Ho 67 163.5	Er 68 167.7	Tm 69 168.5	Yb 70 173.5	Lu 71 175.0		

THE NEARLY COMPLETED PERIODIC TABLE OF THE ELEMENTS, 1926

Fig. 2. Tavola Periodica del 1927 "short form": vedi [6].

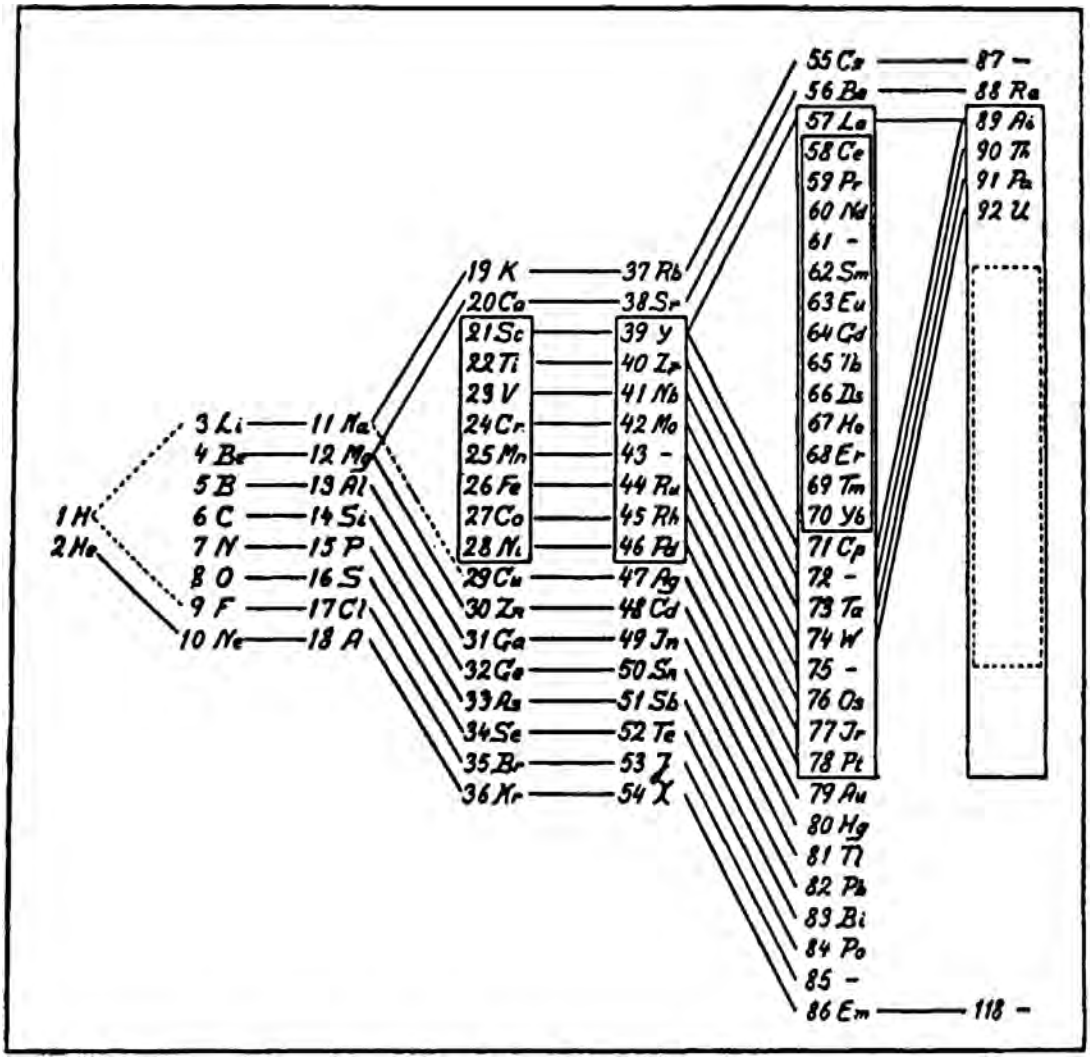

Fig. 3. Tavola Periodica di Bohr: vedi [1].

tinio ed Uranio nei gruppi dal III al VI della tavola periodica, a far scartare probabilmente l'ipotesi che essi potessero invece essere i primi elementi di un gruppo simile ai lantanidi. Una tavola periodica del 1939, organizzata finalmente a 18 colonne, come quella da noi oggi utilizzata, rappresentava chiaramente quanto sopra detto [3] (vedi Fig. 4).

Una nuova strada per la possibile sintesi dei transuranici

Queste ipotesi sulla configurazione elettronica e le conseguenti proprietà chimiche di elementi oltre l'Uranio sembravano destinate a restare speculazioni teoriche, dal momento che essi non erano stati mai identificati, neppure in tracce, in natura oppure in un qualche esperimento. La prospettiva cambiò allorché, all'inizio degli anni '30 del XX secolo, alcuni importanti eventi resero possibile perseguire l'idea di arrivare alla sintesi di tali elementi. Il primo di questi eventi fu la scoperta del neutrone, ipotizzato già precedentemente, ma la cui esistenza venne dimostrata sperimentalmente dal fisico inglese James Chadwick all'inizio del 1932. Un'altra tappa importante in queste ricerche fu la scoperta, da parte di Frédéric e Irene Joliot-Curie, della radioattività indotta, che consisteva nell'emissione di particelle da parte di isotopi artificiali instabili, prodotti dal bombardamento di elementi leggeri con particelle α.

Da tali scoperte si svilupparono tra l'altro gli studi che vennero condotti, a partire dal 1934, nell'Istituto fisico dell'Università di Roma in via Panisperna, dal grup-

	Group Numbers																
Period	1a	2a	3a	4a	5a	6a	7a	8			1b	2b	3b	4b	5b	6b	7b	Inert Gases
I 2 Elements	H 1																	He 2
II 8 Elements	Li 3	Be 4											B 5	C 6	N 7	O 8	F 9	Ne 10
III 8 Elements	Na 11	Mg 12	Transitional Elements										Al 13	Si 14	P 15	S 16	Cl 17	A 18
IV 18 Elements	K 19	Ca 20	Sc 21	Ti 22	V 23	Cr 24	Mn 25	Fe 26	Co 27	Ni 28	Cu 29	Zn 30	Ga 31	Ge 32	As 33	Se 34	Br 35	Kr 36
V 18 Elements	Rb 37	Sr 38	Y 39	Zr 40	Cb 41	Mo 42	Ma 43	Ru 44	Rh 45	Pd 46	Ag 47	Cd 48	In 49	Sn 50	Sb 51	Te 52	I 53	Xe 54
VI 32 Elements	Cs 55	Ba 56	La 58—70 Lu 57 71	Hf 72	Ta 73	W 74	Re 75	Os 76	Ir 77	Pt 78	Au 79	Hg 80	Tl 81	Pb 82	Bi 83	Po 84	— 85	Rn 86
VII 6 Elements	— 87	Ra 88	Ac 89	Th 90	Pa 91	U 92												

* Rare Earth Elements	Ce 58	Pr 59	Nd 60	Il 61	Sm 62	Eu 63	Gd 64	Tb 65	Dy 66	Ho 67	Er 68	Tm 69	Yb 70

Fig. 4. Tavola Periodica del 1939 "medium-long form": vedi [3].

po di ricerca guidato da Enrico Fermi. Fermi partì dall'ipotesi che un bombardamento di neutroni potesse generare fenomeni analoghi a quelli osservati dai coniugi Joliot-Curie, tramite il bombardamento di particelle α. In effetti le sorgenti di neutroni ne emettevano solo un numero relativamente piccolo e questo poteva essere uno svantaggio. Tale inconveniente era tuttavia compensato dal fatto che i neutroni, privi di carica elettrica, potevano raggiungere i nuclei di tutti gli atomi, senza dover superare la barriera potenziale, dovuta al campo di Coulomb intorno al nucleo.

Riassumiamo i risultati della ricerca del gruppo di Via Panisperna, citando direttamente alcuni passi della *lecture* pronunciata da Fermi in occasione della cerimonia nella quale gli venne consegnato il premio Nobel per la Fisica nel 1938 «*per le sue dimostrazioni dell'esistenza di nuovi elementi radioattivi prodotti dall'irradiazione di neutroni, e per la correlata scoperta delle reazioni nucleari provocate dai neutroni lenti*» [2]:

«Fin dai primi esperimenti, ho potuto provare che la maggior parte degli elementi testati sono diventati attivi sotto l'effetto del bombardamento di neutroni. In qualche caso il decadimento dell'attività nel tempo corrispondeva ad una sola vita media; in altri alla sovrapposizione di più curve di decadimento esponenziale.

Un'indagine sistematica del comportamento degli elementi in tutta la Tavola Periodica è stata svolta dal sottoscritto, con l'aiuto di diversi collaboratori, ovvero Amaldi, D'Agostino, Pontecorvo, Rasetti e Segré.

Nella maggior parte dei casi abbiamo eseguito anche un'analisi chimica, al fine di identificare l'elemento chimico che era il vettore dell'attività. Per le sostanze con tempi di emivita brevi, tale analisi doveva essere eseguita molto rapidamente, in un tempo dell'ordine di un minuto.

Risultati sorprendenti li trovammo nello studiare le attività indotte dai neutroni negli elementi naturalmente attivi Torio e Uranio. Entrambi gli elementi mostravano un'attività indotta piuttosto forte, quando bombardati con neutroni; ed in entrambi i casi la curva di decadimento dell'attività indotta mostrava che erano prodotti diversi corpi attivi con vite medie diverse. Noi tentammo, dalla primavera del 1934, di isolare chimicamente i portatori di queste attività, e determinammo che i vettori di alcune delle attività non sono né isotopi dell'Uranio stesso, né degli elementi più leggeri fino al numero atomico 86. Abbiamo concluso che i vettori erano uno o più elementi di numero atomico maggiore di 92; noi, a Roma, chiamiamo Ausonio ed Espero, rispettivamente, gli elementi 93 e 94».

Il testo pubblicato della *lecture* riportava però a questo punto la seguente nota a piè di pagina:

«La scoperta da parte di Hahn e Strassmann della presenza del Bario tra i prodotti di disintegrazione dell'Uranio bombardato, come conseguenza di un processo in cui questo si scinde in due parti approssimativamente uguali, rende necessario riesaminare tutti i problemi degli elementi transuranici».

In effetti la prima ipotesi, da parte di Fermi, di avere effettivamente prodotto due nuovi elementi a numero atomico 93 e 94, inizialmente aveva trovato accettazione da parte del mondo scientifico, ma era stata confutata proprio nel 1938 dai fisici tedeschi Otto Hahn e Fritz Strassmann che, ripetendo le esperienze di Fermi, avevano determinato inequivocabilmente la formazione in esse di elementi più leggeri quali il Bario (Ba, Z = 56) spiegabile solo con l'ipotesi di una disintegrazione del nucleo dell'Uranio [4].

Entra in scena il *Radiation Laboratory* dell'Università della California

A questo punto dobbiamo attraversare l'Atlantico e ripercorrere le ricerche che vennero effettuate dalla fine degli anni '30 dagli scienziati che lavoravano presso il *Radiation Laboratory* dell'Università della California. Questa istituzione era stata fondata nel 1931 da E. O. Lawrence, un fisico statunitense che vinse nel 1939 il premio Nobel per la Fisica per la sua invenzione del ciclotrone, un acceleratore circolare di particelle da lui progettato sin dal 1930. Il primo strumento misurava 13 cm di diametro. Nel corso degli anni '30 Lawrence e i suoi collaboratori costruirono ciclotroni sempre più grandi e conseguentemente sempre più potenti. Questi dispositivi permettevano di bombardare e trasmutare gli elementi più pesanti, mentre le particelle provenienti da fonti naturali, che erano state utilizzate fino ad allora, potevano penetrare nei nuclei solo degli elementi più leggeri.

Nella primavera del 1939, utilizzando come fonte di neutroni quelli formatisi dalla reazione da deuteroni, generati da un ciclotrone di 152 cm di diametro, con atomi di Berillio, un ricercatore dell'Università di Berkeley, Edwin McMillan, prese a studiare più attentamente il processo di fissione dell'Uranio, cercando di misurare l'energia dei due principali frammenti della fissione. Fu in questi esperimenti che McMillan rilevò la presenza di un prodotto radioattivo della reazione con un'emivita di 2,3 giorni che aveva energia inferiore. Sospettò che questo prodotto fosse formato dalla cattura dei neutroni, che non rilascia molta energia, piuttosto che dalla fissione. Immaginò che, tramite la cattura di un neutrone da parte di un atomo di Uranio 238, questi si trasformava in Uranio 239 che poi, con emissione β^-, diveniva un nuovo elemento di massa 239 e Z = 93. Di tale prodotto inizialmente se ne riuscirono a formare quantità dell'ordine dei microgrammi, tuttavia con un'opportuna metodologia di analisi basata sulla radioattività (*tracer technique*) [13] se ne poterono inferire le principali proprietà chimiche. Poiché tali proprietà indicavano una somiglianza dell'elemento con l'Uranio, per esso MacMillan propose il nome di Nettunio, facendo riferimento agli ultimi pianeti del sistema solare [8].

L'elemento a numero atomico 94 fu scoperto tra la fine del 1940 e l'inizio del 1941. A Mc Millan si affiancò tra gli altri Glenn Seaborg, che sarebbe diventato d'ora in poi il leader del gruppo di ricerca, anche perché, poco dopo, McMillan passò a lavorare presso il MIT Radiation Laboratory a Cambridge nel Massachusetts. Dapprima si ottenne l'isotopo 238 dell'elemento con Z = 94, tramite il bombardamento con deuteroni nel ciclotrone [15]. Alcuni mesi dopo fu invece ottenuto l'isotopo di maggiore interesse dell'elemento 94, avente massa 239 e tempo di emivita di circa 24 mila anni [7]. Questi si dimostrò fissile con neutroni lenti. Data l'importanza che questi esperimenti assunsero a fini bellici, la pubblicazione degli articoli che li descrivevano fu ritardata fino a dopo la fine della seconda guerra mondiale.[7] Il nome Plutonio (simbolo Pu), facendo sempre riferimento all'astronomia, fu dato all'elemento 94 per le sue proprietà chimiche, sostanzialmente simili rispetto a quelle dell'Uranio e del Nettunio.[8] È importante sottolineare come le proprietà di Nettunio e Plutonio non fossero invece affatto simili a quelle del Renio e dell'Osmio, sotto ai quali sarebbe stato invece inevitabile porli, se si fosse continuato a collocare gli elementi con lo stesso criterio adottato sino a quel momento (vedi Fig. 4).

Il concetto di attinidi e la loro nuova collocazione

Terminata la seconda guerra mondiale e iniziata la desecretazione delle ricerche sull'argomento, Seaborg e gli altri membri del suo gruppo poterono pubblicare le loro ricerche che nel frattempo erano proseguite. Mi sembra utile citare a questo punto ampi passi di un articolo che il chimico statunitense pubblicò nel 1945 [12]:

---

[7] Dato il limitato scopo del presente articolo, mi trovo costretto a tralasciare qualsiasi considerazione sul significato e le conseguenze che tali ricerche ebbero sull'intera umanità. Non me la sento di trattare un argomento così importante come una parentesi rispetto alla mia ricerca e di dedicargli poche riflessioni, che finirebbero per apparire comunque superficiali e sbrigative.

[8] Ricordiamo che all'epoca Plutone era considerato, dopo Urano e Nettuno, il nono pianeta del sistema solare; da qui, per analogia, il nome dell'elemento 94. In realtà, come sappiamo, Plutone dal 2006 non è più considerato un vero e proprio pianeta, in base ad una decisione dell'Unione astronomica internazionale.

«… $_{93}$Np e $_{94}$Pu non mostrano praticamente alcuna somiglianza con $_{75}$Re e $_{76}$Os e con $_{43}$Ru e $_{44}$Ru. Ciò suggerisce che è il guscio dell'elettrone 5f che viene riempito, sebbene non sia possibile dedurre da questa sola prova chimica se l'uranio sia o meno il primo elemento della serie... Sebbene sia oltre lo scopo di questa discussione fornire tutte le prove a sostegno, vorremmo avanzare l'ipotesi interessante che questa serie simile alle terre rare inizi con l'Attinio, nello stesso senso in cui la serie dei «lantanidi» inizia col Lantanio. Su questa base potrebbe essere definita la serie «attinidi» e il primo elettrone 5f potrebbe apparire nel Torio. Quindi lo stato di ossidazione caratteristico – cioè lo stato di ossidazione mostrato da quei membri contenenti sette elettroni 5f e quattordici 5f – per questa serie di transizione è III.

Lo stato di ossidazione di IV mostrato dal Torio è quindi analogo allo stato di ossidazione IV del Cerio. Dal comportamento di Uranio, Nettunio e Plutonio si deve dedurre che fino a tre dei presunti elettroni 5f vengono prontamente ceduti, così che si spiega l'incapacità del Torio di mostrare uno stato di ossidazione di III. Sulla base di questa ipotesi, gli elementi 95 e 96 dovrebbero presentare stati III molto stabili; infatti l'elemento 96 dovrebbe presentare quasi esclusivamente lo stato III perché, con i suoi sette elettroni 5f, dovrebbe avere una struttura elettronica analoga a quella del Gadolinio, con i suoi sette elettroni 4f. Gli esperimenti di G. T. Seaborg, R. A. James, L. O. Morgan e A. Ghiorso nel Laboratorio Metallurgico hanno recentemente portato all'identificazione degli isotopi degli elementi 95 e 96, rendendo possibile lo studio delle proprietà chimiche di questi isotopi mediante la tecnica del tracciante. Questi ricercatori hanno studiato i prodotti a seguito del bombardamento di U^{238} e Pu^{239} con ioni di Elio ad altissima energia (40 Mev) nel ciclotrone di Berkeley.… Naturalmente nel caso di alcuni elementi della serie può essere una questione accademica assegnare elettroni ai gusci 5f o 6d, poiché l'energia necessaria per il passaggio da un guscio all'altro può rientrare nell'intervallo di energie di un legame chimico. La configurazione elettronica può differire da composto a composto di un elemento o anche con lo stato fisico di un dato composto. Questo spostamento della configurazione elettronica sarebbe probabilmente più pronunciato con i membri centrali della prima metà della serie, cioè Uranio, Nettunio e Plutonio. Poiché la differenza di energia tra i gusci 5f e 6d è piuttosto piccola e poiché gli effetti di risonanza dovrebbero essere piuttosto grandi, questo può predominare nel determinare quale livello di energia è più basso.

Probabilmente vale la pena fare a questo punto un breve riassunto con le seguenti affermazioni. Ad oggi, il sistema periodico è costituito da 96 elementi noti e identificati, ovvero ora è noto almeno un isotopo, stabile o radioattivo, per ciascuno degli elementi dal numero atomico 1 al numero atomico 96 compreso. L'evidenza indica una struttura atomica per gli elementi più pesanti, cioè quegli elementi con numero atomico maggiore di 88, corrispondente a una serie di transizioni in cui viene riempito il guscio di elettroni 5f. Questa serie differisce nelle proprietà chimiche dalla serie delle terre rare (i 14 elementi di numero atomico da 58 a 71 inclusi, dopo il Lantanio) in cui viene riempito il guscio di elettroni 4f, in quanto i primi membri di questa serie pesante sono molto più prontamente ossidati a stati di ossidazione maggiori di III. All'aumentare dei numeri atomici degli elementi in questa serie, gli stati di ossidazione inferiori, e in particolare lo stato III, aumentano di stabilità. Il primo elettrone 5f appare probabilmente nel Torio e la configurazione stabile composta da sette elettroni 5f probabilmente arriva con l'elemento 96».

Conclusioni

Proprio per evidenziare la somiglianza del comportamento degli elementi 95 e 96 con i corrispondenti elementi centrali dei lantanidi, Seaborg propose per essi i nomi di Americio, in analogia con l'Europio, e Curio, in quanto le ricerche dei Curie avevano avuto per gli attinidi un'importanza fondamentale, come quella che per i lantanidi aveva ricoperto Johan Gadolin.

Negli anni immediatamente successivi Seaborg proseguì le proprie ricerche, che confermavano pienamente la sua ipotesi. Nel 1951 a lui e a McMillan venne attribuito il Nobel per la chimica «*per le loro scoperte nella chimica degli elementi transuranici*». Nella sua *Nobel lecture* [14] egli presentò in forma definitiva la tavola periodica da lui modificata, in cui non solo erano già presenti gli attinidi già scoperti o sintetizzati, ma veniva previsto il completamento della serie con altri 5 elementi fino a quello con Z = 103 (vedi Figura 5). Quasi tutti vennero in effetti sintetizzati in pochi anni dallo stesso gruppo di cui Seaborg era il leader. L'ultimo della serie venne chiamato Lawrencium (Laurenzio), dal nome del fondatore del *Radiation Laboratory* ed inventore del ciclotrone, che di queste ricerche era stato ausilio indispensabile.

Ricordiamo in conclusione come in realtà l'opera di Seaborg e del suo gruppo proseguì oltre il Laurenzio, in una ricerca volta alla sintesi di nuovi elementi, a questo punto in una competizione che coinvolse e coinvolge gruppi di ricerca di altri paesi, quali soprattutto la Russia, il Giappone e la Germania. A Seaborg infine fu concesso l'onore, mentre era ancora in vita, di vedere battezzato col suo nome un elemento chimico, il Seaborgio (Sg, Z = 106).

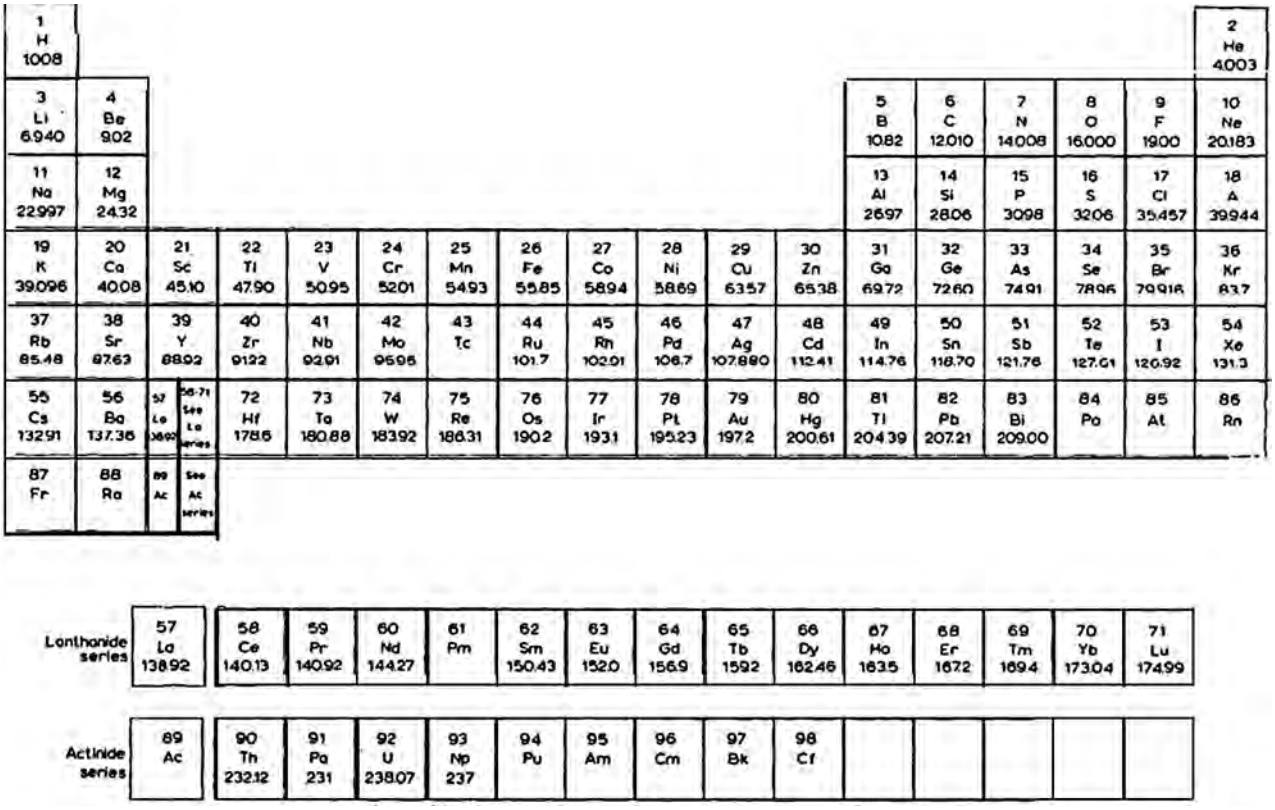

Fig. 5. Tavola Periodica di Seaborg nel 1951: vedi [14].

BIBLIOGRAFIA

[1] BOHR Niels, 1923. The Structure of the Atom. Nature, 112 No. 2801, 29-44.

[2] FERMI Enrico, 1938. Artificial radioactivity produced by neutron bombardment. Nobel Lecture, December 12, 1938, in *Physics 1922-1941, Nobel Lectures*, Elsevier, Amsterdam-London-New York, 1965.

[3] FOSTER Laurence S., 1939. Why not modernize the textbook also? I -The Periodic Table, Journal of Chemical Education, **16**, 409-411.

[4] HAHN Otto e Fritz STRASSMANN, 1939. Über den Nachweis und das Verhalten der bei der Bestrahlung des Urans mittels Neutronen entstehenden Erdalkalimetalle, Naturwissenschaften, **27(1)**, 11-15.

[5] HARRIS Joseph Allen, Leonard Francis YNTEMA, B. Smith HOPKINS, 1926. Illinium, Science, **63**, Issue 1640, pp. 575-576.

[6] HOPKINS B. Smith 1927. Building Blocks of the Universe, Scientific American, **136**, 87-89.

[7] KENNEDY Joseph W. and Arthur C. WAHL, Search for Spontaneous fission in 94^{239}, Physical Review, 1946, **69**, 367-368.

[8] MCMILLAN Edwin and Philip Hauge ABELSON, 1940. Radioactive Element 93. Physical Review, **57**, 1185-1186.

[9] MELLOR Joseph William, 1929. *A comprensive Treatise on Inorganic and Theorethical Chemistry*, Longmans, Green and Co., New York.

[10] MENDELEEV Dmitrij Ivanovič, 1871. Die periodische Gesetzmassigkeit der chemischen Elemente. Annalen der Chemie und Pharmacie, Supplementband, **VIII**, 133-229.

[11] MENDELEEV Dmitrij Ivanovič, 1897. *The principles of chemistry*, Traduzione di G. Kamensky dalla VI Edizione russa, Longman, Green and Co., London.

[12] SEABORG Glenn Theodore, 1945. The Chemical and Radioactive Properties of the Heavy Elements. Chemical and Engineering News, **23** N. 23, 2190-2193.

[13] SEABORG Glenn Theodore, 1946. The Transuranium Elements, Science, **104** n. 2704, 379-386.

[14] SEABORG Glenn Theodore, 1951. The transuranium elements: present status. Nobel Lecture, December 12, 1951, in *Nobel Lectures in Chemistry. Volume 3 - 1942*-1962, Elsevier, Amsterdam-London-New York, 1965.

[15] SEABORG Glenn Theodore, Edwin MCMILLAN, and Arthur C. WAHL, 1946. Radioactive Element 94 from Deuterons on Uranium, Physical Review, **69**, 366-367.

[16] SEABORG Glenn Theodore, 1991. Origin of the Actinide Concept in *The Comparative Science of the Actinide and Lanthanide Elements*, G. Choppin Ed., Elsevier Science Publishing, New York, 1992.

[17] WEEKS Mary Elvira, 1956. *Discovery of the elements* VI Edizione, Journal of Chemical Education, Easton, Cap. 29, pp. 803-843.

[18] WU Ta-You and Samuel GOUDSMIT, 1933. Low States of the Heaviest Elements, Physical Review, **43**, 496.