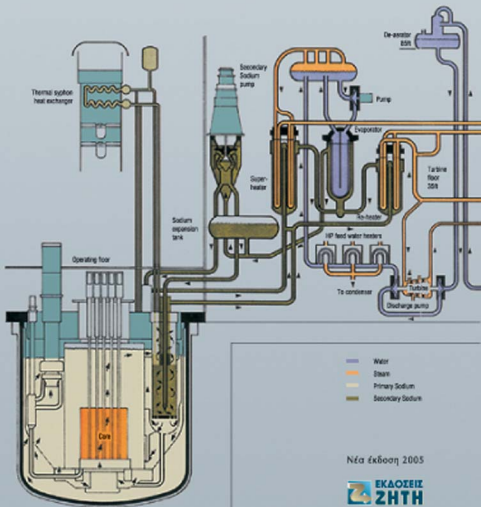


Μ. Αντωνόπουλος - Ντόμης

ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΠΥΡΗΝΙΚΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ



Νέα έκδοση 2005

Κάθε γνήσιο αντίτυπο φέρει την υπογραφή του συγγραφέα.

ISBN 960-431-961-2

© Copyright, 2005, Εκδόσεις ΖΗΤΗ, Μ. Αντωνόπουλος-Ντόμης

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**

Π. ΖΗΤΗ & Σια ΟΕ

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

Βιβλιοπωλείο

ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΖΗΤΗ

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

www.ziti.gr

στον
μοναδικό μου
Δάσκαλο
τον
Νίκο Αντωνόπουλο

Πρόλογος 2ης έκδοσης

Το ανά χείρας βιβλίο καλύπτει σχεδόν το σύνολο του εύρους της πυρηνικής τεχνολογίας, χωρίς όμως να ασχολείται με τη σύντηξη.

Η διδακτική εμπειρία των είκοσι ετών, που έχουν παρέλθει από την πρώτη έκδοση (1984), οδήγησε σε νέο σχεδιασμό μεγάλου μέρους του περιεχόμενου του βιβλίου. Οι στόχοι του νέου σχεδιασμού είναι:

- α) να καταστεί ευκολότερη, για το σπουδαστή, η κατανόηση δύσκολων εννοιών και μεθοδολογιών,
- β) ο εκσυγχρονισμός ορισμένων γνωστικών αντικειμένων και
- γ) η προσθήκη θεμάτων πιο πρόσφατου επιστημονικού ενδιαφέροντος.

Οι σημαντικότερες αλλαγές και προσθήκες είναι οι εξής:

Η επιβράδυνση νετρονίων με ελαστικές σκεδάσεις (κεφάλαιο 2.8) παρουσιάζεται τώρα με απλούστερο τρόπο. Η αυστηρή μαθηματική διατύπωση της κινητικής των ελαστικών σκεδάσεων παρουσιάζεται, για όποιον ενδιαφέρεται, στο παράρτημα I.

Οι αλληλεπιδράσεις ύλης και ακτινοβολιών (κεφάλαιο 2.10), η ανίχνευση και μέτρηση ακτινοβολιών (κεφάλαιο 2.11), τα φάσματα ραδιενεργών διασπάσεων (κεφάλαιο 2.12) και οι εφαρμογές (κεφάλαιο 2.13), αναπτύσσονται με εντελώς νέο τρόπο. Ιδιαίτερα, όσο αφορά το θέμα της ανίχνευσης και μέτρησης των ακτινοβολιών, επιδιώχθηκε η προσέγγιση πλήρους παρουσίασης, σε μεγάλη έκταση, λόγω του πρακτικού ενδιαφέροντος, που έχει σε μεγάλο εύρος σύγχρονων επιστημονικών, βιομηχανικών, ιατρικών κ.ά. εφαρμογών, στη χώρα μας. Για τους ίδιους λόγους προστέθηκε το παράρτημα II (μετρούμενα φάσματα γ).

Η θεωρία διάχυσης νετρονίων (ενότητα 4) αναδιατυπώθηκε, με απλή εισαγωγή των εννοιών, των εξισώσεων, των μεθοδολογιών επίλυσής των και των ορίων αξιοπιστίας του μοντέλου διάχυσης. Η ενότητα 4 αρκεί για την κατανόηση της θεωρίας αντιδραστήρων, η οποία ακολουθεί. Η σχετικά δύσκολη, αυστηρή μαθηματική διατύπωση της εξίσωσης μεταφοράς (εξίσωση Boltzman) και της μετάβασης από αυτήν στην εξίσωση διάχυσης, παρατίθεται στο παράρτημα III.

Η ενότητα της ακτινοπροστασίας (ενότητα 7) είναι και αυτή εντελώς νέα, προκειμένου να είναι συμβατή με τους σύγχρονους κανονισμούς ακτινοπροστασίας.

Προστέθηκαν οι ενότητες της διαχείρισης των ραδιενεργών καταλοίπων (ενότητα 8) και των ατυχημάτων σε πυρηνικές εγκαταστάσεις (ενότητα 9), ενώ στο παράρτημα IV δίδονται λεπτομέρειες για το ατύχημα του Τσέρνομπιλ και των επιπτώσεων του ατυχήματος διεθνώς και στη χώρα μας.

Στο παράρτημα Δ δίνονται στοιχεία της πυρηνικής ηλεκτρικής ενέργειας, διεθνώς.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω την κα Ν. Παπαδοπούλου, για τη γραφή και διαμόρφωση του κειμένου στον υπολογιστή και την κα Κ. Παλούρα, για τη φιλοτέχνηση των σχημάτων.

Θεσσαλονίκη Απρίλιος 2005

Πρόλογος 1ης έκδοσης

Το βιβλίο αυτό, είναι ακριβώς ότι δηλώνει ο τίτλος του: εισαγωγή στην πυρηνική τεχνολογία. Το μεγαλύτερο μέρος του βασίζεται στις σημειώσεις των μαθημάτων που δίδαξε ο συγγραφέας στον κοινό μεταπτυχιακό (MSc) κύκλο σπουδών Πυρηνικής Τεχνολογίας των Queen Mary College και Imperial College του Πανεπιστημίου του Λονδίνου (1977–1980) και των προπτυχιακών μαθημάτων που δίδαξε στην Πολυτεχνική Σχολή του ΑΠΘ (1981–1984).

Η οργάνωση της ύλης είναι προσαρμοσμένη στα μαθήματα που διδάσκονται στο 4ο και 5ο έτος του Τμήματος Ηλεκτρολόγων και στο 3ο έτος του Τμήματος Μηχανολόγων της Πολυτεχνικής Σχολής του ΑΠΘ. Στο 1ο κεφάλαιο διατυπώνεται το αντικείμενο της πυρηνικής τεχνολογίας: η μετατροπή πυρηνικής ενέργειας σε ηλεκτρική ή/και θερμική, και οι τεχνολογικές εφαρμογές της πυρηνικής φυσικής στην παραγωγή και τις επιστήμες. Γίνεται επίσης σύγκριση των συμβατικών με τους πυρηνικούς σταθμούς. Στο 2ο κεφάλαιο αναπτύσσονται εκείνα τα στοιχεία πυρηνικής φυσικής που είναι απαραίτητα για την κατανόηση του αντικειμένου, υποθέτοντας ότι ο σπουδαστής δεν έχει προηγούμενες γνώσεις πυρηνικής φυσικής. Τα μαθήματα διατάσσονται και αναπτύσσονται με κατευθυντήριο άξονα τις εφαρμογές, έχουν δηλαδή σκοπό να εκπαιδεύσουν μηχανικούς μάλλον, παρά φυσικούς. Το κεφάλαιο τελειώνει με την περιγραφή των βασικών αρχών ανίχνευσης των ακτινοβολιών και την περιγραφή των κυριοτέρων εφαρμογών.

Το υπόλοιπο μέρος του βιβλίου αφορά τους πυρηνικούς αντιδραστήρες σχάσης. Σκοπός των μαθημάτων δεν είναι η παραγωγή πυρηνικών μηχανικών. Είναι η εισαγωγή του σπουδαστή στη σχετική θεωρία και τεχνολογία. Με την ολοκλήρωση των μαθημάτων, ο σπουδαστής είναι σε θέση να εκτιμήσει βασικές παραμέτρους σχεδιασμού του αντιδραστήρα, να διαμορφώσει επιστημονική γνώμη και να συζητήσει το ζήτημα των πυρηνικών σταθμών και της μόλυνσης του περιβάλλοντος. Έχει τέλος τις απαραίτητες γνώσεις που θα του χρειαστούν όταν συναντήσει, όπως είναι πολύ πιθανό, σχετικές εφαρμογές κατά την άσκηση του επαγγέλματός του.

Στο 3ο κεφάλαιο, αφού γίνει η εισαγωγή στη βασική έννοια της κρισιμότητας, περιγράφεται η συγκρότηση και οι τύποι των αντιδραστήρων, ενώ γίνεται αναφορά στα οικονομικά - πολιτικά κριτήρια που οδήγησαν στις συγκεκριμένες τεχνολογικές επιλο-

γές. Έτσι, κατά τη διάρκεια της μελέτης της θεωρίας των αντιδραστήρων που ακολουθεί (κεφ. 4, 5 και 6), ο σπουδαστής γνωρίζει που και γιατί χρειάζεται στην πράξη η θεωρία που μελετάει. Το βιβλίο τελειώνει με τη ραδιοπροστασία (κεφ. 7).

Στη διατύπωση της θεωρίας ακολουθήθηκε η σύγχρονη παιδαγωγική αντίληψη που εγκαινιάστηκε με το βιβλίο του P. F. Zweifel: το μεγαλύτερο μέρος της ανάλυσης εισάγεται στα πλαίσια της θεωρίας διάχυσης μιας ομάδας νετρονίων. Η σχετική θεωρία εξάρτησης από την ενέργεια των νετρονίων (θεωρία μεταφοράς, μοντέλα πολλαπλών ομάδων νετρονίων) δεν περιλαμβάνεται σ' αυτό τον τόμο. Ίσως, εάν και όταν χρειαστεί να διδαχτεί, αποτελέσει αντικείμενο δεύτερου τόμου.

Τα κεφάλαια 1, 2, 3, 4, 5 και 7 συνιστούν το περιεχόμενο ετήσιου μαθήματος, (4ο ηλεκτρολόγων και 3ο μηχανολόγων) ενώ, το κεφ. 6 της δυναμικής των αντιδραστήρων συνιστά το περιεχόμενο του μαθήματος στο 5ο έτος των ηλεκτρολόγων μηχανικών. Με το νέο πρόγραμμα σπουδών το μάθημα θα πρέπει να οργανωθεί σε δύο εξάμηνα. Το περιεχόμενο των 1, 2, 3 και 7 πρέπει να ενταχθεί στο 4ο ή 5ο εξάμηνο του ενδεικτικού προγράμματος σπουδών, αποτελεί «εισαγωγή στις εφαρμογές της πυρηνικής τεχνολογίας» και γνωστικά, αποτελεί προϋπόθεση για το εξαμηνιαίο μάθημα της «θεωρίας των αντιδραστήρων» (κεφ. 4, 5, και 6).

Αντί άλλων σχολίων, ας μου επιτραπεί να θυμίσω ότι η πυρηνική τεχνολογία δεν αφορά μόνο στους πυρηνικούς σταθμούς. Πλήθος εφαρμογών στην παραγωγή και στις επιστήμες, είναι πια καθημερινή πραγματικότητα. Σχετικά με τον εύλογο προβληματισμό γύρω από τις επιπτώσεις των πυρηνικών σταθμών στο περιβάλλον (φυσικό και πολιτικό), ας επαναλάβω τη γνωστή διαπίστωση: το ζήτημα δεν είναι τεχνικό. Είναι οικονομικό, σε τελευταία ανάλυση είναι ζήτημα πολιτικής επιλογής. Οι τεχνικές λύσεις υπάρχουν ήδη, ή βρίσκονται, και οπωσδήποτε έπονται της πολιτικής επιλογής. Παρά το περιβαλλοντικό κίνημα, ή μάλλον παράλληλα μ' αυτό και με εμφανείς τις θετικές επιπτώσεις απ' αυτό, υπάρχει σήμερα συγκεκριμένη πραγματικότητα, με σαφή δυναμική και κατεύθυνση. Αυτή που απεικονίζουν οι πίνακες παραγωγής ηλεκτρικής από πυρηνική ενέργεια (παράρτημα Δ).

Θέλω και από τη θέση αυτή να ευχαριστήσω την κα Κ. Παλιούρα που φιλοτέχνησε τα σχήματα του βιβλίου, την κα Ν. Σωτίδου - Κεραμίδα που δακτυλογράφησε τις αρχικές σημειώσεις και την κα Κ. Σκαρπέτα που με βοήθησε στη σύνταξη πινάκων και στη διόρθωση των δοκιμίων. Οφείλω τέλος να ευχαριστήσω τους φοιτητές μου, που με τις απορίες και τις παρατηρήσεις τους έδωσαν αφορμές για βελτιώσεις των αρχικών σημειώσεων.

Θεσσαλονίκη, Οκτώβρης 1984

Μ.Ν. Αντωνόπουλος - Ντόμης

Περιεχόμενα

1. Το αντικείμενο	1
1.1 Πυρηνική τεχνολογία	1
1.2 Συμβατικές και πυρηνικές μονάδες ηλεκτροπαραγωγής	2
2. Στοιχεία πυρηνικής φυσικής	9
2.1 Άτομο και πυρήνας	11
2.2 Ραδιενέργεια	19
2.3 Έλλειμμα μάζας - ενέργεια σύνδεσης	32
2.4 Πυρηνικές αντιδράσεις	37
2.5 Τα προϊόντα της σχάσης	43
2.6 Διατομές αντιδράσεων	51
2.7 Εξάρτηση των διατομών αντιδράσεων από την ενέργεια των νετρονίων	56
α) ραδιενεργός ενσωμάτωση (n, γ)	57
β) Σχάση (n, f)	60
γ) Σκέδαση (n, n)	63
2.8 Επιβράδυνση νετρονίων με ελαστικές σκεδάσεις	64
2.9 Συνέπειες της θερμικής κίνησης των πυρήνων – Φαινόμενο Doppler	69
2.10 Αλληλεπιδράσεις ύλης και ακτινοβολιών	76
α) Βαρέα φορτισμένα σωματίδια	77
β) Σωματίδια β	79
γ) Φωτόνια γ	80
2.11 Ανίχνευση και μέτρηση ακτινοβολιών	88
Α. Γενικά	88
Β. Ανιχνευτές ιοντισμού	93
Γ. Ανιχνευτές στερεάς κατάστασης	99

Δ. Ανιχνευτές Νετρονίων	110
Ε. Διατάξεις απαριθμητών παλμών	116
2.12 Φάσματα ραδιενεργών διασπάσεων με α , β και γ ακτινοβολίες	118
2.13 Εφαρμογές	126
Ιατρικές εφαρμογές	126
Βιομηχανικές και περιβαλλοντικές εφαρμογές	129
Πολυστοιχειακές αναλύσεις με νετρονική ενεργοποίηση	133
3. Πυρηνικοί αντιδραστήρες σχάσης	135
3.1 Κρισιμότητα: ο τύπος των 4 συντελεστών	137
συντελεστής ϵ	141
συντελεστής η	142
συντελεστής f	143
συντελεστής p	143
3.2 Πυρηνικά καύσιμα – Αναπαραγωγή	146
3.3 Συγκρότηση πυρηνικού αντιδραστήρα	151
3.4 Τύποι αντιδραστήρων ισχύος	162
3.4.1 Αντιδραστήρες ελαφρού ύδατος (LWR, Light Water Reactors)	162
3.4.2 Αντιδραστήρες βαρέος ύδατος (HWR, Heavy Water Reactor)	169
CANDU	170
SGHWR	172
3.4.3 Αντιδραστήρας γραφίτη – ύδατος	174
3.4.4 Αερίοψυκτοι αντιδραστήρες με επιβραδυντή γραφίτη (GCR Gass – Cooled, graphite – moderated Reactor)	175
AGR	176
Αερίοψυκτος αντιδραστήρας υψηλής θερμοκρασίας (HTGR)	178
3.4.5 Αναπαραγωγικοί αντιδραστήρες ταχέων νετρονίων	181
4. Θεωρία διάχυσης νετρονίων	187
4.1 Ρεύματα νετρονίων	189
4.2 Ο νόμος του Fick	194
4.3 Εξίσωση διάχυσης μονοενεργειακών νετρονίων	200
4.4 Μήκος διάχυσης	207
4.5 Μήκος επιβράδυνσης	214
4.6 Μοντέλο ενεργειακών ομάδων νετρονίων	218

5. Κρισιμότητα	221
5.1 Μοντέλο μιας ομάδας νετρονίων	223
Γυμνός ομογενής αντιδραστήρας	223
α) Γυμνός πλακοειδής αντιδραστήρας απείρων διαστάσεων	224
β) Γενίκευση της συνθήκης κρισιμότητας γυμνού ομογενούς αντιδραστήρα	231
5.2 Ανακλαστής	238
5.3 Συνθήκη κρισιμότητας μοντέλου δύο ομάδων νετρονίων	246
5.4 Υπολογισμοί κρισιμότητας με μοντέλο πολλαπλών ομάδων νετρονίων	249
 6. Δυναμική των αντιδραστήρων	 251
6.1 Το αντικείμενο	253
6.2 Χαρακτηριστικές παράμετροι	253
6.3 Μοντέλο σημειακού αντιδραστήρα	256
6.4 Μεταβολή αντιδραστικότητας κατά βήμα	262
α) Μια ομάδα καθυστερημένων νετρονίων	262
β) έξι ομάδες καθυστερημένων νετρονίων	270
6.5 Προσέγγιση άπειρου χρόνου καθυστέρησης	273
6.6 Προσέγγιση ακαριαίου άλματος	275
6.7 Φυσικοί μηχανισμοί ανάδρασης	276
6.8 Μεταβατικό φαινόμενο με ανάδραση θερμοκρασίας	281
6.9 Συναρτήσεις μεταφοράς – Απόκριση συχνότητας	288
6.10 Δηλητήρια προϊόντα της σχάσης	295
α) Ξένο	296
β) Σαμάριο	302
6.11 Εξάντληση καυσίμου	305
6.12 Μέθοδοι ελέγχου της αντιδραστικότητας	307
α) Βραχυπρόθεσμος έλεγχος της αντιδραστικότητας	308
β) Μακροπρόθεσμες μεταβολές της αντιδραστικότητας	309
6.13 Δυναμικά χαρακτηριστικά αντιδραστήρων ισχύος	313
α. Αντιδραστήρες γραφίτη	313
β. Αντιδραστήρες νερού	314
β.1 έμμεσα κύκλα: αντιδραστήρες πεπιεσμένου ύδατος (PWR)	315
β.2 άμεσα κύκλα	316
β.3 μικτά κύκλα	316

7. Ακτινοπροστασία	319
7.1 Η αφετηρία των βιολογικών επιπτώσεων των ακτινοβολιών	321
7.2 Δόσεις ραδιενέργειας	326
7.3 Ραδιενέργεια περιβάλλοντος	331
Α. Εξωτερικές πηγές	331
i) Κοσμική ακτινοβολία	331
ii) Ακτινοβολία από τη γη	333
Β. Εσωτερικές πηγές	334
Γ. Δόσεις από φυσική ραδιενέργεια	335
Δ. Ανθρωπογενείς πηγές	336
7.4 Βιολογικές επιπτώσεις	339
7.5 Όρια δόσεων	344
7.6 Το πρόβλημα της θωράκισης	347
8. Διαχείριση των ραδιενεργών καταλοίπων	359
8.1 Κατηγορίες ραδιενεργών καταλοίπων	361
8.2 Βραχυπρόθεσμη και μεσοπρόθεσμη διαχείριση των πυρηνικών καταλοίπων	362
8.3 Μακροπρόθεσμη διαχείριση	367
9. Ατυχήματα σε πυρηνικές εγκαταστάσεις	373
9.1 Τα γνωστά σοβαρά ατυχήματα	375
9.2 Το ατύχημα στο ΤΜΙ	378
9.3 Το ατύχημα στο Τσέρνομπιλ	382
Ως προς τις επιπτώσεις στη Ελλάδα	386
Παραρτήματα	393
Παράρτημα Ι	
Κινητική των ελαστικών σκεδάσεων	395
Παράρτημα ΙΙ	
Μετρούμενα φάσματα-γ	405
Παράρτημα ΙΙΙ	
Από την εξίσωση μεταφοράς στην εξίσωση διάχυσης	410
ΙΙΙ.1 Γενίκευση των εννοιών πυκνότητας και ροής νετρονίων	410

III.2 Ρεύμα νετρονίων	412
III.3 Η εξίσωση μεταφοράς νετρονίων	416
III.4 Από την εξίσωση μεταφοράς στην εξίσωση διάχυσης νετρονίων	420
III.5 Σύνοψη και όρια αξιοπιστίας της εξίσωσης διάχυσης	430
III.6 Συνθήκες για τη ροή $\Phi(\mathbf{r}, E, t)$	433
Παράρτημα IV	
Τα αίτια και οι επιπτώσεις του ατυχήματος του Τσέρνομπιλ	437
IV.1 Τα αίτια του ατυχήματος του Τσέρνομπιλ και οι επιπτώσεις εκτός Ελλάδος	437
IV.2 Οι επιπτώσεις του Τσέρνομπιλ στην Ελλάδα	467
Παράρτημα Α	
Μονάδες και σταθερές	481
Παράρτημα Β	
Πίνακας Ραδιοϊσοτόπων	484
Παράρτημα Γ	
Διατομές αντιδράσεων με θερμικά νετρόνια	488
Παράρτημα Δ	493
Βιβλιογραφία	497
Ευρετήριο όρων	501

1 το αντικείμενο

1.1 Πυρηνική τεχνολογία

Αντικείμενο της Πυρηνικής Τεχνολογίας είναι οι τεχνολογικές εφαρμογές της Πυρηνικής Φυσικής. Αντικείμενο του πυρηνικού μηχανικού είναι η σχεδίαση και λειτουργία των σχετικών τεχνολογικών συστημάτων καθώς και η ανάπτυξη των σχετικών υπολογιστικών και πειραματικών εργαλείων και οργάνων μέτρησης.

Τέτοιες εφαρμογές βρίσκονται σχεδόν σε κάθε κλάδο των επιστημών, της τεχνολογίας και της παραγωγής. Διακρίνουμε δύο τομείς της Πυρηνικής Τεχνολογίας:

- α) τον τομέα παραγωγής ενέργειας (θερμικής ή/και ηλεκτρικής) και
- β) τον τομέα των εφαρμογών στην υγεία, το περιβάλλον, τη βιομηχανία, τις επιστήμες κ.λ.π.

Συνοπτική περιγραφή των κυριοτέρων εφαρμογών δίνεται στο κεφάλαιο 2.13

1.2 Συμβατικές και πυρηνικές μονάδες ηλεκτροπαραγωγής

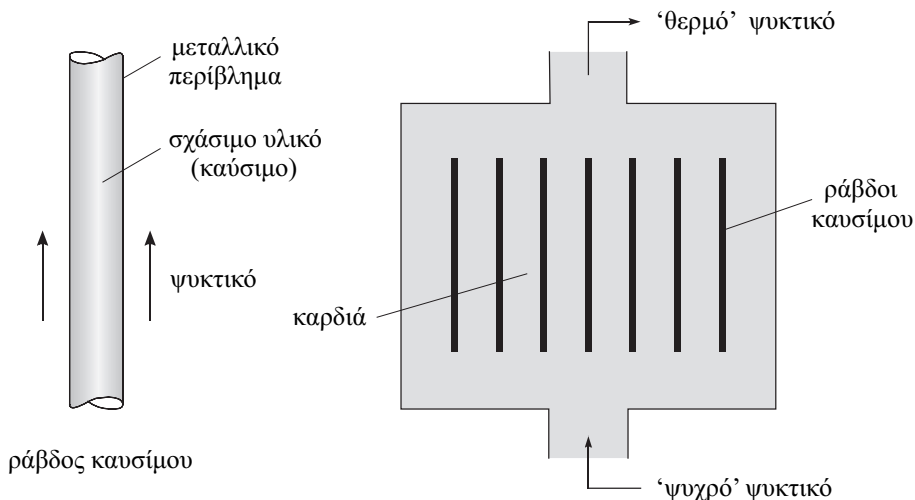
Ακριβής ορισμός των σχάσιμων ισोटόπων δίνεται στο κεφάλαιο 2. Εδώ θα βασιστούμε σε βασικές γνώσεις που έχει ήδη ο σπουδαστής από τα μαθήματα γενικής φυσικής ή ακόμα στις γενικές εγκυκλοπαιδικές γνώσεις του αναγνώστη εφημερίδων, για να κάνουμε ποιοτική σύγκριση συμβατικών και πυρηνικών μονάδων. Ο καθένας έχει ακούσει για το ισότοπο ουράνιο-235 (U-235) και για τη σχάση.

Όταν ένα νετρόνιο συγκρουσθεί με πυρήνα U-235, το πιθανότερο αποτέλεσμα είναι να απορροφηθεί το νετρόνιο από τον πυρήνα του U-235. Προκύπτει έτσι ένας άλλος πυρήνας. Αυτός ονομάζεται σύνθετος πυρήνας και βρίσκεται σε κατάσταση διέγερσης, είναι ασταθής. Ο πιθανότερος τρόπος αποδιέγερσής του είναι η σχάση: ο σύνθετος πυρήνας τεμαχίζεται, συνήθως σε δύο κομμάτια, ελευθερώνοντας ενέργεια και 2 έως 3 νετρόνια. Το μέγιστο ποσοστό αυτής της ενέργειας εμφανίζεται σχεδόν ταυτόχρονα με τη σχάση σαν θερμότητα, πρακτικά στη θέση που έγινε η σχάση. Έστω τώρα ότι το επεισόδιο αυτό της σχάσης πραγματοποιήθηκε μέσα σε υλικό που περιέχει αξιόλογη ποσότητα U-235. Τότε τα νετρόνια της σχάσης προκαλούν και αυτά σχάσεις πυρήνων U-235, που παράγουν και άλλα νετρόνια, που προκαλούν νέες σχάσεις κ.ο.κ. Μπορούμε να πούμε ότι η σχάση, εκτός από την ενέργεια που απελευθερώνει, παράγει το μέσο της αναπαραγωγής της, τα νετρόνια. Προκύπτει έτσι αλυσωτή αντίδραση σχάσεων που μπορεί να είναι αυτοσυντήρητη. Πολλά από τα νετρόνια απορροφώνται σε υλικά του αντιδραστήρα που δεν μπορούν να πάθουν σχάση, που δεν μπορούν να παράγουν άλλα νετρόνια. Οι απορροφήσεις αυτές αποτελούν απώλεια όσο αφορά στην συντήρηση της αλυσωτής αντίδρασης σχάσης.

Διάταξη σχεδιασμένη έτσι ώστε να πραγματοποιείται ελεγχόμενη αυτοσυντήρητη αντίδραση σχάσης ονομάζεται Πυρηνικός Αντιδραστήρας Σχάσης. Δεδομένου ότι στο βιβλίο αυτό δεν θα ασχοληθούμε με τους αντιδραστήρες σύντηξης, ο όρος Πυρηνικός Αντιδραστήρας αναφέρεται στους αντιδραστήρες σχάσης.

Πυρηνικό καύσιμο ή απλά **καύσιμο** ονομάζεται το υλικό που περιέχει τους σχάσιμους πυρήνες. Στους περισσότερους σύγχρονους αντιδραστήρες το καύσιμο τοποθετείται σε μεταλλικό κυλινδρικό περίβλημα με σκοπό τον περιορισμό των ραδιενεργών προϊόντων της σχάσης εντός του περιβλήματος και την ελαχιστοποίηση της διαρροής ραδιενεργών υλικών στο κύκλωμα του αντιδραστήρα. Το περίβλημα μαζί με το καύσιμο που περιέχει ονομάζεται **ράβδος καυσίμου** (σχήμα 1.2.1). Οι σχάσεις πραγματοποιούνται στο σχάσιμο υλικό μέσα στη ράβδο. Το μέγιστο ποσοστό της ενέργειας των σχάσεων εμφανίζεται, όπως είδαμε, ως θερμότητα, πρακτικά στις θέ-

σεις όπου γίνονται οι σχάσεις, δηλαδή μέσα στις ράβδους καυσίμου, πρακτικά ταυτόχρονα με τη σχάση. Γύρω από τις ράβδους του πυρηνικού καυσίμου ρέει κάποιο ψυκτικό (π.χ. νερό, διοξείδιο του άνθρακα, υγρό νάτριο, ήλιο) που απάγει την θερμότητα που παράγεται από τις σχάσεις.

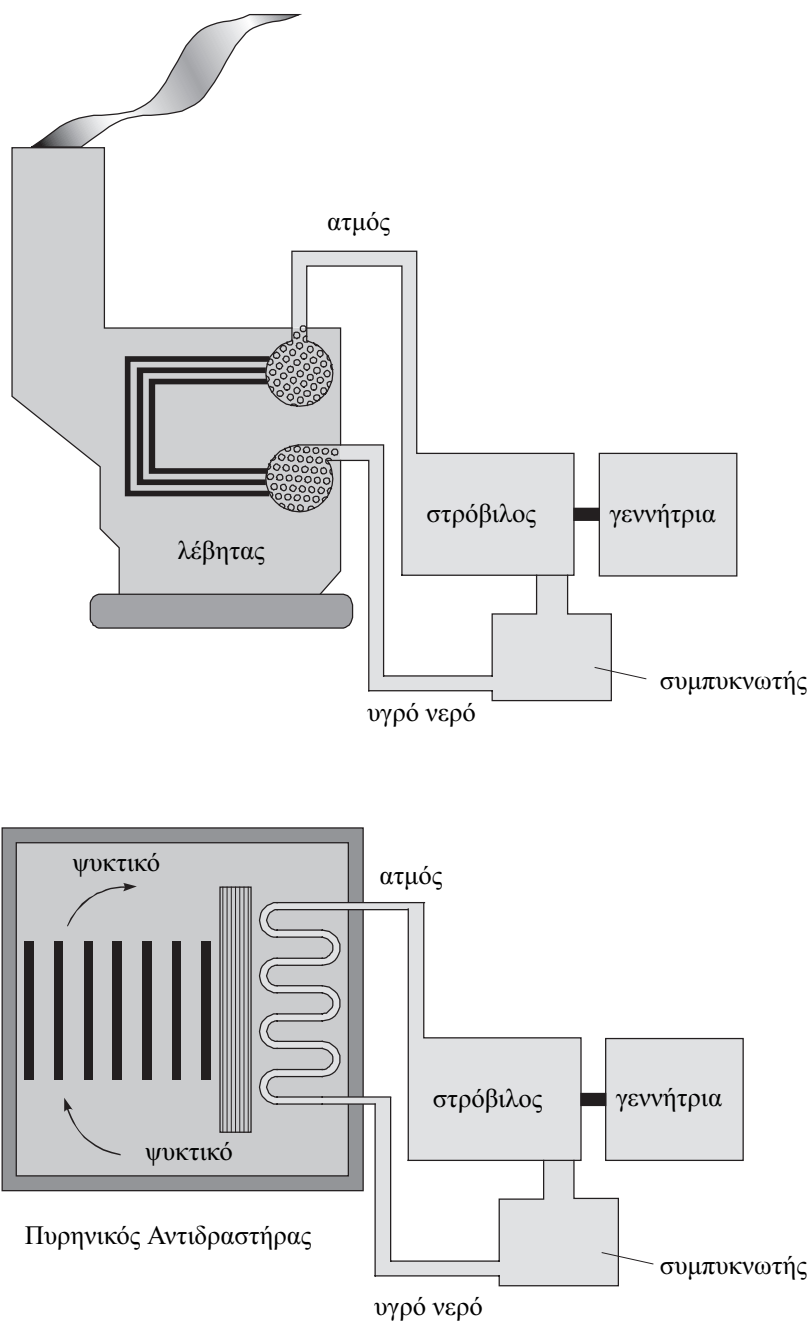


Σχήμα. 1.2.1: Σχηματικό διάγραμμα απαγωγής θερμότητας από την καρδιά αντιδραστήρα.

Οι ράβδοι του καυσίμου είναι τοποθετημένες ή μια δίπλα στην άλλη. Η περιοχή του αντιδραστήρα, όπου βρίσκεται το σχάσιμο υλικό (μέσα στις ράβδους καυσίμου) και πραγματοποιείται η αλυσωτή αντίδραση σχάσης, ονομάζεται **καρδιά ή πυρήνας** του αντιδραστήρα (σχήμα 1.2.1). Το ψυκτικό εισέρχεται σχετικά “ψυχρό” στην καρδιά του αντιδραστήρα και, απάγοντας τη θερμότητα που παράγεται από τις σχάσεις στις ράβδους του καυσίμου, εξέρχεται από την καρδιά σχετικά “θερμό”.

Ο ρόλος του αντιδραστήρα στην ηλεκτροπαραγωγή μονάδα είναι ίδιος με το ρόλο ενός λέβητα συμβατικής μονάδας ηλεκτροπαραγωγής: παραγωγή θερμότητας για την παραγωγή ατμού υψηλής θερμοκρασίας και πίεσης.

Στη συμβατική μονάδα για την παραγωγή θερμικής ενέργειας χρησιμοποιείται ως καύσιμο πετρέλαιο, γαιάνθρακες (κάρβουνο, λιγνίτης) ή φυσικό αέριο. Το καύσιμο καίγεται στον λέβητα (σχήμα 1.2.2α). Στον χώρο του λέβητα βρίσκονται σιδηροί σωλήνες μέσα στους οποίους ρέει νερό. Η θερμική ενέργεια των καυσαερίων της καύσης μεταφέρεται στους σωλήνες, που περιέχουν το νερό, κι απ’ αυτούς στο νερό, με αποτέλεσμα την ατμοποίηση του νερού. Έτσι από τον λέβητα εξέρχεται ατμός υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας. Ο ατμός οδηγείται στην είσοδο του στροβίλου, όπου “χτυπάει τα φτερά” της φτερωτής του στροβίλου και τον κινεί, με αποτέλεσμα



Σχήμα 1.2.2: Απλοποιημένο διάγραμμα (α) συμβατικής και (β) πυρηνικής μονάδας ηλεκτροπαραγωγής.

την περιστροφή του άξονα της φτερωτής. Ο άξονας αυτός είναι συνδεδεμένος με τον άξονα της γεννήτριας ηλεκτρικού ρεύματος. Με την περιστροφή του άξονα της γεννήτριας παράγεται ηλεκτρικό ρεύμα. Ο ατμός στην έξοδο του στροβίλου έχει χαμηλή πίεση και χαμηλή θερμοκρασία. Αυτός οδηγείται στην είσοδο του συμπυκνωτή, ο οποίος στην τεχνική αργκό αποκαλείται “ψυγείο”. Και τούτο διότι μέσα στον συμπυκνωτή υπάρχουν σιδηροσωλήνες μέσα στους οποίους ρέει ψυχρό νερό, με συνέπεια την ψύξη του ατμού και την συμπύκνωση του ατμού σε υγρό νερό. Το νερό αυτό οδηγείται στην είσοδο των σωληνώσεων του λέβητα προκειμένου σε αυτόν να μετασχηματισθεί και πάλι σε ατμό.

Απλοποιημένο διάγραμμα πυρηνικής μονάδας ηλεκτροπαραγωγής παρουσιάζεται στο σχήμα 1.2.2.β. Το ψυκτικό βγαίνει από την καρδιά του αντιδραστήρα σε πολύ υψηλή θερμοκρασία και οδηγείται σε σύστημα που ονομάζεται εναλλάκτης θερμότητας. Εκεί μεταφέρει τη θερμότητα σε κύκλωμα νερού, στο “δευτερεύον κύκλωμα ψυκτικού”, όπως ονομάζεται. Έτσι το νερό του δευτερεύοντος βράζει και παράγεται ατμός. Το ψυκτικό της καρδιάς, έχοντας δώσει τη θερμική του ενέργεια στο δευτερεύον, βγαίνει από τον εναλλάκτη σχετικά “ψυχρό” και επιστρέφει στην είσοδο της καρδιάς για τη συνέχιση της ψύξης της καρδιάς. Το υπόλοιπο κύκλωμα είναι πανομοιότυπο με αυτό της συμβατικής μονάδας : ο ατμός που βγαίνει από το δευτερεύον οδηγείται και κινεί το στροβίλο, στη συνέχεια υγροποιείται στον συμπυκνωτή και στη συνέχεια στην είσοδο του δευτερεύοντος κυκλώματος.

Έτσι, όσον αφορά στο κύκλο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, δεν υπάρχει διαφορά μεταξύ πυρηνικής και συμβατικής μονάδας ηλεκτροπαραγωγής. Εδώ τελειώνουν οι ομοιότητες τους. Οι διαφορές των δύο αυτών μηχανών μετατροπής ενέργειας έχουν αφετηρία στους διαφορετικούς μηχανισμούς με τους οποίους παράγεται η θερμότητα.

Στη συμβατική μονάδα η θερμική ενέργεια παράγεται από εξώθερμες χημικές αντιδράσεις άνθρακα και υδρογόνου με οξυγόνο (καύση). Ο περιοριστικός παράγοντας είναι ο ρυθμός διάχυσης οξυγόνου προς την επιφάνεια του καυσίμου και ο ρυθμός απομάκρυνσης των προϊόντων της καύσης (CO_2 , H_2O) από την επιφάνεια του καυσίμου.

Υπάρχει λοιπόν ανώτατο όριο της ισχύος που μπορεί να παραχθεί ανά μονάδα όγκου του λέβητα, άρα υπάρχει ανώτατο όριο της συνολικής ισχύος που μπορεί να παραχθεί σε λέβητα ορισμένου όγκου. Αν προσθέσουμε περισσότερο όγκο καυσίμου και οξυγόνου, το περίσσειμα πάνω από το ανώτατο όριο θα φύγει από το λέβητα χωρίς να καεί.

Στον πυρηνικό αντιδραστήρα δεν υπάρχει, κατ’ αρχήν, πρακτικά, ανώτατο όριο της θερμικής ισχύος που μπορεί να παραχθεί στο πυρηνικό καύσιμο. Τούτο δε διότι το ανώτατο όριο της πυκνότητας ισχύος, που μπορεί να παραχθεί, είναι τάξεις μεγέθους μεγαλύτερο από τη μέγιστη ικανότητα απαγωγής του από το καύσιμο με τη σύγχρονη τεχνολογία.

Το ανώτατο επιτρεπόμενο όριο παραγωγής θερμικής ισχύος στον αντιδραστήρα, καθορίζεται: (α) από την ανώτατη επιτρεπόμενη θερμοκρασία του υλικού του περιβλήματος των ράβδων καυσίμου και (β) από το όριο θερμικής ισχύος που μπορεί να μεταφερθεί από το καύσιμο στο ψυκτικό. Ωστε, σε αντίθεση με τους λέβητες, στον πυρηνικό αντιδραστήρα η πυκνότητα ισχύος πρέπει να συγκρατηθεί κάτω από ορισμένα επιτρεπόμενα όρια.

Η επόμενη σημαντική διαφορά αφορά στην ασφάλεια των δύο συστημάτων και συνδέεται άμεσα με το μηχανισμό μεταφοράς της θερμότητας.

Στο λέβητα η μέγιστη θερμοκρασία είναι στη φλόγα των αερίων και έχει κάποιο ανώτατο όριο, που υπολογίζεται εύκολα από τη θερμότητα της καύσης και από την ειδική θερμότητα των προϊόντων της καύσης. Στην πράξη η θερμοκρασία της φλόγας είναι πάντα μικρότερη από αυτό το μέγιστο. Αν η ροή του ρευστού διακοπεί (π.χ. με κάποιο έμφραγμα) σε μια από τις σωλήνες, η σωλήνα θα υπερθερμανθεί και το χειρότερο που μπορεί να συμβεί είναι θραύση της σωλήνας και σταμάτημα της μονάδος, με σοβαρές βέβαια οικονομικές συνέπειες.

Στον αντιδραστήρα η θερμότητα παράγεται μέσα στις ράβδους καυσίμου και, όπως είπαμε, πρακτικά δεν υπάρχει ανώτατο όριο της θερμικής ισχύος που μπορεί να παραχθεί. Έτσι, κάποια αθέλητη μεγάλη αύξηση της ισχύος του αντιδραστήρα, ή σημαντική μείωση της ροής του ψυκτικού, μπορεί να οδηγήσει σε αύξηση της θερμοκρασίας πάνω από το σημείο τήξης του περιβλήματος της ράβδου και εισαγωγή στο ψυκτικό των ραδιενεργών προϊόντων της σχάσης. Ακόμα και μετά την παύση της λειτουργίας του αντιδραστήρα εξακολουθεί να παράγεται θερμότητα από τη διάσπαση των ραδιενεργών προϊόντων της σχάσης. Οι συνέπειες ενός τέτοιου ατυχήματος μπορεί να είναι πολύ σοβαρές. Οι απαιτήσεις αξιοπιστίας του συστήματος ψύξης και των υλικών είναι λοιπόν ιδιαίτερα αυστηρές. Ακόμα και αν δεν συμβεί ρύπανση του περιβάλλοντος, οι οικονομικές συνέπειες ενός ατυχήματος μπορεί να είναι μεγάλες.

Προκύπτει έτσι η τελευταία ουσιαστική διαφορά των δύο συστημάτων. Στην πυρηνική μονάδα η ανάγκη για εξαιρετικά προηγμένη τεχνολογία ψύξης, ασφάλειας, συστημάτων έγκαιρης προειδοποίησης, θωράκισης από τις ακτινοβολίες κ.λπ., οδηγούν σε μεγάλο κόστος κατασκευής της μονάδος. Έτσι:

	Πυρηνική μονάδα	Συμβατική μονάδα
Συμβολή κεφαλαίου στο κόστος kWh	2/3 συνολικού	1/3 συνολικού

Το κόστος καυσίμου πάει αντίστροφα. Στη συμβατική μονάδα είναι μεγάλο, στην πυρηνική είναι μικρό. Αυτό μπορούμε να το δούμε από τη σύγκριση των καυσίμων:

1 kg	άνθρακα ή πετρελαίου	δίνει	~ 10	kWh	θερμότητα
1 kg	U-235	δίνει	$\sim 20 \cdot 10^6$	kWh	«
1 kg	φυσικού ουρανίου	δίνει	$\sim 14 \cdot 10^4$	kWh	«

Αυτές είναι οι βασικές διαφορές συμβατικής-πυρηνικής μονάδος. Η τελευταία εξηγεί την τάση για όλο και μεγαλύτερους πυρηνικούς αντιδραστήρες.

Το κύριο αντικείμενο του βιβλίου είναι η παρουσίαση της βασικής θεωρίας που χρειάζεται για την κατανόηση της λειτουργίας, του σχεδιασμού και της δυναμικής συμπεριφοράς των πυρηνικών αντιδραστήρων. Δίνονται ακόμα τα βασικά στοιχεία ακτινοπροστασίας καθώς και οι κυριότερες εφαρμογές της πυρηνικής τεχνολογίας.

2

στοιχεία πυρηνικής φυσικής

Αναπτύσσονται εκείνα τα στοιχεία της πυρηνικής φυσικής, και σε τέτοια έκταση και βάθος, που είναι απαραίτητα για να κατανοήσει κανείς (α) τις σχετικές τεχνολογικές εφαρμογές στην παραγωγή και τις επιστήμες και (β) τη θεωρία και τεχνολογία των πυρηνικών αντιδραστήρων.

Από την ίδια αντίληψη διέπεται και η διάταξη της ύλης. Μετά από σύντομη ποιοτική περιγραφή του ατόμου και του πυρήνα (κεφάλαιο 2.1) εισάγονται αμέσως (κεφάλαιο 2.2) οι έννοιες και οι σχέσεις της ραδιενέργειας και των ραδιοϊσοτόπων. Μετά την εισαγωγή των εννοιών του ελλείμματος μάζας και της ενέργειας σύνδεσης (κεφάλαιο 2.3) περιγράφονται οι πυρηνικές αντιδράσεις, το σχετικό μοντέλο του Bohr (κεφάλαιο 2.4) και τα προϊόντα της σχάσης (κεφάλαιο 2.5). Ακολουθεί η ποσοτική περιγραφή των αντιδράσεων με νετρόνια (διατομές αντιδράσεων, κεφάλαια 2.6 και 2.7), η επιβράδυνση των νετρονίων με ελαστικές σκεδάσεις (κεφάλαιο 2.8) και η περιγραφή της εξάρτησης των διατομών αντιδράσεων από τη θερμοκρασία (φαινόμενο Doppler, κεφάλαιο 2.9). Στο σημείο αυτό ολοκληρώνεται η παρουσίαση των στοιχείων πυρηνικής φυσικής που είναι απαραίτητα για την ανάπτυξη της θεωρίας των αντιδραστήρων και την περιγραφή των εφαρμογών.

Στην περίπτωση διδασκαλίας μαθήματος με αποκλειστικό στόχο τη θεωρία των αντιδραστήρων (ενότητες 3, 4, 5 και 6), είναι δυνατό να παραλειφθούν τα κεφάλαια 2.10 ως και 2.13.

Οι αλληλεπιδράσεις ύλης-ακτινοβολιών (κεφάλαιο 2.10) είναι απαραίτητες για την κατανόηση της ανίχνευσης των ακτινοβολιών (κεφάλαιο 2.11) καθώς και της ακτινοπροστασίας (ενότητα 7). Τέλος, τα φάσματα των ακτινοβολιών (κεφάλαιο 2.12) καθώς και όλα τα προηγούμενα, εκτός των κεφαλαίων 2.8 και 2.9, είναι απαραίτητα για την κατανόηση των εφαρμογών (κεφάλαιο 2.13).

2.1 Άτομο και πυρήνας

Το μικρότερο κομμάτι ύλης που μπορούμε να διακρίνουμε με χημικές μεθόδους ονομάστηκε **άτομο**. Κάθε άτομο αποτελείται από ένα θετικά φορτισμένο πυρήνα, στον οποίο συγκεντρώνεται πρακτικά όλη η μάζα του ατόμου, και από ηλεκτρόνια που κινούνται γύρω από τον **πυρήνα**. Ο χώρος μέσα στον οποίο περιορίζεται η κίνηση των ηλεκτρονίων καθορίζει τις διαστάσεις του ατόμου. Αν φανταστούμε το άτομο σφαιρικό, η ακτίνα του θα είναι περίπου 10^5 φορές μεγαλύτερη από την ακτίνα του πυρήνα (Πίνακας 2.1). Αν μεγεθύνουμε το άτομο του υδρογόνου στις διαστάσεις της γης, το ηλεκτρόνιο του υδρογόνου θα εκινείτο μέσα σε μια σφαίρα σαν τη γη (ακτίνα 6390 km), ενώ ο πυρήνας θα ήταν περιορισμένος σε μια σφαίρα διαμέτρου 130 m στο κέντρο της γης: το άτομο είναι σχεδόν άδειο από μάζα.

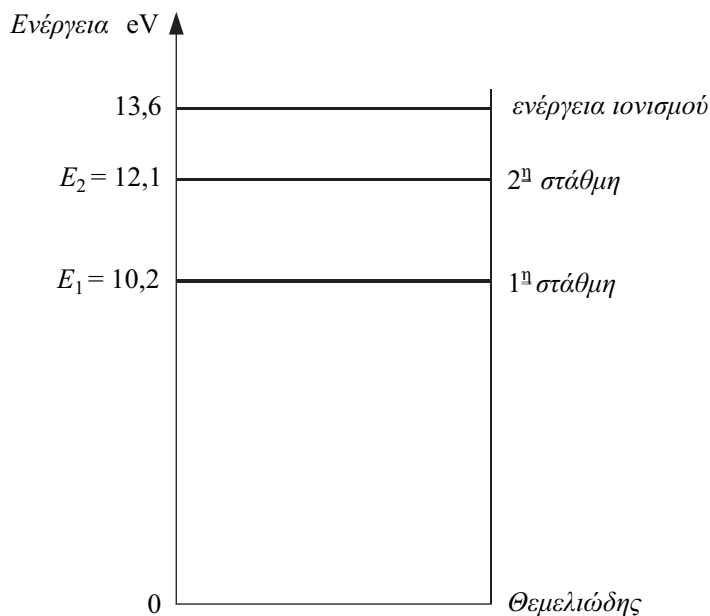
Τα ηλεκτρόνια βρίσκονται μέσα στο ηλεκτρικό πεδίο του θετικά φορτισμένου πυρήνα και έλκονται απ' αυτόν αφού φέρουν αρνητικό φορτίο. Οπότε τίθεται το ερώτημα γιατί δεν πέφτουν πάνω στον πυρήνα, όπως πέφτει πάνω στη γη ένα σώμα που βρίσκεται μέσα στο βαρυτικό πεδίο της γης. Τα ηλεκτρόνια δεν πέφτουν πάνω στον πυρήνα ακριβώς λόγω της μεγάλης ταχύτητας με την οποία κινούνται, όπως δεν πέφτει πάνω στη γη ένας δορυφόρος που κινείται με ικανή ταχύτητα, περιφερόμενος γύρω από τη γη που τον έλκει. Γνωρίζουμε επίσης ότι για να διαφύγει ένα σώμα έξω από το βαρυτικό πεδίο της γης, να «ανεξαρτητοποιηθεί από την γη» πρέπει να αποκτήσει μεγάλη ταχύτητα, μεγαλύτερη από κάποια τιμή. Οι ταχύτητες (ενέργειες) των ηλεκτρονίων στο άτομο είναι αρκετά μεγάλες ώστε, υπό συνήθεις συνθήκες, δεν τα αφήνουν να πέσουν πάνω στον πυρήνα, αλλά επίσης όχι τόσο μεγάλες ώστε «να φύγουν από το άτομο», να βγουν έξω από το ηλεκτρικό πεδίο του πυρήνα που τα έλκει.

Κάθε ηλεκτρόνιο του ατόμου έχει αφ' ενός μεν ηλεκτρική δυναμική ενέργεια λόγω της θέσης του στο ηλεκτρικό πεδίο του ατόμου, αφ' ετέρου δε κινητική ενέργεια λόγω της ταχύτητας με την οποία περιφέρεται περί τον πυρήνα. Η συνολική ενέργεια κάθε ηλεκτρονίου είναι το άθροισμα αυτών των ενεργειών και εξαρτάται από την ακτίνα της τροχιάς που διαγράφει το ηλεκτρόνιο, εξαρτάται δηλαδή από την απόσταση του ηλεκτρονίου από τον πυρήνα.

Το άτομο είναι ένα κβαντομηχανικό σύστημα, πράγμα που συνεπάγεται, μεταξύ άλλων, ότι τα ηλεκτρόνια του ατόμου δεν μπορούν να έχουν οποιαδήποτε ενέργεια, αλλά μόνο διακριτές **επιτρεπόμενες στάθμες ενέργειας**, διαφορετικές για κάθε στοιχείο και χαρακτηριστικές κάθε στοιχείου. Για παράδειγμα άλλες είναι οι επιτρεπόμενες ενεργειακές στάθμες του ηλεκτρονίου του ατόμου του υδρογόνου και άλλες οι επιτρεπόμενες ενεργειακές στάθμες των ηλεκτρονίων του ατόμου του οξυγόνου.

Η κατάσταση του ατόμου με τη μικρότερη από τις επιτρεπόμενες ενέργειες των ηλεκτρονίων είναι η μόνη ευσταθής και ονομάζεται **θεμελιώδης κατάσταση**. Υπό συνήθεις συνθήκες το άτομο βρίσκεται στη θεμελιώδη κατάσταση. Οι άλλες επιτρεπόμενες καταστάσεις είναι μη ευσταθείς και ονομάζονται, και είναι, **καταστάσεις διέγερσης**, οι δε αντίστοιχες ενεργειακές στάθμες ονομάζονται **στάθμες διέγερσης**. Είναι δυνατόν να προσδοθεί σε κάποιο ηλεκτρόνιο του ατόμου εξωτερική ως προς το άτομο ενέργεια, π.χ. με σύγκρουση με άλλο άτομο, και το ηλεκτρόνιο να βρεθεί σε κάποια ενεργειακή στάθμη διέγερσης. Στην κατάσταση αυτή δεν θα παραμείνει ε-σαιεί. Κάποια στιγμή το άτομο θα αποβάλει την περίσσεια ενέργεια εκπέμποντας ένα ή περισσότερα φωτόνια που θα φέρουν αυτήν την περίσσεια ενέργεια και θα επιστρέψει στην ευσταθή θεμελιώδη κατάσταση.

Το απλούστερο άτομο είναι το άτομο του υδρογόνου το οποίο, όπως αναφέρθηκε ήδη, έχει ένα μόνο ηλεκτρόνιο περιφερόμενο περί τον πυρήνα του. Το σχήμα 2.1.1 παρουσιάζει τις στάθμες ενέργειας του ηλεκτρονίου του ατόμου του υδρογόνου. Στο σχηματικό αυτό διάγραμμα σημειώνεται η διαφορά της ενέργειας κάθε στάθμης από την ενέργεια της θεμελιώδους στάθμης.



Σχήμα 2.1.1: Διαφορές ενέργειας κάθε στάθμης του ατόμου του υδρογόνου από τη θεμελιώδη.

Τι θα συμβεί αν κάποιος φορέας ενέργειας επιχειρήσει να προσδώσει ενέργεια σε ηλεκτρόνιο του ατόμου, π.χ. αν το άτομο συγκρουσθεί με κάποιο άλλο άτομο; Αν μεν η προσφερόμενη ενέργεια είναι μικρότερη απ' αυτήν που απαιτείται για να ανέλθει το ηλεκτρόνιο στην πρώτη στάθμη διέγερσης (για το υδρογόνο 10,2 eV), το άτομο θα αγνοήσει τον εξωτερικό φορέα ενέργειας και θα παραμείνει στη θεμελιώδη του κατάσταση. Αν όμως η προσφερόμενη ενέργεια είναι επαρκώς μεγάλη, το ηλεκτρόνιο θα ανέλθει σε στάθμη διέγερσης. Από τη στάθμη αυτή θα επανέλθει στη θεμελιώδη του κατάσταση αποβάλλοντας την περίσσεια ενέργεια συνήθως με εκπομπή φωτονίων. Εφ' εξής, όταν ομιλούμε για ενέργεια στάθμης, εννοούμε τη διαφορά της ενέργειας της στάθμης από την ενέργεια της θεμελιώδους στάθμης.

Έστω ότι το ηλεκτρόνιο του ατόμου του υδρογόνου προσέλαβε, με κάποιο τρόπο, ενέργεια και ανήλθε στη δεύτερη στάθμη, όπου έχει ενέργεια $E_2 = 12,1 \text{ eV}$. Από εκεί θα αποδιεγερθεί και θα επιστρέψει στη θεμελιώδη του κατάσταση με τους εξής δύο πιθανούς τρόπους:

- i) πέφτοντας αρχικά στην πρώτη στάθμη ενέργειας $E_1 = 10,2 \text{ eV}$ με εκπομπή ενός φωτονίου ενέργειας $E_2 - E_1 = 1,9 \text{ eV}$, που είναι στο ορατό «φάσμα» χρώματος κόκκινου. Στη συνέχεια πέφτει από την πρώτη στάθμη στη θεμελιώδη εκπέμποντας ένα φωτόνιο ενέργειας 10,2 eV, που βρίσκεται στο υπεριώδες του φάσματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας.
- ii) πέφτοντας κατ' ευθείαν από τη δεύτερη στάθμη στη θεμελιώδη κατάσταση με εκπομπή ενός φωτονίου ενέργειας 12,1 eV, που βρίσκεται στο υπεριώδες του φάσματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας.

Σε αυτό ακριβώς το φαινόμενο βασίζεται η λειτουργία των λυχνιών φωτισμού. Οι πλέον κοινές και περισσότερο χρησιμοποιούμενες «λάμπες» φωτισμού είναι λυχνίες πυρακτώσεως. Το «συρματάκι» μέσα στη λάμπα είναι μέταλλο (βολφράμιο) και όταν την «ανάβουμε», το διερχόμενο ρεύμα ανεβάζει τη θερμοκρασία του σύρματος, το πυρακτώνει, δηλαδή τα άτομα του σύρματος αποκτούν μεγάλες κινητικές ενέργειες κινούμενα με μεγάλες ταχύτητες τυχαία προς όλες τις κατευθύνσεις (θερμική κίνηση). Ως αποτέλεσμα των συγκρούσεων των ταχέως και τυχαίως κινούμενων ατόμων, τα ηλεκτρόνια των συγκρουόμενων ατόμων ανέρχονται σε στάθμες διέγερσης, από τις οποίες στη συνέχεια αποδιεγείρονται εκπέμποντας φωτόνια στο ορατό φάσμα και έτσι προκύπτει το φως από τη «λάμπα». Στις λυχνίες φθορισμού τα άτομα του φθορίου διεγείρονται με άλλο, πιο αποδοτικό (πιο οικονομικό) σε σχέση με την πυράκτωση, τρόπο και αποδιεγείρονται εκπέμποντας φωτόνια με ενέργειες στο ορατό φάσμα, εκπέμποντας δηλαδή φως.

Η φλόγα της καύσης εκπέμπει φως, διότι τα ταχέως κινούμενα άτομα (ή τα μόρια) των αερίων της καύσης συγκρούονται με αποτέλεσμα την άνοδο ηλεκτρονίων των ατόμων σε στάθμες διέγερσης, απ' όπου αποδιεγείρονται εκπέμποντας φωτόνια στο ορατό φάσμα, εκπέμποντας φως.

Ηλεκτρόνια των ατόμων στοιχείων με μεγάλο ατομικό αριθμό¹, μετά από κατάλληλη διέγερση, αποδιεγείρονται εκπέμποντας φωτόνια με ενέργειες μεγαλύτερες από αυτές του ορατού φάσματος και της υπεριώδους ακτινοβολίας, δηλαδή ενέργειες από 1 ως 100 keV. Όταν ο Roentgen ανακάλυψε αυτήν την ακτινοβολία πριν από το τέλος του 20^{ου} αιώνα, την ονόμασε ακτίνες – X , δηλαδή άγνωστες ακτίνες, διότι ήταν άγνωστη τότε η φύση και η προέλευσή της. Η ονομασία αυτή παρέμεινε. Είναι με δέσμες τέτοιων φωτονίων που γίνονται οι ιατρικές και άλλες ακτινογραφίες, όπως π.χ. στον έλεγχο αποσκευών στα αεροδρόμια. Τούτο δε διότι τα φωτόνια αυτών των ενεργειών έχουν εξαιρετική ικανότητα να διαπερνούν την ύλη, να μην απορροφώνται εύκολα από αυτήν. Η διαπεραστική τους ικανότητα είναι μικρότερη στα μέταλλα και τα οστά. Έτσι όταν μέρος του ανθρώπινου σώματος παρεμβάλλεται μεταξύ δέσμης ακτίνων–X και φωτογραφικού φιλμ, τα φωτόνια διαπερνούν σχεδόν ανεμπόδιστα τη σάρκα και στις αντίστοιχες θέσεις «μαυρίζουν» το φωτογραφικό φιλμ, ενώ διαπερνούν πολύ λιγότερο τα οστά, οπότε στις αντίστοιχες θέσεις το φιλμ «δεν μαυρίζει τόσο», ενώ ο βαθμός της λευκότητάς ή του μαυρίσματος εξαρτάται από το μέγεθος της μάζας διά της οποίας διέρχονται τα φωτόνια της ακτινοβολίας–X. Αποτυπώνεται έτσι στο φιλμ το είδωλο των οστών. Αντίστοιχα αποτυπώνονται στην οθόνη τα είδωλα των μεταλλικών αντικειμένων που βρίσκονται στις διά του ελέγχου διερχόμενες αποσκευές.

Όπως ελέγχθη ήδη, οι ενεργειακές στάθμες είναι μοναδικές για κάθε στοιχείο. Κατά συνέπεια και οι ενέργειες των ακτίνων–X που εκπέμπει κάθε στοιχείο, μετά από κατάλληλη διέγερση, είναι χαρακτηριστικές κάθε στοιχείου, αποτελούν την ταυτότητά του. Εδώ και πολλές δεκαετίες η διαθέσιμη τεχνολογία παρέχει τη δυνατότητα μέτρησης των ενεργειών των ακτίνων–X, αποτύπωσης δηλαδή του ενεργειακού φάσματός τους. Από τα φάσματα αυτά προσδιορίζονται τα στοιχεία που εκπέμπουν τα φωτόνια. Είναι έτσι δυνατόν να προσδιορισθεί η παρουσία ακόμη και ιχνών ενός στοιχείου σε ένα υλικό, ακόμα και αν η αναλογία ατόμων του στοιχείου στο υλικό αυτό είναι ένα στο ένα εκατομμύριο άτομα ή ακόμα και μικρότερη. Η δυνατότητα αυτή, και η αντίστοιχη τεχνολογία, έχει πληθώρα σημαντικών εφαρμογών στην υγεία, τα υλικά και πολλά άλλα.

Αν τώρα σε ηλεκτρόνιο ατόμου προσδοθεί ενέργεια μεγαλύτερη από κάποια τιμή, τότε το ηλεκτρόνιο αυτό είναι δυνατόν να αποσπασθεί από το άτομο, να καταστεί ελεύθερο ηλεκτρόνιο. Κάτι τέτοιο μπορεί π.χ. να γίνει με σύγκρουση του ατόμου με σωματίδιο κινούμενο με μεγάλη ταχύτητα. Όταν ένα ηλεκτρόνιο αποσπασθεί από το άτομο, τότε το άτομο έχει ένα λιγότερο ηλεκτρόνιο από όσα χρειάζεται για να είναι ηλεκτρικά ουδέτερο, οπότε είναι φορτισμένο με το κβάντο του θετικού ηλεκτρικού

¹ Ο ατομικός αριθμός στοιχείου ορίζεται αμέσως πιο κάτω.

φορτίου. Στην κατάσταση αυτή το άτομο είναι **ión²**.

Η απόσπαση ενός ή περισσότερων ηλεκτρονίων από ένα άτομο ονομάζεται **ιοντισμός** του ατόμου, η δε ενέργεια που απαιτείται να προσδοθεί στο ηλεκτρόνιο για τον ιοντισμό ενός συγκεκριμένου ατόμου ονομάζεται **ενέργεια ιοντισμού** του ατόμου αυτού. Π.χ. στο σχήμα 2.1 δηλώνεται ότι η ενέργεια ιοντισμού του ατόμου του υδρογόνου είναι 13,6 eV. Τα ίοντα είναι εξαιρετικά επιρρεπή στην πρόκληση χημικών αντιδράσεων λόγω ακριβώς των ηλεκτρονίων που τους λείπουν.

Τα συστατικά σωματίδια του πυρήνα ονομάζονται **νουκλεόνια** και είναι τα στοιχειώδη σωματίδια πρωτόνιο και νετρόνιο. Για τα περισσότερα φαινόμενα που αφορούν στη θεωρία των αντιδραστήρων μπορούμε να αγνοήσουμε τις κυματικές ιδιότητες των νουκλεονίων και του ηλεκτρονίου και να τα φανταστούμε σαν μικρές σφαίρες. Τα χαρακτηριστικά τους δίνονται στον Πίνακα 2.1.

Πίνακας 2.1: Μεγέθη συστατικών σωματιδίων του ατόμου (τα μεγέθη είναι κατά προσέγγιση, *A*: μαζικός αριθμός, *Z*: ατομικός αριθμός)

Σωματίδιο	Μάζα kg	Φορτίο Coulomb	«Ακτίνα» cm
ηλεκτρόνιο	$9,11 \cdot 10^{-31}$	$-1,6 \cdot 10^{-19}$	
πρωτόνιο	$1,673 \cdot 10^{-27}$	$+1,6 \cdot 10^{-19}$	
νετρόνιο	$1,675 \cdot 10^{-27}$	0	
πυρήνας	$A \cdot 1,67 \cdot 10^{-27}$	$+Z \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}$	$1,2 \cdot 10^{-13} \cdot A^{1/3}$
άτομο	$A \cdot 1,67 \cdot 10^{-27}$	0	$\sim 10^{-8}$

Το **πρωτόνιο** είναι σωματίδιο φορτισμένο θετικά με το κβάντο του ηλεκτρικού φορτίου, δηλαδή με φορτίο ίσο και αντίθετο με το φορτίο του αρνητικού ηλεκτρονίου. Η μάζα του πρωτονίου είναι 1836 περίπου φορές μεγαλύτερη από τη μάζα του ηλεκτρονίου.

Το **νετρόνιο** είναι σωματίδιο ηλεκτρικά ουδέτερο, η μάζα του είναι κατά τι μεγαλύτερη (πρακτικά ίση) με τη μάζα του πρωτονίου. Το νετρόνιο δεν επιβιώνει για πολύ έξω από τον πυρήνα, είναι ασταθές σωματίδιο, διασπάται σε ένα πρωτόνιο και ένα

² Ιόν²: ουδέτερη μετοχή του ρήματος “είμι”, που σημαίνει “πορεύομαι, οδεύω”. Τα ίοντα πήραν αυτό το όνομα διότι, όντας ηλεκτρικά φορτισμένα, υπό την επίδραση ηλεκτρικών δυνάμεων, μετακινούνται (“πορεύονται”).

ηλεκτρόνιο. Η μέση διάρκεια ζωής του ελευθέρου νετρονίου είναι της τάξης των 10 min. Η μέση ταχύτητα των ελευθέρων νετρονίων με τη μικρότερη ενέργεια σ' ένα αντιδραστήρα είναι περίπου 2200 m/s, ενώ η τυπική διάσταση των αντιδραστήρων ισχύος είναι περίπου 4,5 m. Έτσι το «πιο αργό» νετρόνιο διασχίζει τον αντιδραστήρα σε χρόνο της τάξης των 2 ms. Ακόμα, οι αντιδράσεις πυρήνων με νετρόνια πραγματοποιούνται σε χρόνο της τάξης των 10^{-14} s. Η αστάθεια λοιπόν του νετρονίου είναι χωρίς πρακτική σημασία στους αντιδραστήρες και θεωρούμε το νετρόνιο ευσταθές σωματίδιο.

Θεωρώντας τον πυρήνα σφαιρικό και χρησιμοποιώντας τις τιμές του πίνακα βλέπουμε πως η πυκνότητα του πυρήνα είναι της τάξης

$$\frac{A \cdot 1,67 \cdot 10^{-27}}{(1,2 \cdot 10^{-13} \cdot A^{1/3})^3} = 10^{11} \text{ kg/cm}^3 = 10^8 \text{ τόνου/cm}^3$$

δηλαδή κολοσσιαία για την ανθρώπινη κλίμακα.

Αν κοιτάζουμε τον πυρήνα σε σχέση με τις ηλεκτροστατικές δυνάμεις, βλέπουμε ότι οι απωστικές δυνάμεις ανάμεσα στα θετικά φορτισμένα πρωτόνια, που τείνουν να αποσυνθέσουν τον πυρήνα στα συστατικά του, είναι κολοσσιαίες. Δύο εφαπτόμενα πρωτόνια απωθούνται με δύναμη $\sim 6 \cdot 10^7 \text{ N} \cong 6 \cdot 10^3$ τόνων. Τέτοια δύναμη εφαρμοσμένη στη μάζα του πρωτονίου προκαλεί επιτάχυνση 10^{34} m/s^2 . Πρέπει λοιπόν να δεχτούμε ότι στον πυρήνα ασκούνται ελκτικές δυνάμεις τόσο ισχυρές, ώστε να υπερνικούν τις ηλεκτροστατικές και να συγκρατούν τα νουκλεόνια στο μικρό χώρο του πυρήνα. Τις ονομάζουμε **πυρηνικές δυνάμεις** και δεχόμαστε ότι η πυρηνική δύναμη μεταξύ δύο πρωτονίων ή δύο νετρονίων ή μεταξύ πρωτονίου–νετρονίου είναι ίδια. Οι πυρηνικές δυνάμεις είναι μικρής εμβέλειας, διαφορετικά το σύμπαν θα μαζευτόταν σε μία μόνο μπάλα. Γνωρίζουμε ότι έξω από τον πυρήνα επικρατούν οι ηλεκτροστατικές δυνάμεις. Η εμβέλεια της πυρηνικής δύναμης είναι λοιπόν της τάξης μεγέθους του πυρήνα, δηλαδή 10^{-12} cm . Έτσι, ένα νετρόνιο που ταξιδεύει μέσα σε ένα υλικό δεν αισθάνεται την παρουσία του πυρήνα παρά μόνο όταν βρεθεί πολύ κοντά του, θα συνεχίσει να ταξιδεύει σε ευθεία γραμμή μέχρις ότου πέσει πάνω στον πυρήνα. Αντίθετα, ένα πρωτόνιο απωθείται από το θετικό φορτίο του πυρήνα αμέσως μόλις διαπεράσει το σύννεφο των ηλεκτρονίων του ατόμου. Σε αποστάσεις σημαντικά μεγαλύτερες από την ακτίνα του πυρήνα η μόνη δύναμη που ασκείται στο πρωτόνιο είναι η ηλεκτροστατική.

Ο αριθμός Z των πρωτονίων στον πυρήνα καθορίζει τις χημικές ιδιότητες, είναι η χημική ταυτότητα του ατόμου και ονομάζεται **ατομικός αριθμός**. Άτομα που έχουν τον ίδιο ατομικό αριθμό, την ίδια χημική ταυτότητα, αλλά διαφορετικό αριθμό νετρονίων στους πυρήνες τους, ονομάζονται **ισότοπα**.

Ο συνολικός αριθμός νουκλεονίων (πρωτονίων και νετρονίων) στον πυρήνα ονομάζεται **μαζικός αριθμός** και συμβολίζεται με A . Ο αριθμός των νετρονίων στον πυρήνα είναι προφανώς $N = A - Z$. Ισότοπο με μαζικό αριθμό A και ατομικό αριθμό Z συμβολίζεται

$${}_Z^A\text{S} \quad \text{ή και} \quad {}_Z^A\text{S}$$

όπου S είναι το χημικό σύμβολο του στοιχείου, π.χ.

$$\text{ισότοπα ουρανίου} \quad {}_{92}^{233}\text{U}, \quad {}_{92}^{235}\text{U}, \quad {}_{92}^{238}\text{U}$$

Όταν δεν είναι απαραίτητο να δείξουμε τον αριθμό των πρωτονίων γράφουμε

$$\text{π.χ.} \quad \begin{array}{ccc} {}^A\text{S} & \text{ή} & \text{S}-A \\ \text{U-235,} & & \text{U-238} \end{array}$$

Πυρήνες με τον ίδιο μαζικό αριθμό A , αλλά διαφορετικούς ατομικούς αριθμούς Z , ονομάζονται **ισοβαρείς**, ενώ πυρήνες με τον ίδιο αριθμό νετρονίων ονομάζονται **ισότονοι**.

Η πυρηνική ταυτότητα καθορίζεται από τη σύσταση του πυρήνα, δηλαδή από το ζεύγος (Z, N) ή, πράγμα που κάνει το ίδιο, από το ζεύγος (Z, A) . Ονομάζουμε **νουκλίδιο** εκείνη την κατηγορία ατόμων που έχουν την ίδια σύσταση πυρήνα.

Στην κλίμακα του ατόμου είναι λογικό να χρησιμοποιείται αντίστοιχα μικρή μονάδα μάζας και η προφανής επιλογή είναι η μάζα ενός νουκλεονίου. Όπως όμως θα δούμε, η μάζα ενός νουκλεονίου διαφέρει κατά τι από πυρήνα σε πυρήνα, είναι συνάρτηση του μαζικού αριθμού A . Έτσι στη **φυσική κλίμακα**, μονάδα ατομικής μάζας ορίζεται το $1/12$ της μάζας του ισότοπου του άνθρακα C-12

$$\begin{aligned} 1 \text{ u} &= 1/12 \text{ μάζας του C-12} \\ \text{Μονάδα ατομικής μάζας:} &= 1,660438 \cdot 10^{-24} \text{ g} \end{aligned}$$

Από τη σχέση $E = mc^2$ ισοδυναμίας μάζας ενέργειας προκύπτει

$$1 \text{ u} = 931,478 \text{ MeV}$$

Παλαιότερα αντί του u (unit) χρησιμοποιούταν το σύμβολο amu (atomic mass unit).

Στη φύση τα περισσότερα στοιχεία βρίσκονται ως μίγματα ισότόπων σε ορισμένη αναλογία. Έτσι, οι ατομικές μάζες που δίνονται στον περιοδικό πίνακα των στοιχείων, μετρημένες με χημικές μεθόδους, είναι μέσες τιμές των ατομικών μαζών των ισότόπων του στοιχείου.

Στον πίνακα 2.2 δίνεται η ισοτοπική σύσταση, οι ατομικές μάζες των ισοτόπων και η μέση ατομική μάζα μερικών στοιχείων.

Πριν από το 1961 μοναδική κλίμακα ατομικών μαζών ήταν η χημική, στην οποία είχε οριστεί μονάδα ατομικής μάζας το 1/16 του χημικά καθαρού στοιχείου οξυγόνου. Όταν λοιπόν κάνει κανείς υπολογισμούς μαζών, πρέπει να βεβαιωθεί ότι όλα τα δεδομένα εκφράζονται στην ίδια κλίμακα (χημική ή φυσική). Στη φυσική κλίμακα:

μάζα πρωτονίου : 1,007277 u
 μάζα νετρονίου : 1,008665 u
 μάζα ηλεκτρονίου: 0,000548597 u

Πίνακας 2.2: Ισοτοπική σύσταση και μάζες μερικών στοιχείων (φυσική κλίμακα ατομικών μαζών)

στοιχείο	Z	ισότοπο	ισοτοπική αναλογία %	ατομική μάζα (u)	μέση ατομική μάζα στοιχείου (u)
υδρογόνο	1	H-1	99,985	1,007825	1,007997
		H-2	0,015	2,014102	
άνθρακας	6	C-12	98,892	12,000000	12,011151
		C-13	1,108	13,003354	
άζωτο	7	N-14	99,635	14,003074	14,0067
		N-15	0,365	15,000108	
οξυγόνο	8	O-16	99,759	15,994915	15,9994
		O-17	0,037	16,999133	
		O-18	0,204	17,999160	
ουράνιο	92	U-233		233,03950	238,03
		U-235	0,715	235,04393	
		U-238	99,28	238,05076	

Τέλος, με τη σταθερά του Avogadro συνδέονται ποσότητες της ατομικής κλίμακας με ποσότητες μετρημένες στην ανθρώπινη κλίμακα. Η σταθερά αυτή δίνει τον αριθμό μορίων που περιέχονται σε ένα γραμμομόριο οποιασδήποτε χημικής ένωσης (τον αριθμό ατόμων σε ένα γραμμοάτομο μονοατομικού στοιχείου).

σταθερά Avogadro:	φυσική κλίμακα	$N_A = 6,02205 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$
	χημική κλίμακα	$N_A = 6,0232 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$

Ένα μέγεθος που υπολογίζουμε συχνά είναι η πυκνότητα πυρήνων ορισμένου είδους σε ένα υλικό. Αν ρ είναι η πυκνότητα του υλικού (g/cm^3) και MB το μοριακό βάρος της χημικής του ένωσης, ο αριθμός N μορίων ανά cm^3 είναι

$$N = \frac{\rho}{MB} N_A \quad (2.1.1)$$

Από τη χημική σύνθεση του μορίου, την ισοτοπική αναλογία των στοιχείων του μορίου και το N βρίσκουμε την πυκνότητα πυρήνων στο υλικό.

2.2 Ραδιενέργεια

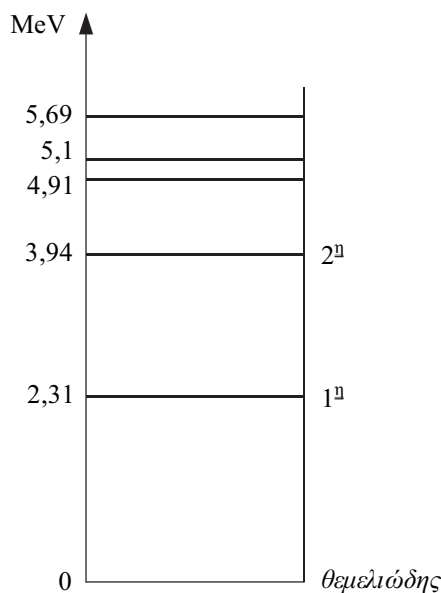
Το σύστημα των νουκλεονίων στην κατάσταση πυρήνας είναι κβαντομηχανικό σύστημα, οπότε η εσωτερική ενέργεια του πυρήνα δεν μπορεί να έχει οποιαδήποτε τιμή: για κάθε είδος πυρήνα υπάρχουν διακριτές επιτρεπόμενες **στάθμες ενέργειας**, χαρακτηριστικές του είδους του πυρήνα. Η κατάσταση με τη μικρότερη από τις επιτρεπόμενες ενέργειες είναι η πιο ευσταθής και ονομάζεται **θεμελιώδης κατάσταση**. Οι υπόλοιπες καταστάσεις ονομάζονται, και είναι, **καταστάσεις διέγερσης**, αφού αργά ή γρήγορα, με κάποιο τρόπο, ο πυρήνας θα μεταβεί στη θεμελιώδη του κατάσταση ελευθερώνοντας την περίσσεια ενέργεια. Οι ενεργειακές στάθμες παριστάνονται με διαγράμματα όπου σημειώνεται η διαφορά της ενέργειας κάθε στάθμης από τη θεμελιώδη, π.χ. οι ενεργειακές στάθμες του πυρήνα του N-14 παριστάνονται στο σχήμα 2.2.1.

Σχετικά μακρόβιες καταστάσεις διέγερσης ονομάζονται **ισομερείς καταστάσεις**.

Πολλοί από τους φυσικούς πυρήνες είναι ασταθείς: παθαίνουν δηλαδή από μόνοι τους, χωρίς καμιά εξωτερική διέγερση, μετατροπή σε κάποιο άλλο πυρήνα εκπέμποντας σωματίδια, ή και μετάβαση από κάποια στάθμη διέγερσης σε κάποια άλλη χαμηλότερη εκπέμποντας φωτόνια. Μιλάμε τότε για **ραδιενεργό διάσπαση** του ασταθούς πυρήνα. Ο διασπώμενος πυρήνας ονομάζεται **μητρικός** και ο πυρήνας που προκύπτει από τη διάσπαση ονομάζεται **θυγατρικός**.

Τα σωματίδια εκπέμπονται με σημαντική ενέργεια και η εκπομπή τους χαρακτηρίζεται **ραδιενεργός ακτινοβολία**. **Ραδιενέργεια** ονομάζεται η ιδιότητα της αυθόρμητης διάσπασης, δηλαδή της διάσπασης χωρίς εξωτερική διέγερση, των ραδιενεργών πυρή-

νων με ταυτόχρονη εκπομπή ραδιενεργών ακτινοβολιών. Ο όρος ραδιενέργεια (radioactivity) αποδόθηκε το 1898 από την Marie Curie για να περιγράψει τη ραδιενεργό συμπεριφορά του ουρανίου και του θορίου που η Curie είχε παρατηρήσει. Η Curie εμπνεύστηκε το μεν πρώτο συνθετικό της λέξης (radio-) από το λατινικό radium που σημαίνει ακτίνα, το δε δεύτερο (-activity=δραστηριότητα) αποδόθηκε στα ελληνικά ως -ενέργεια. Τα ραδιενεργά νουκλίδια αναφέρονται και ως **ραδιονουκλίδια**.



Σχήμα 2.2.1: Ενεργειακές στάθμες πυρήνα N-14

Οι πιο συνηθισμένες ακτινοβολίες, κατά τη διάσπαση φυσικών ραδιενεργών πυρήνων, είναι:

- **εκπομπή σωματιδίων α:** το σωματίδιο α συγκροτείται από δύο πρωτόνια και δύο νετρόνια, είναι δηλαδή πυρήνας ηλίου (${}^4_2\text{He}$). Ο ατομικός αριθμός του θυγατρικού πυρήνα είναι μειωμένος κατά 2 σε σχέση με αυτόν του μητρικού (άρα είναι διαφορετικό χημικό στοιχείο από το μητρικό) και ο μαζικός αριθμός του είναι μειωμένος κατά 4.
- **εκπομπή σωματιδίου β-:** πρόκειται για ηλεκτρόνιο που εκπέμπεται από τον πυρήνα κατά τη μετατροπή ενός νετρονίου του πυρήνα σε πρωτόνιο. Ο ατομικός αριθμός του θυγατρικού πυρήνα είναι αυξημένος κατά 1 σε σχέση με αυτόν του

μητρικού (άρα είναι διαφορετικό χημικό στοιχείο από το μητρικό) και ο μαζικός αριθμός του παραμένει αναλλοίωτος. Η εκπομπή β^- συνοδεύεται από εκπομπή ενός αντινετρίνου.

- **αντινετρίνο:** σωματίδιο μηδενικού ηλεκτρικού φορτίου και μάζας αμελητέας σε σχέση με το ηλεκτρόνιο. Το διάνυσμα του spin του αντινετρίνο είναι αντιπαράλληλο του διανύσματος της ορμής του.
- **εκπομπή ποζιτρονίου β^+ :** το ποζιτρόνιο έχει μάζα ίση με αυτήν του ηλεκτρονίου και ηλεκτρικό φορτίο $+e$, όπου $-e$ το φορτίο του ηλεκτρονίου. Εκπέμπεται κατά τη μετατροπή ενός πρωτονίου του πυρήνα σε νετρόνιο, με ταυτόχρονη εκπομπή ενός νετρίνου. Ο ατομικός αριθμός του θυγατρικού πυρήνα είναι μειωμένος κατά 1 σε σχέση με αυτόν του μητρικού (άρα είναι διαφορετικό χημικό στοιχείο από το μητρικό) και ο μαζικός αριθμός του παραμένει αναλλοίωτος. Η εκπομπή β^- συνοδεύεται από εκπομπή ενός νετρίνου.
- **νετρίνο:** έχει τις ίδιες ιδιότητες με το αντινετρίνο, αλλά το διάνυσμα του spin είναι παράλληλο του διανύσματος της ορμής του.
- **ακτινοβολία γ :** κατά τη μετάβαση ενός πυρήνα από κάποια ενεργειακή στάθμη διέγερσης σε κάποια άλλη χαμηλότερη, εκπέμπεται ένα φωτόνιο ενέργειας ίσης με τη διαφορά των δύο σταθμών (0,1 ως 10 MeV περίπου). Αυτή η μορφή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας ονομάζεται ακτινοβολία γ .

Εκτός από τα φυσικά, υπάρχουν και τεχνητά ραδιενεργά ισότοπα, κατασκευάσματα του ανθρώπου. Μερικά από αυτά διασπώνται με εκπομπή νετρονίου, όπως π.χ. το προϊόν της σχάσης $^{87}_{36}\text{Kr}$.

Σημειώνεται ότι εκτός από τον πυρήνα του ελαφρού υδρογόνου H-1 όλοι οι πυρήνες έχουν $N \geq Z$. Εξαιρώντας και πάλι το H-1, μόνο τα ισότοπα με $Z < N \leq 1,6Z$ είναι ευσταθή και από αυτά όχι όλα. Όλοι οι πυρήνες με ζεύγη (N, Z) έξω από την περιοχή αυτή είναι ασταθείς.

Το φαινόμενο της ραδιενεργού διάσπασης είναι στοχαστικό, όπως εξάλλου όλα τα ατομικά και πυρηνικά φαινόμενα. Για ένα και μόνο ασταθή πυρήνα δεν μπορούμε να πούμε «πότε» θα διασπαστεί. Το μόνο που μπορούμε να προσδιορίσουμε είναι η πιθανότητα διάσπασης. Έχει διαπιστωθεί πειραματικά ότι η πιθανότητα διάσπασης ενός ραδιενεργού πυρήνα στο μικρό χρονικό διάστημα από t σε $t+dt$ είναι χαρακτηριστική του είδους του πυρήνα και ανεξάρτητη της προηγούμενης ζωής του. Έτσι, για ένα μεγάλο πλήθος N ορισμένου είδους πυρήνων, ο ρυθμός διασπάσεων dN/dt είναι ανάλογος του αριθμού $N(t)$ των μητρικών πυρήνων που επιβιώνουν τη χρονική στιγμή t .

$$-\frac{dN(t)}{dt} = \lambda N(t) \quad (2.2.1)$$

όπου η σταθερά αναλογίας λ , είναι χαρακτηριστική του είδους των ραδιενεργών πυρήνων, ονομάζεται **σταθερά διάσπασης** και έχει διαστάσεις (χρόνος)⁻¹. Το αρνητικό σημείο στην (2.2.1) μπαίνει γιατί: με κάθε διάσπαση καταστρέφεται ένας μητρικός πυρήνας και παράγεται ένας θυγατρικός, η μεταβολή dN των μητρικών πυρήνων είναι λοιπόν αρνητική. Η (2.2.1) εκφράζει το θεμελιώδη νόμο των ραδιενεργών διασπάσεων και επιβεβαιώνεται από τις πειραματικές μετρήσεις. Ολοκληρώνοντας την (2.2.1) βρίσκει κανείς εύκολα ότι:

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t} \quad (2.2.2)$$

όπου N_0 είναι ο αριθμός των μητρικών πυρήνων τη στιγμή $t=0$ και $N(t)$ ο αριθμός των μητρικών πυρήνων που επιβιώνουν μέχρι τη στιγμή t . Έτσι, η πιθανότητα $N(t)/N_0$ επιβίωσης ενός πυρήνα επί χρόνο t είναι:

$$\begin{array}{l} \text{πιθανότητα επιβίωσης} \\ \text{επί χρόνο } t \end{array} = e^{-\lambda t} \quad (2.2.3)$$

Αν ένας πυρήνας ζει τη στιγμή t , η πιθανότητα να διασπαστεί στο διάστημα από t σε $t+dt$ είναι $dN/N = \lambda dt$. Ώστε η σταθερά λ δίνει την ανά μονάδα χρόνου πιθανότητα διάσπασης. Η πιθανότητα $p(t)dt$ να επιβιώσει ο πυρήνας επί χρόνο t και να διασπαστεί στο διάστημα από t σε $t+dt$ είναι λοιπόν:

$$p(t) dt = \lambda e^{-\lambda t} dt \quad (2.2.4)$$

Όπως ελέχθη, δεν μπορούμε να προβλέψουμε πότε θα διασπαστεί ένας πυρήνας, μπορούμε όμως να υπολογίσουμε τη **μέση ζωή** τ των πυρήνων ορισμένου είδους. Από τον ορισμό της μέσης τιμής,

$$\tau \equiv \int_0^{\infty} t p(t) dt \quad (2.2.5)$$

και από τις (2.2.4) και (2.2.5) βρίσκει κανείς εύκολα

$$\text{μέση ζωή: } \tau = \frac{1}{\lambda} \quad (2.2.6)$$

Μιλήσαμε στην αρχή για ενεργειακές στάθμες και δώσαμε και παράδειγμα με τις τιμές της ενέργειας E στις στάθμες αυτές. Όπως όμως είναι γνωστό, είναι αδύνατο να προσδιοριστεί με απόλυτη ακρίβεια η ενέργεια E μιας κατάστασης του πυρήνα ακόμα

κι αν διαθέτουμε «ιδανικά», «τέλεια» όργανα. Υπάρχει πάντα μια απροσδιοριστία ΔE για κάθε ενεργειακή στάθμη. Ας θεωρήσουμε ένα πυρήνα σε κάποια στάθμη διέγερσης E , από όπου αποδιεγείρεται εκπέμποντας κάποιο σωματίδιο, με σταθερά διάσπασης λ . Η μέση ζωή $\tau = 1/\lambda$ είναι ο μέσος χρόνος παραμονής του μητρικού πυρήνα στη στάθμη αυτή. Η σχέση ανάμεσα στη ΔE και την τ δίνεται από την αρχή της απροσδιοριστίας του Heisenberg, όπου \hbar η σταθερά του Planck

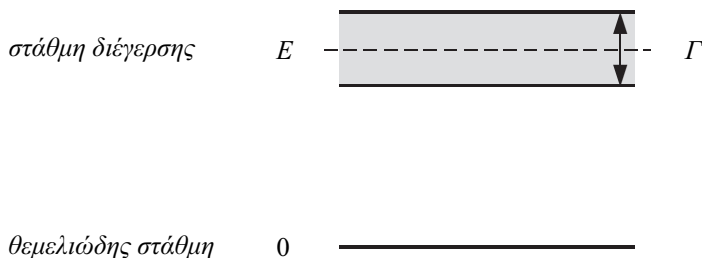
$$\Delta E \cdot \tau \geq \hbar = \frac{h}{2\pi} \quad (2.2.7)$$

$$\Delta E \geq \lambda \cdot \hbar \quad (2.2.8)$$

Το μέγεθος

$$\Gamma \equiv \lambda \hbar \quad (2.2.9)$$

ονομάζεται **πλάτος της στάθμης E** . Από τον ορισμό του είναι φανερό ότι η πιθανότητα αποδιέγερσης από τη στάθμη E είναι ανάλογη του πλάτους Γ . Μια ενεργειακή κατάσταση με μικρή ζωή τ έχει μεγάλο πλάτος Γ , προσδιορίζεται με μεγάλη ανακρίβεια. Αντίθετα, μια μακρόβια κατάσταση έχει μικρό Γ , η ενέργειά της προσδιορίζεται με ακρίβεια.



Σχήμα 2.2.2: Πλάτος Γ της στάθμης E .

Ο **χρόνος υποδιπλασιασμού** ή και **χρόνος ημιζωής** $t_{1/2}$ ορίζεται ως ο χρόνος που χρειάζεται για να διασπαστούν μισοί από τους αρχικούς μητρικούς πυρήνες. Από την (2.2.2) προκύπτει ότι

$$t_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0,693}{\lambda} = 0,693 \tau \quad (2.2.10)$$

Η σταθερά λ (άρα και ο χρόνος $t_{1/2}$) αναφέρεται σε συγκεκριμένο νουκλίδιο (Z, A),

για συγκεκριμένο τρόπο διάσπασης του νουκλίδιου αυτού, π.χ. εκπομπή φωτονίου συγκεκριμένης ενέργειας. Πολλά όμως νουκλίδια μπορούν να διασπαστούν με περισσότερους από ένα τρόπους, π.χ. εκπομπή α και εκπομπή φωτονίων. Κάθε τρόπος διάσπασης i έχει συγκεκριμένη πιθανότητα, άρα και συγκεκριμένη σταθερά διάσπασης λ_i χαρακτηριστική του τρόπου αυτού διάσπασης. Ακόμα, κάθε τρόπος διάσπασης i είναι στατιστικά ανεξάρτητος των υπολοίπων. Άρα η συνολική σταθερά διάσπασης λ , που δίνει την ανά μονάδα χρόνου πιθανότητα να διασπαστεί ο πυρήνας ανεξάρτητα του τρόπου διάσπασης, είναι

$$\lambda = \sum_i \lambda_i \quad (2.2.11)$$

Το **συνολικό πλάτος** Γ μιας ενεργειακής στάθμης που μπορεί να αποδιεγερθεί με περισσότερους από ένα τρόπους i είναι

$$\Gamma = \sum_i \hbar \lambda_i \quad (2.2.12)$$

Ονομάζουμε **μερικό πλάτος** Γ_i για κάθε τρόπο i αποδιέγερσης της στάθμης το μέγεθος

$$\Gamma_i = \hbar \lambda_i \quad (2.2.13)$$

οπότε το συνολικό πλάτος της στάθμης είναι

$$\Gamma = \sum_i \Gamma_i \quad (2.2.14)$$

Η πιθανότητα να διασπαστεί ο πυρήνας είναι ανάλογη του πλάτους Γ , η πιθανότητα η διάσπαση αυτή να είναι του τύπου i είναι ανάλογη του Γ_i/Γ . Και, όπως θα περιμέναμε, η πιθανότητα να συμβεί η διάσπαση τύπου i είναι ανάλογη του:

$$(\text{πιθανότητα να γίνει διάσπαση}) \cdot (\text{πιθανότητα η διάσπαση να είναι } i) = \Gamma \cdot \Gamma_i / \Gamma = \Gamma_i.$$

Ενεργότητα μιας ποσότητας υλικού ονομάζεται ο συνολικός αριθμός διασπάσεων κάθε είδους που συμβαίνουν στην ποσότητα αυτή ανά μονάδα χρόνου. Αν μια ποσότητα υλικού περιέχει ένα μόνο είδος ραδιενεργών πυρήνων και $N(t)$ είναι ο συνολικός αριθμός των πυρήνων αυτών, τότε η ενεργότητα A της ποσότητας είναι $A = -dN/dt$ και από τις (2.2.1) και (2.2.2) προκύπτει,

$$A(t) = -\frac{dN}{dt} = \lambda N = A_0 e^{-\lambda t} \quad (2.2.15)$$

όπου $A_0 \equiv A(0)$ και λ η συνολική σταθερά διάσπασης (2.2.11). Αν η ποσότητα υλικού περιέχει περισσότερα από ένα είδη ραδιενεργών πυρήνων, η ενεργότητα της πο-

σότητας αυτής είναι το άθροισμα των ενεργοτήτων όλων των ραδιενεργών πυρήνων που περιέχονται σε αυτήν. Η ενεργότητα μιας ποσότητας υλικών είναι προφανώς συνάρτηση του χρόνου (Σχήμα 2.2.3).

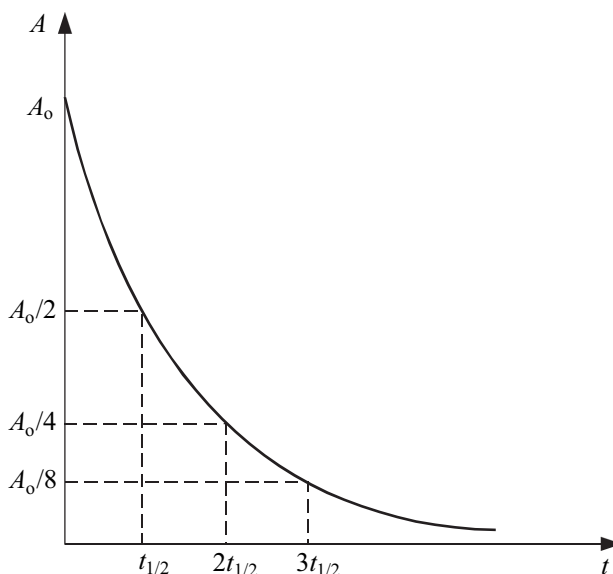
Η σύγχρονη μονάδα ενεργότητας στο σύστημα μονάδων SI είναι το Becquerel (σύμβολο Bq) που ορίζεται

$$1 \text{ Bq} = 1 \text{ διάσπαση/s}$$

Το Bq είναι προφανώς μικρή μονάδα και γι' αυτό χρησιμοποιούνται πολλαπλάσιά του όπως το $\text{kBq} = 10^3 \text{ Bq}$, το $\text{MBq} = 10^6 \text{ Bq}$ και το $\text{TBq} = 10^{12} \text{ Bq}$. Παλαιότερη μονάδα ενεργότητας, η οποία όμως συνεχίζει να χρησιμοποιείται, είναι το Curie (σύμβολο Ci).

$$1 \text{ Ci} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ διασπάσεις/s} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Bq}$$

Το Ci είναι προφανώς μεγάλη μονάδα και γι' αυτό χρησιμοποιούνται τα υποπολλαπλάσιά του: $1 \text{ mCi} = 10^{-3} \text{ Ci}$ και $1 \mu\text{Ci} = 10^{-6} \text{ Ci}$. Η ενεργότητα μιας ποσότητας υλικού εκφρασμένη σε Ci ή Bq δίνει το συνολικό ρυθμό διασπάσεων, δεν περιέχει όμως καμιά πληροφορία σχετικά με το είδος ακτινοβολιών που εκπέμπονται ή τις πιθανές βιολογικές ή άλλες επιπτώσεις.



Σχήμα 2.2.3: Η ενεργότητα A μειώνεται με το χρόνο t : υποδιπλασιάζεται σε διάστημα ενός χρόνου ημιζωής $t_{1/2}$.