

Φυσική Ακτινοβολιών και Εφαρμογές Ραδιοϊσοτόπων

Κων. Φ. Παπαστεφάνου

Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Γ' ΕΚΔΟΣΗ



Κάθε γνήσιο αντίτυπο φέρει την υπογραφή του συγγραφέα

ISBN 960-431-709-1

© Copyright: Κ. Παπαστεφάνου, Εκδόσεις Ζήτη, Απρίλιος 2001, Θεσσαλονίκη

*Απαγορεύεται η με κάθε τρόπο αντιγραφή ή αναπαραγωγή μέρους ή όλου του βιβλίου
χωρίς την έγγραφη άδεια του συγγραφέα και του εκδότη.*



www.ziti.gr

**Φωτοστοιχειοθεσία
Εκτύπωση**

Π. ΖΗΤΗ & Σια ΟΕ

18ο χλμ Θεσ/νύκης-Περαίας
Τ.Θ. 171 • Νέοι Επιβάτες Θεσσαλονίκης • Τ.Κ. 570 19
Τηλ.: 0392-72.222 (3 γραμ.) - Fax: 0392-72.229
e-mail: info@ziti.gr

Βιβλιοπωλείο

ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΖΗΤΗ

Αρμενοπούλου 27 • 546 35 Θεσσαλονίκη
Τηλ. (031) 203.720, Fax (031) 211.305
e-mail: sales@ziti.gr

Σχήμα εξωφύλλου

Παραγωγή της δευτερογενούς συνιστώσας της κοσμικής ακτινοβολίας. Ο ανοιχτός κύκλος παριστάνει ένα πυρήνα στον αέρα (ατμόσφαιρα). Οι μικροί πλήρεις κύκλοι παριστάνουν πυρήνες που παίρνουν μέρος σε δευτερογενείς αντιδράσεις. Με N_L και N_H σημειώνονται τα νουκλεόνια χαμηλής και υψηλής ενέργειας, αντίστοιχα. Τα πιόνια και τα μόνια παριστάνονται με τα σύμβολά τους π και μ , τα ποζιτρόνια και τα ηλεκτρόνια με e^+ και e^- και τέλος τα φωτόνια με γ .

Στη Χαίρω

Εὐφράνθητι, ἔρημος διψῶσα, ἀγαλλιάσθω ἔρημος καὶ ἀνθήτω ὡς κρίνον,
καὶ ἐξανθήσει καὶ ὑλοχαρήσει καὶ ἀγαλλιάσεται ... ὅτι ἐρράγη ἐν τῇ ἐρήμῳ
ὕδωρ καὶ φάραγξ ἐν γῆ διψώση· καὶ ἔσται ἡ ἄνυδρος εἰς ἔλη καὶ εἰς τὴν
διψῶσαν γῆν πηγὴ ὕδατος ἔσται.

Ἡσαΐας λε' 1, 2, 6, 7

Πρόλογος

Η ύλη αυτού του βιβλίου είναι το αποτέλεσμα της πολυετούς (από το 1980) εμπειρίας που αποκτήθηκε στη διδασκαλία του μαθήματος «Φυσικής Ακτινοβολιών και Εφαρμογές Ραδιοϊσοτόπων». Στην αρχή ξεκίνησε με τη μορφή φοιτητικών σημειώσεων (1980 και 1986), γιατί αφορούσε και εξακολουθεί να αφορά τους φοιτητές του τμήματος Φυσικής, αλλά και άλλων τμημάτων του Πανεπιστημίου, π.χ. του Τμήματος Γεωλογίας, του Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών, της Ιατρικής Σχολής, της Γεωπονικής Σχολής ως και του Τμήματος Αρχαιολογίας. Θα έλεγα ότι ενδιαφέρει όλους τους επιστήμονες, ανεξάρτητα από την ειδικότητά τους, που χρησιμοποιούν στη δουλειά τους ακτινοβολίες (occupational), αλλά και αυτούς που εκτίθενται στις ακτινοβολίες ευρισκόμενοι σε χώρους επισημασμένους με την ένδειξη: «Προσοχή. Έκθεση στην Ακτινοβολία», χωρίς επαγγελματικά να έχουν καμία σχέση με ακτινοβολίες (non-occupational).

Ίσως δεν υπάρχει σήμερα έστω μία Επιστήμη που να μη χρησιμοποιεί τις ακτινοβολίες σε κάποιο τομέα. Γύρω μας, στο σπίτι, στο γραφείο, στο χώρο εργασίας, ακόμα και στο ύπαιθρο ή στο αεροπλάνο όταν πετάμε (πολύ περισσότερο με το Atlantis, όλο και σε κάποια ακτινοβολία θα βρεθούμε ανύποπτα εκτεθειμένοι. Και μόνον όταν τη χρειαστούμε για τη διάγνωση ή τη θεραπεία κάποιας σοβαρής αρρώστειας στο νοσοκομείο θα κάνουμε λόγο γι' αυτήν.

Καιρός λοιπόν είναι να μάθουμε κάτι παραπάνω για τις ακτινοβολίες και να μη ζήσουμε ποτέ στιγμές πανικού, όπως τότε με το ατύχημα του Τσερνομπίλ (Μάης '86).

Μία μόνο λέξη, τέλος, ή έκφραση εκτίμησης, από τη θέση αυτή, δεν μπορεί να αντανakλά επαρκώς την ευγνωμοσύνη μου στη σύζυγό μου Χάιδω για την ηθική της συμπαράσταση και την κατανόηση για τριάντα χρόνια γεμάτα μόχθο και στα παιδιά μου Πέρη και Φώτη που κατάφεραν να είναι πάντοτε ευχάριστα, να είναι η διασκέδασή μου.

Η έκδοση αυτή είναι η τρίτη κατά σειρά με κάποιες αλλαγές ως προς τις δύο προηγούμενες εκδόσεις, Α (1989) και Β (1992), αντίστοιχα.

Κ. Παπαστεφάνου
20.3.2001

Περιεχόμενα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ Ι

Εισαγωγικές έννοιες ατομικής και πυρηνικής φυσικής

1.1	Άτομο και Ατομικά πρότυπα	13
1.2.	Συστατικά του ατόμου	17
	α. Το ηλεκτρόνιο	18
	β. Ο πυρήνας	19
1.3.	Πυρηνική δομή	21
	α. Διάσταση του πυρήνα	21
	β. Ισότοπα στοιχεία	22
	γ. Έλλειμμα μάζας και ενέργεια σύνδεσης του πυρήνα	23
	δ. Πυρηνικές δυνάμεις	26
	ε. Πυρηνικά πρότυπα	28

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΙΙ

Ραδιενέργεια

2.1.	Εισαγωγή	29
2.2.	Ραδιενεργός διάσπαση	29
2.3.	Μονάδες ραδιενέργειας	33
2.4.	Ραδιενεργός ισορροπία	34
2.5.	Φυσική Ραδιενέργεια	37
2.6.	Πυρηνική Σχάση	41
2.7.	Πυρηνική Σύντηξη	45
2.8.	Ραδιενέργεια Υποστρώματος	49
2.9.	«Εξωτική» ραδιενέργεια	51
2.10.	«Αόρατη» Ραδιενέργεια	53
2.11.	Επαγόμενη ραδιενέργεια από τους επιταχυντές σωματιδίων υψηλών ενεργειών	53

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΙΙΙ

Πυρηνικές ακτινοβολίες

3.1.	Φύση των Πυρηνικών Ακτινοβολιών	61
3.2.	Ακτινοβολία άλφα	62

3.3. Άλφα διάσπαση	68
3.4. Ακτινοβολία βήτα	71
3.5. Βήτα διάσπαση	75
3.6. Ηλεκτρόνια Auger	79
3.7. Ακτινοβολία γάμμα	80
3.8. Γάμμα διάσπαση	82
3.9. Αλληλεπίδραση της ακτινοβολίας γάμμα με την ύλη	86
α. Φωτοηλεκτρικό φαινόμενο	87
β. Φαινόμενο Compton	88
γ. Δίδυμη γένεση	89
3.10. Απορρόφηση των ακτίνων γάμμα	91
3.11. Εξαύλωση	92
3.12. Ηλεκτρόνια εσωτερικών μετατροπών (Internal conversion electrons)	93
3.13. Δίδυμη γένεση από εσωτερική μετατροπή	95
3.14. Ακτινοβολία νετρονίων	96

ΚΕΦΑΛΑΙΟ IV

Μη πυρηνικές ακτινοβολίες

4.1. Εισαγωγή	103
4.2. Ακτίνες δέλτα	103
Καθοδικές ακτίνες	104
Διαυλικές ακτίνες	104
4.3. Ακτινοβολία πέδησης (Bremsstrahlung)	105
4.4. Ακτινοβολία Čerenkov	106
4.5. Ακτίνες X	108
4.6. Ακτινοβολία μικροκυμάτων - ραδιοσυχνοτήτων	111
4.7. Ακτίνες Laser	112
4.8. Υπεριώδης ακτινοβολία (Ultraviolet radiation, UVR)	114
4.9. Ακτινοβολία υπερήχων (Ultrasound)	115
4.10. Κοσμική ακτινοβολία	116
4.11 Ακτινοβολίες από στοιχειώδη σώματα	119

ΚΕΦΑΛΑΙΟ V

Ανιχνευτές πυρηνικών ακτινοβολιών

5.1. Εισαγωγή	123
5.2. Ανιχνευτής Geiger - Müller	124
5.3. Απαριθμητής Σπινθηρισμών (Scintillation detector)	127

5.4. Απαριθμητές Ge, Ge-Li και Si-Li	131
5.5. Πλαστικοί ανιχνευτές ιχνών (Nuclear track detectors)	136
5.6. Απαριθμητές θερμοφωταύγειας	137
5.7. Απαριθμητής νετρονίων BF_3	137
5.8. Φορητά όργανα ανίχνευσης πυρηνικών ακτινοβολιών (Survey meters)	139
5.9. Δοσίμετρα	140

ΚΕΦΑΛΑΙΟ VI

Προσδιορισμός Ραδιενεργών Συγκεντρώσεων και Ενεργοτήτων

6.1. Ενεργοποίηση με νετρόνια (Instrumental neutron activation analysis, INAA)	143
6.2. Προσδιορισμός του Ουρανίου με τη μέθοδο των «καθυστερημένων» νετρονίων (Delayed neutron activation analysis, DNAA)	146
6.3. Προσδιορισμός του Ουρανίου σε ορυκτά με τη μέθοδο εγγραφής ιχνών σχάσης (Nuclear fission track method)	147
6.4. Μέθοδος ανάλυσης φθορισμού με ακτίνες-X (X-ray fluorescence) ..	148

ΚΕΦΑΛΑΙΟ VII

Ραδιοχρονολογήσεις

7.1. Εισαγωγή	151
7.2. Ηλικία της Ύλης	153
7.3. Γενική αρχή των ραδιοχρονολογήσεων	154
7.4. Ταξινόμηση των μεθόδων των ραδιοχρονολογήσεων	156
7.5. Μέθοδος Ηλίου	157
7.6. Μέθοδος Μολύβδου	158
7.7. Μέθοδος Ουρανίου - Θορίου (^{234}U - ^{230}Th method of dating)	160
7.8. Μέθοδος Ραδίου - Θορίου (^{228}Ra - ^{228}Th method of dating)	162
7.9. Μέθοδος Καλίου - Αργού	163
7.10. Μέθοδος Ρουβιδίου - Στροντίου	165
7.11. Μέθοδος Ρενίου - Οσμίου	165
7.12. Μέθοδος Λουτετίου - Χαφνίου	166
7.13. Μέθοδος Τριτίου - Άνθρακα (TRICARB)	167
α. Μέθοδος άνθρακα-14	167
β. Μέθοδος τριτίου	171
7.14. Μέθοδος εγγραφής ιχνών σχάσης (FT dating)	173
7.15. Μέθοδος θερμοφωταύγειας (Thermoluminescence, TL dating) Εισαγωγή στο φαινόμενο της θερμοφωταύγειας	174
α. Φωτοκαμπύλη	176

β. Μέτρηση της θερμοφωταύγειας	178
γ. Η θερμοφωταύγεια σαν συνάρτηση της δόσης	179
δ. Δοσιμετρία με θερμοφωταύγεια	180
ε. Χρονολόγηση με θερμοφωταύγεια	181
7.16. Μέθοδος συντονισμού του σπιν του ηλεκτρονίου (ESR dating)	184
7.17. Μέθοδος των αμινοξέων (Amino acid racemisation dating)	186

ΚΕΦΑΛΑΙΟ VII

Εφαρμογές των ραδιοϊσοτόπων στη Γεωλογία

8.1 Έρευνα για την ανεύρεση μεταλλευμάτων και ορυκτών	189
8.2. Ραδιοίχνηθέντες στην Υδρολογία	191
8.3. Προσδιορισμός Παλαιοθερμοκρασιών με ^{18}O	193
8.4. Το ραδόνιο στην πρόβλεψη των σεισμών	194

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΙΧ

Εφαρμογές των ακτινοβολιών στην Ιατρική

9.1. Εισαγωγή	199
9.2. Τα ραδιοϊσότοπα στην Ακτινοδιαγνωστική	199
9.3. Γεννήτριες νουκλιδίων	201
9.4. Σπινθηρογραφία (Nuclear imaging)	204
9.5. Ισότοπα και ακτινοβολίες στην Ακτινοθεραπεία	207
α. Εσωτερικές πηγές θεραπείες	207
β. Εξωτερική ακτινοβόληση με πηγές - ραδιοτηλεθεραπεία	208
9.6. Διάφορες χρήσεις ραδιοϊσοτόπων στην Ιατρική	211

ΚΕΦΑΛΑΙΟ Χ

Φυσικές εφαρμογές των ιονίζουσών ακτινοβολιών

10.1. Εισαγωγή	215
10.2. Διασπορά στατικού ηλεκτρισμού. Αλεξικέρανο ιονισμού	215
10.3. Μέτρηση κενού	219
10.4. Σωλήνες εκφόρτισης	220
10.5. Ανιχνευτές καπνού	220
10.6. Μέτρηση της ταχύτητας του αέρα	221
10.7. Οξονιστήρες	221
10.8. Ηλεκτρικές γεννήτριες	222
10.9. Γεννήτριες παραγωγής φωτός	222
10.10. Μέτρηση υψηλών ηλεκτρικών αντιστάσεων	223

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΧΙ

Εφαρμογές των ραδιοϊσοτόπων στην Τεχνολογία

11.1. Εισαγωγή	225
11.2. Συνεχής μέτρηση πάχους μεταλλικών φύλλων	225
11.3. Προβλήματα στερεάς διάχυσης των μετάλλων	227
11.4. Ακτινογραφίες μεταλλικών εξαρτημάτων. Ραδιογραφία και αυτοραδιογραφία	227
11.5. Διάφορες εφαρμογές των ραδιοϊσοτόπων	228

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΧΙΙ

Πυρηνική Ενέργεια

12.1. Σταθμοί της Πυρηνικής Ενέργειας	231
12.2. Πυρηνικοί αντιδραστήρες σχάσης (Fission reactors)	233
α. Αντιδραστήρες ελαφρού ύδατος (Light-Water Reactors, LWR) ..	233
β. Θερμικοί αντιδραστήρες ψυχόμενοι δι' αερίου (Gas Cooled Thermal Reactors, GCR)	235
γ. Αντιδραστήρες βαρέος ύδατος (Heavy Water Reactors, HWR) ..	236
δ. Αναπαραγωγικοί αντιδραστήρες (Breeder reactors)	237
12.3. Αντιδραστήρες πυρηνικής σύντηξης (Fusion reactors)	240
12.4. Ραδιενεργά κατάλοιπα (Radioactive wastes)	242
12.5. Πυρηνικά ατυχήματα (Nuclear accidents)	243
12.6. Πυρηνικά όπλα (Nuclear weapons)	244

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΧΙΙΙ

Αρχές προστασίας από τις ακτινοβολίες (Ραδιοπροστασία)

13.1. Διέλευση βαρέων φορτισμένων σωματιδίων, ακτίνων γάμμα και ακτίνων-X δια μέσου της ύλης	249
13.2. Δόση από ακτινοβολία	251
α. Δόση έκθεσης	251
β. Δόση απορρόφησης	252
γ. Ισοδύναμη δόση	252
δ. Ενεργός ισοδύναμη δόση	254
ε. Δόση πληθυσμού	254
στ. Kerma	254
ζ. LET	254
η. Μέγιστη επιτρεπτή δόση	255
13.3. Δόση από έκθεση σε φυσικές και μη πηγές ακτινοβολίας	256
13.4. Βιολογικά φαινόμενα και επιπτώσεις από την έκθεση στην ακτινοβολία. Σύνδρομο οξείας ακτινοβολήσης	258

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΧΙΥ

Μέθοδοι παραγωγής ραδιοϊσοτόπων

14.1. Μέθοδοι παραγωγής ραδιοϊσοτόπων	261
α. Με n, γ αντίδραση στους πυρηνικούς αντιδραστήρες	261
β. Ως παράγωγα της σχάσης του ^{235}U με θερμικά νετρόνια στος πυρηνικούς αντιδραστήρες	262
γ. Βαρέα υπερουράνια ισότοπα με πολλαπλή αρπαγή νετρονίων (multiple n-capture) και στη συνέχεια με ραδιενεργό διάσπαση των ενδιάμεσων βραχύβιων ισοτόπων	262
δ. Με βομβαρδισμό σταθερών ισοτόπων με πρωτόνια, νετρόνια, δευτερόνια, σωματίια άλφα ή και ελαφρούς πυρήνες, π.χ. ^3He σε επιταχυντές	262
ε. Βραχύβια ισότοπα με γεννήτριες νουκλιδίων	263
14.2. Μέθοδοι παρασκευής ραδιενεργών πηγών	263

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

ΠΙΝΑΚΕΣ

Θεμελιώδεις Φυσικές Σταθερές	271
Πίνακας I. Ενέργειες σωματίων άλφα χρησιμοποιούμενες ως αναφορά στην φασματοσκοπία ακτίνων-α	272
Πίνακας II. Ενέργειες ηλεκτρονίων χρησιμοποιούμενες ως αναφορά στη φασματοσκοπία ακτίνων-β	274
Πίνακας III. Ενέργειες φωτονίων γάμμα χρησιμοποιούμενες ως αναφορά στη φασματοσκοπία των ακτίνων-γ	276
Πίνακας IV. Μαζικός συντελεστής εξασθένησης (μ/ρ) διαφόρων υλικών	280
Πίνακας V. Μαζικός συντελεστής απορρόφησης (μ_a/ρ) διαφόρων υλικών	282
Πίνακας VI. Ενεργοί διατομές διαφόρων νουκλιδίων	284
Πίνακας VII. Αντιστοιχία μονάδων σε τρία συστήματα μονάδων	285
Πίνακας VIII. Ενέργειες σύνδεσης των ηλεκτρονίων	286
Πίνακας IX. Ενέργειες ακτίνων-X και σχετικές εντάσεις	289
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	293
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΝΝΟΙΩΝ	297

Εισαγωγικές έννοιες Ατομικής και Πυρηνικής Φυσικής

1.1 Άτομο και Ατομικά πρότυπα

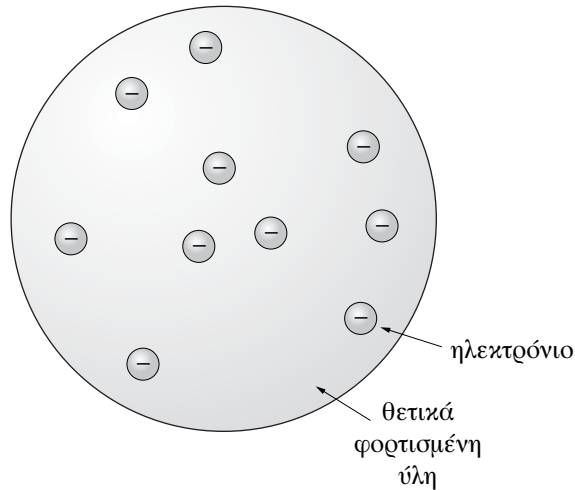
Η ύλη αποτελείται από άτομα*. Από τον 19ο αιώνα επικρατεί η αντίληψη ότι τα χημικά στοιχεία αποτελούνται από άτομα. Συνεπώς το άτομο θεωρείται ότι είναι η στοιχειώδης μονάδα της ύλης, αλλά τίποτε περισσότερο δεν ήταν γνωστό για τα άτομα αυτά καθεαυτά. Οι πρώτες απόψεις πάνω στη δομή και την συγκρότηση του ατόμου γίνονται μετά την ανακάλυψη του ηλεκτρονίου, της στοιχειώδους μονάδας του ηλεκτρισμού, με τα πειράματα των J.J. Thomson (1857) και R. Millikan (1909). Τα ηλεκτρόνια περιέχουν αρνητικό ηλεκτρικό φορτίο, ενώ τα άτομα εμφανίζονται ηλεκτρικώς ουδέτερα. Συνεπώς τα άτομα θα πρέπει να περιέχουν διάχυτο θετικό φορτίο ισοδύναμο προς εκείνο των ηλεκτρονίων.

Το πρώτο ατομικό πρότυπο προτάθηκε το 1897 από τον J.J. Thomson, σαν μια συμπαγής σφαίρα διαμέτρου $\sim 10^{-8}$ cm, θετικά φορτισμένης ύλης, στην οποία το αρνητικό φορτίο –τα ηλεκτρόνια είναι κατεσπαρμένα, Σχ. 1.1. Τα ηλεκτρόνια είναι ομοιόμορφα κατανεμημένα λόγω των αμοιβαίων απώσεων. Το πρότυπο αυτό δεν επέζησε πάνω από 13 χρόνια, καθ' όσον δεν μπορούσε να εξηγήσει αρκετά φαινόμενα, όπως π.χ. το διαπερατό λεπτόν μεταλλικών φύλλων από τις καθοδικές ακτίνες, ενώ εξηγούσε την εκπομπή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας από διεγερμένα άτομα.

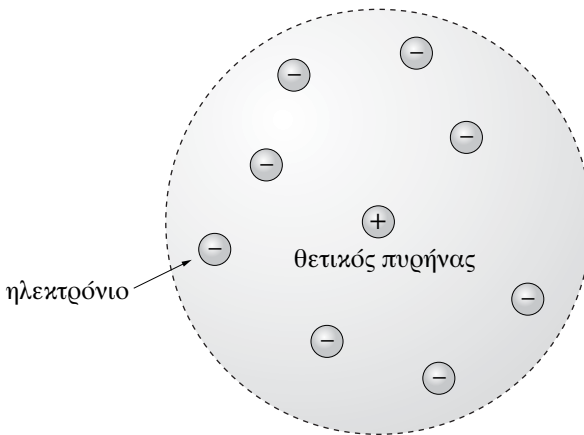
Το 1911, ο Ernest Rutherford βασιζόμενος σε πειράματα σκέδασης των ακτίνων άλφα από λεπτά μεταλλικά φύλλα (π.χ. φύλλα Au), που έκαναν οι συνεργάτες του H. Geiger και E. Marsden, πρότεινε ένα δεύτερο πρότυπο για το άτομο, που ταυτόχρονα εύρισκε ακατάλληλο ή καταργούσε πλέον το πρότυπο ατόμου του Thomson. Κατά τον Rutherford, θα πρέπει στο κέντρο του ατόμου να υπάρχει μια περιοχή συμπυκνωμένης ύλης που θα περιλαμβάνει όλη την μάζα και το θετικό φορτίο του ατόμου. Αυτή η περιοχή, ο πυρήνας δηλαδή, στο κέντρο του ατόμου, βρέθηκε από τα πειράματά τους να έχει διαστάσεις $\sim 10^{-12}$ cm, ενώ

* Την έννοια του ατόμου θεμελίωσε ο Δημόκριτος (470-360 π.Χ.).

τα ηλεκτρόνια βρίσκονται πολύ μακριά από τον πυρήνα, όπως ακριβώς οι πλανήτες γύρω από τον Ήλιο, Σχ. 1.2.



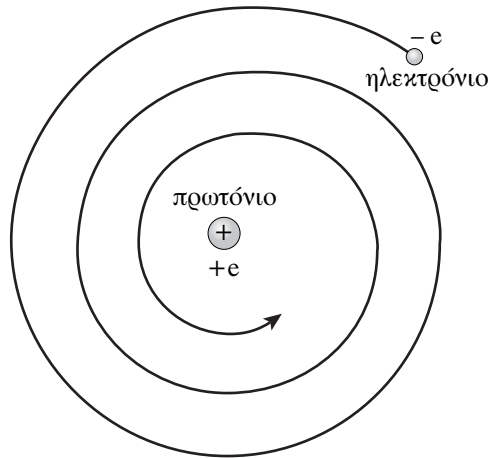
Σχήμα 1.1. Το ατομικό πρότυπο Thomson.



Σχήμα 1.2. Το ατομικό πρότυπο Rutherford.

Το ατομικό πρότυπο Rutherford δεν φάνηκε αρκετό να σταθεί για πολύ, καθ' όσον δεν καθόριζε τι γίνεται με τα ηλεκτρόνια γύρω από τον πυρήνα. Έτσι, αν τα ηλεκτρόνια παραμένουν ακίνητα, τότε λόγω των ηλεκτροστατικών έλξεων (δυνάμεις Coulomb) που θα ασκεί σ' αυτά ο πυρήνας με το θετικό φορτίο, θα πέσουν πάνω του. Αν όμως περιφέρονται γύρω από τον πυρήνα, σύμφωνα με την ηλεκτροδυναμική τα ηλεκτρόνια θα εκπέμπουν ηλεκτρομαγνητική

ακτινοβολία με συνέπεια να χάνουν ενέργεια και να πέσουν τελικά πάνω στον πυρήνα διαγράφοντας σπειροειδή τροχιά, όπως δείχνει το Σχ. 1.3.



Σχήμα 1.3. Σπειροειδής τροχιά του ηλεκτρονίου με κατεύθυνση τον πυρήνα.

Το 1913 ο Niels Bohr με νέες υποθέσεις, ξεπέρασε την δυσκολία που προαναφέρθηκε για το πρότυπο Rutherford. Διετύπωσε τις περιβόητες **συνθήκες Bohr**, δεχόμενος τις βασικές απόψεις - θεωρίες του ατομικού προτύπου Rutherford. Συνεπώς τα ηλεκτρόνια κινούνται σε κυκλικές τροχιές γύρω από τον πυρήνα με την επίδραση των δυνάμεων Coulomb:

$$F = \frac{m \cdot v^2}{r} = \frac{Ze^2}{r^2} \quad (1.1.1)$$

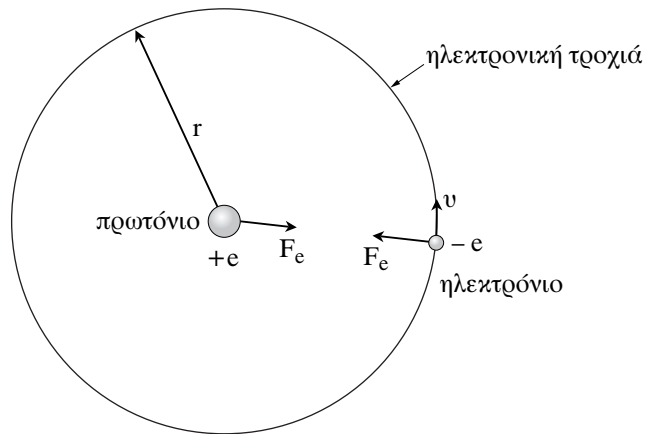
όπου m η μάζα του ηλεκτρονίου, v η ταχύτητά του, r η ακτίνα της κυκλικής τροχιάς του, e το φορτίο του και Z ο αριθμός των θετικών φορτίων του πυρήνα, Σχ. 1.4.

Οι συνθήκες του Bohr είναι οι ακόλουθες:

1. Η πρώτη συνθήκη, που καλείται και **μηχανική συνθήκη**, καθορίζει την κίνηση των ηλεκτρονίων που επιτρέπεται μόνο σε τροχιές ακτίνας r , έτσι ώστε η στροφορμή τους L , να είναι ακέραιο πολλαπλάσιο της ποσότητας $\hbar = h/2\pi$, όπου h η σταθερά του Planck (6.6×10^{-27} erg·sec), δηλαδή

$$L = mv \cdot r = n \cdot \hbar \quad (1.1.2)$$

όπου n ακέραιος αριθμός, ο κβαντικός αριθμός του Bohr ή κύριος κβαντικός αριθμός, που μπορεί να πάρει τις τιμές 1, 2, 3, ..., n .

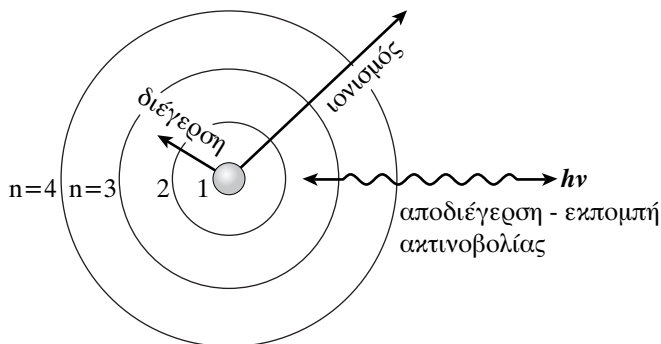


Σχήμα 1.4. Δυνάμεις που δρουν στο άτομο του υδρογόνου.

2. Η δεύτερη συνθήκη, που καλείται και **οπτική συνθήκη**, καθορίζει ότι, όταν το ηλεκτρόνιο μεταπηδήσει από μια εξωτερική, επιτρεπτή, τροχιά α (αρχική του τροχιά) σε μια εσωτερική, επιτρεπτή, τροχιά τ , (τελική του τροχιά), άλμα που είναι δυνατόν να γίνει, τότε το άτομο εκπέμπει ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία συχνότητας ν , που δίνεται από τη σχέση:

$$E_{\alpha} - E_{\tau} = h \cdot \nu \quad (1.1.3)$$

όπου E_{α} και E_{τ} η ενέργεια του ηλεκτρονίου στην αρχική και τελική τροχιά του, αντίστοιχα. Στην περίπτωση αυτή έχουμε **αποδιέγερση** του ατόμου, Σχ. 1.5.



Σχήμα 1.5. Διέγερση, αποδιέγερση και ιονισμός του ατόμου.

Αντίθετο άλμα του ηλεκτρονίου από εσωτερική, επιτρεπτή, τροχιά α σε εξωτερική, επιτρεπτή, τροχιά τ , είναι, επίσης, δυνατόν να γίνει μόνο με απορρόφηση ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας συχνότητας ν , που διέπεται από την

ίδια σχέση, την 1.1.3. Στην περίπτωση αυτή έχουμε **διέγερση** του ατόμου, Σχ. 1.5. Όταν το ηλεκτρόνιο απομακρυνθεί (αποσυνδεθεί) τελείως από το άτομο, τότε έχουμε **ιονισμό** του ατόμου, Σχ. 1.5.

Από τις σχέσεις (1.1.1) και (1.1.2), εύκολα συνάγεται ότι, το ηλεκτρόνιο κινείται γύρω από τον πυρήνα σε κλιτική τροχιά ακτίνας r :

$$r = \frac{n^2 \hbar^2}{Z \cdot e^2 \cdot m} \quad (1.1.4)$$

με ταχύτητα v :

$$v = \frac{Z e^2}{n \hbar} \quad (1.1.5)$$

Στην **τροχιά Bohr**, $n = 1$, (βασική τροχιά) το ηλεκτρόνιο κινείται με ταχύτητα $v_1 = 2.2 \times 10^8$ cm/sec, η δε ακτίνα της βασικής αυτής τροχιάς, που καλείται και **ακτίνα Bohr**, είναι ίση προς $r_1 = 0,5 \times 10^{-8}$ cm ή 0.4 \AA .

Η ολική ενέργεια του ηλεκτρονίου, δυναμική συν κινητική, κινουμένου σε επιτρεπτή τροχιά με κβαντικό αριθμό n , δίνεται από τη σχέση:

$$E_{ολ} = - \frac{Z^2 e^4 m}{2 n^2 \hbar^2} \quad (1.1.6)$$

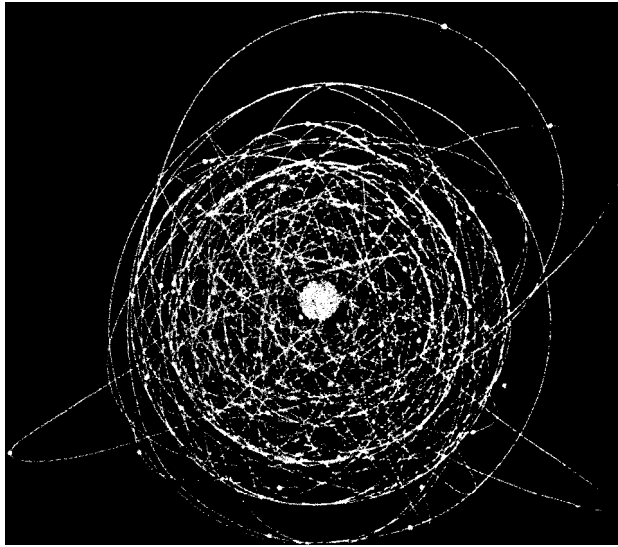
Η τιμή αυτή της ολικής ενέργειας του ηλεκτρονίου στη σχέση (1.1.3), θα μας δώσει τη συχνότητα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που θα εκπέμψει το άτομο, όταν γίνει ένα άλμα του ηλεκτρονίου από μια επιτρεπτή εξωτερική τροχιά α σε μια επιτρεπτή εσωτερική τροχιά τ :

$$v_{\tau, \alpha} = \frac{E_{\alpha} - E_{\tau}}{h} = \frac{Z^2 e^4 m}{4 \pi \hbar^3} \left(\frac{1}{n_{\tau}^2} - \frac{1}{n_{\alpha}^2} \right) \quad (1.1.7)$$

Στην φασματοσκοπία χρησιμοποιείται περισσότερο το αντίστροφο του μήκους κύματος, δηλαδή το $1/\lambda$, που λέγεται και **αριθμός κύματος** (ή **κυματάριθμος**) και υπολογίζεται από τη σχέση (1.1.7), αν ληφθεί υπ' όψιν και η γνωστή σχέση $c = v \cdot \lambda$, όπου c η ταχύτητα του φωτός.

1.2 Συστατικά του ατόμου

Σύμφωνα με το ενιαίο πρότυπο Rutherford-Bohr, το άτομο θα εμφάνιζε την εικόνα του Σχήματος 1.6. Στο κέντρο του ατόμου είναι ο πυρήνας και γύρω από τον πυρήνα κινούνται τα ηλεκτρόνια σε επιτρεπτές κυκλικές τροχιές, όπως καθορίζονται από την πρώτη συνθήκη του Bohr, σχέση (1.1.2).



Σχήμα 1.6. Το άτομο με τον πυρήνα και τα ηλεκτρόνιά του. Το άτομο είναι του ουρανίου ($Z = 92$).

α) Το ηλεκτρόνιο

Το ηλεκτρόνιο είναι το μικρότερο σε μάζα από τα συστατικά του ατόμου, το δε αρνητικό ηλεκτρικό φορτίο του θεωρείται σαν στοιχειώδης μονάδα του ηλεκτρισμού. Το φορτίο του ηλεκτρονίου μετρήθηκε από τον Robert Millikan το 1911 με το ομώνυμο πείραμά του, «το πείραμα της σταγόνας λαδιού» και ισούται με:

$$e = -4.8 \times 10^{-10} \text{ esu}^* = -1.6 \times 10^{-19} \text{ Cb.}$$

Η μάζα του ηλεκτρονίου μετρήθηκε από τον J.J. Thomson το 1897 έμμεσα, από τον λόγο του φορτίου του ηλεκτρονίου προς την μάζα του, e/m . Ο λόγος αυτός ισούται με:

$$e/m = 1.76 \times 10^{11} \text{ Cb/kg.}$$

Συνεπώς η μάζα του ηλεκτρονίου θα ισούται με:

$$m_e = 9.11 \times 10^{-28} \text{ g } (9.109389 \times 10^{-31} \text{ kg}).$$

Σύμφωνα με την θεωρία της σχετικότητας, του Einstein, ότι: μάζα \equiv ενέργεια, η μάζα του ηλεκτρονίου θα ισοδυναμεί με ενέργεια ίση προς 0.511 MeV^{**} .

* esu = ηλεκτροστατική μονάδα φορτίου (electrostatic unit).

** $1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV}$, $1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ Cb} \cdot 1 \text{ Volt} = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ Joules} = 1.6 \times 10^{-12} \text{ erg.}$

Δεχόμενοι σαν αληθινή την πρόταση ότι, το ηλεκτρόνιο έχει ομοιόμορφη κατανομή φορτίου σε όλη την έκταση του σφαιρικού του όγκου, μπορούμε να υπολογίσουμε την «κλασική» ακτίνα του ηλεκτρονίου, η οποία ισούται με:

$$r_e = \frac{e^2}{m_e c^2} = 2.82 \times 10^{-13} \text{ cm} = 2.82 \text{ fm}^*.$$

Η μαγνητική ροπή του ηλεκτρονίου, η οποία δίνει και την τάξη μεγέθους της μαγνητικής ροπής του ατόμου, είναι ίση με:

$$\begin{aligned} \mu_B &= \frac{1}{2} \frac{e}{m_e} \cdot h = 9.27 \times 10^{-24} \text{ Amp} \cdot \text{m}^2 = \\ &= 9.27 \times 10^{-21} \text{ HMM μαγνητικής ροπής} = \\ &= 5.79 \times 10^{-11} \text{ MeV T}^{-1}. \end{aligned} \quad (1.2.1)$$

Η μ_B καλείται **μαγνητόνη του Bohr**.

Το σπιν του ηλεκτρονίου, ή ίδια στροφορμή του, λόγω περιφοράς του περι άξονα διερχόμενο από το κέντρο μάζας του ισούται με:

$$S = \frac{1}{2} \hbar \quad (1.2.2)$$

ενώ η στροφορμή του λόγω περιφοράς γύρω από τον πυρήνα είναι ίση με:

$$L = n \hbar, \quad (1.2.3)$$

όπου n = ακέραιος αριθμός (1, 2, ..., n) ή κύριος κβαντικός αριθμός.

Αυτά είναι συνοπτικά τα κύρια χαρακτηριστικά του ηλεκτρονίου ή άλλως οι φυσικές σταθερές του.

β) Ο πυρήνας

Ο πυρήνας με διαστάσεις της τάξης του 10^{-12} cm (περίπου μιας δεκάδας fm), όπως έδειξαν τα πειράματα των Geiger και Marsden και η εξήγησή τους από τον Rutherford, περιέχει δύο ειδών σωματίια: τα **πρωτόνια** και **νετρόνια**: Τα σωματίια αυτά είναι ίσα περίπου σε μάζα, ενώ τα πρώτα είναι θετικώς φορτισμένα σωματίδια, τα δε δεύτερα εμφανίζονται ουδέτερα, γεγονός στο οποίο οφείλουν και την ονομασία τους.

Το **πρωτόνιο** έχει φορτίο θετικό ισοδύναμο με το αρνητικό φορτίο του ηλεκτρονίου, δηλαδή:

$$e = +4.8 \times 10^{-10} \text{ esu} = +1.6 \times 10^{-19} \text{ Cb}.$$

* 1 fm (femto meter) = 10^{-15} m = 10^{-13} cm, μονάδα που χρησιμοποιείται για πυρηνικές διαστάσεις, όπως η μονάδα Ångström, Å για ατομικές διαστάσεις.

Η μάζα του πρωτονίου είναι:

$$m_p = 1.67 \times 10^{-24} \text{ g } (1.672623 \times 10^{-27} \text{ kg})$$

δηλαδή 1836 φορές μεγαλύτερη από την μάζα του ηλεκτρονίου και το ισοδύναμό της σε ενέργεια κατά Einstein:

$$m_p = 938.27 \text{ MeV.}$$

Η μαγνητική ροπή του πρωτονίου δίνει και την τάξη μεγέθους της μαγνητικής ροπής του πυρήνα, η οποία είναι ίση με

$$\begin{aligned} \mu_N &= \frac{1}{2} \cdot \frac{e}{m_p} \cdot \hbar = 5.05 \times 10^{-27} \text{ Amp} \cdot \text{m}^2 = \\ &= 5.05 \times 10^{-24} \text{ HMM μαγνητικής ροπής} = \\ &= 3.15 \times 10^{-14} \text{ MeV T}^{-1} \end{aligned} \quad (1.2.4)$$

συνεπώς:

$$\mu_p = 2.79 \mu_N \quad (1.2.5)$$

δηλαδή περίπου 1836 φορές μικρότερη από την μαγνητική ροπή του ηλεκτρονίου. Η μ_N καλείται **πυρηνική μαγνητόνη**. Η τάξη μεγέθους της μαγνητικής ροπής του πυρήνα, κατά πολύ μικρότερη εκείνης του ηλεκτρονίου, είναι και ένας από τους βασικούς λόγους που αποκλείουν την ύπαρξη ηλεκτρονίων (και γενικά ελαφρών σωματιδίων) μέσα στον πυρήνα.

Το σπιν του πρωτονίου είναι:

$$S = 1/2 \hbar. \quad (1.2.6)$$

Το **νετρόνιο**, είναι σχεδόν ίσο σε μάζα με το πρωτόνιο, κατά τι μεγαλύτερο. Η μάζα του νετρονίου ισούται με:

$$m_n = 1.67 \times 10^{-24} \text{ g } (1.674663 \times 10^{-27} \text{ kg})$$

και το ισοδύναμό της σε ενέργεια κατά Einstein:

$$m_n = 939.54 \text{ MeV}$$

δηλαδή, κατά 1.293 MeV μεγαλύτερη από την μάζα του πρωτονίου ($m_n - m_p = 1.293 \text{ MeV}$). Το φορτίο του νετρονίου είναι μηδέν. Παρά ταύτα το νετρόνιο έχει μαγνητική ροπή και μάλιστα αρνητική, που εξηγείται τόσο ως προς το μέγεθος όσο και ως προς το σημείο (αρνητικό, στην προκειμένη περίπτωση)

από την ύπαρξη εσωτερικής κατανομής φορτίων και σπιν. Είναι δε ίση με:

$$\mu_n = -1.91 \mu_N \quad (1.2.7)$$

όπου μ_N , η μονάδα πυρηνικής μαγνητικής ροπής (πυρηνική μαγνητόνη). Το σπιν του νετρονίου είναι:

$$S = 1/2 \hbar. \quad (1.2.8)$$

Το σπιν και η μαγνητική ροπή του νετρονίου είναι αντιπαράλληλα διανύσματα.

1.3 Πυρηνική δομή

Ο πυρήνας περιέχει Z πρωτόνια και N νετρόνια. Ισάριθμα προς τα πρωτόνια, δηλαδή Z ηλεκτρόνια του ατόμου περιφέρονται γύρω από τον πυρήνα. Το Z καλείται ατομικός αριθμός και το N αριθμός νετρονίων ή νετρονικός αριθμός.

Το άθροισμα $Z + N$ καλείται **μαζικός αριθμός** ή αριθμός μάζας και συμβολίζεται με το A . Είναι δηλαδή $A = Z + N$.

α) Διάσταση του πυρήνα

Η διάσταση του πυρήνα μπορεί να υπολογιστεί με διάφορες μεθόδους, πυρηνικές ή ηλεκτρομαγνητικές. Η ακτίνα του πυρήνα δίνεται από μια σχέση της μορφής:

$$R = R_0 \cdot A^{1/3} \text{ cm} \quad (1.3.1)$$

όπου A είναι ο μαζικός αριθμός και R_0 μια σταθερά της οποίας η μέση τιμή είναι περίπου 1.3×10^{-13} cm, ή 1.3 fm. Η τιμή αυτή κυμαίνεται μεταξύ 1.1 και 1.5 fm ανάλογα με την μέθοδο προσδιορισμού της πυρηνικής ακτίνας (πυρηνική μέθοδος ή ηλεκτρομαγνητική μέθοδος). Η μάζα του πυρήνα υπολογίζεται με βάση τη μονάδα ατομικών μαζών ($1 \text{ amu} = \text{atomic mass unit}$) και είναι ανάλογη του αριθμού των πρωτονίων και των νετρονίων που περιέχει, δηλαδή του μαζικού αριθμού A . Συνεπώς:

$$M = Z \cdot m_p + N \cdot m_n \cong (Z + N) m_p = A \cdot m_p, \quad (1.3.2)$$

καθ' όσον $m_p \cong 1.67 \times 10^{-24}$ g.

Η **πυρηνική πυκνότητα**, σύμφωνα με την σχέση:

$$\rho = \frac{M}{V} \quad (1.3.3)$$

θα ισούται με:

$$\rho = \frac{Zm_p + Nm_n}{4/3 \pi R^3} \approx \frac{A \cdot m_p}{4/3 \pi (R_0 A^{1/3})^3} = \frac{m_p}{4/3 \pi \cdot R_0^3} \approx 10^{14} \text{ g/cm}^3 =$$

$$= 10^8 \text{ tons/cm}^3 \quad (1.3.4)$$

είναι σταθερή και η μεγαλύτερη που θα μπορούσε να υπάρξει.

β) Ισότοπα στοιχεία

Σύμφωνα με τα ανωτέρω, υπάρχουν πυρήνες ενός και του αυτού στοιχείου, του ίδιου Z δηλαδή, που έχουν διαφορετικό αριθμό νετρονίων N , άρα και διαφορετικό μαζικό αριθμό A . Τα στοιχεία στα οποία ανήκουν οι πυρήνες αυτοί, καλούνται **ισότοπα στοιχεία**. Ο μαζικός αριθμός A ενός νουκλιδίου, όπως είναι αυτονόητο, είναι ακέραιος αριθμός και δεν πρέπει να συγχέεται με την ατομική μάζα $M(Z, A)$ ισότοπου στοιχείου που δεν είναι ακέραιος, αλλά δεκαδικός αριθμός και διαφέρει ελάχιστα από τον μαζικό αριθμό A . Π.χ. ο πυρήνας του $^{16}_8\text{O}$ έχει $A = 16$ και $M(Z, A) = 15.99491502 \text{ amu}$, ενώ ο πυρήνας του $^{226}_{88}\text{Ra}$ έχει $A = 226$ και $M(Z, A) = 226.025360 \text{ amu}$. Οι ατομικές μάζες $M(Z, A)$ των ισότοπων στοιχείων εκφράζονται σε μονάδες ατομικής μάζας ($1 \text{ amu} = 1/12 M_{^{12}\text{C}}$), δηλαδή το $1/12$ της μάζας του ισότοπου του $^{12}_6\text{C}$ σε g μάζας ή σε MeV ($1 \text{ amu} = 931.4932 \text{ MeV}$).

Εδώ θα πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι δεν πρέπει να συγχέεται η ατομική μάζα $M(Z, A)$ ενός ισότοπου με το ατομικό βάρος του στοιχείου στο οποίο ανήκει το ισότοπο. Π.χ. του ισότοπου ουρανίου-238 ($^{238}_{92}\text{U}$), η ατομική μάζα είναι $M(Z, A) = 238.050770 \text{ amu}$, ενώ το ατομικό βάρος του στοιχείου ουρανίου, ^{92}U , που είναι μίγμα όλων των ισότοπων του ουρανίου, ήτοι του $^{234}_{92}\text{U}$ (0.0054%), του $^{235}_{92}\text{U}$ (0.720%) και του $^{238}_{92}\text{U}$ (92.2746%), είναι $AB = 238.03$. Στον πίνακα 1.1 παρατίθεται ο μαζικός αριθμός, η ατομική μάζα ορισμένων ισότοπων, καθώς και το ατομικό βάρος των στοιχείων που ανήκουν.

Ένας πυρήνας στοιχείου X με ατομικό αριθμό Z (αριθμός πρωτονίων) και μαζικό αριθμό A ($A = Z + N$) συμβολίζεται ως εξής:



π.χ. $^{14}_6\text{C}$, $^{16}_8\text{O}$, $^{40}_{19}\text{K}$, $^{131}_{53}\text{I}$, $^{226}_{88}\text{Ra}$ είναι συμβολισμοί πυρήνων διαφόρων στοιχείων. Τα στοιχεία με τους πυρήνες $^{12}_6\text{C}$ και $^{14}_6\text{C}$ καλούνται ισότοπα στοιχεία, όπως προαναφέρθηκε. Στην πραγματικότητα είναι ισότοποι πυρήνες ενός και του αυτού (χημικού) στοιχείου και όχι δύο διαφορετικά στοιχεία. Ισότοπα είναι π.χ. τα $^{16}_8\text{O}$ και $^{18}_8\text{O}$, καθώς και τα $^{238}_{92}\text{U}$ και $^{235}_{92}\text{U}$. Άλλη ονομασία των ισότοπων είναι **νουκλίδια**. Στους χάρτες των νουκλιδίων, όπως αποκαλούνται τα ισότοπα, που

Πίνακας 1.1. Μαζικός αριθμός, ατομική μάζα και ατομικό βάρος ισotόπων στοιχείων.

Ισότοπο	A	M(Z, A) (amu)	AB
${}^1_1\text{H}$	1	1.007825 19	${}_1\text{H}$: 1.00797
${}^2_1\text{H}$	2	2.014 10222	
${}^3_1\text{H}$	3	3.016 049 71	
${}^{12}_6\text{C}$	12	12.000 000 000	${}_6\text{C}$: 12.01115
${}^{14}_6\text{C}$	14	14.003.24197	
${}^{16}_8\text{O}$	16	15.994 915 02	${}_8\text{O}$: 15.9994
${}^{18}_8\text{O}$	18	17.999 160 02	
${}^{39}_{19}\text{K}$	39	38.963 710 1	${}_{19}\text{K}$: 39.102
${}^{40}_{19}\text{K}$	40	39.963 999 8	
${}^{226}_{88}\text{Ra}$	226	226.025 360	${}_{88}\text{Ra}$: 226.0254
${}^{228}_{88}\text{Ra}$	228	228.031 139	
${}^{232}_{90}\text{Th}$	232	232.038 124	${}_{90}\text{Th}$: 232.038
${}^{228}_{90}\text{Th}$	228	228.028 750	
${}^{238}_{92}\text{U}$	238	238.050 770	${}_{92}\text{U}$: 238.03
${}^{235}_{92}\text{U}$	235	235.043 915	

φτάνουν περίπου τις δύο χιλιάδες, εκ των οποίων περίπου τα 1700 είναι ραδιενεργά, είναι διατεταγμένα σε διάγραμμα με άξονες τον ατομικό αριθμό Z και τον νετρονικό αριθμό N ($N = A - Z$), Σχ. 1.7.

Η μέτρηση των ισοτοπικών μαζών γίνεται με τα φασματόμετρα ή φασματογράφους μάζας. Υπάρχουν διαφόρων τύπων φασματόμετρα, που φέρουν τα ονόματα των ερευνητών που τα ανακάλυψαν - κατασκεύασαν, όπως π.χ. φασματογράφος Aston, φασματογράφος Thomson, φασματόμετρο Nier, φασματόμετρο Dempster, κ.λπ., η δε ακρίβεια με την οποία δίνουν την ισοτοπική μάζα φθάνει στο πέμπτο (ίσως και στο έκτο, σήμερα) δεκαδικό ψηφίο.

γ) Έλλειμμα μάζας και ενέργεια σύνδεσης του πυρήνα

Όπως ήδη αναφέρθηκε, ο πυρήνας αποτελείται μόνο από πρωτόνια και νετρόνια. Συνεπώς θα έπρεπε κανονικά η μάζα του να ισούται με το άθροισμα των

							10	Ne	20.183		Ne 17			
									σ .032		0.10s $\beta^+ > 5$ ($\beta^+ 2.3, 4.0, 4.6, 5.4, 7.4$)			
							9	F	18.9984		F 16			
								σ .010			$\sim 10^{-19}$ s β .81 18.0171			
							8	O	15.9994	013	014	015		
								$\sigma < .0002$	$\beta^+ .0087$ s ($\beta^+ 6.9, 7.6$)	$\beta^+ 1.81, 4.14$ $\gamma 2.31$ E5.14	$\beta^+ 1.74$ 124s E2.76	17-		
						7	N	14.0067		N 12	N 13	N 14		
							σ 19			0.011s $\beta^+ 16.3$ (3a ~ 4) E17.3	9.96m $\beta^+ 1.19$ E2.22	92.63 $\sigma_{\text{th}} 1.8$ $\sigma .04$ 13.0097		
						6	C	12.01115	C 9	C 10	C 11	C 12	C 13	
							σ .0034	0.13s $\beta^+ 3.5$ ($\beta^+ 9.3, 12.3$)	$\beta^+ 1.9, \dots$ $\gamma 72, 104$ E 3.6	$\beta^+ .96$ E1.98	20.5m $\beta^+ 1.19$ σ .0034	11- σ .0009	13- σ .0009	
						5	B	10.811		B 8	B 9	B 10	B 11	B 12
							σ 759		0.78s $\beta^+ 1.4$ (2 a 3) E18	$\geq 3 \times 10^{-19}$ s $\beta^+ 1.2$ 9.01333	13.78 $\sigma_{\text{th}} 3640$ $\sigma .5$ 10.0234	11- σ .005	90.22 σ .005	12- 0.020s $\beta^+ 13.4, 9.0$ $\gamma 4.4$ (a. 2) E13.4
						4	Be	9.0122	Be 6	Be 7	Be 8	Be 9	Be 10	Be 11
							σ .009	$\geq 4 \times 10^{-21}$ s $\beta^+ .46$ p. a. L ³ $\sigma_{\text{th}} 5400$ E. 86	53d $\beta^+ .46$ 2 a .09 8.00531	$\sim 3 \times 10^{-16}$ s $\beta^+ .46$ 2 a .09 8.00531	100 σ .009	2.7 x 10 ⁶ y $\beta^+ .56$ E. 56	$\beta^+ 13.4, 9.0$ $\gamma 4.4$ (a. 2) E13.4	
						3	Li	6.939	Li 5	Li 6	Li 7	Li 8	Li 9	
							σ 71	$\sim 10^{-21}$ s $\beta^+ .46$ p. a. L ³ $\sigma_{\text{th}} 5400$ E. 86	7.42 $\sigma_{\text{th}} 960$ $\sigma .045$ 6.0812	92.56 $\sigma .036$ 7.01800	0.85s $\beta^+ 1.3$ (2 a 3) E16.0	0.17s (n, 2 a) E13.6		
						2	He	4.0026	He 3	He 4	He 5	He 6	He 8	
							σ .007	0.00013 $\sigma_{\text{th}} 9827$ 3.01905	~ 100 σ 0	2 x 10 ⁻²¹ s $\beta^+ .351$ E3.51	0.81s $\beta^+ 1.3$ (2 a 3) E16.0	13.6s $\beta^+ 11.5, 9.3, \dots$ $\gamma 2.2, 8.8, 4.8 - 5.0$ E11.5		
						1	H	1.00797	H 1	H 2	H 3			
							σ .33	92.905 $\sigma .33$ 1.007825	0.015 σ .0008	12.26y $\beta^+ .0186$ σ .000007 E.0186				
						0	n	12m $\beta^+ .782$ E.782						
							1.008665							

Σχήμα 1.7. Το πρώτο τμήμα του χάρτη των νουκλιδίων.

μαζών των πρωτονίων και των νετρονίων που συνιστούν τον πυρήνα. Τα πειραματικά όμως αποτελέσματα δείχνουν ότι η μάζα του πυρήνα είναι μικρότερη από το άθροισμα αυτό. Παρατηρείται δηλαδή μια διαφορά $M-A$. Η διαφορά αυτή καλείται **έλλειμμα μάζας** και μετατρέπεται (ή εκλύεται) σε ενέργεια κατά τον σχηματισμό ή τη διάσπαση του ατόμου, αντίστοιχα, σύμφωνα πάντοτε με την αρχή της ισοδυναμίας μάζας - ενέργειας κατά Einstein.

Η ενέργεια σχηματισμού του πυρήνα ή **ενέργεια σύνδεσης**, BE (Binding energy), δίνεται από την σχέση:

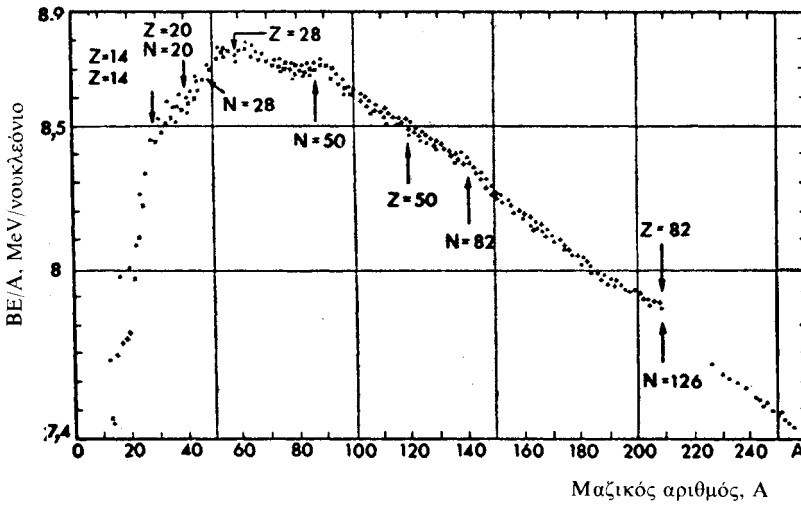
$$BE = \Delta M \cdot c^2 \tag{1.3.5}$$

όπου ΔM η ελάττωση της μάζας, όταν ένας αριθμός πρωτονίων, νετρονίων και ηλεκτρονίων συνδυαστεί κατάλληλα και συνενωθεί για να σχηματιστεί ένα άτομο. Το ίδιο ποσό ενέργειας θα πρέπει να προσφερθεί στο άτομο για να διασπαστεί στα συστατικά του.

Αναλυτικότερα θα είναι:

$$BE = \{Z \cdot m_p + N \cdot m_n + Z \cdot m_e - M(Z, A)\}c^2 \tag{1.3.6}$$

ή
$$BE = \{Z \cdot m_p + (A - Z) \cdot m_n + Z \cdot m_e - M(Z, A)\}c^2. \tag{1.3.7}$$



Σχήμα 1.8. Μέση ενέργεια σύνδεσης ανά σωματίο (νουκλεόνιο) του πυρήνα, BE/A , σαν συνάρτηση του μαζικού αριθμού A .

Εκείνο όμως που ενδιαφέρει και χρησιμοποιείται περισσότερο είναι η μέση ενέργεια σύνδεσης ανά νουκλεόνιο (σωμάτιο) του πυρήνα, δηλαδή ο λόγος BE/A . Όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.8, η μέση **ενέργεια σύνδεσης** ανά νουκλεόνιο είναι γύρω στα 8 MeV. Στον Πίνακα 1.2α περιλαμβάνονται οι τιμές της ενέργειας σύνδεσης, BE και της ενέργειας σύνδεσης ανά νουκλεόνιο, $\frac{BE}{A}$ για ορισμένους ελαφρείς πυρήνες, ενώ στον Πίνακα 1.2β οι αντίστοιχες τιμές για ενδιάμεσους και βαρείς πυρήνες. Η ελάχιστη ενέργεια που απαιτείται για να χωριστεί ένα πρωτόνιο από τον πυρήνα ${}^4_2\text{He}$ είναι 19.8 MeV, ενώ για ένα νετρόνιο από τον πυρήνα ${}^4_2\text{He}$ είναι 20.55 MeV. Η ενέργεια σύνδεσης, BE ενός πρωτονίου είναι μικρότερη από την ενέργεια σύνδεσης ενός νετρονίου κατά τον

υπολογισμό της ηλεκτροστατικής άπωσης στον πυρήνα.

Πίνακας 1.2α. Ενέργεια σύνδεσης, BE και ενέργεια σύνδεσης ανά νουκλεόνιο, $\frac{BE}{A}$ ελαφρών πυρήνων.

Πυρήνας	${}^2_1\text{H}$	${}^3_1\text{H}$	${}^3_2\text{He}$	${}^4_2\text{He}$	${}^6_2\text{He}$	${}^6_3\text{Li}$	${}^7_3\text{Li}$	${}^8_3\text{Le}$	${}^7_4\text{Be}$
BE, MeV	2.22	8.48	7.72	28.30	29.27	31.56	39.25	41.28	37.60
$\frac{BE}{A}$, MeV	1.11	2.82	2.57	7.07	4.88	5.26	5.61	5.16	5.37

Πίνακας 1.2β. Ενέργεια σύνδεσης, BE και ενέργεια σύνδεσης ανά νουκλεόνιο, $\frac{BE}{A}$ ενδιάμεσων και βαρέων πυρήνων.

Πυρήνας	${}^{60}_{27}\text{Co}$	${}^{90}_{38}\text{Sr}$	${}^{137}_{55}\text{Cs}$	${}^{235}_{92}\text{U}$	${}^{252}_{98}\text{Cf}$
BE, MeV	524.81	782.62	1149.59	1783.88	1881.39
$\frac{BE}{A}$, MeV	8.75	8.70	8.39	7.59	7.47

δ) Πυρηνικές δυνάμεις

Οι δυνάμεις που εξασκούνται μέσα στον πυρήνα μεταξύ των σωματιδίων που τον συνιστούν, δηλαδή μεταξύ των πρωτονίων και των νετρονίων, είναι οι πυρηνικές δυνάμεις και είναι υπεύθυνες για την συγκρότησή του. Τα κυριότερα χαρακτηριστικά (ιδιότητες) των πυρηνικών δυνάμεων είναι τα εξής:

- Είναι ισχυρές.** Είναι υπεύθυνες για τις ισχυρές αλληλεπιδράσεις, για την εκπομπή των ακτίνων άλφα από τον πυρήνα. Είναι οι πλέον ισχυρές από όλα τα είδη δυνάμεων που υπάρχουν στη φύση. Είναι ισχυρότερες από τις ηλεκτροστατικές δυνάμεις Coulomb, γι' αυτό τα πρωτόνια βρίσκονται πολύ κοντά το ένα με το άλλο μέσα στον πυρήνα. Καλούνται ισχυρές λόγω του πολύ μικρού χρόνου δράσης τους, που είναι της τάξης του 10^{-23} sec.
- Είναι κορεσίμες.** Οι κλασικές δυνάμεις, δυνάμεις Coulomb $F_C = k \cdot q_1 q_2 / r^2$ και δυνάμεις βαρύτητας $F_G = G \cdot m_1 m_2 / r^2$ είναι ακόρεστες δυνάμεις. Κάθε σωματίο του πυρήνα, πρωτόνιο ή νετρόνιο, δρα με περιορισμένο αριθμό γειτονικών του σωματιών, καθ' όσον πρόσθεση σωματιών, ήτοι πρωτονίων ή νετρονίων στον πυρήνα, αυξάνει την ενέργεια σύνδεσης BE του πυρήνα σαν σύνολο, αλλά η μέση ενέργεια σύνδεσης ανά σωματίο (νουκλεόνιο) του πυ-

ρήνα BE/A, παραμένει σταθερή, περίπου 8 MeV, όπως προαναφέρθηκε, για τους περισσότερους πυρήνες από $A = 50$ μέχρι $A = 130$. Η σταθερή πυρηνική πυκνότητα και η εξάρτηση της πυρηνικής ακτίνας (διάσταση του πυρήνα) από την κυβική ρίζα του μαζικού αριθμού A ($R = R_0 A^{1/3}$) αποτελούν μια ακόμη απόδειξη ότι οι πυρηνικές δυνάμεις είναι κορεσίμες.

- iii) **Είναι μικρής εμβέλειας.** Για τις πυρηνικές δυνάμεις πρέπει να υπάρχει απωστική συνιστώσα, καθ' όσον διαφορετικά όλοι οι πυρήνες θα έπρεπε να έχουν το ίδιο περίπου μέγεθος, σε αντίθεση προς τα πειραματικά δεδομένα, τα οποία δίνουν την πυρηνική ακτίνα ανάλογη των πυρηνικών δυνάμεων. Η απωστική συνιστώσα αρχίζει να δρα από το κέντρο του σωματιδίου, πρωτονίου ή νετρονίου, μέχρι περίπου 0.5 fm (0.5×10^{-13} cm) και θα πρέπει να είναι κατά πολύ ισχυρότερη, στην απόσταση αυτή 0.5 fm, από την ελκτική συνιστώσα των πυρηνικών δυνάμεων. Η εμβέλεια των πυρηνικών δυνάμεων φθάνει μέχρι λίγα fm, περίπου 2 fm. Η πυρηνική ακτίνα είναι της τάξης των 10 fm.
- iv) **Είναι ανεξάρτητες του φορτίου.** Τα σωματίδια του πυρήνα, πρωτόνια και νετρόνια κινούνται μέσα στον πυρηνικό όγκο, χωρίς να επηρεάζει το ένα το άλλο, ανεξάρτητα από το αν φέρουν φορτίο (πρωτόνια) ή όχι (νετρόνια). Η ενέργεια που απαιτείται για να εξαχθεί ένα πρωτόνιο από τον πυρήνα είναι περίπου η ίδια που απαιτείται για να εξαχθεί ένα νετρόνιο (~ 8 MeV). Γι' αυτό έχουν και κοινή ονομασία, **νουκλεόνια**, γεγονός που τα κάνει να μην ξεχωρίζουν, όσον αφορά την ιδιότητα αυτή.

Για να γίνει έντονα κατανοητό το πόσο ισχυρές είναι οι πυρηνικές δυνάμεις, θα πρέπει να γίνει σύγκριση με τα άλλα είδη των δυνάμεων που υπάρχουν στη φύση. Συνολικά είναι ως τώρα γνωστά τέσσερα ήδη δυνάμειων:

- 1) **Πυρηνικές δυνάμεις**, όπως εκτέθηκαν παραπάνω.
- 2) **Ηλεκτρομαγνητικές δυνάμεις.** Είναι 137 φορές ασθενέστερες από τις πυρηνικές δυνάμεις. Δρουν μεταξύ φορτισμένων σωματιδίων ή σωματιδίων που έχουν ηλεκτρική ή μαγνητική ροπή. Ακολουθούν τον νόμο του αντιστρόφου τετραγώνου της απόστασης r ($F_C = k \cdot q_1 q_2 / r^2$). Είναι δυνάμεις άπειρης εμβέλειας ($1/r^2$). Είναι υπεύθυνες για την ενέργεια σύνδεσης των ηλεκτρονίων στα άτομα και τον σχηματισμό των μορίων. Ο χρόνος δράσης τους είναι της τάξης του 10^{-21} sec.
- 3) **Δυνάμεις ασθενούς αλληλεπίδρασης.** Είναι 10^{14} φορές ασθενέστερες από τις πυρηνικές δυνάμεις. Είναι υπεύθυνες για την εκπομπή των ακτίνων βήτα από τον πυρήνα. Η αλληλεπίδραση είναι σημειακή. Ο χρόνος δράσης τους είναι της τάξης του 10^{-8} sec.
- 4) **Δυνάμεις βαρύτητας.** Είναι οι πλέον ασθενείς, 10^{39} φορές ασθενέστερες από τις πυρηνικές δυνάμεις. Είναι δυνάμεις ελκτικές, άπειρης εμβέλειας

$(1/r^2)$ και ακολουθούν και αυτές, όπως και οι ηλεκτρομαγνητικές δυνάμεις, τον νόμο του αντιστρόφου τετραγώνου της απόστασης r ($F_G = G \cdot m_1 m_2 / r^2$).

ε) Πυρηνικά πρότυπα

Ενιαίο πυρηνικό πρότυπο διευθέτησης των νουκλεονίων, δηλαδή των πρωτονίων και των νετρονίων μέσα στον πυρήνα, το οποίο να περιγράφει και να εξηγεί (και να προβλέπει) όλα τα πυρηνικά φαινόμενα και τις πυρηνικές αντιδράσεις, δεν υπάρχει, τουλάχιστον, μέχρι σήμερα. Έχουν προταθεί πολλά πρότυπα, τα οποία περιγράφουν - ερμηνεύουν ένα πλήθος φαινομένων, αλλά αδυνατούν όμως να εξηγήσουν άλλα φαινόμενα. Κυριότερα από τα πυρηνικά πρότυπα αναφέρουμε τα εξής:

- 1) **Το πρότυπο της υγρής σταγόνας** που εξηγεί καλά την ενέργεια σύνδεσης του πυρήνα και το φαινόμενο της πυρηνικής σχάσης.
- 2) **Το πρότυπο συσσωμάτωσης σωματίων άλφα**, που ερμηνεύει την εκπομπή των ακτίνων άλφα από τον πυρήνα.
- 3) **Το πρότυπο κατά φλοιούς**, όπως ακριβώς συμβαίνει με το πρότυπο των ατομικών ηλεκτρονίων κατά φλοιούς. Το πρότυπο αυτό ερμηνεύει τις κβαντισμένες ενεργειακές καταστάσεις του πυρήνα, την εκπομπή δηλαδή των ακτίνων γάμμα.