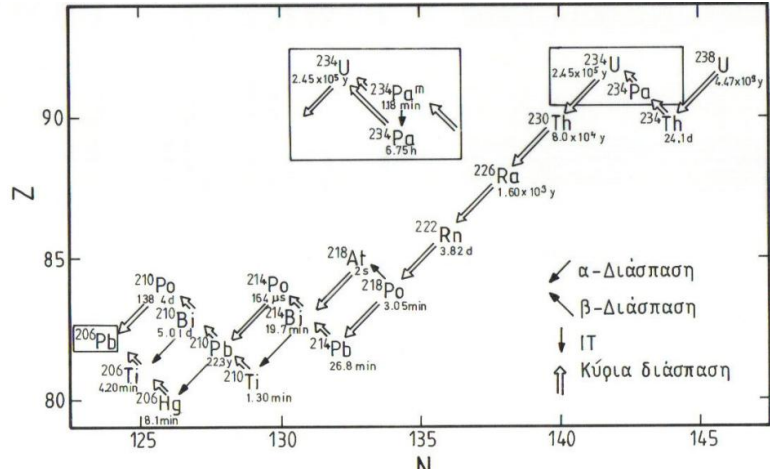


## 6. ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

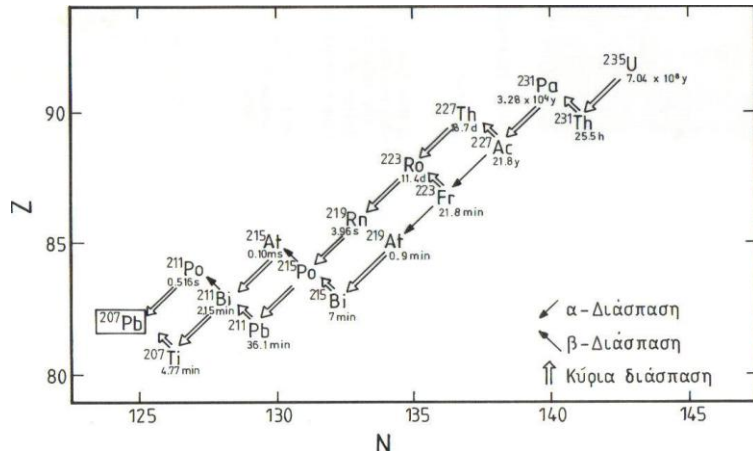
Από τα 118 μέχρι σήμερα γνωστά στοιχεία, μόνο τα 94 υπάρχουν στη γή κι από αυτά μόνο τα 80 παρουσιάζουν σταθερά ισότοπα (τα στοιχεία με  $Z = 1$  ως 82, εκτός από  $Z = 43$  (τεχνητό, Tc) και 61 (προμήθειο, Pm)). Μία ερευνητική ομάδα του Institut d'Astrophysique Spatiale του CNRS και του Université Paris Sud (Orsay, Γαλλία) ανακάλυψε το 2003 ότι το στοιχείο βισμούθιο ( $Z = 83$ ) δεν είναι στην πραγματικότητα σταθερό αλλά εξαιρετικά μακρόβιο ραδιενεργό. Η γαλλική αυτή ομάδα ανέφερε στη δημοσίευσή της ότι το  $^{209}\text{Bi}$  διασπάται εκπέμποντας σωματίδια- $\alpha$  με χρόνο υποδιπλασιασμού  $1.9 \times 10^{19}$  χρόνια, δηλαδή  $10^9$  φορές μεγαλύτερη από τη σήμερα αποδεκτή ηλικία του σύμπαντος<sup>1</sup>. Λόγω του εξαιρετικά μεγάλου χρόνου υποδιπλασιασμού του, το βισμούθιο θα εξακολουθήσει να θεωρείται στην πράξη ως σταθερό, αλλά η παρατήρηση αυτή επιβεβαίωσε θεωρητικές προβλέψεις.

Όλα τα στοιχεία με  $Z > 83$  είναι επίσης ασταθή και διασπώνται εκπέμποντας σωματιδιακή και ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Ανάμεσα στα ισότοπα αυτών των στοιχείων το  $^{232}\text{Th}$ , το  $^{235}\text{U}$  και το  $^{238}\text{U}$  παρουσιάζουν πολύ μεγάλο χρόνο υποδιπλασιασμού σε σχέση με την ηλικία της γης (περ.  $5 \times 10^9$  χρόνια) και αποτελούν τα μητρικά νουκλίδια των φυσικών ραδιενεργών σειρών του θορίου ( $A = 4n$ ), ακτινίου ( $A = 4n + 3$ ) και ουρανίου ( $A = 4n + 2$ ), που καταλήγουν αντίστοιχα, μετά σειρά διασπάσεων (βλ. Σχήμα 6-1, 6-2, 6-3), στα σταθερά ισότοπα του μολύβδου με  $A = 208, 207$  και  $206$ . Μέλη αυτών των φυσικών ραδιενεργών σειρών αποτελούν και ισότοπα των στοιχείων με  $Z = 91$  (Pa, πρωτακτίριο), 89 (Ac, ακτίριο), 88 (Ra, ράδιο), 87 (Fr, φράγκιο), 86 (Ra, ραδόνιο), 85 (At, αστάτιο) και 84 (Po, πολώνιο), που είναι ραδιενεργά. Η ραδιενεργός σειρά με μαζικό αριθμό των μελών της  $A = 4n + 1$  δεν υπάρχει πια στη φύση, λόγω του σχετικά μικρού χρόνου υποδιπλασιασμού του μητρικού της νουκλιδίου ( $^{237}\text{Np}$ ,  $t_{1/2} = 2.14 \times 10^6$  χρόνια). Το τελικό προϊόν αυτής της ραδιενεργού σειράς είναι το  $^{209}\text{Bi}$ .

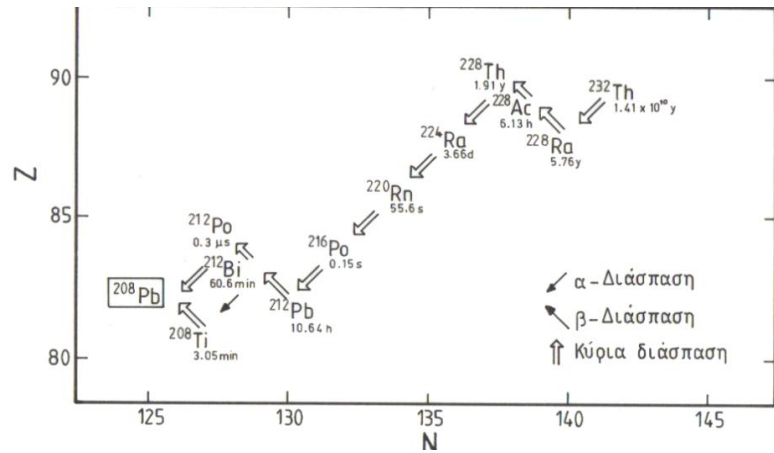
<sup>1</sup> Pierre de Marcillac et al., *Experimental detection of  $\alpha$ -particles from the radioactive decay of natural bismuth*, Nature **422** (2003) 876



Σχήμα 6-1: Η ραδιενεργός οικογένεια του ουρανίου-ραδίου ( $A=4n+2$ )



Σχήμα 6-2: Η ραδιενεργός οικογένεια του ακτινίου ( $A=4n+3$ )



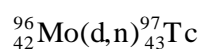
Σχήμα 6-3: Η ραδιενεργός οικογένεια του θορίου ( $A=4n$ )

Στα τεχνητά ραδιενεργά στοιχεία ανήκουν το τεχνητίο ( $Z = 47$ ), το προμήθειο ( $Z = 61$ ) καθώς επίσης όλα τα στοιχεία με ατομικό αριθμό  $Z > 92$ .

Τα ισότοπα όλων αυτών των στοιχείων δεν βρίσκονται στη φύση λόγω του μικρού χρόνου υποδιπλασιασμού τους.

### 6.1 Το τεχνητίο (Tc)

Το τεχνητίο ( $Z = 43$ ) ανακαλύφθηκε το 1937 από τους Perrier και Segre στην Ιταλία. Το νέο αυτό στοιχείο βρέθηκε σε δείγμα μολυβδαινίου, που ακτινοβολήθηκε με δευτερόνια από τον E. Lawrence στο κύκλοτρο του Berkeley



Το τεχνητίο, που ήταν το πρώτο τεχνητό στοιχείο, λαμβάνεται σήμερα σε σημαντικές ποσότητες κατά την επεξεργασία των χρησιμοποιημένων πυρηνικών καυσίμων. Ο ρυθμός παραγωγής του τεχνητίου-99 στους πυρηνικούς αντιδραστήρες είναι της τάξεως των 20 mg/MWd.

Το τεχνητίο βρέθηκε επίσης στο φάσμα των αστέρων του τύπου -S, -M και -N, πράγμα που οδήγησε σε καινούργιες θεωρίες σχετικά με την παραγωγή βαρέων στοιχείων στα άστρα. Από τα 24 σήμερα γνωστά ισότοπα του τεχνητίου, το μεγαλύτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει το τεχνητίο-99 ( $t_{1/2} = 2.1 \times 10^5$  χρόνια), το οποίο διαθέτει και ένα ισομερές το τεχνητίο-99m ( $t_{1/2} = 6.0$  ώρες). Το τεχνητίο-99m χρησιμοποιείται ευρύτατα στην ιατρική διαγνωστική.

Το τεχνητίο παρουσιάζει μία πληθώρα οξειδωτικών καταστάσεων (από 3- ως 7+), ενώ η χημεία του μοιάζει περισσότερο με αυτή του ρηνίου παρά με την αντίστοιχη του μαγγανίου.

Η πλέον σταθερή οξειδωτική του τεχνητίου κατάσταση είναι η 7+, και οι πιο γνωστές ενώσεις του σ' αυτή την οξειδωτική κατάσταση το  $\text{Tc}_2\text{S}_7$ , το  $\text{Tc}_2\text{O}_7$ , τα αλογονίδια ( $\text{TcX}_6$ , όπου  $X = \text{F}, \text{Cl}, \text{Br}, \text{I}, \text{SCN}$ ) και τα υπετεχνητικά άλατα ( $\text{MTcO}_4$ , όπου M: μονοσθενές κατιόν). Το ελεύθερο υπερτεχνητικό οξύ ( $\text{HTcO}_4$ ) είναι επίσης γνωστό.

Οι πιο χαρακτηριστικές ενώσεις του τετρασθενούς τεχνητίου είναι το οξείδιο ( $\text{TcO}_2$ ) και τα σύμπλοκα του τύπου  $\text{TcX}^{-2}$  (όπου  $X = \text{F}, \text{Cl}, \text{Br}, \text{I}, \text{SCN}$ ). Από τις ενώσεις του τεχνητίου σε χαμηλότερες οξειδωτικές καταστάσεις μπορούν να αναφερθούν οι χηλικές ενώσεις του Tc(III) και Tc(II) με υποκατεστημένες διαρσίνες, το εξακύανο-τεχνητικό κάλιο, υδρίδια, καρβονυλικές και οργανομεταλλικές ενώσεως και το διβένζο-τεχνητικό κατιόν.

Το μεταλλικό τεχνητίο (σ.τ. 2445.2 K, σ.ζ. 4840 K,  $\rho(293 \text{ K}) = 11.5 \text{ g/cm}^3$ ) λαμβάνεται σήμερα με την αναγωγή υπερτεχνητικού αμμωνίου με υδρογόνο. Το μέταλλο, που είναι ένας έξοχος υπεραγωγός σε θερμοκρασίες χαμηλότερες των 11 K, διαλύεται σε νιτρικό οξύ, σε

βασιλικό ύδωρ και σε πυκνό θειικό οξύ αλλά όχι σε υδροχλωρικό οξύ.

Πέρα από τις ιατρικές εφαρμογές του, το τεχνητό διαθέτει αντιδιαβρωτικές ιδιότητες. Έχει αναφερθεί ότι συγκεντρώσεις  $\text{K}_2\text{CrO}_4$  της τάξεως των 55 mg/kg μπορούν να προστατεύσουν μαλακούς ανθρακούχους χάλυβες από τη διάβρωση σε νερό θερμοκρασίας μέχρι 250 °C. Οι εφαρμογές όμως του στοιχείου αυτού περιορίζονται από την ακτινοβολία του.

## 6.2 Το προμήθειο (Pm)

Η πρώτη χημική επιβεβαίωση της σύνθεσης του προμηθείου έγινε το 1947 από τους Coryell, Glendenin και Marinisky, οι οποίοι μελετώντας τα προϊόντα σχάσεως του ουρανίου με χρωματογραφία ιοντοανταλλαγής ανακάλυψαν το  $^{147}\text{Pm}$  και το  $^{149}\text{Pm}$ . Το  $^{147}\text{Pm}$  παράγεται σε ζυγίσιμες ποσότητες σε πυρηνικούς αντιδραστήρες ισχύος (περίπου 10 mg/MWd).

Σήμερα είναι γνωστά 29 ισότοπα του προμηθείου με μαζικό αριθμό A μεταξύ 130 και 158.

Η χημική συμπεριφορά του προμηθείου είναι ανάλογη της ομάδας των σπανίων γαιών, στις οποίες ανήκει. Παρουσιάζεται μόνον ως τρισθενές και σχηματίζει, μεταξύ άλλων, οξειδίο, υδροξείδιο, αλογονίδια και φωσφορικό άλας. Το μεταλλικό προμήθειο (σ.τ. 1353.2 K) λαμβάνεται με αναγωγή του  $\text{PmF}_3$  με ασβέστιο.

Οι εφαρμογές του προμηθείου είναι πολύ περιορισμένες. Χρησιμοποιείται, λόγω της ακτινοβολίας-β που εκπέμπει, για τη διέγερση εκπομπής ακτίνων-X, σε συστήματα μετρήσεως πάχους υλικών, σε φωσφορίζουσες χρωστικές και πυρηνικούς ηλεκτρικούς συσσωρευτές. Από τα ισότοπα του προμηθείου το  $^{147}\text{Pm}$  ( $t_{1/2} = 2.6$  χρόνια) παρουσιάζει τη μεγαλύτερη χρησιμότητα.

## 6.3 Οι ακτινίδες

Στην ομάδα των ακτινίδων ανήκουν τα στοιχεία με ατομικό αριθμό (Z) από 89 μέχρι 103. Τα στοιχεία αυτά δε διαθέτουν κανένα σταθερό ισότοπο. Τα βαρύτερα στοιχεία της ομάδος παρουσιάζουν την τάση να διασπώνται με αυθόρμητη σχάση. Μόνο τέσσερα από τα στοιχεία της ομάδας των ακτινίδων υπάρχουν στη φύση (Ac, Th, Pa, U), ενώ τα υπόλοιπα έχουν παρασκευασθεί τεχνητά.

Η ηλεκτρονική δομή όλων των ακτινίδων δεν είναι τελείως γνωστή. Χαρακτηριστική είναι η βαθμιαία συμπλήρωση των 5f τροχιακών (βλ. Πίνακα 6-1), που γίνεται εμφανής και στις ιδιότητες των στοιχείων. Τα 5f-ηλεκτρόνια συμμετέχουν στο χημικό δεσμό ισχυρότερα από τα 4f-ηλεκτρόνια των λανθανίδων. Έτσι, ενώ στις λανθανίδες δεν είναι ποτέ διαθέσιμα για χημικό δεσμό περισσότερα από δύο 4f-ηλεκτρόνια (π.χ. ενώσεις του Tb(IV)), στις ακτινίδες περισσότερα από δύο f-ηλεκτρόνια λαμβάνουν μέρος στη χημική τους σύνδεση (π.χ. ενώσεις του U(VI)). Το

γεγονός αυτό μπορεί να εξηγηθεί με τη μικρότερη ενεργειακή διαφορά μεταξύ των 5f και των 6d τροχιακών καταστάσεων σε σύγκριση με τη διαφορά μεταξύ των 4f και 5d καταστάσεων στις λανθανίδες. Όσο αυξάνει ο ατομικός αριθμός τόσο αυξάνει και η ενεργειακή απόσταση μεταξύ των 5f και 6d καταστάσεων. Η ιδιότητα αυτή γίνεται ιδιαίτερα εμφανής παρατηρώντας τις δυνατές οξειδωτικές καταστάσεις των ακτινίδων στον Πίνακα 6.2. Οι έντονα γραμμένες οξειδωτικές καταστάσεις είναι οι πλέον συνηθισμένες.

Τα ιόντα των ακτινίδων της ίδιας οξειδωτικής κατάστασης παρουσιάζουν μία ελάττωση της ακτίνας τους αυξανόμενου του ατομικού τους αριθμού (*συστολή των ακτινίδων*). Το φαινόμενο αυτό εξηγείται με τη συμπλήρωση της 5f στοιβάδας ηλεκτρονίων, ενώ οι εξωτερικές στοιβάδες παραμένουν αμετάβλητες.

Η αύξηση του ατομικού αριθμού και του φορτίου του πυρήνα οδηγεί στη μείωση της ακτίνας των ιόντων. Το ίδιο φαινόμενο παρατηρείται και στις λανθανίδες (Σχήμα 6-4).

Πίνακας 6-1: Ηλεκτρονική διαμόρφωση της βασικής κατάστασης των ακτινίδων.

Ατομικός αριθμός (Z)	Σύμβολο	Όνομα	Ηλεκτρονική Διαμόρφωση
89	Ac	Ακτίνιο	[Rn]6d 7s <sup>2</sup>
90	Th	Θόριο	[Rn]6d <sup>2</sup> 7s <sup>2</sup>
91	Pa	Πρωτακτίνιο	[Rn]5f <sup>2</sup> 6d <sup>1</sup> 7s <sup>2</sup>
92	U	Ουράνιο	[Rn]5f <sup>3</sup> 6d <sup>1</sup> 7s <sup>2</sup>
93	Np	Νεπτούνιο	[Rn]5f <sup>4</sup> 6d <sup>1</sup> 7s <sup>2</sup>
94	Pu	Πλουτόνιο	[Rn]5f <sup>6</sup> 7s <sup>2</sup>
95	Am	Αμερίκιο	[Rn]5f <sup>7</sup> 7s <sup>2</sup>
96	Cm	Κιούριο	[Rn]5f <sup>7</sup> 6d <sup>1</sup> 7s <sup>2</sup>
97	Bk	Μπερκέλιο	[Rn]5f <sup>9</sup> 7s <sup>2</sup>
98	Cf	Καλιφόρνιο	[Rn]5f <sup>10</sup> 7s <sup>2</sup>
99	Es	Αϊνστάνιο	[Rn]5f <sup>11</sup> 7s <sup>2</sup>
100	Fm	Φέρμιο	[Rn]5f <sup>12</sup> 7s <sup>2</sup>
101	Md	Μεντελέβιο	[Rn]5f <sup>13</sup> 7s <sup>2</sup>
102	No	Νομπέλιο	[Rn]5f <sup>14</sup> 7s <sup>2</sup>
103	Lr	Λωρέντσιο	[Rn]5f <sup>14</sup> 6d <sup>1</sup> 7s <sup>2</sup>

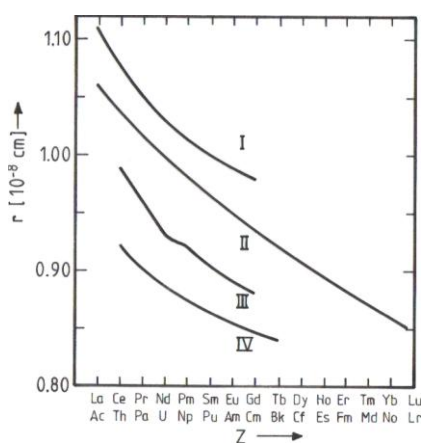
Η χημική συμπεριφορά των ακτινίδων είναι ανάλογη των λανθανίδων. Οι ακτινίδες παρουσιάζουν μία πληθώρα οξειδωτικών καταστάσεων από +1 μέχρι 7+.

Η δισθενής, τρισθενής και τετρασθενής κατάσταση εμφανίζεται στα περισσότερα στοιχεία αυτής της ομάδας με το σχηματισμό ιόντων του τύπου M<sup>n+</sup>. Στα διαλύματα παρουσιάζονται τα αντίστοιχα ενυδατωμένα ιόντα.

Ο αριθμός συναρμογής των  $M^{n+}$  -ιόντων σε διαλύματα εξαρτάται από το μέγεθος των ιόντων και των συναρμοστών (ligands). Τα ιόντα των τρισθενών ακτινίδων του τύπου  $M^{3+}$  μπορούν να δεχθούν 8 ως 9 μόρια ύδατος στην πρώτη σφαίρα συναρμογής, ενώ τα περαιτέρω μόρια ύδατος, που δεν είναι απευθείας συνδεδεμένα με το  $M^{3+}$  ιόν, μπορούν να διαταχθούν στη δεύτερη σφαίρα συναρμογής. Ο αριθμός συναρμογής των  $M^{4+}$  - ιόντων είναι 8.

Πίνακας 6-2: Οξειδωτικές καταστάσεις των λανθανίδων και ακτινίδων (με έντονη γραφή χαρακτηρίζεται η πιο σταθερή).

ΛΑΝΘΑΝΙΔΕΣ			ΑΚΤΙΝΙΔΕΣ		
Σύμβολο	Z	Οξειδωτική Κατάσταση	Σύμβολο	Z	Οξειδωτική Κατάσταση
La	57	<b>3</b>	Ac	89	<b>3</b>
Ce	58	<b>3, 4</b>	Th	90	<b>3, 4</b>
Pr	59	<b>3, 4</b>	Pa	91	<b>4, 5</b>
Nd	60	<b>3, 4</b>	U	92	<b>3, 4, 5, 6</b>
Pm	61	<b>3</b>	Np	93	<b>3, 4, 5, 6, 7</b>
Sm	62	<b>2, 3</b>	Pu	94	<b>3, 4, 5, 6, 7</b>
Eu	63	<b>2, 3</b>	Am	95	<b>2, 3, 4, 5, 6</b>
Gd	64	<b>3</b>	Cm	96	<b>2, 3, 4</b>
Tb	65	<b>3, 4</b>	Bk	97	<b>2, 3, 4</b>
Dy	66	<b>3, 4</b>	Cf	98	<b>2, 3, 4</b>
Ho	67	<b>3</b>	Es	99	<b>2, 3</b>
Er	68	<b>3</b>	Fm	100	<b>2, 3</b>
Tm	69	<b>2, 3</b>	Md	101	<b>1, 2, 3</b>
Yb	70	<b>2, 3</b>	No	102	<b>2, 3</b>
Lu	71	<b>3</b>	Lr	103	<b>3</b>

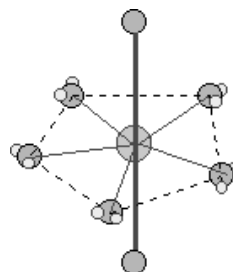


Σχήμα 6-4: Σύσθολή της ακτίνας των ιόντων των τρισθενών και τετρασθενών ακτινίδων και λανθανίδων (I: ακτινίδες (III), II: λανθανίδες (III), III: ακτινίδες (IV), IV: λανθανίδες (IV))

Το θόριο δεν είναι σταθερό στην οξειδωτική κατάσταση (III). Το τρισθενές ουράνιο, νεπτούνιο και πλουτόνιο δεν χαρακτηρίζονται επίσης από ιδιαίτερη σταθερότητα. Το τρισθενές ουράνιο αντιδρά σε υδατικά διαλύματα με το νερό με έκλυση υδρογόνου, ενώ το τρισθενές νεπτούνιο και πλουτόνιο είναι σταθερά σε υδατικά διαλύματα αλλά οξειδώνονται πολύ γρήγορα στον αέρα.

Η τετρασθενής κατάσταση είναι η χαρακτηριστική οξειδωτική κατάσταση του θορίου. Το τετρασθενές ουράνιο και νεπτούνιο είναι σταθερά σε υδατικά διαλύματα αλλά οξειδώνονται με αργό ρυθμό στον αέρα μεταπίπτοντας στην εξασθενή κατάσταση ( $(\text{UO}_2)^{2+}$  και  $(\text{NpO}_2)^{2+}$ ). Το τετρασθενές πλουτόνιο είναι σταθερό μόνο σε ισχυρά όξινα διαλύματα, ενώ σε αραιά διαλύματα οξέων μετατρέπεται σε μείγμα της τρισθενούς και εξασθενούς. Το τετρασθενές αμερίκιο και κιούριο είναι γνωστά μόνο με τη μορφή συμπλόκων ενώσεων σε διαλύματα. Το τετρασθενές μπερκέλιο είναι σταθερό αλλά μπορεί να αναχθεί σε τρισθενές. Όλες οι ακτινίδες σχηματίζουν δυσδιάλυτα ιωδικά και αρσενικικά άλατα. Στην οξειδωτική κατάσταση (IV) εμφανίζουν οι ακτινίδες μία συγγένεια με το τετρασθενές δημήτριο και το ζιρκόνιο.

Η κύρια μορφή των πεντασθενών και εξασθενών ακτινιδών είναι το ακτινυλικό κατιόν  $(\text{MO}_2)^{n+}$  με ευθύγραμμο ομοιοπολικό δεσμό μεταξύ του μετάλλου και του οξυγόνου (Σχήμα 6-5). Μόνο το πρωτακτίνιο εμφανίζεται σε πολύ όξινα διαλύματα με τη μορφή του "γυμνού" πεντασθενούς μεταλλικού ιόντος.



Σχήμα 6-5: Το ακτινυλικό ιόν του τύπου  $\text{MO}_2^{+} \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  ή  $\text{MO}_2^{2+} \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ . Η μετατροπή των μεταλλικών ιόντων στη διοξυ-μορφή δεν είναι αμφίδρομη



Η οξειδωτική κατάσταση ((VI) είναι χαρακτηριστική για το ουράνιο και εμφανίζεται στο νεπτούνιο, πλουτόνιο και αμερίκιο. Η σταθερότερη μορφή των επτασθενών ακτινιδών είναι το ανιόν  $(\text{MO}_4)^-$ . Σε αλκαλικά διαλύματα το ανιόν αυτό λαμβάνει τη μορφή  $(\text{MO}_4(\text{OH})_2)^{3-}$ . Η μορφή του "γυμνού" επτασθενούς κατιόντος είναι σπανιότερη και παρατηρείται, κατά πάσα πιθανότητα, στις ενώσεις  $\text{Li}_5\text{PuO}_6$  ή  $\text{Ba}_2\text{LiNpO}_6$ .

Τα ιόντα των ακτινίδων παρουσιάζουν μία ισχυρή τάση να υδρολύονται και να σχηματίζουν σύμπλοκα με οργανικούς και ανόργανους συναρμοστές. Η τελευταία αυτή ιδιότητα παρουσιάζει μεγάλο ενδιαφέρον για το διαχωρισμό τους με εκχύλιση ή ανταλλαγή ιόντων. Τα σύμπλοκα των ακτινίδων με OH-ομάδες είναι σταθερότερα από τα αντίστοιχα με SH-ομάδες. Η τάση σχηματισμού συμπλόκων για μία οξειδωτική κατάσταση ελαττώνεται αυξανομένης της ακτίνας των ιόντων.

Οι χηλικές ενώσεις των ακτινίδων με πενταμελείς δακτύλιους είναι σταθερότερες από τις αντίστοιχες με εξαμελείς. Στα ακτινιδικά ιόντα παρατηρούνται αριθμοί συναρμογής μέχρι 8 (εξαγωνική διπυραμίδα), ενώ σε χηλικές ενώσεις με "γυμνά" μεταλλικά ιόντα 10 και μεγαλύτεροι (π.χ. 12 στο  $\text{MgTh}(\text{NO}_3)_6 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ ).

Τα μέταλλα των στοιχείων της ομάδας των ακτινίδων λαμβάνονται με αναγωγή των ενώσεών τους με ισχυρά αναγωγικά μέσα, όπως το ασβέστιο ή το βάριο (π.χ.,  $\text{PuF}_4 + 2 \text{Ca} \rightarrow \text{Pu} + 2 \text{CaF}_2$ ).

Τα διοξείδια είναι οι σταθερότερες ενώσεις των ακτινίδων από το Np μέχρι το Cf. Με αναγωγή με υδρογόνο σχηματίζονται, εκτός από την περίπτωση του Np, οξείδια του τύπου  $\text{M}_2\text{O}_3$ , που είναι ισότυπα των λανθανιδών. Σε τήγματα και υδατικά διαλύματα μπορεί να παρατηρηθούν και οξείδια υψηλότερων οξειδωτικών καταστάσεων (π.χ.  $\text{Np}_3\text{O}_8$ ,  $\text{PuO}_3 \cdot 0.8\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{NpO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ). Με άμεση αντίδραση των στοιχείων Np μέχρι Bk με υδρογόνο, άζωτο και άνθρακα λαμβάνονται υδρίδια (π.χ.  $\text{NpH}_3$ ,  $\text{PuH}_2$ ,  $\text{BkH}_{2+x}$ ), αζίδια (π.χ.  $\text{PuN}$ ) και καρβίδια (π.χ.  $\text{PuC}$ ,  $\text{Pu}_2\text{C}_3$ ,  $\text{PuC}_2$ ).

Οι ακτινίδες σε μεταλλική κατάσταση παρουσιάζουν υψηλή πυκνότητα και εμφανίζονται σε πολλές κρυσταλλικές μορφές (πολυμορφία). Οι μαγνητικές ιδιότητες των ακτινίδων δείχνουν απόλυτη αναλογία με των λανθανιδών. Όλες οι ακτινίδες με μονήρη 5f-ηλεκτρόνια είναι παραμαγνητικές.

Από άποψη χρησιμοποίησης τεχνολογικό ενδιαφέρον μόνο τρία στοιχεία αυτής της ομάδας: το θόριο, το ουράνιο και το πλουτώνιο. Το καλιφόρνιο χρησιμοποιείται σε μικρές ποσότητες ως πηγή νετρονίων ενώ το αμερίκιο ως πηγή σωματιδίων-α σε πηγές νετρονίων και σε συστήματα πυρασφαλείας.

### 6.3.1 Το θόριο (Th)

Το θόριο (σ.τ. 2023 K, σ.ζ. 5061, πυκνότητα  $\rho = 11.72 \text{ gr/cm}^3$ ), που ανακαλύφθηκε το 1829 από τον σουηδό χημικό J. J. Berzelius στο ορυκτό θορίτη ( $\text{ThSiO}_4$ ), βρίσκεται με αφθονία 0.0007% στο φλοιό της γής. Σήμερα είναι γνωστά 30 ισότοπα του θορίου με μαζικό αριθμό από 209 ως 238. Το φυσικό θόριο ( $^{232}\text{Th}$ ) έχει χρόνο υποδιπλασιασμού  $1.4 \times 10^{10}$  χρόνια και είναι το μητρικό νουκλίδιο της ραδιενεργού οικογένειας του θορίου ( $A = 4n$ ). Στη φύση συναντώνται ακόμη το  $^{227}\text{Th}$  ( $t_{1/2}=18.2$  ημέρες), το  $^{228}\text{Th}$  ( $t_{1/2}=1.91$  χρόνια), το  $^{230}\text{Th}$  ( $t_{1/2}=8 \cdot 10^4$  χρόνια), το



$^{231}\text{Th}$  ( $t_{1/2}=25.52$  ημέρες) και το  $^{234}\text{Th}$  ( $t_{1/2}=24.1$  ημέρες), που είναι μέλη των διαφόρων φυσικών ραδιενεργών οικογενειών.

Η κυριώτερη πηγή του θορίου είναι η άμμος του μοναζίτη ((Ce, La, Th, Nd, Y)PO<sub>4</sub>), που περιέχει, εκτός από τα φωσφορικά του θορίου και των λανθανιδών, πυριτικά, σίδηρο, αλουμίνιο, μαγνήσιο και ασβέστιο. Η παραλαβή του παραγματοποιείται με τη βοήθεια υδρομεταλλουργικών μεθόδων από όξινο ή αλκαλικό περιβάλλον. Το μεταλλικό θόριο παράγεται με αναγωγή των φθοριούχων ή χλωριούχων ενώσεων του με ασβέστιο, μαγνήσιο ή νάτριο.

Η χαρακτηριστικότερη οξειδωτική κατάσταση του θορίου είναι η +4, που στη χημική συμπεριφορά παρουσιάζει ομοιότητες με το ζirkόνιο και το τετρασθενές δημήτριο.

Το θόριο σχηματίζει μία πληθώρα ενώσεων. Το οξείδιο του θορίου (ThO<sub>2</sub>) έχει το υψηλότερο σημείο τήξεως ανάμεσα στα οξείδια των μετάλλων (σ.τ. 3663 K) και λαμβάνεται κατά την οξείδωση του μετάλλου στον αέρα ή την πύρωση των ενώσεών του. Τα αλογονίδια του θορίου υδρολυόμενα δίνουν προϊόντα του τύπου Th(OH)X<sub>3</sub> και ThOX<sub>2</sub>. Η κρυστάλλωση των αλάτων του με οξέα πραγματοποιείται με τη συμμετοχή διαφορετικών αριθμών μορίων ύδατος. Τα υδρίδια (ThH<sub>2</sub>, Th<sub>4</sub>H<sub>15</sub>), βορίδια (ThB<sub>4</sub>, ThB<sub>6</sub>), καρβίδια (ThC, ThC<sub>2</sub>), πυριτίδια (ThSi, Th<sub>3</sub>Si<sub>2</sub>, ThSi<sub>2</sub>), φωσφίδια (Th<sub>3</sub>P<sub>4</sub>, ThP), σουλφίδια (ThS, Th<sub>2</sub>S<sub>3</sub>, Th<sub>7</sub>S<sub>12</sub>, ThS<sub>2</sub>) και οξυσουλφίδια (ThOS) αποτελούν μερικές από τις άλλες ανόργανες ενώσεις του θορίου.

Χαρακτηριστική είναι εξ άλλου η ιδιότητα του θορίου να σχηματίζει διπλά άλατα. Διπλά άλατα του θορίου και των αλκαλίων είναι γνωστά με σχεδόν όλα τα ανιόντα. Με μερικά ανιόντα το θόριο σχηματίζει σύμπλοκα κατιόντα του τύπου [ThX]<sup>3+</sup>, [ThX<sub>2</sub>]<sup>2+</sup> και [ThX<sub>3</sub>]<sup>+</sup> καθώς επίσης ουδέτερα σύμπλοκα του τύπου [ThX<sub>4</sub>]. Η ιδιότητα αυτή καθιστά την συμπεριφορά των ιόντων του θορίου σε διαλύματα πολύπλοκη. Το ανθρακικό θόριο είναι π.χ. διαλυτό σε περίσσεια ανθρακικού αμμωνίου εξαιτίας του σχηματισμού του (NH<sub>4</sub>)<sub>6</sub>Th(CO<sub>3</sub>)<sub>5</sub> ενώ το οξαλικό θόριο, που είναι αδιάλυτο σε διαλύματα αραιών οξέων, διαλύεται σε περίσσεια οξαλικών με σχηματισμό του συμπλόκου ιόντος [Th(C<sub>2</sub>O<sub>4</sub>)<sub>4</sub>]<sup>4-</sup>.

Το θόριο-232 σχάζεται με ταχέα νετρόνια ενέργειας μεγαλύτερης από 1.05 MeV και μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο για πυρηνικούς αντιδραστήρες καθώς επίσης για την εκκόλαψη του ουρανίου-233, που είναι επίσης σχάσιμο. Το θόριο χρησιμοποιήθηκε επίσης για την παρασκευή του μανδύα Welsbach σε φορητές φωτιστικές συσκευές αερίου (οξείδιο θορίου και περίπου 1% οξείδιο δημητρίου), στην κατασκευή εργαστηριακών χωνευτηρίων υψηλής θερμοκρασίας, στη βελτίωση της αντοχής κραμάτων του μαγνησίου, στην επικάλυψη συρμάτων βολφραμίου για ηλεκτρονικές εφαρμογές και στην κατασκευή υψηλής ποιότητας φακών για φωτογραφικές μηχανές και επιστημονικά όργανα. Επίσης το οξείδιο του θορίου χρησιμοποιείται ως καταλύτης στη μετατροπή της αμμωνίας σε νιτρικό οξύ, στην πετροχημική βιομηχανία (cracking) και στην παραγωγή θεικού οξέως.

### 6.3.2 Το πρωτακτίσιο (Pa)

Το πρωτακτίσιο ανακαλύφθηκε το 1913 από τους K. Fajans και O. Göhring, που αναγνώρισαν το  $^{234m}\text{Pa}$  ( $t_{1/2} = 1.17 \text{ min}$ ) ανάμεσα στα μέλη της φυσικής ραδιενεργού οικογένειας του  $^{238}\text{U}$ . Το πιο σταθερό από τα ισότοπα του πρωτακτινίου, το  $^{231}\text{Pa}$  ( $t_{1/2} = 32760 \text{ χρόνια}$ ), ανακαλύφθηκε το 1916 από τους O. Hahn, L. Meitner, F. Soddy και J.A. Cranston. Οι πιο γνωστές ενώσεις του πρωτακτινίου είναι τα αλογονίδια ( $\text{PaF}_4$ ,  $\text{PaF}_5$ ,  $\text{PaCl}_4$ ,  $\text{PaCl}_5$ ,  $\text{PaBr}_4$ ,  $\text{PaBr}_5$ ,  $\text{PaI}_3$ ,  $\text{PaI}_4$ ,  $\text{PaI}_5$ ) και τα οξειδία του ( $\text{PaO}$ ,  $\text{PaO}_2$ ,  $\text{Pa}_2\text{O}_5$ ).

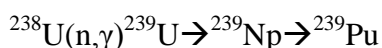
### 6.3.3 Το ουράνιο (U)

Το ουράνιο, που ανακαλύφθηκε το 1789 από τον H. Klaproth στο ορυκτό πισσουρανίτης και πήρε το όνομα του πλανήτη Ουρανού, αποτελεί σήμερα το σημαντικότερο πυρηνικό καύσιμο. Όλα τα ισότοπα του ουρανίου είναι ραδιενεργά. Το φυσικό ουράνιο με ατομική μάζα 238.029 αποτελείται από ένα μείγμα τριών ισωτόπων, του ουρανίου-238 ( $t_{1/2} = 4.51 \times 10^9 \text{ χρόνια}$ , αφθονία: 99.276 %), του ουρανίου-235 ( $t_{1/2} = 7.1 \times 10^8 \text{ χρόνια}$ , αφθονία: 0.7196 %) και του ουρανίου-234 ( $t_{1/2} = 2.47 \times 10^5 \text{ χρόνια}$ , αφθονία: 0.0057 %). Και τα τρία ισότοπα του ουρανίου διασπώνται εκπέμποντας ακτινοβολία-α. Το ουράνιο-238 και το ουράνιο-235 αποτελούν τα μητρικά νουκλίδια των ραδιενεργών οικογενειών του ουρανίου ( $A = 4n + 2$ ) και του ακτινίου ( $A = 4n + 3$ ).

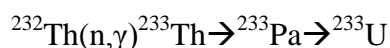
Η αφθονία του ουρανίου στη φύση είναι της ίδιας τάξεως μεγέθους με το βόριο, άφνιο και ψευδάργυρο ( $(2-3) \cdot 10^{-4} \%$ ). Ορυκτά του ουρανίου με περιεκτικότητα μεγαλύτερη από 0.5 % θεωρούνται εκμεταλλεύσιμα. Το θαλασσινό νερό περιέχει επίσης 2  $\mu\text{g/L}$  ουράνιο.

Για την παραλαβή του ουρανίου από τα ορυκτά του χρησιμοποιείται η διάλυσή τους σε θειικό οξύ ή σε διαλύματα σόδας. Το ουράνιο σχηματίζει ευδιάλυτα θειικά και ανθρακικά σύμπλοκα ( $\text{UO}_2(\text{SO}_4)_3^{4-}$ ,  $\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3^{4-}$ ), που συγκρατούνται σε ανιονικούς εναλλάκτες. Μετά την παραλαβή του με αραιό νιτρικό οξύ το ουράνιο καθαρίζεται με εκχύλιση με TBP (tri-butyl-phosphate) σε κηροζίνη. Το τελικό προϊόν, που εμφανίζεται στο εμπόριο είναι το  $(\text{NH}_4)_2\text{U}_2\text{O}_7$  (yellow cake).

Το ουράνιο είναι το πλέον ενδιαφέρον στοιχείο για την πυρηνική τεχνολογία. Το οξείδιο του ουρανίου-235 είναι το κύριο καύσιμο για πυρηνικούς αντιδραστήρες ενώ το ουράνιο-238 χρησιμοποιείται σε μετατρεπτικούς αντιδραστήρες για την παραγωγή του σχασίμου  $^{239}\text{Pu}$  ( $t_{1/2} = 24000 \text{ χρόνια}$ )



Σχάσιμο είναι επίσης το ουράνιο-233 ( $t_{1/2} = 160\,000 \text{ χρόνια}$ ), που παράγεται από την ακτινοβόληση του θορίου-232 με νετρόνια σε μετατρεπτικούς αντιδραστήρες

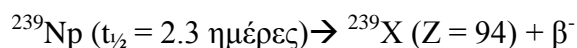


### 6.3.4 Το νεπτούνιο (Np) και το πλουτόνιο (Pu)

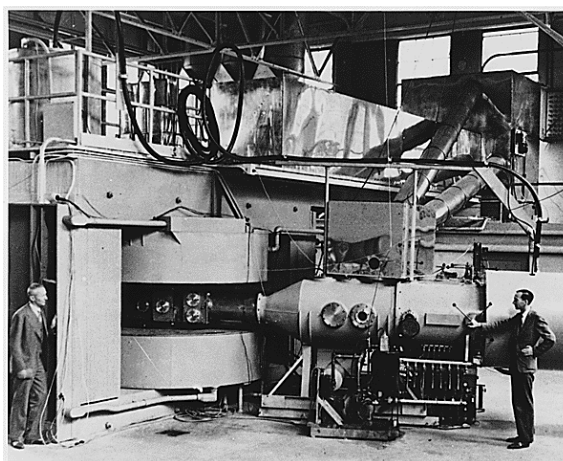
Την άνοιξη του 1940 ο E. McMillan και P. Abelson, εργαζόμενοι στο Κύκλοτρο του Πανεπιστημίου της Καλιφόρνια στο Berkeley, (Σχήμα 6-6) ακτινοβόλησαν ένα στόχο φυσικού ουρανίου με ταχέα νετρόνια ( $E_n=12$  MeV). Τα νετρόνια αυτά παράχθηκαν από την αντίδραση δευτερονίων με βηρύλλιο (Be). Οι McMillan και Abelson παρατήρησαν την ιδιαιτερότητα των χημικών και πυρηνικών ιδιοτήτων του προϊόντος της διάσπασης του  $^{239}\text{U}$  και ανακάλυψαν το πρώτο υπερουράνιο στοιχείο, το νεπτούνιο (Np,  $Z = 93$ )<sup>2</sup>.



Από την άλλη μεριά, το καλοκαίρι του 1940 μία άλλη ερευνητική ομάδα αποτελούμενη από τους χημικούς G. Seaborg, A. Wahl και J. Kennedy στο ίδιο εργαστήριο άρχισαν να ψάχνουν για το επόμενο υπερουράνιο στοιχείο με  $Z = 94$ , που υπέθεσαν ότι είναι προϊόν της διάσπασης του Np-239.



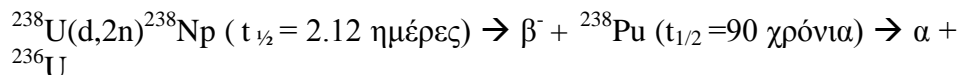
Συνεχίζοντας τις έρευνές τους για το στοιχείο με  $Z = 94$  τον χειμώνα του 1941, βομβάρδισαν οξείδιο του ουρανίου με δευτερόνια ενέργειας 16 MeV και αναγνώρισαν ένα άλλο ισότοπο του νεπτουνίου, το Np-238, που



Σχήμα 6-6: Το κύκλοτρο των 60 ιντσών του Πανεπιστημίου της Καλιφόρνια στο Berkeley.

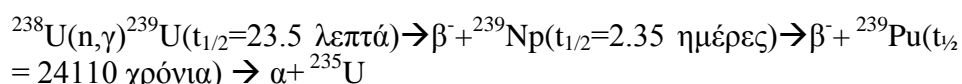
<sup>2</sup> G. T. Seaborg, *The chemical and radioactive properties of the heavy elements*, Chemical and Engineering News **23** (1945) 2190

διασπαζόταν με εκπομπή ακτινοβολίας-β σ' ένα ισότοπο του στοιχείου με  $Z = 94$ , του πλουτωνίου, το οποίο με τη σειρά του διασπαζόταν κι αυτό με α-διάσπαση



Το πλουτώνιο διαχωρίστηκε χημικά από το U, το Np και τα άλλα προϊόντα της αντίδρασης και οξειδώθηκε με  $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$  σε μία οξειδωτική κατάσταση, που ήταν διαλυτή σε φθοριούχα. Τα υπόλοιπα προϊόντα της αντίδρασης δεν οξειδώθηκαν και παρέμειναν αδιάλυτα. Μετά από αναγωγή με  $\text{SO}_2$  σε μια χαμηλότερη οξειδωτική κατάσταση το πλουτώνιο καταβυθίστηκε ως φθοριούχο και παραλήφθηκε χρησιμοποιώντας  $\text{Ce}^{3+}$  και  $\text{La}^{3+}$  ως φορείς. Αυτός ο χημικός διαχωρισμός απετέλεσε και τη βάση της μετέπειτα παραγωγής μεγάλων ποσοτήτων πλουτωνίου. Η αναγνώριση του νέου στοιχείου έγινε με βάση την ακτινοβολία-α, που εκπέμπει. Η επιβεβαίωση του μαζικού αριθμού του ισότοπου αυτού, που ήταν το  ${}^{238}\text{Pu}$ , πραγματοποιήθηκε αργότερα. Πάντως η προσπάθεια του διαχωρισμού έδωσε στους επιστήμονες την ευκαιρία να ανακαλύψουν και να κατανοήσουν πολλές χημικές ιδιότητες του νέου αυτού στοιχείου.

Την άνοιξη του 1941 ένα ακόμη σημαντικότατο ισότοπο του πλουτωνίου, το  ${}^{239}\text{Pu}$ , ανακαλύφθηκε στο ίδιο εργαστήριο με βομβαρδισμό μίας ένωσης του ουρανίου με νετρόνια χαμηλής ενέργειας. Το νέο αυτό ισότοπο, που εκπέμπει επίσης ακτινοβολία-α και έχει χρόνο υποδιπλασιασμού 24000 χρόνια, απομονώθηκε χρησιμοποιώντας την ίδια χημική διαδικασία όπως και το  ${}^{238}\text{Pu}$ .



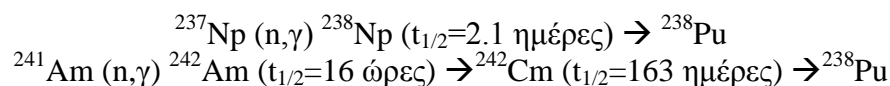
Το Μάρτιο του 1941, η ερευνητική ομάδα του G.T. Seaborg ακτινοβόλησε ένα δείγμα 0.25 mg  ${}^{239}\text{Pu}$  με θερμοποιημένα από παραφίνη νετρόνια στο Κύκλοτρο του Πανεπιστημίου της Καλιφόρνια και παρατήρησε ότι μπορούσε να υποστεί σχάση. Αυτή η παρατήρηση και τα πειράματα, που ακολούθησαν, οδήγησαν στη θεώρηση του  ${}^{239}\text{Pu}$  ως υποψήφιο υλικό για την παραγωγή πυρηνικών όπλων. Φυσικά, η χημεία του πλουτωνίου έπρεπε να μελετηθεί ιδιαίτερα καλά ώστε να επιτευχθεί μεγάλης κλίμακας διαχωρισμός του  ${}^{239}\text{Pu}$  από το ουράνιο και τα προϊόντα της σχάσεως του.

Η πρώτη ζυγίσιμη ποσότητα ένωσης του πλουτωνίου (2.77 mg  $\text{PuO}_2$ ) παράχθηκε το Σεπτέμβριο του 1942 ενώ η πρώτη ποσότητα μεταλλικού πλουτωνίου το Νοέμβριο του 1943 με αναγωγή 35 mg  $\text{PuF}_4$  με μεταλλικό βάριο στους  $1400^\circ \text{C}$ . Η παραγωγή μεγάλων ποσοτήτων πλουτωνίου ως σχάσιμου υλικού για την παραγωγή ενέργειας και για οπλικά συστήματα απαίτησε την εφαρμογή της αλυσιδωτής αντίδρασης

του ουρανίου με νετρόνια, που επιτεύχθηκε σχεδόν συγχρόνως από τους E. Fermi και L.Szilard στο Chicago.

Το πλουτώνιο θεωρείται το σημαντικότερο υπερουράνιο στοιχείο. Τα ισότοπά του με μαζικό αριθμό  $A = 238$  και  $239$  παρουσιάζουν μεγάλο τεχνολογικό ενδιαφέρον.

Το  $^{238}\text{Pu}$ , που χρησιμοποιείται ως πηγή ενέργειας σε ισοτοπικούς συσσωρευτές και σε καρδιακούς βηματοδότες, παράγεται με βομβαρδισμό με νετρόνια του  $^{237}\text{Np}$  και του  $^{241}\text{Am}$ :

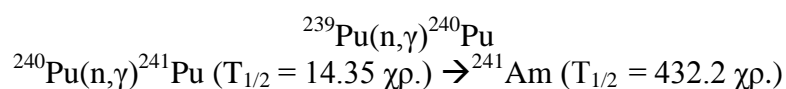


Το  $^{239}\text{Pu}$  παράγεται ως προϊόν της αντιδράσεως του  $^{238}\text{U}$  με νετρόνια στους πυρηνικούς αντιδραστήρες. Λόγω της μεγάλης ενεργού διατομής του  $^{239}\text{Pu}$  για νετρόνια, τα χρησιμοποιημένα καύσιμα πυρηνικών αντιδραστήρων περιέχουν μείγμα ισοτόπων του πλουτωνίου με μαζικό αριθμό  $A = 240, 241$  και  $242$  (σε μικρές ποσότητες). Το ποσοστό της παρουσίας των βαρύτερων ισοτόπων του πλουτωνίου αυξάνει με το χρόνο παραμονής του καυσίμου στον αντιδραστήρα.

Το μεταλλικό πλουτώνιο παρασκευάζεται με αναγωγή των αλογονιδίων του ( $\text{PuF}_4$  ή  $\text{PuF}_3$ ) με ασβέστιο ή με ηλεκτρόλυση. Το μεταλλικό πλουτώνιο έχει μεταλλική λάμψη και, σε λεπτή κατανομή, αναφλέγεται. Μεταξύ θερμοκρασίας περιβάλλοντος και του σημείου τήξεως του (σ.τ.  $913 \text{ K}$ ) το μεταλλικό πλουτώνιο παρουσιάζει έξι αλλοτροπικές μορφές μερικές εκ των οποίων παρουσιάζουν αρνητικό συντελεστή διαστολής (μοναδικό παράδειγμα στη μεταλλουργία).

### 6.3.4 Το αμερίκιο(Am) και το κιούριο (Cm)

Το αμερίκιο (Am,  $Z = 95$ ) απομονώθηκε το 1944 από την ομάδα του Glenn T. Seaborg στο Chicago κατά τον βομβαρδισμό πλουτωνίου με νετρόνια<sup>3</sup>



Σήμερα είναι γνωστά 18 ισότοπα του αμερικίου με σταθερότερα το  $^{243}\text{Am}$  ( $T_{1/2} = 7370$  χρόνια) και το  $^{241}\text{Am}$  ( $T_{1/2} = 432.2$  χρόνια).

Η χημεία του αμερικίου έχει διερευνηθεί διεξοδικά λόγω της ανάγκης διαχωρισμού του από τα απόβλητα πυρηνικών αντιδραστήρων. Το

<sup>3</sup> G.T. Seaborg, R.A. James and L.O. Morgan, *The new element americium (atomic number 95)*, National Nuclear Energy Series, Manhattan Project Technical Section, Division IV – Plutonium Project record, Vol. 14B; *The transuranium Elements: Research Papers*, G.T. Seaborg, J.J. Katz and W.M. Manning, eds., McGraw Hill, New York (1949), Part II, paper 22.1, 1525. Το πλήρες κείμενο της δημοσίευσης μπορεί να βρεθεί στο βιβλίο *Modern Alchemy*, Selected papers of Glenn T. Seaborg, G.T. Seaborg (ed.), World Scientific, Singapore, 1994, σελ. 24.

αμερίκιο σχηματίζεται σε σημαντικές ποσότητες στα καύσιμα των πυρηνικών αντιδραστήρων ως επακόλουθο διαδοχικών συλλήψεων νετρονίων από το ουράνιο-238 και στα ισότοπα του οφείλεται ένα σημαντικό ποσοστό της μακρόβιας ραδιενέργειας των πυρηνικών αποβλήτων.

Η πιό σταθερή οξειδωτική κατάσταση του αμερικίου σε υδατικά διαλύματα είναι η 3+. Το στοιχείο αυτό δε σχηματίζει τόσο εύκολα όσο το ουράνιο αμερικυλικά ιόντα. Στο περιβάλλον ο αμερικυλικός πυρήνας [AmO<sub>2</sub>] σχηματίζει αρνητικά και θετικά φορτισμένα σύμπλοκα ιόντα με υδροξύλια, ανθρακικά, νιτρώδη, νιτρικά και θειικά ανιόντα, που παρουσιάζουν ιδιαίτερη ικανότητα μεταφοράς στο έδαφος (π.χ. AmO<sub>2</sub>(OH)<sup>+</sup>, AmO<sub>2</sub>(OH)<sub>2</sub><sup>+2</sup>, AmO<sub>2</sub>CO<sup>+3</sup>, AmO<sub>2</sub>(CO<sub>3</sub>)<sup>-2</sup>, AmO<sub>2</sub>(CO<sub>3</sub>)<sub>3</sub><sup>-3</sup>).

Παραδείγματα ενώσεων του τετρασθενούς αμερικίου είναι το Am(OH)<sub>4</sub> και το AmF<sub>4</sub> ενώ του πεντασθενούς και εξασθενούς τα σύμπλοκα άλατα KAmO<sub>2</sub>F<sub>2</sub>, Li<sub>3</sub>AmO<sub>4</sub> και Li<sub>6</sub>AmO<sub>6</sub>, Ba<sub>3</sub>AmO<sub>6</sub>, AmO<sub>2</sub>F<sub>2</sub>. Το εξασθενές αμερίκιο είναι ένα ισχυρό οξειδωτικό μέσο.

Το <sup>241</sup>Am σχάζεται με νετρόνια και μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για την κατασκευή οπλικών συστημάτων. Το ισότοπο αυτό του αμερικίου, πέρα από τη χρήση του σε ανιχνευτές καπνού και σε πηγές νετρονίων, χρησιμοποιείται για την ενεργειακή βαθμονόμηση ανιχνευτών ακτινοβολίας-γ και για τη διέγερση φθορισμού ακτίνων-X για αναλυτικούς σκοπούς (E<sub>γ</sub> = 59 keV).

Το κιούριο (Cm, Z = 96) ανακαλύφθηκε από την ομάδα του G.T. Seaborg, R.A. James and A. Ghiorso βομβαρδίζοντας πλουτόνιο-239 με σωματίδια-α στο κύκλοτρο του Πανεπιστημίου της Καλιφόρνια (Berkeley) το 1944 και ταυτοποιήθηκε χημικά στο Μεταλλουργικό Εργαστήριο του Πανεπιστημίου του Chicago (το σημερινό Argonne National Laboratory)<sup>4</sup>



Επειδή η ανακάλυψη αυτού του στοιχείου, όπως και του αμερικίου, συνδεόταν άμεσα με το Manhattan Project, οι πληροφορίες για τις ιδιότητές του κρατήθηκαν εμπιστευτικές και δημοσιεύθηκαν το 1945.

Σήμερα είναι γνωστά 21 ισότοπα και 4 μετασταθείς καταστάσεις του κιουρίου με μαζικούς αριθμούς A μεταξύ 232 και 252 και χρόνους υποδιπλασιασμού μέχρι 1.56 x10<sup>7</sup> χρόνια (<sup>247</sup>Cm). Τα ισότοπα του κιουρίου με περιττό μαζικό αριθμό είναι σχάσιμα ενώ αυτά με άρτιο παρουσιάζουν μικρές ενεργές διατομές για σχάση και για σύλληψη νετρονίων.

<sup>4</sup> G.T. Seaborg, R.A. James and A. Ghiorso, *The new element curium (atomic number 96)*, National Nuclear Energy Series, Manhattan Project Technical Section, Division IV – Plutonium Project record, Vol. 14B; *The transuranium Elements: Research Papers*, G.T. Seaborg, J.J. Katz and W.M. Manning, eds., McGraw Hill, New York (1949), Part II, paper 22.2, 1554. Το πλήρες κείμενο της δημοσίευσης μπορεί να βρεθεί στο βιβλίο *Modern Alchemy*, Selected papers of Glenn T. Seaborg, G.T. Seaborg (ed.), World Scientific, Singapore, 1994, σελ. 53.

Το  $^{244}\text{Cm}$  ( $t_{1/2} = 18.1$  χρόνια) και το  $^{242}\text{Cm}$  ( $t_{1/2} = 160$  ημέρες) χρησιμοποιούνται ως πηγές σωματιδίων- $\alpha$  και για την παραγωγή θερμότητας σε ραδιοϊσοτοπικές θερμοηλεκτρικές γεννήτριες. Το  $^{244}\text{Cm}$  χρησιμοποιήθηκε σε φασματογράφους ακτίνων-X διαφόρων διαστημικών πτήσεων (π.χ. Mars Exploration Rover<sup>5</sup>, Rosetta Philae<sup>6</sup>). Οι γνωστές ενώσεις του κιουρίου περιλαμβάνουν οξειδία (π.χ.  $\text{CmO}_2$ ,  $\text{Cm}_2\text{O}_3$ ) και αλογονίδια (π.χ.  $\text{CmBr}_3$ ,  $\text{CmCl}_3$ ,  $\text{CmI}_3$ ,  $\text{CmF}_4$ ).

### 6.3.5 Τα υπόλοιπα στοιχεία της ομάδας των ακτινίδων

Τα υπόλοιπα στοιχεία των ακτινίδων είναι διαθέσιμα μόνο σε πολύ μικρές ποσότητες και η διερεύνηση των φυσικών και χημικών τους ιδιοτήτων δεν ήταν εύκολη.

Το μπερκέλιο (Bk,  $Z = 97$ ) ανακαλύφθηκε επίσης από την ομάδα του Πανεπιστημίου της Καλιφόρνια βομβαρδίζοντας, τον Δεκέμβριο του 1949, αμερίκιο-241 με σωματίδια- $\alpha$ <sup>7</sup>



Το πλέον μακρόβιο από τα περίπου 20 γνωστά ισότοπα του μπερκελίου έχει χρόνο υποδιπλασιασμού 1382 χρόνια.

Ζυγίσιμες μικροποσότητες μπερκελίου επέτρεψαν την ταυτοποίηση και μελέτη μερικών ενώσεων του όπως το διοξείδιο ( $\text{BkO}_2$ ), το φθορίδιο ( $\text{BkF}_3$ ), το χλωρίδιο ( $\text{BkCl}_3$ ), το οξυχλωρίδιο ( $\text{BkOCl}$ ), και το τριοξείδιο ( $\text{BkO}_3$ ).<sup>13</sup>

Το καλιφόρνιο (Cf,  $Z = 98$ ), του οποίου η ανακάλυψη ανακοινώθηκε στις 17 Μαρτίου του 1950, ήταν το έκτο στοιχείο της ομάδας των ακτινίδων. Το  $^{245}\text{Cf}$  ( $t_{1/2} = 44$  min) ήταν το πρώτο ισότοπο του στοιχείου, που ανακαλύφθηκε κατά τον βομβαρδισμό του κιουρίου-242 με σωματίδια- $\alpha$



Το καλιφόρνιο δεν υπάρχει στη γη και αλλά οι φασματικές γραμμές του (φάσματα εκπομπής) του στοιχείου αυτού εμφανίζονται στα φάσματα των supernova τύπου II.

Το ισότοπο του καλιφορνίου με τη μεγαλύτερη εφαρμογή είναι το  $^{252}\text{Cf}$  ( $t_{1/2} = 2645$  χρόνια), που διασπάται κατά 96.9% με  $\alpha$ -διάσπαση και 3.1% με αυθόρμητη σχάση εκπέμποντας 3.77 νετρόνια ανά σχάση. Το  $^{252}\text{Cf}$ , όπως και το  $^{254}\text{Cf}$  ( $t_{1/2} = 60.5$  ημέρες) χρησιμοποιούνται ως πηγές νετρονίων.

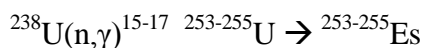
Το αϊνστάνιο (Es,  $Z = 99$ ) και το φέρμιο (Fm,  $Z = 100$ ) είναι δύο

<sup>5</sup> [http://en.wikipedia.org/wiki/Mars\\_Exploration\\_Rover](http://en.wikipedia.org/wiki/Mars_Exploration_Rover)

<sup>6</sup> [http://en.wikipedia.org/wiki/Philae\\_lander](http://en.wikipedia.org/wiki/Philae_lander)

<sup>7</sup> S.G.Thompson, A. Ghiorso and G.T. Seaborg, *Element 97*, Phys. Rev. **77** (1950) 838  
S.G.Thompson, A. Ghiorso and G.T. Seaborg, *The new element Berkelium (atomic number 97)*, Phys. Rev. **80** (1950) 781

στοιχεία, που ταυτοποιήθηκαν από τον A. Ghiorso και την ομάδα του στα υπολείμματα της πρώτης θερμοπυρηνικής έκρηξης (Ivy Mike), που πραγματοποιήθηκε την 1<sup>η</sup> Νοεμβρίου του 1952 στην ατόλη Enewetak στον Ειρηνικό Ωκεανό<sup>8</sup>. Τα αποτελέσματα αυτών των ερευνών κοινοποιήθηκαν αργότερα, το 1955, λόγω του Ψυχρού Πολέμου. Ο A. Ghiorso απομόνωσε τα ισότοπα  $^{253}\text{Es}$  ( $t_{1/2} = 20.5$  ημέρες),  $^{255}\text{Es}$  ( $t_{1/2} = 39.8$  ημέρες) και  $^{255}\text{Fm}$  ( $t_{1/2} = 20.07$  ώρες), που προέκυψαν από τη σύλληψη 15 και 17 νετρονίων αντίστοιχα από το  $^{238}\text{U}$  ακολουθούμενη από εκπομπή 7 β<sup>-</sup>



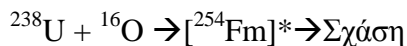
Ισότοπα του αϊνστανίου συντέθηκαν αργότερα με βομβαρδισμό του  $^{238}\text{U}$  με ιόντα  $^{14}\text{N}$  και εντατική ακτινοβόληση του  $^{239}\text{Pu}$  με νετρόνια. Το 1961 κατέστη δυνατόν να παρασκευασθούν 10 μg  $^{253}\text{Es}$ . Ζυγίσιμες ποσότητες (3 mg) αϊνστανίου παράχθηκαν επίσης στο Oak Ridge National Laboratory με πολυετή ακτινοβόληση ποσότητας  $^{239}\text{Pu}$  σε πυρηνικό αντιδραστήρα. Το  $^{242}\text{Pu}$ , που σχηματίστηκε κατ' αυτόν τον τρόπο χρησιμοποιήθηκε για να παρασκευασθεί δισκίο οξειδίου του πλουτωνίου με σκόνη αλουμινίου, το οποίο ακτινοβολήθηκε με νετρόνια αρχικά για 1 χρόνο στο Savannah River Plant και κατόπιν για άλλους 4 μήνες σ' ένα HFIR (High Flux Isotopic Reactor). Το αϊνστάσιο παραλήφθηκε τελικά με χημικό διαχωρισμό από το καλιφόρνιο.

Σήμερα είναι γνωστά 19 ισότοπα του αϊνστανίου εκ των οποίων το μακροβιότερο είναι το  $^{252}\text{Es}$  με χρόνο υποδιπλασιασμού 471.7 ημέρες.

Η χημεία του αϊνστανίου μελετήθηκε χρησιμοποιώντας τα μακροβιότερα ισότοπά του. Τα οξείδια και αλογονίδια του τρισθενούς και του δισθενούς αϊνστανίου είναι οι γνωστότερες από τις ενώσεις του. Οι διαθέσιμες ποσότητες αϊνστανίου είναι πάρα πολύ μικρές.

Το  $^{253}\text{Es}$  υπήρξε το νουκλίδιο εκκίνησης για την παραγωγή του στοιχείου με  $Z = 101$  (μεντελέβιο).

Όσον αφορά τα ισότοπα του φερμίου, πέρα από το  $^{255}\text{Fm}$ , που αναφέρθηκε παραπάνω, η ομάδα του Ινστιτούτου Νομπέλ στη Στοκχόλμη ανακάλυψε το 1954 το  $^{250}\text{Fm}$  με βομβαρδισμό του  $^{238}\text{U}$  με ιόντα  $^{16}\text{O}$  ενέργειας περ. 90 MeV<sup>9</sup>. Η ενεργός διατομή της αντίδρασης ( $^{238}\text{U} + ^{16}\text{O}$ ) είναι της τάξεως των 0.1 mb.



αλλά και σε πολύ μικρότερο βαθμό (λόγος ενεργών διατομών: περ. 1:10<sup>5</sup>)



<sup>8</sup> A. Ghiorso et al., The new elements einsteinium and fermium, atomic numbers 99 and 100, Phys. Rev. **99** (1955) 1048

H. Diamond et al., Heavy isotope abundances in Mike Thermonuclear device, Phys. Rev. **119** (1960) 2000

<sup>9</sup> H. Atterling, et al., Element 100 Produced by Means of Cyclotron-Accelerated Oxygen Ions, Phys. Rev. **95** (1954) 585

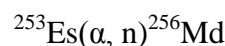


Το  $^{257}\text{Fm}$  ( $t_{1/2} = 100.5$  ημέρες) συντέθηκε επίσης κατά τη διάρκεια της υπόγειας πυρηνικής δοκιμής Hutch το 1969 με σύλληψη 19 νετρονίων από το  $^{238}\text{U}$  και 8 διαδοχικές  $\beta^-$ -διασπάσεις. Κατά τη διάρκεια αυτής της δοκιμής επιτεύχθηκε η σύνθεση, από  $17.8 \text{ g } ^{238}\text{U}$ , που βομβαρδίσθηκαν με ροή νετρονίων μέχρι  $2.4 \cdot 10^{25} \text{ cm}^{-2}$ , σημαντικών ποσοτήτων  $^{244-254}\text{Cf}$ ,  $^{255}\text{Es}$  και  $^{257}\text{Fm}$ . Φυσικά, μόνο ένα πολύ μικρό τμήμα (περ.  $10^{-8}\%$ ) των συνολικά 150000 τόννων τετηγμένων πετρωμάτων μπόρεσαν να επεξεργασθούν στο εργαστήριο.

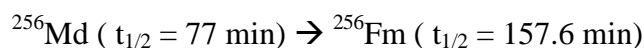
Το  $^{257}\text{Fm}$  είναι το βαρύτερο νουκλίδιο, που μπορεί να συντεθεί με σύλληψη νετρονίων. Το  $^{258}\text{Fm}$ , που προκύπτει από την αντίδραση  $^{257}\text{Fm}(n,\gamma) ^{258}\text{Fm}$ , έχει χρόνο υποδιπλασιασμού 370  $\mu\text{s}$  και διασπάται πριν μπορέσει να συλλάβει περαιτέρω νετρόνια. Άλλωστε τόσο το  $^{258}\text{Fm}$  όσο και το  $^{259}\text{Fm}$  ( $t_{1/2} = 1.5 \text{ s}$ ) δεν παρουσιάζουν  $\beta^-$ -διάσπαση ώστε να προκύψουν τα ισοβαρή τους του αμέσως βαρύτερου στοιχείου ( $Z = 101$ , μεντελέβιο).

Σήμερα έχουν ταυτοποιηθεί 18 ισότοπα του φερμίου ( $A = 242 - 259$ ) με χρόνους υποδιπλασιασμού από  $\mu\text{s}$  ( $^{258}\text{Fm}$ ) μέχρι 100.5 ημέρες ( $^{257}\text{Fm}$ ).

Η σύνθεση του στοιχείου μεντελέβιο (Md,  $Z = 101$ ) πραγματοποιήθηκε επίσης από την ομάδα του A. Ghiorso στο Πανεπιστήμιο της Καλιφόρνια στις αρχές του 1955 ακτινοβολώντας με σωματίδια- $\alpha$  ενέργειας 48 MeV ένα έλασμα χρυσού επικαλυμένο ηλεκτροχημικά με περίπου  $10^9$  άτομα  $^{253}\text{Es}$ <sup>10</sup>



Το έλασμα χρυσού, μετά την ακτινοβόληση διαλύθηκε σε βασιλικό ύδωρ, το διάλυμα προσυγκεντρώθηκε με εξάτμιση και διαβιβάστηκε σε ιοντοανταλλακτική στήλη, στην οποία συγκρατήθηκαν οι ακτινίδες. Με έκλυση με διάλυμα υδρόξυ-βουτυρικού οξέως εκλούστηκαν τα στοιχεία με ατομικό αριθμό 100 και 101 σε αντίστροφη φορά (το 101 πριν το 100) και μετρήθηκε η ακτινοβολία τους. Το  $^{256}\text{Md}$ , που σχηματίστηκε κατά την ακτινοβόληση, έχει χρόνο υποδιπλασιασμού 77 min, και ταυτοποιήθηκε έμμεσα μέσω της αυθόρμητης σχάσης του προϊόντος της διάσπασής του με σύλληψη ηλεκτρονίου, του  $^{256}\text{Fm}$



Μετά από ακτινοβόληση για 15 min των  $10^9$  ατόμων  $^{253}\text{Es}$ , που ήταν και η συνολική διαθέσιμη ποσότητα το 1955, σχηματίστηκε ένα άτομο  $^{256}\text{Md}$ , που οδήγησε και στην αναγνώρισή του.

Το νομπέλιο (No,  $Z = 102$ ) αναγνωρίστηκε επίσημα στο Flerov Institute for Nuclear Reactions (FINR) του Joint Institute for Nuclear Research Dubna (Ρωσία, παλ. Ε.Σ.Σ.Δ.) το 1956<sup>11</sup> βομβαρδίζοντας έναν στόχο από  $^{238}\text{U}$  με  $^{22}\text{Ne}$

<sup>10</sup> A. Ghiorso et al., *New element mendelevium, Atomic number 101*, Phys. Rev. **98** (1955) 1518

<sup>11</sup> E.D. Donets, V.A. Shchegolets, V.A. Ermakov, *Synthesis of the element 102 of mass number*



Παράλληλα πειράματα σύνθεσης ισοτόπων του νομπελίου πραγματοποιήθηκαν και στο Berkeley χρησιμοποιώντας το γραμμικό Επιταχυντή Βαρέων Ιόντων (Heavy Ion Linear Accelerator, HILAC). Η ομάδα του Berkeley χρησιμοποίησε για το σκοπό αυτό τον βομβαρδισμό με ιόντα  $^{12}\text{C}$  ενός στόχου κιουρίου (κυρίως  $^{244}\text{Cm}$  με μικρά ποσοστά  $^{246}\text{Cm}$ ). Η ταυτοποίηση αυτού του ισοτόπου του στοιχείου 102, που έχει χρόνο υποδιπλασιασμού 51 s, πραγματοποιήθηκε μέσω του  $^{250}\text{Fm}$  στο οποίο διασπάται το  $^{254}\text{No}$  με εκπομπή ακτινοβολίας- $\alpha$ <sup>12</sup>.

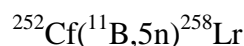
Σήμερα είναι γνωστά πάνω από 10 ισότοπα του νομπελίου (το  $^{259}\text{No}$  έχει χρόνο υποπλασιασμού 58 min) και 5 ισομερείς καταστάσεις, που σχηματίστηκαν βομβαρδίζοντας βαρείς πυρήνες (π.χ. ισότοπα του Pb, Pu, Am, Cm και Es) με διάφορα ιόντα (π.χ.  $^{12}\text{C}$ ,  $^{13}\text{C}$ ,  $^{15}\text{N}$ ,  $^{16}\text{O}$ ,  $^{18}\text{O}$ ,  $^{22}\text{Ne}$ ,  $^{48}\text{Ca}$ ).

Η ομάδα του FINR, συνεχίζοντας την έρευνα του επάνω στο καινούργιο αυτό στοιχείο, διαπίστωσε ομοιότητες στη χημική συμπεριφορά με το υτέρβιο.

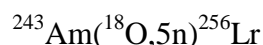
Το νομπέλιο εμφανίζεται στα διαλύματα με οξειδωτική κατάσταση 2+, που οξειδώνεται σε 3+ και σχηματίζει σύμπλοκα με μόρια ύδατος και στις δύο καταστάσεις ( $[\text{No}(\text{H}_2\text{O})_6]^{2+}$ ,  $[\text{No}(\text{H}_2\text{O})_6]^{3+}$ ). Το πρώτο από αυτά τα σύμπλοκα βρέθηκε να έχει ιονική ακτίνα 110 pm.

Ισότοπα του νομπελίου βρέθηκε να προκύπτουν και κατά τη διάσπαση ισοτόπων βαρυτέρων στοιχείων (π.χ. τα  $^{254}\text{No}$  και  $^{262}\text{No}$  κατά τη διάσπαση των  $^{254}\text{Lr}$  και  $^{262}\text{Lr}$  ή το  $^{251}\text{No}$  κατά τη διάσπαση του  $^{251}\text{Rf}$ ).

Το στοιχείο λωρέντσιο (Lr, Z = 103) ανακαλύφθηκε από τον A. Ghiorso και την ομάδα του στις 14 Φεβρουαρίου 1961 στο Lawrence Radiation Laboratory βομβαρδίζοντας έναν στόχο, που περιείχε 3 mg τριών ισοτόπων του καλιφορνίου με  $^{10}\text{B}$  και  $^{11}\text{B}$  στον γραμμικό Επιταχυντή Βαρέων Ιόντων (HILAC). Το ισότοπο με μαζικό αριθμό A = 258, που ανακάλυψαν, έχει χρόνο υποδιπλασιασμού 4.1 s και εκπέμπει ακτινοβολία- $\alpha$ . Στο νέο στοιχείο δόθηκε το όνομα λωρεντσιο (lawrencium) προς τιμή του E.O. Lawrence εφευρέτη του κυκλότρου



Το 1967 επιστήμονες του FINR ανακοίνωσαν την παρατήρηση του  $^{256}\text{Lr}$  ως προϊόν της αντίδρασης του  $^{243}\text{Am}$  με  $^{18}\text{O}$



256, Atomnaya Energiya **16** (1964) 195

G. N. Flerov et al., *A History and Analysis of the Discovery of Element 102*, Radiochim. Acta **56** (1992) 111

<sup>12</sup> G. Münzenberg, M. Schädel, *Moderne Alchemie: Die Jagd nach den schwersten Elementen*, Vieweg, Braunschweig-Wiesbaden, 1996, σελ. 105

Στο ίδιο ινστιτούτο αναγνωρίστηκε και η πρώτη ένωση του λωρεντίου σε αέρια κατάσταση, του  $\text{LrCl}_3$ , που τεκμηρίωσε τόσο την ύπαρξή του σε οξειδωτική κατάσταση  $3+$  όσο και τη σχέση του με την ομάδα των ακτινίδων. Η σχέση του λωρεντίου με την ομάδα των ακτινίδων τεκμηριώθηκε και με την εκχύλιση του από υδατική φάση με thenoyl-trifluor-aceton, ένα συμπλοκοποιητή διαλελυμένο σε μεθυλ-ισοβουτυλκετόνη. Το λωρέντιο εμφάνισε συναφή συμπεριφορά με τις άλλες τρισθενείς ακτινίδες (Am, Cm, Fm) σε αντίθεση με το νομπέλιο, που έδειξε συμπεριφορά ανάλογη του βαρίου και ραδίου (δηλαδή, παρουσία ως  $\text{No(II)}$  σε υδατικά διαλύματα απουσία οξειδωτικών). Η τρισθενής οξειδωτική κατάσταση του λωρεντίου επιβεβαιώθηκε επίσης το 1988 με ιοντοανταλλακτική χρωματογραφία χρησιμοποιώντας ένα σύμπλοκο με  $\alpha$ -υδρόξυ-βουτυρικά ( $\alpha$ -HIB). Η σύγκριση του χρόνου έκλυσης με τις άλλες ακτινίδες επέτρεψε τον προσδιορισμό και της ιοντικής ακτίνας του  $\text{Lr}^{3+}$  (88.6 pm).

Σήμερα είναι γνωστά 12 ισότοπα του λωρεντίου, που σχηματίστηκαν με διάφορες πυρηνικές αντιδράσεις. Το μακροβιότερο από αυτά τα ισότοπα είναι το  $^{262}\text{Lr}$  με χρόνο υποδιπλασιασμού 216 min.

Το λωρέντιο είναι το τελευταίο στοιχείο της ομάδας των ακτινίδων. Τα καινούργια στοιχεία (οι τρανσακτινίδες) ανήκουν σε άλλες ομάδες του Περιοδικού Πίνακα.

#### 6.4 Οι τρανσακτινίδες: Αναζητώντας τα όρια της πυρηνικής σταθερότητας.

Η παρατήρηση ότι στοιχεία με ορισμένους συγκεκριμένους αριθμούς πρωτονίων διαθέτουν ένα μεγάλο αριθμό ισωτόπων και η μελέτη της διάσπασής τους οδήγησε το 1948 την M. Goerpert-Mayer στο συμπέρασμα ότι και οι πυρήνες διαθέτουν για τα πρωτόνια και τα νετρόνια μία δομή με ενεργειακά επίπεδα (“στοιβάδες”), όπως τα ατομικά ηλεκτρόνια. Πυρήνες με συμπληρωμένες στοιβάδες πρωτονίων ή και νετρονίων παρουσιάζουν μία ιδιαίτερη σταθερότητα έναντι των γειτονικών τους. Στην περίπτωση των ηλεκτρονίων ήταν γνωστοί ήδη οι “μαγικοί” αριθμοί 2, 8, 18, 32, 50 και 72, αλλά για τους πυρήνες δεν υπήρχαν θεωρητικά δεδομένα.

Το 1949 η M. Goerpert-Mayer και ανεξάρτητα από αυτή οι O. Haxel, H.D. Jensen και H.E. Suess κατόρθωσαν να δώσουν μία λύση στο παραπάνω πρόβλημα και να υπολογίσουν θεωρητικά τη μέγιστη χωρητικότητα των στοιβάδων για πρωτόνια και νετρόνια του πυρήνα. Η σύζευξη της ιδιοστροφορμής και της τροχιακής στροφορμής των νουκλεονίων οδηγούν σ’ αυτή την περίπτωση σε τελείως διαφορετικές από τα ηλεκτρόνια λύσεις της εξίσωσης του Schrödinger και σε “μαγικούς” αριθμούς διαφορετικούς από τους αντίστοιχους των ηλεκτρονίων, δηλαδή σε 2, 8, 20, 28, 50 και 82. Από την  $6^{\text{η}}$  στοιβάδα και πέρα οι “μαγικοί” αριθμοί για τα πρωτόνια και τα νετρόνια

διαφοροποιούνται και η επόμενη στοιβάδα των πρωτονίων συμπληρώνεται με 114 πρωτόνια ενώ των νετρονίων με 126 νετρόνια. Γι' αυτό το λόγο πυρήνες όπως οι  $^{40}\text{Ca}$  ( $Z = 20$ ,  $N = 20$ ),  $^{48}\text{Ca}$  ( $Z = 20$ ,  $N = 28$ ) και  $^{208}\text{Pb}$  ( $Z = 82$ ,  $N = 126$ ) παρουσιάζουν μία εξαιρετική σταθερότητα.

Η Μ. Göppert – Mayer τιμήθηκε, μαζί με τον Ε.Ρ. Wigner και τον Η.Δ. Jensen, με το βραβείο Nobel Φυσικής το 1963 για την πρόταση της δομής του ατομικού πυρήνα.

Οι διαπιστώσεις αυτές υπήρξαν και το έναυσμα μίας πληθώρας ιδιαίτερα αξιόλογων προσπαθειών να υπολογισθούν θεωρητικά τα όρια της πυρηνικής σταθερότητας πέρα από το βισμούθιο, που είναι το τελευταίο στοιχείο με σταθερό ισότοπο στη γη. Όλες αυτές οι θεωρίες, παρά τις διαφοροποιήσεις τους, κατέληξαν στο συμπέρασμα της ύπαρξης μίας περιοχής σχετικά σταθερών πυρήνων κοντά στον ατομικό αριθμό  $Z = 114$ .

Πίνακας 6-3: Οι τρανσακτινίδες

<i>Z</i>	<i>Όνομα</i>	<i>Ελληνικό όνομα</i>	<i>Σύμβολο</i>
104	Rutherfordium	Ραδερφόρδιο	Rf
105	Dubnium	Ντούμπνιο	Db
106	Sieborgium	Σιμπόργκιο	Sg
107	Bohrium	Μπόριο	Bh
108	Hassium	Χάσσιο	Hs
109	Meitnerium	Μαϊτνέριο	Mt
110	Darmstadtium	Νταρμστάτιο	Ds
111	Roentgenium	Ραιντγκένιο	Rg
112	<i>Ununbium</i> **		<i>Unb</i>
113	<i>Ununtrium</i> **		<i>Uut</i>
114	<i>Ununquadium</i> **		<i>Uuq</i>
115	<i>Ununpentium</i> **		<i>Uup</i>
116	<i>Ununhexium</i> **		<i>Uuh</i>
117	<i>Ununseptium</i> **		<i>Uus</i>
118	<i>Ununoctium</i> **		<i>Uuo</i>

\* Η ονομασία ισχύει μετά την αποδοχή της από την I.U.P.A.C./I.U.P.A.P Transfermium Working Group.

\*\* Προσωρινή ονομασία.

Το γεγονός αυτό από την άλλη πλευρά ήταν συγχρόνως μία πρόκληση για τους πειραματικούς να εντατικοποιήσουν τις προσπάθειες συνθέσεως νέων στοιχείων πέρα από τα όρια του γνωστού τότε Περιοδικού Πίνακα, σε μια περιοχή πυρηνικής αστάθειας κατά το πρότυπο της σταγόνας υγρού. Έτσι το 1966 υπήρχαν σ' όλο τον τον περίπου είκοσι προγράμματα κατασκευής επιταχυντών, που θα μπορούσαν να

χρησιμοποιηθούν γι' αυτό το σκοπό. Πειράματα χρησιμοποιώντας μία πληθώρα πυρηνικών αντιδράσεων με στόχους ισότοπα βαρέων στοιχείων και ακτινίδες έκαναν εφικτή τη σύνθεση, μέχρι σήμερα, στοιχείων με ατομικό αριθμό μέχρι και 118. Από αυτά τα νέα στοιχεία έχουν ονομασθεί επισήμως αυτά με  $Z < 112$  (Πίνακας 6-3).

Οι μικρές ενεργές διατομές των πυρηνικών αντιδράσεων σχηματισμού, που τις περισσότερες φορές δεν ξεπερνούν τα pb, δεν επιτρέπουν την εκτεταμένη μελέτη των χημικών τους ιδιοτήτων. Γι' αυτό και η χημική τους μελέτη περιορίζεται σε αέριο-θερμο-χρωματογραφία κυρίως των οξειδίων τους σε σύγκριση με ελαφρύτερα ομόλογα των ομάδων του Περιοδικού Πίνακα στις οποίες ανήκουν. Πειράματα σε υγρή φάση έχουν πραγματοποιηθεί σε ελάχιστες περιπτώσεις.