



Στοιχεία Σύγχρονης Φυσικής

για μαθητές Λυκείου

Μανόλης Δρης, Θανάσης Κασίδης,
Γιώργος Παυλικάκης, Νίκος Τράκας,
Κώστας Φαράκος

ΜΑΪΟΣ 2019

Στοιχεία Σύγχρονης Φυσικής
για μαθητές Λυκείου

1η έκδοση, Μάιος 2019

Elements of Contemporary Physics
for high school students

1st edition, May 2019

ISBN 978-0-359-91593-4

Φωτογραφία εξωφύλλου: Ο ανιχνευτής ATLAS, κατά την διάρκεια της συναρμολόγησης του (2005). Ο ATLAS είναι ένας από τους δύο μεγάλους ανιχνευτές (ο άλλος είναι ο ανιχνευτής CMS), που είναι τοποθετημένοι στον Μεγάλο Αδρονικό Επιταχυντή (Large Hadron Collider, LHC), στο CERN, το Ευρωπαϊκό Εργαστήριο Πυρηνικών Ερευνών κοντά στην Γενεύη, στα σύνορα Ελβετίας-Γαλλίας. Η λειτουργία του επιταχυντή ξεκίνησε το 2009, και το 2012 ανακοινώθηκε και από τους δύο ανιχνευτές η παρατήρηση, για πρώτη φορά, του σωματιδίου higgs (Η φωτογραφία είναι ευγενική προσφορά του CERN).

Στοιχεία Σύγχρονης Φυσικής

για μαθητές Λυκείου

Μανόλης Δρης, Θανάσης Κασίδης,
Γιώργος Παυλικιάκης, Νίκος Τράκας,
Κώστας Φαράκος

ΜΑΪΟΣ 2019

Πρόλογος

Με το παρόν εγχειρίδιο γίνεται μια προσπάθεια να μεταφερθούν στο επίπεδο των μαθητών του Λυκείου θέματα Φυσικής που αναφέρονται στις εξελίξεις του επιστημονικού αυτού τομέα κατά τον 20ο αιώνα: σχετικότητα, ατομική και πυρηνική φυσική, στοιχειώδη σωματίδια της ύλης. Ο μαθητής που συμπληρώνει το Λύκειο θα πρέπει να έχει στην φαρέτρα των γνώσεών του και στοιχεία από αυτούς του τομείς της Φυσικής που, εκτός των άλλων, εμφανίζονται πλέον και στην καθημερινή ζωή, με κλασικά παραδείγματα τις εφαρμογές στην ιατρική και την χρήση πυρηνικής ενέργειας.

Τα θέματα που αναπτύσσονται αποτελούν τμήμα της διδακτέας (και εξεταστέας) ύλης σε πολλές Ευρωπαϊκές χώρες (αν όχι σε όλες) στο επίπεδο της δευτεροβάθμιας εκπαίδευσης. Οπότε, δεν θεωρούμε ότι η δική μας πρόταση αποτελεί κάποιου είδους καινοτομία. Αντίθετα, θεωρούμε ότι οι Έλληνες μαθητές λανθασμένα στερούνται βασικών γνώσεων που θα έπρεπε να είναι κτήμα κάθε ενεργού πολίτη.

Πέρα από τους παραπάνω λόγους θα πρέπει η πανεπιστημιακή εκπαίδευση (στους σχετικούς με την Φυσική τομείς) να ακολουθεί, κατά το δυνατόν, τις επιστημονικές εξελίξεις. Αυτό ακριβώς απαιτεί την προετοιμασία του μαθητή που ξεκινά τις πανεπιστημιακές σπουδές του, με ένα «πρώτο άκουσμα» των εξελίξεων που αναμφισβήτητα έχουν επηρεάσει την αντίληψή μας για την Φύση όσο και την ίδια την καθημερινή ζωή μας.

Ελπίζουμε η προτεινόμενη ύλη της Σύγχρονης Φυσικής να υιοθετηθεί από την επίσημη Πολιτεία και τα θέματα που αναπτύσσονται να φτάσουν σε κάθε μαθητή της χώρας μας.

Οι συγγραφείς

Περιεχόμενα

1	Η ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΤΟΥ ΦΩΤΟΣ	9
1.1	Σχετικιστική μηχανική	11
2	ΑΤΟΜΙΚΑ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ	15
2.1	Τα πρότυπα του ατόμου	15
2.2	Παλιά κβαντική θεωρία	17
2.3	Αρχή της Αντιστοιχίας	23
2.4	Υλικά κύματα de Broglie	24
2.5	Κβαντομηχανική	25
2.6	Αρχή της Απροσδιοριστίας	25
2.7	Φαινόμενα Συμβολής	26
3	ΠΥΡΗΝΙΚΑ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ	29
3.1	Ενέργεια σύνδεσης πυρήνα	31
3.2	Η πυρηνική δύναμη	32
3.3	Πυρηνική ευστάθεια και αστάθεια	33
3.4	Ραδιενεργές οικογένειες	35
3.5	Νόμος των ραδιενεργών διασπάσεων	36
3.6	Ραδιοχρονολόγηση	38
3.7	Κίνδυνοι από ακτινοβολίες	39
3.8	Δοσιμετρία ακτινοβολιών	40
3.9	Χρήσεις ακτινοβολιών	43
3.10	Πυρηνικές αντιδράσεις	43
3.11	Πυρηνική ενέργεια	44
	3.11.1 Πυρηνική σχάση	44
	3.11.2 Πυρηνική σύντηξη	46
3.12	Φυσική των σωματιδίων	48
	3.12.1 Λεπτόνια	49

3.12.2	Κουάρκ	50
3.12.3	Αδρόνια	52
3.12.4	Σωματίδια φορείς των θεμελιωδών αλληλεπιδράσεων	52
4	ΚΥΚΛΟΤΡΟ	57
4.1	Η αρχή του κυκλότρου	57
4.2	Φασματογράφος μάζας	59
5	ΕΡΩΤΗΣΕΙΣ/ΑΣΚΗΣΕΙΣ	61
5.1	Ταχύτητα φωτός	61
5.2	Ατομικά Φαινόμενα	62
5.3	Πυρηνικά φαινόμενα	67
5.4	Κύκλοτρο, Φασματογράφος μάζας	72
Α'	Ατομικές μάζες των ισοτόπων των στοιχείων	75

Κεφάλαιο 1

Η ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΤΟΥ ΦΩΤΟΣ

Στο κενό, η ταχύτητα του φωτός c (ακριβέστερα το μέτρο της διανυσματικής ταχύτητας του φωτός), είναι μια παγκόσμια σταθερά της οποίας η τιμή είναι: $c = 299\,792\,458$ m/s ακριβώς. Η σημασία της ταχύτητας του φωτός είναι μεγάλη στον κόσμο μας. Σύμφωνα με την Ειδική Θεωρία της Σχετικότητας, η ταχύτητα του φωτός είναι ίδια για κάθε αδρανειακό σύστημα αναφοράς ¹. Η ταχύτητα του φωτός είναι η μεγαλύτερη ταχύτητα με την οποία μπορεί να κινηθεί ένα σώμα. Σημειώνουμε πως η ταχύτητα c είναι η μέγιστη ταχύτητα με την οποία μπορεί να μεταδοθεί πληροφορία από ένα σημείο σε ένα άλλο απομακρυσμένο σημείο. Αυτά σχετίζονται με την αλληλουχία αιτίου και αιτιατού, με απλά λόγια δεν μπορούμε να βρούμε ένα σύστημα αναφοράς όπου να μπορούμε να πάμε πίσω στο χρόνο. Η ταχύτητα του φωτός εισέρχεται σε πολλές σχέσεις της φυσικής. Η πιο δημοφιλής είναι η σχέση ισοδυναμίας μάζας και ενέργειας: $E = mc^2$. Αυτή συνδέει τη μάζα ενός ακίνητου σώματος (συνήθως σωματιδίου) m με τη (σχετικιστική) ενέργεια E του σώματος. Αν εξαφανιστεί μάζα m θα εμφανιστεί ενέργεια E . Αυτό γίνεται σε πυρηνικούς αντιδραστήρες που τελικώς παράγουν ηλεκτρική ισχύ. 1 g μάζας αντιστοιχεί σε ενέργεια 9×10^{13} J. Αυτή η ενέργεια ισούται με το έργο που χρειάζεται για να ανυψωθεί κατά 9000 km μέσα σε ομογενές πεδίο βαρύτητας με $g = 10$ m/s², μάζα 1 000 000 kg=1000 t. Αυτή η μετατροπή γίνεται και κατά την λεγόμενη εξαύλωση ηλεκτρονίου και ποζιτρονίου. Συγκεκριμένα, αν ένα ηλεκτρόνιο και ένα ποζιτρόνιο (το αντισωματίδιο του ηλεκτρονίου) βρεθούν πολύ κοντά, αλληλεπιδρούν και στην θέση τους εμφανίζονται δύο φωτόνια. Το φαινόμενο είναι ένα κλασικό παράδειγμα μετατροπής της μάζας σε ενέργεια. Αυτό γίνεται σε εργαστήρια φυσικής σωματιδίων

¹Αδρανειακό είναι το σύστημα αναφοράς όπου ισχύουν οι νόμοι του Νεύτωνα. Ένα σύστημα αναφοράς που κινείται με σταθερή ταχύτητα ως προς κάποιο αδρανειακό, είναι και αυτό αδρανειακό σύστημα. Με πολύ καλή προσέγγιση, η Γη αποτελεί αδρανειακό σύστημα αναφοράς. Για παράδειγμα, ένα επιταχυνόμενο αυτοκίνητο δεν αποτελεί αδρανειακό σύστημα αναφοράς.

όπως το γνωστό Ευρωπαϊκό Εργαστήριο Πυρηνικών Ερευνών CERN (από τα αρχικά Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire), που ουσιαστικά είναι εργαστήριο για την σωματιδιακή φυσική. Η «σύγκρουση» ενός ηλεκτρονίου με ένα ποζιτρόνιο με μεγάλες κινητικές ενέργειες οδηγεί επίσης σε δημιουργία πληθώρας σωματιδίων με μάζες πολύ μεγαλύτερες των αρχικών. Επίσης, από την αλληλεπίδραση φωτονίου ακτίνων γ μεγάλης ενέργειας με, για παράδειγμα, φύλλο μολύβδου δημιουργείται ζεύγος ηλεκτρονίου-ποζιτρονίου. Αυτή είναι η λεγόμενη δίδυμη γέννηση. Πρόκειται για υλοποίηση (μετατροπή σε ύλη) ακτινοβολίας (ενέργειας) και συμβαίνει όταν το φωτόνιο βρεθεί μέσα στο ισχυρό ηλεκτρικό πεδίο κάποιου πυρήνα, χωρίς ο πυρήνας να μεταβάλλεται. Η ενέργεια του φωτονίου πρέπει να είναι τουλάχιστο ίση με την ενέργεια ηρεμίας των δυο σωματιδίων, δηλαδή ίση με $2m_e c^2 \approx 1\text{MeV} \approx 1,60 \times 10^{-13}\text{J}$. Σημειώνουμε ότι η μάζα του ποζιτρονίου είναι ακριβώς ίση με αυτήν του ηλεκτρονίου.

Ένα άλλο σχετικιστικό φαινόμενο είναι η διαστολή του χρόνου. Έστω ότι έχουμε δυο αδρανειακά συστήματα Α και Β. Το σύστημα Α κινείται ως προς το Β με (σταθερή) διανυσματική ταχύτητα \vec{v} . Σ' αυτό το κινούμενο σύστημα αναφοράς ας υποθέσουμε ότι δύο γεγονότα συμβαίνουν στο ίδιο σημείο του χώρου. Το πρώτο συμβαίνει την χρονική στιγμή t_{01} και το δεύτερο την στιγμή t_{02} . Ας ορίσουμε με $T_0 = t_{02} - t_{01}$. Το χρονικό διάστημα T που μετριέται στο σύστημα Β για την χρονική διάρκεια μεταξύ των δύο γεγονότων είναι

$$T = T_0 \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Η έκφραση

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

λέγεται συντελεστής Lorentz και με δεδομένο ότι $v < c$, ισχύει $\gamma > 1$. Παρατηρούμε ότι στο σύστημα Β το χρονικό διάστημα T είναι μεγαλύτερο από το T_0 και από αυτό προκύπτει ο όρος διαστολή του χρόνου. Σημειώνουμε ότι αν και τα δυο συστήματα είναι αδρανειακά, όπως υποθέσαμε προηγουμένως, τότε το φαινόμενο είναι «συμμετρικό». Δηλαδή, αν τα δύο γεγονότα συνέβαιναν στο ίδιο σημείο του συστήματος Β, στο σύστημα Α θα μετρούσαμε μεγαλύτερη χρονική διάρκεια. Γενικεύοντας: το χρονικό διάστημα μεταξύ δύο γεγονότων που μετριέται από ένα αδρανειακό σύστημα αναφοράς εξαρτάται από την ταχύτητα του συγκεκριμένου συστήματος. Το μικρότερο χρονικό διάστημα μετριέται στο αδρανειακό σύστημα όπου τα δύο γεγονότα γίνονται στο ίδιο σημείο του χώρου. Αν όμως το σύστημα Α επιταχύνεται ως προς το αδρανειακό σύστημα Β, τότε δεν υπάρχει η παραπάνω συμμετρία, το T_0 αναφέρεται στο επιταχυνόμενο

σύστημα. Σε αυτή την περίπτωση μπορούμε να θεωρήσουμε πως για πολύ μικρά χρονικά διαστήματα (και αντίστοιχες πολύ μικρές μετατοπίσεις) η ταχύτητα παραμένει σταθερή και ισχύει

$$\Delta T_{0i} = \sqrt{1 - \frac{v_i^2}{c^2}} \Delta T_i$$

Επομένως θα έχουμε για το «συνολικό» χρονικό διάστημα

$$T_0 = \sum_i \Delta T_{0i} = \sum_i \sqrt{1 - \frac{v_i^2}{c^2}} \Delta T_i, \quad T = \sum_i \Delta T_i$$

Προφανώς πρέπει να θεωρήσουμε ότι $\Delta T_{0i} \rightarrow 0$. Με απλό συλλογισμό προκύπτει ότι πάντοτε $T_0 < T$ ανεξάρτητα του πώς μεταβάλλεται η ταχύτητα με το χρόνο, δηλαδή ανεξάρτητα από πόση είναι η επιτάχυνση.

Για το φαινόμενο της διαστολής του χρόνου, το παράδειγμα του μιονίου είναι πολύ χαρακτηριστικό. Τα μίονια είναι σωματίδια που παράγονται στα ανώτερα στρώματα της γήινης ατμόσφαιρας. Αυτό γίνεται κατά τις συγκρούσεις κοσμικών σωματιδίων μεγάλης ενέργειας, κυρίως πρωτονίων, με συστατικά της ατμόσφαιρας. Ο χρόνος ζωής τους όταν είναι ακίνητα είναι $\tau_0 \approx 2 \mu\text{s}$. Αν δεν ίσχυε η διαστολή του χρόνου, ακόμη και αν έτρεχαν με την ταχύτητα του φωτός θα διένυαν διαδρομή περίπου 600 m πριν διασπαστούν. Έτσι δεν θα έφταναν σχεδόν ποτέ μίονια στην επιφάνεια της γης. Όμως, λόγω της διαστολής του χρόνου, ένα μίονιο με ενέργεια 10 GeV=10⁴ MeV, έχει $\gamma \approx 95$ οπότε μπορεί να βρείτε ότι διατρέχει περίπου 60 km πριν διασπαστεί. Αυτό σημαίνει πως μεγάλο πλήθος μιονίων φτάνει στην επιφάνεια της γης. Συγκεκριμένα, η ροή τους είναι περίπου 500 m⁻²s⁻¹. Αυτά μας βομβαρδίζουν και προκαλούν (ευτυχώς) βραδείες μεταλλάξεις οι οποίες έχουν συμβάλει στην εξέλιξη του ανθρώπινου είδους.

1.1 Σχετικιστική μηχανική

Η ορμή \vec{p} και η ενέργεια E ενός σώματος με μάζα m που κινείται με ταχύτητα \vec{v} , δίνονται από τις σχέσεις

$$\vec{p} = \frac{m\vec{v}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \quad E = \sqrt{(mc^2)^2 + p^2c^2} \rightarrow E = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (1.1)$$

Ας δούμε λίγο αυτές τις σχέσεις. Για ταχύτητες πολύ μικρότερες αυτής του φωτός, $v \ll c$, ή $v/c \ll 1$, η σχέση της ορμής προσεγγίζεται από την

$$\vec{p} = \frac{m\vec{v}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \approx m\vec{v}$$

που δεν είναι τίποτα άλλο παρά η ορμή στην νευτώνεια μηχανική.

Στην περίπτωση που το σώμα είναι ακίνητο, $\vec{v} = 0$, η σχέση της ενέργειας γράφεται

$$E^2 = (mc^2)^2 \rightarrow E = mc^2$$

Αυτή είναι η λεγόμενη ενέργεια ηρεμίας ενός σώματος με μάζα m . Αν και πάλι η ταχύτητα είναι πολύ μικρότερη αυτής του φωτός, $v/c \ll 1$, και θέλουμε να κάνουμε μια προσέγγιση της ενέργειας, καλύτερη από αυτήν της απλής $E \approx mc^2$, εύκολα φαίνεται ότι²

$$E = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \approx mc^2 \left(1 + \frac{1}{2} \frac{v^2}{c^2}\right) = mc^2 + \frac{1}{2}mv^2$$

Αν εξαιρέσουμε τον πρώτο όρο που είναι η (σχετικιστική) ενέργεια ηρεμίας, ο δεύτερος όρος είναι η νευτώνια κινητική ενέργεια. Στο Σχ.(1.1(α)) φαίνεται η εξάρτηση της ορμής από την ταχύτητα στην νευτώνια και στην σχετικιστική μηχανική. Για μικρές ταχύτητες, οι δύο καμπύλες συμπίπτουν.

Ξεκινώντας από την σχετικιστική σχέση της ενέργειας Εξ.(1.1), παίρνουμε

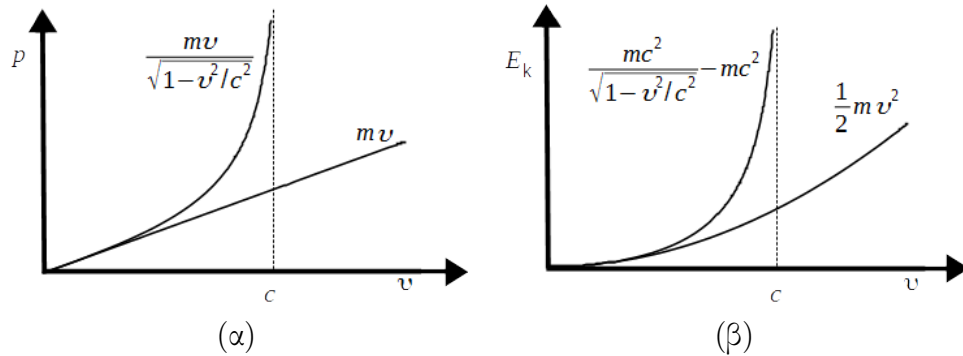
$$E = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \rightarrow E^2 = \frac{m^2c^4}{1 - \frac{v^2}{c^2}} \rightarrow E^2 \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right) = m^2c^4$$

και λύνοντας ως προς την ταχύτητα

$$v = c\sqrt{1 - \frac{m^2c^4}{E^2}} \quad (1.2)$$

Παρατηρούμε, από την παραπάνω σχέση ότι για να αποκτήσει ένα σώμα ταχύτητα ίση με c (δηλαδή η τετραγωνική ρίζα να γίνει ίση με την μονάδα), θα πρέπει η ενέργεια E να γίνει άπειρη. Δηλαδή, κανένα σώμα δεν μπορεί να κινηθεί με την ταχύτητα c μιας και θα έπρεπε να έχει άπειρη ενέργεια.

²Προσέξτε ότι $(1 - \epsilon)(1 + \epsilon/2)^2 = 1 - 3\epsilon^2/4$. Δηλαδή το $(1 + \epsilon/2)^2$ είναι το αντίστροφο του $(1 - \epsilon)$ με ένα σφάλμα ανάλογο του ϵ^2 . Επομένως, αν $\epsilon \ll 1$, μπορούμε να γράψουμε ότι $1/(1 - \epsilon) \approx (1 + \epsilon/2)^2$ ή $1/\sqrt{1 - \epsilon} \approx (1 + \epsilon/2)$.



Σχήμα 1.1: Η ορμή ως συνάρτηση της ταχύτητας (α) και η κινητική ενέργεια ως συνάρτηση της ταχύτητας (β), στην νευτώνια και στην σχετικιστική μηχανική.

Αν δεχθούμε ότι κάποιο «σώμα» έχει μηδενική μάζα, $m = 0$, η σχετικιστική σχέση της ενέργειας, Εξ.(1.1), γράφεται

$$E^2 = p^2 c^2 \rightarrow E = pc \rightarrow p = \frac{E}{c}$$

Αυτή είναι η περίπτωση του φωτονίου, το οποίο αποτελεί το κβάντο της ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας, Στην κβαντική φυσική, η ηλεκτρομαγνητική ενέργεια αποτελείται από κβάντα ενέργειας, (διακριτές) ποσότητες ενέργειας. Αν η ηλεκτρομαγνητική ενέργεια έχει συχνότητα f , τότε η ενέργεια του κβάντου αυτής της ενέργειας είναι $E = hf$ όπου h είναι η σταθερά του Planck (Πλανκ), $h = 6,626\,070\,15 \times 10^{-34} \text{Js}$. Οπότε, η ορμή του φωτονίου είναι

$$p = \frac{hf}{c}$$

Από την Εξ.(1.2) βλέπουμε ότι αν $m = 0$, η ταχύτητα είναι πάντα ίση με c . Πράγματι, το φωτόνιο έχει πάντοτε ταχύτητα c , από οποιοδήποτε σύστημα και αν την μετρήσουμε.

Στο Σχ.(1.1(β)) σχεδιάζουμε την κινητική ενέργεια E_k σώματος με μάζα m , ως συνάρτηση της ταχύτητας για την νευτώνια και την σχετικιστική μηχανική. Στην τελευταία, η κινητική ενέργεια ορίζεται ως η σχετικιστική ενέργεια μείον την ενέργεια ηρεμίας

$$E_k = E - mc^2 = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - mc^2$$

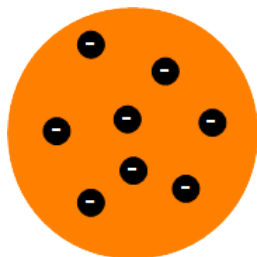
Κεφάλαιο 2

ΑΤΟΜΙΚΑ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ

2.1 Τα πρότυπα του ατόμου

Φαίνεται ότι πρώτοι οι αρχαίοι Έλληνες ασχολήθηκαν με τη δομή της ύλης. Οι Λεύκιππος και Δημόκριτος θεωρούσαν ότι η ύλη αποτελείται από απειροελάχιστους δομικούς λίθους, σωματίδια, που είναι τα απλούστερα συστατικά της ύλης, είναι αδιαίρετα και γι αυτό τα ονόμασαν άτομα, άτμητα. Δεν είχαν τις ίδιες ιδέες οι Πλάτωνας και Αριστοτέλης των οποίων οι απόψεις κυριάρχησαν και η ιδέα των ατόμων εγκαταλείφτηκε μέχρι τον 19ο αιώνα. Από τις αρχές αυτού του αιώνα επιστήμονες όπως ο John Dalton (Ντάλτον) επανέφεραν την θεωρία των ατόμων για να εξηγήσουν τους νόμους της Χημείας. Παρόλα αυτά η έννοια του ατόμου έμεινε ασαφής και αμφισβητούμενη για πολλά χρόνια ακόμη και από διάσημους επιστήμονες εκείνης της εποχής. Ο J.J. Thomson (Τόμσον) κατά το τέλος του 19ου αιώνα ανακάλυψε την ύπαρξη του ηλεκτρονίου, που είναι ένα αρνητικά φορτισμένο σωματίδιο. Είναι το πρώτο στοιχειώδες (θεμελιώδες) σωματίδιο που ανακαλύφτηκε. Είναι συστατικό του ατόμου το οποίο, γενικώς, μπορεί να έχει πολλά ηλεκτρόνια. Το άτομο είναι ουδέτερο επομένως πρέπει να έχει ίσου μέτρου θετικό και αρνητικό φορτίο. Ο Thomson επινόησε ένα μοντέλο (πρότυπο) του ατόμου, όπου αυτό είναι μια σφαίρα στην οποία θετικό φορτίο είναι κατανεμημένο ομοιόμορφα στον όγκο της ενώ τα ηλεκτρόνια είναι διάσπαρτα στο εσωτερικό της, όπως σε ένα στρογγυλό σταφιδόψωμο (βλ. Σχ.(2.1)). Η μάζα των ηλεκτρονίων είναι κατά πολύ μικρότερη από το μέρος του ατόμου που φέρει το θετικό φορτίο.

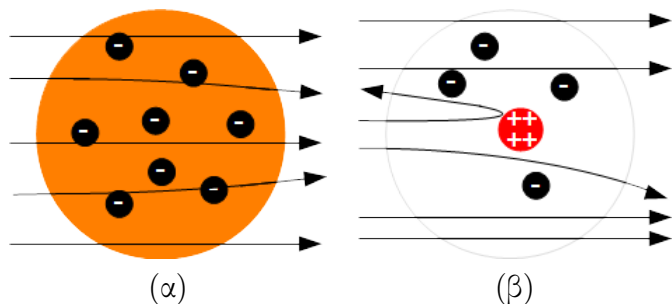
Ο Ernest Rutherford (Ράδερφορντ) στις αρχές του 20ου αιώνα πρότεινε και κατήυθυνε τη διεξαγωγή πειραμάτων σκέδασης σωματιδίων άλφα, α , με λεπτό φύλλο χρυσού. Τα σωματίδια α είναι θετικά φορτισμένα με φορτίο απόλυτης τιμής ίσης με δυο φορές το φορτίο του ηλεκτρονίου. Σήμερα ξέρουμε ότι είναι πυρήνες του στοιχείου που λέγεται



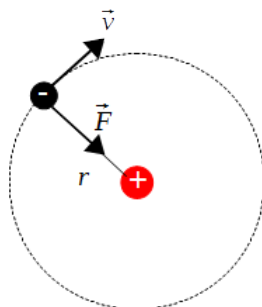
Σχήμα 2.1: Το πρότυπο του ατόμου κατά τον Thomson. Το θετικό φορτίο είναι κατανεμημένο ομοιόμορφα στον όγκο της σφαίρας (πορτοκαλί χρώμα) ενώ τα ηλεκτρόνια είναι διάσπαρτα στο εσωτερικό της. Το συνολικό ηλεκτρικό φορτίο είναι μηδενικό.

ήλιο. Αν η μάζα του ατόμου με το θετικό της φορτίο ήταν κατανεμημένη όπως έλεγε το μοντέλο του Thomson η σκέδαση θα γίνονταν όπως στο Σχ.(2.2α). Τα περισσότερα σωματίδια δεν αλλάζουν κατά πολύ πορεία, η γωνία εκτροπής τους από την αρχική κατεύθυνσή τους (γωνία σκέδασης) είναι πολύ μικρή. Το πείραμα έδειξε ότι αρκετά σωματίδια σκεδάζονταν με γωνίες σκέδασης πολύ μεγάλες. Αυτό είχε ως συνέπεια να ισχύει το μοντέλο που φαίνεται στο Σχ.(2.2β). Δηλαδή, υπάρχει ένα κεντρικό τμήμα του ατόμου (πυρήνας) όπου είναι συγκεντρωμένη σχεδόν όλη η μάζα του ατόμου και όλο το θετικό φορτίο του. Στη σκέδαση δεν παίζουν σημαντικό ρόλο τα ηλεκτρόνια του ατόμου γιατί έχουν πολύ μικρή μάζα και γι αυτό δε μπορεί να εκτρέψουν τα πολύ βαρύτερα σωματίδια α. Με βάση τα πειράματα σκέδασης, ο Rutherford πρότεινε το πρότυπο του ατόμου που φέρει το όνομά του (πρότυπο του Rutherford) και λέγεται και πλανητικό μοντέλο του ατόμου. Αυτό αντικατέστησε το πρότυπο του Thomson. Στο Σχ.(2.3) δείχνουμε το μοντέλο του Rutherford για το απλούστερο άτομο που είναι το άτομο του υδρογόνου.

Ο Rutherford υπολόγισε και την ακτίνα του πυρήνα. Ενδεικτικά αναφέρουμε ότι



Σχήμα 2.2: Σκέδαση σωματιδίων α στο: (α) πρότυπο του Thomson και (β) στο πρότυπο του Rutherford.



Σχήμα 2.3: Το πρότυπο του ατόμου κατά τον Rutherford.

αν ο πυρήνας θεωρηθεί ότι είναι μια μπάλα ποδοσφαίρου τότε το ηλεκτρόνιο κινείται σε απόσταση από τον πυρήνα που αντιστοιχεί σε μήκος ενός γηπέδου ποδοσφαίρου. Η τελευταία είναι και η σχετική διάσταση του ατόμου, είναι τεράστια σε σχέση με αυτή του πυρήνα. Τα ηλεκτρόνια κινούνται γύρω από τον πυρήνα όπως οι πλανήτες γύρω από τον ήλιο. Η δύναμη που τα συγκρατεί είναι η ηλεκτροστατική δύναμη που ασκεί ο πυρήνας, ενώ στην περίπτωση των πλανητών η δύναμη είναι η βαρυτική δύναμη. Το πρόβλημα με αυτό το μοντέλο είναι η αστάθειά του. Το ηλεκτρόνιο κινείται σε καμπύλη τροχιά οπότε έχει επιτάχυνση, αφού το διάνυσμα της ταχύτητάς του συνεχώς μεταβάλλεται. Σύμφωνα με τη θεωρία του ηλεκτρομαγνητισμού κάθε επιταχυνόμενο ηλεκτρισμένο σωματίδιο εκπέμπει ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, δηλαδή χάνει ενέργεια. Στην περίπτωση του ατόμου θα έπρεπε το ηλεκτρόνιο χάνοντας ενέργεια να πλησιάζει συνεχώς τον πυρήνα ώσπου να πέσει πάνω του. Δηλαδή τα άτομα θα ήταν ασταθή, όλη η ύλη θα κατέρρεε και ούτε εμείς θα υπήρχαμε. Δεν θα υπήρχαν ευσταθή άτομα με ηλεκτρόνια να κινούνται σε πολύ μεγάλες αποστάσεις από τον πολύ μικρών διαστάσεων πυρήνα τους.

2.2 Παλιά κβαντική θεωρία.

Το ατομικό κβαντικό πρότυπο του Bohr

Το πρόβλημα που είχε το πλανητικό μοντέλο του Rutherford, μπόρεσε να λύσει ο Niels Bohr (Μπόρ) (1913). Θα περιοριστούμε στο άτομο του υδρογόνου. Όπως ήδη αναφέραμε, σύμφωνα με τον Rutherford το άτομο του υδρογόνου είναι αυτό που φαίνεται στο Σχ.(2.3).

Η μάζα του πυρήνα του είναι $M_p = 1840 m_e$ όπου m_e η μάζα του ηλεκτρονίου. Σε ότι ακολουθεί θα αγνοήσουμε το γεγονός πως στην πραγματικότητα ο πυρήνας και

το ηλεκτρόνιο περιφέρονται περί το κοινό κέντρο μάζας τους και θα υποθέσουμε ότι ο πυρήνας είναι ακίνητος και το ηλεκτρόνιο περιφέρεται περί αυτόν. Ο Bohr προσπάθησε να τροποποιήσει το πλανητικό μοντέλο ώστε να δικαιολογήσει την ευστάθεια του ατόμου. Επίσης προσπάθησε να ερμηνεύσει το γεγονός της εκπομπής ακτινοβολίας από αέρια (μεμονωμένα άτομα). Τα άτομα εκπέμπουν συγκεκριμένα μήκη κύματος ή συχνότητες, δηλαδή δεν εκπέμπουν συνεχή φάσματα αλλά διακριτά, γραμμικά φάσματα. Στο Σχ.(2.4) εικονίζεται το (ορατό) φάσμα του υδρογόνου, οι γραμμές εκπομπής του υδρογόνου.

Ο Bohr κατάλαβε πως πρέπει το άτομο να έχει στάσιμες καταστάσεις στις οποίες όταν βρίσκεται δεν ακτινοβολεί και έχει συγκεκριμένες διαστάσεις και ταχύτητες περιφοράς ή αντίστοιχες συχνότητες περιφοράς. Ο Bohr διατύπωσε τις παρακάτω αρχές για να πετύχει τους στόχους του:

1. Η δυναμική ισορροπία του ατόμου όταν βρίσκεται σε κάποια από τις στάσιμες καταστάσεις μπορεί να μελετηθεί με τη συνήθη μηχανική του Νεύτωνα, ενώ η μετάβαση από μια στάσιμη σε άλλη στάσιμη κατάσταση δε μπορεί να μελετηθεί με αυτό τον τρόπο.
2. Η μετάβαση συνοδεύεται από εκπομπή μονοχρωματικής ακτινοβολίας, για την ενέργεια της οποίας ισχύει η σχέση του Planck, $E = hf$. Δηλαδή εκπέμπεται ένα κβάντο ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας. Το f παριστάνει τη συχνότητα της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας. Το h είναι η σταθερά του Planck.

Σημειώνουμε ότι η έννοια του φωτονίου δεν είχε εισαχθεί εκείνη την εποχή αλλά θα χρησιμοποιούμε κατά καιρούς αυτή την έννοια, αντί για κβάντο της ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας.

Αναφέρουμε ότι από το 1885 ο Balmer (Μπάλμερ) είχε βρει ότι οι τα μήκη κύματος λ των φασματικών γραμμών του υδρογόνου ακολουθούν τη σχέση:

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{f}{c} = R \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right)$$



Σχήμα 2.4: Το ορατό φάσμα του υδρογόνου. Οι τιμές υποδηλώνουν το αντίστοιχο μήκος κύματος.

όπου τα n_1 και n είναι θετικοί ακέραιοι, $1, 2, 3, \dots, \infty$ με $n > n_1$. Η παραπάνω σχέση αποτελεί γενίκευση του τύπου του Balmer που αντιστοιχεί στην περίπτωση που $n_1 = 2$. Για διάφορα n_1 έχουμε τις διάφορες σειρές φασμάτων που φέρουν τα ονόματα ανθρώπων που πρώτοι τις παρατήρησαν. Το Σχ.(2.4) δείχνει τις ορατές γραμμές της σειράς Balmer. Η σταθερά R λέγεται σταθερά (του) Rydberg (Ρίντμπεργκ) και ήταν γνωστή πειραματικά, δηλαδή από μετρήσεις. Η τιμή της σταθεράς είναι $R = 1,0974 \times 10^7 \text{m}^{-1}$.

Θα προχωρήσουμε σε υπολογισμούς σχετικά με το πρότυπο του Bohr. Θα υποθέσουμε ότι οι τροχιές του ηλεκτρονίου είναι κύκλοι και ότι η ταχύτητα του ηλεκτρονίου είναι πολύ μικρότερη από την ταχύτητα του φωτός οπότε ισχύουν οι σχέσεις της νευτώνειας μηχανικής. Ο Bohr ακολούθησε διάφορες διαδικασίες, εδώ θα περιοριστούμε σε μια που χρησιμοποίησε προς το τέλος η οποία συνήθως αναφέρεται στα περισσότερα διδακτικά βιβλία.

Από το Σχ.(2.3) έχουμε τη γνωστή σχέση για την κεντρομόλο δύναμη η οποία οφείλεται στην ηλεκτροστατική έλξη μεταξύ του πρωτονίου (πυρήνα) και του ηλεκτρονίου

$$\frac{m_e v^2}{r} = k \frac{e^2}{r^2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r^2}$$

όπου e η απόλυτη τιμή του φορτίου του ηλεκτρονίου ή το φορτίο του πρωτονίου (στοιχειώδες ηλεκτρικό φορτίο), v το μέτρο της ταχύτητας του ηλεκτρονίου και r η ακτίνα της κυκλικής κίνησής του (το ϵ_0 είναι η λεγόμενη διηλεκτρική σταθερά του κενού ή, σύμφωνα με την σύγχρονη ορολογία, ηλεκτρική σταθερά). Η κινητική, E_k , και η δυναμική, E_d , ενέργεια του ηλεκτρονίου δίνονται από τις σχέσεις

$$E_k = \frac{1}{2} m_e v^2 = \frac{1}{8\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r}, \quad E_d = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r}$$

και η ολική ενέργεια του ηλεκτρονίου

$$E = E_k + E_d = -\frac{1}{8\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r}$$

Είναι ευνόητο πως δε μπορούμε να προσδιορίσουμε το μέγεθος του ατόμου, αφού τα r , v και η ενέργεια μπορεί να έχουν οποιοσδήποτε τιμές. Εκτός από την αστάθεια που οδηγεί σε συνεχές και όχι διακριτό φάσμα εκπομπής, επίσης η εκπεμπόμενη ενέργεια κατά την πτώση του ηλεκτρονίου στον πυρήνα είναι πολύ μεγάλη, πολύ μεγαλύτερη από την ενέργεια που εκπέμπεται στην πραγματικότητα και χαρακτηρίζεται από τις φασματικές γραμμές. Οι σχέσεις αυτές πρέπει να συμπληρωθούν με κάποια άλλη σχέση. Σημειώνουμε ότι ήδη υπήρχε η σχέση κβάντωσης της ενέργειας ταλαντωτών που εκπέμπουν και απορροφούν ακτινοβολία, αυτή είναι η σχέση του Planck που αναφέραμε

προηγουμένως. Επίσης υπήρχε η ιδέα του Einstein (Αϊνστάιν) για τη φύση του φωτός ότι αποτελείται από κβάντα ενέργειας με συμπεριφορά σωματιδιακή και κυματική. Αυτές οι οντότητες είναι που ονομάστηκαν αργότερα φωτόνια. Η νέα σχέση που εισήγαγε ο Bohr είναι η ακόλουθη:

$$m_e v r = n \frac{h}{2\pi}, \quad \text{όπου } n = 1, 2, 3, \dots$$

Πρόκειται για την κβάντωση της τροχιακής στροφορμής λόγω περιφοράς του ηλεκτρονίου. Δηλαδή, η στροφορμή, $m_e v r$, μπορεί να πάρει μόνο ορισμένες τιμές οι οποίες είναι ακέραια πολλαπλάσια της ποσότητας $h/(2\pi)$. Η χρήση αυτής της σχέσης οδηγεί στην κβάντωση της ακτίνας r , της ταχύτητας v και της ενέργειας E

$$r_n = \frac{\epsilon_0 h^2}{\pi m_e e^2} n^2, \quad v_n = \frac{e^2}{2\epsilon_0 h} \frac{1}{n}, \quad E_n = -\frac{e^4 m_e}{8\epsilon_0^2 h^2} \frac{1}{n^2}, \quad \text{όπου } n = 1, 2, 3, \dots$$

Το n είναι ο λεγόμενος κύριος κβαντικός αριθμός. Τα παραπάνω αντιστοιχούν σε στάσιμες τροχιές, καταστάσεις, του ατόμου του υδρογόνου. Η ιδέα είναι ότι όταν βρίσκεται σε αυτές τις καταστάσεις το άτομο δεν ακτινοβολεί και είναι ευσταθές.

Όταν το ηλεκτρόνιο μεταβαίνει από μια κατάσταση με κβαντικό αριθμό n σε άλλη με κβαντικό αριθμό n_1 , $n_1 < n$, τότε εκπέμπεται κβάντο (φωτόνιο) ενέργειας $E_\varphi = E_{n_1} - E_n$. Αυτή η σχέση εκφράζει και τη διατήρηση της ενέργειας, αφού η αρχική ενέργεια του ηλεκτρονίου ισούται με την τελική του ενέργεια συν την ενέργεια του φωτονίου που εκπέμφθηκε, $E_n = E_{n_1} + E_\varphi$. Από τα προηγούμενα βρίσκουμε ότι αν έχουμε μετάπτωση στην κατάσταση με τελικό κβαντικό αριθμό $n_1 = 2$, καταλήγουμε στη σχέση:

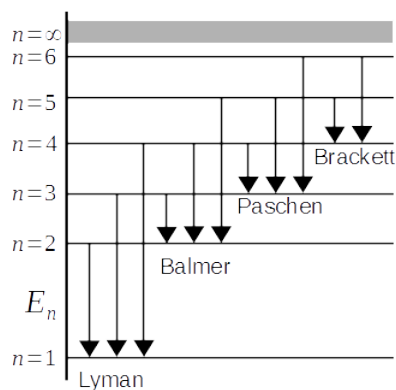
$$hf = E_n - E_2 = \frac{e^4 m_e}{8\epsilon_0^2 h^2} \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

Ουσιαστικά πρόκειται για τη σχέση του Balmer. Γενικότερα ισχύει:

$$hf = E_n - E_{n_1} = \frac{e^4 m_e}{8\epsilon_0^2 h^2} \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

Αυτή η διαδικασία λέγεται αποδιέγερση του ατόμου. Είναι ευνόητο ότι η σταθερά Rydberg εκφράζεται ως συνάρτηση άλλων γνωστών σταθερών, δηλαδή ισχύει $R = \frac{e^4 m_e}{8\epsilon_0^2 c h^3}$. Η ακτίνα του ατόμου του υδρογόνου που αντιστοιχεί στον μικρότερο κβαντικό αριθμό $n = 1$, μικρότερη ακτίνα, r_1 , δηλαδή στη λεγόμενη θεμελιώδη κατάσταση του ατόμου του υδρογόνου, δίνεται από τη σχέση

$$r_1 = a_0 = \frac{\epsilon_0 h^2}{\pi m_e e^2} \approx 5,291 \times 10^{-11} \text{m}$$



Σχήμα 2.5: Οι στάθμες ενέργειας του ατόμου του υδρογόνου και οι σειρές εκπομπής ακτινοβολίας.

Συνήθως αναφέρονται ως συνθήκες του Bohr δυο παραδοχές που ακολουθούνται για την τροποποίηση της κλασικής νευτώνειας εικόνας του ατόμου του υδρογόνου ώστε να εξηγηθούν τα πειραματικά δεδομένα των γραμμικών φασμάτων του ατόμου του υδρογόνου.

- 1η συνθήκη του Bohr: Τα ηλεκτρόνια του ατόμου περιφέρονται σε στάσιμες τροχιές χωρίς να ακτινοβολούν. Για αυτές τις τροχιές ισχύει για την τροχιακή στροφορμή L του κάθε ηλεκτρονίου, $L = m_e v r = n \frac{h}{2\pi}$, $n = 1, 2, \dots$, όπου n είναι ο κύριος κβαντικός αριθμός.
- 2η συνθήκη του Bohr: Ακτινοβολία εκπέμπεται μόνο όταν ηλεκτρόνιο μεταπηδά από στάσιμη τροχιά μεγαλύτερης ενέργειας σε στάσιμη τροχιά μικρότερης ενέργειας.

Τονίζουμε εδώ ότι είναι δυνατή μετάβαση από τροχιά μικρότερης ενέργειας σε τροχιά μεγαλύτερης αν δοθεί στο ηλεκτρόνιο το κατάλληλο κβάντο ενέργειας που αντιστοιχεί στις δυο συγκεκριμένες τροχιές: $hf = E_{\text{τελ}} - E_{\text{αρχ}}$, όπου $E_{\text{τελ}} > E_{\text{αρχ}}$. Αυτό λέγεται διέγερση του ατόμου.

Παριστάνουμε τη σχέση μεταξύ των επιτρεπόμενων (κβαντισμένων) τιμών της ολικής ενέργειας του ατόμου του υδρογόνου όπως φαίνεται στο Σχ.(2.5). Ο κατακόρυφος άξονας παριστάνει, με τις οριζόντιες γραμμές που σχεδιάζονται, τις ενέργειες για τις διάφορες διαδοχικές τιμές του κύριου κβαντικού αριθμού $n = 1, 2, 3, \dots$. Οι γραμμές παριστάνουν τις στάθμες ενέργειας του ατόμου. Στο σχήμα αυτό φαίνονται και οι λεγόμενες σειρές εκπομπής ακτινοβολίας με τα διάφορα ονόματά τους.

Είναι ευνόητο ότι ο τύπος της ενέργειας για $n = +\infty$ και κάποιο πεπερασμένο n_1 δίνει την ελάχιστη ενέργεια που απαιτείται να δοθεί στο ηλεκτρόνιο ώστε το άτομο να ionιστεί. Σε αυτή την περίπτωση το ηλεκτρόνιο απομακρύνεται σε πολύ μεγάλη απόσταση (άπειρη απόσταση) από τον πυρήνα και έχει ταχύτητα μηδέν. Η μέγιστη τέτοια ενέργεια είναι η ενέργεια για την στάθμη με $n_1 = 1$, αυτή λέγεται ότι είναι η ενέργεια ionτισμού του ατόμου. Η ενέργεια αυτή για το άτομο του υδρογόνου είναι: $E_{\text{ionτ}} = 2,18 \times 10^{-18} \text{J} \approx 13,6 \text{eV}$.

Στα άτομα με πολλά ηλεκτρόνια η κατανομή των ηλεκτρονίων γύρω από τον πυρήνα γίνεται με βάση την Κβαντομηχανική. Τα ηλεκτρόνια κατανέμονται σε στιβάδες και σε υποστιβάδες. Οι στιβάδες και υποστιβάδες φέρουν ορισμένο πλήθος ηλεκτρονίων, έχουν συγκεκριμένες ενέργειες και άλλα χαρακτηριστικά όπως η στροφορμή. Όπως και όλα τα στοιχειώδη σωματίδια, το ηλεκτρόνιο έχει μια ιδιότητα που καλείται ιδιοστροφορμή (σπιν). Αυτή η ιδιοστροφορμή πρέπει να προστεθεί στην τροχιακή στροφορμή που έχει το ηλεκτρόνιο λόγω της περιφοράς του. Η τιμή του σπιν είναι ανεξάρτητη από την συγκεκριμένη κίνηση του ηλεκτρονίου.

Στη θεμελιώδη κατάσταση το άτομο με πολλά ηλεκτρόνια έχει μια συγκεκριμένη διάταξη των ηλεκτρονίων του που αντιστοιχεί στο ελάχιστο της ολικής ενέργειας του ατόμου. Μόνο τα ηλεκτρόνια των εξωτερικών στιβάδων (και σχετικών υποστιβάδων) υπεισέρχονται στην ένωση μεταξύ ατόμων, δηλαδή στο σχηματισμό μορίων ή αλλιώς στις χημικές διεργασίες. Αυτό εξηγεί γιατί άτομα με ίδιο πλήθος εξωτερικών ηλεκτρονίων έχουν παρεμφερείς ιδιότητες. Οι κβαντικοί αριθμοί που καθορίζουν την κατάσταση ενός ηλεκτρονίου σε ένα άτομο είναι οι εξής τέσσερις:

- ο κύριος κβαντικός αριθμός n που παίρνει τιμές $n = 1, 2, 3, \dots$, και καθορίζει την στιβάδα,
- ο δευτερεύον κβαντικός αριθμός l που παίρνει τιμές $l = 0, 1, 2, \dots, n - 1$, και καθορίζει την υποστιβάδα,
- ο κβαντικός αριθμός τροχιακής στροφορμής ή μαγνητικός κβαντικός αριθμός τροχιακής στροφορμής m_l που παίρνει τιμές $m_l = -l, -l + 1, \dots, l - 1, l$,
- ο κβαντικός αριθμός κατεύθυνσης του σπιν m_s που παίρνει τιμές $m_s = \pm 1/2$.

Σημειώνουμε ότι ο κβαντικός αριθμός l σχετίζεται με το μέτρο της τροχιακής στροφορμής (στροφορμή εκ περιφοράς η οποία είναι διανυσματικό μέγεθος, \vec{L}) με τη σχέση

$$L = \sqrt{l(l+1)} \frac{h}{2\pi}$$

Η προβολή της τροχιακής στροφορμής σε οποιονδήποτε άξονα (έστω z) είναι

$$L_z = m_l \frac{h}{2\pi}$$

Το μέτρο του σπιν του ηλεκτρονίου είναι

$$S = \sqrt{\frac{1}{2} \left(\frac{1}{2} + 1 \right)} \frac{h}{2\pi}$$

και η προβολή του σπιν σε οποιονδήποτε άξονα (έστω z) είναι

$$S_z = m_s \frac{h}{2\pi}$$

Τα άτομα συγκροτούν τις απλούστερες ουσίες, δηλαδή τα χημικά στοιχεία. Το κάθε χημικό στοιχείο χαρακτηρίζεται από πυρήνα με συγκεκριμένο πλήθος πρωτονίων και επομένως και ηλεκτρονίων. Η διάταξη των ηλεκτρονίων στα άτομα με πολλά ηλεκτρόνια υπακούει στην λεγόμενη απαγορευτική αρχή του Pauli (Πάολι), σύμφωνα με την οποία δε μπορούν δυο ηλεκτρόνια του ατόμου να έχουν και τους τέσσερις κβαντικούς αριθμούς ίδιους. Δηλαδή, δε μπορούν να βρίσκονται στην ίδια κβαντική κατάσταση. Αυτό συμβάλλει στην μεγάλη ποικιλία ατόμων με διαφορετικές ηλεκτρονικές κατανομές. Είναι δύσκολο να φανταστούμε τον κόσμο μας χωρίς αυτή την αρχή.

2.3 Αρχή της Αντιστοιχίας

Σύμφωνα με την αρχή της αντιστοιχίας, τα αποτελέσματα της κβαντικής θεωρίας πλησιάζουν τα αποτελέσματα της κλασικής θεωρίας για μεγάλους κβαντικούς αριθμούς που κατά τις μεταπτώσεις σχετίζονται με μικρές μεταβολές των κβαντισμένων ποσοτήτων. Η κλασική μηχανική είναι οριακή περίπτωση της κβαντικής για τροχιές με μεγάλη ακτίνα, επίσης είναι οριακή περίπτωση για πολύ μεγάλες μάζες. Ευτυχώς, φανταστείτε να χρειάζονταν κβαντική μηχανική για την περιγραφή της κίνησης ενός αυτοκινήτου! Αντίστοιχα, η κλασική νευτώνεια μηχανική συμπίπτει με την Ειδική Θεωρία της Σχετικότητας για πολύ μικρές ταχύτητες σε σχέση με την ταχύτητα του φωτός ενώ η Γενική Θεωρία της Σχετικότητας δίνει ίδια αποτελέσματα με την Ειδική θεωρία για ασθενικά πεδία βαρύτητας.

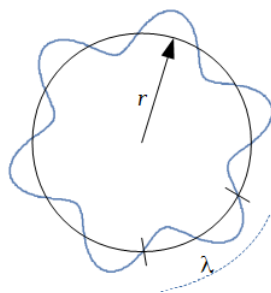
2.4 Υλικά κύματα de Broglie

Ένα μεγάλο βήμα στην κβαντική Φυσική έγινε από τον Louis de Broglie (Λουί ντε Μπρόυ). Ήταν γνωστό ότι το φως που χαρακτηρίζονταν ως κυματικό φαινόμενο του ηλεκτρομαγνητισμού, παρουσίαζε και σωματιδιακές ιδιότητες. Οπότε με κάποιους θεωρητικούς συλλογισμούς κατέληξε στο συμπέρασμα ότι και ένα υλικό σωματίδιο έχει και κυματική συμπεριφορά. Συγκεκριμένα, σωματίδιο με ορμή p συνδέεται με κύμα μήκους κύματος $\lambda = h/p$. Για μικρές ταχύτητες σχετικά με αυτήν του φωτός έχουμε προφανώς: $\lambda = h/(mv)$. Αμέσως γίνεται αντιληπτό ότι για συνήθη σώματα όπου οι μάζες είναι τεράστιες, τα αντίστοιχα μήκη κύματος είναι πάρα πάρα πολύ μικρά, αμελητέα, οπότε η κυματική περιγραφή τους δεν έχει νόημα. Τέτοια κύματα δεν μπορούν να μετρηθούν. Τα πράγματα αλλάζουν στην περιγραφή του μικρόκοσμου, άτομα, μόρια, υπατομικά σωματίδια. Για το άτομο του υδρογόνου κάνουμε την παραδοχή πως έχουμε στάσιμες τροχιές (στάσιμες καταστάσεις) όταν το μήκος της τροχιάς του ηλεκτρονίου ισούται με ακέραιο πλήθος μηκών κύματος de Broglie (βλ. Σχ.(2.6)). Αυτό είναι το αντίστοιχο της κλασικής φυσικής όπου έχουμε μόνο διακριτές, στάσιμες, καταστάσεις (στάσιμα κύματα) σε χορδή στερεωμένη στα δυο άκρα της ή στάσιμα κύματα σε ηχητικούς σωλήνες. Σύμφωνα λοιπόν με την αρχή αυτή ισχύει: $2\pi r = n\lambda$ με $n = 1, 2, \dots$, όπου r η ακτίνα της τροχιάς. Αυτό οδηγεί στη σχέση

$$2\pi r = n \frac{h}{mv}, \quad n = 1, 2, \dots$$

δηλαδή οδηγεί στην κβάντωση της στροφορμής που αναφέραμε προηγουμένως

$$L = mvr = n \frac{h}{2\pi}$$



Σχήμα 2.6: Το μήκος της τροχιάς είναι ίσο με ακέραιο πλήθος μηκών κύματος de Broglie.

Αυτή η ιδέα είναι η βάση της σύγχρονης θεωρίας της Κβαντομηχανικής που αναπτύχθηκε αργότερα και δίνει μια επιτυχή περιγραφή του μικρόκοσμου, δηλαδή των ατόμων και μορίων. Όλα έως τώρα αναφέρονται ως παλιά κβαντική φυσική. Αποτελούν ένα σημαντικό βήμα στην περιγραφή του μικρόκοσμου αλλά δεν τον περιγράφουν ικανοποιητικά. Το μοντέλο του ατόμου εφαρμόζεται στο υδρογόνο και σε άλλα άτομα που έχουν ιονιστεί και τους έχει μείνει μόνο ένα ηλεκτρόνιο. Αυτά λέγονται υδρογονοειδή άτομα ή καλύτερα υδρογονοειδή συστήματα ή υδρογονοειδή ιόντα. Όμως δεν μπορεί να επεκταθεί σε άτομα με πολλά ηλεκτρόνια και δεν δίνει την ακριβή περιγραφή ακόμη και της συμπεριφοράς του ατόμου του υδρογόνου.

2.5 Κβαντομηχανική

Σύμφωνα με αυτή τη θεωρία δεν έχει νόημα η τροχιά ενός σωματιδίου. Δε μπορούμε σε ένα σύστημα αξόνων να δώσουμε κάθε χρονική στιγμή τη θέση ενός σωματιδίου και από τη διαδοχή των θέσεων να σχεδιάσουμε την τροχιά του στο χώρο. Το μόνο που μπορούμε να υπολογίσουμε με την Κβαντομηχανική, είναι η πιθανότητα να βρεθεί το σωματίδιο σε μια περιοχή του χώρου. Το μέγεθος που χαρακτηρίζει την κατάσταση ενός κβαντικού συστήματος, όπως το άτομο του υδρογόνου, είναι μια συνάρτηση της θέσης και του χρόνου από όπου μπορούν να υπολογιστούν τα διάφορα φυσικά μεγέθη, ενέργεια, στροφορμή, κατανομή πυκνότητας πιθανότητας κτλ. Αυτή λέγεται κυματοσυνάρτηση και με τη χρήση της μπορεί να ερμηνευτούν κυματικά φαινόμενα των σωματιδίων όπως φαινόμενα συμβολής.

Το κβάντο (φωτόνιο) της ενέργειας που απορροφάται ή εκπέμπεται από τα ηλεκτρόνια που αλλάζουν ενεργειακή στάθμη οδηγεί στην έννοια ότι το φως έχει (πέραν από την κυματική) και σωματιδιακή μορφή (πειράματα με ασθενικό φως το επιβεβαιώνουν). Εύλογο λοιπόν είναι να ρωτήσει κάποιος, τι είναι ένα υλικό σωματίδιο ή ένα φωτόνιο: κύμα ή σωματίδιο; Η απάντηση είναι πως ο σωματιδιακός και ο κυματικός χαρακτήρας είναι δυο όψεις που εμφανίζουν όλα τα σωματίδια, είναι δυο όψεις τους που χρειάζονται και οι δυο για την πλήρη κατανόησή τους. Όταν ανιχνεύονται εμφανίζονται εντοπισμένα όπως συνηθίζουμε να περιμένουμε για ένα σωματίδιο, όμως εμφανίζουν και φαινόμενα συμβολής όπως τα κύματα. Αυτό ονομάζεται δυϊσμός.

2.6 Αρχή της Απροσδιοριστίας

Στην κβαντομηχανική ισχύει και η Αρχή της Απροσδιοριστίας ή Αρχή του Heisenberg (Χάιζενμπεργκ). Η αρχή αυτή λέει ότι είναι αδύνατο να γνωρίζουμε ταυτόχρονα τη

θέση και την ορμή ενός υλικού σωματιδίου. Συγκεκριμένα, σε αυτή την περίπτωση, η απροσδιοριστία (πιο σωστά η τυπική απόκλιση), Δx , στη συντεταγμένη θέσης x και η απροσδιοριστία, Δp_x , στην αντίστοιχη ορμή p_x (της συνιστώσας της ορμής παράλληλης με τον άξονα x), συνδέονται με τη σχέση

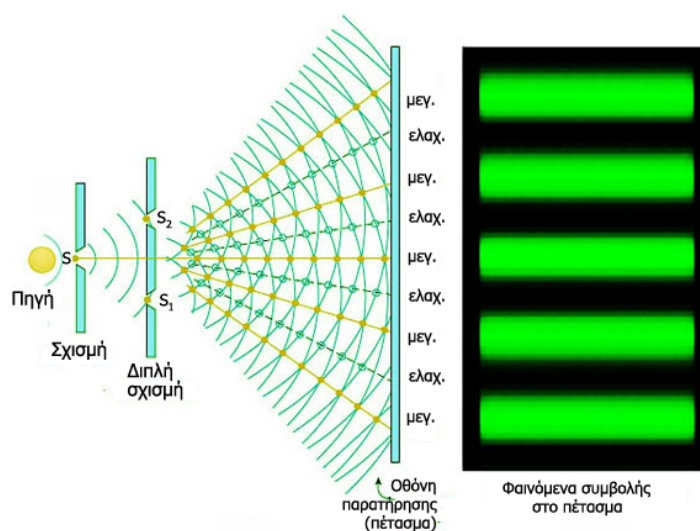
$$\Delta x \Delta p_x \geq \frac{1}{2} \frac{h}{2\pi}$$

με αντίστοιχες σχέσεις για τις άλλες δύο συνιστώσες y και z . Αυτό σημαίνει πως όσο καλύτερα είναι γνωστή η θέση, τόσο χειρότερα είναι γνωστή η ορμή και αντιστρόφως. Σημειώνουμε ότι αυτή η απροσδιοριστία δεν οφείλεται σε σφάλμα των μετρητικών οργάνων αλλά είναι χβαντικό φαινόμενο. Βέβαια η σταθερά του Planck, h , είναι τόσο μικρή ώστε σε μακροσκοπικά αντικείμενα, ή ακόμα και σε αντικείμενα αρκετά μεγαλύτερα από μόρια, η σχέση απροσδιοριστίας δεν παίζει κανένα ρόλο. Αντίθετα, ο ρόλος της σε επίπεδο ατόμου, πυρήνα και στοιχειώδους σωματιδίου είναι πολύ σημαντικός.

2.7 Φαινόμενα συμβολής με φωτόνια και με σωματίδια

Έχουν διεξαχθεί πειράματα συμβολής με φως, όπως το πείραμα του Young με δυο λεπτές σχισμές πολύ κοντά μεταξύ τους. Σήμερα παρόμοια πειράματα μπορούν να γίνουν πολύ εύκολα με τη χρήση μικρού laser τσέπης. Η αρχή της πειραματικής διάταξης φαίνεται στο Σχ.(2.7). Το σημείο S αντιπροσωπεύει μια σχισμή (πηγή φωτός) που στέλνει μονοχρωματικό φως προς τα δεξιά, πάνω στο διάφραγμα όπου υπάρχουν δύο παράλληλες λεπτές σχισμές, S_1, S_2 . Όταν το φως πέσει στις σχισμές αυτές γίνονται πηγές φωτός (στο επίπεδο του σχήματος είναι σαν σημειακές πηγές). Το φως διαδίδεται στο χώρο μεταξύ του διαφράγματος με τις δύο σχισμές και μιας οθόνης παρατήρησης (πετάσματος). Στα σημεία του πετάσματος όπου οι φάσεις των δυο φωτεινών (ηλεκτρομαγνητικών) κυμάτων από τις δυο σχισμές διαφέρουν κατά ακέραιο πολλαπλάσιο του μήκους κύματος τότε έχουμε ενισχυτική συμβολή και ο φωτισμός είναι έντονος. Αν οι φάσεις διαφέρουν κατά ημιακέραιο πολλαπλάσιο του μήκους κύματος τότε έχουμε καταστροφική συμβολή οπότε ο φωτισμός είναι (θεωρητικά) μηδέν. Το πέτασμα είναι ένα φωτοευαίσθητο σύστημα, π.χ. φωτογραφικό φιλμ, όπου καταγράφονται τα μέγιστα και ελάχιστα του φωτισμού υπό μορφή ταινιών, όπως φαίνεται στο Σχ.(2.7).

Το Σχ.(2.8) δείχνει τι αποτυπώνεται όταν το φως είναι πολύ ασθενικό. Τότε γίνεται αισθητή η χβάντωση του φωτός, φωτόνια. Παρατηρούμε μετά από διαδοχικά αυξανόμενα χρονικά διαστήματα τους σχηματισμούς του Σχ.(2.8). Βλέπουμε ότι στο

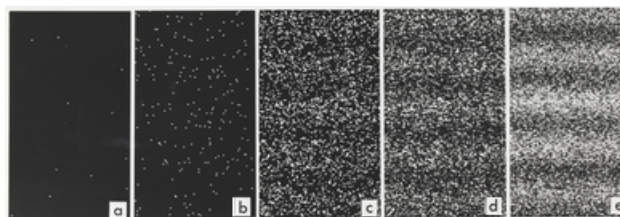


Σχήμα 2.7: Συμβολή φωτός

πέτασμα εμφανίζονται διακριτά σημεία τα οποία πυκνώνουν όσο περνά ο χρόνος. Σε πολύ μεγάλο χρόνο θα έχουμε τις ταινίες φωτός-σκότους του Σχ.(2.7).

Τα σημεία δείχνουν τις θέσεις καταγραφής των φωτονίων, δηλαδή δείχνουν τον σωματιδιακό χαρακτήρα (χωρικός εντοπισμός) του φωτός ενώ οι ταινίες δείχνουν τον κυματικό χαρακτήρα του, συμβολή. Τα Σχ.(2.7,2.8) είναι προσομοιώσεις αλλά υπάρχουν φωτογραφίες και από πραγματικά παρόμοια πειράματα.

Σημειώνουμε ότι αν η πηγή φωτός αντικατασταθεί με πηγή υλικών σωματιδίων, όπως ηλεκτρόνια, τότε θα έχουμε και πάλι σχηματισμούς όπως είναι αυτοί του Σχ.(2.8). Δηλαδή, παρατηρούμε πως και τα υλικά σωματίδια παρουσιάζουν τη γνωστή σωματιδιακή συμπεριφορά (χωρικός εντοπισμός, όπως τον έχουμε συνηθίσει) αλλά και κυματική συμπεριφορά (κύματα de Broglie) αφού εμφανίζονται ταινίες λόγω συμβολής κυμάτων.



Σχήμα 2.8: Σωματιδιακή και κυματική συμπεριφορά του φωτός και υλικών σωματιδίων. Η χρονική εξέλιξη είναι a,b,c,d,e.

Κεφάλαιο 3

ΠΥΡΗΝΙΚΑ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ

Όπως είδαμε στα προηγούμενα, μετά από την ανακάλυψη του σωματιδίου που λέγεται ηλεκτρόνιο, βρέθηκε ότι το άτομο αποτελείται από ένα κεντρικό τμήμα πολύ μικρών διαστάσεων, που λέγεται πυρήνας. Ο πυρήνας έχει σχεδόν όλη τη μάζα του ατόμου και θετικό φορτίο ίσο με το μέτρο του φορτίου των ηλεκτρονίων του. Το μέγεθος του πυρήνα είναι περίπου το μέγεθος του ατόμου δια 10 000. Στη συνέχεια βρέθηκε, με διάφορα πειράματα, ότι ο πυρήνας συγκροτείται από σωματίδια που ονομάζονται νουκλεόνια και διακρίνονται σε πρωτόνια και νετρόνια. Τα πρωτόνια έχουν ηλεκτρικό φορτίο ίσο με το στοιχειώδες ηλεκτρικό φορτίο, δηλαδή $e = +1,60 \times 10^{-19} \text{C}$ περίπου. Θυμίζουμε ότι το ηλεκτρόνιο έχει αρνητικό φορτίο μέτρου ίσου με το στοιχειώδες ηλεκτρικό φορτίο. Για σωματίδια χρησιμοποιείται η ατομική μονάδα μάζας u η οποία ορίζεται ως το $1/12$ της μάζας του ατόμου του άνθρακα ($^{12}_6\text{C}$) και για την οποία ισχύει ¹:

$$1 \text{ u} = 1,661 \times 10^{-27} \text{ kg} = 931,5 \text{ MeV}/c^2$$

Η μάζα του πρωτονίου m_p είναι περίπου

$$m_p = 1,67 \times 10^{-27} \text{ kg} = 938,3 \text{ MeV}/c^2 = 1,007 \text{ u}$$

Σημειώνουμε ότι η μάζα του ηλεκτρονίου m_e είναι περίπου .

$$m_e = 9,11 \times 10^{-31} \text{ kg} = 0,511 \text{ MeV}/c^2 = 5,49 \times 10^{-4} \text{ u}$$

Δηλαδή η μάζα του πρωτονίου ισούται με τη μάζα του ηλεκτρονίου επί 1836 (περίπου). Το πρωτόνιο φαίνεται πως είναι ευσταθές σωματίδιο δεν καταστρέφεται (δεν διασπάται) καταλήγοντας σε άλλα σωματίδια. Το πρωτόνιο έχει και αυτό ιδιοστροφορμή (σπιν).

¹Υπενθυμίζουμε ότι με την σχέση ενέργειας-ύλης του Einstein: $E = mc^2$, μπορούμε να εκφράσουμε τη μάζα σε μονάδες ενέργειας ανά τετράγωνο της ταχύτητας του φωτός, $m = E/c^2$.

Το νετρόνιο δεν έχει ηλεκτρικό φορτίο και η μάζα του m_n είναι περίπου ίση με

$$m_n = 1,675 \times 10^{-27} \text{kg} = 939,6 \text{ MeV}/c^2 = 1,009 \text{ u}$$

Το ελεύθερο νετρόνιο διασπάται σε άλλα σωματίδια με μέσο χρόνο ζωής $\tau_n = 880 \text{ s}$. Όπως και το πρωτόνιο, το νετρόνιο έχει και αυτό ιδιοστροφορμή (σπιν).

Ο πυρήνας του ατόμου του υδρογόνου αποτελείται από ένα μόνο νουκλεόνιο, το οποίο είναι ένα πρωτόνιο. Η μέθοδος που ακολουθείται, μέχρι και σήμερα, για την μελέτη των πυρήνων και γενικώς των σωματιδίων, είναι αυτή που επινόησε ο Rutherford. Δηλαδή ένα σωματίδιο συγκρούεται με έναν πυρήνα ή άλλο σωματίδιο και μετρώντας διάφορα μεγέθη που χαρακτηρίζουν τα προκύπτοντα από τη σύγκρουση σωματίδια (ενέργειες, ορμές, φορτία και διάφορες κατανομές τους), βγάζουμε συμπεράσματα για τον τρόπο που αλληλεπιδρούν τα σωματίδια και μαθαίνουμε για τις ιδιότητές τους και την δομή τους. Ο αριθμός (το πλήθος) των νουκλεονίων του πυρήνα λέγεται νουκλεονικός αριθμός ή μαζικός αριθμός και συμβολίζεται με το A . Η ιδιοστροφορμή (σπιν) του πυρήνα οφείλεται στην ιδιοστροφορμή των νουκλεονίων του και στην στροφορμή εκ περιφοράς τους, κατά την κίνησή τους μέσα στον πυρήνα. Η κβαντομηχανική καθορίζει πως συντίθενται οι στροφορμές.

Αν φανταστούμε τον πυρήνα σαν μια σφαίρα, τότε για τους περισσότερους πυρήνες η ακτίνα τους προσδιορίζεται από τη σχέση: $R = R_0 A^{1/3}$. Πειραματικά βρίσκεται ότι ισχύει για τη σταθερά: $R_0 = 1,2 \times 10^{-15} \text{ m}$. Αν λάβουμε υπόψη ότι η μάζα του πυρήνα είναι σε μονάδες ατομικής μονάδας μάζας περίπου ίση με A , τότε συμπεραίνουμε ότι η πυκνότητα μάζας του πυρήνα είναι περίπου ίδια για τους διάφορους πυρήνες και ίση με

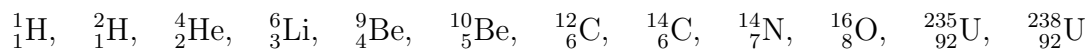
$$\frac{A}{\frac{4}{3}\pi R^3} u = \frac{3}{4\pi R_0^3} u = 2,3 \times 10^{17} \text{ kg m}^{-3}$$

όπου χρησιμοποιήσαμε ότι ο όγκος της σφαίρας ακτίνας R είναι $4\pi R^3/3$. Αυτή είναι μια τεράστια πυκνότητα, δεκάδες χιλιάδες φορές τις συνηθισμένες πυκνότητες που ξέρουμε οι οποίες, ουσιαστικά, αναφέρονται στις πυκνότητες της ύλης που μας περιβάλλει και η οποία αποτελείται από άτομα και μόρια.

Το πλήθος των πρωτονίων του πυρήνα λέγεται ατομικός (ή πρωτονικός) αριθμός, Z , και το πλήθος των νετρονίων λέγεται νετρονικός αριθμός, N . Ισχύει βέβαια $A = Z + N$. Ένας πυρήνας με συγκεκριμένο ατομικό και νετρονικό αριθμό αποτελεί ένα νουκλίδιο. Τα νουκλίδια παριστάνονται ως εξής:

$${}^A_Z\text{G}$$

όπου G το σύμβολο του νουκλιδίου. Παραδείγματα νουκλιδίων είναι τα εξής:



Νουκλίδια με ίδιο πλήθος πρωτονίων λέγονται ισότοπα, και έχουν το ίδιο όνομα. Τα αντίστοιχα άτομα έχουν τις ίδιες χημικές ιδιότητες, αφού έχουν ίδιο πλήθος ηλεκτρονίων και ίδιες κατανομές ηλεκτρονίων. Επειδή οι πυρήνες των διαφόρων ισοτόπων του ίδιου στοιχείου έχουν διαφορετικές μάζες και οι μάζες αυτές επηρεάζουν λίγο τις ενεργειακές στάθμες του ατόμου, τα φάσματα των ισοτόπων διαφέρουν λίγο μεταξύ τους. Θυμηθείτε ότι τα ηλεκτρόνια περιφέρονται περί το κέντρο μάζας του ατόμου, αυτό σημαίνει ότι και ο πυρήνας περιφέρεται περί το ίδιο σημείο. Είναι ευνόητο ότι για τα διάφορα ισότοπα του ίδιου στοιχείου το κέντρο μάζας θα είναι διαφορετικό και έτσι οι ενέργειες των ηλεκτρονίων θα είναι (λίγο) διαφορετικές. Το φαινόμενο είναι πιο εύκολα παρατηρήσιμο στα ισότοπα του υδρογόνου. Στην ανάλυσή μας για το υδρογόνο θεωρήσαμε ότι κατά προσέγγιση ο πυρήνας είναι ακίνητος, πράγμα που δεν είναι εντελώς σωστό.

3.1 Ενέργεια σύνδεσης πυρήνα

Ορίζεται ως ενέργεια σύνδεσης πυρήνα, η ενέργεια που χρειάζεται να δοθεί στον πυρήνα, ώστε αυτός να χωριστεί στα συστατικά του νουκλεόνια, τα οποία να βρίσκονται σε μεγάλες αποστάσεις μεταξύ τους ώστε να μην αλληλεπιδρούν και να έχουν ταχύτητες πρακτικά μηδέν. Μπορεί κάποιος να ορίσει κάτι ανάλογο για το άτομο όπου η ενέργεια σύνδεσης είναι η ενέργεια που χρειάζεται για να απομακρυνθούν από τον πυρήνα όλα τα ηλεκτρόνια μέχρι το άπειρο και να είναι πρακτικώς ακίνητα.

Ας περιοριστούμε στον πυρήνα. Αφού χρειάζεται να δώσουμε ενέργεια στον πυρήνα για να διαχωριστεί στα συστατικά του νουκλεόνια όπως είπαμε προηγουμένως, η ολική ενέργεια ηρεμίας των χωριστών νουκλεονίων είναι μεγαλύτερη από την ενέργεια ηρεμίας του πυρήνα. Σύμφωνα με τον ορισμό της ενέργειας σύνδεσης, E_{Σ} , ισχύει

$$E_{\Sigma} = (Zm_p + Nm_n - M_{\Pi}) c^2$$

όπου m_p , m_n και M_{Π} η μάζα του πρωτονίου, του νετρονίου και του πυρήνα αντίστοιχα. Αυτό σημαίνει ότι το άθροισμα των μαζών των νουκλεονίων που αποτελούν τον πυρήνα είναι μεγαλύτερο από τη μάζα του πυρήνα. Αυτό λέγεται έλλειμμα μάζας, ΔM , και προφανώς ισχύει:

$$\Delta M = \frac{E_{\Sigma}}{c^2} = Zm_p + Nm_n - M_{\Pi}$$

Αξίζει να τονίσουμε ότι η ενέργεια του πυρήνα οφείλεται στις μάζες των νουκλεονίων, στις κινητικές ενέργειές τους και στους όρους δυναμικής ενέργειας λόγω των μεταξύ τους αλληλεπιδράσεων. Βέβαια ένας υπολογισμός της ενέργειας του πυρήνα που να στηρίζεται σε αυτά που αναφέραμε στην προηγούμενη παράγραφο είναι πολύ δύσκολος

και μπορεί να γίνει με διάφορους βαθμούς προσέγγισης. Προτιμάται να λαμβάνονται υπόψη πειραματικές τιμές των διαφόρων μαζών και να γίνεται ο υπολογισμός με τους παραπάνω τύπους για την ενέργεια σύνδεσης. Η δυναμική ενέργεια θεωρείται μηδέν όταν τα νουκλεόνια είναι πολύ μακριά το ένα από το άλλο ώστε οι μεταξύ τους δυνάμεις να είναι μηδέν. Αυτά είναι σύμφωνα με τη θεωρία της σχετικότητας όπου όλες οι μορφές ενέργειας μπορεί συμβάλουν στη μάζα ενός σώματος. Εδώ πρόκειται για έναν ακίνητο πυρήνα.

Ας υπολογίσουμε το έλλειμμα μάζας του πυρήνα του ${}^4_2\text{He}$, από όπου υπολογίζεται και η ενέργεια σύνδεσης. Υπάρχουν δυο πρωτόνια, μάζα πρωτονίου 1,007 276 u, και δυο νετρόνια, μάζα νετρονίου 1,008 665 u. Επομένως το άθροισμα των μαζών τους, σε ατομικές μονάδες μάζας, είναι: $2 \cdot 1,007 276 \text{ u} + 2 \cdot 1,008 665 \text{ u} = 4,031 882 \text{ u}$. Από μετρήσεις, η μάζα αυτού του πυρήνα είναι 4,001506 u, επομένως το έλλειμμα μάζας είναι $\Delta M = (4,031 882 - 4,001 506) \text{ u} = 0,030 376 \text{ u}$. Αυτή η μάζα αντιστοιχεί σε ενέργεια σύνδεσης περίπου 28,3 MeV.

Επειδή η ατομική μάζα (ουδέτερο άτομο) κάθε στοιχείου είναι πολύ καλύτερα μετρημένη σε σχέση με τις αντίστοιχες μάζες των πυρήνων, αντί για τις πυρηνικές μάζες χρησιμοποιούμε τις ατομικές μάζες. Οι τελευταίες είναι ίσες με τις αντίστοιχες πυρηνικές προσθέτοντας τις μάζες όλων των ηλεκτρονίων του ατόμου (αγνοώντας την μικρή ενέργεια σύνδεσης των ηλεκτρονίων).

3.2 Η πυρηνική δύναμη

Τα πρωτόνια του πυρήνα αλληλοαπωθούνται διότι είναι θετικά φορτισμένα. Αν δεν υπήρχε άλλη δύναμη, ελκτική, που να ασκείται μεταξύ των νουκλεονίων, οι πυρήνες θα διαλύονταν, δεν θα υπήρχαν και φυσικά ούτε ο Κόσμος μας όπως τον ξέρουμε. Πράγματι μεταξύ των νουκλεονίων, ανεξάρτητα από το φορτίο τους, υπάρχει ελκτική δύναμη, η πυρηνική δύναμη. Τα χαρακτηριστικά της είναι ότι είναι ίδια για όλους τους συνδυασμούς νουκλεονίων ανά δύο. Επίσης είναι πολύ ισχυρή, πολύ ισχυρότερη από την ηλεκτρική δύναμη, αλλά έχει πολύ μικρή εμβέλεια, της τάξης των $10^{-15} \text{ m} = 1 \text{ fm}$. Σε αντίθεση με την απωστική ηλεκτρική δύναμη μεταξύ των πρωτονίων, η πυρηνική δύναμη ασκείται μεταξύ νουκλεονίων που βρίσκονται πολύ κοντά το ένα στο άλλο. Η ηλεκτρική δύναμη ασκείται μεταξύ των συνδυασμών ανά δύο των νουκλεονίων όλου του πυρήνα. Αυτό που συμβαίνει είναι ότι υπάρχει κάποια απόσταση μεταξύ νουκλεονίων που οι απωστικές και ελκτικές δυνάμεις ισορροπούν. Η σχεδόν ίδια πυκνότητα των πυρήνων οδηγεί σε περίπου ίδια ενέργεια σύνδεσης ανά νουκλεόνιο. Η ανάλυση της δομής του πυρήνα είναι πολύπλοκη σε σχέση με τη δομή του ατόμου και δεν θα μας απασχολήσει περισσότερο. Τα νουκλεόνια του πυρήνα και επομένως ο ίδιος ο πυρήνας

χαρακτηρίζεται από κβαντισμένες στάθμες ενέργειας όπως και το άτομο. Απλώς είναι δύσκολος ο υπολογισμός τους διότι τα νουκλεόνια είναι πολύ κοντά το ένα στο άλλο και είναι δύσκολο να βρεθεί η δύναμη που ασκείται στο κάθε ένα από τα άλλα. Αν περιοριστούμε στο άτομο του υδρογόνου, τα πράγματα είναι πολύ απλά διότι η δύναμη στο ηλεκτρόνιο είναι πολύ καλά γνωστή, είναι η ηλεκτροστατική δύναμη του πρωτονίου πάνω στο ηλεκτρόνιο. Είναι δύναμη Κουλόμπ μεταξύ, πρακτικώς, σημειακών φορτίων. Μια ουσιώδης διαφορά είναι ότι οι ενεργειακές στάθμες στα άτομα διαφέρουν κατά ενέργειες της τάξης eV με keV, ενώ στους πυρήνες είναι της τάξης των MeV.

3.3 Πυρηνική ευστάθεια και αστάθεια

Υπάρχουν ευσταθή νουκλίδια (πυρήνες) που δεν διασπώνται, δεν διαλύονται, οδηγώντας σε άλλα σωματίδια και υπάρχουν και άλλα που διασπώνται. Από τα χιλιάδες γνωστά νουκλίδια μερικές εκατοντάδες είναι ευσταθή, τα άλλα είναι ασταθή και διασπώμενα οδηγούν σε άλλα νουκλίδια ενώ εκπέμπουν ελαφρύτερα σωματίδια και ακτίνες γάμα. Η εκπομπή αυτή λέγεται ραδιενεργός ακτινοβολία. Αυτό το φαινόμενο της εκπομπής λέγεται ραδιενέργεια. Οι πυρήνες αυτοί λέγονται ραδιενεργοί πυρήνες. Υπάρχουν ραδιενεργοί πυρήνες που απαντούν στη φύση, φυσικοί ραδιενεργοί πυρήνες, και άλλοι που παράγονται τεχνητά στα εργαστήρια. Η εκπεμπόμενη ακτινοβολία αποτελείται από:

- ακτίνες α (άλφα),
- από ηλεκτρόνια, ακτίνες β (βήτα) και
- από ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, ακτίνες γ (γάμα), φωτόνια μεγάλης ενέργειας.

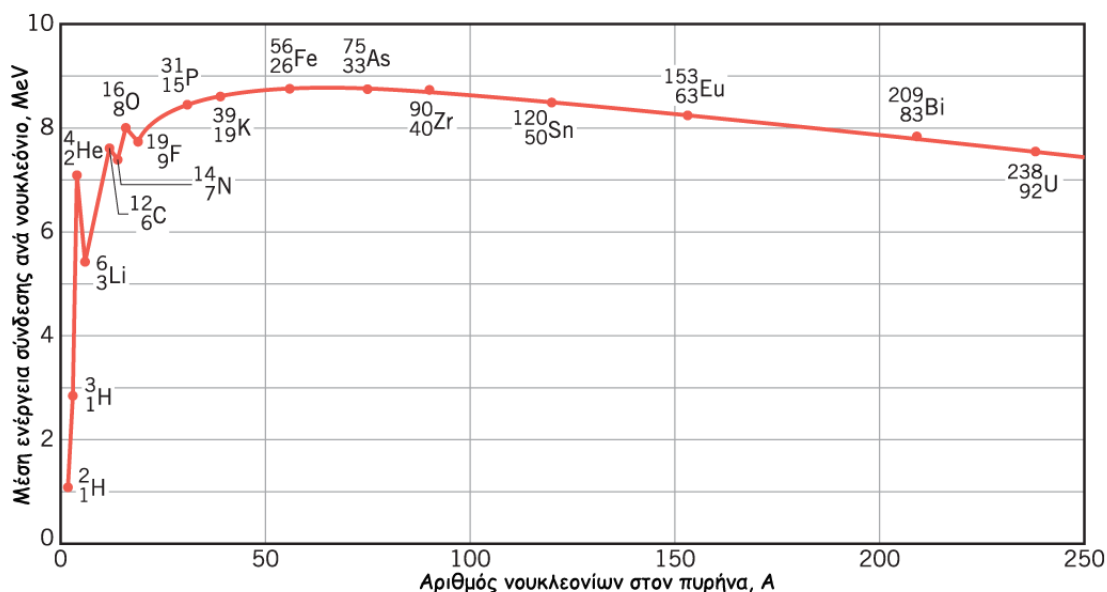
Τα σωματίδια α είναι θετικά φορτισμένα, είναι πυρήνες ηλίου (${}^4_2\text{He}$) και φέρουν δυο στοιχειώδη φορτία. Μερικά από τα νουκλεόνια του αρχικού πυρήνα (μητρικός πυρήνας) αναδιατάσσονται και σχηματίζουν τον νέο πυρήνα (θυγατρικός πυρήνας), όμως μερικά από αυτά τα αρχικά νουκλεόνια διασπώνται ή συνδυάζονται και οδηγούν στην εκπεμπόμενη ακτινοβολία και σε άλλα σωματίδια όπως νετρίνα². Η ραδιενεργός διαδικασία μπορεί να οδηγεί στη μεταβολή του είδους των πυρήνων, οπότε έχουμε το φαινόμενο που λέγεται μεταστοιχείωση. Οι ενέργειες σύνδεσης των νουκλιδίων ανά νουκλεόνιο, αν εξαιρέσουμε τα νουκλίδια με μάζες μικρότερες από αυτές του ${}^{12}_6\text{C}$, είναι από 7 MeV/A έως 9 MeV/A. Όσο πιο μεγάλη είναι αυτή η ποσότητα τόσο μεγαλύτερη η ευστάθεια του πυρήνα. Το ${}^4_2\text{He}$ (σωματίδιο άλφα, α) παρουσιάζει μια

²Για τα νετρίνα, βλέπε παρακάτω στο ίδιο Κεφάλαιο

μεγάλη ευστάθεια σε σχέση με αυτά που έχουν γειτονικούς μαζικούς αριθμούς, κάπου 7 MeV/A . Αυτό οφείλεται στο ότι, από την κβαντομηχανική, η πυρηνική δύναμη ευνοεί τους συνδυασμούς δύο πρωτονίων με αντίθετα προσανατολισμένα σπιν $(+1/2, -1/2)$, και το ίδιο ισχύει για δυο νετρόνια. Επίσης ευνοείται η ύπαρξη ζευγών πρωτονίων και νετρονίων. Το ήλιο έχει ζευγάρια πρωτονίων και νετρονίων, οπότε παρουσιάζει σχετικά μεγάλη ευστάθεια. Αυτή είναι η αιτία που η ραδιενεργός ακτινοβολία περιλαμβάνει τις ακτίνες άλφα, αφού είναι ευσταθής σχηματισμός τεσσάρων νουκλεονίων μέσα σε πυρήνες. Στο Σχ.(3.1) φαίνεται η καμπύλη που περιγράφει την εξάρτηση της ανωτέρω ποσότητας ως προς τον μαζικό αριθμό.

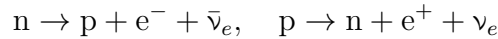
Για να βρει κάποιος αν μια διάσπαση είναι δυνατή ενεργειακά, είναι ο εξής: Βρίσκει τις μάζες των προϊόντων της διάσπασης και συγκρίνει με τη μάζα του αρχικού πυρήνα. Αν η μάζα του αρχικού πυρήνα είναι πιο μεγάλη τότε μπορεί να συμβεί διάσπαση. Εκτός από το ισοζύγιο ενεργειών πρέπει να ισχύει και η διατήρηση διαφόρων φυσικών μεγεθών αλλά αυτό το θέμα δεν θα μας απασχολήσει εδώ.

Κατά την εκπομπή ακτινοβολίας α , τα σωματίδια αυτά προϋπάρχουν μέσα στον πυρήνα ως συσσωματώματα και εκπέμπονται κατά τη διάσπασή του. Η ραδιενέργεια β , συνίσταται στην εκπομπή από τον πυρήνα ηλεκτρονίου e^- (β^-) ή του αντισωματιδίου του e^+ (β^+), που λέγεται ποζιτρόνιο, καθώς και η σύλληψη ηλεκτρονίου από τον πυ-

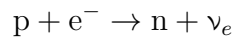


Σχήμα 3.1: Μέση ενέργεια σύνδεσης ως συνάρτηση του μαζικού αριθμού A .

ρήνα, το οποίο ηλεκτρόνιο βρίσκονταν στην κατώτατη ενεργειακή στάθμη του ατόμου. Σημειώνουμε πως το ηλεκτρόνιο ή το ποζιτρόνιο, δεν προϋπάρχει στον πυρήνα αλλά δημιουργείται κατά τη διάσπαση σύμφωνα με τις διαδικασίες:



Τα ν_e και $\bar{\nu}_e$ είναι ουδέτερα σωματίδια, είναι τα νετρίνα τύπου ηλεκτρονίου και έχουν πολύ μικρή μάζα, σχεδόν μηδενική. Το ένα είναι αντισωματίδιο του άλλου. Η δεύτερη διάσπαση δεν συμβαίνει για ελεύθερο πρωτόνιο, διότι δεν επιτρέπεται ενεργειακά. Το νετρόνιο έχει μεγαλύτερη μάζα από το πρωτόνιο και φυσικά υπάρχουν και οι μάζες των δυο άλλων σωματιδίων. Μέσα στον πυρήνα το πρωτόνιο δεν είναι ελεύθερο αλλά υφίσταται αλληλεπιδράσεις των άλλων νουκλεονίων, επομένως ανταλλάσσει μαζί τους την ενέργεια που χρειάζεται ώστε να γίνει η διάσπαση του πρωτονίου σύμφωνα με αυτή την αντίδραση. Στην περίπτωση της σύλληψης ηλεκτρονίου, το ηλεκτρόνιο δεν μένει στον πυρήνα αλλά ακολουθείται η παρακάτω μετατροπή:

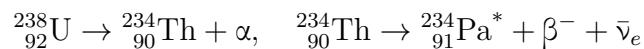


Η ακτινοβολία γ εκπέμπεται λόγω μετάπτωσης από μια διεγερμένη ενεργειακή κατάσταση σε μια χαμηλότερη, όπως γίνεται με τα άτομα. Εδώ οι ακτίνες είναι φωτόνια μεγάλης ενέργειας, της τάξης των MeV ³.

3.4 Ραδιενεργές οικογένειες

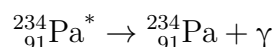
Κατά τη ραδιενεργό διάσπαση μπορεί να προκύψει και πάλι ασταθής πυρήνας ο οποίος διασπάται κοκ. Έτσι διαδέχονται η μια την άλλη μια σειρά από διαδοχικές διασπάσεις μέχρις ότου η διαδικασία καταλήξει σε ευσταθή πυρήνα. Μια τέτοια σειρά λέγεται ραδιενεργός οικογένεια. Υπάρχουν τρεις τέτοιες σειρές, οικογένειες, οι οποίες ξεκινούν από ασταθείς, ραδιενεργούς, μητρικούς πυρήνες που απαντούν στη φύση. Υπάρχουν όμως και σειρές που ξεκινούν από πυρήνες που δεν υπάρχουν στη φύση.

Μια οικογένεια που απαντά στη φύση αρχίζει με το ραδιενεργό ουράνιο ${}_{92}^{238}\text{U}$ που είναι το ισότοπο ουρανίου που κυρίως απαντά στη φύση. Αυτή η σειρά λέγεται οικογένεια του ουρανίου και καταλήγει στο ευσταθές ισότοπο του μολύβδου, ${}_{82}^{206}\text{Pb}$. Οι πρώτες δυο διασπάσεις είναι:



³Οι τελευταίες τρεις διαδικασίες συμβαίνουν στο εσωτερικού ασταθούς πυρήνα όταν ισχύουν ορισμένες προϋποθέσεις.

Επειδή το σωματίδιο άλφα έχει τέσσερα νουκλεόνια βλέπουμε ότι το θόριο που προκύπτει στην πρώτη διάσπαση έχει μαζικό αριθμό κατά τέσσερα μικρότερο από τον μαζικό αριθμό του ουρανίου. Επίσης ο ατομικός αριθμός μίκρυνε κατά δύο αφού το σωματίδιο άλφα έχει δυο πρωτόνια. Έχουμε διατήρηση του πλήθους των νουκλεονίων και του φορτίου, ή χωριστά του πλήθους των νετρονίων και των πρωτονίων ή του ατομικού αριθμού. Στη δεύτερη διάσπαση, ο πυρήνας πρωτακτίου έχει τον ίδιο μαζικό αριθμό με τον μητρικό πυρήνα το θόριο-234. Το φορτίο του θορίου είναι κατά ένα στοιχειώδες ηλεκτρικό φορτίο μικρότερο από το φορτίο του πρωτακτίου. Το ισοζύγιο (η διατήρηση) του φορτίου ισχύει διότι εκπέμπεται ηλεκτρόνιο που έχει αρνητικό φορτίο μέτρου ίσου με ένα στοιχειώδες ηλεκτρικό φορτίο. Το αντινεutrino είναι ουδέτερο. Εδώ έχουμε μετατροπή ενός νετρονίου σε πρωτόνιο σύμφωνα με την αντίδραση β διάσπασης που είδαμε προηγουμένως. Το πρωτακτίο που παρήχθη βρίσκεται σε διεγερμένη κατάσταση (αυτό δηλώνεται με το σύμβολο *). Το πρωτακτίο μεταβαίνει στη θεμελιώδη κατάστασή του εκπέμποντας μια ακτίνα (φωτόνιο) όπως δείχνει η αντίδραση:



Μια άλλη οικογένεια διασπάσεων που απαντά στη φύση είναι αυτή που ξεκινά από το ισότοπο ${}_{92}^{235}\text{U}$ (αυτό απαντά σπάνια στη φύση) και καταλήγει στο ευσταθές ισότοπο του μολύβδου ${}_{82}^{207}\text{Pb}$. Αυτή λέγεται οικογένεια του ακτινίου. Η άλλη οικογένεια, που απαντά στη φύση, είναι η οικογένεια του θορίου. Αυτή ξεκινά με το ${}_{90}^{232}\text{Th}$ και καταλήγει στο ευσταθές ισότοπο ${}_{82}^{208}\text{Pb}$.

3.5 Νόμος των ραδιενεργών διασπάσεων

Η ραδιενεργός διάσπαση είναι τυχαία διαδικασία, όπου οι πυρήνες διασπώνται εντελώς ανεξάρτητα ο ένας από τον άλλο. Επειδή υπάρχει πάντα ένα τεράστιο πλήθος ραδιενεργών πυρήνων μέσα σε μια δεδομένη ποσότητα ραδιενεργού υλικού, μπορεί να εφαρμοστούν στατιστικές μέθοδοι για την μελέτη της εξέλιξης του φαινομένου. Υποθέτουμε ότι ο ρυθμός διάσπασης ενός νουκλιδίου κάθε στιγμή είναι ανάλογος προς το πλήθος $N(t)$ των νουκλιδίων που υπάρχουν στο υλικό εκείνη τη στιγμή. Αυτό σημαίνει ότι ο ρυθμός διάσπασης $dN(t)/dt$ θα είναι ίσος με

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

Το $\lambda > 0$ είναι μια σταθερά με διαστάσεις αντιστρόφου χρόνου, η οποία εξαρτάται από το είδος των πυρήνων και λέγεται σταθερά διάσπασης. Ο ρυθμός διάσπασης λέγεται

και ραδιενεργότητα ή απλώς ενεργότητα. Από αυτή τη σχέση συμπεραίνεται ότι

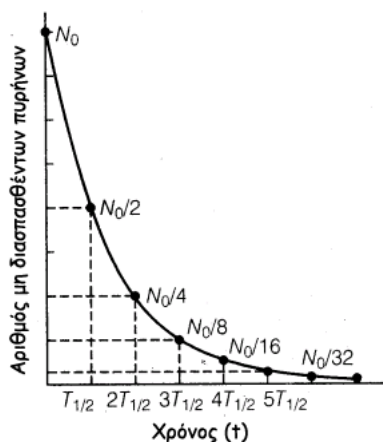
$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t}$$

όπου N_0 είναι το πλήθος των ραδιενεργών πυρήνων (που δεν έχουν διασπαστεί) την αρχική στιγμή, δηλαδή τη στιγμή $t = 0$. Αυτός είναι ο νόμος των ραδιενεργών διασπάσεων. Παρατηρούμε ότι μια ραδιενεργός ουσία διασπάται εκθετικά με το χρόνο. Μονάδα της ραδιενεργότητας στο SI είναι το μπεκερέλ (Becquerel, Bq), και ισχύει $1 \text{ Bq} = \text{μια διάσπαση ανά δευτερόλεπτο}$, δηλαδή η διάσταση του Bq είναι s^{-1} . Μπορούμε να γράψουμε τη σχέση για το ρυθμό διάσπασης στη μορφή:

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

Δηλαδή, η σταθερά διάσπασης λ ισούται με το ηγλίκο του πλήθους των διασπάσεων ανά μονάδα χρόνου δια του πλήθους των ραδιενεργών πυρήνων που δεν έχουν διασπαστεί. Γι αυτό το λ μπορεί να ερμηνευτεί ως η πιθανότητα ανά μονάδα χρόνου να διασπαστεί κάποιος πυρήνας. Όσο το λ είναι μεγαλύτερο τόσο γρηγορότερα συμβαίνουν οι διασπάσεις.

Αν στην εκθετική σχέση θέσουμε $t = 1/\lambda$, τότε βρίσκουμε ότι οι μη διασπασθέντες



Σχήμα 3.2: Ο νόμος των ραδιενεργών διασπάσεων

(εναπομείναντες) πυρήνες είναι:

$$\frac{N_0}{e} \approx 0,368 \times N_0$$

δηλαδή περίπου το $1/3$ των αρχικών. Ο μέσος χρόνος ζωής ή απλώς χρόνος ζωής, τ , είναι η μέση τιμή των χρόνων που επιζούν οι ραδιενεργοί πυρήνες μιας ραδιενεργούς ουσίας. Θυμηθείτε ότι οι επιμέρους πυρήνες επιζούν διαφορετικούς χρόνους, άλλοι διασπώνται γρήγορα και άλλοι διασπώνται μετά από πολύ χρόνο. Αποδεικνύεται ότι ο (μέσος) χρόνος ζωής ισούται με $1/\lambda$. Πιο συχνά χρησιμοποιείται ο χρόνος υποδιπλασιασμού ή χρόνος ημιζωής, $T_{1/2}$. Αυτός είναι ο χρόνος που απαιτείται για να μείνει το μισό πλήθος από τους αρχικούς πυρήνες, δηλαδή $N_0/2 = N_0 e^{-\lambda T_{1/2}}$. Από αυτή τη σχέση βρίσκουμε:

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} \approx \frac{0,693}{\lambda} \quad \text{ή} \quad \tau = \frac{1}{\lambda} = \frac{T_{1/2}}{\ln 2} \approx 0,693 \times T_{1/2}$$

Στο Σχ.(3.2) φαίνεται η γραφική παράσταση του νόμου των ραδιενεργών διασπάσεων.

3.6 Ραδιοχρονολόγηση

Ο άνθρακας έχει πολλά ισότοπα εκ των οποίων τρία απαντούν στη φύση. Από αυτά το ραδιοϊσότοπο $^{14}_6\text{C}$ είναι ραδιενεργό, υπάρχει σε πολύ ελάχιστη ποσότητα και έχει χρόνο υποδιπλασιασμού περίπου 5730 χρόνια. Τα άλλα δύο, $^{12}_6\text{C}$ και $^{13}_6\text{C}$, είναι ευσταθή. Ο άνθρακας-12 υπάρχει στο μέγιστο ποσοστό. Ο ραδιενεργός άνθρακας παράγεται όταν νετρόνια συγκρούονται με ατμοσφαιρικό άζωτο σύμφωνα με τη διαδικασία: $n + ^{14}_7\text{N} \rightarrow ^{14}_6\text{C} + p$. Τα νετρόνια παράγονται από πυρήνες που υπάρχουν μέσα στην ατμόσφαιρα όταν αυτοί συγκρουστούν με κοσμικές ακτίνες (έρχονται από το διάστημα). Στη συνέχεια ο ραδιενεργός άνθρακας-14, όπως και ο μη ραδιενεργός, σχηματίζει ραδιενεργό και μη ραδιενεργό διοξείδιο του άνθρακα που χρησιμοποιείται από τα φυτά και τα δένδρα για την παρασκευή υδατανθράκων με φωτοσύνθεση. Τα ζώα τρώνε τα φυτά και έτσι παίρνουν ίδια ποσοστά ραδιενεργού και μη ραδιενεργού άνθρακα όπως και τα φυτά. Τα ποσοστά είναι ίδια με αυτά της ατμόσφαιρας. Αυτό ισχύει διότι οι χημικές ιδιότητες όλων των ισωτόπων του άνθρακα είναι ίδιες, επομένως ίδιες είναι και οι χημικές τους αντιδράσεις κατά τις παραπάνω διαδικασίες μέσα στους ζώντες οργανισμούς. Ο άνθρακας-14 διασπάται με την εξής διαδικασία: $^{14}_6\text{C} \rightarrow ^{14}_7\text{N} + e^-$. Η μέθοδος ραδιοχρονολόγησης στηρίζεται στο εξής: Αφού ο οργανισμός πεθαίνει παύει να λαμβάνει άνθρακα από την αρχική πηγή που είναι η ατμόσφαιρα. Το ποσό των ευσταθών ισωτόπων άνθρακα παραμένει σταθερό, όμως το ποσό του ραδιενεργού άνθρακα επειδή

αυτός διασπάται συνεχώς μειώνεται. Όσο περνά ο χρόνος η μείωση μεγαλώνει σύμφωνα με το νόμο των ραδιενεργών διασπάσεων. Μετρώντας το ποσοστό ραδιενεργού άνθρακα σε σχέση με τον ευσταθή άνθρακα, υπολογίζεται ο χρόνος από τη στιγμή του θανάτου του οργανισμού. Η διάρκεια χρόνου που μπορεί να ανιχνευτεί με άνθρακα είναι περίπου 50 000 χρόνια. Επειδή τα ποσοστά ραδιενεργού άνθρακα αλλάζει σε πολύ μεγάλες χρονικές περιόδους έχουν βρεθεί μέθοδοι που κάνουν σχετικές διορθώσεις με βάση άλλα δεδομένα.

Υπάρχουν παρόμοιες τεχνικές για τη χρονολόγηση γεωλογικών δειγμάτων. Μερικά πετρώματα περιέχουν το ασταθές ισότοπο $^{40}_{19}\text{K}$ (κάλιο). Αυτό διασπάται με διάσπαση-β οπότε παράγεται ευσταθές $^{40}_{18}\text{Ar}$ (αργό). Το κάλιο-40 έχει χρόνο ημιζωής $2,4 \times 10^8$ χρόνια. Η ηλικία του πετρώματος προσδιορίζεται μετρώντας τις συγκεντρώσεις των $^{40}_{19}\text{K}$ και $^{40}_{18}\text{Ar}$. Η ηλικία μπορεί να προσδιοριστεί μέχρι εκατοντάδες εκατομμύρια χρόνια.

3.7 Κίνδυνοι από ακτινοβολίες

Υπάρχουν ακτινοβολίες που μπορούν να προκαλέσουν ιονισμό (ιοντισμό) στην ύλη και λέγονται ιοντίζουσες ακτινοβολίες και άλλες όπως η ακτινοβολία των κινητών τηλεφώνων που δεν ιοντίζουν. Επίσης υπάρχουν και ηλεκτρομαγνητικά πεδία που δεν είναι ακριβώς ακτινοβολίες αλλά και αυτά εξετάζονται στην κατηγορία των μη ιοντίζουσών ακτινοβολιών. Όλες αυτές οι ακτινοβολίες μπορεί να έχουν μικρή ή μεγάλη επίπτωση στον ανθρώπινο οργανισμό και γι αυτό γίνεται συνεχώς μελέτη των επιπτώσεων και τίθενται όρια που αφορούν στο πόσο πολύ έκθεση στις διάφορες ακτινοβολίες μπορεί να δεχτεί ο ανθρώπινος οργανισμός χωρίς να υποστεί σοβαρές βλάβες. Εδώ αναφερόμαστε στις ιοντίζουσες ακτινοβολίες. Με αυτό τον όρο χαρακτηρίζονται οι ακτίνες X (φωτόνια ενεργειών της τάξης των keV) και οι υπεριώδεις ακτίνες, ακτίνες γ (φωτόνια με ενέργειες της τάξης των MeV), ηλεκτρόνια, νετρόνια, σωματίδια α, πρωτόνια και βαριά ιόντα. Οι κίνδυνοι από ακτινοβολίες για τον άνθρωπο μπορεί να προέλθουν από την έκθεση του σώματος σε εξωτερική ακτινοβολία και από την έκθεση σε ακτινοβολία ένεκα κατάποσης ραδιενεργού ουσίας. Τα αποτελέσματα την ακτινοβολίας εξαρτώνται από τη φύση της, από το μέρος του σώματος που ακτινοβολείται και από την ποσότητα της ακτινοβολίας που δέχτηκε το σώμα. Η δράση των ακτινοβολιών στον ανθρώπινο οργανισμό είναι πολύπλοκη διαδικασία. Αναφέρομε συνοπτικά περί τίνος πρόκειται. Οι ακτινοβολίες διερχόμενες μέσα από την ύλη χάνουν ενέργεια καθώς διασπών τους μοριακούς δεσμούς και δημιουργούν ιόντα. Η ακτινοβολία που αποτελείται από φορτισμένα σωματίδια αλληλεπιδρά άμεσα με τα ηλεκτρόνια του υλικού του σώματος, οι διάφορες ηλεκτρομαγνητικές ακτινοβολίες μπορεί, με κάποιες διαδικασίες, να απορροφηθούν από ηλεκτρόνια του υλικού τα οποία ηλεκτρόνια ελευθερώνονται από

τα άτομα και λειτουργούν όπως προηγουμένως. Τα νετρόνια προκαλούν ιοντισμό έμμεσα συγκρουόμενα με πυρήνες ή προκαλώντας ραδιενεργές διασπάσεις των πυρήνων που προκύπτουν. Ειδικά τα βαριά ιόντα κάνουν όλα τα παραπάνω. Τα σωματίδια α , όταν βομβαρδίζουν εξωτερικά το σώμα, δεν έχουν μεγάλη διεισδυτικότητα διότι προκαλούν μεγάλο ιονισμό και έτσι χάνουν πολύ γρήγορα την ενέργειά τους με αποτέλεσμα να μην μπορούν να διαπεράσουν τα εξωτερικά στρώματα του δέρματος. Όμως όταν εισαχθούν στον οργανισμό προκαλούν πολύ μεγάλες ζημιές λόγω των μεγάλων ιοντισμών. Τα νετρόνια επειδή δεν είναι φορτισμένα εισχωρούν βαθύτερα στο ανθρώπινο σώμα. Γενικώς οι ακτινοβολίες προκαλούν στα ανθρώπινα κύτταρα μεταβολές οι οποίες οφείλονται σε φυσικοχημικές διαδικασίες που διαταράσσουν τη φυσιολογική τους λειτουργία. Δημιουργούνται ελεύθερες ρίζες που προκαλούν χημικές αντιδράσεις που οδηγούν στη διακοπή του βιοχημικού κύκλου λειτουργίας και πολλαπλασιασμού των κυττάρων. Η καταστροφή πολλών κυττάρων και η αδυναμία αναπλήρωσής τους μπορεί να καταλήξουν σε σοβαρά εγκαύματα. Σε ιστούς όπως ο μυελός των οστών, μπορεί να προκληθεί αναιμία και εξασθένιση της ανοσοβιολογικής άμυνας του οργανισμού. Βλάβες στον κανονικό κύκλο πολλαπλασιασμού των κυττάρων μπορεί να προκαλέσει διάφορες μορφές καρκίνου. Δυστυχώς, τις περισσότερες φορές, τα αποτελέσματα των ακτινοβολιών δεν γίνονται αμέσως αισθητά αλλά μετά από αρκετό χρόνο. Επίσης μπορεί η ακτινοβολία να προκαλέσει μεταβολές στη δομή του κώδικα DNA (μεταλλάξεις), με αποτέλεσμα να γεννιούνται απόγονοι με ανωμαλίες.

3.8 Δοσιμετρία ακτινοβολιών

Η δοσιμετρία ακτινοβολιών ασχολείται με την ποσοτική περιγραφή των αποτελεσμάτων της ακτινοβολίας στους ζωντανούς ιστούς. Η απορροφούμενη δόση ακτινοβολίας είναι η ενέργεια που απορροφάται από το σώμα ανά μονάδα μάζας. Η μονάδα της στο SI είναι το ένα τζουλ ανά χιλιόγραμμα, 1 J/kg , και ονομάζεται grey (γκρέυ, Gy), $1 \text{ Gy}=1 \text{ J/kg}$. Η απορροφούμενη δόση δεν είναι αρκετή για να εκφράσει ποσοτικά το αποτέλεσμα που έχει η ακτινοβολία στον ζωντανό ιστό, διότι οι διαφορετικές ακτινοβολίες σε ίσες δόσεις φέρουν διαφορετικά αποτελέσματα. Αυτό, για κάθε ένα είδος ακτινοβολίας, εκφράζεται ποσοτικά με ένα συντελεστή που λέγεται σχετική βιολογική αποτελεσματικότητα (relative biological effectiveness, RBE) ή παράγοντας ποιότητας (quality factor, QF). Εξ ορισμού ακτίνες X με ενέργεια 200 keV έχουν RBE (QF)=1. Τα αποτελέσματα των άλλων ακτινοβολιών συγκρίνονται με τα αποτελέσματα αυτών των ακτίνων πειραματικά και βρίσκεται ο αντίστοιχος συντελεστής ποιότητας. Το βιολογικό αποτέλεσμα εκφράζεται με το φυσικό μέγεθος που λέγεται βιολογική ισοδύναμη δόση ή απλώς ισοδύναμη δόση και μετριέται σε σίβερτ (sievert, Sv). Ισχύει: Ισοδύναμη

Ακτινοβολία	Εμβέλεια	Θωράκιση
α	40 μm	10 μm Al
β	20 mm	3 mm Al
Ακτίνες X (20 keV)	6 mm	0,01 mm Pb
γ (1 MeV)	60 mm	5 cm Pb
Νετρόνια	20 cm	5 cm Pb

Πίνακας 3.1: Εμβέλεια διαφόρων ακτινοβολιών και το πάχος υλικού θωράκισής τους.

δόση=RBE×Απορροφούμενη Δόση. Προφανώς η μονάδα του RBE είναι το 1 Sv/Gy. Στον Πίνακα (3.1) δίνουμε, ενδεικτικές τιμές, για το βάθος διείσδυσης (εμβέλεια) διαφόρων ακτινοβολιών και το πάχος υλικού θωράκισής τους ώστε να μην προκαλούν αισθητές βλάβες στους ανθρώπους.

Στον Πίνακα (3.2) δίνονται προσεγγιστικές τιμές του συντελεστή RBE για διάφορες ακτινοβολίες. Στην πραγματικότητα αυτές οι τιμές εξαρτώνται κάπως από το είδος του ιστού που ακτινοβολείται και επίσης εξαρτώνται από την ενέργεια της ακτινοβολίας. Ο άνθρωπος λαμβάνει περίπου 2 mSv με 3 mSv δόση ανά χρόνο από φυσικά αίτια, κοσμικές ακτίνες, φυσική ακτινοβολία από το χώμα, υλικά οικοδομών κοκ, στο υψόμετρο της θάλασσας, ενώ το ποσό διπλασιάζεται στα 1500 m υψόμετρο. Αυτές είναι ενδεικτικές τιμές, υπάρχουν διαφορές από τόπο σε τόπο. Η δόση που παίρνει κάποιος σε όλο του το σώμα σε ένα υπερατλαντικό αεροπορικό ταξίδι είναι περίπου 0,05 mSv. Μια ακτινογραφία δίνει δόση 0,2 mSv. Πρέπει να μην γίνονται άσκοπα πολλές ακτινογραφίες. Κάθε ακτινοβολήση έχει μικρές ή μεγάλες επιπτώσεις κινδύνου για τον άνθρωπο, όμως πρέπει να ζυγίζονται η επικινδυνότητα και το κέρδος που έχει κανείς κάνοντας χρήση ραδιενέργειας για ιατρικό σκοπό και έτσι να αποφασίζεται η

Ακτινοβολία	RBE(Sv/Gy)
Ακτίνες X και γ	1
Ηλεκτρόνια	1,0-1,5
Βραδέα νετρόνια	3-5
Πρωτόνια	10
α	20
Βαριά ιόντα	20

Πίνακας 3.2: Ο συντελεστή RBE για διάφορες ακτινοβολίες.

χρήση της. Γενικώς ας είμαστε προσεκτικοί και ας μην κάνουμε χρήση ακτινοβολιών χωρίς σοβαρό λόγο. Υπάρχουν κάποια ετήσια όρια «επιτρεπόμενων» δόσεων για τον άνθρωπο που όμως κατά καιρούς μεταβάλλονται με βάση νεώτερα δεδομένα. Δεν είναι εύκολο να εκτιμηθεί ακριβώς ο κίνδυνος από πολλές εκθέσεις σε μικρές δόσεις. Για λόγους ασφαλείας προτιμάται να θεωρείται πως το φαινόμενο είναι εντελώς προσθετικό ενώ μάλλον δεν είναι ακριβώς έτσι. Δηλαδή θεωρούμε ότι είναι το ίδιο να πάρει κάποιος μια φορά μια δόση με το να πάρει την ίδια συνολική δόση, σε μεγάλο χρονικό διάστημα σε πολλές μικρές δόσεις.

Ένα πρόβλημα που υπάρχει στην εποχή μας είναι ο κίνδυνος από πυρηνικά εργοστάσια ισχύος. Σίγουρα μολύνουν με ραδιενέργεια το περιβάλλον, όμως το πρόβλημα είναι πολυσύνθετο, χρειάζεται να γίνει σύγκριση με τις άλλες πηγές ισχύος, π.χ. κάρβουνο. Για τα εργοστάσια παραγωγής ισχύος από κάρβουνο είναι γνωστό ότι η ραδιενέργεια που πάει στο περιβάλλον από το κάψιμο του κάρβουνου (φυσική ραδιενέργεια) με τα καυσαέρια είναι περίπου 100 φορές περισσότερη από ότι από πυρηνικό εργοστάσιο ίσης ισχύος. Φυσικά τα καυσαέρια που εκλύονται έχουν και άλλες επιπτώσεις όπως αύξηση του διοξειδίου του άνθρακα και έκλυση άλλων βλαβερών ουσιών. Ένας άλλος σοβαρός παράγοντας που απασχολεί τον άνθρωπο σήμερα είναι ένα πυρηνικό ατύχημα που έχει επιπτώσεις σε μεγάλη κλίμακα πληθυσμού. Επίσης, το άλλο μεγάλο πρόβλημα είναι η αποθήκευση των πυρηνικών αποβλήτων που παραμένουν ραδιενεργά επί πολύ μεγάλα χρονικά διαστήματα. Αυτά έχουν οδηγήσει τον άνθρωπο να πάει προς εναλλακτικές μορφές ενέργειας (που τόσο πολύ την απαιτεί ο σημερινός πολιτισμός μας) όπως ενέργεια από τον ήλιο με φωτοβολταϊκά, ενέργεια από τον άνεμο με ανεμογεννήτριες, ενέργεια από κύματα, από γεωθερμία κτλ. Σήμερα όλοι οι τρόποι χρησιμοποιούνται παράλληλα, δυστυχώς δε μπορούν ακόμη οι εναλλακτικοί τρόποι να αντικαταστήσουν τελείως τους παραδοσιακούς, τους πλέον μολύνοντες το περιβάλλον, που είναι η χρήση πετρελαίου, κάρβουνου και πυρηνικών. Παράλληλα με την παραγωγή ενέργειας γίνονται και προσπάθειες περιορισμού της κατανάλωσης. Γίνεται προσπάθεια εξοικονόμησης ενέργειας με κατασκευή μηχανών αυτοκινήτων, αεροπλάνων και πλοίων με μεγαλύτερη απόδοση, με θερμομόνωση κτιρίων, με κατασκευή οικιακών συσκευών μεγαλύτερης απόδοσης κτλ. Όλα αυτά πρέπει να μας απασχολούν όλους μας, αυτός ο πλανήτης είναι το σπίτι μας και πρέπει να τον προστατέψουμε. Δεν φαίνεται να αποκτήσουμε σύντομα άλλο τέτοιο σπίτι στο κοντινό διάστημα. Αν κάποτε γίνει και αυτό, το νέο περιβάλλον δεν θα είναι τόσο φιλικό όσο η Γη μας.

3.9 Χρήσεις ακτινοβολιών

Υπάρχουν πολλές χρήσεις των ραδιοακτινοβολιών στην ιατρική αλλά και σε μη ιατρικές περιοχές. Ένα παράδειγμα είναι η ανίχνευση διαρροής σε υπόγειους σωλήνες που μεταφέρουν νερό, πετρέλαιο κτλ. Τοποθετείται μικρή ποσότητα ραδιενεργού διαλύματος στο υγρό που διοχετεύεται μέσα από το σωλήνα, στην περιοχή στο σημείο διαρροής εμφανίζεται ραδιενεργότητα που ανιχνεύεται με ανιχνευτές ραδιενέργειας. Αυτή η τεχνική εφαρμόζεται και αλλού όπως για παράδειγμα στη μελέτη μόλυνσης υδάτων ποταμών. Ακτινοβολίες χρησιμοποιούνται στην ιατρική για θεραπευτικούς και για διαγνωστικούς σκοπούς. Χρησιμοποιούνται για την επιλεκτική καταστροφή καρκινικών όγκων. Αυτό ενέχει κινδύνους για τον ασθενή αλλά αν η αρρώστια είναι θανατηφόρος αν δεν αντιμετωπιστεί, τότε ο κίνδυνος της ραδιενέργειας αξίζει τον κόπο. Συνήθως χρησιμοποιούνται ραδιοϊσότοπα που παράγονται τεχνητά, αυτά έχουν το πλεονέκτημα ότι έχουν χρόνους ημιζωής μικρούς, οπότε συνιστούν μικρότερο κίνδυνο όταν εισέρχονται στο σώμα και έχουν μεγαλύτερη ενεργότητα. Σήμερα, πολλές φορές, αντί για ραδιοϊσότοπα χρησιμοποιούνται δέσμες σωματιδίων από κατάλληλους επιταχυντές. Οι δέσμες αυτές είναι πρωτόνια, ιόντα άνθρακα κτλ.

Η πυρηνική ιατρική εξελίσσεται ραγδαίως. Τα ραδιενεργά ισότοπα έχουν πρακτικώς τις ίδιες χημικές ιδιότητες με τα αντίστοιχα μη ραδιενεργά. Αυτό σημαίνει πως ακολουθούν μέσα στον οργανισμό τις ίδιες διαδικασίες με τα μη ραδιενεργά. Η διαφορά τους είναι ότι ανιχνεύονται εύκολα με κατάλληλους ανιχνευτές. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι το ραδιενεργό ιώδιο, $^{131}_{53}\text{I}$. Το ιώδιο που μπαίνει στον οργανισμό είτε απορρίπτεται ή αποθηκεύεται στον θυρεοειδή αδένα. Διοχετεύεται στον ασθενή πολύ μικρή ποσότητα ραδιενεργού ιωδίου και μετρίεται ο ρυθμός με τον οποίο συγκεντρώνεται στον θυρεοειδή και αυτό μας λέει πόσο καλά λειτουργεί ο θυρεοειδής αδένας. Επειδή ο χρόνος ημιζωής αυτού του ραδιοϊσοτόπου είναι 8,02 μέρες δεν υπάρχουν σημαντικές επιπτώσεις ραδιενεργού κινδύνου. Υπάρχει πληθώρα εφαρμογών της απεικονιστικής ιατρικής. Με αυτές τις εφαρμογές μπορεί να πάρει κάποιος εικόνες εσωτερικών οργάνων του ανθρώπινου σώματος. Υπάρχουν απεικονιστικές τεχνικές που δεν χρησιμοποιούν ραδιενέργεια. Τέτοιες είναι οι τεχνικές με υπέρηχους και η μαγνητική τομογραφία. Από αυτές που χρησιμοποιούν ραδιενέργεια είναι η απλή ακτινογραφία και η αξονική τομογραφία.

3.10 Πυρηνικές αντιδράσεις

Μέχρι τώρα αναφερθήκαμε σε διασπάσεις ασταθών πυρήνων, ειδικά στην αυθόρμητη εκπομπή σωματιδίων α , β , που μπορεί να ακολουθούνται από εκπομπή ακτίνων γ . Τώ-

ρα θα ασχοληθούμε με πυρηνικές αντιδράσεις που ανακατατάσσουν τα πρωτόνια και τα νετρόνια των πυρήνων και προκύπτουν αν βομβαρδίσουμε με σωματίδια τον πυρήνα. Ένα κλασικό παράδειγμα είναι η παρακάτω πυρηνική αντίδραση που προκάλεσε πρώτος ο Rutherford. Χρησιμοποίησε φυσική πηγή ακτίνων α , όπως και στη σκέδαση Rutherford. Αυτά τα σωματίδια-βλήματα (ενέργειας μερικών MeV) χτυπούσαν πυρήνες (αερίου) αζώτου, $^{14}_7\text{N}$. Η πυρηνική αντίδραση που προκλήθηκε είναι η ακόλουθη: $^4_2\text{He} + ^{14}_7\text{N} \rightarrow ^{17}_8\text{O} + ^1_1\text{H}$. Αυτό σημαίνει πως από τη σύγκρουση δημιουργήθηκε ένας νέος πυρήνας (οξυγόνου) και ένας πυρήνας υδρογόνου (πρωτόνιο). Σήμερα χρησιμοποιούνται επιταχυντές για να επιταχύνουν διάφορα φορτισμένα σωματίδια (βλήματα) που συγκρουόμενα με πυρήνες ή στοιχειώδη σωματίδια προκαλούν διάφορες πυρηνικές αντιδράσεις.

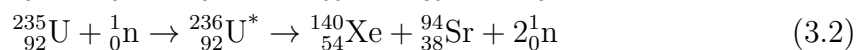
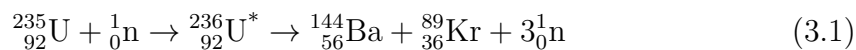
Οι πυρηνικές αντιδράσεις υπαχούν σε πολλούς νόμους διατήρησης. Οι νόμοι διατήρησης (της κλασικής φυσικής) του φορτίου, της ορμής, της στροφορμής και της σχετικιστικής ενέργειας (περιλαμβάνονται οι ενέργειες ηρεμίας) ισχύουν για κάθε πυρηνική αντίδραση. Ένας άλλος νόμος διατήρησης για τις πυρηνικές αντιδράσεις, που δεν απαντά στην κλασική φυσική, είναι η διατήρηση του ολικού νουκλεονικού αριθμού (μαζικού αριθμού). Ο ολικός νουκλεονικός αριθμός πριν την αντίδραση είναι το άθροισμα των επιμέρους μαζικών αριθμών των σωματιδίων. Το ίδιο ισχύει για τα προϊόντα της αντίδρασης. Σημειώστε ότι δεν διατηρείται η ολική μάζα διότι μάζα μπορεί να μετατραπεί σε ενέργεια και αντιστρόφως.

3.11 Πυρηνική ενέργεια

3.11.1 Πυρηνική σχάση

Το χαρακτηριστικό αυτής της αντίδρασης είναι ότι όταν ένας βαρύς πυρήνας βομβαρδίζεται με νετρόνια προκύπτουν δυο πυρήνες με μάζες σχεδόν ίσες που λέγονται θραύσματα της σχάσης. Επίσης προκύπτουν κάποια νετρόνια και μερικές φορές ελαφρά νουκλίδια. Τα θραύσματα της σχάσης είναι ζεύγη από περίπου 100 διαφορετικά νουκλίδια. Κατά την σχάση η μάζα των προϊόντων της σχάσης είναι πολύ μικρότερη από τη μάζα των αρχικών σωματιδίων.

Υπάρχουν διάφορα ευσταθή νουκλίδια που μπορεί να υποστούν σχάση. Θα αναφερθούμε μόνο στο ουράνιο-235. Χαρακτηριστικές περιπτώσεις σχάσης του ουρανίου-235 είναι οι παρακάτω



όπου τα νετρόνια-βλήματα είναι αποτελεσματικά αν είναι βραδέα νετρόνια, δηλαδή κινητικές ενέργειες κάτω του eV. Αυτές οι διαδικασίες μας λένε ότι το νετρόνιο απορροφάται από τον πυρήνα του ουρανίου, ο πυρήνας γίνεται ασταθής (το δείχνει το *) και διασπάται. Η ολική κινητική ενέργεια των θραυσμάτων της σχάσης είναι περίπου 200 MeV. Τα νετρόνια που παράγονται έχουν κινητικές ενέργειες της τάξης του MeV. Παρατηρούμε ότι η εκλυόμενη ενέργεια είναι τεράστια σε σχέση με την ενέργεια κατά τις χημικές αντιδράσεις. Η αιτία που εκλύεται τόση ενέργεια οφείλεται στο γεγονός ότι τα νουκλίδια που βρίσκονται στην περιοχή των πολύ μεγάλων μαζικών αριθμών είναι συνδεδεμένα μεταξύ τους πιο χαλαρά σε σχέση με αυτά που έχουν ενδιάμεσους μαζικούς αριθμούς. Αυτό σημαίνει πως οι βαρείς πυρήνες θα τείνουν να σχηματίσουν πυρήνες της ενδιάμεσης περιοχής αφού αυτό ευνοείται ενεργειακά. Από πίνακες ή από το Σχ.(3.1), βρίσκουμε ότι η μέση ενέργεια συνδέσεως ανά νουκλεόνιο του πυρήνα στην περιοχή με $A = 240$, είναι περίπου 7,6 MeV ενώ στη μέση περιοχή με $A = 120$ περίπου, η ενέργεια συνδέσεως ανά νουκλεόνιο είναι περίπου 8,5 MeV, δηλαδή αρκετά μεγαλύτερη. Για την περίπτωση του $^{235}_{92}\text{U}$ αυτό οδηγεί σε έκλυση ενέργειας που υπολογίζεται από τη διαδικασία: $(8,5 - 7,6) \times 235 \text{ MeV} \approx 200 \text{ MeV}$, όπως αναφέραμε προηγουμένως.

Σημειώνουμε ότι και οι πυρήνες θραύσματα της σχάσης είναι συνήθως ραδιενεργόι και διασπώνται μέχρι να καταλήξουν σε ευσταθείς πυρήνες. Από τις διαδοχικές διασπάσεις που προκύπτουν από το $^{140}_{54}\text{Xe}$, εκλύεται επιπλέον ενέργεια 15 MeV.

Βλέπουμε ότι από κάθε σχάση ελευθερώνονται νετρόνια, αυτά τα νετρόνια είναι δυνατόν να απορροφηθούν από πυρήνες ουρανίου και να προκαλέσουν σχάσεις κοκ. Το φαινόμενο λέγεται αλυσιδωτή αντίδραση. Ας υποθέσουμε ότι έχουμε καθαρό ουράνιο-235 στο οποίο με κάποιο τρόπο αρχίζει σχάση, παράγονται νετρόνια των οποίων ένα πλήθος φεύγει από την επιφάνεια του υλικού χωρίς να προκαλέσουν σχάσεις. Είναι γεγονός ότι αν η μάζα του υλικού είναι μικρότερη από κάποια κρίσιμη μάζα δεν προκαλείται αλυσιδωτή αντίδραση. Αν είναι μεγαλύτερη τότε προκαλείται. Είναι δυνατόν η αλυσιδωτή αντίδραση να ελέγχεται ή να μένει ανεξέλεγκτη. Η πρώτη περίπτωση απαντά στους πυρηνικούς αντιδραστήρες παραγωγής ισχύος και στους μικρότερους αντιδραστήρες για πειράματα. Η δεύτερη περίπτωση απαντά στην πυρηνική βόμβα όπου προκαλείται έκρηξη με τρομερή έκλυση ενέργειας και τεράστιες καταστρεπτικές συνέπειες.

Στον πυρηνικό αντιδραστήρα ή ενέργεια που ελευθερώνεται χρησιμοποιείται για να δημιουργήσει ατμό που με τη σειρά του κινεί τουρμπίνες οι οποίες περιστρέφουν ηλεκτρογεννήτριες και παράγουν ηλεκτρική ενέργεια. Χρησιμοποιούνται και για ακτινοβόληση υλικών, π.χ. για αποστείρωση προϊόντων, επίσης και για πειράματα.

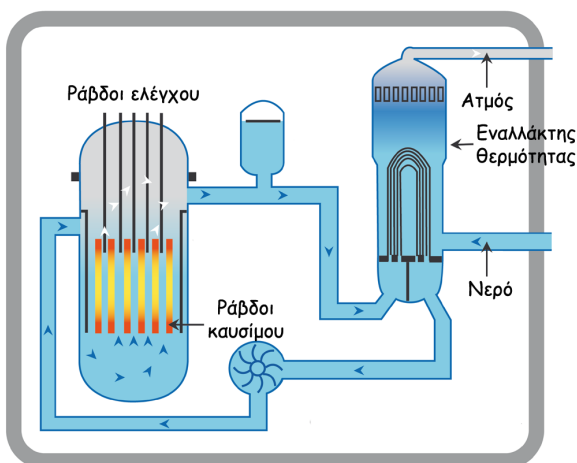
Το φυσικό ουράνιο περιέχει περίπου 99% ουράνιο-238 που δεν είναι σχάσιμο με τις σχετικά χαμηλές ενέργειες νετρονίων από τη σχάση του ουρανίου-235, και 1% ουράνιο-

235. Κυρίως το ουράνιο-238 απορροφά τα νετρόνια από τη σχάση του ουρανίου-235 και προκαλείται πυρηνική αντίδραση που δεν είναι σχάση. Τα περισσότερα νετρόνια απορροφώνται από το ουράνιο-238. Σε αντίθεση με το ουράνιο-238 το ουράνιο-235 έχει μικρή πιθανότητα να απορροφήσει νετρόνια με κινητική ενέργεια της τάξης του MeV, αυτή είναι περίπου η κινητική ενέργεια των νετρονίων της σχάσης του. Στον πυρηνικό αντιδραστήρα είναι καλό να έχουμε πυρηνικό «καύσιμο» με μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε ουράνιο-235. Αυτό το πετυχαίνουν με τη διαδικασία του εμπλουτισμού του φυσικού ουρανίου έτσι που το ποσοστό του ουρανίου-235 φτάνει περίπου το 3%. Για να αυξηθεί η απορρόφηση νετρονίων από το σχάσιμο ουράνιο χρησιμοποιείται υλικό επιβραδυντής ώστε η κινητική ενέργεια να φτάσει από MeV σε eV. Αν κάποιο σωματίδιο συγκρουστεί ελαστικά με άλλο ίδιας μάζας τότε αυτό χάνει πιο εύκολα κινητική ενέργεια. Για τα νετρόνια αυτό γίνεται περιστοιχίζοντας συνήθως το καύσιμο του αντιδραστήρα με σύννητες νερό ή (για τεχνικούς λόγους) βαρύ νερό ⁴ ή ακόμη και γραφίτη που αποτελείται από σχετικά μικρής μάζας πυρήνες. Με τις διαδοχικές συγκρούσεις των πρωτονίων (υδρογόνου) του νερού με τα νετρόνια η κινητική ενέργεια των νετρονίων φτάνει την τάξη του 1 eV. Αυτά λέγονται θερμικά νετρόνια γιατί έχουν ταχύτητες που αντιστοιχούν στη θερμική κίνηση των συστατικών του νερού. Επειδή από κάθε σχάση παράγονται περισσότερα από ένα νετρόνια η αλυσιδωτή αντίδραση όταν αρχίσει μπορεί, όπως είπαμε, να οδηγήσει σε τεράστια έκλυση ενέργειας σε πολύ μικρό χρόνο, με καταστροφικές συνέπειες. Δυστυχώς αυτή είναι η ιδέα της πυρηνικής βόμβας που καλό θα ήταν να περιοριστεί η κατασκευή, η εξάπλωση και φυσικά η χρήση. Για να υπάρξει έλεγχος της αλυσιδωτής αντίδρασης χρησιμοποιούνται ράβδοι ελέγχου. Οι ράβδοι ελέγχου οι οποίοι απορροφούν μέρος των νετρονίων έτσι που να επιτυγχάνεται ισορροπία, σταθερότητα, στο πλήθος των πυρήνων που υφίστανται σχάση στη μονάδα του χρόνου. Το καυτό νερό, υπό πίεση, από τον αντιδραστήρα με χρήση εναλλάκτη θερμότητας (αποτελείται από σπείρες σωλήνα) ζεσταίνουν το περιβάλλον νερό και παράγεται ατμός που κινεί τουρμπίνες κτλ. Το Σχ.(3.3) δείχνει σχηματικά έναν αντιδραστήρα ισχύος. Ο εναλλάκτης θερμότητας εκτός των άλλων απομονώνει το νερό που έρχεται από τον αντιδραστήρα, και περιέχει ραδιενεργές ουσίες, από το (καθαρό) νερό που αφού ατμοποιηθεί γυρνά τις τουρμπίνες.

3.11.2 Πυρηνική σύντηξη

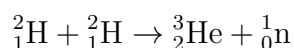
Στην περίπτωση της πυρηνικής σύντηξης αντιδρούν (συντήκονται) δυο ελαφροί πυρήνες και σχηματίζουν έναν πυρήνα με μεγαλύτερο μαζικό αριθμό. Η ενέργεια σύνδεσης

⁴Στο βαρύ νερό, το κάθε άτομο από τα δύο του υδρογόνου που συμμετέχουν στο μόριο του νερού, αντικαθίστανται από ένα ισότοπο του υδρογόνου, δευτέριο, που στον πυρήνα του έχει ένα πρωτόνιο και ένα νετρόνιο.



Σχήμα 3.3: Η αρχή λειτουργίας του αντιδραστήρα ισχύος

του τελικού πυρήνα είναι μεγαλύτερη από την ενέργεια σύνδεσης των αρχικών οπότε η αντίδραση αυτή ευνοείται. Όπως και στη σχάση ελευθερώνεται ενέργεια κατά τη σύντηξη. Γενικώς οι πυρηνικές αντιδράσεις όπου ελευθερώνεται ενέργεια είναι εξωενεργειακές, το ανάλογο των εξωθερμικών της Χημείας. Το αντίστροφο ισχύει για τις λεγόμενες ενδοενεργειακές πυρηνικές αντιδράσεις, αντίστοιχο των ενδοθερμικών της Χημείας. Η σχάση και η σύντηξη είναι εξωενεργειακές πυρηνικές αντιδράσεις. Ένα παράδειγμα σύντηξης είναι η πυρηνική αντίδραση μεταξύ δυο πυρήνων του δευτερίου (ισότοπο του υδρογόνου - ονομάζεται και βαρύ υδρογόνο - και ο πυρήνας του λέγεται δευτερόνιο) που οδηγεί σε πυρήνα ηλίου-3 και ένα νετρόνιο



Μπορεί να δείχτεί ότι η ενέργεια που εκλύεται είναι ίση με περίπου 3,3 MeV ανά αντίδραση. Αυτό μπορεί να υπολογιστεί λαμβάνοντας υπόψη τις ενέργειες σύνδεσης, όπως στην περίπτωση της σχάσης ή από τη διαφορά των μαζών των σωματιδίων πριν και μετά την αντίδραση. Το ποσό της ενέργειας φαίνεται μικρό σε σχέση με το αντίστοιχο της σχάσης, όμως δεν είναι διότι η μάζα που συμμετέχει στην αντίδραση είναι πολύ μικρότερη. Το πρόβλημα με την σύντηξη είναι πως πρέπει να υπερνικηθεί η ηλεκτρική άπωση μεταξύ των δυο θετικά φορτισμένων πυρήνων που συγκρούονται και πρέπει να έλθουν πολύ κοντά (απόσταση της τάξης μερικών fm) ώστε να αρχίσουν να δρουν οι πυρηνικές δυνάμεις που έχουν πολύ μικρή εμβέλεια. Υπάρχουν διάφοροι τρόποι να

επιτευχθούν οι μεγάλες ενέργειες και συνεπώς ταχύτητες και κυρίως αν το δευτέριο βρίσκεται σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες (θερμοπυρηνικές αντιδράσεις). Θεωρούμε ότι η μέση κινητική ενέργεια ενός πυρήνα δευτερίου είναι ίση με $3kT/2$, όπου k είναι η σταθερά Boltzman ($k = 1,380 \times 10^{-23} \text{JK}^{-1}$) και T η θερμοδυναμική (ή απόλυτη) θερμοκρασία. Χαρακτηριστικές θερμοκρασίες που απαιτούνται είναι της τάξης των 10^8K με 10^9K . Μέχρι σήμερα δεν έχει επιτευχθεί ελεγχόμενη σύντηξη η οποία θα βοηθούσε στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Υπάρχουν μεγάλα ερευνητικά κέντρα στον κόσμο που ασχολούνται με σχετική έρευνα. Σημειώνουμε πως υπάρχει άφθονο υδρογόνο (στο νερό) στον πλανήτη μας και τα κατάλοιπα, απόβλητα, από τη σύντηξη είναι αμελητέα σε σχέση με αυτά της σχάσης. Στα αστέρια η σύντηξη είναι η πηγή της ακτινοβολίας τους, πρόκειται για θερμοπυρηνικές αντιδράσεις. Οι πυρήνες των άστρων έχουν τεράστιες θερμοκρασίες.

Έχουν κατασκευαστεί οι λεγόμενες βόμβες υδρογόνου (βόμβες που στηρίζονται στη σύντηξη) και είναι πιο ισχυρές από τις πυρηνικές βόμβες που στηρίζονται στη σχάση. Ευτυχώς δεν χρησιμοποιήθηκαν ποτέ σε αντίθεση με τις πυρηνικές βόμβες που χρησιμοποιήθηκαν στη Χιροσίμα και στο Ναγκασάκι της Ιαπωνίας προς το τέλος του Δευτέρου Παγκόσμιου πολέμου. Οι καταστροφές ήταν τεράστιες με επιπτώσεις στους ανθρώπους που φτάνουν μέχρι τις μέρες μας.

3.12 Φυσική των σωματιδίων

Ο όρος σωματίδιο χρησιμοποιείται για να δηλώσει διάφορες οντότητες. Μιλούμε για σωματίδια σκόνης. Αυτά είναι μικρά μακροσκοπικά αλλά μεγάλα μικροσκοπικά, αποτελούνται από μεγάλο (τεράστιο) πλήθος μικρότερων σωματιδίων. Υπάρχει και ο όρος σωματίο που είναι γραμματικά ισοδύναμος του όρου σωματίδιο, όμως μερικοί προτιμούμε να τον χρησιμοποιούμε αντί του όρου υλικό σημείο. Επίσης υπάρχουν τα μόρια και τα άτομα, αυτά είναι ένα είδος μικροσκοπικών σωματιδίων. Υπάρχουν ακόμη σωματίδια που λέγονται υπατομικά σωματίδια που έχουν διαστάσεις πολύ μικρότερες από τα άτομα και σε αυτά μπορούν να καταταγούν και οι πυρήνες των ατόμων. Όμως συνηθίζεται να ξεχωρίζουμε τους πυρήνες και να λέμε πυρήνες και σωματίδια. Σωματίδια είναι και τα υποπυρηνικά σωματίδια που είναι μικρότερα σε μέγεθος από τους πυρήνες και μπορεί να είναι συστατικά των πυρήνων αλλά περιλαμβάνουν και άλλα σωματίδια που αποτελούνται από πιο θεμελιώδη, δηλαδή από στοιχειώδη σωματίδια. Υποπυρηνικά είναι τα πρωτόνια και τα νετρόνια, τα πιόνια, τα καόνια κτλ. Τα στοιχειώδη σωματίδια δεν έχουν δομή, δεν αποτελούνται από άλλα σωματίδια. Τα υποπυρηνικά σωματίδια είναι και υποατομικά, π.χ. πρωτόνια, ηλεκτρόνια, τα τελευταία είναι και στοιχειώδη. Εδώ εξετάζουμε τα υποπυρηνικά σωματίδια, κυρίως όμως τα στοιχειώδη σωματίδια και συ-

νήθως μπορεί να χρησιμοποιούμε τον όρο σωματίδια, χωρίς άλλον προσδιορισμό. Όπως αναφέραμε ήδη πρώτοι οι αρχαίοι Έλληνες όπως ο Δημόκριτος, θεώρησαν πως η ύλη αποτελείται από αδιαίρετους δομικούς λίθους, τα άτομα (άτμητα). Φυσικά σήμερα αυτό ισχύει για τα στοιχειώδη σωματίδια και όχι για αυτά που λέμε άτομα. Επειδή οι μάζες τους είναι πολύ μικρές, αντί για kg, συνήθως εκφράζουμε τις μάζες των σωματιδίων σε eV/c^2 και πολλαπλάσια αυτής της μονάδας, MeV/c^2 , GeV/c^2 κτλ. Παρουσιάζουμε παρακάτω διάφορα είδη σωματιδίων.

Θα αναφερθούμε κυρίως στα Στοιχειώδη (θεμελιώδη) σωματίδια που χωρίζονται στα λεπτόνια, στα κουάρκ (quark), στα σωματίδια φορείς των αλληλεπιδράσεων και στο χιγκς (higgs). Κάθε σωματίδιο έχει το αντισωματίδιό του που μπορεί να συμπίπτει με το ίδιο. Τα αντισωματίδια έχουν αντίθετους κβαντικούς αριθμούς από τα σωματίδια. Ένας τέτοιος κβαντικός αριθμός είναι και αυτός που χαρακτηρίζει το φορτίο του σωματιδίου. Είναι ο αριθμός που πολλαπλασιάζει το στοιχειώδες φορτίο για να μας δώσει το φορτίο του σωματιδίου. Άλλος γνώριμος κβαντικός αριθμός είναι του σπιν (ιδιοστροφορμή). Υπάρχουν τέσσερις θεμελιώδεις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των στοιχειωδών σωματιδίων: Η ισχυρή αλληλεπίδραση, η ηλεκτρομαγνητική, η ασθενής και η βαρυτική.

- Η ισχυρή έχει μικρή εμβέλεια, της τάξης του 1 fm, αλλά είναι η ισχυρότερη.
- Η ηλεκτρομαγνητική δύναμη είναι περίπου 100 φορές ασθενέστερη από την ισχυρή αλλά έχει άπειρη εμβέλεια. Η εξάρτηση από την απόσταση είναι της μορφής $1/r^2$.
- Η ασθενής δύναμη έχει και αυτή πολύ μικρή εμβέλεια, 0,001 fm, και είναι κατά 10^5 φορές ασθενέστερη από την ισχυρή.
- Τέλος, η βαρυτική δύναμη έχει άπειρη εμβέλεια (όπως και η ηλεκτρομαγνητική, η εξάρτηση από την απόσταση είναι της μορφής $1/r^2$) αλλά είναι κατά 10^{38} φορές ασθενέστερη από την ισχυρή.

3.12.1 Λεπτόνια

Θυμίζουμε ότι τα λεπτόνια είναι στοιχειώδη, δηλαδή δεν αποτελούνται από άλλα σωματίδια, δεν έχουν δομή. Τα λεπτόνια δεν έχουν ισχυρές αλληλεπιδράσεις. Περιλαμβάνουν το ηλεκτρόνιο (e) και το ηλεκτρονικό νεutrino (ν_e), το μόνιο (μ) και το μιονικό νεutrino (ν_μ), το ταόνιο (ή σωματίδιο ταυ), (τ) και το ταονικό νεutrino, (ν_τ). Όλα αυτά έχουν και τα αντισωματίδιά τους, e^+ , $\bar{\nu}_e$, μ^+ , $\bar{\nu}_\mu$, τ^+ , $\bar{\nu}_\tau$. Όλα έχουν (κβαντικό αριθμό) σπιν 1/2

Όνομα σωματιδίου (συμβ.)	Μάζα (MeV/c ²)	L_e	L_μ	L_τ	Χρόνος ζωής (s)	Κύρια διάσπαση
Ηλεκτρόνιο (e^-)	0,511	+1	0	0	Σταθερό	
Ηλεκτρονικό νεutrίνο (ν_e)	$< 2 \times 10^{-6}$	+1	0	0	Σταθερό	
Μιόνιο (μ)	105,7	0	+1	0	$2,20 \times 10^{-6}$	$e^- \bar{\nu}_e \nu_\mu$
Μιονικό νεutrίνο (ν_μ)	$< 0,19$	0	+1	0	Σταθερό	
Ταόνιο ή ταυ (τ)	1777	0	0	+1	$2,9 \times 10^{-13}$	$\mu^- \bar{\nu}_\mu \nu_\tau$ ή $e^- \bar{\nu}_e \nu_\tau$
Ταονικό νεutrίνο (ν_τ)	$< 18,2$	0	0	+1	Σταθερό	

Πίνακας 3.3: Τα λεπτόνια. Τα αντισωματίδια έχουν αντίθετους χβαντικούς αριθμούς.

και γί αυτό είναι φερμιόνια⁵. Τα ταόνια και τα μιόνια είναι ασταθή. Σημειώνουμε πως υπάρχουν τρεις λεπτονικοί χβαντικοί αριθμοί που χαρακτηρίζουν τα λεπτόνια, είναι ο ηλεκτρονικός λεπτονικός αριθμός, L_e , ο μιονικός, L_μ και ο ταονικός, L_τ . Στον Πίνακα (3.3) φαίνονται οι ιδιότητες των λεπτονίων.

Ο καθένας λεπτονικός αριθμός χωριστά διατηρείται κατά τις αλληλεπιδράσεις των λεπτονίων. Για παράδειγμα: $\mu^- \rightarrow e^- \bar{\nu}_e \nu_\mu$, προφανώς διατηρούνται ο ηλεκτρικός λεπτονικός αριθμός και ο μιονικός χωριστά.

3.12.2 Κουάρκ

Υπάρχουν έξι διαφορετικά κουάρκ, έξι γεύσεις όπως ονομάζονται, όπως υπάρχουν και έξι αντίστοιχα λεπτόνια, όπως είδαμε. Από αυτά τα κουάρκ τα τρία είναι οι δομικοί λίθοι της ύλης που υπάρχει γύρω μας, τα άλλα παράγονται από αλληλεπιδράσεις σωματιδίων υψηλών ενεργειών, σε εργαστήριο με μεγάλους επιταχυντές όπως στο Ευρωπαϊκό Κέντρο Πυρηνικών Ερευνών, το λεγόμενο CERN, κοντά στη Γενεύη της Ελβετίας και βρίσκεται σε ελβετικό και γαλλικό έδαφος. Τα κουάρκ σε αντίθεση με τα άλλα σωματίδια έχουν φορτία που είναι κλάσματα του στοιχειώδους φορτίου. Τα ονόματά τους και τα σύμβολά τους είναι: u (up, πάνω), d (down, κάτω), c (charm, γοητευτικό), s (strange, παράξενο), t (top, κορυφαίο) και b (bottom, κατώτατο). Όλα τα κουάρκ έχουν σπιν 1/2 και βαρυονικό χβαντικό αριθμό 1/3. Το ηλεκτρικό φορτίο τους είναι

⁵Όλα τα σωματίδια διακρίνονται σε φερμιόνια και μποζόνια. Σύμφωνα με την απαγορευτική αρχή του Pauli, δύο φερμιόνια δεν μπορούν να βρίσκονται ταυτόχρονα στην ίδια χβαντική κατάσταση. Αντίθετα, αυτό επιτρέπεται για τα μποζόνια. Τα σωματίδια με ημιακέραιο σπιν (1/2, 3/2, ...) είναι φερμιόνια ενώ αυτά με ακέραιο σπιν (0, 1, 2, ...) είναι μποζόνια. Τα ονόματα προέρχονται από τον Ιταλό φυσικό Enrico Fermi (Φέρμι) και τον Ινδό φυσικό Satyendra Nath Bose (Μπόζε).

Όνομα σωματιδίου (συμβ.)	Μάζα (κατά προσεγ.) (MeV/c ²)	Ηλεκτρικό φορτίο (e)
πάνω, up (u)	2	2/3
κάτω, down (d)	5	-1/3
γοητευτικό, charm (c)	1300	2/3
παράξενο, strange (s)	100	-1/3
κορυφαίο, top (t)	173 000	2/3
κατώτατο, bottom (b)	4200	-1/3

Πίνακας 3.4: Τα κουάρκ. Τα αντισωματίδια έχουν αντίθετο ηλεκτρικό φορτίο. Η μάζα είναι προσεγγιστική διότι τα κουάρκ δεν μπορούν να απομονωθούν.

κλασματικό: για τα u, c και t είναι $+2/3e$ και για τα d, s και b είναι $-1/3e$ (βλ. Πίνακα (3.4)).

Το κάθε κουάρκ έχει το αντικουάρκ του. Πολλά από τα γνωστά μας σωματίδια και άλλα λιγότερο γνωστά, αποτελούνται από συνδυασμούς κυρίως των τριών κουάρκ, u, d και s. Οι συνδυασμοί και των υπόλοιπων κουάρκ μπορεί να δώσουν και άλλα σωματίδια που παράγονται κυρίως σε μεγάλους επιταχυντές σωματιδίων, σε διάφορα εργαστήρια στον κόσμο. Τα κουάρκ δεν έχουν δομή, είναι στοιχειώδη σωματίδια. Παρόλα αυτά το top κουάρκ είναι το σωματίδιο με τη μεγαλύτερη μάζα από όλα τα υπατομικά σωματίδια, $173 \text{ GeV}/c^2$. Σημειώνουμε πως τα κουάρκ φαίνεται (μέχρι τώρα) πως δεν μπορεί να υπάρξουν ελεύθερα αλλά μόνο δέσμια, συγκροτώντας σωματίδια που έχουν φορτίο ακέραιο πολλαπλάσιο του στοιχειώδους φορτίου. Μέχρι τώρα, στα πειράματα δεν παρατηρήθηκαν ελεύθερα σωματίδια με κλασματικό φορτίο.

Το πρωτόνιο αποτελείται από τρία κουάρκ, uud. Το άθροισμα των φορτίων αυτών των κουάρκ ισούται με το στοιχειώδες φορτίο. Το αντιπρωτόνιο αποτελείται από τα τρία (αντι)κουάρκ, τα $\bar{u}\bar{u}\bar{d}$. Το νετρόνιο έχει τη δομή udd, προφανώς έχει φορτίο μηδέν. Κατά τις αλληλεπιδράσεις σωματιδίου με το αντισωματίδιό του μπορεί να γίνει εξαύλωση, δηλαδή να εξαφανιστούν και τα δυο και να εμφανιστούν στη θέση τους, τελικώς, μόνο φωτόνια, δηλαδή ουσιαστικά μόνο ενέργεια αφού τα φωτόνια δεν έχουν μάζα. Πολύ γνωστά παραδείγματα έχουμε στις συγκρούσεις με εξαύλωση ηλεκτρονίου ποζιτρονίου και πρωτονίου αντιπρωτονίου. Αν είχαμε μεγάλη ποσότητα αντιύλης, π.χ. αντιπρωτονίων, θα είχαμε λύσει το ενεργειακό μας πρόβλημα, όμως ο κόσμος μας κυριαρχείται από ύλη ενώ η αντιύλη παράγεται στα εργαστήρια με τεράστια δαπάνη ενέργειας. Στο CERN που λειτουργεί αρκετές δεκάδες χρόνια έχουν παραχθεί συνολικά μερικές δεκάδες mg αντιύλης.

3.12.3 Αδρόνια

Τα αδρόνια είναι σύνθετα σωματίδια και συγκροτούνται από κουάρκ. Διακρίνονται σε βαρυόνια και μεσόνια. Τα βαρυόνια αποτελούνται από τρία κουάρκ και τα αντισωματίδιά τους από τρία αντικουάρκ. Βαρυόνια είναι τα πρωτόνια και τα νετρόνια που έχουν βαρυονικό αριθμό $1/3+1/3+1/3=1$ (το άθροισμα των βαρυονικών αριθμών των κουάρκ). Τα αντισωματίδιά τους έχουν βαρυονικό αριθμό -1 . Υπάρχουν και άλλα βαρύτερα ασταθή βαρυόνια, που λέγονται υπερόνια. Τέτοιο είναι το Σ^+ με μάζα $1186 \text{ MeV}/c^2$. Η σύστασή του είναι uus και έχει σπιν $1/2$ οπότε είναι φερμιόνιο. Ο ολικός βαρυονικός αριθμός διατηρείται σε όλες τις αντιδράσεις, όπως ο λεπτονικός αριθμός. Τα βαρυόνια έχουν σπιν $1/2$ ή $3/2$ και είναι φερμιόνια. Τα μεσόνια αποτελούνται από ένα κουάρκ και ένα αντικουάρκ. Παραδείγματα είναι: το π^+ ($u\bar{d}$), το K^- ($\bar{u}s$) κτλ. Τα μεσόνια έχουν σπιν 0 ή 1 οπότε είναι μποζόνια.

3.12.4 Σωματίδια φορείς των θεμελιωδών αλληλεπιδράσεων

Οι θεμελιώδεις αλληλεπιδράσεις είναι αυτές που ήδη αναφέραμε. Όταν δυο στοιχειώδη σωματίδια αλληλεπιδρούν αυτό οφείλεται στην ύπαρξη κάποιου σωματιδίου φορέα της αλληλεπίδρασης. Το πλέον γνωστό μας παράδειγμα είναι η ηλεκτρομαγνητική αλληλεπίδραση της κλασικής φυσικής. Στο περιβάλλον φορτισμένων σωματιδίων λέμε κλασικά πως δημιουργείται ένα πεδίο λόγω του οποίου ασκούνται δυνάμεις στα φορτισμένα σωματίδια. Στη γλώσσα της κβαντικής φυσικής το πεδίο συνδέεται με σωματίδια (κβάντωση του πεδίου) τα οποία είναι οι φορείς των αλληλεπιδράσεων, σε αυτή την περίπτωση το σωματίδιο φορέας είναι το φωτόνιο που έχει μάζα μηδέν και αυτό οδηγεί σε εμβέλεια δυνάμεων άπειρη. Για την ισχυρή αλληλεπίδραση το αντίστοιχο πεδίο σχετίζεται με τα γκλουόνια τα οποία ανταλλάσσονται ανάμεσα στα κουάρκ. Η πυρηνική ισχυρή δύναμη μεταξύ νουκλεονίων είναι συνέπεια αυτής της θεμελιώδους δύναμης με ένα όμως αρκετά περίπλοκο τρόπο που δεν είναι πλήρως κατανοητός ακόμα ⁶. Η ασθενής αλληλεπίδραση σχετίζεται με τα σωματίδια φορείς W^+ , W^- , Z , με μάζες $80 \text{ GeV}/c^2$ (για τα W^\pm) και $91 \text{ GeV}/c^2$ (για το Z) και έχει μικρή εμβέλεια. Φορέας της βαρυτικής αλληλεπίδρασης που σχετίζεται με το γνωστό μας βαρυτικό πεδίο είναι το σωματίδιο βαρυτόνιο που όμως δεν έχει παρατηρηθεί ακόμη. Η βαρυτική αλληλεπίδραση έχει άπειρη εμβέλεια, όπως και η ηλεκτρική.

⁶Η δυσκολία κατανόησης οφείλεται και στο γεγονός ότι, παρ' όλο που η ισχυρή αλληλεπίδραση μεταξύ των κουάρκ έχει πολύ μικρή εμβέλεια, η ισχύς της αυξάνεται με την απόσταση. Η ισχυρή αλληλεπίδραση μεταξύ των κουάρκ ονομάζεται Κβαντική Χρωμοδυναμική.

Τα στοιχειώδη σωματίδια που συνιστούν τον υλικό κόσμο (κουάρκ και λεπτόνια) είδαμε πως είναι φερμιόνια, έχουν σπιν $1/2$. Όλα τα σωματίδια φορείς των αλληλεπιδράσεων έχουν ακέραιο σπιν και γι αυτό ανήκουν στα μποζόνια. Στη γλώσσα της κβαντικής φυσικής λέμε πως οι αλληλεπιδράσεις οφείλονται στην «ανταλλαγή» των σωματιδίων φορέων, πράγμα που δεν είναι κατανοητό με την κλασική φυσική και δεν είναι εύκολο να γίνει κατανοητό με απλό τρόπο. Τέλος αναφέρουμε και το σωματίδιο χιγκς (higgs, H) που παρατηρήθηκε για πρώτη φορά από δυο μεγάλες ομάδες στο CERN το 2012. Ήταν ο τελευταίος κρίκος που χρειαζόνταν για το λεγόμενο Καθιερωμένο Πρότυπο (βλέπε λίγο παρακάτω) της θεωρίας των στοιχειωδών σωματιδίων.

Το σωματίδιο χιγκς (ουσιαστικά οι αλληλεπιδράσεις του με τα άλλα στοιχειώδη σωματίδια) είναι αναγκαίο για να μπορούμε να περιγράψουμε με ένα συνεπή τρόπο τον κόσμο των υποατομικών σωματιδίων από τα οποία, σε τελευταία ανάλυση, αποτελούμαστε και εμείς οι ίδιοι. Πιο συγκεκριμένα, χωρίς την παρουσία του σωματιδίου χιγκς δεν θα μπορούσαμε να περιγράψουμε, με μια συνεπή θεωρία, σωματίδια φορείς αλληλεπιδράσεων που έχουν μάζα, όπως για παράδειγμα τους φορείς της ασθενούς αλληλεπίδρασης, W^\pm , Z . Από τη δεκαετία του 1960 θεωρητικοί φυσικοί είχαν προτείνει ένα μοντέλο (πρότυπο) όπου ακριβώς, εισάγοντας το μη παρατηρημένο έως τότε σωματίδιο χιγκς, κατόρθωσαν να έχουν μια συνεπή θεωρία περιγραφής των ασθενών αλληλεπιδράσεων και μάλιστα ταυτόχρονα να ενσωματώσουν (ενοποιήσουν) στην θεωρία αυτή και την ηλεκτρομαγνητική αλληλεπίδραση. Το προτεινόμενο σωματίδιο χιγκς είχε μηδενικό φορτίο και σπιν ίσο με 0 (μποζόνιο). Στο πρότυπο αυτό, δεν μπορούσε να προβλεφθεί η μάζα του νέου σωματιδίου. Τα πειράματα, το 2012, που παρατήρησαν για πρώτη φορά το νέο σωματίδιο, προσδιόρισαν την μάζα του: $125 \text{ GeV}/c^2$ περίπου. Στην ανακάλυψη του χιγκς συμμετείχαν πολλοί Έλληνες επιστήμονες από την Ελλάδα και το εξωτερικό. Στα πειράματα με μεγάλους επιταχυντές μπορεί να επιταχύνονται και να αποκτούν μεγάλες (υψηλές) ενέργειες, ηλεκτρόνια και ποζιτρόνια που είναι στοιχειώδη σωματίδια αλλά και άλλα φορτισμένα σωματίδια όπως πρωτόνια, αντιπρωτόνια ακόμη και βαριά ιόντα. Στην περίπτωση συγκρούσεων σύνθετων σωματιδίων, όπως είναι τα πρωτόνια και τα αντιπρωτόνια, σε πολύ υψηλές ενέργειες παράγονται νέα σωματίδια που οφείλονται στις συγκρούσεις μεταξύ των κουάρκ ή/και γκλουονίων τα οποία ουσιαστικά συγκροτούν τα σύνθετα αυτά σωματίδια. Η μάζα των νέων σωματιδίων μπορεί να είναι πολύ μεγαλύτερη αυτής των σωματιδίων που συγκρούονται. Εδώ έχουμε μια τυπική μετατροπή της ενέργειας των συγκρουομένων σωματιδίων σε μάζα. Τα σωματίδια δεν προϋπάρχουν στα αρχικά συγκρουόμενα σωματίδια αλλά παράγονται κατά τη σύγκρουση από τις μεταξύ τους αλληλεπιδράσεις. Υπάρχουν διάφορα είδη επιταχυντών που δεν θα μας απασχολήσουν εδώ.

Στόχος της Φυσικής είναι να βρεθεί μια ενιαία θεωρία που να εξηγεί όλες τις αλληλεπιδράσεις συμπεριλαμβανομένης της βαρύτητας, μια ενοποιημένη θεωρία. Αυτό έχει επιτευχθεί μερικώς, αρχικά με την ενοποίηση των μαγνητικών και ηλεκτρικών

αλληλεπιδράσεων από τον Maxwell (1870). Επίσης έχει γίνει ενοποίηση του ηλεκτρομαγνητισμού και των ασθενών αλληλεπιδράσεων με τη λεγόμενη ηλεκτρασθενή θεωρία (και την καταλυτική παρουσία του σωματιδίου χιγκς όπως αναφέραμε παραπάνω). Το λεγόμενο Καθιερωμένο Πρότυπο είναι μια ικανοποιητική θεωρία που περιλαμβάνει πέρα από την ηλεκτρασθενή και την ισχυρή αλληλεπίδραση (αν και η τελευταία δεν είναι πλήρως ενοποιημένη), που λίγο πολύ περιγράψαμε στα προηγούμενα, με τις οικογένειες των διαφόρων σωματιδίων και τις αλληλεπιδράσεις τους.

Η έρευνα συνεχίζεται για να επιτευχθεί ο στόχος της ενοποίησης όλων των αλληλεπιδράσεων.

ΕΝΘΕΤΟ

Πώς ανακαλύφθηκε το σωματίδιο χιγκς

Ποια είναι η αρχή στην οποία στηρίχτηκε η ανακάλυψη και ο προσδιορισμός της μάζας του σωματιδίου χιγκς; Σημειώνουμε πως το χιγκς έχει απειροελάχιστο χρόνο ζωής, δεν μπορεί να ανιχνευτεί άμεσα, δεν μπορεί να αφήσει άμεσα ίχνη του στους ανιχνευτές σωματιδίων. Αυτά που παρατηρούνται και μετριοούνται είναι τα σωματίδια προϊόντα της διάσπασής του, που δημιουργούνται κατά τη στιγμή της διάσπασης, δεν προϋπάρχουν μέσα στο στοιχειώδες σωματίδιο, το χιγκς. Η μέθοδος είναι παρόμοια και για άλλα σωματίδια. Η πρώτη παρατήρηση του χιγκς έγινε από τη διάσπασή του σε δυο φωτόνια γ , δηλαδή $H \rightarrow \gamma\gamma$. Είναι μεγάλη ιστορία πώς μέσα στην πληθώρα των παραγόμενων σωματιδίων επελέγησαν τα δυο φωτόνια. Χονδρικά αναφέρουμε πως διαλέχτηκαν εκείνα που είχαν μεγάλες ενέργειες και επίσης μεγάλες γωνίες σε σχέση με τις κατευθύνσεις των πρωτονίων που συγκρούονταν στον Μεγάλο Επιταχυντή Συγκρουόμενων Δεσμών Αδρονίων (Large Hadron Collider, LHC) στο CERN. Διαλέχτηκε ένα μεγάλο πλήθος τέτοιων αντιδράσεων (γεγονότων) και στη συνέχεια η διαδικασία είναι η εφαρμογή της λεγόμενης κινηματικής της Ειδικής Θεωρίας της Σχετικότητας. Ας υποθέσουμε ότι ένα ασταθές σωματίδιο έχει (σχετικιστική) ενέργεια και (σχετικιστική) ορμή E, \vec{p} αντίστοιχα. Ισχύει η σχέση που περιλαμβάνει και τη μάζα του

$$E^2 = (mc^2)^2 + p^2c^2 \rightarrow (mc^2)^2 = E^2 - p^2c^2$$

Το σωματίδιο διασπάται σε πολλά άλλα σωματίδια με ενέργειες και ορμές E_i και \vec{p}_i αντίστοιχα. Έστω πως αυτά μπορεί να παρατηρηθούν και να μετρηθούν οι ορμές και ενέργειές τους. Επειδή διατηρείται η ενέργεια και η ορμή πριν και μετά την διάσπαση, έχουμε

$$E = \sum_i E_i, \quad \vec{p} = \sum_i \vec{p}_i$$

Δηλαδή

$$(mc^2)^2 = \left(\sum_i E_i \right)^2 - \left(\sum_i \vec{p}_i \right)^2 c^2$$

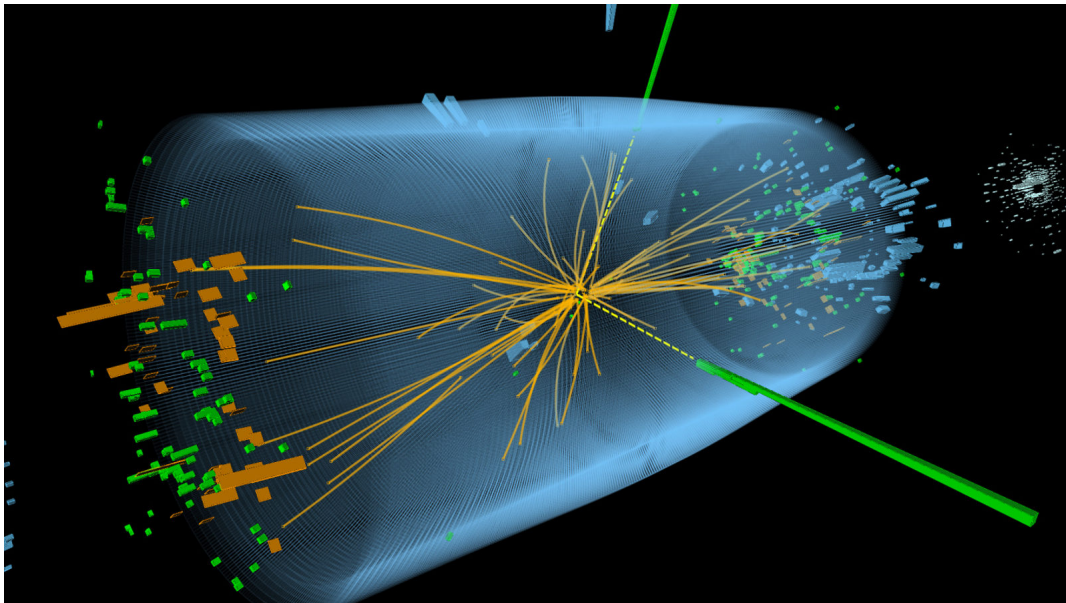
Από αυτή τη σχέση μπορούμε να βρούμε τη μάζα του σωματιδίου που διασπάστηκε. Μπορούμε σε αυτή τη σχέση να βάλουμε τις μάζες των προϊόντων της διάσπασης. Στην πράξη υπολογίζουμε τη μάζα για πολλούς συνδυασμούς σωματιδίων διάσπασης και αν υπάρχει αρχικό σωματίδιο τότε θα έχουμε σε μια περιοχή υπολογιζόμενων μαζών μεγαλύτερο πλήθος διασπάσεων.

Στην περίπτωση μας, $H \rightarrow \gamma\gamma$, επειδή γνωρίζουμε ότι το φωτόνιο δεν έχει μάζα

και το μέτρο της ορμής του δίνεται από τη σχέση $p = E/c$, παίρνουμε

$$(mc^2)^2 = 2E_1E_2(1 - \cos\theta) \rightarrow m = \sqrt{2 \frac{E_1}{c^2} \frac{E_2}{c^2} (1 - \cos\theta)}$$

όπου θ είναι γωνία που σχηματίζουν οι ορμές των δύο παρατηρούμενων φωτονίων⁷. Παρατηρήθηκε λοιπόν ότι υπήρχε μια περίσσεια διασπάσεων γύρω στην τιμή $m \approx 125 \text{ GeV}/c^2$. Αυτό σημαίνει ότι τα συγκεκριμένα ζεύγη φωτονίων προέρχονταν από την διάσπαση ενός σωματιδίου με αντίστοιχη μάζα.



Σχήμα 3.4: Υποψήφιο γεγονός διάσπασης σωματιδίου χιγκς σε δύο φωτόνια στον ανιχνευτή CMS στο CERN. Οι διακεκομμένες κίτρινες γραμμές αναπαριστούν τις τροχιές των δύο φωτονίων, ενώ το ύψος των πράσινων στηλών αναπαριστά την ενέργεια του αντίστοιχου φωτονίου (Η φωτογραφία είναι ευγενική προσφορά του CERN).

⁷Χρησιμοποιούμε τον διεθνώς αναγνωρισμένο συμβολισμό για τους τριγωνομετρικούς αριθμούς γωνίας. Οπότε, το συνημίτονο της γωνίας θ αναγράφεται ως $\cos\theta$.

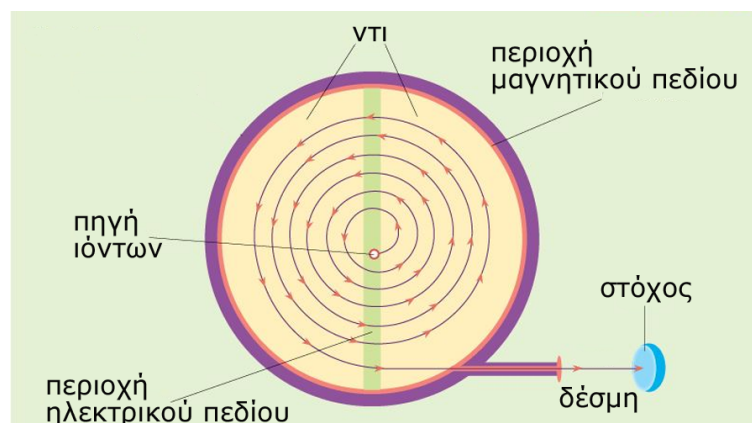
Κεφάλαιο 4

ΚΥΚΛΟΤΡΟ

4.1 Η αρχή του κυκλότρου

Το κύκλοτρο είναι ένας σχετικά μικρός επιταχυντής (φορτισμένων) σωματιδίων. Είναι από τους πολύ παλιούς αλλά χρησιμοποιείται και σήμερα για παραγωγή βραχύβιων ραδιοϊσοτόπων που χρησιμοποιούνται στην ιατρική. Το πρώτο κύκλοτρο κατασκευάστηκε από τον Αμερικανό Ernest Lawrence (Λόρεν) και την ομάδα του το 1931. Ο Lawrence πήρε το βραβείο Νόμπελ Φυσικής το 1939. Το Σχ.(4.1) δείχνει την αρχή λειτουργίας του.

Η διάταξη αποτελείται από δυο ηλεκτρόδια σε σχήμα κοίλου κυλινδρικού τυμπάνου που, επειδή μοιάζουν με το γράμμα D λέγονται ηλεκτρόδια ντι. Το υλικό τους δεν



Σχήμα 4.1: Η αρχή λειτουργίας του κύκλοτρου

πρέπει να είναι μαγνητικό υλικό, μπορεί να είναι χαλκός, αλουμίνιο κτλ. Το σύστημα βρίσκεται υπό κενό. Υπάρχει μικρό διάστημα μεταξύ των δυο ηλεκτροδίων. Τα ηλεκτρόδια τροφοδοτούνται από εναλλασσόμενη τάση οπότε στο διάκενο υπάρχει εναλλασσόμενο ηλεκτρικό πεδίο. Η όλη συσκευή βρίσκεται μέσα σε ομογενές μαγνητικό πεδίο, B . Στο κέντρο της διάταξης υπάρχει πηγή ιόντων ή άλλων σωματιδίων. Το ηλεκτρικό πεδίο τα επιταχύνει και εισέρχονται στο χώρο του ενός ηλεκτροδίου. Στο εσωτερικό το ηλεκτρικό πεδίο είναι μηδέν. Τότε το κάθε φορτίο δέχεται μόνο μαγνητική δύναμη από το μαγνητικό πεδίο και διαγράφει κυκλική τροχιά μικρής σχετικά ακτίνας. Διαγράφει ουσιαστικά ημικύκλιο και εισέρχεται ξανά στο διάκενο όπου υπάρχει ηλεκτρικό πεδίο που τώρα έχει αντίθετη φορά από ότι προηγουμένως. Το σωματίδιο επιταχύνεται κατά τη φορά της ταχύτητάς του και εισέρχεται στο άλλο ηλεκτρόδιο με μεγαλύτερη ταχύτητα. Θα διαγράψει τροχιά μεγαλύτερης ακτίνας και η διαδικασία θα συνεχιστεί πολλές φορές. Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται να αποκτήσει μεγάλη ταχύτητα το σωματίδιο με χρήση μικρής σχετικά διαφοράς δυναμικού, διότι το δυναμικό εναλλάσσεται και επιταχύνει πολλές φορές, διαδοχικά, το σωματίδιο. Στην ανάλυση που ακολουθεί υποθέτουμε πως οι ταχύτητες είναι μικρές ώστε να μην χρειάζεται η χρήση της Ειδικής Θεωρίας της Σχετικότητας αλλά η περισσότερο γνωστή μας Μηχανική του Νεύτωνα. Σε αυτή την περίπτωση έχει σημασία το ότι ο χρόνος διαδρομής του ημικυκλίου είναι σταθερός για το σωματίδιο ανεξάρτητα από την ταχύτητά του. Όταν η ακτίνα της τροχιάς πλησιάσει την ακτίνα του ηλεκτροδίου-D, με ένα ειδικό σύστημα ηλεκτροδίων η λεγόμενη δέσμη που αποτελείται από πολλά φορτισμένα σωματίδια εκτρέπεται ηλεκτροστατικά και εξέρχεται από τη διάταξη μέσα από ένα παράθυρο από λεπτό υλικό, για να χρησιμοποιηθεί κατάλληλα.

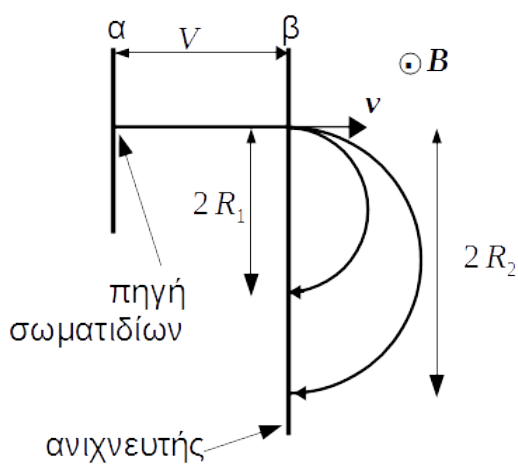
Η ανάλυση της κίνησης γίνεται με χρήση των σχέσεων της κεντρομόλου δύναμης και της μαγνητικής δύναμης πάνω σε κινούμενο φορτίο. Στην περίπτωσή μας, η δύναμη από το μαγνητικό πεδίο δρα ως κεντρομόλος στο φορτισμένο σωματίδιο, οπότε

$$m \frac{v^2}{r} = qvB \Rightarrow v = \frac{q}{m} Br$$

όπου m , q , v είναι η μάζα το φορτίο και η ταχύτητα του φορτισμένου σωματιδίου και r η ακτίνα της (ημι)κυκλικής τροχιάς που διαγράφει. Το μαγνητικό πεδίο B είναι κάθετο στο επίπεδο της κίνησης του σωματιδίου, δηλαδή κάθετο στην ταχύτητά του. Η χρονική διάρκεια για να εκτελέσει το σωματίδιο ένα ημικύκλιο είναι

$$\frac{\frac{1}{2} 2\pi r}{v} = \frac{\pi r}{\frac{qBr}{m}} = \frac{\pi}{B} \frac{m}{q}$$

Δηλαδή, για μη σχετικιστικές ταχύτητες, ο χρόνος που κάνει το σωματίδιο για να εκτελέσει ένα ημικύκλιο είναι ανεξάρτητο από την ακτίνα του ημικυκλίου, η οποία όπως



Σχήμα 4.2: Αρχή λειτουργίας του φασματογράφου μάζας

είδαμε συνεχώς αυξάνει για το σωματίδιο. Αν όμως οι ταχύτητες είναι συγκρίσιμες με αυτή του φωτός, c , τότε επέρχεται αποσυντονισμός και το κύκλωτρο δε μπορεί να λειτουργήσει.

4.2 Φασματογράφος μάζας

Με τους φασματογράφους μάζας είναι δυνατός ο προσδιορισμός της μάζας κάθε ιόντος χωριστά. Στην πραγματικότητα προσδιορίζεται το ηλίκιο φορτίο δια μάζα, q/m . Αυτό επιτυγχάνεται με κατάλληλη χρήση ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου. Υπάρχουν διάφοροι τύποι φασματογράφων μάζας. Εδώ θα αναφερθούμε στην αρχή της μεθόδου, που φαίνεται στο Σχ.(4.2).

Η διάταξη βρίσκεται σε κενό. Υποθέτουμε ότι οι ταχύτητες είναι μικρές ώστε η περιγραφή να γίνεται με τη Μηχανική του Νεύτωνα. Υπάρχουν δυο ηλεκτρόδια α και β μεταξύ των οποίων υπάρχει διαφορά δυναμικού V , σωστής φοράς ώστε να επιταχύνει τα σωματίδια που παράγονται στην πηγή σωματιδίων που βρίσκεται στο ηλεκτρόδιο α (υποθέτουμε με αρχική ταχύτητα μηδέν), προς το ηλεκτρόδιο β . Στο χώρο δεξιά του ηλεκτροδίου β υπάρχει ομογενές μαγνητικό πεδίο, κάθετο στο επίπεδο του σχήματος. Τα σωματίδια υπό την επίδραση αυτού του πεδίου διαγράφουν κυκλική (ημικυκλική) τροχιά και καταγράφονται (ανιχνεύονται) από τον ανιχνευτή σωματιδίων σε κάποιο σημείο, η θέση του οποίου εξαρτάται από την ακτίνα του κύκλου. Ο ανιχνευτής μπορεί να είναι φωτογραφική πλάκα. Η διαφορά δυναμικού V δίνει κινητική ενέργεια σε

φορτισμένο σωματίδιο μάζας m και φορτίου q

$$\frac{1}{2}mv^2 = qV$$

και η δύναμη του μαγνητικού πεδίου B δρα ως κεντρομόλος

$$m\frac{v^2}{R} = qvB$$

όπου R η ακτίνα της (ημι)κυκλικής τροχιάς του σωματιδίου. Οι δύο αυτές σχέσεις οδηγούν στην

$$\frac{q}{m} = \frac{2V}{B^2R^2}$$

Δηλαδή, κάθε συγκεκριμένο πηλίκο φορτίου δια μάζα σωματιδίου, q/m , αντιστοιχεί διαφορετική ακτίνα R . Επομένως, σωματίδια με διαφορετικό τέτοιο πηλίκο θα καταλήγουν σε διαφορετικό σημείο όταν διαγράψουν το ημικύκλιό τους. Αν οι ταχύτητες από την πηγή δεν είναι μηδέν τότε με ένα συνδυασμό κάθετων μεταξύ τους κατάλληλων ομογενών (πρόσθετου) ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίων στο χώρο μεταξύ των ηλεκτροδίων α και β , μπορούμε να διαλέξουμε συγκεκριμένης ταχύτητας διαφορετικά σωματίδια οπότε ισχύει η παραπάνω ανάλυση ακριβώς. Το ηλεκτρικό πεδίο θα είναι κατά την κατακόρυφη διεύθυνση (πάνω-κάτω) στο Σχ.(4.2) και το μαγνητικό κάθετο στο επίπεδο του σχήματος.

Κεφάλαιο 5

ΕΡΩΤΗΣΕΙΣ/ΑΣΚΗΣΕΙΣ

5.1 Ταχύτητα φωτός

Ερωτήσεις

1. Δύο ακριβώς ίδια ρολόγια είναι συγχρονισμένα. Το ένα τοποθετείται σε έναν δορυφόρο που περιστρέφεται γύρω από τη Γη ενώ το άλλο παραμένει στη Γη. Αν το κινούμενο ρολόι επιστρέψει στη Γη, τα δύο ρολόγια θα είναι ακόμη συγχρονισμένα; Ποιο από τα δύο ρολόγια θα δείχνει μικρότερη ένδειξη; Αγνοείτε την επίδραση της βαρύτητας.
2. Αφού η μάζα ισοδυναμεί με την ενέργεια, μπορούμε να ισχυριστούμε ότι ένα ελατήριο όταν είναι συσπειρωμένο έχει περισσότερη μάζα από ότι όταν ήταν στο φυσικό του μήκος;

Ασκήσεις

Στις παρακάτω ασκήσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν:

$$\text{μάζα ηλεκτρονίου } m_e = 9,11 \times 10^{-31} \text{kg}$$

$$\text{μάζα πρωτονίου } m_p = 1,67 \times 10^{-27} \text{kg}$$

$$\text{ταχύτητα φωτός στο κενό } c = 3 \times 10^8 \text{m/s}$$

1. Ένα υποθετικό διαστημόπλοιο μάζας 1000 kg πρόκειται να επιταχυνθεί από την κατάσταση ηρεμίας μέχρι να αποκτήσει ταχύτητα 0,5 c. Πόση ενέργεια απαιτείται γι' αυτό;
2. Πόση ενέργεια απαιτείται για να επιταχυνθεί ένα ηλεκτρόνιο από 0,75 c σε 0,9 c; Η ενέργεια ηρεμίας του ηλεκτρονίου είναι 0,511 MeV

3. Πόση ενέργεια απαιτείται για να επιταχυνθεί ένα ηλεκτρόνιο από $0,9 c$ σε $0,99 c$; Η ενέργεια ηρεμίας του ηλεκτρονίου είναι $0,511 \text{ MeV}$.
4. Με πόση ταχύτητα πρέπει να κινείται ένα ρολόι έτσι ώστε ακίνητος παρατηρητής να βλέπει στο δικό του ρολόι τα χρονικά διαστήματα διπλάσια από τα αντίστοιχα στο κινούμενο ρολόι;
5. Ένα ρολόι που βρίσκεται μέσα σε ένα διαστημόπλοιο χάνει 1 s κάθε ημέρα σε σχέση με ένα ακριβώς ίδιο ρολόι που βρίσκεται στη Γη. Πόση είναι η ταχύτητα του διαστημοπλοίου; Η Γη να θεωρηθεί αδρανειακό σύστημα αναφοράς.
6. Ένα ηλεκτρόνιο έχει ταχύτητα $0,75 c$. Να βρεθεί η ταχύτητα ενός πρωτονίου που έχει:
 - α) την ίδια κινητική ενέργεια με το ηλεκτρόνιο,
 - β) την ίδια ορμή με το ηλεκτρόνιο.
7. Ένα πρωτόνιο σε έναν επιταχυντή αποκτά κινητική ενέργεια 50 GeV . Ποια είναι η ορμή και η ταχύτητα του πρωτονίου;
8. Ένα ηλεκτρόνιο έχει ορμή κατά 90% μεγαλύτερη από την κλασική τιμή.
 - α) Ποια είναι η ταχύτητα του ηλεκτρονίου;
 - β) Ποια θα ήταν η ταχύτητα ενός αντίστοιχου πρωτονίου;

5.2 Ατομικά Φαινόμενα

Ερωτήσεις

1. Ο Thomson πρότεινε για το άτομο:
 - α) το μέγεθος των ηλεκτρονίων είναι ίσο με το μέγεθος των πρωτονίων.
 - β) τα θετικά φορτία κινούνται μέσα σε μία μάζα αρνητικού φορτίου.
 - γ) τα αρνητικά φορτία κινούνται μέσα σε μία μάζα θετικού φορτίου.
 - δ) το άτομο είναι αρνητικά φορτισμένο.
2. Στο πείραμα του Rutherford, όταν μία δέσμη σωματίων α κατευθύνεται σε λεπτό μεταλλικό φύλλο στόχου, τότε παρατηρούμε ότι (i) τα περισσότερα σωματάρια α περνάνε ανεπηρέαστα μέσα από το στόχο, (ii) αρκετά σωματάρια α αποκλίνουν σε διάφορες γωνίες, (iii) λίγα αποκλίνουν κατά 180° . Ποια από τις παραπάνω παρατηρήσεις δείχνει ότι:
 - α) Ο χώρος μέσα στο άτομο είναι σχεδόν κενός.

- β) Το θετικό φορτίο του ατόμου είναι συγκεντρωμένο στο κέντρο του ατόμου.
γ) Το κέντρο του ατόμου είναι θετικά φορτισμένο.
3. Ποιο πρόβλημα παρουσιάζει το πρότυπο του Rutherford;
α) το επιταχυνόμενο ηλεκτρόνιο απορροφά ακτινοβολία.
β) το επιταχυνόμενο ηλεκτρόνιο εκπέμπει ακτινοβολία.
γ) το επιταχυνόμενο ηλεκτρόνιο ούτε απορροφά ούτε εκπέμπει ακτινοβολία.
δ) το ηλεκτρόνιο γύρω από τον πυρήνα έχει σταθερή ταχύτητα.
4. Σύμφωνα με το πρότυπο του Bohr για το άτομο του υδρογόνου:
α) το ηλεκτρόνιο κινείται σε τυχαίες κυκλικές τροχιές γύρω από τον πυρήνα.
β) η ενέργεια του ηλεκτρονίου είναι κβαντισμένη.
γ) το ηλεκτρόνιο ακτινοβολεί συνεχώς ενέργεια.
δ) η στροφορμή του ηλεκτρονίου είναι ακέραιο πολλαπλάσιο του $c/2\pi$.
5. Το πρότυπο του Bohr για το άτομο του υδρογόνου βασίζεται σε κάποιες υποθέσεις. Οι υποθέσεις αυτές αντιφάσκουν με την κλασική φυσική;
6. Υποθέστε ότι το ηλεκτρόνιο στο άτομο του υδρογόνου ακολουθεί την κλασική μηχανική αντί της κβαντομηχανικής. Σε αυτήν την περίπτωση το άτομο θα εκπέμπει συνεχές ή γραμμικό φάσμα και γιατί;
7. Μπορεί το ηλεκτρόνιο στη θεμελιώδη κατάσταση του ατόμου του υδρογόνου να απορροφήσει ένα φωτόνιο ενέργειας
α) μικρότερης από 13,6 eV και
β) μεγαλύτερης από 13,6 eV;
8. Το ηλεκτρόνιο του ατόμου του υδρογόνου μεταπίπτει, με όλους τους δυνατούς τρόπους, από την διεγερμένη κατάσταση με $n = 5$ στη θεμελιώδη κατάσταση. Το πλήθος των φασματικών γραμμών που θα εκπέμψει είναι:
α) 6, β) 7, γ) 10, δ) 17
9. Να σημειωθούν οι σωστές (Σ) και οι λάθος (Λ) προτάσεις:
α) Ο Thomson πρότεινε το πλανητικό μοντέλο για το άτομο.
β) Σύμφωνα με το πρότυπο του Rutherford, το ηλεκτρόνιο του ατόμου του υδρογόνου, εκπέμπει ακτινοβολία όταν περιφέρεται γύρω από τον πυρήνα.
γ) Η ενέργεια μίας διεγερμένης κατάστασης του ατόμου του υδρογόνου είναι ανάλογη του κύριου κβαντικού αριθμού.
δ) Ενέργεια ιονισμού του ατόμου του υδρογόνου είναι η ενέργεια που απαιτείται για να μεταφερθεί το ηλεκτρόνιο εκτός του ηλεκτρικού πεδίου του πυρήνα.

10. Αν $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ είναι αντίστοιχα τα μήκη κύματος των φωτονίων που εκπέμπονται κατά τις μεταβάσεις $E_3 > E_1, E_2 > E_1$ και $E_3 > E_2$, του ηλεκτρονίου του ατόμου του υδρογόνου, θα ισχύει:
 α) $\lambda_1 = \lambda_2 + \lambda_3$, β) $\lambda_1 = \lambda_2 \times \lambda_3$, γ) $\lambda_1 = \lambda_2 - \lambda_3$, δ) $\lambda_1^{-1} = \lambda_2^{-1} + \lambda_3^{-1}$.
11. Το ηλεκτρόνιο είναι σωματίδιο ή κύμα;
12. Εξηγήστε γιατί το πρότυπο του Bohr για το υδρογόνο δεν είναι συμβατό με την αρχή της απροσδιοριστίας;
13. Από την άποψη της αρχής της απροσδιοριστίας, γιατί ένα μπαλάκι του τένις έχει καθορισμένη θέση και ταχύτητα, ενώ ένα ηλεκτρόνιο όχι;

Ασκήσεις

Στις παρακάτω ασκήσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν:

ταχύτητα του φωτός στο κενό $c = 3,00 \times 10^8 \text{ m/s}$

σταθερά Planck $h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ Js}$

σταθερά Coulomb $k = 1/(4\pi\epsilon_0) = 8,99 \times 10^9 \text{ N m}^2/\text{C}^2$

σταθερά Rydberg $R = 1,0974 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$

μάζα ηλεκτρονίου $m_e = 9,11 \times 10^{-31} \text{ kg}$

στοιχειώδες ηλεκτρικό φορτίο $e = 1,60 \times 10^{-19} \text{ C}$

- Υπολογίστε τα μήκη κύματος των τριών πρώτων γραμμών της σειράς Balmer για το υδρογόνο.
- Ένα άτομο υδρογόνου που βρίσκεται αρχικά στη θεμελιώδη κατάσταση ($n = 1$) απορροφά ένα φωτόνιο και διεγείρεται στην κατάσταση με $n = 3$.
 α) Πόση είναι η ενέργεια του απορροφούμενου φωτονίου;
 β) Αν το άτομο επιστρέψει στη θεμελιώδη κατάσταση (με όλους τους δυνατούς τρόπους), ποιες ενέργειες μπορεί να εκπέμψει;
- Ένα φωτόνιο εκπέμπεται από ένα άτομο υδρογόνου το οποίο μεταβαίνει από την κατάσταση με $n = 3$ στην κατάσταση με $n = 2$. Υπολογίστε:
 α) την ενέργεια,
 β) το μήκος κύματος,
 γ) τη συχνότητα του εκπεμπόμενου φωτονίου.

4. Πόση είναι η ενέργεια ενός φωτονίου που θα μπορούσε να προκαλέσει μετάβαση του ηλεκτρονίου του ατόμου του υδρογόνου
 - α) από την κατάσταση με $n = 4$ στην κατάσταση με $n = 5$,
 - β) από την κατάσταση με $n = 5$ στην κατάσταση με $n = 6$;
5. Βρείτε τη δυναμική και την κινητική ενέργεια του ηλεκτρονίου στη θεμελιώδη κατάσταση του ατόμου του υδρογόνου.
6. Ένα άτομο υδρογόνου βρίσκεται στη θεμελιώδη κατάσταση ($n = 1$). Χρησιμοποιώντας τη θεωρία του Bohr να υπολογίσετε:
 - α) την ακτίνα της τροχιάς του ηλεκτρονίου,
 - β) τη γραμμική ορμή του ηλεκτρονίου,
 - γ) τη στροφορμή του ηλεκτρονίου,
 - δ) την κινητική, τη δυναμική και την ολική ενέργεια του ηλεκτρονίου.
7. Ένα άτομο υδρογόνου βρίσκεται στη θεμελιώδη κατάσταση ($E_1 = -13,6 \text{ eV}$).
 - α) Ποια είναι η ελάχιστη ενέργεια που πρέπει να προσφερθεί στο άτομο για να διεγερθεί;
 - β) Η ενέργεια που βρέθηκε στο προηγούμενο ερώτημα προσφέρεται στο άτομο από μία μονοχρωματική ακτινοβολία. i) Να υπολογιστεί το μήκος κύματος αυτής της ακτινοβολίας. ii) Σε ποιο τμήμα του φάσματος των ακτινοβολιών ανήκει αυτή η ακτινοβολία;
8. Ένα άτομο υδρογόνου βρίσκεται στη διεγερμένη κατάσταση με $n = 4$. Το άτομο διεγέρθηκε από τη θεμελιώδη κατάσταση, όπου έχει ενέργεια $E_1 = -13,6 \text{ eV}$, με κρούση με ένα ηλεκτρόνιο κινητικής ενέργειας 13 eV .
 - α) Πόση τάση (διαφορά δυναμικού) απαιτείται για να προσδώσει στο προσπίπτον ηλεκτρόνιο την κινητική ενέργεια του;
 - β) Ποια θα είναι η ταχύτητα του προσπίπτοντος ηλεκτρονίου πριν την κρούση;
 - γ) Ποια θα είναι η ταχύτητα του προσπίπτοντος ηλεκτρονίου μετά την κρούση;
 - δ) Να σχεδιάσετε το διάγραμμα των ενεργειακών σταθμών στο οποίο να φαίνονται οι δυνατές μεταβάσεις του ηλεκτρονίου κατά την αποδιέγερσή του.
 - ε) Αν διπλασιαστεί η τάση που επιταχύνει το ηλεκτρόνιο, τι θα συμβεί με την ταχύτητα του πριν και μετά την κρούση;
(Να θεωρηθεί ότι το άτομο είναι ακίνητο πριν και μετά την κρούση).
9. Χρησιμοποιήστε το πρότυπο του Bohr για το άτομο του υδρογόνου για να αποδείξετε ότι, όταν το άτομο μεταβαίνει από μία κατάσταση n στην κατάσταση

$n - 1$, η συχνότητα του εκπεμπόμενου φωτονίου δίνεται από τη σχέση:

$$f = \frac{2\pi^2 m k^2 e^4}{h^3} \left[\frac{2n - 1}{(n - 1)^2 n^2} \right]$$

Αποδείξτε ότι, όταν $n \rightarrow \infty$, η παραπάνω έκφραση μεταβάλλεται όπως η ποσότητα $1/n^3$ και απλοποιείται στην κλασική σχέση της συχνότητας που αναμένεται να εκπέμψει το άτομο (παράδειγμα της αρχής της αντιστοιχίας).

10. Τα μήκη κύματος των φασματικών γραμμών της σειράς Balmer δίνονται από τη σχέση:

$$\lambda(\text{cm}) = C_2 \left(\frac{n^2}{n^2 - 2^2} \right) \text{ με } n = 3, 4, 5, \dots$$

όπου C_2 είναι μία σταθερά (γνωστή ως όριο σύγκλισης) που είναι ίση με $3645,6 \times 10^{-8} \text{ cm}$. Η σταθερά αυτή αντιπροσωπεύει το μήκος κύματος της γραμμής με τη μεγαλύτερη τιμή για το n ($n \rightarrow \infty$). Να αποδείξετε ότι η παραπάνω σχέση είναι ισοδύναμη με τη σχέση του Rydberg:

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

Επιβεβαιώστε ότι η τιμή της σταθεράς R έχει την ίδια τιμή με την ποσότητα $2^2/C_2$.

11. Ένα άτομο υδρογόνου που βρίσκεται αρχικά στην κατάσταση με $n = 3$ μεταπίπτει στη θεμελιώδη κατάσταση εκπέμποντας ένα φωτόνιο.
 α) Υπολογίστε το μήκος κύματος του εκπεμπόμενου φωτονίου.
 β) Εκτιμήστε την ορμή και την κινητική ενέργεια που αποκτάται άτομο μετά την εκπομπή του φωτονίου. Από που προέρχεται η ενέργεια αυτή;
12. α) Χρησιμοποιώντας τις συνθήκες του Bohr για το άτομο του υδρογόνου, να εξάγετε τις σχέσεις που δίνουν την ακτίνα r_n και την ενέργεια E_n των στάσιμων τροχιών για ένα υδρογονοειδές σύστημα (ión, άτομο), δηλαδή ένα ιονισμένο άτομο με ένα μόνο ηλεκτρόνιο με ατομικό αριθμό Z .
 β) Να κατασκευάσετε ένα διάγραμμα των ενεργειακών σταθμών του ιόντος Li^{2+} , το οποίο έχει $Z = 3$.
13. Η ταχύτητα ενός ηλεκτρονίου είναι ίση με $5,00 \times 10^3 \text{ m/s}$ με (χβαντική) απροσδιοριστία 0,003%. Βρείτε την απροσδιοριστία της θέσης του ηλεκτρονίου αυτού.

14. Ένα σωματίδιο φορτίου q και μάζας m , που είναι αρχικά ακίνητο, επιταχύνεται από μία διαφορά δυναμικού V . Να βρείτε το μήκος κύματος de Broglie του σωματιδίου.
15. Να υπολογίσετε το μήκος κύματος de Broglie ενός ηλεκτρονίου με κινητική ενέργεια α) 50 eV και β) 50 KeV.
16. Αν η θέση ενός ηλεκτρονίου έχει (χβαντική) απροσδιοριστία 2×10^{-8} m, ποια είναι η αντίστοιχη απροσδιοριστία στην ταχύτητά του;
17. Ένα ηλεκτρόνιο έχει απροσδιοριστία ίση προς τη διάμετρο του ατόμου του υδρογόνου ($D \approx 10^{-10}$ m). Πόση είναι η κινητική ενέργεια του ηλεκτρονίου; Πώς συγκρίνεται αυτή η ενέργεια με την ενέργεια της θεμελιώδους κατάστασης του ατόμου του υδρογόνου;

5.3 Πυρηνικά φαινόμενα

Ερωτήσεις

1. Η αντίδραση $e^- + p \rightarrow n + \bar{\nu}$
 - α) είναι δυνατή γιατί ισχύουν όλες οι αρχές διατήρησης.
 - β) είναι αδύνατη γιατί δεν διατηρείται ο αριθμός των νουκλεονίων.
 - γ) είναι αδύνατη γιατί δεν διατηρείται το συνολικό φορτίο.
 - δ) είναι αδύνατη γιατί δεν διατηρείται ο αριθμός των λεπτονίων.
2. Ένας πυρήνας προσδιορίζεται πλήρως από
 - α) τον ατομικό του αριθμό.
 - β) τον μαζικό του αριθμό.
 - γ) τον μαζικό και τον ατομικό του αριθμό.
 - δ) τον πρωτονικό του αριθμό.
3. Ισότοποι είναι οι πυρήνες που έχουν
 - α) τα ίδια A και Z .
 - β) το ίδιο A και διαφορετικό Z .
 - γ) το ίδιο Z και διαφορετικό A .
 - δ) διαφορετικά A και Z .
4. Γιατί είναι ασταθείς οι βαρείς πυρήνες;

5. Θεωρήστε δύο βαρείς πυρήνες X και Y με ίδιους μαζικούς αριθμούς. Αν ο X έχει μεγαλύτερη ενέργεια σύνδεσης από τον Y, ποιος πυρήνας έχει την τάση να είναι πιο ασταθής;
6. Ο πυρήνας A: ${}^{238}_{92}\text{U}$, έχει ενέργεια σύνδεσης 1801,72 MeV και ο πυρήνας B: ${}^{28}_{14}\text{Si}$, έχει ενέργεια σύνδεσης 236,93 MeV.
 - α) Ο A είναι σταθερότερος του B.
 - β) Ο B είναι σταθερότερος του A.
 - γ) Ο A μπορεί να πάθει σύντηξη.
 - δ) Ο B μπορεί να πάθει σχάση.
7. Σωματίδια β είναι
 - α) πρωτόνια που εκπέμπονται από έναν πυρήνα.
 - β) ηλεκτρόνια που εκπέμπονται από έναν πυρήνα.
 - γ) νετρόνια που εκπέμπονται από έναν πυρήνα.
 - δ) ηλεκτρόνια που εκπέμπονται από το ηλεκτρονιακό νέφος ενός ατόμου.
8. Όταν ένας πυρήνας παθαίνει διάσπαση β^- τότε ο θυγατρικός πυρήνας έχει:
 - α) το ίδιο Z και N μειωμένο κατά 1.
 - β) Z μειωμένο κατά 1 και A μειωμένο κατά 1.
 - γ) A ίδιο και Z αυξημένο κατά 1.
 - δ) Z αυξημένο κατά 1 και N μειωμένο κατά 1.
9. Η πυρηνική αντίδραση ${}^2_1\text{H} + {}^1_1\text{H} \rightarrow {}^3_2\text{He} + \gamma$ παριστάνει:
 - α) διάσπαση γ .
 - β) διάσπαση β^- .
 - γ) σχάση.
 - δ) σύντηξη.
10. Αν ένας πυρήνας έχει χρόνο ημιζωής ένα έτος, αυτό σημαίνει ότι ένας πληθυσμός τέτοιων πυρήνων θα έχει εξαφανισθεί τελείως μετά από 2 έτη;
11. Τι κλάσμα ενός ραδιενεργού δείγματος έχει διασπαστεί μετά την παρέλευση δύο ημιζωών;
12. Αν ένα σωματίδιο α και ένα ηλεκτρόνιο έχουν την ίδια κινητική ενέργεια, ποιο υφίσταται μεγαλύτερη απόκλιση όταν διέρχεται μέσα από ένα μαγνητικό πεδίο;
13. Το στοιχείο X έχει διάφορα ισότοπα. Τι κοινό έχουν αυτά τα ισότοπα; Σε τι διαφέρουν;

14. Ποιες είναι οι κύριες διαφορές μεταξύ των ακτίνων α , β και γ ;
15. Πόσα πρωτόνια και πόσα νετρόνια υπάρχουν στον πυρήνα ${}^{222}_{86}\text{Rn}$; Πόσα ηλεκτρόνια υπάρχουν στο ιόν ${}^{222}_{86}\text{Rn}^+$;
16. Αν έχουμε ένα φωτογραφικό φιλμ μέσα σε ένα δοχείο, τα σωματίδια α από μία ραδιενεργό πηγή εκτός του δοχείου δεν μπορούν να επηρεάσουν το φιλμ, αλλά τα σωματίδια β μπορούν. Εξηγήστε γιατί.
17. Ποιες από τις παρακάτω αντιδράσεις είναι πυρηνικές συντήξεις και ποιες πυρηνικές σχάσεις;
- α) ${}^0_1\text{n} + {}^{235}_{92}\text{U} \rightarrow {}^{94}_{38}\text{Sr} + {}^{160}_{54}\text{Xe} + 2{}^1_0\text{n}$, β) ${}^2_1\text{H} + {}^2_1\text{H} \rightarrow {}^3_1\text{H} + {}^1_1\text{H}$,
- γ) ${}^1_0\text{n} + {}^{235}_{92}\text{U} \rightarrow {}^{88}_{38}\text{Sr} + {}^{136}_{54}\text{Xe} + 12{}^1_0\text{n}$, δ) ${}^2_1\text{H} + {}^3_1\text{H} \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^1_0\text{n}$.
- ε) ${}^6_3\text{Li} + {}^1_1\text{H} \rightarrow {}^3_2\text{He} + \alpha$.
18. Να συμπληρωθούν με ένα νουκλίδιο οι πυρηνικές αντιδράσεις:
- α) ${}^2_1\text{H} + {}^{199}_{80}\text{Hg} \rightarrow {}^{197}_{79}\text{Au} + \dots$, β) ${}^{234}_{90}\text{Th} \rightarrow {}^{235}_{91}\text{Pa} + \dots$
- γ) ${}^1_0\text{n} + {}^{196}_{78}\text{Pt} \rightarrow {}^{197}_{78}\text{Pt} + \dots$, δ) ${}^{234}_{90}\text{Th} \rightarrow {}^{234}_{89}\text{Ac} + \dots$,
- ε) ${}^{10}_5\text{B} + {}^4_2\text{He} \rightarrow {}^{13}_7\text{N} + \dots$,
19. Να συμπληρωθούν με ένα νουκλίδιο οι πυρηνικές αντιδράσεις:
- α) ${}^{234}_{90}\text{Th} \rightarrow {}^?_? \text{Pa} + \dots + \bar{\nu}$ β) ${}^1_0\text{n} + {}^{198}_{80}\text{Hg} \rightarrow {}^{197}_{79}\text{Au} + \dots$,
- γ) ${}^2_1\text{H} + {}^{198}_{80}\text{Hg} \rightarrow {}^{197}_{79}\text{Au} + \dots$ δ) ${}^1_0\text{n} + {}^{196}_{78}\text{Pt} \rightarrow {}^{197}_{78}\text{Pt} + \dots$,
- ε) ${}^2_1\text{H} + {}^{196}_{78}\text{Pt} \rightarrow {}^{197}_{79}\text{Au} + \dots$, στ) $\gamma + {}^{198}_{80}\text{Hg} \rightarrow {}^{197}_{79}\text{Au} + \dots$

Ασκήσεις

Στις παρακάτω ασκήσεις δίνονται:

$$\text{μάζα πρωτονίου } m_p = 1,007\,277 \text{ u}$$

$$\text{μάζα νετρονίου } m_n = 1,008\,665 \text{ u}$$

$$\text{ταχύτητα φωτός στο κενό } c = 3,00 \times 10^8 \text{ m/s}$$

$$1 \text{ u} = 1,66 \times 10^{-27} \text{ kg} = 931,5 \text{ MeV}/c$$

$$1 \text{ eV} = 1,60 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$\ln 2 = 0,693$$

Οι ατομικές μάζες των ισοτόπων των στοιχείων φαίνονται στο παράρτημα στο τέλος.

1. Να υπολογίσετε την ενέργεια σύνδεσης ανά νουκλεόνιο των πυρήνων:
 ${}_{10}^{20}\text{Ne}$, ${}_{20}^{40}\text{Ca}$, ${}_{41}^{93}\text{Nb}$, ${}_{79}^{197}\text{Au}$.
2. Η ενέργεια σύνδεσης του δευτερίου (${}^2_1\text{H}$) είναι ίση με 2,224 MeV. Αυτή η τιμή αντιστοιχεί σε 1,112 MeV/νουκλεόνιο. Πόση είναι η ενέργεια σύνδεσης ανά νουκλεόνιο του τριτίου (${}^3_1\text{H}$);
3. Οι πυρήνες που έχουν τον ίδιο μαζικό αριθμό είναι γνωστοί ως ισοβαρείς. Υπολογίστε τη διαφορά στην ενέργεια σύνδεσης ανά νουκλεόνιο των ισοβαρών πυρήνων (${}_{11}^{23}\text{Na}$) και (${}_{12}^{23}\text{Mg}$). Που οφείλεται η διαφορά;

4. Ένας ραδιενεργός πυρήνας με σταθερά διάσπασης λ διασπάται σε έναν σταθερό θυγατρικό πυρήνα.

α) Να αποδείξετε ότι ο αριθμός των θυγατρικών πυρήνων N_2 αυξάνεται σε συνάρτηση με το χρόνο σύμφωνα με τη σχέση:

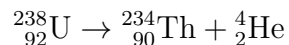
$$N_2 = N_{01} (1 - e^{-\lambda t})$$

όπου N_{01} είναι ο αρχικός αριθμός των μητρικών πυρήνων.

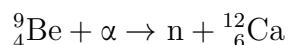
β) Αν διαθέτουμε αρχικά 106 μητρικούς πυρήνες τη χρονική στιγμή $t = 0$ και ο χρόνος ημιζωής είναι ίσος με 10 ώρες, να παραστήσετε γραφικά τον αριθμό των μητρικών και τον αριθμό των θυγατρικών πυρήνων ως συναρτήσεις του χρόνου στο διάστημα από 0 έως 30 ώρες.

5. Οι μετρήσεις σε ένα ραδιενεργό δείγμα δείχνουν ότι η ενεργότητα του μειώνεται 5 φορές σε χρονικό διάστημα 2 ωρών.
 - α) Να προσδιορίσετε τη σταθερά διάσπασης και
 - β) να υπολογίσετε το χρόνο ημιζωής.
6. Ο χρόνος ημιζωής του ισοτόπου 131 του ιωδίου (${}_{53}^{131}\text{I}$) είναι 8,04 ημέρες. α) Να υπολογίσετε τη σταθερά διάσπασης αυτού του ισοτόπου. β) Να βρείτε τον αριθμό των πυρήνων του (${}_{53}^{131}\text{I}$) που είναι απαραίτητοι για την παραγωγή δείγματος με ενεργότητα $1,85 \times 10^{10}$ mBq.
7. Ένα δείγμα ραδιενεργού ισοτόπου έχει ενεργότητα 37×10^7 Bq. Μετά από παρέλευση 4 ωρών η ενεργότητα είναι 30×10^7 Bq.
 - α) Βρείτε τη σταθερά διάσπασης και το χρόνο ημιζωής του ισοτόπου αυτού.
 - β) Πόσα άτομα του ισοτόπου περιέχονταν στο αρχικό δείγμα;
 - γ) Πόση είναι η ενεργότητα του δείγματος 30 ώρες μετά την παρασκευή του;

8. Βρείτε την ενέργεια που εκλύεται κατά τη διάσπαση α του ${}^{238}_{92}\text{U}$:

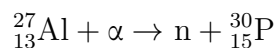


9. Βρείτε την κινητική ενέργεια ενός σωματίου α που εκπέμπεται κατά τη διάσπαση του ${}^{220}_{86}\text{Rn}$. Υποθέστε ότι ο θυγατρικός πυρήνας ${}^{216}_{84}\text{Po}$ έχει μηδενική ταχύτητα ανάκρουσης.
10. Η παρακάτω αντίδραση, που πρωτοπαρατηρήθηκε το 1930, οδήγησε στην ανακάλυψη του νετρονίου από τον Chadwick:



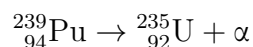
Να υπολογίσετε σε MeV τη διαφορά μαζών αντιδρώντων-προϊόντων επί c^2 (ενέργεια αντίδρασης, Q).

11. Η παρακάτω αντίδραση είναι η πρώτη γνωστή αντίδραση κατά την οποία ο πυρήνας που προκύπτει είναι ραδιενεργός (επιτεύχθηκε το 1934):



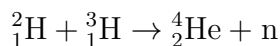
Να υπολογίσετε σε MeV τη διαφορά μαζών αντιδρώντων-προϊόντων (ενέργεια αντίδρασης, Q).

12. Ένα υποπροϊόν κάποιων αντιδραστών σχάσης είναι το ισότοπο ${}^{239}_{94}\text{Pu}$, το οποίο είναι εκπομπός σωματίων α με χρόνο ημιζωής 24 000 έτη



Θεωρήστε ένα δείγμα 1 kg αμιγούς ${}^{239}_{94}\text{Pu}$ τη χρονική στιγμή $t = 0$. Υπολογίστε:
 α) τον αριθμό των πυρήνων ${}^{239}_{94}\text{Pu}$ που υπάρχουν την χρονική στιγμή $t = 0$ και
 β) την αρχική ενεργότητα του δείγματος.

13. Δείξτε ότι η ενέργεια που απελευθερώνεται κατά την αντίδραση σύντηξης



είναι 17,59 MeV.

14. Να βρεθεί το έλλειμμα μάζας και η ενέργεια σύνδεσης του πυρήνα του ισότοπου ${}^{12}_6\text{C}$ σε MeV και J.

15. Το θόριο, ${}^{230}_{90}\text{Th}$, διασπάται σε ράδιο, ${}^{226}_{88}\text{Ra}$, με εκπομπή ενός σωματίου α .
- Να γραφεί η πυρηνική αντίδραση.
 - Να βρεθεί η κινητική ενέργεια του σωματιδίου α . Ο θυγατρικός πυρήνας θεωρείται ότι παραμένει ακίνητος.
16. Ο χρυσός Au, υφίσταται διάσπαση β^- παράγοντας μία διεγερμένη κατάσταση του πυρήνα ${}^{198}_{80}\text{Hg}^*$, που με τη σειρά του αποδιεγείρεται με εκπομπή φωτονίου γ ενέργειας 0,412 MeV. Πόση είναι η κινητική ενέργεια του ηλεκτρονίου που εκπέμπεται (ο θυγατρικός πυρήνας θεωρείται ακίνητος);

5.4 Κύκλωτρο, Φασματογράφος μάζας

Ερωτήσεις

- Ένα κύκλωτρο έχει, συνήθως, ακτίνα μερικών δεκάδων εκατοστών και το μαγνητικό πεδίο στα ηλεκτρόδια είναι 1 T - 2 T (μέσος όρος 1,2 T). Στο κύκλωτρο εφαρμόζεται η νευτώνεια μηχανική (χωρίς σχετικότητα). Έχοντας υπόψη σας αυτά τα στοιχεία, εξηγήστε γιατί το κύκλωτρο δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επιτάχυνση ηλεκτρονίων.
- Στον φασματογράφο μάζας, για πανομοιότυπα σωματίδια (ίδια μάζα και ίδιο φορτίο), πώς μπορούμε να πετύχουμε διαφορετικές τροχιές;

Ασκήσεις

Στις παρακάτω ασκήσεις δίνονται:

$$\text{μάζα πρωτονίου } m_p = 1,67 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

$$\text{μάζα δευτερονίου } m_d = 3,34 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

$$\text{στοιχειώδες ηλεκτρικό φορτίο } e = 1,60 \times 10^{-19} \text{ C}$$

Θεωρούμε ότι εφαρμόζεται η νευτώνεια μηχανική.

- Σε ένα κύκλωτρο, ακτίνας $R = 0,480 \text{ m}$, ανάμεσα στα ηλεκτρόδια (D's) - μέσα στα οποία επικρατεί υψηλό κενό - υπάρχει ένα μαγνητικό πεδίο, παράλληλο στον άξονα των ημικυλίνδρων, τιμής $B = 1,80 \text{ T}$. Στο διάκενο ανάμεσα στα ηλεκτρόδια ένας ταλαντωτής παράγει μία εναλλασσόμενη τάση πλάτους $V_m = 1500 \text{ V}$ και συχνότητας f , ίσης με τη συχνότητα περιστροφής των σωματιδίων, τα οποία επιταχύνονται σε κάθε πέρασμα από το ένα ηλεκτρόδιο στο άλλο. Στο κέντρο της διάταξης, μία πηγή S εκπέμπει πυρήνες δευτερίου (ή δευτερόνια), ${}^2_1\text{H}$, μάζας m και μηδενικής αρχικής ταχύτητας.

α) Ναδειχθεί ότι:

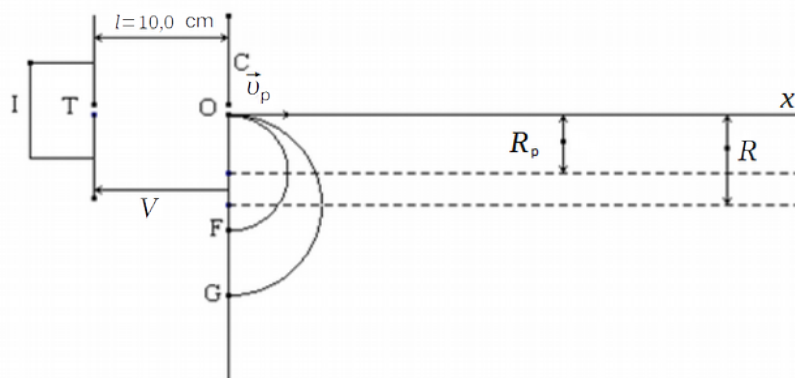
- i. η συχνότητα περιστροφής f ενός πυρήνα δευτερίου είναι $f = Be/(2\pi m_d)$, όπου e είναι το στοιχειώδες ηλεκτρικό φορτίο,
- ii. η κινητική ενέργεια ενός πυρήνα δευτερίου κατά την έξοδό του από το κύκλοτρο είναι $E_{\text{cmax}} = B^2 e^2 R^2 / (2m_d)$.

β) Να υπολογιστούν:

- i. η τιμή της E_{cmax} ,
- ii. ο αριθμός n των αναγκαίων περιστροφών, ώστε ένας πυρήνας δευτερίου να αποκτήσει ενέργεια E_{cmax} .

γ) Το μαγνητικό πεδίο \vec{B} διατηρείται αλλά θέλουμε να επιταχύνουμε πρωτόνια. Σ' αυτήν την περίπτωση πρέπει να αλλάξουμε τη συχνότητα της εναλλασσόμενης τάσης ανάμεσα στα ηλεκτρόδια. Να υπολογιστεί η τιμή f' αυτής της νέας συχνότητας.

2. α) Πρωτόνια, μάζας m_p και φορτίου e , εξέρχονται από το θάλαμο ιονισμού I από την οπή T με μηδενική ταχύτητα και επιταχύνονται μεταξύ της T και της καθόδου C από μία τάση V . Τα πρωτόνια αυτά εισέρχονται από το σημείο O, κατά τη διεύθυνση του άξονα Ox , σε μία περιοχή που υπάρχει ένα ομογενές μαγνητικό πεδίο \vec{B} . Στο O, το οποίο απέχει από την T κατά $l = 10,0 \text{ cm}$ τα πρωτόνια έχουν ταχύτητα \vec{v}_p μέτρου $v_p = 8,00 \times 10^5 \text{ m/s}$ (βλέπε σχήμα).
Να υπολογιστούν:



- i) η τιμή της επιταχύνουσας τάσης V ,
- ii) η τιμή της επιτάχυνσης a των πρωτονίων.

Μετά από το πέρασμα από το O , τα πρωτόνια διαγράφουν μέσα στο ομογενές μαγνητικό πεδίο \vec{B} ένα ημικύκλιο ακτίνας $R_P = 2,00$ cm και κατόπιν φθάνουν στο σημείο F (βλέπε σχήμα).

- i) Προσδιορίστε τη διεύθυνση και τη φορά του \vec{B} .
- ii) Ποιο είναι το μέτρο της ταχύτητας των πρωτονίων στο F ; Δικαιολογήστε την απάντησή σας.
- iii) Να υπολογιστεί η τιμή B του μαγνητικού πεδίου \vec{B} .

β) Στην πραγματικότητα, και άλλα σωματρία επίσης, μάζας m ($m \neq m_p$), αλλά με το ίδιο φορτίο e με το πρωτόνιο, παράγονται στο θάλαμο ιονισμού I . Αυτά τα σωματρία περνούν επίσης από την οπή T με μηδενική ταχύτητα και επιταχύνονται από την τάση V . Εισέρχονται από το O , με ταχύτητα \vec{v} , στο ομογενές μαγνητικό πεδίο \vec{B} , όπου διαγράφουν ημικύκλιο ακτίνας $R = 2,83$ cm και κατόπιν φθάνουν στο G (βλέπε σχήμα).

- i) Να αποδειχθεί η σχέση:

$$\frac{m}{m_p} = \left(\frac{R}{R_p} \right)^2$$

- ii) Ποια είναι αυτά τα άλλα σωματρία;

Παράρτημα Α΄

Ατομικές μάζες των ισοτόπων των στοιχείων

Η σχετική ατομική μάζα A_r ισούται με την αριθμητική τιμή της ατομικής μάζας σε μονάδες u .

Στοιχείο			Ατομική μάζα (u)
Z	Σύμβολο	A	
1	H	1	1,007 825
		2	2,014 101
		3	3,016 049
2	He	3	3,016 029
		4	4,002 603
4	Be	9	9,012 183
6	C	12	12,000 000
		13	13,003 354
		14	14,003 241
10	Ne	20	19,992 440
		21	20,993 846
		22	21,991 385
11	Na	23	22,989 769
12	Mg	24	23,985 041
		25	24,985 836
		26	25,982 592
13	Al	27	26,981 538
15	P	31	30,973 761
20	Ca	40	39,962 590
		42	41,958 617
		43	42,958 766
		44	43,955 481
		46	45,953 689
48	47,952 522		
41	Nb	93	92,906 373
79	Au	197	196,966 568
		198	197,968 242

Στοιχείο			Ατομική μάζα (u)
Z	Σύμβολο	A	
80	Hg	196	195,965 832
		198	197,966 768
		199	198,968 280
		200	199,968 326
		201	200,970 302
		202	201,970 643
204	203,973 493		
84	Po	209	208,982 430
		210	209,982 874
86	Rn	211	210,990 601
		220	220,011 394
		222	222,017 578
87	Fr	223	223,019 736
88	Ra	223	223,018 502
		224	224,020 212
		226	226,025 410
		228	228,031 070
90	Th	230	230,033 134
		232	232,038 055
92	U	233	233,039 635
94	Pu	238	238,049 560
		239	239,052 163
		240	240,053 813
		241	241,056 851
		242	242,058 742
244	244,064 205		