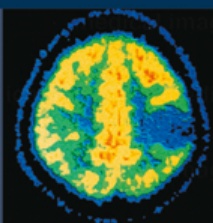


Παναγιώτης Μισαηλίδης

Φωτεινή Νόλη

Ραδιοχημεία και Πυρηνική Χημεία

ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ και ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ



 ΕΚΔΟΣΕΙΣ
ΖΗΤΗ

Παναγιώτης Μισαηλίδης
misailid@chem.auth.gr

Φωτεινή Νόλη
noli@chem.auth.gr

Ραδιοχημεία και Πυρηνική Χημεία:
Βασικές αρχές και Εφαρμογές

ISBN 978-960-456-546-7

© Copyright, Παναγιώτης Μισαηλίδης, Φωτεινή Νόλη, Εκδόσεις ΖΗΤΗ,
Θεσσαλονίκη, Σεπτέμβριος 2020

Το παρόν έργο πνευματικής ιδιοκτησίας προστατεύεται κατά τις διατάξεις του ελληνικού νόμου (Ν.2121/1993 όπως έχει τροποποιηθεί και ισχύει σήμερα) και τις διεθνείς συμβάσεις περί πνευματικής ιδιοκτησίας. Απαγορεύεται απολύτως η άνευ γραπτής άδειας του εκδότη κατά οποιοδήποτε τρόπο ή μέσο αντιγραφή, φωτοανατύπωση και εν γένει αναπαραγωγή, εκμίσθωση ή δανεισμός, μετάφραση, διασκευή, αναμετάδοση στο κοινό σε οποιαδήποτε μορφή (ηλεκτρονική, μηχανική ή άλλη) και η εν γένει εκμετάλλευση του συνόλου ή μέρους του έργου.

Φωτοστοιχειοθεσία
Εκτύπωση
Βιβλιοδεσία

Π. ΖΗΤΗ & ΣΙΑ Ι.Κ.Ε.
18ο χλμ Θεσ/νίκης-Περαίας
Τ.Θ. 4171 • Περαία Θεσσαλονίκης • Τ.Κ. 570 19
Τηλ.: 2392.072.222 - Fax: 2392.072.229 • e-mail: info@ziti.gr



www.ziti.gr

ΒΙΒΛΙΟΠΩΛΕΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ:
Αρμενοπούλου 27, 546 35 Θεσσαλονίκη
Τηλ.: 2310.203.720, Fax: 2310.211.305 • e-mail: sales@ziti.gr

ΒΙΒΛΙΟΠΩΛΕΙΟ ΑΘΗΝΩΝ:
Χαριλάου Τρικούπη 22, 106 79 Αθήνα
Τηλ.-Fax: 210.3816.650 • e-mail: athina@ziti.gr

ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΟ ΒΙΒΛΙΟΠΩΛΕΙΟ: www.ziti.gr

*Στους δασκάλους μου και σ' όλους όσους
με στήριξαν στη συγγραφή αυτού του βιβλίου*

Π. Μ.

*Στα παιδιά μου
Βανέσα, Γιώργο, Ελίνα
και σε όλους τους φοιτητές μου*

Φ. Ν.

*Νόμῳ γάρ φησι γλυκύ, νόμῳ πικρόν, νόμῳ θερμόν,
νόμῳ ψυχρόν, νόμῳ χροίῃ, ἔτεῃ δὲ ἄτομα καὶ κενόν.*

(Νομίζουμε μόνο ότι υπάρχει γλυκύ, πικρό, ζεστό, κρύο, έγχρωμο,
στην πραγματικότητα υπάρχουν μόνον άτομα και κενό.)

Δημόκριτος (470-360 πΧ.)

Πρόλογος

Η Ραδιοχημεία και η Πυρηνική Χημεία αποτελούν δύο κλάδους των πυρηνικών επιστημών, που δε γνώρισαν ιδιαίτερη άνθηση στην Ελλάδα. Αυτό οφείλεται σε διάφορους λόγους και ανάμεσα σ' αυτούς και η έλλειψη ενός προγράμματος παραγωγής πυρηνικής ηλεκτρικής ενέργειας. Περιορισμένη ήταν και η εκπαίδευση σ' αυτές τις επιστημονικές περιοχές στα ελληνικά εκπαιδευτικά ιδρύματα. Το τελευταίο γίνεται εμφανές και από την, σχεδόν παντελή, έλλειψη εξειδικευμένων διδακτικών συγγραμμάτων ραδιοχημείας και πυρηνικής χημείας στην ελληνική γλώσσα. Το βιβλίο αυτό, που, σε μεγάλο βαθμό, βασίστηκε στη διδασκαλία του σχετικού προπτυχιακού και μεταπτυχιακού μαθήματος στους φοιτητές του Τμήματος Χημείας του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης τα τελευταία τριάντα πέντε χρόνια, έχει ως σκοπό να καλύψει, κατά το δυνατόν, ένα μέρος αυτού του κενού και να δώσει, στην ελληνική βιβλιογραφία ένα διδακτικό βοήθημα για τους φοιτητές της τριτοβάθμιας εκπαίδευσης, αλλά, συγχρόνως και σε κάθε ενδιαφερόμενο τη δυνατότητα ενημέρωσης για τις πυρηνικές επιστήμες και τις εφαρμογές τους.

Στο σύγγραμμα αυτό προσφέρεται, πέρα από μία σύντομη εισαγωγή στις βασικές αρχές που διέπουν τη δομή και διάσπαση των ατομικών πυρήνων, μια ευρύτερη εποπτεία για την αλληλεπίδραση της πυρηνικής ακτινοβολίας με την ύλη και τις εφαρμογές των ραδιενεργών ισοτόπων και ακτινοβολιών στην έρευνα και την τεχνολογία. Η σύνθεση και μελέτη των ιδιοτήτων των νέων στοιχείων με ατομικό αριθμό μέχρι 118, που επέκτειναν το μέχρι τώρα γνωστό περιοδικό σύστημα, η παραγωγή της πυρηνικής ενέργειας, τα στοιχεία υγειοφυσικής και ακτινοπροστασίας αλλά και η ραδιενέργεια στο περιβάλλον και τα τρόφιμα αποτελούν επίσης σημαντικά κεφάλαια αυτού του διδακτικού βιβλίου.

Οι συγγραφείς ευχαριστούν όλους όσους συνέβαλαν στην ολοκλήρωση αυτού βιβλίου και ιδιαίτερα τον Εκδοτικό Οίκο ΖΗΤΗ για τη συνεργασία και την εποικοδομητική υποστήριξη σε όλα τα στάδια της προετοιμασίας και της έκδοσης.

Τέλος, οι συγγραφείς ευχαριστούν ιδιαίτερα τις οικογένειές τους για τη στήριξη και υπομονή, που έδειξαν κατά την όλη περίοδο της συγγραφής αυτού του βιβλίου, ελπίζοντας ότι η κάποια αποστασιοποίηση από τα συνήθη οικογενειακά καθήκοντα, να άξιζε τελικά τον κόπο.

Παναγιώτης Μισαηλίδης, Φωτεινή Νόλη

Θεσσαλονίκη, Ιούνιος 2020

Εισαγωγή	15
Μία σύντομη ιστορική αναδρομή	15
Ραδιοχημεία και Πυρηνική Χημεία	20
Κεφάλαιο 1 Το άτομο και ο πυρήνας του	29
1.1. Το φορτίο και η ακτίνα του πυρήνα	30
1.2. Μάζα και σταθερότητα του ατομικού πυρήνα	32
1.3. Το σπιν, η μαγνητική ροπή, η ηλεκτρική τετραπολική ροπή και η ομοτιμία των ατομικών πυρήνων	38
1.4. Τα υποατομικά και τα στοιχειώδη σωματίδια	40
Ασκήσεις - Ερωτήσεις	45
Κεφάλαιο 2 Η ραδιενεργός διάσπαση	47
2.1. Νόμοι της ραδιενεργού διάσπασης	47
2.2. Ραδιενεργός ισορροπία	51
2.3. Η α-διάσπαση	55
2.4. Η β-διάσπαση	59
2.5. Η εκπομπή ακτινοβολίας-γ	64
2.6. Η αυθόρμητη σχάση	66
2.7. Εξωτικές μορφές διάσπασης	69
Ασκήσεις - Ερωτήσεις	70
Κεφάλαιο 3 Αλληλεπίδραση ακτινοβολίας και ύλης	73
3.1. Η αλληλεπίδραση των φορτισμένων σωματιδίων με την ύλη	73
3.1.1. Η ακτινοβολία πέδησης	77
3.1.2. Η ακτινοβολία Čerenkov	78

3.2. Η αλληλεπίδραση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας με την ύλη	79
3.2.1. Το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο	80
3.2.2. Η σκέδαση Compton	81
3.2.3. Η δίδυμη γένεση	82
3.3. Η αλληλεπίδραση των νετρονίων με την ύλη	84
Ασκήσεις - Ερωτήσεις	85

Κεφάλαιο 4 Ανίχνευση και μέτρηση της πυρηνικής ακτινοβολίας 87

4.1. Μέθοδοι ανίχνευσης και μέτρησης της ακτινοβολίας	88
4.1.1. Οι ανιχνευτές ακτινοβολίας με αέριο	89
4.1.2. Οι σπινθηριστές	94
Δύο λόγια για τη θεωρία των ζωνών	95
4.1.3. Οι ημιαγωγοί ανιχνευτές	99
Ανιχνευτές με p-n συνδέσμους (p-n junctions)	100
Ανιχνευτές ημιαγωγών n-i-p	101
Ανιχνευτές επιφανειακού φραγμού	104
4.1.4. Βασικά συστήματα μέτρησης ακτινοβολίας	107
4.2. Μερικές βασικές έννοιες της στατιστικής των μετρήσεων	111
Ασκήσεις - Ερωτήσεις	116

Κεφάλαιο 5 Πυρηνικές αντιδράσεις, τεχνητή πυρηνική σχάση και πυρηνική σύντηξη 117

5.1. Η ενέργεια των πυρηνικών αντιδράσεων	118
5.2. Η ενεργός διατομή των πυρηνικών αντιδράσεων	121
5.3. Υπολογισμός της απόδοσης μιας πυρηνικής αντίδρασης	124
5.4. Είδη πυρηνικών αντιδράσεων	125
5.5. Ο ελαστικός και ανελαστικός σκεδασμός	128
5.6. Η τεχνητή πυρηνική σχάση	129
5.7. Η πυρηνική σύντηξη	134
Ασκήσεις - Ερωτήσεις	137

Κεφάλαιο 6 Ραδιενεργά στοιχεία 139

6.1. Το τεχνήτιο (Tc)	139
6.2. Το προμήθειο (Pm)	142

6.3. Οι ακτινίδες	142
6.3.1. Το θόριο (Th)	147
6.3.2. Το πρωτακτίριο (Pa)	149
6.3.3. Το ουράνιο (U)	149
6.3.4. Το νεπτούριο (Np) και το πλουτώνιο (Pu)	150
6.3.5. Το αμερίκιο (Am) και το κιούριο (Cm)	152
6.3.6. Τα υπόλοιπα στοιχεία της ομάδας των ακτινιδών	153
6.4. Οι τρανσακτινίδες: Αναζητώντας τα όρια της πυρηνικής σταθερότητας ...	157
6.4.1. Το Ραδερφόρδιο (Rutherfordium), Rf	159
6.4.2. Το Ντούμπνιο (Dubnium), Db	160
6.4.3. Το Σιμπόργκιο (Seaborgium), Sg	161
6.4.4. Το Μπόριο (Bohrium), Bh	161
6.4.5. Το Χάσσιο (Hassium), Hs	162
6.4.6. Το Μαϊτνέριο (Meitnerium), Mt	163
6.4.7. Το Νταρμστάτιο (Darmstadtium), Ds	163
6.4.8. Το Ραϊντγκενίο (Röntgenium), Rg	164
6.4.9. Το Κοπερνίκιο (Copernicium), Cn	164
6.4.10. Τα στοιχεία με $Z=113$ ως 118	165
Ασκήσεις - Ερωτήσεις	167

Κεφάλαιο 7	Η πυρηνική ενέργεια και ο κύκλος των πυρηνικών καυσίμων	169
-------------------	--	------------

7.1. Αλίσσωτές αντιδράσεις και νετρονικό ισοζύγιο στους πυρηνικούς αντιδραστήρες	170
7.2. Τα συστατικά και η δομή ενός πυρηνικού αντιδραστήρα	176
7.3. Είδη πυρηνικών αντιδραστήρων	179
7.4. Ο κύκλος των πυρηνικών καυσίμων	182
7.4.1. Η εξόρυξη και παραλαβή του ουρανίου	182
7.4.2. Η μετατροπή σε UF_6 και ο εμπλουτισμός του ουρανίου	185
7.4.3. Η παραγωγή των πυρηνικών καυσίμων	187
7.4.4. Η επεξεργασία των χρησιμοποιημένων πυρηνικών καυσίμων και η ανακύκλωση του απομένοντος σχάσιμου υλικού	188
7.4.5. Η διαχείριση και διάθεση των πυρηνικών αποβλήτων	191
7.5. Η παραγωγή ενέργειας από την πυρηνική σύντηξη	197
Ασκήσεις - Ερωτήσεις	202

Κεφάλαιο 8	Οι επιταχυντές σωματιδίων	203
8.1.	Οι πηγές των ιόντων	203
8.2.	Είδη επιταχυντών	203
8.2.1.	Οι επιταχυντές σταθερού ηλεκτρικού πεδίου	205
8.2.2.	Οι επιταχυντές εναλλασσόμενου ηλεκτρικού πεδίου	207
	Ασκήσεις - Ερωτήσεις	213
Κεφάλαιο 9	Αρχές υγειοφυσικής και ακτινοπροστασίας	215
9.1.	Βασικές έννοιες και μονάδες της υγειοφυσικής	215
9.2.	Βιολογικές επιπτώσεις των ακτινοβολιών	218
9.3.	Η θωράκιση των πηγών ακτινοβολίας	224
9.4.	Μερικοί απλοί δοσιμετρικοί υπολογισμοί	227
9.5.	Η προσωπική δοσιμετρία	229
9.6.	Προστασία από τις ακτινοβολίες	232
9.6.1.	Τα ραδιενεργά εργαστηριακά κατάλοιπα	236
9.6.2.	Η μεταφορά ραδιενεργών ουσιών	237
	Ασκήσεις - Ερωτήσεις	239
Κεφάλαιο 10	Ατομικές και πυρηνικές τεχνικές ανάλυσης	241
10.1.	Η ανάλυση με φθορισμό ακτίνων-Χ	241
10.2.	Η ανάλυση με νετρονική ενεργοποίηση	248
10.3.	Η ανάλυση με δέσμες ιόντων	257
10.3.1.	Η ανάλυση με επαγόμενη από πρωτόνια εκπομπή ακτίνων-Χ	259
10.3.2.	Η ανάλυση με φασματοσκοπία οπισθοσκέδασης Rutherford και με ανίχνευση ανακρουόμενων πυρήνων	261
10.3.3.	Η ανάλυση με πυρηνικές αντιδράσεις	267
10.3.4.	Η ανάλυση με ενεργοποίηση με φορτισμένα σωματίδια	269
10.3.5.	Η φασματομετρία μαζών με επιταχυντές	271
	Ασκήσεις - Ερωτήσεις	273
Κεφάλαιο 11	Εφαρμογές των ραδιενεργών ισοτόπων και των ακτινοβολιών	275
11.1.	Εφαρμογές των ραδιενεργών ισοτόπων στη χημεία	275
11.1.1.	Οι ραδιενεργοί ιχνηθέτες	275

11.1.2. Η ανάλυση με ισοτοπική αραιώση	277
11.1.3. Η φασματοσκοπία Mössbauer	279
11.2. Εφαρμογές ραδιοϊσοτόπων στις γεωλογικές επιστήμες	284
11.3. Ραδιενεργά ισότοπα και ακτινοβολίες στην ιατρική και τις βιολογικές επιστήμες	285
11.3.1. Τα ραδιοφάρμακα: παρασκευή και χρήσεις	285
Η παρασκευή των ραδιοφαρμάκων	287
11.3.2. Οι γεννήτριες ραδιονουκλιδίων	290
Η γεννήτρια $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$	292
11.3.3. Η ιατρική διαγνωστική με ραδιοφάρμακα και ακτινοβολίες	294
Υπολογιστική τομογραφία και υπολογιστική τομογραφία εκπομπής μονού φωτονίου	294
Η τομογραφία εκπομπής ποζιτρονίων	296
Οι ραδιοανοσιολογικές εξετάσεις (RIA)	297
11.3.4. Ιατρική θεραπευτική με ραδιοφάρμακα και ακτινοβολίες	298
11.4. Η ραδιοχρονολόγηση	300
11.4.1. Η ραδιοχρονολόγηση με άνθρακα-14	302
11.4.2. Η χρονολόγηση υδάτων με κοσμογενή ραδιονουκλίδια	306
11.4.3. Η ραδιοχρονολόγηση στη γεωλογία	308
Το χρονόμετρο καλίου-αργού ($^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$)	308
Η χρονολόγηση ουρανιούχων και θοριούχων ορυκτών	309
11.5. Τεχνολογικές εφαρμογές των ραδιενεργών ισωτόπων και των ακτινοβολιών	312
11.5.1. Οι εφαρμογές των ακτινοβολιών στην τεχνολογία των τροφίμων ...	317
11.6. Οι ακτινοβολίες στην υπηρεσία της αρχαιολογίας και της τέχνης	322
11.6.1. Η ραδιοχρονολόγηση στην αρχαιολογία	322
11.6.2. Τα νετρόνια στην υπηρεσία της τέχνης	325
11.6.3. Η μελέτη των υλικών και ο έλεγχος της αυθεντικότητας	326
Ασκήσεις - Ερωτήσεις	332

Κεφάλαιο 12 Ραδιενέργεια στο περιβάλλον και τα τρόφιμα 335

12.1. Η φυσική ακτινοβολία	335
12.1.1. Το ραδόνιο	340
12.1.2. Η τεχνολογικά επαυξημένη συγκέντρωση φυσικών ραδιενεργών υλικών (TENORM): Μερικά παραδείγματα	343
Τα οικοδομικά υλικά	343
Η παραγωγή και χρήση φωσφορικών λιπασμάτων – Ο φωσφογύψος ..	344

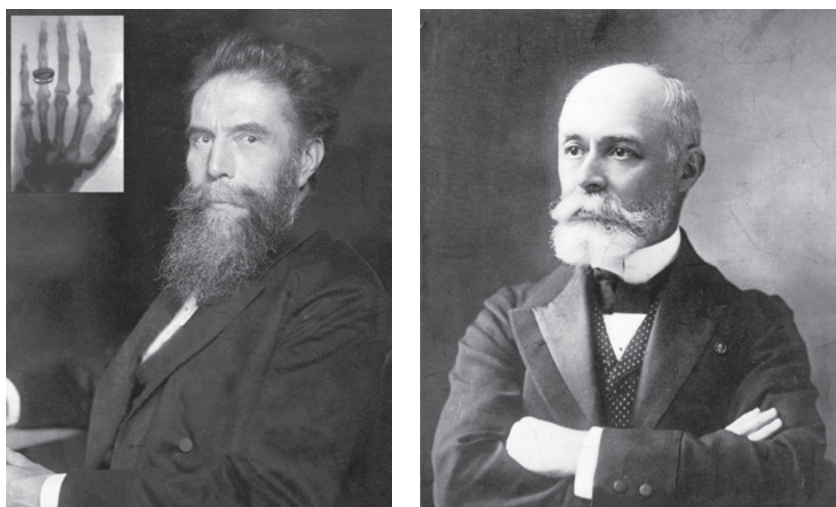
Η καύση άνθρακα για παραγωγή ενέργειας	345
Η εξόρυξη και μεταλλουργία μετάλλων	345
12.2. Η τεχνητή ραδιενέργεια	346
12.2.1. Οι δοκιμές πυρηνικών όπλων	346
12.2.2. Η παραγωγή της πυρηνικής ηλεκτρικής ενέργειας	347
12.2.3. Η ραδιορύπανση των υδάτων	350
12.3. Η μεταφορά των ραδιονουκλιδίων στο γήινο περιβάλλον	352
12.4. Η πρόσληψη των ραδιενεργών νουκλιδίων από τα φυτά, τα ζώα και τον άνθρωπο	359
12.4.1. Η πρόσληψη των φυσικών ραδιονουκλιδίων	361
12.4.2. Η πρόσληψη των τεχνητών ραδιονουκλιδίων	365
Το ιώδιο-131	365
Το στρόντιο-90	367
Το καίσιο-137 και -134	367
Τα υπερουράνια στοιχεία	368
12.5. Τα ραδιονουκλίδια στα φυτικά και ζωικά τρόφιμα	369
12.5.1. Η βιοσυσσωρευση των ραδιονουκλιδίων στα ψάρια και τα θαλασσινά	372
12.5.2. Η ισχύουσα νομοθεσία	373
Ασκήσεις - Ερωτήσεις	375
 Βιβλιογραφία	 377
Ευρετήριο όρων	385

Εισαγωγή

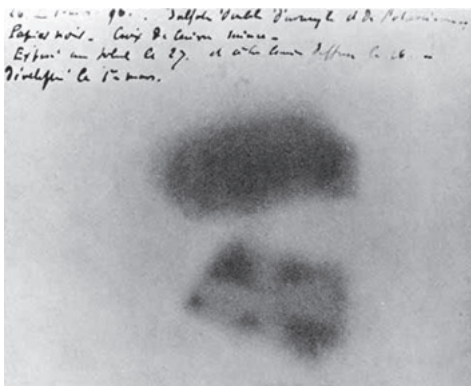
Μια σύντομη ιστορική αναδρομή

Παρά το γεγονός ότι ο άνθρωπος, από τη μέρα της εμφάνισής του επάνω στη γη, είναι εκτεθειμένος σε ραδιενεργό ακτινοβολία, η αρχή της πυρηνικής εποχής συνδέεται με την, τυχαία κατά κάποιον τρόπο, ανακάλυψη της **ραδιενέργειας** (*radioactivity*) από τον Antoine Henri Becquerel την 1η Μαρτίου 1896, δύο μόλις μήνες μετά την ανακάλυψη των ακτίνων-X από τον Wolfgang Conrad Röntgen (Σχήμα 1). Με αυτόν τον όρο χαρακτηρίζεται η ιδιότητα ορισμένων ασταθών ατομικών ειδών (νουκλιδίων) να μεταπίπτουν σε άλλα σταθερότερα ή σταθερά εκπέμποντας σωματιδιακή ή ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία.

Η ανακάλυψη της ραδιενέργειας βασίζεται στην παρατήρηση από τον Becquerel της εκπομπής από το καλιούχο θειϊκό ουρανύλιο ($\text{K}_2(\text{UO}_2)(\text{SO}_4)_2$) μιας ακτινοβολίας που προκαλεί το μαύρισμα φωτογραφικών πλακών ακόμη κι όταν είναι περιτυλιγμένες με αδιαφανές μαύρο χαρτί (Σχήμα 2).



Σχήμα 1: Ο W. C. Röntgen (1845-1923) και ακτινογράφημα της παλάμης της συζύγου του με ημερομηνία 22.12.1895 (αριστερά) και ο A. H. Becquerel (1852-1908) (δεξιά).



Σχήμα 2: Η ιστορική φωτογραφία, που οδήγησε τον Α. Η. Becquerel στην ανακάλυψη της ραδιενέργειας.



Σχήμα 3: Το ζεύγος Pierre (1859-1906) και Marie Curie (1967-1934) στο εργαστήριό τους στο Παρίσι.

Αμέσως μετά την ανακάλυψη του Becquerel, οι Pierre και η Marie Curie (Σχήμα 3) άρχισαν να μελετούν τον ιονισμό, που προκαλεί η ακτινοβολία των διαφόρων ορυκτών και αλάτων του ουρανίου και θορίου. Οι δύο ερευνητές απέδειξαν σε μερικές μόλις εβδομάδες, ότι η ένταση της ακτινοβολίας είναι ανάλογη της ποσότητας του ουρανίου και ανεξάρτητη του είδους της ένωσης καθώς επίσης της επίδρασης φωτός και θερμότητας. Παρατήρησαν επίσης ότι ορισμένα ορυκτά ουρανίου, όπως ο πισσουρανίτης, ακτινοβολούσαν ισχυρότερα από τις καθαρές ενώσεις του και σε άρθρο τους έγραψαν «αυτό το φαινόμενο οδηγεί στην υπόθεση ότι αυτά τα ορυκτά περιέχουν στοιχεία που είναι πιο δραστικά από το ουράνιο».

Η χημική επεξεργασία μεγάλων ποσοτήτων πισσουρανίτη οδήγησε τον Απρίλιο του 1898 στην ανακάλυψη της ραδιενέργειας του **θορίου** (Th). Οι ίδιοι πάλι ερευνητές, απομονώνοντας μια ουσία με ακτινοβολία 400 φορές μεγαλύτερη από εκείνη του ουρανίου, ανακάλυψαν το καλοκαίρι του 1898 ένα ακόμα, άγνωστο μέχρι τότε, μέταλλο για το οποίο πρότειναν την ονομασία **πολώνιο** (Po) από το όνομα της Πολωνίας, πατρίδας της Marie Curie. Στη δημοσίευση για την ανακάλυψη του πολωνίου το 1898 αναφέρεται για πρώτη φορά και η λέξη **ραδιοστοιχείο**. Τον ίδιο χρόνο (Δεκέμβριο 1898), μετά από επεξεργασία μεγάλης ποσότητας πισσουρανίτη απομονώθηκε από την ίδια ερευνητική ομάδα ένα ακόμη νέο στοιχείο, το οποίο ονόμασαν **ράδιο** (Ra). Αναφέρεται μάλιστα ότι για την απομόνωση περίπου 0,1 g καθαρού χλωριούχου ραδίου απαιτήθηκε η επεξεργασία περίπου δύο τόνων πισσουρανίτη. Από τον πισσουρανίτη απομονώθηκε το 1899 από τον Α.-L. Debierne και το ραδιενεργό στοιχείο το **ακτίνιο** (Ac). Ο προσδιορισμός του ατομικού βάρους και η μέτρηση του φάσματος εκπομπών επιβεβαίωσαν τελικά τα νέα στοιχεία που είχαν απομονωθεί.

Οι ανακαλύψεις αυτές προκάλεσαν μεγάλη εντύπωση στην επιστημονική κοινότητα και έδωσαν κίνητρα σε πολλούς ερευνητές να ασχοληθούν με τη μελέτη και ανάλυση των ορυκτών του ουρανίου. Μέχρι το 1903 ανακαλύφθηκαν πάνω από 10 ραδιοστοιχεία, ενώ ως το 1913 ο αριθμός τους ανέβηκε στα 40 δημιουργώντας προβλήματα κατάταξής τους στις 7 μόνο διαθέσιμες θέσεις του περιοδικού πίνακα μεταξύ του βισμούθιου, θορίου και ουρανίου. Το πρόβλημα αυτό λύθηκε από τον Frederic Soddy το 1917 αντικαθιστώντας τον όρο **ραδιοστοιχείο** με το **ισότοπο**. Ο Α.-H. Becquerel καθώς επίσης το ζεύγος Curie τιμήθηκαν το 1903 με το βραβείο Nobel Φυσικής. Επιπρόσθετα, η Marie Curie τιμήθηκε, το 1911, με το βραβείο Nobel Χημείας για την ανακάλυψη και απομόνωση των στοιχείων πολώνιο και ράδιο.

Οι φυσικοί, από την άλλη πλευρά, επικέντρωσαν τις προσπάθειες τους στη μελέτη της υφής της ακτινοβολίας, που εκπέμπεται από το ουράνιο και τα άλλα ραδιενεργά ατομικά είδη, χρησιμοποιώντας φωτογραφικές πλάκες, ηλεκτρόμετρα και μαγνητικά πεδία και απέδειξαν σύντομα, ότι η ακτινοβολία είναι σύνθετη και όχι ενιαία. Στο ζεύγος Curie ήταν ήδη γνωστό ότι υφίστανται διάφορα είδη ραδιενεργού ακτινοβολίας, πράγμα που επιβεβαιώθηκε αργότερα και πειραματικά με τη διάκριση της ακτινοβολίας σε α, β και γ. Ο Α. H. Becquerel διαπίστωσε ακόμα ότι οι ακτίνες-β έδειχναν σε μαγνητικό πεδίο την ίδια συμπεριφορά με τις καθοδικές ακτίνες, ενώ ο P. Villard ότι οι ακτίνες-γ, που δεν παρουσίαζαν απόκλιση σε μαγνητικό πεδίο, είχαν ηλεκτρομαγνητική υφή.

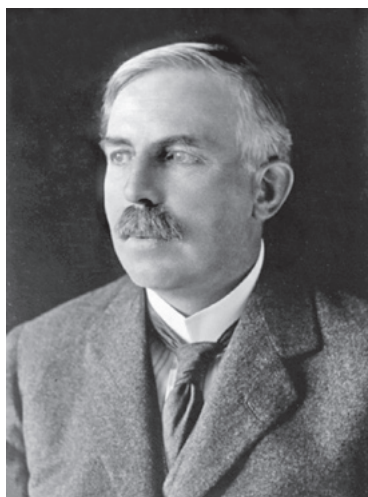
Το 1908 ο Sir Ernest Rutherford (*Σχήμα 4*), που θεωρείται ιδρυτής της έρευνας στην πυρηνική φυσική, διαπίστωσε ότι οι ακτίνες-α υφίστανται σε μαγνητικό και ηλεκτρικό πεδίο μικρότερη απόκλιση από τις ακτίνες-β, δηλαδή ότι έχουν μεγα-

λύτερη μάζα και απέδειξε ότι αποτελούνται από διπλά θετικά φορτισμένα σωματίδια του μεγέθους ενός ατόμου του στοιχείου ηλίου, που κινούνται με μεγάλες ταχύτητες.

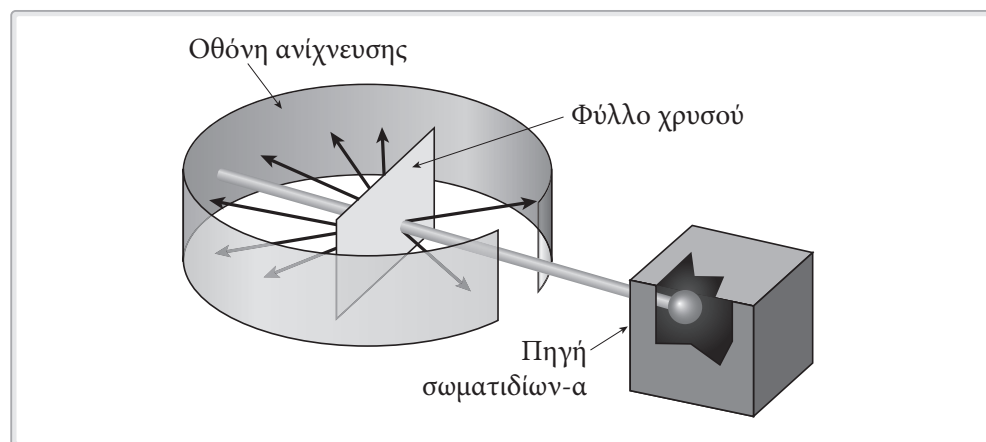
Ο E. Rutherford μαζί με τους συνεργάτες του Hans Geiger και Ernest Marsden απέδειξαν, με πειράματα σκεδασμού το 1909, ότι ο πυρήνας καταλαμβάνει μόνο ένα πάρα πολύ μικρό τμήμα στο κέντρο του ατόμου (Σχήμα 5).

Στον E. Rutherford οφείλεται επίσης η πραγματοποίηση της πρώτης πυρηνικής αντίδρασης, κατά την οποία διαπίστωσε ότι βομβαρδίζοντας άζωτο με σωματίδια-α σχηματίζεται υδρογόνο και οξυγόνο, η ανακάλυψη του στοιχείου **ραδόνιο** (Rn) και το όνομα **πρωτόνιο**, που δόθηκε στον πυρήνα του υδρογόνου, τον πιο απλό πυρήνα στη φύση. Το δεύτερο συστατικό των ατομικών πυρήνων, το **νετρόνιο** ανακαλύφθηκε το 1932 από τον James D. Chadwick μετά από την ανακάλυψη της τεχνητής ραδιενέργειας από τους Jean Frédéric Joliot και Irène Curie-Joliot, κόρη της Marie Curie. Ο J. Chadwick είχε προηγουμένως, το 1914, μελετήσει και τα συνεχή φάσματα της ακτινοβολίας-β, που ερμηνεύθηκαν αργότερα από τον Wolfgang Pauli με βάση τη θεωρία του **νετρίνο**.

Παράλληλα με τα πειράματα, ένας μεγάλος αριθμός πειραματικών και θεωρητικών επιστημόνων προσπάθησαν να ερμηνεύσουν τη δομή και τις διασπάσεις



Σχήμα 4: Sir Ernest Rutherford (1871-1937).

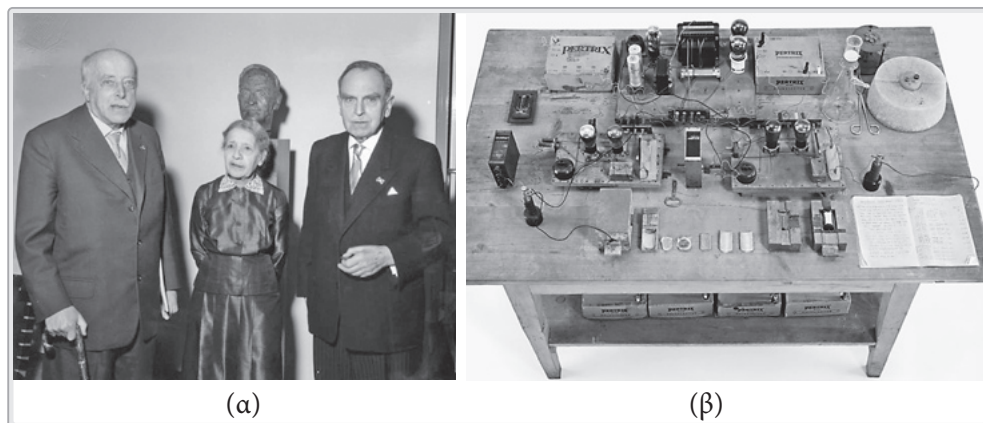


Σχήμα 5: Γραφική παράσταση της διάταξης του σκεδασμού σωματιδίων-α από φύλλο χρυσού, που χρησιμοποιήθηκε από τον Rutherford.

των ατομικών πυρήνων καθώς επίσης συνέβαλαν και στην ερμηνεία των ιδιοτήτων τους.

Μια όμως από τις, ίσως πιο συναρπαστικές, ανακαλύψεις του περασμένου αιώνα ήταν η **τεχνητή πυρηνική σχάση**, που ανακαλύφθηκε το 1938 από τους Otto Hahn, Lise Meitner και Friedrich Wilhelm Straßmann στο Βερολίνο (Σχήμα 6). Οι επιστήμονες αυτοί διαπίστωσαν ότι, κατά τον βομβαρδισμό με νετρόνια χαμηλής ενέργειας, ο πυρήνας του ουρανίου σπάζει (σχάζεται) σε μικρότερα τμήματα, που ανήκουν σε άλλα στοιχεία μικρότερου ατομικού αριθμού. Η πειραματική απόδειξη της σύγχρονης εκπομπής νετρονίων στη σχάση το 1939 και η απελευθέρωση μεγάλης ποσότητας ενέργειας οδήγησε στην εφαρμογή του φαινομένου τόσο για ειρηνικούς αλλά και στρατιωτικούς σκοπούς (ρίψη της πρώτης ατομικής βόμβας ουρανίου στη Hiroshima στις 6 Αυγούστου 1945 και της πρώτης πλουτωνίου στο Nagasaki στις 9 Αυγούστου 1945). Η τεχνητή πυρηνική σχάση παρουσιάζει και αναλογία με την αυθόρμητη που ανακαλύφθηκε το 1940 ως ένας τρόπος διάσπασης όχι μόνο του ουρανίου στη φύση (G. N. Flerov, και K. A. Petrzhak) αλλά και παραμορφωμένων βαρέων πυρήνων.

Η εξέλιξη των ανιχνευτών για σωματιδιακή και ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία καθώς επίσης η ανάπτυξη επιταχυντικών διατάξεων ικανών να επιταχύνουν φορτισμένα σωματίδια σε υψηλές ενέργειες, έδωσαν στους επιστήμονες τη δυνατότητα περαιτέρω μελέτης της πυρηνικής δομής, της σύνθεσης νέων στοιχείων, της διερεύνησης της υποατομικής ύλης αλλά και εφαρμογών των ακτινοβολιών στην ιατρική και την τεχνολογία.



Σχήμα 6: F.W. Straßmann, L. Meitner και O. Hahn σε μία φωτογραφία των αρχών της δεκαετίας του 1960 (αριστερά) και η πειραματική διάταξη με την οποία ανακαλύφθηκε η τεχνητή πυρηνική σχάση (δεξιά).

Ραδιοχημεία και Πυρηνική Χημεία

Η **Ραδιοχημεία** (*radiochemistry*) και η **Πυρηνική Χημεία** (*nuclear chemistry*) αποτελούν δύο συγγενείς κλάδους των πυρηνικών επιστημών. Ο πρώτος από αυτούς ασχολείται με την παραγωγή και μελέτη των ιδιοτήτων των ραδιενεργών στοιχείων καθώς επίσης με την εφαρμογή του φαινομένου της ραδιενεργού διάσπασης και μεθόδων της πυρηνικής φυσικής στην επίλυση προβλημάτων στη χημεία, ιατρική και τεχνολογία. Από την άλλη πλευρά, η πυρηνική χημεία εφαρμόζει διεργασίες και τεχνικές της χημείας στη μελέτη της δομής του ατομικού πυρήνα. Παρόλο ότι τα όρια αυτών των δύο κλάδων της Χημείας δεν είναι τελείως σαφή, είχαν ιδιαίτερη ανάπτυξη και συνδέθηκαν με μεγάλες ανακαλύψεις του περασμένου αιώνα.

Ο όρος Ραδιοχημεία αποδίδεται, ιστορικά, στη Marie Curie η οποία σε άρθρο της το 1924 αναφέρει ότι η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε για την απομόνωση και ταυτοποίηση των ραδιενεργών στοιχείων πολώνιο και ράδιο ήταν νέα στη χημική έρευνα και βασιζόταν στην ακτινοβολία που εκπέμπουν τα στοιχεία αυτά. Σημαντικές ανακαλύψεις συνδέθηκαν με το πεδίο αυτό και συνέβαλαν στην ανάπτυξή του. Ιδιαίτερης σημασίας ήταν η συνεισφορά της ραδιοχημείας και της πυρηνικής χημείας στην ανακάλυψη νέων στοιχείων, στην παραγωγή της πυρηνικής ενέργειας καθώς επίσης στη μελέτη και επίλυση μιας πληθώρας επιστημονικών προβλημάτων στην αρχαιολογία, την τέχνη, την ιατρική, την τεχνολογία και το περιβάλλον. Αυτό αποδεικνύεται και από τα πολυάριθμα Βραβεία Nobel, που απονεμήθηκαν σε επιστήμονες, που εργάστηκαν σ' αυτές αλλά και σε συγγενείς τους επιστημονικές περιοχές, όπως η πυρηνική φυσική, αστροφυσική και ιατρική. Στον *Πίνακα Ι* δίνονται οι σημαντικότερες από τις επιστημονικές ανακαλύψεις στο πεδίο των πυρηνικών επιστημών, που σχετίζονται άμεσα με τα πεδία της Ραδιοχημείας και της Πυρηνικής Χημείας μαζί με τα Βραβεία Nobel, που απονεμήθηκαν στους αντίστοιχους ερευνητές.

Κεφάλαιο 1

Το άτομο και ο πυρήνας του

Σύμφωνα με τη σημερινή αντίληψη, ο ατομικός πυρήνας αποτελείται από πρωτόνια, που είναι οι φορείς θετικού του φορτίου, και νετρόνια, τα οποία είναι ηλεκτρικά ουδέτερα. Τα πρωτόνια και νετρόνια του πυρήνα ονομάστηκαν συλλογικά από τους W. Pauli και S. M. Dancoff το 1942 **νουκλεόνια** (*nucleons*). Ο αριθμός των πρωτονίων Z σε κάθε πυρήνα είναι χαρακτηριστικός του χημικού στοιχείου, στο οποίο ανήκει, και ονομάζεται **ατομικός αριθμός** (*atomic number*). Η πρόσθεση του ατομικού αριθμού Z ενός πυρήνα και του αριθμού των νετρονίων του N , δίνει τον **μαζικό αριθμό** (*mass number*) A , του ατομικού είδους, που ονομάζεται **νουκλίδιο** (*nuclide*). Ο μαζικός αριθμός παρέχει, κατά προσέγγιση, τη μάζα του ατόμου σε **ατομικές μονάδες μάζας** (*atomic mass units*), που χαρακτηρίζονται με το σύμβολο u . Μία ατομική μονάδα μάζας ισοδυναμεί με το $1/12$ της μάζας του ισότοπου του άνθρακα με μαζικό αριθμό $A = 12$, δηλαδή μάζα ίση με $1,66053 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$.

Ο χαρακτηρισμός ενός νουκλιδίου πραγματοποιείται με τη γραφή του ονόματος του χημικού στοιχείου, στο οποίο ανήκει, καθώς επίσης του μαζικού και του ατομικού του αριθμού, A και Z , σε θέση δείκτη αντίστοιχα επάνω και κάτω αριστερά. Ο ατομικός αριθμός πολλές φορές παραλείπεται, επειδή υποδηλώνεται από το όνομα του χημικού στοιχείου (π.χ. $^{16}_8\text{O}$ ή ^{16}O). Η γραφή $\text{O}-16$ συνηθίζεται επίσης σε ορισμένα κείμενα.

Για τη συστηματική παράσταση των διαφόρων νουκλιδίων επινοήθηκε ο **Πίνακας των Νουκλιδίων** (*Chart of Nuclides*), ο οποίος αποτελεί ένα διάγραμμα με συντεταγμένες τον αριθμό των νετρονίων N (x-άξονας) και τον ατομικό αριθμό Z (y-άξονας). Κάθε οριζόντια σειρά αυτού του πίνακα (Σχήμα 1-1) περιλαμβάνει νουκλίδια με τον ίδιο αριθμό πρωτονίων Z στον πυρήνα τους, αλλά διαφορετικό αριθμό νετρονίων N . Τα νουκλίδια αυτά αποτελούν διάφορα ατομικά είδη του ίδιου στοιχείου και ονομάζονται **ισότοπα** (*isotopes*), γιατί καταλαμβάνουν την ίδια θέση στο περιοδικό σύστημα. Για παράδειγμα, τα νουκλίδια ^{12}C , ^{13}C και ^{14}C , έχοντας 6 πρωτόνια στον πυρήνα τους, είναι ισότοπα του άνθρακα. Από αυτά τα νουκλίδια ο ^{12}C και ο ^{13}C είναι σταθερά ενώ ο ^{14}C ασταθής (ραδιενεργός). Τα ισότο-

The chart displays nuclides arranged by atomic number (Z) and mass number (N). The vertical axis represents Z (0 to 13), and the horizontal axis represents N (0 to 31). The chart includes a grid of elements and their isotopes, with some cells containing specific data like half-life or decay mode. The chart is labeled with 'Z' for atomic number and 'N' for mass number.

Σχήμα 1-1: Απόσπασμα του Πίνακα των Νουκλιδίων.

πα ενός στοιχείου, σταθερά και ασταθή, έχουν τις ίδιες χημικές ιδιότητες. Οι φυσικές τους ιδιότητες δεν είναι όλες ίδιες και ορισμένες από αυτές μπορεί να παρουσιάζουν διαφορές (π.χ. συντελεστής διάχυσης).

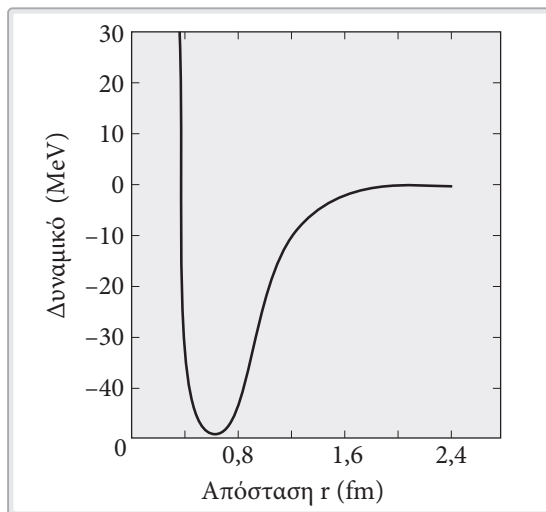
Ο Πίνακας των Νουκλιδίων, που περιλαμβάνει 270 σταθερά και πάνω από 2.500 ασταθή ισότοπα των διαφόρων χημικών στοιχείων, παρέχει και μια πληθώρα πληροφοριών όπως, για παράδειγμα, η αφθονία των σταθερών καθώς επίσης ο **χρόνος υποδιπλασιασμού ή ημιζωή** (*half-life*) και τρόπος διάσπασης των ασταθών (ραδιενεργών) νουκλιδίων.

1.1 Το φορτίο και η ακτίνα του πυρήνα

Οι ατομικοί πυρήνες μπορεί να θεωρηθεί ότι έχουν, κατά προσέγγιση, ένα σφαιρικό σχήμα με ακτίνα R . Η έννοια της πυρηνικής ακτίνας γίνεται πιο κατανοητή παρακολουθώντας την μεταβολή της δυναμικής ενέργειας ενός φορτισμένου σωματιδίου στην περιοχή ενός ατομικού πυρήνα (Σχήμα 1-2).

Όταν ένα σωματίδιο πλησιάζει την επιφάνεια του πυρήνα υφίσταται ισχυρή έλξη, που γίνεται εμφανής από την απότομη ελάττωση της δυναμικής ενέργειας.

Η δυναμική ενέργεια σε αποστάσεις $r > R$ μεταβάλλεται σύμφωνα τον **νόμο του Coulomb**. Έτσι, η πυρηνική ακτίνα R ταυτίζεται με την ακτίνα δράσης των πυρηνικών δυνάμεων.



Σχήμα 1-2: Δυναμικό φορτισμένου σωματιδίου στην περιοχή του πυρήνα.

Οι πειραματικές τιμές των πυρηνικών ακτίνων περιγράφονται από την εμπειρική σχέση

$$R = r_0 A^{1/3} \quad (1-1)$$

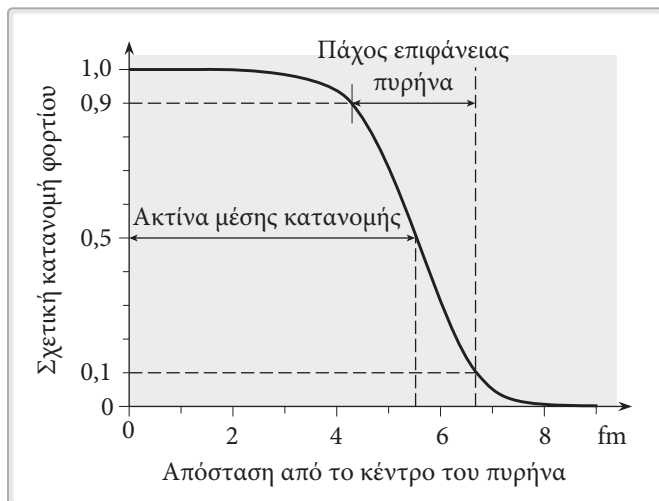
Το r_0 είναι μια σταθερά, που λαμβάνει τιμές μεταξύ 1,2 και 1,5 fm (1 fm = 1 femtometer = 10^{-15} m). Οι διακυμάνσεις των πειραματικών τιμών της σταθεράς r_0 δείχνουν, ότι ο ακριβής προσδιορισμός των ορίων του ατομικού πυρήνα δεν είναι δυνατός.

Η πυκνότητα του πυρήνα ρ_N είναι ανεξάρτητη του αριθμού των νουκλεονίων του. Λαμβάνοντας $r_0 = 1,4$ fm και θεωρώντας τη μάζα των νουκλεονίων $m_N = 1,67 \cdot 10^{-27}$ kg (μάζα πρωτονίου και νετρονίου αντίστοιχα $1,672614 \cdot 10^{-27}$ και $1,674941 \cdot 10^{-27}$ kg) προκύπτει για την πυκνότητα του πυρήνα ρ_N η εξαιρετικά μεγάλη τιμή

$$\rho_N = \frac{A}{\frac{4}{3} \pi R^3 N_A} \approx 1,2 \cdot 10^{14} \text{ g/cm}^3 \quad (1-2)$$

Το N_A παριστάνει τον αριθμό του Avogadro, δηλαδή τον αριθμό των ατόμων σε μάζα σε γραμμάρια ίση με την ατομική μάζα.

Για όλους τους πυρήνες με $A > 16$ η κατανομή του φορτίου παραμένει μόνο σε μια περιορισμένη περιοχή σταθερή και μετά, στα όρια του πυρήνα, τείνει προς το μηδέν (Σχήμα 1-3).



Σχήμα 1-3: Κατανομή του φορτίου στον ατομικό πυρήνα.

1.2

Μάζα και σταθερότητα του ατομικού πυρήνα

Η μάζα των ατόμων είναι πάρα πολύ μικρή. Για παράδειγμα, η μάζα του ατόμου του υδρογόνου ισούται με $1,67355 \cdot 10^{-27}$ kg, ενώ αυτή των ατόμων των βαρύτερων στοιχείων είναι περίπου δύο τάξεις μεγέθους μεγαλύτερη.

Λαμβάνοντας υπόψη την ισοδυναμία μάζας και ενέργειας,

$$E = mc^2 \quad (1-3)$$

μπορεί να υπολογισθεί το ενεργειακό ισοδύναμο μίας ατομικής μονάδας μάζας

$$u = 1,4923 \cdot 10^{-10} \text{ Joule} \quad (1-4)$$

όπου c είναι η ταχύτητα του φωτός στο κενό ($c = 2,99792458 \cdot 10^8$ m/s).

Στις πυρηνικές επιστήμες η ενέργεια εκφράζεται τις περισσότερες φορές σε **ηλεκτρονιοβόλτ** (*electron-volt*), eV, και τα πολλαπλάσιά του (π.χ., keV, MeV). Ένα ηλεκτρονιοβόλτ ισούται με την κινητική ενέργεια, που αποκτά ένα ηλεκτρόνιο δι-ασχίζοντας στο κενό μια διαφορά δυναμικού ενός Volt ($1 \text{ eV} = 1,6022 \cdot 10^{-19}$ J). Μία ατομική μονάδα μάζας ισοδυναμεί με ενέργεια 931,494028 MeV.

Λαμβάνοντας υπόψη την ατομική μάζα μπορεί να υπολογισθεί η μάζα του πυρήνα αφαιρώντας τη μάζα των ηλεκτρονίων ($m_e = 5,48592 \cdot 10^{-4} \text{ u} = 9,109534 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$). Η ενέργεια σύνδεσης των ηλεκτρονίων μπορεί να θεωρηθεί, σ' αυτή την περίπτωση, αμελητέα.

Ακριβείς προσδιορισμοί των ατομικών μαζών διαφόρων νουκλιδίων έδειξαν ότι είναι ελάχιστα μικρότερες από το άθροισμα της μάζας των συστατικών τους (Z πρωτόνια, N νετρόνια και Z ηλεκτρόνια). Αυτή η διαφορά μάζας δM (**έλλειμμα μάζας**, *mass defect*) αντιστοιχεί στην ενέργεια E_B , που απαιτείται για τη συγκράτηση των πρωτονίων και νετρονίων στον πυρήνα (**ενέργεια σύνδεσης**, *binding energy*). Έτσι η μάζα ενός ουδέτερου ατόμου (M) δίνεται από τη σχέση

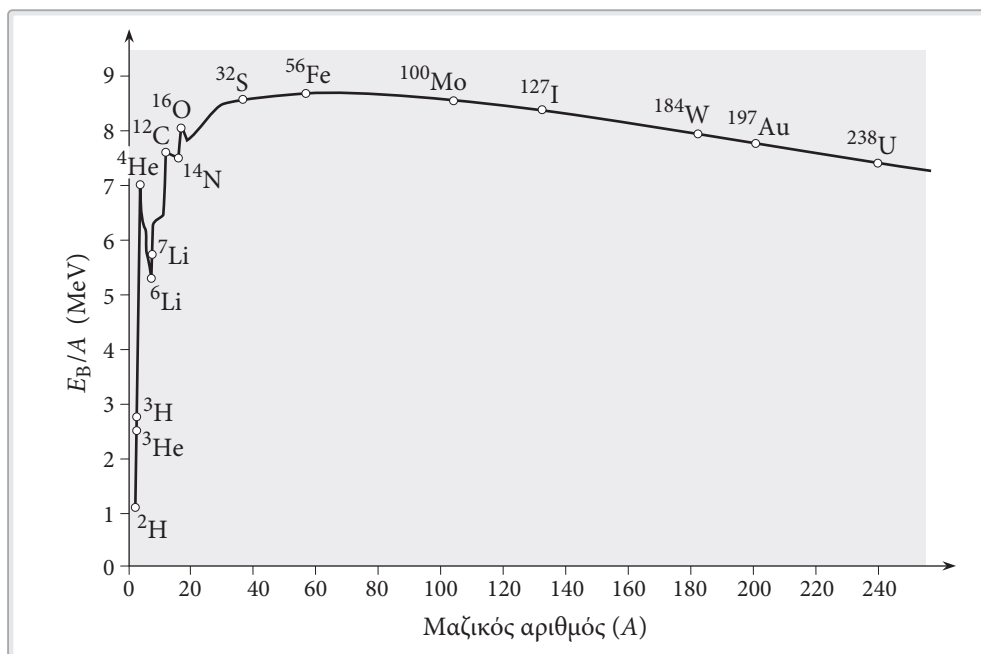
$$M = Zm_p + Nm_N + Zm_e - \delta M = Zm_H + Nm_N - \delta M \quad (1-5)$$

όπου m_p , m_N , m_e και m_H η μάζα του πρωτονίου, του νετρονίου, του ηλεκτρονίου και του ατόμου του υδρογόνου.

Χρησιμοποιώντας τη σχέση της ισοδυναμίας μάζας και ενέργειας μπορεί από το έλλειμμα μάζας να υπολογισθεί η ενέργεια σύνδεσης (E_B) ενός πυρήνα. Διαιρώντας την ενέργεια σύνδεσης με τον αριθμό των νουκλεονίων του πυρήνα προκύπτει η ενέργεια σύνδεσης ανά νουκλεόνιο (E_B/A).

$$\frac{E_B}{A} = \frac{(\delta M c^2)}{A} = \frac{(Zm_p + Nm_N + Zm_e - M) c^2}{A} = \frac{(Zm_H + Nm_N - M) c^2}{A} \quad (1-6)$$

Το Σχήμα 1-4 δίνει την ενέργεια σύνδεσης των σταθερών πυρήνων σε συνάρτηση με τον αριθμό των νουκλεονίων τους. Με εξαίρεση τους ελαφρούς πυρήνες, η ενέργεια σύνδεσης ανά νουκλεόνιο (E_B/A) δεν μεταβάλλεται δραστικά. Ιδιαίτερη σημασία στο Σχήμα 1-4 έχει η απότομη πτώση της ενέργειας σύνδεσης στους πολύ ελαφρούς πυρήνες και η βαθμιαία πτώση στους πολύ βαρείς. Αυτό σημαίνει, ότι η σύντηξη των πολύ ελαφρών πυρήνων και η σχάση των πολύ βαρέων είναι εξώθερμα φαινόμενα, που οδηγούν σε απελευθέρωση ενέργειας σύνδεσης. Πέρα από αυτά, στο Σχήμα 1-4 μπορεί να παρατηρηθεί η ιδιαίτερα υψηλή σταθερότητα των πυρήνων με μαζικό αριθμό A περίπου 60 καθώς επίσης η αντιστοιχία των νουκλιδίων ${}^4\text{He}$, ${}^{12}\text{C}$ και ${}^{16}\text{O}$, που έχουν υψηλότερη ενέργεια σύνδεσης από τα γειτονικά τους. Η υψηλή ενέργεια σύνδεσης του ${}^4\text{He}$ δικαιολογεί την αυθόρμητη διάσπαση του ${}^8\text{Be}$ σε δύο πυρήνες ${}^4\text{He}$ (σωματίδια-α) καθώς επίσης και τις τεράστιες ποσότητες ενέργειας, που παράγονται από την καύση (σύντηξη) του υδρογόνου σε ήλιο στον Ήλιο.



Σχήμα 1-4: Ενέργεια σύνδεσης ανά νουκλεόνιο των διαφόρων πυρήνων.

Οι H. Bethe και C.F. von Weizsäcker, βασιζόμενοι στο **πρότυπο της σταγόνας υγρού** (*liquid-drop model*), πρότειναν μια ημιεμπειρική σχέση που επιτρέπει τον υπολογισμό της ενέργειας σύνδεσης των πυρήνων με αρκετή ακρίβεια. Το πρότυπο της σταγόνας υγρού θεωρεί τον πυρήνα των ατόμων σαν μια σταγόνα ενός μη συμπιεστού ηλεκτρικά φορτισμένου υγρού και τα νουκλεόνια σαν μόριά της.

Σύμφωνα με τη σχέση των Bethe και Weizsäcker, η ενέργεια σύνδεσης των πυρήνων στη βασική τους κατάσταση δίνεται από το άθροισμα πέντε ενεργειακών παραγόντων

$$E_B = E_0 + E_E + E_C + E_\Sigma + \varepsilon_{\text{συζ}} \quad (1-7)$$

όπου E_B είναι η **ενέργεια συνδέσης**, E_0 η **ενέργεια όγκου**, E_E η **ενέργεια επιφάνειας**, E_C η **ενέργεια Coulomb**, E_Σ η **ενέργεια συμμετρίας** και $\varepsilon_{\text{συζ}}$ η **ενέργεια σύζευξης**.

Η ενέργεια όγκου είναι μια συνάρτηση του R^3 , δηλαδή του A , και αντιστοιχεί στη μέγιστη ενέργεια σύνδεσης ενός πυρήνα με μαζικό αριθμό A και ίσο αριθμό πρωτονίων και νετρονίων. Η άπωση μεταξύ των πρωτονίων δεν λαμβάνεται υπόψη σ' αυτόν τον παράγοντα της συνάρτησης.

Η ενέργεια επιφάνειας λαμβάνει υπόψη της το γεγονός, ότι τα επιφανειακά νουκλεόνια ενός πυρήνα είναι μονόπλευρα και συνεπώς ασθενέστερα συνδεде-

μένα από τα αντίστοιχα στο εσωτερικό του. Η ενέργεια επιφάνειας, που μειώνει την ενέργεια σύνδεσης και έχει αρνητικό πρόσημο, είναι ανάλογη με το R^2 , δηλαδή με $A^{2/3}$.

Η ενέργεια Coulomb, που αντιστοιχεί στην ηλεκτροστατική άπωση μεταξύ των πρωτονίων του πυρήνα, είναι αντίστροφα ανάλογη με την ακτίνα του πυρήνα (R^{-1}) και έχει επίσης αρνητικό πρόσημο.

Η ενέργεια συμμετρίας εκφράζει την τάση ιδιαίτερης σταθερότητας, που χαρακτηρίζει τους ελαφρούς πυρήνες με $Z=N$. Η ενέργεια αυτή είναι ανάλογη του $(N-Z)^2/A$.

Τέλος, η ενέργεια σύζευξης είναι ένας εμπειρικός διορθωτικός παράγοντας που εκφράζει την αύξηση της ενέργειας σύνδεσης κατά δ σε πυρήνες με άρτιο αριθμό πρωτονίων και νετρονίων. Ο σχηματισμός ζευγών πρωτονίων και νετρονίων με συνολικό σπιν ίσο με μηδέν ($S=0$) συνεπάγεται ένα ισχυρότερο δέσιμο αυτών των πυρήνων σε σύγκριση με αντίστοιχους, με περιττό αριθμό.

$$\varepsilon_{\text{συζ}} = \delta, \quad \text{όταν } N \text{ άρτιος και } Z \text{ άρτιος,}$$

$$\varepsilon_{\text{συζ}} = 0, \quad \text{όταν } N \text{ περιττός και } Z \text{ άρτιος ή όταν } N \text{ άρτιος και } Z \text{ περιττός,}$$

$$\varepsilon_{\text{συζ}} = -\delta, \quad \text{όταν } N \text{ περιττός και } Z \text{ περιττός,}$$

$$\delta = 11,46 A^{-1/2} \text{ MeV.}$$

Έτσι, η σχέση των Bethe και Weizsäcker παίρνει τη μορφή

$$E_B = \alpha_0 A - \alpha_E A^{2/3} - \alpha_C \frac{Z^2}{A^{1/3}} - \alpha_S \frac{(A - 2Z)^2}{A} + \varepsilon_{\text{συζ}} \quad (1-8)$$

Οι σταθερές της σχέσης προσδιορίστηκαν με τη βοήθεια πειραματικών δεδομένων και έχουν τις τιμές:

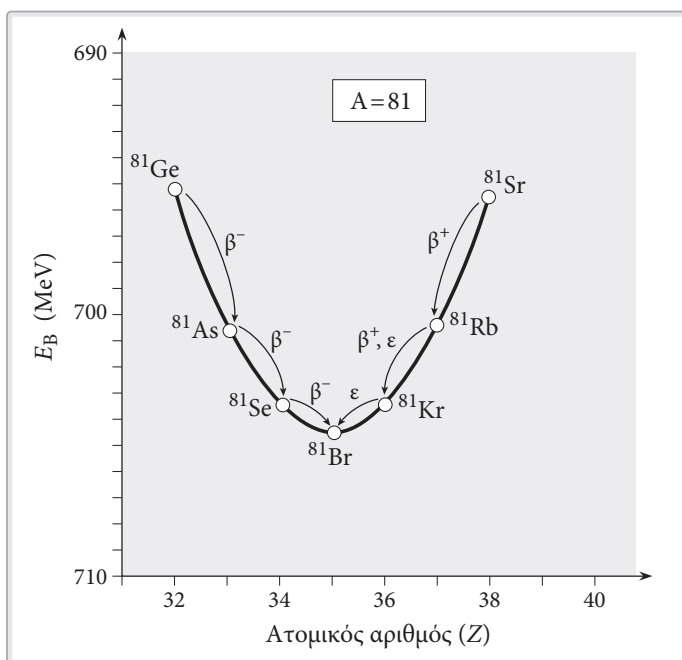
$$\alpha_0 = 15,8 \text{ MeV}, \quad \alpha_E = 17,8 \text{ MeV}, \quad \alpha_C = 0,71 \text{ MeV}, \quad \alpha_S = 23,22 \text{ MeV}$$

$$\text{και} \quad \varepsilon_{\text{συζ}} = 0 \text{ ή } +11,46 A^{-1/2}.$$

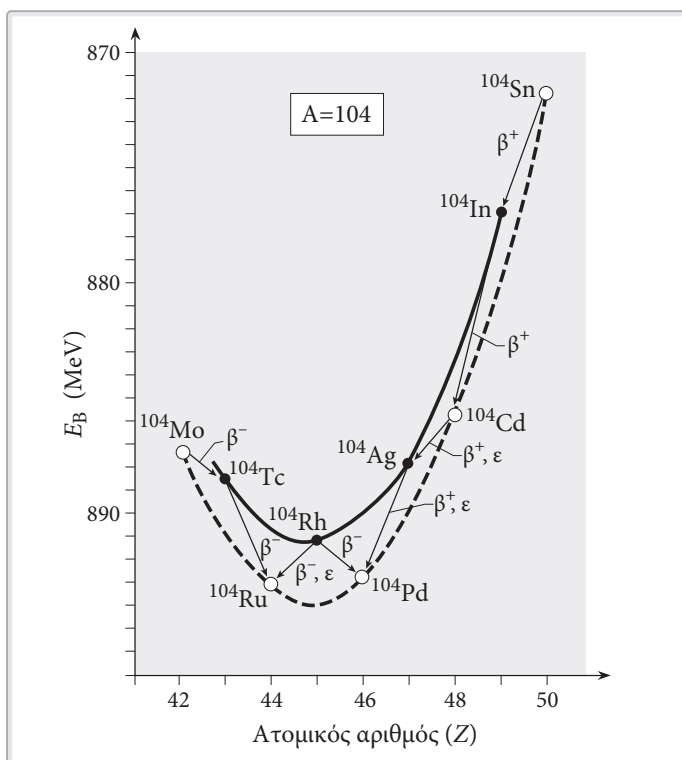
Για ένα δεδομένο αριθμό νουκλεονίων A η σχέση των Bethe και Weizsäcker έχει τη μορφή μιας παραβολικής συνάρτησης με μεταβλητή τον ατομικό αριθμό των πυρήνων Z (Σχήμα 1-5).

Όταν ο αριθμός των νουκλεονίων είναι άρτιος προκύπτουν από τη συνάρτηση, λόγω του τελευταίου όρου της σχέσης ($\varepsilon_{\text{συζ}}$), δύο καμπύλες (Σχήμα 1-6), η μια για τους πυρήνες με άρτιο αριθμό πρωτονίων και νετρονίων (**α,α-πυρήνες**) και η άλλη για τους πυρήνες με περιττό (**π,π-πυρήνες**).

Οι πυρήνες που βρίσκονται πλησιέστερα στην κορυφή της παραβολικής καμπύλης, είναι οι σταθερότεροι της ισοβαρούς σειράς, ενώ οι υπόλοιποι διασπώ-



Σχήμα 1-5:
Ισοβαρές καμπύλη
για πυρήνες με $A=81$.

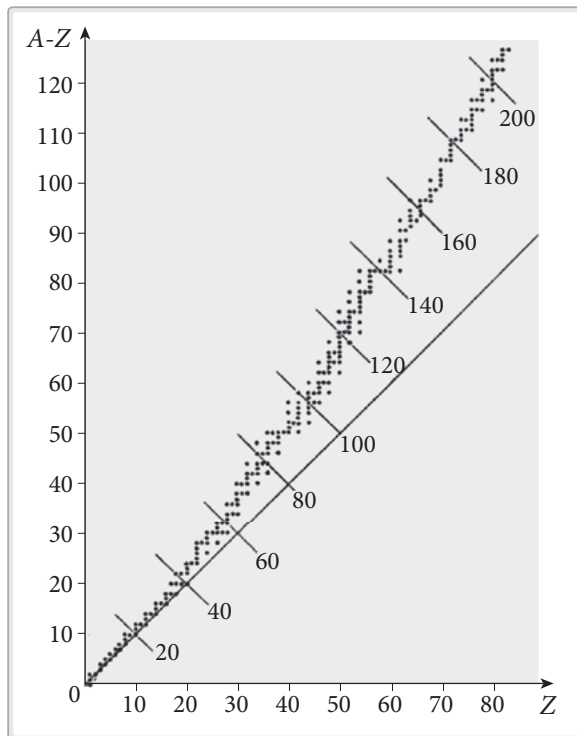


Σχήμα 1-6:
Ισοβαρείς καμπύλες
για πυρήνες με $A=104$.

νται εκπέμποντας ακτινοβολία-β μέχρι να φθάσουν στην κατάσταση της μέγιστης σταθερότητας. **Ισοβαρείς** (*isobars*) είναι οι πυρήνες με τον ίδιο μαζικό αριθμό, δηλαδή με το ίδιο άθροισμα του αριθμού των πρωτονίων και των νετρονίων.

Η παρατήρηση του Πίνακα των Νουκλιδίων οδηγεί στο συμπέρασμα, ότι από τα 270 σταθερά νουκλίδια στη φύση τα 162 έχουν άρτιο αριθμό πρωτονίων και νετρονίων στον πυρήνα τους (α,α-νουκλίδια). Τα α,α-νουκλίδια χαρακτηρίζονται όχι μόνο από μεγάλη σταθερότητα αλλά και από μεγάλη αφθονία στη φύση (π.χ. το ^{16}O και το ^{28}Si αποτελούν τα 75% της μάζας του στερεού φλοιού της γης). Σταθερότητα επίσης παρατηρείται σε 55 νουκλίδια με άρτιο αριθμό πρωτονίων και περιττό νετρονίων καθώς και σε 50 με περιττό αριθμό πρωτονίων και άρτιο νετρονίων στον πυρήνα τους (αντίστοιχα π,α- και α,π-νουκλίδια). Μόνο πέντε σταθερά νουκλίδια (^2H , ^6Li , ^{10}B , ^{14}N και ^{180}Ta) έχουν περιττό αριθμό πρωτονίων και νετρονίων στον πυρήνα τους (π,π-νουκλίδια). Στην τελευταία κατηγορία ανήκουν επίσης μερικά μακρόβια ασταθή νουκλίδια, όπως το ^{40}K , ^{50}V , ^{138}La και ^{175}Lu .

Στα ελαφρά σταθερά νουκλίδια ο αριθμός των πρωτονίων του πυρήνα είναι σχεδόν ίσος με τον αριθμό των νετρονίων. Όταν αυξάνει το φορτίο του πυρήνα όλο και περισσότερα νετρόνια είναι απαραίτητα για την εξασφάλιση της σταθερότητας (βλ. Σχήμα 1-7).



Σχήμα 1-7:

Συνολτικός πίνακας των σταθερών νουκλιδίων.

Κεφάλαιο 10

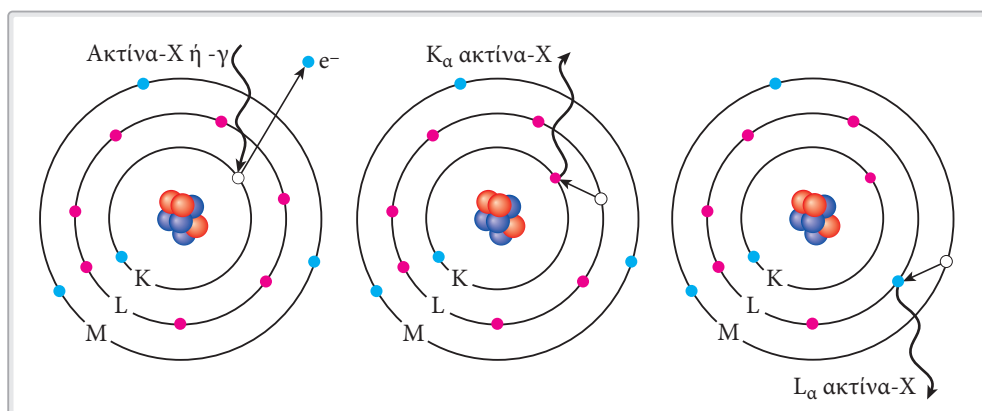
Ατομικές και πυρηνικές τεχνικές ανάλυσης

10.1 Η ανάλυση με φθορισμό ακτίνων-X

Η **ανάλυση με φθορισμό ακτίνων-X** (*X-Ray Fluorescence Analysis*, XRF) είναι μια αναλυτική τεχνική που χρησιμοποιείται σε πολλά επιστημονικά πεδία γιατί παρέχει τη δυνατότητα για γρήγορο προσδιορισμό του μεγαλύτερου αριθμού στοιχείων του περιοδικού πίνακα με όρια ανίχνευσης της τάξης των $\mu\text{g/g}$ (ppm) [25].

Κατά την ανάλυση το δείγμα ακτινοβολείται με μια δέσμη ακτίνων-X ή ακτίνων- γ που προκαλεί διέγερση και απομάκρυνση ηλεκτρονίων από τις εσωτερικές στοιβάδες του ατόμου (*Σχήμα 10-1*). Οι κενές θέσεις ηλεκτρονίων, που προκύπτουν, καλύπτονται από ηλεκτρόνια ανώτερων στοιβάδων με σύγχρονη εκπομπή ακτίνων-X ενέργειας ίσης με την ενεργειακή διαφορά των στοιβάδων. Αυτό γίνεται εμφανές και στο *Σχήμα 10-1β* όπου παρουσιάζεται η εκπομπή της χαρακτηριστικής ακτινοβολία K_{α} , που είναι αποτέλεσμα της μετάπτωσης ηλεκτρονίων από την L- στην K-στοιβάδα ενός ατόμου. Παρόμοιες, μεταπτώσεις ηλεκτρονίων από την M- στην K-στοιβάδα συνοδεύονται από την εκπομπή των χαρακτηριστικών K_{β} ακτίνων-X. Οι μεταπτώσεις που καταλήγουν στην L- και την M-στοιβάδα οδηγούν αντίστοιχα στην εκπομπή L- και M ακτίνων-X, που έχουν χαμηλότερες ενέργειες από τις K_{α} και K_{β} .

Οι K_{α} ακτίνες-X, που έχουν ενέργεια χαμηλότερη από αυτή των αντίστοιχων K_{β} , είναι οι σημαντικότερες και χαρακτηριστικότερες σε ένα φάσμα. Από την άλλη μεριά, οι K_{β} ακτίνες-X έχουν, για ελαφρά στοιχεία ($Z \leq 30$), ένταση μικρότερη από αυτή των K_{α} (K_{β}/K_{α} : 10-15%). Ο λόγος των εντάσεων K_{β}/K_{α} όμως αυξάνει στα βαριά στοιχεία μέχρι ~30%. Κατ' αυτόν τον τρόπο, οι K ακτίνες-X αποτελούν σ' ένα δείγμα τον κύριο τρόπο ταυτοποίησης στοιχείων με χαμηλό ατομικό αριθμό, όπου οι L- και οι M- ακτίνες έχουν χαμηλή ενέργεια και ο προσδιορισμός της έντασής τους δεν είναι ικανοποιητικός. Οι L-ακτίνες-X χρησιμοποιούνται με



Σχήμα 10-1: Η αρχή της ανάλυσης με φθορισμό ακτίνων-X: διέγερση ενός ατόμου από ακτινοβολία-X ή -γ με εκπομπή ενός ηλεκτρονίου της K-στοιβάδας (α), κατάληψη της κενής θέσης ηλεκτρονίου της K-στοιβάδας από ηλεκτρόνιο της L-στοιβάδας με σύγχρονη εκπομπή K_α ακτίνων-X (β) και κατάληψη της κενής θέσης ηλεκτρονίου της L-στοιβάδας από ηλεκτρόνιο της M-στοιβάδας με σύγχρονη εκπομπή L_α ακτίνων-X (γ).

επιτυχία για τον προσδιορισμό στοιχείων υψηλού ατομικού αριθμού, στα οποία η μέτρηση των K-ακτίνων με ανιχνευτές κατάλληλους για χαμηλές ενέργειες (π.χ. Si(Li) ή *planar* HPGe) παρουσιάζει δυσκολίες (χαμηλή απόδοση μέτρησης). Οι ενέργειες των K ακτίνων-X κυμαίνονται μεταξύ ~1 keV (Na) και 100 keV (U) ενώ των L μεταξύ 0,3 keV (Ca) και 20 (U) keV. Η ενέργεια των M-ακτίνων δεν υπερβαίνει τα περίπου 3 keV (U). Η ενέργεια των ακτίνων-X είναι χαρακτηριστική των στοιχείων από τα οποία προέρχονται.

Όπως είναι γνωστό, το μήκος κύματος, και συνεπώς η ενέργεια, των ακτίνων-X συνδέεται άμεσα, σύμφωνα με το **νόμο του Moseley**, με τον ατομικό αριθμό των στοιχείων προέλευσης

$$\frac{1}{\lambda} = C(Z - s)^2 \quad (10-1)$$

όπου, το λ είναι το μήκος κύματος της ακτινοβολίας, το C μία σταθερά (περίπου ίση με τη σταθερά Rydberg, R), η οποία διαφέρει για κάθε φασματική σειρά, και s μία **σταθερά προάσπισης** (*screening constant*) με τιμή περίπου ίση με τη μονάδα. Το μήκος κύματος της ακτινοβολίας λ συνδέεται άμεσα με την ενέργειά της με τη σχέση

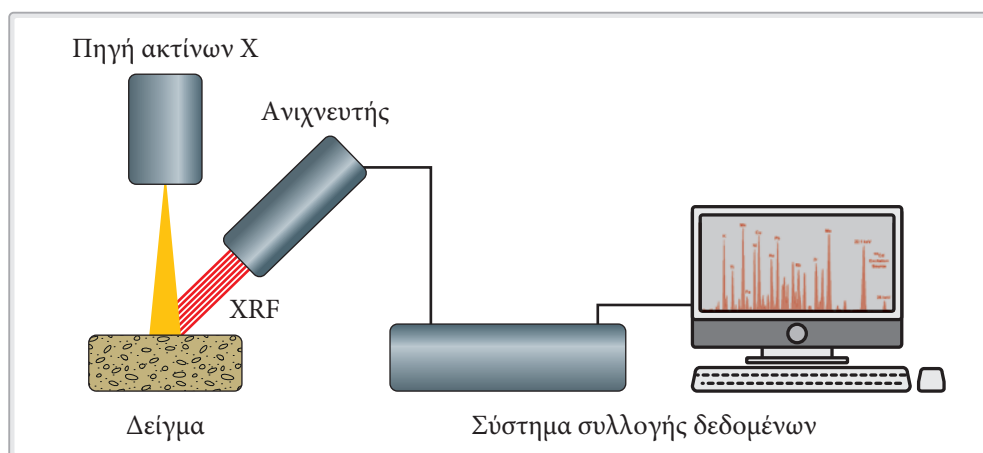
$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (10-2)$$

όπου h η σταθερά του Planck ($h = 4,136 \cdot 10^{-15}$ eV s), ν η συχνότητα της ακτινοβολίας και c η ταχύτητα του φωτός.

Συμπερασματικά, οι ενέργειες των ακτίνων-X παρέχουν πληροφορίες για τη στοιχειακή σύσταση ενός δείγματος, ενώ η ένταση των κορυφών τους στο φάσμα δίνει την ποσοτική πληροφορία.

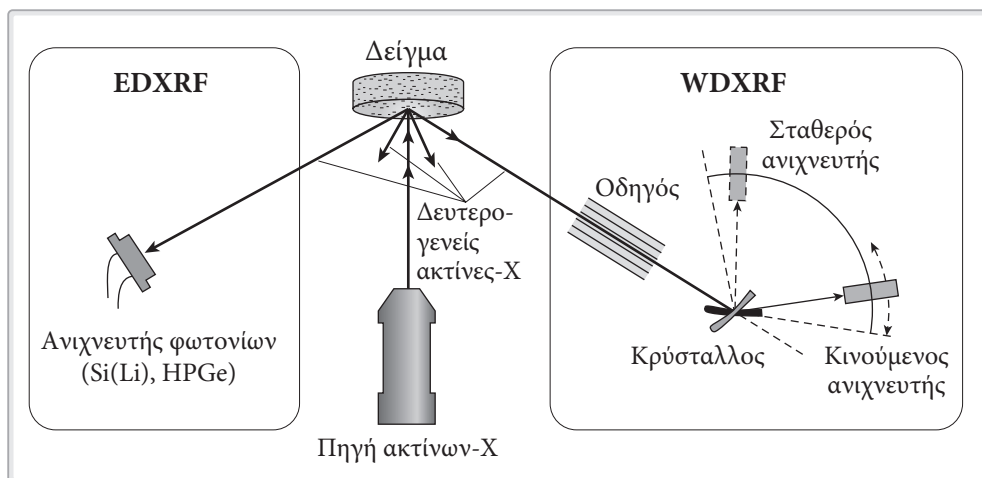
Η ανάλυση με φθορισμό ακτίνων-X είναι μια τεχνική ολικού δείγματος (*bulk analysis*). Το πάχος της στοιβάδας του δείγματος, που αναλύεται, εξαρτάται από την ενέργεια της διεγείρουσας ακτινοβολίας και των εκπεμπόμενων ακτίνων-X. Για την ανάλυση χρησιμοποιούνται κυρίως δύο μεθοδολογίες, η **διασποράς ενέργειας** (*energy dispersive XRF, EDXRF*) και η **διασποράς μήκους κύματος** (*wavelength dispersive XRF, WDXRF*). Με την EDXRF μπορούν να ανιχνευθούν, σε συγκεντρώσεις $\mu\text{g/g}$, στοιχεία από Na μέχρι και U ($Z = 14-92$) ενώ με WDXRF η περιοχή ανίχνευσης μπορεί να επεκταθεί μέχρι και το Be. Τα όρια ανίχνευσης εξαρτώνται από το στοιχείο αλλά και το δείγμα. Γενικά, η αναλυτική αυτή τεχνική παρουσιάζει μεγαλύτερη ευαισθησία για βαρύτερα στοιχεία.

Τα βασικά συστατικά του εξοπλισμού ανάλυσης με φθορισμό ακτίνων-X διασποράς ενέργειας (EDXRF) είναι η πηγή της ακτινοβολίας-X ή γ -, ο ανιχνευτής της ακτινοβολίας (συνήθως Si(Li) ή HPGe) και το σύστημα συλλογής δεδομένων (Σχήμα 11-2).



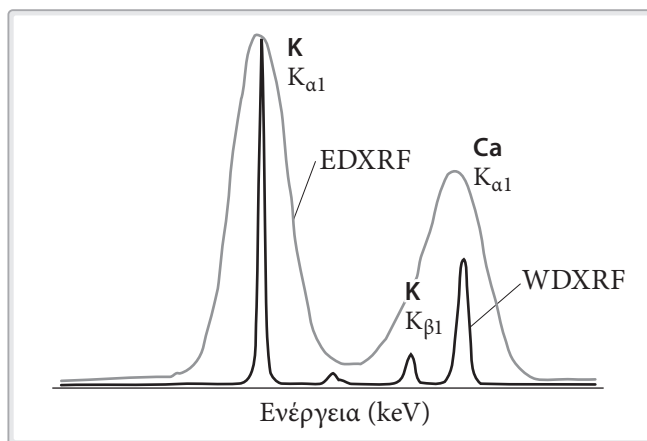
Σχήμα 10-2: Πειραματική διάταξη της φασματοσκοπίας φθορισμού ακτίνων-X διασποράς ενέργειας (EDXRF).

Στην WDXRF, οι ακτίνες-X του δείγματος περιθλώνται από έναν κρύσταλλο σε διάφορες γωνίες ανάλογα με το μήκος κύματός τους και το φάσμα τους καταγράφεται σημείο προς σημείο με βαθμιαία περιστροφή του κρυστάλλου (Σχήμα 10-3).



Σχήμα 10-3: Σύγκριση ενός συστήματος EDXRF (αριστερά) με ένα WDXRF (δεξιά).

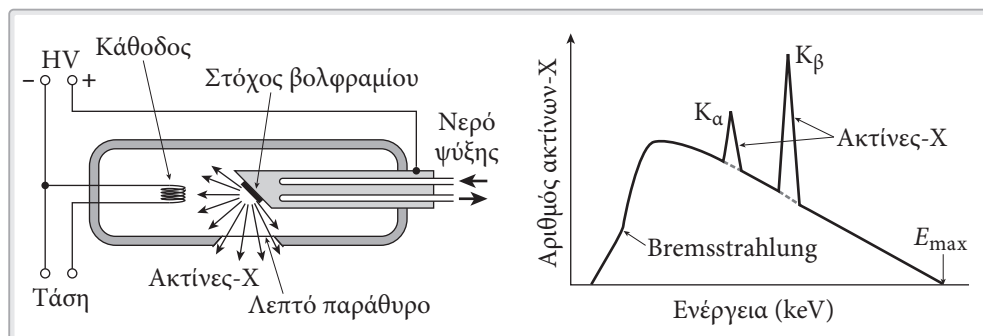
Το μεγάλο πλεονέκτημα της WDXRF έγκειται στη διακριτικότητα ενέργειας (5-20 eV έναντι 150-300 eV της EDXRF), που συνεπάγεται περιορισμό των επικαλύψεων των κορυφών στο φάσμα και επίτευξη χαμηλών ορίων ανίχνευσης (Σχήμα 10-4), ενώ τα μειονεκτήματά της στην μεγαλύτερη διάρκεια της μέτρησης και τον πιο σύνθετο εξοπλισμό.



Σχήμα 10-4: Διαφορά της διακριτικής ικανότητας ενέργειας στην ανάλυση με φθορισμό ακτίνων-X διασποράς ενέργειας (EDXRF) και μήκους κύματος (WDXRF).

Στη λυχνία ακτίνων-X (Σχήμα 10-5α), ηλεκτρικό ρεύμα προκαλεί την εκπομπή ηλεκτρονίων από ένα μεταλλικό νήμα (κάθοδο). Τα ηλεκτρόνια αυτά, μετά την επιτάχυνσή τους από υψηλή τάση, προσπίπτουν σε ένα μεταλλικό στόχο (άνοδο)

από Cu, Mo, Rh ή W και παράγουν ένα ευρύ φάσμα ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, που αποτελείται από ακτινοβολία πέδησης (Bremsstrahlung) και χαρακτηριστικές ακτίνες-X της ανόδου (Σχήμα 10-5β). Ένα λεπτό παράθυρο επιτρέπει την έξοδο των ακτίνων-X από τη λυχνία. Ανάλογα με τα στοιχεία που πρόκειται να αναλυθούν, επιλέγεται το υλικό της ανόδου της λυχνίας.



Σχήμα 10-5: Σχηματική παράσταση λειτουργίας λυχνίας παραγωγής ακτίνων-X (α) και η παραγωγή τους κατά τον βομβαρδισμό της ανόδου με ηλεκτρόνια (β).

Στην περίπτωση της διέγερσης του φθορισμού με ραδιοϊσοτοπικές πηγές, η εκπεμπόμενη ακτινοβολία έχει συγκεκριμένη ενέργεια, με αποτέλεσμα κάθε ραδιενεργός πηγή να μπορεί να διεγείρει με επιτυχία ορισμένη περιοχή στοιχείων. Συνεπώς για την ανάλυση μίας ευρείας περιοχής στοιχείων σ' ένα δείγμα απαιτείται συχνά η χρησιμοποίηση περισσότερων της μίας πηγών. Στον Πίνακα 10-1 δίνονται μερικές από τις πλέον συνηθισμένες ραδιοϊσοτοπικές πηγές διέγερσης ακτίνων-X με επικρατέστερες τις Fe-55, Cd-109 και Am-241.

Πίνακας 10-1: Ραδιονουκλίδια που χρησιμοποιούνται συνήθως ως πηγές στη φασματοσκοπία φθορισμού ακτίνων-X

Νουκλίδιο	Χρόνος υποδιπλασιασμού	Είδος διάσπασης	Ενέργεια ακτινοβολίας (keV)
^{109}Cd	462,6 ημέρες	EC	22,1 (Ag K)
^{241}Am	432 χρόνια	α	59,6 (γ)
^{210}Pb	22,3 χρόνια	β^-	46,5 (γ)
^{125}I	59,4 ημέρες	EC	27,4 (Te K); 35,4 (γ)
^{55}Fe	2,73 χρόνια	EC	5,9 (Mn K)
^{57}Co	271,8 ημέρες	EC	136 (γ); 122 (γ)

Στην ανάλυση με φθορισμό ακτίνων-Χ απαιτείται, στις περισσότερες περιπτώσεις, προετοιμασία των δειγμάτων, που μπορεί να περιλαμβάνει κονιοποίηση, ομογενοποίηση, τήξη, χημική επεξεργασία και δημιουργία δισκίων με εφαρμογή πίεσης ή και υαλοποίηση. Προηγμένες τεχνικές οπτικής έδωσαν τη δυνατότητα δημιουργίας, σε αναλυτικές διατάξεις φθορισμού ακτίνων-Χ, δέσμης διέγερσης διαμέτρου πολύ μικρότερης του mm (μέχρι και 10 μm). Αυτή η τεχνική, που χαρακτηρίζεται ως **μικροανάλυση με φθορισμό ακτίνων-Χ ($\mu\text{-XRF}$)**, επιτρέπει την ανάλυση μεμονωμένων σωματιδίων και τη λήψη της χωρικής κατανομής των διαφόρων στοιχείων στο δείγμα με υψηλή διακριτικότητα.

Ιδιαίτερα ενδιαφέρον παρουσιάζει και η ανάπτυξη, κατά τη διάρκεια των τελευταίων ετών, συμπαγών πηγών ακτίνων-Χ χαμηλής ισχύος και ανιχνευτών μικρών διαστάσεων, οι οποίοι μπορούν να λειτουργούν σε θερμοκρασία δωματίου χωρίς ψύξη υγρού αζώτου. Τα συστήματα αυτά οδήγησαν στο σχεδιασμό φορητών διατάξεων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για επιτόπιες (*in situ*) μετρήσεις και σε εξωτερικούς χώρους. Στο Σχήμα 10-6 απεικονίζονται παραδείγματα τέτοιων συσκευών για εργαστηριακή χρήση καθώς επίσης και φορητές συσκευές για εξωτερικές (εκτός εργαστηρίου) μετρήσεις.

Η ποσοτικοποίηση των αποτελεσμάτων της ανάλυσης με φθορισμό ακτίνων-Χ δεν είναι πάντοτε εύκολη και απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή. Συνήθως επιτυγχάνεται με τη χρησιμοποίηση πρότυπων υλικών απόλυτα γνωστής συγκέντρωσης για τη χάραξη καμπύλων βαθμονόμησης (ένταση της κορυφής XRF ως προς τη συγκέντρωση των επιμέρους στοιχείων). Ιδιαίτερη σπουδαιότητα στην XRF παρουσιάζει ο υπολογισμός του εύρους της στοιβάδας του δείγματος από το οποίο προκύπτει το φάσμα των ακτίνων-Χ. Αυτός ο υπολογισμός δεν είναι πάντοτε απλός και περιλαμβάνει τόσο την απώλεια ενέργειας κατά τη διείσδυση της αρχικής (διεγείρουσας) ακτινοβολίας στο δείγμα όσο και αυτής κατά την έξοδο των ακτίνων-Χ που εκπέμπονται από τα συστατικά του. Και οι δύο αυτοί παράγοντες εξαρτώνται άμεσα από την ενέργεια των ακτίνων-Χ και την εν γένει σύσταση του δείγματος. Γενικά, μπορεί να λεχθεί ότι οι ακτίνες-Χ, που ανιχνεύονται προκύπτουν από στοιβάδες του δείγματος μεταξύ μερικών mm και μερικών μm .

Σήμερα η ανάλυση με φθορισμό ακτίνων-Χ είναι μια καθιερωμένη, ταχεία και ιδιαίτερα προσιτή τεχνική με ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών στην έρευνα και τεχνολογία. Η μελέτη των υλικών (π.χ. κράματα, λεπτά υμένα, βιομηχανικά προϊόντα), η επιστήμη του περιβάλλοντος (π.χ. εδάφη, αερολύματα επάνω σε φίλτρα), η αρχαιολογία και τέχνη αλλά και η εγκληματολογία υπήρξαν και συνεχίζουν να είναι αντικείμενα ενός μεγάλου αριθμού αναλύσεων μ' αυτή την τεχνική.

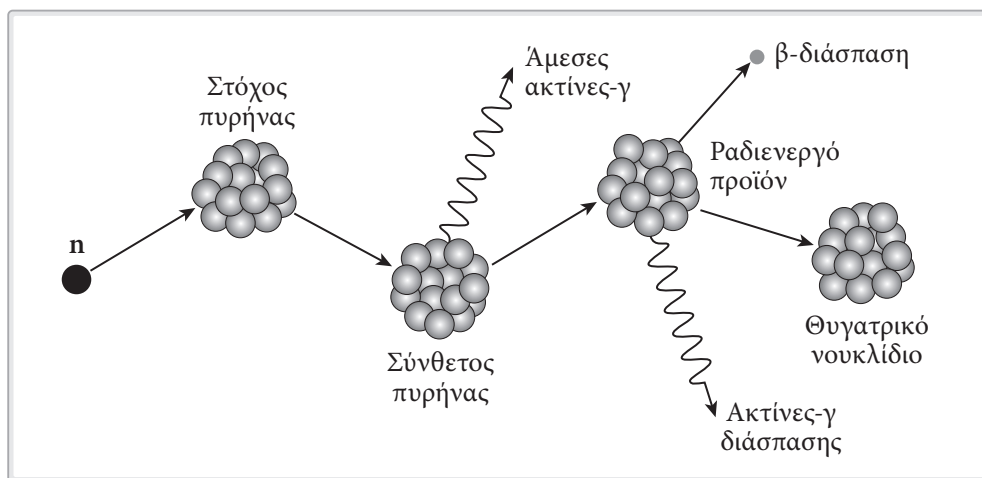


Σχήμα 10-6: (α) Si-PIN ανιχνευτής με συσκευή παροχής τάσης και ενισχυτή σήματος (άνω) καθώς επίσης πηγή ακτίνων-X (κάτω) της εταιρίας AMPTEK, (β) και εργαστηριακό σύστημα ανάλυσης με φθορισμό ακτίνων-X πολλαπλών δειγμάτων της εταιρίας PANALYTICAL, (γ) και (δ) φορητά συστήματα ανάλυσης με φθορισμό ακτίνων-X της εταιρίας BRUKER.

10.2 Η ανάλυση με νετρονική ενεργοποίηση

Η **ανάλυση με νετρονική ενεργοποίηση** (*Neutron Activation Analysis, NAA*) ανακαλύφθηκε από τους G. de Hevesy και H. Levi το 1936 και από τότε χρησιμοποιείται ευρύτατα λόγω της ευαισθησίας και της ακρίβειάς της [26-28].

Η τεχνική αυτή βασίζεται στη μέτρηση της χαρακτηριστικής ακτινοβολίας-γ των ραδιονουκλιδίων που σχηματίζονται κατά την ακτινοβόληση ενός υλικού με νετρόνια (Σχήμα 10-7). Οι πυρηνικές αντιδράσεις, που λαμβάνουν χώρα είναι συνήθως του τύπου (n,γ) (π.χ. $^{23}\text{Na}(n,\gamma)^{24}\text{Na}$ ($t_{1/2} = 14$ ώρες) \rightarrow ^{24}Mg (σταθερό)).

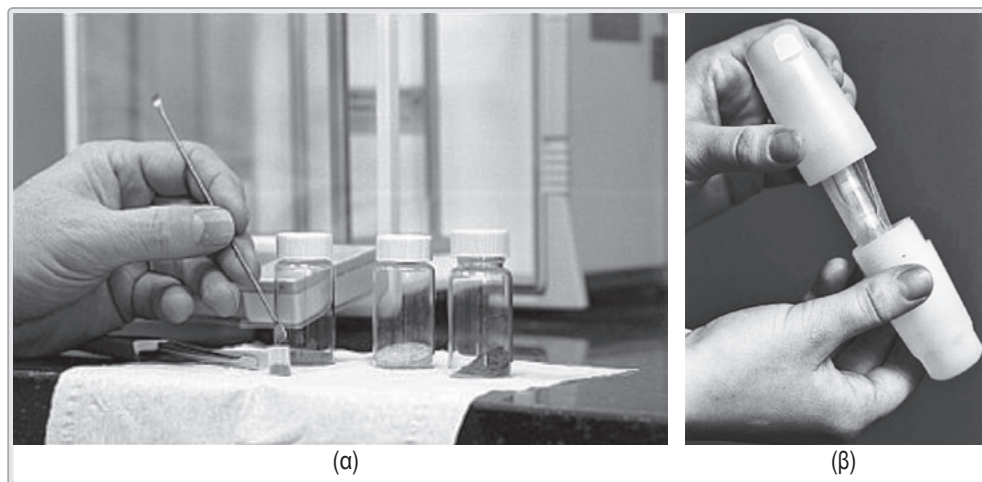


Σχήμα 10-7: Σχηματική παράσταση της νετρονικής ενεργοποίησης.

Η συγκεκριμένη τεχνική ανάλυσης παρέχει μια σειρά πλεονεκτημάτων όπως:

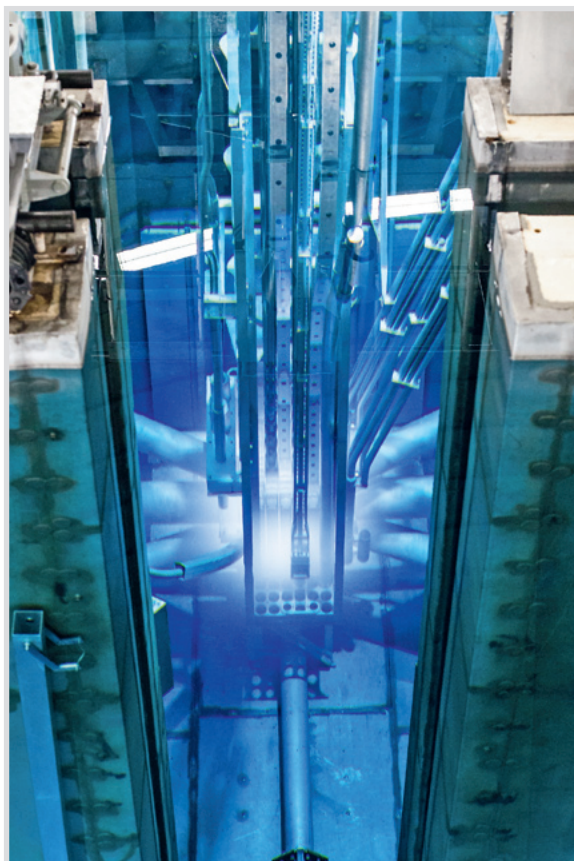
- η εφαρμογή της σε στερεά, υγρά ακόμη και αέρια δείγματα με σύντομη φυσική ή χημική προετοιμασία,
- ο σύγχρονος προσδιορισμός μεγάλου αριθμού στοιχείων (μέχρι και άνω των 30) σε διάφορες μήτρες,
- η δυνατότητα μη-καταστροφικής ανάλυσης,
- το εύρος της περιοχής εφαρμογής της (από $\mu\text{g/kg}$ ως g/kg),
- η μικρή ποσότητα του απαιτούμενου δείγματος (10-70 mg),
- η υψηλή ακρίβεια και χαμηλή αβεβαιότητα των αποτελεσμάτων,
- η διαθεσιμότητα πιστοποιημένων υλικών αναφοράς (*certified reference materials*) για τον υπολογισμό των συγκεντρώσεων των στοιχείων αλλά και τον έλεγχο της αξιοπιστίας (*quality control*) των προσδιορισμών.

Για την πραγματοποίηση της ανάλυσης, μια μικρή ομογενής και αντιπροσωπευτική ποσότητα (περίπου 25 mg) του δείγματος ζυγίζεται σε ειδικά φιαλίδια από υψηλής καθαρότητας και μικρής πυκνότητας πολυαιθυλένιο (LDP) και ακτινοβολείται με νετρόνια. Η ακτινοβόληση μπορεί να γίνει είτε μεμονωμένα ή με τοποθέτηση πολλών φιαλιδίων, συχνά μαζί με ένα πιστοποιημένο δείγμα αναφοράς, σε ειδική οβίδα (Σχήμα 10-8). Τα νετρόνια για την ενεργοποίηση παρέχονται από έναν **πειραματικό πυρηνικό αντιδραστήρα**, μία **γεννήτρια νετρονίων** (*neutron generator*) ή μία **ισοτοπική πηγή νετρονίων** (*isotopic neutron source*).



Σχήμα 10-8: Συσκευασία των δειγμάτων σε ειδικά φιαλίδια πολυαιθυλενίου (α) και τοποθέτησή τους σε οβίδα για ακτινοβόληση (β).

Στους πειραματικούς πυρηνικούς αντιδραστήρες (π.χ. Σχήμα 10-9), χρησιμοποιούνται για την ακτινοβόληση κυρίως θερμικά νετρόνια ($E_n \sim 0,025$ eV, ταχύτητα 2.200 m/s) λόγω της μεγάλης πυκνότητας ροής τους (10^{12} - 10^{14} νετρόνια $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$) και των υψηλών ενεργών διατομών σύλληψής τους από τα διάφορα στοιχεία (*thermal neutron activation analysis*, TNAA). Σε μικρότερο βαθμό χρησιμοποιούνται τα επιθερμικά νετρόνια (ενέργεια 0,1-1 eV) (*Epithermal Neutron Activation Analysis*, ENAA), τα ενδιάμεσα νετρόνια (ενέργεια 1-500 keV) και τα ταχεία νετρόνια (ενέργεια $> 0,5$ MeV) (*Fast Neutron Activation Analysis*, FNAA). Σ' αυτές τις περιπτώσεις το δείγμα συσκευάζεται σε δοχείο καδμίου (πάχος τοιχωμάτων περίπου 1 mm) ή βορίου. Το κάδμιο και το βόριο απορροφούν τα θερμικά νετρόνια, που αποτελούν το 90-95% των νετρονίων στις θέσεις ακτινοβόλησης του αντιδραστήρα, και το δείγμα βομβαρδίζεται από τα επιθερμικά και ταχεία νετρόνια. Η ροή των επιθερμικών νετρονίων αποτελεί περίπου το 2% και των ταχέων το 5% της συνολικής ροής του αντιδραστήρα. Τα επιθερμικά νετρόνια προ-

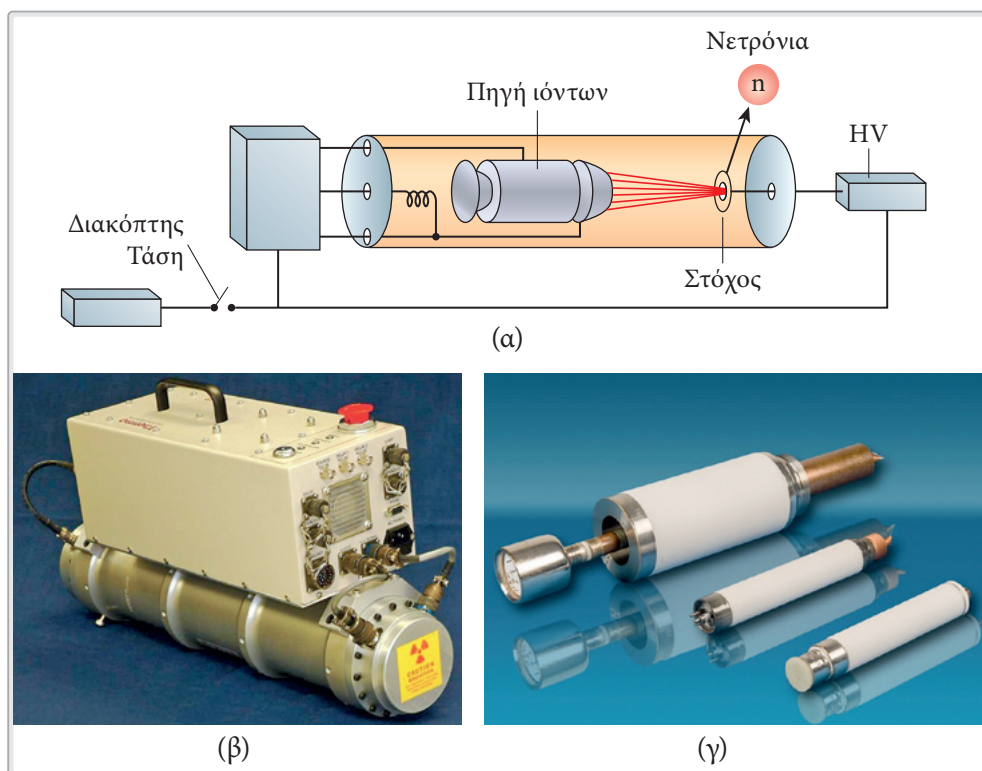


Σχήμα 10-9:

Το εσωτερικό του πειραματικού πυρηνικού αντιδραστήρα ανοικτής δεξαμενής του Πολυτεχνείου του Delft (Ολλανδία) που χρησιμοποιείται για αναλύσεις με νετρονική ενεργοποίηση.

καλούν, όπως και τα θερμικά, αντιδράσεις του τύπου (n, γ) ενώ τα ταχεία (n, γ) , (n, n') και $(n, 2n)$.

Οι γεννήτριες νετρονίων είναι συμπαγείς επιταχυντές σωματιδίων χαμηλής τάσης στους οποίους παράγονται νετρόνια από πυρηνικές αντιδράσεις με βομβαρδισμό ενός κατάλληλου στόχου με φορτισμένα σωματίδια (Σχήμα 10-10). Η πλέον διαδεδομένη αντίδραση παραγωγής είναι η ${}^3\text{H}(d, n){}^4\text{He}$, η οποία παράγει μονοενεργειακά νετρόνια ενέργειας 14 MeV. Η πυκνότητα ροής νετρονίων μίας γεννήτριας είναι της τάξης των $10^9 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ σε σύγκριση με αυτή ενός πυρηνικού αντιδραστήρα, που είναι ως και 10^6 φορές υψηλότερη. Γεννήτριες νετρονίων χρησιμοποιούνται τόσο στο εργαστηριακό περιβάλλον όσο και για επιτόπιες αναλύσεις στην ύπαιθρο (π.χ. αναλύσεις πετρωμάτων σε γεωτρήσεις πετρελαίου). Από την άλλη πλευρά, οι ισοτοπικές πηγές, που αποτελούνται από ένα α-ραδιενεργό νουκλίδιο (π.χ. ${}^{227}\text{Ac}$, ${}^{226}\text{Ra}$, ${}^{239}\text{Pu}$) αναμειγμένο με βηρύλλιο, παράγουν νετρόνια μέσω αντιδράσεων του τύπου (α, n) . Ως πηγές νετρονίων χρησιμοποιούνται επίσης ορισμένα ισότοπα υπερουράνιων στοιχείων που διασπώνται με αυθόρμη-



Σχήμα 10-10: Σχηματική παράσταση γεννήτριας νετρονίων (α), φορητή γεννήτρια νετρονίων της εταιρίας ThermoFischer (β) και σωλήνες παραγωγής νετρονίων για γεωτρήσεις της εταιρίας SODERN (γ).

τη σχάση. Το γνωστότερο και πιο διαδεδομένο από αυτά είναι το ^{252}Cf ($t_{1/2} = 2,64$ χρόνια) που εκπέμπει κατά μέσον όρο 3,76 νετρόνια ενέργειας 1,5 MeV ανά σχάση. Έτσι, 1 mg ^{252}Cf παράγει περίπου $2,3 \cdot 10^9$ νετρόνια ανά δευτερόλεπτο.

Η μέτρηση της ακτινοβολίας, που εκπέμπουν τα δείγματα, πραγματοποιείται είτε κατά τη διάρκεια της ακτινοβόλησης χρησιμοποιώντας τις άμεσες ακτίνες-γ του σχηματιζόμενου σύνθετου πυρήνα (**ανάλυση με νετρονική ενεργοποίηση άμεσης ακτινοβολίας-γ, prompt-gamma neutron activation analysis, PGNA**), ή μετά το πέρας της χρησιμοποιώντας τις ακτίνες-γ που εκπέμπονται από τη διάσπαση των προϊόντων της ενεργοποίησης. Η PGNAA χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό στοιχείων με πολύ μεγάλες ενεργές διατομές σύλληψης νετρονίων (π.χ., B, Cd, Sm, Gd), με πολύ μικρούς χρόνους υποδιπλασιασμού, με πολύ ασθενείς ακτίνες-γ ή στοιχείων που με σύλληψη νετρονίων παράγουν σταθερά νουκλίδια. Για τη χρησιμοποίηση αυτής της τεχνικής απαιτείται η εξαγωγή της δέσμης των νετρονίων εκτός του αντιδραστήρα, γεγονός που μειώνει ιδιαίτερα σημαντι-

**Ασκήσεις - Ερωτήσεις**

1. Το οξυγόνο μπορεί να προσδιορισθεί χρησιμοποιώντας ταχέα νετρόνια με τη βοήθεια της πυρηνικής αντίδρασης $^{16}\text{O} (n, p) ^{16}\text{N}$ ($t_{1/2} = 7 \text{ s}$). Η ενεργός διατομή αυτής της αντίδρασης είναι 49 mb. Μια ποσότητα 3,982 g ενός λιπαρού οξέως ακτινοβολήθηκαν για 20 s με $4 \cdot 10^8 \text{ νετρ/cm}^2 \text{ s}$. Μετά την ακτινοβόληση το δείγμα μεταφέρθηκε σ' ένα σύστημα μέτρησης με απόδοση 1,1% για τις ακτίνες- γ του ^{16}N . Ακριβώς 8 s μετά την ακτινοβόληση το δείγμα μετρήθηκε και βρέθηκε να παρουσιάζει ρυθμό απαρίθμησης 13.418 min^{-1} . Πόσο οξυγόνο περιείχε το δείγμα;
2. α) Υπολογίσατε την ενεργότητα του ^{49}Ca ($t_{1/2} = 8,72 \text{ min}$), που θα σχηματισθεί ακτινοβολώντας με νετρόνια 2,7 g CaO σ' έναν πυρηνικό αντιδραστήρα με ροή νετρονίων $3 \cdot 10^{12} \text{ νετρ/cm}^2 \text{ s}$ για 10 min. Η ενεργός διατομή της αντίδρασης $^{48}\text{Ca}(n, \gamma) ^{49}\text{Ca}$ είναι 1,0 b και η αφθονία του ^{48}Ca στη φύση 0,187%.
β) Επαναλάβετε τον υπολογισμό για την περίπτωση που το ίδιο δείγμα CaO ακτινοβολείται σε επιταχυντή με 21 MeV δευτερόνια. Ως ρεύμα της δέσμης των δευτερονίων μπορεί να ληφθεί 10 μA (μικρο-αμπέρ). Η ενεργός διατομή της αντίδρασης $^{48}\text{Ca}(d, p) ^{49}\text{Ca}$ είναι 50 mb.
3. Πόσος θα είναι ο χρόνος ακτινοβόλησης ενός δείγματος 38,2 mg αλουμινίου που ακτινοβολείται σ' έναν αντιδραστήρα με ροή $2,5 \cdot 10^{13} \text{ νετρ/cm}^2 \text{ s}$. Η ενεργός διατομή της αντίδρασης $^{27}\text{Al}(n, \gamma) ^{28}\text{Al}$ είναι 0,23 b. Ο ρυθμός απαρίθμησης 5 min μετά την ακτινοβόληση χρησιμοποιώντας μια ανιχνευτική διάταξη με απόδοση 40% ήταν 6.800 min^{-1} ($t_{1/2}$ του ^{28}Al : 2,25 min, φυσική αφθονία του ^{27}Al : 100%).
4. Χρειάζεται να προσδιορισθεί η συγκέντρωση του λανθανίου σε ένα γεωλογικό δείγμα. Γι' αυτό το σκοπό, ακτινοβολήθηκε μια ποσότητα 22,4 g του δείγματος για 20 s σε πυρηνικό αντιδραστήρα με ροή νετρονίων $4 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Μετά την ακτινοβόληση το δείγμα μεταφέρθηκε σ' ένα σύστημα μέτρησης με απόδοση 19%. Ακριβώς 8 s μετά την ακτινοβόληση το δείγμα μετρήθηκε και βρέθηκε να παρουσιάζει ρυθμό απαρίθμησης 13.418 min^{-1} . Πόσο λανθάνιο περιείχε το δείγμα; Η πυρηνική αντίδραση που λαμβάνει χώρα είναι $^{139}\text{La}(n, \gamma) ^{140}\text{La}$ με ενεργό διατομή $\sigma = 9 \text{ b}$. Ο χρόνος υποδιπλασιασμού του ^{140}La είναι 40,3 ώρες και η αφθονία του ^{139}La στη φύση 99,91%.
5. Να υπολογισθεί η συγκέντρωση χρωμίου σε ένα δείγμα βάρους 28,2 g το οποίο ακτινοβολήθηκε για 120 s σε πυρηνικό αντιδραστήρα με ροή νετρονίων $2 \cdot 10^{14}$

$\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ μαζί με πρότυπο δείγμα βάρους 22,4 g περιεκτικότητας 60,2 mg/g σε χρώμιο. Μετά την ακτινοβολήση το δείγμα μεταφέρθηκε σ' ένα σύστημα μέτρησης και βρέθηκε να παρουσιάζει 2.900 διασπάσεις σε 10 min ενώ το πρότυπο δείγμα αντίστοιχα 310 διασπάσεις σε 15 min.

6. Γιατί, κατά τη γνώμη σας, ο προσδιορισμός ελαφρών στοιχείων με νετρονική ενεργοποίηση με θερμικά νετρόνια δεν είναι δυνατός;
7. Ποια πλεονεκτήματα προσφέρει η CPAA έναντι της NAA;
8. Βομβαρδίζεται ένα λεπτό μεταλλικό υμένιο, που περιέχει Co και Nb με σωματίδια-α ενέργειας 3,8 MeV. Η Η γωνία σκέδασης $\theta = 170^\circ$. Σε ποια ενέργεια θα εμφανισθεί στο φάσμα οπισθοσκέδασης Rutherford η υψηλοενεργειακή πλευρά (E_1) της κορυφής Co ($M_{\text{Co}} = 58,933 \text{ u}$) και του Nb ($M_{\text{Nb}} = 95,931 \text{ u}$);
9. Ποια είναι η τιμή της ενεργού διατομής για σκέδαση Rutherford σωματιδίων-α ενέργειας 3,8 MeV σε γωνία $\theta = 170^\circ$ του Υ ($M_{\text{Y}} : 88,906 \text{ u}$) και ποια των ιόντων άνθρακα-12 ($M_{\text{C}} : 12,011 \text{ u}$);
10. Ποια είναι τα πλεονεκτήματα της AMS στον προσδιορισμό του άνθρακα-14 σ' ένα δείγμα έναντι των άλλων μορφών φασματομετρίας μάζας;

Κεφάλαιο 11

Εφαρμογές των ραδιενεργών ισοτόπων και των ακτινοβολιών

Οι εφαρμογές των ραδιενεργών ισοτόπων και των ακτινοβολιών παρουσιάζουν για την ανθρωπότητα σημαντικότητα ίση, και ίσως μεγαλύτερη, από την πυρηνική ενέργεια. Σήμερα τα ραδιενεργά ισότοπα και οι ακτινοβολίες βρίσκουν μία πληθώρα εφαρμογών στη χημεία, γεωλογία, ιατρική και βιολογία καθώς επίσης στην τέχνη και αρχαιολογία. Στα πλαίσια αυτού του διδακτικού βιβλίου θα αναφερθούν μόνο μερικές χαρακτηριστικές εφαρμογές.

11.1 Εφαρμογές των ραδιενεργών ισοτόπων στη χημεία

11.1.1. Οι ραδιενεργοί ιχνηθέτες

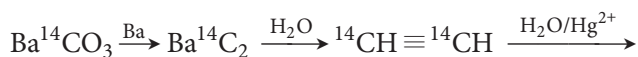
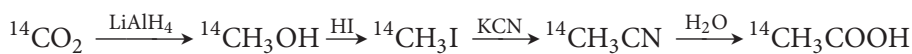
Μία συνηθισμένη διεργασία στη ραδιοχημεία είναι η χρησιμοποίηση ραδιενεργών **ιχνηθετών** (*tracers*), που μπορεί να έχουν φυσική προέλευση ή να παρασκευάζονται τεχνητά σε πυρηνικούς αντιδραστήρες και επιταχυντές σωματιδίων. Η χρήση των ιχνηθετών αναπτύχθηκε ήδη στο πρώτο μισό του προηγούμενου αιώνα από τον G. Hevesy, που τιμήθηκε με βραβείο Nobel Χημείας το 1943 για τη συνολική συνεισφορά του στη μελέτη μεταβολικών διεργασιών σε φυτά και ζώα χρησιμοποιώντας ραδιενεργά ισότοπα (π.χ. ^{212}Pb).

Με τον όρο **επισήμανση** (*labelling*) εννοείται η αντικατάσταση σε μία ένωση ενός σταθερού συστατικού στοιχείου της με ένα ραδιενεργό του ισότοπο (π.χ. η αντικατάσταση σε μια οργανική ένωση του ^{12}C με τον ραδιενεργό ^{14}C ή στην ανόργανη ένωση KMnO_4 , του $^{55}\text{Mn}^{7+}$ με $^{56}\text{Mn}^{7+}$). Κατ' αυτόν τον τρόπο είναι δυνατή η παρακολούθηση του μηχανισμού μίας χημικής αντίδρασης ή της πορείας μιας διεργασίας μεταφοράς μετρώντας την ακτινοβολία, που εκπέμπεται.

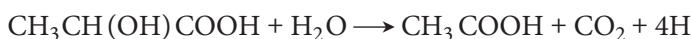
Για την επισήμανση των ενώσεων χρησιμοποιούνται τόσο οι μέθοδοι της κλασικής συνθετικής χημείας όσο και νεότερες τεχνικές, που αναπτύχθηκαν γι' αυτό

το σκοπό. Γενικά, η παρασκευή ανόργανων επισημασμένων ενώσεων δεν παρουσιάζει ιδιαίτερες δυσκολίες ενώ των οργανικών είναι πιο σύνθετη.

Παρόλο ότι η σύνθεση πολλών οργανικών ενώσεων επισημασμένων με ^{14}C ξεκινά με χρήση $\text{Ba}^{14}\text{CO}_3$ ως αρχική ύλη, η χρήση άλλων συνθετικών οδών πολλές φορές προτιμάται για την επιλογή του συγκεκριμένου ατόμου του άνθρακα, που θα αντικατασταθεί. Έτσι, για την παρασκευή $\text{CH}_3^{14}\text{COOH}$, $^{14}\text{CH}_3\text{COOH}$ και $^{14}\text{CH}_3^{14}\text{COOH}$ μπορεί κανείς να χρησιμοποιήσει αντιδράσεις όπως



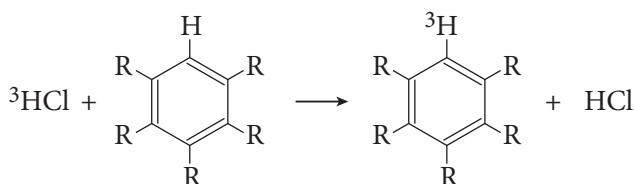
Για την παρασκευή πολύπλοκων επισημασμένων ενώσεων χρησιμοποιούνται, συχνά, βιοχημικές συνθέσεις, όπως η φωτοσύνθεση παρουσία $^{14}\text{CO}_2$ από την οποία προκύπτουν επισημασμένα σάκχαρα. Η βιοχημική επισήμανση δεν οδηγεί πάντοτε σε καθορισμένες θέσεις αντικατάστασης. Για την εξειδικευμένη βιοχημική επισήμανση μπορεί να χρησιμοποιηθούν επισημασμένα ενδιάμεσα προϊόντα του μεταβολισμού. Για παράδειγμα, αν τεθεί $^{14}\text{CO}_2$ στη διάθεση ενός βακίλου ο οποίος συνθέτει, σύμφωνα με τις παρακάτω εξισώσεις, από γαλακτικό βουτυρικό οξύ



τότε λαμβάνεται $^{14}\text{CH}_3^{14}\text{CH}_2^{14}\text{CH}_2^{14}\text{COOH}$. Αν πάλι προστεθεί $\text{CH}_3^{14}\text{COOH}$ τότε λαμβάνεται $\text{CH}_3^{14}\text{CH}_2\text{CH}_2^{14}\text{COOH}$, ενώ η προσθήκη $^{14}\text{CH}_3\text{COOH}$ οδηγεί στη σύνθεση $^{14}\text{CH}_3\text{CH}_2^{14}\text{CH}_2\text{COOH}$.

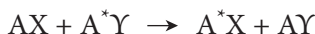
Η βιοχημική σύνθεση επιτρέπει την παρασκευή σακχάρων, βιταμινών, αμινοξέων, αδενοσίνου-τριφωσφορικού οξέος (ATP) κ.α. επισημασμένων με ^{14}C , ^{35}S ή ^{32}P . Η άγνωστη θέση επισήμανσης μιας ένωσης μπορεί να προσδιορισθεί με τη χημική της αποσύνθεση.

Πέρα από τις τεχνικές, που αναφέρθηκαν παραπάνω, η ισοτοπική ανταλλαγή, όπως για παράδειγμα η αντικατάσταση Η με τρίτιο



βρίσκει πολύ συχνά εφαρμογή στην επισήμανση τόσο ανόργανων όσο και οργανικών ενώσεων.

Στην ισοτοπική ανταλλαγή της οποίας η γενική μορφή δίνεται από τη σχέση



δε λαμβάνει χώρα καμιά χημική αντίδραση στο σύστημα. Έτσι, η διαφορά της ενθαλπίας είναι περίπου ίση με το μηδέν, ενώ η διαφορά της εντροπίας διάφορη του μηδενός. Η αντίδραση συνεχίζεται μέχρι την ισοκατανομή των ραδιενεργών ατόμων ή ομάδων ατόμων στα δύο είδη.

Οι ραδιενεργοί ιχνηθέτες βρίσκουν στη χημεία μια πληθώρα εφαρμογών όπως για παράδειγμα

- ▶ στον προσδιορισμό της διαλυτότητας δυσδιάλυτων ενώσεων (π.χ. αλογονιδίων του αργύρου σε υδατικό διάλυμα χλωριούχου νατρίου),
- ▶ στη μελέτη χημικών αντιδράσεων (π.χ. η διευκρίνιση του μηχανισμού της αλληλικής μετάθεσης χρησιμοποιώντας αλληλοφαινυλεστέρες επισημασμένους με ^{14}C),
- ▶ στη φαρμακολογία και τοξικολογία (π.χ. τη διευκρίνιση του μηχανισμού του μεταβολισμού διαφόρων ουσιών στους ζώντες οργανισμούς),
- ▶ στη μελέτη της συμπεριφοράς ανόργανων ενώσεων συναρμογής (π.χ. η ταχύτητα ανταλλαγής συναρμοστών),
- ▶ στην παρακολούθηση και μελέτη φαινομένων διάχυσης και αυτοδιάχυσης,
- ▶ στη χημική και βιοχημική ανάλυση (ανάλυση με ισοτοπική αραίωση, ραδιοανοσιο-αναλύσεις (*Radio-Immuno Assays*, RIA)).

11.1.2. Η ανάλυση με ισοτοπική αραίωση

Η **ανάλυση με ισοτοπική αραίωση** (*Isotope Dilution Analysis*, IDA) είναι μία αναλυτική τεχνική, που εφαρμόζεται σε περιπτώσεις όπου ο ποσοτικός διαχωρισμός ενός συστατικού του δείγματος είναι ιδιαίτερα δύσκολος ή χρονοβόρος. Η μέθοδος βασίζεται στην αρχή ότι η **ειδική ενεργότητα** (*specific activity*), SA, ενός μείγματος σταθερών και ραδιενεργών ατόμων δε μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια χημικών διεργασιών. Με τον όρο ειδική ενεργότητα χαρακτηρίζεται η ενεργότητα

ενός νουκλιδίου (A) ανά μονάδα μάζας (m)

$$SA = \frac{A}{m} \quad (11-1)$$

Στην ανάλυση με ισοτοπική αραίωση μια μικρή αλλά επακριβώς γνωστή ποσότητα ραδιενεργού ισotόπου ενός στοιχείου ή μιας ραδιενεργά επισημασμένης ένωσης προστίθεται στο διάλυμα με την άγνωστη ποσότητα του στοιχείου ή της ένωσης, των οποίων απαιτείται ο προσδιορισμός. Ο ραδιενεργός δείκτης (*spike*) μπορεί και να μην είναι το ίδιο στοιχείο ή ένωση με αυτό που θα προσδιορισθεί, αλλά να παρουσιάζει την ίδια συμπεριφορά στο διάλυμα κάτω από τις δεδομένες συνθήκες. Για παράδειγμα $^{131}\text{I}^-$ μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό Br^- . Μετά από ανάμιξη για να επιτευχθεί ομοιογενής κατανομή του δείκτη, διαχωρίζεται από το διάλυμα μία μικρή αλλά καθαρή ποσότητα του στοιχείου ή της ένωσης της οποίας απαιτείται ο προσδιορισμός. Λόγω της ομογενούς κατανομής, η ειδική ενεργότητα του δείκτη στην ποσότητα του δείγματος που διαχωρίστηκε (σε Bq/mg ή Bq/mmol) είναι ίση με αυτή στο μείγμα του με την άγνωστη ποσότητα του στοιχείου ή ένωσης, που προσδιορίζονται. Η μάζα και η ειδική ενεργότητα της ποσότητας που διαχωρίστηκε οδηγεί στον υπολογισμό της συγκέντρωσης του στοιχείου ή της ένωσης στο αρχικό μείγμα. Έτσι, αν m_a είναι η άγνωστη μάζα του συστατικού σ' ένα δείγμα, m_1 και A_1 η γνωστή μάζα και ενεργότητα του δείκτη και m_2 και A_2 η μάζα και η ενεργότητα του δείκτη στην ποσότητα που διαχωρίστηκε, ισχύει η σχέση

$$\frac{A_1}{m_a + m_1} = \frac{A_2}{m_2} \quad (11-2)$$

Από τη σχέση (11-2) προκύπτει η

$$m_a = \left(\frac{\frac{A_1}{m_1}}{\frac{A_2}{m_2}} - 1 \right) m_1 \quad (11-3)$$

Η ανάλυση με ισοτοπική αραίωση εφαρμόζεται και σε βιολογικά δείγματα εμπλουτισμένα με ^{13}C , ^{15}N , ^{18}O λόγω της απλότητας και του χαμηλού κόστους της. Παραλλαγές της μεθόδου βρίσκουν εφαρμογή στην κλινική χημεία (π.χ. ραδιοανοσιολογικοί προσδιορισμοί) καθώς επίσης, χρησιμοποιώντας σταθερούς ισοτοπικούς δείκτες, στη φασματοσκοπία μαζών και στη φασματοσκοπία επαγωγικά συζευγμένου πλάσματος (ICP).

11.3 Ραδιενεργά ισότοπα και ακτινοβολίες στην ιατρική και τις βιολογικές επιστήμες

Τα ραδιενεργά ισότοπα και οι ακτινοβολίες (ακτίνες-β, -γ και Χ) βρίσκουν ένα ευρύ πεδίο εφαρμογών στην πυρηνική ιατρική και στις βιολογικές επιστήμες. Οι εφαρμογές τους μπορούν να διακριθούν σε διαγνωστικές, θεραπευτικές και βιοχημικές.

Οι διαγνωστικές εφαρμογές, που περιλαμβάνουν την ακτινοδιαγνωστική με ή χωρίς χρήση ραδιοφαρμάκων, δίνουν τη δυνατότητα απεικόνισης οργάνων ή ιστών του σώματος και παρέχουν πληροφορίες για την ενδεχόμενη ύπαρξη παθολογικών καταστάσεων (π.χ. δυσλειτουργιών, αιματωμάτων, καρκινικών όγκων). Από την άλλη μεριά, οι θεραπευτικές εφαρμογές έχουν άμεση σχέση με την ακτινοθεραπεία, η οποία έχει ως στόχο την καταστροφή καρκινικών κυττάρων με εξωτερική (ηλεκτρόνια, ακτίνες-Χ ή φορτισμένα σωματίδια από επιταχυντές σωματιδίων) ή εσωτερική ακτινοβολήση. Τέλος, στις βιοχημικές εφαρμογές χρησιμοποιούνται ραδιενεργά νουκλίδια για φαρμακολογικές μελέτες και ραδιοανοσολογικές αναλύσεις [42].

11.3.1. Τα ραδιοφάρμακα: παρασκευή και χρήσεις

Τα **ραδιοφάρμακα** (*radiopharmaceuticals*) είναι φαρμακευτικά σκευάσματα που περιέχουν ένα ραδιενεργό άτομο και χρησιμοποιούνται για διαγνωστικούς και θεραπευτικούς σκοπούς. Η βασική διαφορά των ραδιοφαρμάκων από τα συνήθη (μη-ραδιενεργά) φάρμακα είναι η έλλειψη ή πολύ μικρή φαρμακολογική τους δράση. Η διαγνωστική και θεραπευτική δραστηριότητα αυτών των φαρμακευτικών σκευασμάτων οφείλεται αποκλειστικά στην ακτινοβολία του ραδιενεργού συστατικού τους.

Η επιλογή των ραδιενεργών νουκλιδίων των ραδιοφαρμάκων γίνεται με γνώμονα το είδος και την ενέργεια ακτινοβολίας που εκπέμπουν, καθώς επίσης τον χρόνο υποδιπλασιασμού τους.

Τα ραδιονουκλίδια που χρησιμοποιούνται στη διαγνωστική πρέπει, διασπώμενα με σύλληψη ηλεκτρονίου ή με ισομερή μετάπτωση, να εκπέμπουν αποκλειστικά ακτινοβολία-γ. Η εκπομπή ακτινοβολίας-α και -β είναι, λόγω της υψηλής τους γραμμικής μεταφοράς ενέργειας, ανεπιθύμητη. Η υψηλή γραμμική μεταφορά ενέργειας οδηγεί αφ' ενός στην ολική απορρόφηση της ακτινοβολίας από το σώμα του ασθενούς και την αυξημένη ραδιολογική του επιβάρυνση και αφ' ετέρου στην παρεμπόδιση της μέτρησης της ακτινοβολίας από εξωτερικούς ανιχνευτές. Η ιδανική για τη μέτρηση ενέργεια της ακτινοβολίας-γ είναι μεταξύ 100

και 250 keV, παρόλο ότι μερικά από τα νουκλίδια που χρησιμοποιούνται σε ραδιοφάρμακα εκπέμπουν ακτινοβολία εκτός αυτής της περιοχής (π.χ. το ^{201}Tl και το ^{133}Xe αντίστοιχα 70 και 80 keV ή το ^{67}Ga και το ^{131}I 300 και 354,5 keV). Ιδιαίτερα ενδιαφέροντα για την ιατρική διαγνωστική ραδιονουκλίδια είναι, από άποψη ενέργειας ακτινοβολίας, το $^{99\text{m}}\text{Tc}$ (140 keV), ^{111}In (171 και 245 keV) και το ^{123}I (159 keV).

Τα διαγνωστικά ραδιοφάρμακα πρέπει να περιέχουν νουκλίδια με σχετικά μικρό χρόνο υποδιπλασιασμού (< 1 ημέρα) αλλά και να έχουν **αποτελεσματικό χρόνο υποδιπλασιασμού** (*effective half-life*, $t_{1/2(\text{αποτ})}$) περίπου 1,5 φορές μεγαλύτερο από τη διάρκεια της διαγνωστικής διαδικασίας. Αυτό παρέχει ένα λογικό συμβιβασμό μεταξύ της δόσης της ακτινοβολίας, που λαμβάνει ο ασθενής, και της ποσότητας του ραδιοφαρμάκου η οποία θα απαιτηθεί για την επίτευξη μέτρησης με καλή στατιστική. Ο αποτελεσματικός χρόνος υποδιπλασιασμού δίνεται από τη σχέση

$$\frac{1}{t_{1/2(\text{αποτ})}} = \frac{1}{t_{1/2(\text{φυσ})}} + \frac{1}{t_{1/2(\text{βιολ})}} \quad (11-6)$$

όπου $t_{1/2(\text{αποτ})}$ και $t_{1/2(\text{βιολ})}$, είναι αντίστοιχα ο αποτελεσματικός και βιολογικός χρόνος υποδιπλασιασμού του ραδιοφαρμάκου και $t_{1/2(\text{φυσ})}$, ο φυσικός χρόνος υποδιπλασιασμού του ραδιονουκλιδίου που περιέχει. Το 95% των ραδιοφαρμάκων, που χρησιμοποιούνται στην πυρηνική ιατρική, αποσκοπούν στη διάγνωση.

Σε αντίθεση με τα διαγνωστικά, τα θεραπευτικά ραδιοφάρμακα σχεδιάζονται κατά τέτοιον τρόπο ώστε να καταστρέφουν καρκινικά κύτταρα. Τα περισσότερα ραδιονουκλίδια, που χρησιμοποιούνται γι' αυτό το σκοπό, εκπέμπουν αποκλειστικά ακτινοβολία-β⁻ μέγιστης ενέργειας (E_{max}) μεγαλύτερης από 1 MeV. Σωματίδια-α δεν βρίσκουν ιδιαίτερες εφαρμογές στη θεραπευτική λόγω της πολύ μικρής εμβέλειάς τους στους βιολογικούς ιστούς. Σ' ορισμένες περιπτώσεις χρησιμοποιούνται στη ραδιοθεραπεία και νουκλίδια που εκπέμπουν ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία παρόλο ότι η καταστροφική της ικανότητα είναι σαφώς μικρότερη από αυτή των σωματιδίων-β⁻. Επειδή τα θεραπευτικά αποτελέσματα της ακτινοβολίας πρέπει να ακολουθούν άμεσα τη θεραπεία, ο αποτελεσματικός χρόνος υποδιπλασιασμού των θεραπευτικών ραδιοφαρμάκων πρέπει να είναι της τάξης των μερικών ωρών ή ημερών, αλλά όχι πολύ μεγαλύτερος. Κλασικά παραδείγματα είναι η χρήση του ^{131}I ($t_{1/2(\text{αποτ})} = 6$ ημέρες) για τη θεραπεία του υπερθυρεοειδισμού ή του ^{166}Ho -FHMA ($t_{1/2(\text{αποτ})} = 1,2$ ημέρες) στη θεραπεία αρθρίτιδων.

Ένας άλλος παράγοντας, που λαμβάνεται υπόψη στο σχεδιασμό ενός ραδιοφαρμάκου είναι ο λόγος συσσώρευσής του στο στόχο όργανο σε σχέση με τους γειτονικούς ιστούς. Ο λόγος αυτός πρέπει να είναι αρκετά μεγάλος ώστε να επιτρέπει, στην περίπτωση ενός διαγνωστικού ραδιοφαρμάκου, την αξιόπιστη διά-

κριση της παθολογικής κατάστασης του οργάνου ή, στην περίπτωση ενός θεραπευτικού, την αποτελεσματική θεραπεία με τη μικρότερη δυνατή ραδιολογική επιβάρυνση ή καταστροφή γειτονικών ιστών.

Τέλος, για εργαστηριακές φαρμακολογικές μελέτες, *in-vitro* πειράματα και ραδιοανοσιολογικούς προσδιορισμούς, χρησιμοποιούνται, συνήθως, ραδιονουκλίδια που εκπέμπουν χαμηλής ενέργειας ακτινοβολία-β.

Η παρασκευή των ραδιοφαρμάκων

Η παρασκευή των ραδιοφαρμάκων αποτελείται από δύο βασικά στάδια, την επιλογή και παραγωγή του κατάλληλου ραδιονουκλιδίου και την μετατροπή του στην επιθυμητή μορφή για τη χρησιμοποίησή του.

Τα ραδιονουκλίδια παράγονται με πυρηνικές αντιδράσεις σε πυρηνικούς αντιδραστήρες και σε επιταχυντές σωματιδίων (κυρίως κύκλοτρα) χρησιμοποιώντας για την ακτινοβολήση, ως στόχο, σταθερά νουκλίδια. Επίσης, ορισμένα ραδιονουκλίδια για φαρμακευτική χρήση προέρχονται και από τη σχάση του ^{235}U σε πυρηνικούς αντιδραστήρες. Στους Πίνακες 11-1 και 11-2 δίνονται αντίστοιχα τα κυριότερα ραδιονουκλίδια, που παράγονται σε πυρηνικούς αντιδραστήρες και σε κύκλοτρα μαζί με τις διαγνώστικές και θεραπευτικές τους εφαρμογές.

Από όλα αυτά τα ραδιονουκλίδια μεγαλύτερη εφαρμογή στην πράξη βρίσκουν το $^{99\text{m}}\text{Tc}$, που παράγεται από τη διάσπαση του ^{99}Mo σε γεννήτριες ισotόπων και τα ισotόπα του ιωδίου (^{123}I και ^{131}I). Μεγάλο ενδιαφέρον παρουσιάζει επίσης τα τελευταία χρόνια η χρησιμοποίηση του ^{18}F καθώς και μερικών άλλων βραχύβιων β $^{+}$ -ραδιονουκλιδίων (π.χ. ^{11}C , ^{13}N , ^{15}O) για εξετάσεις με **τομογραφία εκπομπής ποζιτρονίων** (*Positron Emission Tomography*, PET).

Το ^{123}I παράγεται σε κύκλοτρα σύμφωνα με την πυρηνική αντίδραση $^{124}\text{Te}(p,n)^{123}\text{I}$ χρησιμοποιώντας ως στόχο TeO_2 εμπλουτισμένο σε ^{124}Te (φυσική αφθονία ^{124}Te : 4,82%), ενώ το ^{131}I από τη σχάση του ^{235}U (απόδοση σχάσης για $A = 131$: 2,879 %). Το ^{18}F λαμβάνεται με βομβαρδισμό H_2^{18}O με πρωτόνια σε κύκλοτρα χρησιμοποιώντας την πυρηνική αντίδραση $^{18}\text{O}(p,n)^{18}\text{F}$.

Τα ραδιονουκλίδια, που προορίζονται για φαρμακευτική χρήση διαχωρίζονται από τον στόχο παραγωγής τους με διάλυση, καταβύθιση, εκχύλιση, απόσταξη ή με κάποια άλλη τεχνική. Η ενσωμάτωση των ραδιονουκλιδίων σε μία χημική ένωση για ραδιοφαρμακευτική χρήση μπορεί να γίνει, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, με χημική σύνθεση, βιοσύνθεση ή με αντιδράσεις ανταλλαγής.

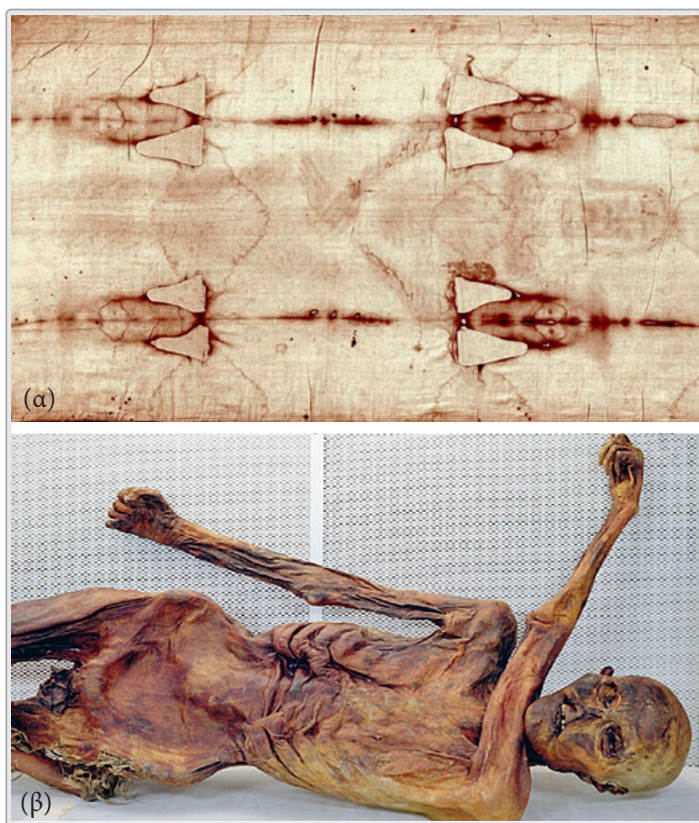
11.6 Οι ακτινοβολίες στην υπηρεσία της αρχαιολογίας και της τέχνης

11.6.1. Η ραδιοχρονολόγηση στην αρχαιολογία

Μέχρι τα μέσα του προηγούμενου αιώνα οι αρχαιολόγοι βασιζόταν για τον υπολογισμό της ηλικίας ενός ευρήματος σε τυπολογικές συγκρίσεις και σε γραπτά κείμενα (π.χ. επιγραφές τάφων, λίστες ιερών και κρατικών αξιωματούχων, χρονικά, αστρονομικές παρατηρήσεις). Αυτά τα κείμενα ήταν πολλές φορές δύσκολα να ερμηνευθούν γιατί οι συγγραφείς δεν είχαν ως κύριο στόχο την καταγραφή ιστορικών δεδομένων. Τα προβλήματα αυτά έλυσε η ραδιοχρονολόγηση με άνθρακα-14. Η τεχνική αυτή, που παρουσιάστηκε λεπτομερέστερα σε προηγούμενη παράγραφο αυτού του κεφαλαίου (11.3.1), επιτρέπει σήμερα τη χρονολόγηση δειγμάτων ηλικίας μέχρι περίπου 50.000 ετών.

Με τη μέθοδο του άνθρακα-14 χρονολογήθηκε μία πληθώρα αρχαιολογικών ευρημάτων οργανικής προέλευσης (π.χ. μούμιες, πάπυροι, χειρόγραφα, οστά, σκελετοί κ.λπ.) που οδήγησαν σε ιδιαίτερα ενδιαφέροντα ιστορικά αλλά και ανθρωπολογικά συμπεράσματα (π.χ. μετακινήσεις πληθυσμών, διατροφικές συνήθειες, χρονολόγηση καταστροφών κ.λπ.). Η χρονολόγηση πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας την ακτινοβολία-β, που εκπέμπεται από τον άνθρακα-14 ή, με ακόμη μεγαλύτερη ακρίβεια, φασματοσκοπία μαζών σε επιταχυντές σωματιδίων (AMS). Η ύπαρξη στην περιοχή του Μlader (Τσεχία) οργανωμένων ανθρωπίνων οικισμών πριν περίπου 31.000 χρόνια, η ανακάλυψη επεξεργασμένου καλαμποκιού (κάτι σαν το σημερινό popcorn) στη διατροφή των κατοίκων του Περού πριν 6.700 χρόνια καθώς επίσης η χρονολόγηση της **σινδόνης του Τορίνο** (*Shroud of Turin*) και ο προσδιορισμός της ηλικίας του **ανθρώπου των παγετώνων των Άλπεων** (*Ötzi*) είναι απλά μόνο τέσσερα ενδιαφέροντα παραδείγματα από τις χιλιάδες μελέτες που πραγματοποιήθηκαν με αυτή την τεχνική.

Η μελέτη της περίφημης σινδόνης του Τορίνου (*Σχήμα 1-26α*), που ακόμα πιστεύεται ότι αποτελεί το νεκρικό σάβανο του Χριστού, πραγματοποιήθηκε ήδη το 1988 από τρία εξειδικευμένα σε AMS εργαστήρια (ETH Zürich, University of Oxford, University of Arizona) και έδειξε, με βεβαιότητα >95%, ότι είναι μεσαιωνική (1260-1390 μ.Χ.). Τα δεδομένα αυτά συμπίπτουν και με τον χρόνο εμφάνισης του κειμηλίου (1350 μ.Χ.). Για τον έλεγχο της αξιοπιστίας των μετρήσεων χρησιμοποιήθηκαν τρία προχρονολογημένα υλικά (ένα κομμάτι νουβιακού λινού υφάσματος του 11^{ου}-12^{ου} μ.Χ. αιώνα, λινό ύφασμα από τη μούμια της Κλεοπάτρας των Θηβών από τον 2^ο μ.Χ. αιώνα και ίνες από το κάλυμμα της κεφαλής του St. Louis d' Anjou (1290-1310 μ.Χ.)). Οι μετρήσεις υπήρξαν και συνεχίζουν να είναι αντικείμενο επισημονικής και θεολογικής διαμάχης [55, 56]. Από την άλλη πλευρά, χαρακτηριστική είναι η διαφορά της ηλικίας, που προέκυψε από τη χρονολόγηση του ανθρω-

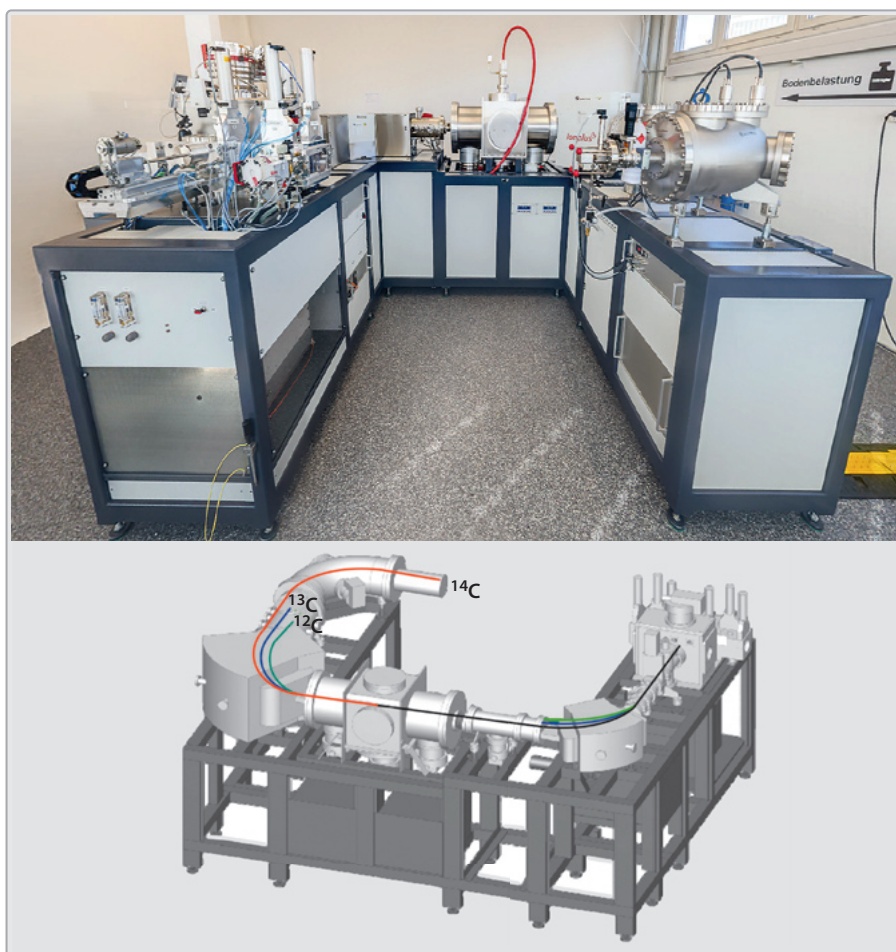


Σχήμα 11-26: Η σινδόνη του Τορίνο (α) και φωτογραφία του ανθρώπου των παγετώνων των Άλπεων (β).

που των παγετώνων των Άλπεων χωρίς και με δένδροχρονολογική διόρθωση. Η ηλικία του μομοποιημένου αυτού ανθρώπου (Σχήμα 11-26β), που βρέθηκε στην Ötztal της Ελβετίας το 1991, προσδιορίστηκε το 2016 με AMS. Το αποτέλεσμα της χρονολόγησης ήταν, χωρίς τη δένδροχρονολογική διόρθωση, 4550 ± 27 BP [BP: before present, δηλ. χρόνια πριν το 1950 ($4550 - 1950 = 2600$ π.Χ.)] ενώ με τη διόρθωση περίπου 650 χρόνια μεγαλύτερο (~ 3250 π.Χ.) [57].

Η ανάπτυξη μικρών (χαμηλής τάσης) επιταχυντών αποκλειστικά κατάλληλων για τον προσδιορισμό άνθρακα-14 με AMS (Σχήμα 11-27) κατέστησαν την τεχνική πιο προσιτή και μείωσε αισθητά το κόστος των χρονολογήσεων (συχνά κάτω των 500 €).

Στην Ελλάδα λειτουργεί μόνο ένα εργαστήριο ραδιοχρονολόγησης στο Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. Δημόκριτος. Στο εργαστήριο αυτό, χρησιμοποιώντας μέτρηση της ακτινοβολίας-β του άνθρακα-14 με διάταξη αναλογικού απαριθμητή, χρονολογήθηκαν εκατοντάδες αρχαιολογικά δείγματα των οποίων η ηλικία φθάνει και στην πρώιμη νεολιθική εποχή (μέχρι την 7^η χιλιετία π.Χ.) αλλά και όστρακα από ανασκαφές. Εγκατάσταση AMS δεν υπάρχει στην Ελλάδα.



Σχήμα 11-27: Επιταχυντής με διάταξη AMS (MICADAS 0,2 MV, Ionplus AG).

Πυρηνικές αντιδράσεις με σωματίδια, που προέρχονται από επιταχυντές σωματιδίων, μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για τη χρονολόγηση ανόργανων υλικών, όπως, για παράδειγμα ύαλοι και οψιδιανός. Ο υπολογισμός της ηλικίας τους πραγματοποιείται λαμβάνοντας υπόψη τη μείωση της συγκέντρωσης νατρίου στην επιφάνειά τους και τον εμπλουτισμό της σε υδρογόνο. Ο προσδιορισμός του νατρίου και του υδρογόνου στα επιφανειακά στρώματα των υλικών πραγματοποιείται με τη βοήθεια των πυρηνικών αντιδράσεων $^{23}\text{Na}(p,\alpha)^{20}\text{Ne}$ και $^1\text{H}(^{15}\text{N},\alpha)^{12}\text{C}$ [58]. Η σε βάθος κατανομή των δύο αυτών στοιχείων παρέχει πληροφορίες για την ηλικία των δειγμάτων αλλά και αποκαλύπτει ενδεχόμενες απομιμήσεις.

Τέλος, η **θερμοφωταύγεια** (*thermoluminescence*), που ήδη αναφέρθηκε προηγουμένως, χρησιμοποιείται επίσης ευρύτατα για τη χρονολόγηση κεραμικών.

11.6.2. Τα νετρόνια στην υπηρεσία της τέχνης

Οι εμπορικές διασυνδέσεις μεταξύ των λαών μπορούν να δώσουν στον ιστορικό πολύτιμες πληροφορίες για το πολιτισμικό, οικονομικό και τεχνολογικό επίπεδο των διαφόρων περιοχών. Η στοιχειακή χημική ανάλυση των διαφόρων ευρημάτων μπορεί, πέρα από την αποκάλυψη απομιμήσεων, πλαστογραφιών και στυλιστικών αντιγραφών, να δώσουν πληροφορίες για την προέλευση των διαφόρων αντικειμένων και των υλικών κατασκευής. Οι μέθοδοι της ανάλυσης, που χρησιμοποιούνται γι' αυτό το σκοπό, πρέπει να είναι ευαίσθητες, να παρέχουν μεγάλη ακρίβεια προσδιορισμού και να απαιτούν ελάχιστη ποσότητα δείγματος, ώστε να μην καταστρέφονται ή βλάπτονται πολύτιμα αντικείμενα. Η ανάλυση με νετρονική ενεργοποίηση εξακολουθεί να είναι μία από τις τεχνικές που παρέχουν αυτά τα πλεονεκτήματα.

Με την ανάλυση με νετρονική ενεργοποίηση έχει γίνει ένας πολύ μεγάλος αριθμός μελετών για την προέλευση κεραμικών, λίθων και αρχαιολογικών ευρημάτων με βάση τη διαφορετική σύσταση των υλικών της περιοχής προέλευσής τους. Η τεχνική αυτή, για παράδειγμα, συνέβαλε στην αποκάλυψη ότι οι μεγάλοι του Stonehenge (~2300 π.Χ., Ν. Αγγλία) προέρχονται από περιοχή της Ουαλίας, που βρίσκεται περ. 240 χιλιόμετρα μακριά (Σχήμα 11-28α). Ο τρόπος μεταφοράς αυτών των μεγαλίθων δεν έχει αποσαφηνιστεί ακόμη. Με την ίδια τεχνική επιβεβαιώθηκε, συγκρίνοντας την περιεκτικότητα σε κοβάλτιο και σίδηρο, ότι οι μονόλιθοι βάρους 70 τόνων των αγαλμάτων του Φαραώ Αμενόφης ΙΙΙ (περ. 2500 π.Χ.) στην περιοχή των Θηβών (Ανω Αίγυπτος) προέρχονται από την περιοχή της Μέμφιδος (σημερινό Κάιρο) και μεταφέρθηκαν με πλοίο 600 χιλιόμετρα αντίθετα στο ρεύμα του Νείλου (Σχήμα 11-28β) [59].



Σχήμα 11-28α: Οι μονόλιθοι του Stonehenge.

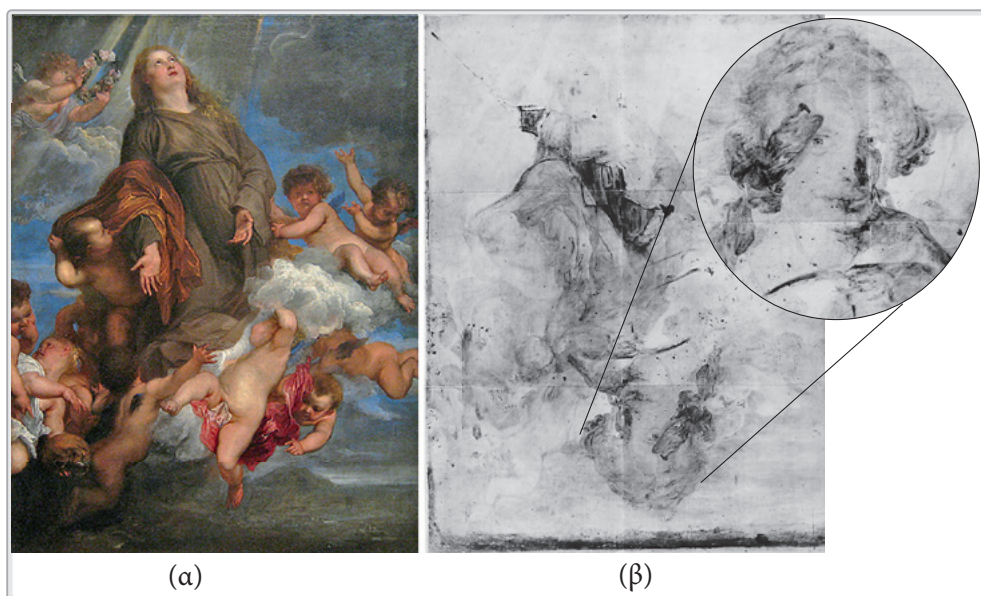
Σχήμα 11-28β:
Τα μονολιθικά
αγάλματα του
Φαραώ Αμενόφης III.



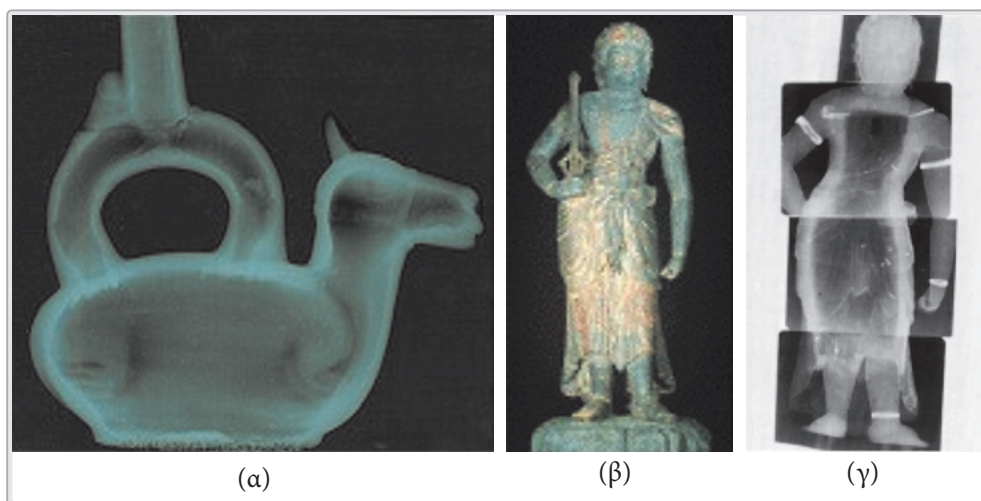
Μία άλλη μορφή νετρονικής ενεργοποίησης αποτελεί και η **νετρονική ραδιογραφία** (*neutron radiography*) κατά την οποία πίνακες εκτίθενται για μικρό χρονικό διάστημα σε δέσμη νετρονίων. Τα νετρόνια καθιστούν ορισμένα συστατικά των πινάκων (π.χ. το φωσφόρο, που υπάρχει στο κάρβουνο σχεδίασης οργανικής προέλευσης ή το χαλκό και το κοβάλτιο, που είναι συστατικά χρωστικών) ραδιενεργά. Η κάλυψη, μετά την έκθεση σε νετρόνια, του πίνακα με φωτογραφικό φιλμ μπορεί να επιφυλάξει, σε πολλές περιπτώσεις, εκπλήξεις. Όπως, για παράδειγμα, κάτω από τον πίνακα του Α. V. Dyck “*Η Αγία Ροζαλία προσεύχεται για το Παλέρμο που χτυπήθηκε από τη χολέρα το 1624*” κρυβόταν μία αυτοπροσωπογραφία του ζωγράφου (Σχήμα 11-29).

11.6.3. Η μελέτη των υλικών και ο έλεγχος της αυθεντικότητας

Σημαντικότερη είναι η συνεισφορά των ακτινοβολιών και των πυρηνικών μεθόδων ανάλυσης στη μελέτη, συντήρηση και τον έλεγχο της αυθεντικότητας έργων τέχνης [60]. Πέρα από τη φωτογραφία με διάφορα είδη φωτός (π.χ. ορατό, ψυχρό, υπέρυθρο, υπεριώδες), που μπορεί να αποκαλύψει ατέλειες, προηγούμενες επεμβάσεις συντήρησης, ή ακόμη και ολόκληρα έργα κάτω από πίνακες, η ραδιογραφία ακτίνων-Χ αποτελεί πολύτιμο εργαλείο για τη μελέτη έργων ζωγραφικής αλλά και συμπαγών ή κοίλων μουσειακών αντικειμένων. Με τεχνικές ακτίνων-Χ είναι δυνατή η αποκάλυψη ατελειών του υλικού (ρωγμές, ανομοιογένειες) και η λήψη πληροφοριών για τον τρόπο και την τεχνολογία κατασκευής του αντικειμένου (Σχήμα 11-30).



Σχήμα 11-29: (α) A. V. Dyck "Η Αγία Ροζαλία προσεύχεται για το Παλέρμο που χτυπήθηκε από τη χολέρα το 1624" και (β) η αυτοπροσωπογραφία του ζωγράφου, που κρυβόταν κάτω από την επιφάνεια του πίνακα [61].



Σχήμα 11-30: Ραδιογραφική εξέταση κεραμικών: (α) Ρωγμές και ανομοιογένεια προ-ισπανικού κεραμικού [62], (β, γ) Μελέτη σύνδεσης των τμημάτων και επεμβάσεων σε ιαπωνικό κεραμικό αγαλματίδιο (Fudo Myoo).

Ραδιενέργεια στο περιβάλλον και τα τρόφιμα

Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενα κεφάλαια, ο άνθρωπος είναι διαρκώς εκτεθειμένος σε ακτινοβολία από φυσικές και τεχνητές ραδιενεργές πηγές.

Οι φυσικές πηγές περιλαμβάνουν την ακτινοβολία, που προέρχεται από τη γη και το σύμπαν ενώ οι τεχνητές, αυτήν που προέρχεται από ανθρώπινες δραστηριότητες και μεταξύ αυτών την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας καθώς επίσης και τις δοκιμές πυρηνικών όπλων.

Η μελέτη της συμπεριφοράς των ραδιενεργών νουκλιδίων στο περιβάλλον επικεντρώνεται στη **βιόσφαιρα**, (*biosphere*), όπου υπάρχει και η ζωή στον πλανήτη μας. Η βιόσφαιρα αποτελείται από ένα τμήμα της ατμόσφαιρας, από το εξωτερικό στρώμα του φλοιού της γης και σχεδόν ολόκληρη την υδρόσφαιρα.

12.1 Η φυσική ακτινοβολία

Με τον όρο φυσική ακτινοβολία χαρακτηρίζεται η κοσμική ακτινοβολία και αυτή που προέρχεται από τη διάσπαση προκοσμιαίων και κοσμογενών ραδιονουκλιδίων στο περιβάλλον. Η έκθεση σ' αυτήν μπορεί να είναι τόσο εξωτερική όσο και εσωτερική.

Τα προκοσμιαία ραδιονουκλίδια υπάρχουν από τότε που δημιουργήθηκε το σύμπαν και έχουν σχεδόν όλα χρόνους υποδιπλασιασμού της τάξης των χιλιάδων εκατομμυρίων χρόνων, ενώ τα κοσμογενή παράγονται συνεχώς από την κοσμική ακτινοβολία με πυρηνικές αντιδράσεις.

Τα περισσότερα ραδιενεργά νουκλίδια στο περιβάλλον αποτελούν μέλη των φυσικών σειρών με μητρικά νουκλίδια το θόριο και το ουράνιο. Υπολογίζεται ότι οι ραδιενεργές σειρές του θορίου και ουρανίου συνεισφέρουν στην ακτινοβολία περιβάλλοντος με δόσεις περίπου 0,14 και 0,10 mSv/y αντίστοιχα. Πολύ υψηλότερες δόσεις ακτινοβολίας παρατηρούνται σε ορισμένες περιοχές της γης με μεγάλη περιεκτικότητα του εδάφους σε θοριούχα και ουρανιούχα ορυκτά και πετρώ-

ματα. Χαρακτηριστικά είναι τα παραδείγματα της Kerala και Tamil Nadu στην Ινδία, των ακτών των πολιτειών Espirito Santo και Rio de Janeiro στη Βραζιλία και του Ramsar στο Ιράν, των οποίων οι πληθυσμοί είναι εκτεθειμένοι σε δόσεις ακτινοβολίας μέχρι και εκατοντάδων mSv/y.

Εκτός από το ^{232}Th και ^{238}U , που είναι μητρικά νουκλίδια των αντίστοιχων φυσικών ραδιενεργών σειρών, συναντώνται στο περιβάλλον άλλα 16 νουκλίδια με χρόνο υποδιπλασιασμού, για τα περισσότερα από αυτά, μεγαλύτερο από την ηλικία της γης (Πίνακας 12-1). Από αυτά τα προκοσμία ραδιονουκλίδια μόνο το ^{40}K και το ^{87}Rb παρουσιάζουν ραδιολογικό ενδιαφέρον ενώ μερικά από αυτά χρησιμοποιούνται και για χρονολογήσεις γεωλογικών σχηματισμών (βλ. Κεφάλαιο 11.4).

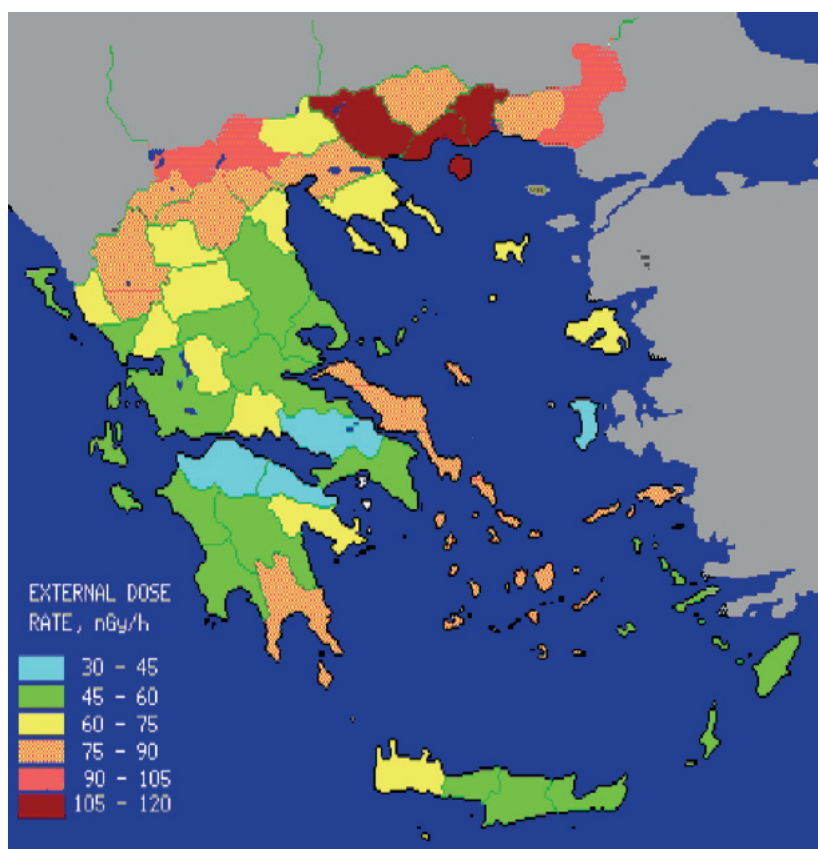
Πίνακας 12.1: Τα προκοσμία ραδιονουκλίδια και ο χρόνος υποδιπλασιασμού τους [67].

Νουκλίδιο	Χρόνος υποδιπλασιασμού, $t_{1/2}$ (χρόνια)	Νουκλίδιο	Χρόνος υποδιπλασιασμού, $t_{1/2}$ (χρόνια)
K-40	$1,3 \cdot 10^9$	Gd-152	$1,1 \cdot 10^{14}$
Rb-87	$4,9 \cdot 10^{10}$	Lu-176	$3,8 \cdot 10^{10}$
In-115	$4,4 \cdot 10^{14}$	Hf-174	$2 \cdot 10^{15}$
Te-128	$2,2 \cdot 10^{24}$	Re-187	$4,1 \cdot 10^{10}$
Te-130	$8,2 \cdot 10^{20}$	Os-186	$2 \cdot 10^{15}$
La-138	$1,0 \cdot 10^{11}$	Pt-190	$6,5 \cdot 10^{11}$
Nd-144	$2,3 \cdot 10^{15}$	Pb-204	$1,4 \cdot 10^{17}$
Sm-147	$1,1 \cdot 10^{11}$	Th-232	$1,41 \cdot 10^{10}$
Sm-148	$7 \cdot 10^{15}$	U-238	$4,46 \cdot 10^9$

Το ^{235}U ($t_{1/2} = 7,04 \cdot 10^5$ χρόνια), που είναι το μητρικό νουκλίδιο της φυσικής ραδιενεργού σειράς του ακτινίου ($A = 4n + 3$), δεν θεωρείται προκοσμία γιατί προήλθε από τη σύλληψη νετρονίων από το ^{238}U .



Η εξωτερική δόση από την έκθεση στην ακτινοβολία των φυσικών ραδιονουκλιδίων διαφέρει ανάλογα με την ορυκτολογική σύσταση του εδάφους και την παρουσία καλιούχων, ουρανιούχων και θοριούχων ορυκτών. Στον Πίνακα 12-2 δίνονται ενδεικτικές τιμές ειδικής ενεργότητας (Bq/kg) του ^{40}K , ^{238}U και ^{232}Th μερικών πετρωμάτων ενώ στο Σχήμα 12-1, η δόση από φυσική ακτινοβολία στις διάφορες περιοχές της Ελλάδας.



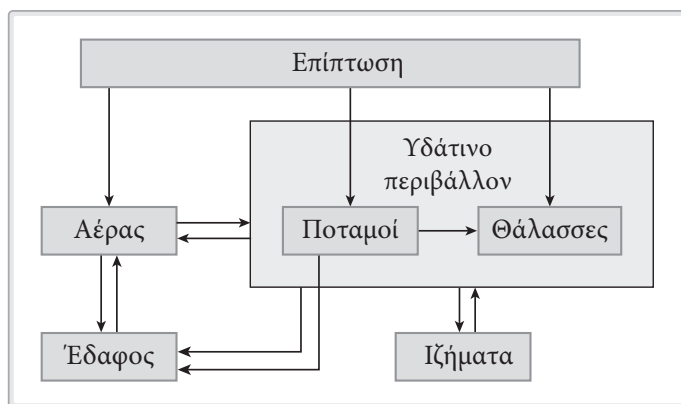
Σχήμα 12-1: Εξωτερική δόση από φυσική ακτινοβολία στην Ελλάδα σε nGy/h (Πηγή: Εργαστήριο Ραδιενέργειας Περιβάλλοντος, Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. Δημόκριτος).

Πίνακας 12-2: Ενδεικτικές τιμές ειδικής ενεργότητας (Bq/kg) του ^{40}K , ^{238}U και ^{232}Th σε διάφορα πετρώματα [68].

Πέτρωμα	Ειδική ενεργότητα (Bq/kg)		
	K-40	U-238	Th-232
Γρανίτης	1.000	60	80
Διορίτης	700	20	30
Βασάλτης	250	10	10
Ασβεστόλιθος	90	30	7
Ψαμμίτης	350	20	10
Αργιλικός σχιστόλιθος	700	40	50

12.3 Η μεταφορά των ραδιονουκλιδίων στο γήινο περιβάλλον

Η μεταφορά των προϊόντων της σχάσης, που απελευθερώνονται στην ατμόσφαιρα από δοκιμές οπλικών συστημάτων και πυρηνικά ατυχήματα, πραγματοποιείται μέσω της προσάρτησής τους σε αερολύματα, σχηματισμού ραδιενεργού νέφους και, τελικά, κατακρήμνισής τους στη γη. Η μεταφορά αυτή των ραδιονουκλιδίων εξαρτάται από τον χρόνο υποδιπλασιασμού τους, την κατεύθυνση και ταχύτητα των αέριων ρευμάτων και τις καιρικές συνθήκες. Κατά τον ίδιο, περίπου, τρόπο διακινούνται και τα περισσότερα κοσμογενή ραδιονουκλίδια. Κάποια ιδιαιτερότητα παρουσιάζει η μεταφορά του άνθρακα-14 και του τριτίου, που, μετά την παραγωγή τους, μετατρέπονται, το πρώτο, σε $^{14}\text{CO}_2$ και το δεύτερο, κυρίως, σε τριτιωμένο ύδωρ (ΗΤΟ) και εισέρχονται με ανταλλαγή στη βιόσφαιρα. Στο Σχήμα 12-7 δίνεται γραφικά η αλληλεπίδραση των ραδιονουκλιδίων με το έδαφος και το υδάτινο περιβάλλον.

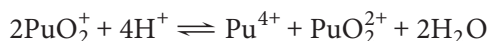
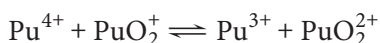
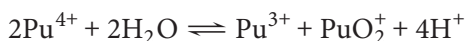


Σχήμα 12-7: Αλληλεπίδραση των ραδιονουκλιδίων με το έδαφος και το υδάτινο περιβάλλον.

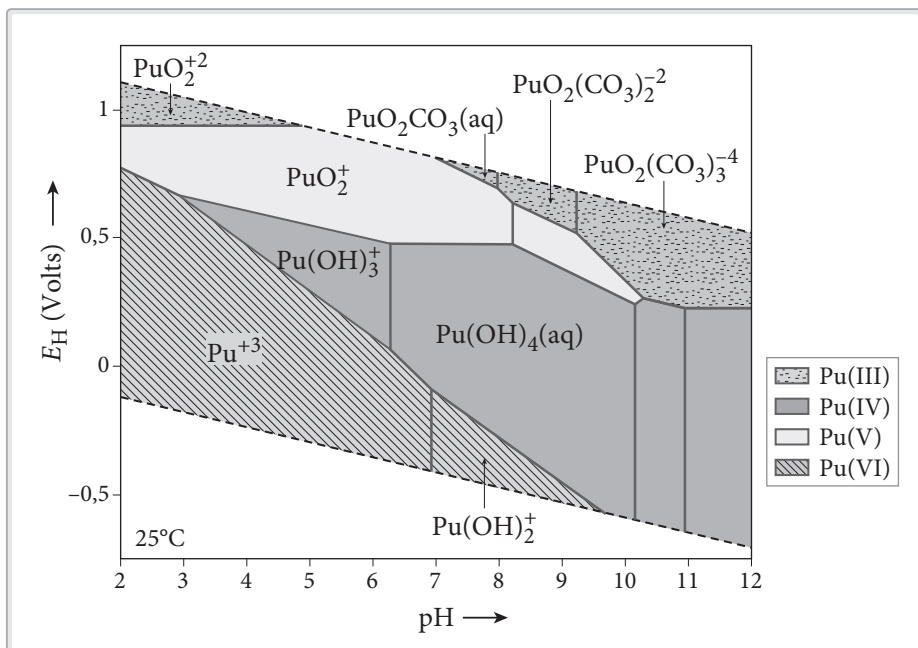
Η **μετακίνηση** (*migration*) των ραδιονουκλιδίων στο έδαφος πραγματοποιείται, όπως και των άλλων ρυπαντών, μέσω των υδατινών οδών και είναι ιδιαίτερα πολύπλοκη γιατί εξαρτάται τόσο από τις χημικές ιδιότητες των στοιχείων, στα οποία ανήκουν, όσο και από τις ορυκτολογικές, γεωχημικές, θερμικές, υδραυλικές και μηχανικές ιδιότητες των ορυκτών και πετρωμάτων με τα οποία έρχονται σε επαφή. Γενικά, κατά τη μετακίνηση των ραδιονουκλιδίων λαμβάνει χώρα μία σειρά διεργασιών που εξαρτώνται από τη συγκέντρωσή τους, το pH, τη θερμοκρασία, την πίεση καθώς επίσης και από την παρουσία ανόργανων και οργανικών ανταγωνιστικών ιόντων, κολλοειδών και μικροβίων. Ανάμεσα σ' αυτές τις διεργασίες μπορεί κανείς να διακρίνει την **οξειδοαναγωγή** (*redox reactions*), τη **συμπλο-**

κοποίηση (*complexation*) και τη **ρόφηση** (*sorption*). Ο ευρύς όρος ρόφηση περιλαμβάνει την **προσρόφηση** (*adsorption*), **απορρόφηση/ιονταναλλαγή** (*absorption/ion exchange*), **βιορρόφηση/βιοσυσώρευση** (*biosorption/bioaccumulation*) και **επιφανειακή κατακρήμνιση** (*surface precipitation*).

Με αντιδράσεις οξειδο-αναγωγής μεταβάλλεται η οξειδωτική κατάσταση των ραδιονουκλιδίων, οδηγώντας στην επίτευξη καταστάσεων ισορροπίας μεταξύ ιοντικών ειδών σε διαλύματα. Για παράδειγμα, κατά την οξειδο-αναγωγή του πλουτωνίου σε όξινα διαλύματα λαμβάνουν χώρα αντιδράσεις όπως

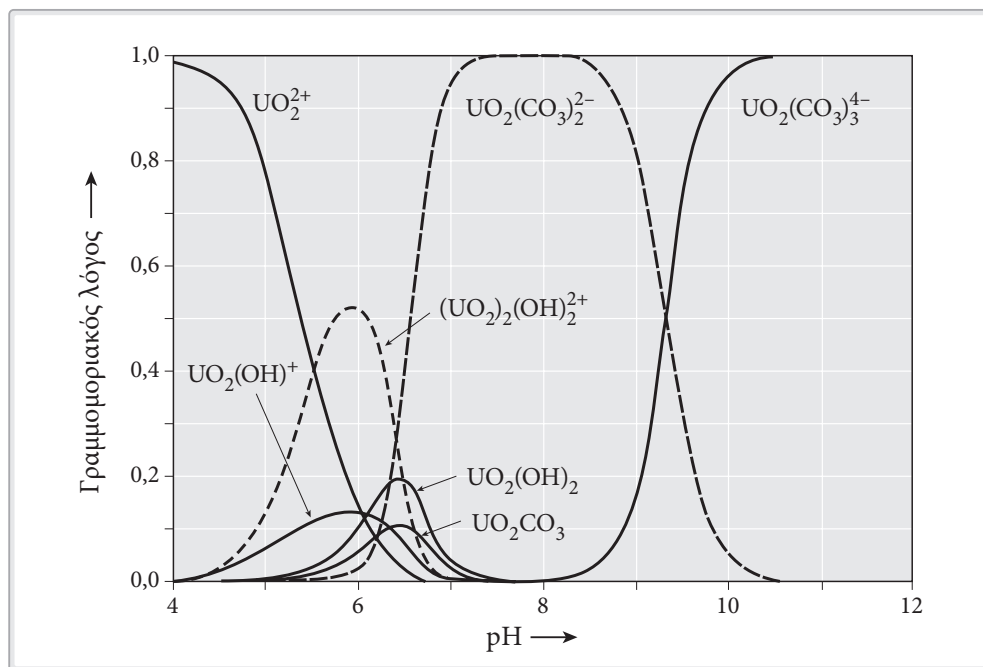


Στο Σχήμα 12-8 δίνεται το δυναμικό οξειδο-αναγωγής (E_H) του πλουτωνίου (συγκέντρωση 10^{-13} M) σε φυσικά ύδατα θερμοκρασίας 25°C σε συνάρτηση με το pH. Στο σχήμα αυτό είναι εμφανής ο σχηματισμός διαφόρων ιοντικών και συμπλόκων ειδών του πλουτωνίου σε διαφορετικές οξειδωτικές βαθμίδες.



Σχήμα 12-8: Δυναμικό οξειδο-αναγωγής (E_H) του πλουτωνίου σε φυσικά ύδατα σε συνάρτηση με το pH (συγκέντρωση πλουτωνίου: 10^{-13} M, θερμοκρασία 25°C).

Ο σχηματισμός συμπλόκων ιόντων με διάφορους ανόργανους (π.χ., OH^- , CO_3^{2-} , Cl^- , SO_4^{2-} , PO_4^{3-}) και οργανικούς (π.χ. χουμικά και φουλβικά οξέα) συναρμωστές επηρεάζουν τη διαλυτότητα, τη χημική συμπεριφορά και την ταχύτητα μεταφοράς των ραδιονουκλιδίων. Κλασικές περιπτώσεις είναι τα ανθρακικά σύμπλοκα των ακτινιδών, όπως, για παράδειγμα, του ουρανίου (Σχήμα 12-9). Τα $\text{UO}_2(\text{CO}_3)_2^{2-}$ και $\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3^{4-}$ είναι οι συνηθισμένες ιοντικές μορφές του ουρανίου σε φυσικά ύδατα. Το $(\text{UO}_2)_2(\text{OH})_2^{2+}$ σχηματίζεται σε συγκεντρώσεις ουρανίου μεγαλύτερες του 0,1 mM.



Σχήμα 12-9: Ιοντικά είδη του ουρανίου σε οξυγονούχα φυσικά ύδατα κάτω από συνθήκες ατμοσφαιρικής συνθήκης [88].

Σχηματισμός καρβονικών συμπλόκων του πλουτωνίου σε αλκαλικά διαλύματα είναι επίσης εμφανής στο Σχήμα 12-8.

Η ρόφηση σε επιφάνειες ορυκτών, πετρωμάτων αλλά και ιζημάτων παίζει έναν ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο στη μετακίνηση των ραδιονουκλιδίων αλλά και στη γεωλογική διάθεση των αποβλήτων της πυρηνικής βιομηχανίας.

Η προσρόφηση των ενυδατωμένων ιόντων σε επιφάνειες ορυκτών και πετρωμάτων μπορεί να πραγματοποιηθεί με σχηματισμό συμπλόκων εσωτερικής και εξωτερικής σφαίρας (Σχήμα 12-10).

A

Αγωγοί (conductors), 95
 Αδρανής εγκλεισμός (inertial confinement), 200
 Αδρόνια (hadrons), 40
 Αϊνστάινιο (Einsteinium, Es), 154
 Ακτινίδες (actinides), 142
 Ακτίνιο (Actinium, Ac), 17
 Ακτινοβολία
 » -γ, 64
 » εξαϋλωσης (annihilation radiation), 60
 » κοσμική (cosmic radiation), 339
 » πέδησης (Bremsstrahlung), 77
 » Čerenkov (Čerenkov radiation), 78
 » συγχρότρου (synchrotron radiation), 212, 217
 » βιολογικές επιπτώσεις (biological effects), 218
 » φυσική, 335
 ALARA (As Low As Reasonably Achievable), 233
 ALI (Annual Limit of Intake, ετήσιο όριο πρόσληψης), 234
 Αλληλεπίδραση
 » ηλεκτρομαγνητική (electromagnetic), 44
 » ισχυρή (strong), 44
 » ασθενής (weak), 44
 » βαρυτική (gravitational), 44
 » ακτινοβολίας με την ύλη, 73
 » σωματιδιακής ακτινοβολίας με την ύλη, 73
 » ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας με την ύλη, 79
 » νετρονίων με την ύλη, 84
 Αμερίκιο (Americium, Am), 152, 368
 Ανακλαστήρας (reflector), 173
 Αναλογικός προς ψηφιακό μετατροπέας (Analog to Digital Converter, ADC), 108

Ανάλυση με

» ανίχνευση ανακρουόμενων πυρήνων (Elastic Recoil Detection Analysis, ERDA), 264
 » δέσμες ιόντων (Ion Beam Analysis, IBA), 257
 » ενεργοποίηση με φορτισμένα σωματίδια (Charged Particle Activation Analysis, CPAA), 258
 » επαγόμενη από πρωτόνια εκπομπή ακτίνων-X (Proton-Induced X-ray Emission, PIXE), 258, 259
 » νετρονική ενεργοποίηση άμεσης εκπομπής ακτινοβολίας-γ (prompt-gamma neutron activation analysis, PGNA), 251
 » νετρονική ενεργοποίηση, ενόργανη (Instrumental Neutron Activation Analysis, INAA), 255, 326
 » νετρονική ενεργοποίηση, ραδιοχημική (radiochemical neutron activation analysis, RNAA), 255
 » οπισθοσκέδαση Rutherford (Rutherford Backscattering Spectroscopy, RBS), 258
 » πυρηνικές αντιδράσεις (Nuclear Reaction Analysis, NRA), 258, 267
 » πυρηνικές αντιδράσεις συντονισμού (Nuclear Resonant Reaction Analysis, NRRA), 268
 » φθορισμό ακτίνων-X (X-Ray Fluorescence Analysis, XRF), 241, 328
 » φθορισμό ακτίνων-X διασποράς ενέργειας (Energy Dispersive XRF, EDXRF), 243
 » φθορισμό ακτίνων-X διασποράς μήκους κύματος (Wavelength Dispersive, WDXRF), 243
 » μ-XRF, 246

Ανάλυση με φθορισμό ακτίνων-X με ακτινοβολία συγχρότρου (SR-XRF), 329

Αναλυτής

- » ύψους παλμών (peak-height analyzer, PHA), 108
- » μονοδιαυλικός (single-channel analyzer, SCA) 108
- » πολυδιαυλικός (multichannel analyzer, MCA) 108

Ανιχνευτές ακτινοβολίας

- » αναλογικοί (proportional counters), 92
- » Geiger- Müller (GM-counter), 93
- » με σπινθηριστές (scintillators), 94
- » Ιωδιούχου νατρίου (sodium iodide, NaI(Tl)), 96
- » ημιαγωγικοί (semiconductor detectors), 99
- » γερμανίου υψηλής καθαρότητας (High-Purity Ge detectors, HPGe ή intrinsic Ge, Ge(i)), 102
- » γερμανίου-λιθίου (Ge(Li)), 102
- » πυριτίου-λιθίου (Si(Li)), 102
- » επιφανειακού φραγμού πυριτίου (Silicon Surface Barrier detectors, SSB-detectors), 104
- » PIPS (Passivated Implanted Planar Silicon detectors), 105

Αντιδράσεις

- » αλυσωτές (chain reactions), 171
- » άμεσες (direct reactions), 125
- » απογύμνωσης (stripping reactions), 128
- » κρούσης (knock-on reactions), 128
- » μεταφοράς (transfer reactions), 128
- » στατιστικές (statistical reactions), 126
- » σύλληψης (pick-up reactions), 128
- » σύνθετου πυρήνα (compound nucleus reactions), 125
- » συντονισμού (resonance reactions), 126
- » Oppenheimer - Phillips, 128

Αντιδραστήρες

- » ελαφρού ύδατος (Light Water Reactors, LWR), 179
- » ελαφρού ύδατος υπό βρασμό (Boiling Water Reactors, BWR), 180
- » ελαφρού ύδατος υπό πίεση (Pressurized Water Reactors, PWR), 180
- » μετατροπείς (converters), 181

Αντιδραστήρες

- » εκκολαπτικοί (breeders,) 181
- » CANDU, 181
- » AGR, 181
- » RBMK, 181
- » Πειραματικοί (ανοικτής δεξαμενής, swimming pool reactors), 182

Αντιδραστικότητα (reactivity), 174

Αντιδραστικότητας, περίσσεια (reactivity excess), 174

Αντι-

- » νετρίνο (anti-neutrino) 41, 59
- » σωματίδιο (anti- particle), 40
- » quark (anti-quark), 44

Απόβλητα ραδιενεργά,

- » εξαιρούμενα (Exempt waste, EW), 191
- » ιδιαίτερα βραχύβια (Very Short-lived waste, VSLW), 191
- » πολύ χαμηλού επιπέδου (Very Low-Level waste, VLLW), 191
- » χαμηλού επιπέδου (Low-level Waste, LLW), 191
- » ενδιάμεσου επιπέδου (Intermediate Level Waste, ILW), 191
- » υψηλού επιπέδου (High level waste, HLW), 191
- » μεταλλευτικά, 346

Απόδοση

- » Ανιχνευτή (detector efficiency), 49
- » Auger (Auger yield, 61
- » σχάσης (fission yield), 132
- » φθορισμού (fluorescence yield), 61

Απορρόφηση

- » ιοντανταλλαγή (ion exchange), 353
- » συντονισμού (resonance absorption), 279

Αποσβεστικά αέρια (quenching gases), 92

Αποτελέσματα έκθεσης σε ακτινοβολία,

- » μη-στοχαστικά (deterministic effects), 221
- » στοχαστικά (stochastic effects), 221

Αποτελεσματικός

- » αριθμός νετρονίων (effective neutron number), 172
- » λόγος πολλαπλασιασμού (effective multiplication factor), 173

Άργιλος (clay), 196

Αργίλου ορυκτά (clay minerals), 196

Αραίωση ισοτοπική (isotopic dilution), 277

Αριθμός

- » ατομικός (atomic number, Z), 29
- » μαζικός (mass number, A), 29

Αστάτιο (Astatine), 139

Ατομική μονάδα μάζας (atomic mass unit, u), 29

Ατυχήματα, πυρηνικά (nuclear accidents), 348

B

Βαρυόνια (baryons), 41

barn (b), 121

Be-7, Be-10, 339

Becquerel A. H., 15

- » μονάδα (Bq), 49

Bethe-Weizsäcker εξίσωση, 34

Βαρυόνια (baryons), 41

Βιορρόφηση (biosorption), 353

Βιοσυσσώρευση (bioaccumulation), 353, 373

Βιόσφαιρα, (biosphere), 335

Bragg καμπύλη, 74

Breit-Wigner σχέση, 127

Γ

Γεννήτρια

- » Cockroft-Walton (Cockroft-Walton generator), 205
- » νετρονίων (neutron generator), 249
- » ραδιονουκλιδίων (radionuclide generator), 291
- » Mo-99/Tc-99m, 292

Γκλουόνια ή συγκολλητές (gluons), 45

Γραμμική μεταφορά ενέργειας (Linear Energy Transfer, LET), 215

Glendenin-Coryell, 76

Gray (Gy), 216

Chernobyl ατύχημα, 348

Δ

DAC (derived air concentration, προκύπτουσα συγκέντρωση στον αέρα), 234

Δείκτες επικινδυνότητας (hazard indices), 344

Δενδροχρονολόγηση (dendrochronology), 305

Διακριτικότητα ενέργειας (energy resolution), 87

Διάρκεια ζωής (life-time), 41

Διάσπαση,

- » $-\alpha$ (α -decay), 55
- » $-\beta$ (β -decay), 59

Διάσπασης

- » διάγραμμα (decay scheme), 57
- » εκθετική σχέση (radioactive decay exponential relation), 47
- » λόγος διακλάδωσης (branching ratio), 50

Διασπορά εμβέλειας (range straggling), 74

Διάχυση αερίων (gaseous diffusion process), 185

Δίδυμη γένεση (pair production), 66, 79

Διποζιτρόνιο, 77

Δοκιμές, πυρηνικές (nuclear tests), 346

Δόση

- » απορροφούμενη (absorbed dose), 216
- » ενεργός (effective dose), 219
- » ενεργός, δεσμευθείσα (committed effective dose), 221
- » θανάσιμη (lethal dose), 223
- » ισοδύναμη (equivalent dose), 216
- » ισοδύναμη, δεσμευθείσα (committed equivalent dose) 218

Δοσιμέτρα

- » ενεργητικά (active dosimeters), 229
- » παθητικά (passive dosimeters), 229
- » διόδου πυριτίου (Si-PIN dosimeters) 231
- » θερμοφωταυγειακά (thermoluminescent, TLDs), 229

Δύνοδοι (dynodes), 98

Ε

Έκθεση (exposure), 215

Ελέγχου

- » ράβδοι (control rods), 174
- » συστήματα (control systems), 176

Έλλειμμα μάζας (mass defect), 33

Εμβέλεια,

- » μέση (mean range), 74
- » προεντεταμένη (extrapolated range), 74

Εμπλουτισμός ουρανίου

- » φυγοκεντρικός (centrifuge process), 185
- » με διάχυση αερίων (gas diffusion process), 185

Εμφύτευση ιόντων (ion implantation), 315

Ενέργεια

- » ανάκρουσης (recoil energy), 64, 279
- » Coulomb (Coulomb energy), 34
- » διάσπασης (decay energy), 55, 62
- » κατωφλίου (threshold energy) 120
- » όγκου (volume energy), 34
- » πυρηνική (nuclear energy), 347
- » σύζευξης (pairing energy), 34
- » συμμετρίας (symmetry energy), 34
- » σύνδεσης (binding energy), 33

Ενεργός διατομή (cross section), 121

Ενεργότητα ή ρυθμός διάσπασης (activity), 48

- » ειδική (specific activity), 277
- » συσσωρευθείσα (cumulated activity), 360

Ενισχυτής (amplifier), 107

Εξόρυξη ουρανίου (uranium mining), 182

Επιβραδυντής (moderator), 176

Επιθερμική περιοχή (epithermal region), 172

Επίπεδο δέκτη (acceptor level), 100

- » δότη (donor level), 99

Επισήμανση (labelling), 275

Επιταχυντές

- » σωματιδίων (particle accelerators), 203
- » σταθερού ηλεκτρικού πεδίου (DC-accelerators), 205
- » Cockroft-Walton, 205
- » van de Graaff (van de Graaff), 205
- » Tandem van de Graaff (Tandem van de Graaff), 206
- » εναλλασσόμενου ηλεκτρικού πεδίου (AC-accelerators), 207
- » γραμμικοί (linear accelerators, LINACs), 207
- » κύκλοτρα (cyclotrons), 210
- » σύγχροτρα (synchrotrons), 210

Επιφανειακή

- » κατακρήμνιση (surface precipitation), 353
- » πυκνότητα (areal density), 262

Εφαρμογές, ραδιενεργών ισοτόπων και ακτινοβολιών

- » στη χημεία, 275
- » γεωλογία, 284
- » ιατρική και βιολογία, 285
- » τεχνολογία, 312
- » αρχαιολογία και τέχνη, 322

Z

Ζεόλιθος (zeolite), 197, 356

Zώνη

- » αγωγιμότητας (conductivity band), 95
- » σθένους (valence band), 95

H

Hahn O., 19, 129

Ηλεκτρόνια, 41

- » Auger (Auger electrons), 60
- » μετατροπής (conversion electrons), 65

Ηλεκτρονίου, σύλληψη (electron capture, EC ή ε), 59, 60

Ηλεκτρονιοβόλτ (electron-volt), 32

Ηλικία BP (before present), 305

Ημιαγωγοί (semiconductor), 95

- » ενδογενείς (intrinsic), 99
- » προσμειξιών (doped) 99
- » p-τύπου, 100
- » n-τύπου, 99

Ημιαπορρόφησης, στοιβάδα (half-thickness), 79

Θ

Θάλαμος ιονισμού (ionization chamber), 91

Θερμοφωταύγεια (thermoluminescence), 312, 324

Θεωρία

- » του νετρίνο (neutrino theory), 18
- » των ζωνών (zones theory), 94

Θόριο (Thorium, Th), 17, 147

Θωρακίσεις ακτινοβολίας (radiation shields), 109

I

Ιδιοστροφορμή (spin), 38

Ιζήματα, θαλάσσια (marine sediments), 358

Ιονισμός, ειδικός (specific ionization), 74

Ισοδύναμο ραδίου (radium equivalent), 344

Ισομερής

- » κατάσταση (isomeric state), 65
- » μετάπτωση (isomeric transition), 65
- » μετατόπιση (isomer shift), 282

Ισορροπία,

- » διαρκής (secular equilibrium), 52
- » μεταβατική (transient equilibrium), 52

- Ισότοπα (isotopes), 29
 Ισοτοπική αραίωση (isotopic dilution), 277
 Ισχύς πέδησης (stopping power), 73
 Ιχνηθέτες, ραδιενεργοί (radioactive tracers), 275
 Ιώδιο-131 (I-131), 365
- Κ**
- Curie M., 15
 » μονάδα (Ci), 49
 Καίσιο-134, Καίσιο-137 (Cs-134, Cs-137), 367
 Καλιφόρνιο (Californium, Cf), 153
 Κατώφλιο σχάσης (threshold energy), 130
 Καύση άνθρακα, 345
 Κβαντο-χρωμοδυναμική (quantum chromodynamics), 45
 Κινηματικός παράγοντας, 262
 Κιούριο (Curium, Cm), 152
 Κοκτέϊλ σπινθηρισμού (scintillation cocktail), 97
 Κοπερνίκιο (Copernicium, Cn), 164
 Κοσμική ακτινοβολία (cosmic radiation), 301
 Κριτήριο Lawson (Lawson criterium), 199
 Κύκλος πυρηνικών καυσίμων (nuclear fuel cycle), 169
 quarks, 44
- Λ**
- Λεπτόνια (leptons), 41
 Λιβερμόριο (Livermorium, Lv), 166
 Λόγος διακλάδωσης διάσπασης (branching ratio), 50
 Λωρέντσιο (Lawrencium, Lr), 156
- Μ**
- Μαγικοί αριθμοί (magic numbers), 38
 Μαγνητική ροπή (magnetic moment), 39
 Μαγνητικός εγκλεισμός (magnetic confinement), 200
 Μαγνητόνη Bohr (Bohr magneton), 39
 Mach, κώνος, 78
 Μαϊτνέριο (Meitnerium, Mt), 163
 Mattauach, κανόνες (1ος και 2ος), 38
 Meitner L., 19, 129
 Μεντελέβιο (Mendelevium, Md), 155
 Μεσόνια (mesons), 41
 Μετακίνηση, ραδιονουκλιδίων (Radionuclide migration), 352
 Μετασταθείς καταστάσεις (metastable states), 65
 Μετατοπιστές μήκους κύματος (wavelength shifters), 97
 Μετατροπή ουρανίου, 185
 Μικροαναλυτής σωματιδίων (particle microprobe), 330
 Μικροδέσμη πρωτονίων (proton microbeam), 260
 Μονάδες τριτίου (tritium units, TU), 306
 Μοντμοριλλονίτης (montmorillonite), 196, 355
 Μονωτές (insulators), 95
 Μοσκόβιο (moscovium, Mc), 165
 Mössbauer φαινόμενο (Mössbauer effect), 279
 Μπεντονίτης (bentonite), 196
 Μπερκέλιο (Berkelium, Bk), 153
 Μπόριο (Bohrium, Bh), 161
- Ν**
- Νανολιθογραφία (nanolithography), 315
 Νεκρός χρόνος (dead time), 87
 Νεπτούνιο (Neptunium, Np), 150
 Νετρίνο (neutrino), 41
 » ηλεκτρονικά (electron neutrino), 60
 Νετρόνια
 » θερμικά (thermal neutrons), 130
 » καθυστερημένα (delayed neutrons) 69, 133, 175
 » επιθερμικά (epithermal neutrons), 249
 » ταχεία (fast neutrons), 249
 Νετρονίων
 » γεννήτρια (neutron generator), 249
 » ισοτοπική πηγή (isotopic neutron source), 249
 » μέση διάρκεια ζωής (mean neutron generation time), 174
 Νετρονική ραδιογραφία (neutron radiography), 326
 Νομοθεσία ισχύουσα, 373
 Νόμος,
 » Coulomb, 31
 » Moseley, 242

Νομπέλιο (Nobelium, No), 156
 NORM, φυσικά ραδιενεργά υλικά (Naturally Occurring Radioactive Materials), 335
 Νουκλεόνια (nucleons), 29
 Νουκλίδιο (nuclide), 29
 Νταρμστάτιο (Darmstadtium, Ds), 163
 Ντούμπνιο (Dubnium, Db), 160

O

Ογκανέσσιο, (Oganessium, Og), 167
 Oklo, φαινόμενο, 170
 Ομοτιμία πυρήνα (parity), 40
 Οξειδοαναγωγή (redox reactions), 352
 Οπισθοσκεδασμός (backscattering), 77
 Οπισθοσκεδασμός Rutherford, (Rutherford backscattering), 129
 Ουράνιο (Uranium, U), 149
 » μετατροπή σε UF_6 , 185
 » παραλαβή, 182
 Ötzi (Ötztal Iceman), 323

Π

Παράγοντας
 » θερμικής χρήσης (thermal utilization factor), 172
 » ταχείας σχάσης (fast fission factor), 172
 Παράμετρος σχάσης (fission parameter), 66
 Περίοδος αντιδραστήρα (reactor period), 174
 Περιοχή
 » επανασύνδεσης (recombination region), 91
 » κένωσης (depletion region), 101
 » ελεγχόμενη (controlled), 234
 » επιβλεπόμενες (supervised), 234
 Πιθανότητα διαφυγής από συντονισμό (resonance escape probability), 172
 Πίνακας των Νουκλιδίων (Chart of Nuclides), 29
 Πλάσμα (Plasma), 135
 Πλειονότητας, φορείς (majority carriers), 100
 Πλουτώνιο (Plutonium, Pu), 150, 188, 368
 Ποζιτρονιακά άτομα (positronium atoms, Ps), 77
 Πολυδιαλυτικός αναλυτής (MCA), 108
 Πολώνιο (Polonium, Po), 17, 139

PUREX, μέθοδος διαχωρισμού (Plutonium and Uranium Recovery by Extraction), 190
 Προενισχυτής (preamplifier), 107
 Προμήθειο (Promethium, Pm), 142
 Προπαρασκευασμένα φαρμακευτικά σκευάσματα (kits), 290
 Πρόσληψη ραδιονουκλιδίων (radionuclide uptake), 359, 365
 Προσρόφηση (adsorption), 353
 Πρότυπο της σταγόνας υγρού (liquid-drop model), 34
 Πρωτακτίνιο (Protactinium, Pa), 149
 Πρωτόνια (protons), 18, 41
 » καθυστερημένα (delayed protons), 69
 Πρωτονιακή ή αδρονική θεραπεία (proton or hadron therapy), 211
 Πυρήνες
 » π, π^- , και α, α^- , 35
 » ισοβαρείς (isobars), 37
 » μετασταθείς (metastable), 65
 Πυρηνικά ίχνη (nuclear tracks), 88
 Πυρηνικά καύσιμα (nuclear fuels), 176
 » οξειδίου του ουρανίου (uranium oxide fuels, UOX), 187
 » φυσικού ουρανίου (natural uranium), 187
 » μεικτών οξειδίων (mixed oxide fuels, MOX), 187
 » κεραμικά, 188
 » μεταλλικά, 188
 » μεικτών υδριδίων του ουρανίου, 188
 » καύσιμα, χρησιμοποιημένα (Spent Nuclear Fuels, SNF), 193
 Πυρηνικά ατυχήματα (nuclear accidents), 347
 Πυρηνική
 » αντίδραση (nuclear reaction), 84, 117
 » ενέργεια (nuclear energy), 347
 » ισομέρεια ή Fermi ισομέρεια, 67
 » μαγνητόνη (nuclear magneton), 39
 » σχάση (nuclear fission), 129
 » σύντηξη (nuclear fusion), 134
 » χημεία (nuclear chemistry), 20

P

Ράβδοι πυρηνικών καυσίμων (nuclear fuel rods), 177
 » ελέγχου (control rods), 174

- Rutherford E. Sir, 18
 rad, μονάδα, 216
 Ραδερφόρδιο (Rutherfordium, Rf), 159
 Ραδιενέργεια (radioactivity), 15
 » τεχνητή (artificial radioactivity), 346
 Ραδιενεργός διάσπαση (radioactive decay), 47
 Ραδιενεργός ισορροπία (radioactive equilibrium), 52
 Ραδόνιο (Radon, Rn), 18, 340
 Ράδιο (Radium, Ra), 17, 362
 Ραδιοανοσιολογικές εξετάσεις (Radio-immuno assays, RIA), 297
 Ραδιονουκλίδια,
 » κοσμογενή (cosmogenic), 300, 338
 » προκοσμιαία ή αρχέγονα (primordial), 337, 300
 » στα τρόφιμα, 363
 » εφαρμογές στην τεχνολογία, 312
 Ραδιοφάρμακα (radiopharmaceuticals), 285
 Ραδιοχημεία (radiochemistry), 20
 Ραιντγκένιο (Rontgenium, Rg), 164
 Röntgen W. K., 15
 » μονάδα (R), 216
 Ρόφηση (sorption), 353
- Σ
 Sievert (Sv), μονάδα, 217
 Σιμπόργκιο (Seaborgium), Sg, 161
 Σινδόνι του Τορίνο (Turin shroud), 323
 Σκέδαση Compton (Compton scattering), 79
 Σκεδασμός (scattering), 125
 » ελαστικός και ανελαστικός (elastic και inelastic scattering), 84, 128
 Σπινθηρογράφημα, 294
 Σταθερά
 » διάσπασης (decay constant), 47
 » προάσπισης (screening constant), 242
 » Planck, 38
 Strassmann F., 19, 129
 Στρόντιο-90 (Sr-90), 367
 Συγχροκύκλωτρο (synchrocyclotron), 210
 Συμπλοκοποίηση (complexation), 352
 Συναρμοστές (ligands), 145
 Συνάρτηση διέγερσης (excitation function), 122
- Σύνθετος πυρήνας (compound nucleus), 118
 Σύμπτωσης, τεχνικές (coincidence counting), 109
 Συντελεστή απορρόφησης
 » γραμμικός (linear absorption coefficient), 79
 » μαζικός (mass absorption coefficient), 79
 » κατανομής στερεού/υγρού (Distribution Coefficient), 358
 » μετατροπής (conversion coefficient), 66
 » μεταφοράς (transfer coefficient), 370
 Σύντηξη (fusion), 197
 Συστολή ακτινιδών (actinide contraction), 144
 Σύστημα,
 » υποκρίσιμο (subcritical), 174
 » κρίσιμο (critical), 174
 » υπερκρίσιμο (supercritical), 174
 Σχάση (fission), 125
 » αυθόρμητη (spontaneous), 66
 » τεχνητή (artificial), 19, 209
 » ισομερής (isomeric), 67
 » ασύμμετρη (asymmetric), 66
 » συμμετρική (symmetric), 66
 Σχέση
 » Bethe-Weizsäcker, 34
 » Breit - Wigner, 127
 » ενεργοποίησης (activation formula), 125
 » Glendenin-Coryell, 76
 » τεσσάρων συντελεστών (four factor), 173
- Τ
 Τάση κορεσμού (saturation voltage), 91
 TENORM ραδιενεργά υλικά (Technologically Enhanced Naturally Occurring Radioactive Materials), 335
 Τεχνητή πυρηνική σχάση (artificial nuclear fission), 19, 129
 Τεχνήτιο (Technetium, Tc), 139, 292
 Τομογραφία
 » εκπομπής ποζιτρονίων (Positron Emission Tomography, PET), 287, 296
 » υπολογιστική εκπομπής μονού φωτονίου (Single-Photon Emission Computed Tomography, SPECT), 294

Τομογραφία υπολογιστική ακτίνων-X (Computed Tomography, CT), 294, 328

Τρανσακτινίδες (transactinides), 157

Τρόφιμα ακτινοβόληση (radiation processing), 317

Τροχιακή στροφορμή, 38

Υ

Υγειοφυσική (health physics), 215

Υδρόλυση, ραδιονουκλιδίων (hydrolysis), 358

Υλικό επίχωσης (backfill material), 195

Υπερόνια (hyperons), 41

Υποατομικά σωματίδια (subatomic particles)

» στοιχειώδη (elementary), 40

» σύνθετα (composite) ή αδρόνια (hadrons), 40

Υπόγεια ερευνητικά εργαστήρια (underground research laboratories, URL), 194

yellow cake, 149, 184

Φ

Φαινόμενο

- οξυγόνου (oxygen effect), 218

- σήραγγας (tunnel effect), 58

Φασματομετρία

- μαζών με επιταχυντές σωματιδίων (Accelerator Mass Spectrometry, AMS), 258

Φασματοσκοπία

» ηλεκτρονίων Auger (Auger Electron Spectroscopy, AES), 259

» μαζών δευτερογενών ιόντων (Secondary Ion Mass Spectrometry, SIMS), 259

» Mössbauer (Mössbauer spectroscopy), 279, 330

» οπισθοσκέδασης Rutherford ford (Rutherford Backscattering Spectroscopy, RBS), 261

- φωτοηλεκτρονική ακτίνων-X (X-ray Photoelectron Spectroscopy, XPS), 259

Φέρμιο (Fermium, Fm), 154

Φλερόβιο (Flerovium, Fl), 165

Φραγμοί, τεχνητοί (engineered barrier systems, EBS), 195

Fukushima Daiichi, 248

Φωσφογύψος (phosphogypsum), 344

Φωσφορικά, λιπάσματα (phosphoric fertilizers), 344

Φωτοηλεκτρικό, φαινόμενο (photoelectric effect), 79

Φωτοηλεκτρόνιο (photoelectron), 80

Φωτοκάθοδος (photocathode), 98

Φωτονία (photons), 41

Φωτοπολλαπλασιαστής (photomultiplier), 98

Χ

Χάσσιο (Hassium, Hs), 162

Χρονολόγηση (dating), 300

- με κοσμογενή ραδιονουκλίδια (cosmogenic radionuclides dating), 301

- με προκοσμία ραδιονουκλίδια (primordial radionuclides dating), 302

- με άνθρακα-14 (carbon-14 dating), 302

- υδάτων με τρίτιο (tritium dating), 306

- με κάλιο-40 /αργό-40 (K-40/Ar-40 dating) 308

- ουρανιούχων και θοριούχων πετρωμάτων (dating of U- and Th-containing rocks), 309

- με ίχνη σχάσης (fission track dating), 311

- με φασματοσκοπία μαζών με επιταχυντές (AMS dating), 323

- με θερμοφωταύγεια (thermoluminescence dating), 324

Χρόνος υποδιπλασιασμού ή ημιζωή (half-life), 30, 48, 286

» αποτελεσματικός (effective half-life), 286

» βιολογικός (biological half-life), 286

Ψ

Ψυκτικό μέσο (reactor coolant), 176