

ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΦΥΣΙΚΗΣ

**«Πυρηνική Φυσική & Φυσική Στοιχειωδών
Σωματιδίων» (5ο εξάμηνο)**

ΟΔΗΓΟΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

για τα προτεινόμενα βιβλία:

Cottingham, W.N., & Greenwood, D.A. (1995/2002). *Εισαγωγή στην Πυρηνική Φυσική* (μτφρ. Κ. Σαρηγιάννης). Αθήνα: εκδόσεις Τυπωθήτω

ΚΑΙ

Χ. Α. Ελευθεριάδης (2014), *Πυρηνική Φυσική - Βασικές Αρχές και Πυρηνοσύνθεση* (Θεσσαλονίκη, εκδόσεις C. C. Publish).

Επιμέλεια

Κωνσταντίνος Σ. Κορδάς

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ 2017

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Εισαγωγικό Σημείωμα		2
Ενότητα 1	Βασικές έννοιες: δομικοί λίθοι και αλληλεπιδράσεις τους – Μονάδες μέτρησης – Πυρήνες και συμβολισμός τους – Πυρηνική αστάθεια και μέσος χρόνος ζωής – Σκεδάσεις και ενεργός διατομή	3
Ενότητα 2	Μέγεθος και μάζα των πυρήνων – Εκλυόμενη ενέργεια κατά τις διασπάσεις – Πλεόνασμα μάζας και ενέργεια σύνδεσης	6
Ενότητα 3	Ημιεμπειρικός τύπος μάζας και κοιλάδα β-σταθερότητας	8
Ενότητα 4	Αλληλεπίδραση νουκλεονίου-νουκλεονίου – Στοφορμή, σπιν και ομοτιμία ενός συστήματος νουκλεονίων – Το δευτέριο	10
Ενότητα 5	Ιδιότητες της θεμελιώδους κατάστασης των πυρήνων – Το πρότυπο των φλοιών	12
Ενότητα 6	Άλφα διάσπαση (“α-διάσπαση”)	14
Ενότητα 7	Αποδιέγερση βήτα (“β-διάσπαση”)	16
Ενότητα 8	Διεγερμένες καταστάσεις του πυρήνα και αποδιέγερση γάμμα (“γ-διάσπαση”)	19
Ενότητα 9	Σχάση και σύντηξη	21
Ενότητα 10	Φυσική ακτινοβολία – Ραδιοχρονολόγηση – Μονάδες ραδιενέργειας και βιολογικές επιπτώσεις	23

ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΟ ΣΗΜΕΙΩΜΑ

Ο παρών Οδηγός Μελέτης αποτελεί βασικό βοήθημα για την ενότητα της Πυρηνικής Φυσικής στο μάθημα του 5ου εξαμήνου «Πυρηνική Φυσική & Φυσική Στοιχειωδών Σωματιδίων» του Τμήματος Φυσικής του Α.Π.Θ

Αυτός ο Οδηγός Μελέτης έχει σχεδιαστεί κατά κύριο λόγο για τη μελέτη του βιβλίου *Εισαγωγή στην Πυρηνική Φυσική* των W. N. Cottingham και D. A. Greenwood (μτφρ. Κ. Σαρηγιάννης, εκδόσεις Τυπωθήτω, Αθήνα, 1995/2002), το οποίο είναι ένα κλασικό σύγγραμμα πανεπιστημιακών προγραμμάτων σε τμήματα Φυσικής ανά την υφήλιο, καθώς και του βιβλίου *Πυρηνική Φυσική – Βασικές Αρχές και Πυρηνοσύνθεση* του Χ. Α. Ελευθεριάδη, εκδόσεις C. C. Publish, Θεσσαλονίκη, 2014, το οποίο επίσης προτείνεται στους φοιτητές μας. Ο παρών Οδηγός Μελέτης αποσκοπεί να εφοδιάσει τους/τις φοιτητές/-τριες με οδηγίες ώστε να χρησιμοποιούν τα βιβλία αποδοτικά στη μελέτη τους.

Ο παρών Οδηγός Μελέτης περιλαμβάνει 10 ενότητες και κάθε ενότητα αποτελείται από τα ακόλουθα τμήματα: Σκοπό, Προσδοκώμενα Αποτελέσματα, Έννοιες-Κλειδιά, βασική βιβλιογραφία και Δραστηριότητες. Οι ενότητες αυτές αντιστοιχούν στις 10 περίπου εβδομάδες διδασκαλίας της Πυρηνικής Φυσικής και το εξειδικεύουν σε επίπεδο παραγράφων των βιβλίων (τόσο των Cottingham και Greenwood, όσο και του κ. Ελευθεριάδη).

Θέλω να ευχαριστήσω το συνάδελφο, μέλος ΣΕΠ στη ΘΕ ΦΥΕ 40 του ΕΑΠ, κ. Κ. Γ. Παπαδόπουλο για τις χρήσιμες παρατηρήσεις του κατά τη συγγραφή του παρόντος σχετικά με τα προσδοκώμενα αποτελέσματα.

Κωνσταντίνος Σ. Κορδάς

Επίκουρος Καθηγητής ΑΠΘ

ΕΝΟΤΗΤΑ 1

Βασικές έννοιες: δομικοί λίθοι και αλληλεπιδράσεις τους – Μονάδες μέτρησης – Πυρήνες και συμβολισμός τους – Πυρηνική αστάθεια και μέσος χρόνος ζωής – Σκεδάσεις και ενεργός διατομή

Σκοπός

Σκοπός της ενότητας είναι να γνωρίσουν οι φοιτητές αδρομερώς (γιατί θα τα μελετήσουν εκτενέστερα στο τελευταίο μέρος της ΦΥΕ 40, στην εισαγωγή στα στοιχειώδη σωματίδια) τα δομικά συστατικά της ύλης, την ύπαρξη των διαφορών δυνάμεων μέσω των οποίων αυτά αλληλεπιδρούν, και ότι στις αντιδράσεις μεταξύ σωματιδίων υπάρχουν νόμοι διατήρησης κάποιων νέων κβαντικών αριθμών, πέρα από το φορτίο και τη στροφορμή που έχουν δει μέχρι τώρα. Θα μάθουν επίσης τις μονάδες που χρησιμοποιούνται στην πυρηνική φυσική και στη φυσική στοιχειωδών σωματιδίων, το συμβολισμό των πυρήνων, το νόμο των ραδιενεργών διασπάσεων για τα ασταθή σωματίδια και την έννοια της ενεργού διατομής στις αλληλεπιδράσεις σωματιδίων.

Προσδοκώμενα Αποτελέσματα

Μετά την ολοκλήρωση της μελέτης αυτής της ενότητας, ο/η φοιτητής/τρια θα είναι σε θέση:

- Να γνωρίζει ότι τα στοιχειώδη σωματίδια χωρίζονται σε *φερμιόνια* και *μποζόνια*, ανάλογα με το αν το σπιν τους είναι ημιακέραιο ή ακέραιο πολλαπλάσιο του \hbar , αντίστοιχα, καθώς και την έννοια της ομοτιμίας της κυματοσυνάρτησης που περιγράφει ένα σωματίδιο ή ένα σύστημα σωματιδίων (σημείωση: να γνωρίζει επίσης ότι η ομοτιμία απαντάται και ως “πάριτυ” ή “πάριτη” στα ελληνικά, από τον αγγλικό όρο “parity”).
- Να γνωρίζει ότι τα ηλεκτρόνια είναι φερμιόνια και άρα οι κυματοσυναρτήσεις ταυτόσημων ηλεκτρονίων δεν μπορεί να έχουν όλους τους κβαντικούς αριθμούς ίδιους, γιατί το σύστημα των δύο πρέπει να έχει αντισυμμετρική ολική κυματοσυνάρτηση, και ότι αυτή η ιδιότητα εξηγεί τη δομή των ατόμων.
- Να γνωρίζει ότι, αντιθέτως, τα φωτόνια είναι μποζόνια και άρα οι κυματοσυναρτήσεις ταυτόσημων φωτονίων μπορεί να έχουν όλους τους κβαντικούς αριθμούς ίδιους, γιατί το σύστημα των δύο πρέπει να έχει συμμετρική ολική κυματοσυνάρτηση, και ότι αυτή η ιδιότητα επιτρέπει την κατασκευή κυμάτων με μακροσκοπικό πλάτος, όπως είναι το γνωστό ηλεκτρικό και μαγνητικό πεδίο.
- Να γνωρίζει ότι τα διάφορα σωματίδια μπορούν να αλληλεπιδρούν μεταξύ τους με τέσσερις δυνάμεις, και όχι μόνο με την ηλεκτρομαγνητική ή τη βαρύτητα. Επίσης, ότι καθένα από τα πεδία αλληλεπίδρασης είναι κβαντισμένο και το κβάντα ενέργειας είναι μποζόνιο (φωτόνια για την *ηλεκτρομαγνητική*, γκλουόνια για την *ισχυρή*, W^+ W^- και Z^0 για την *ασθενή*, και κατ’ αναλογία το υποτιθέμενο βαρυτόνιο ή γκραβιτόνιο για τη *βαρύτητα*).
- Να γνωρίζει ότι τα σωματίδια που δεν αισθάνονται την ισχυρή δύναμη ονομάζονται *λεπτόνια*, τρία φορτισμένα και τρία ουδέτερα, και ότι το ηλεκτρόνιο είναι ένα από αυτά. Ακόμη, ότι τα τρία φορτισμένα λεπτόνια είναι το ηλεκτρόνιο, το μιονίο και το ταυ (το ελληνικό γράμμα “τ”) και ότι τα αντίστοιχα ουδέτερα ονομάζονται νετρίνο (νετρίνο του ηλεκτρονίου, νετρίνο του μιονίου και νετρίνο του ταυ). Τέλος, ότι δεν είναι όλα σταθερά, παρόλο που είναι στοιχειώδη (δηλαδή δεν έχουν δομή), αλλά κάποια διασπώνται, σεβόμενα φυσικά τη διατήρηση της ορμής, της ενέργειας, της στροφορμής και του φορτίου, αλλά και ενός νέου κβαντικού αριθμού, του “λεπτονικού αριθμού”.

- Να γνωρίζει ότι για κάθε σωματίδιο υπάρχει και το αντίστοιχο “αντι-σωματίδιο” (για το ηλεκτρόνιο, e^- , υπάρχει το ποζιτρόνιο, e^+ , για το μίονιο, μ^- , υπάρχει το θετικό μίονιο, μ^+ , για το νετρίνο του ηλεκτρονίου υπάρχει το αντινετρίνο του ηλεκτρονίου κ.ο.κ). Επίσης ότι τα λεπτόνια κατά σύμβαση έχουν λεπτονικό αριθμό +1, ενώ τα αντιλεπτόνια έχουν λεπτονικό αριθμό -1, και ότι υπάρχουν τρεις λεπτονικοί αριθμοί: ένας για την οικογένεια του ηλεκτρονίου, ένας για του μιονίου και ένας για του λεπτονίου ταυ. Να γνωρίζει ακόμη ότι στις αντιδράσεις με λεπτόνια υπάρχει ξεχωριστή διατήρηση για κάθε έναν από τους τρεις λεπτονικούς αριθμούς και ότι οι λεπτονικοί αριθμοί είναι προσθετικοί κβαντικοί αριθμοί. Να γνωρίζει λοιπόν ότι στη διάσπαση ενός νετρονίου σε ένα πρωτόνιο, εκπέμπεται μεν ένα ηλεκτρόνιο για να διατηρείται το φορτίο, αλλά εκπέμπεται και ένα αντινετρίνο ηλεκτρονίου, ώστε ο συνολικός λεπτονικός αριθμός τύπου ηλεκτρονίου να είναι μηδέν για τα προϊόντα, όπως είναι φυσικά και για το αρχικό νετρόνιο που έχει λεπτονικό αριθμό μηδέν αφού δεν είναι λεπτόνιο.
- Να γνωρίζει ότι τα πρωτόνια (που είδε στην κβαντομηχανική στο άτομο του υδρογόνου) και τα νετρόνια είναι σύνθετα σωματίδια που τα συστατικά τους (τα κουάρκ) αισθάνονται την ισχυρή δύναμη, καθώς και ποια είναι τα κουάρκ. Να γνωρίζει ότι για κάθε κουάρκ υπάρχει το αντι-σωματίδιό του, που ονομάζεται αντι-κουάρκ.
- Να γνωρίζει ότι τα σύνθετα σωματίδια που αποτελούνται από κουάρκ ονομάζονται είτε *βαρυόνια* (αν αποτελούνται από τρία κουάρκ ή τρία αντι-κουάρκ) είτε *μεσόνια* (αν αποτελούνται από ένα κουάρκ και ένα αντι-κουάρκ). Να γνωρίζει λοιπόν ότι το πρωτόνιο και το νετρόνιο είναι βαρυόνια.
- Να γνωρίζει επίσης ότι στις αντιδράσεις σωματιδίων, εκτός από τη διατήρηση των λεπτονικών αριθμών, υπάρχει και ο νόμος διατήρησης του “βαρυονικού” κβαντικού αριθμού και ότι τα βαρυόνια που είναι φτιαγμένα από κουάρκ έχουν βαρυονικό αριθμό +1 (γιατί κάθε κουάρκ έχει κατά σύμβαση βαρυονικό αριθμό +1/3), ενώ τα βαρυόνια που είναι φτιαγμένα από αντί-κουάρκ έχουν βαρυονικό αριθμό -1 (γιατί τα αντί-κουάρκ έχουν βαρυονικό αριθμό -1/3). Να γνωρίζει επίσης ότι ο βαρυονικός αριθμός είναι προσθετικός κβαντικός αριθμός, όπως είναι το φορτίο και οι λεπτονικοί αριθμοί.
- Να μπορεί να χειριστεί τις μονάδες μέτρησης που χρησιμοποιούνται στην πυρηνική φυσική και στη φυσική στοιχειωδών σωματιδίων και να θυμάται ότι η μονάδα “φέρμι” αναφέρεται στο fm (= 1 femto-meter), το οποίο στην πυρηνική φυσική το ονομάζουμε “fermi” προς τιμήν του μεγάλου φυσικού Enrico Fermi.
- Να γνωρίζει ότι το όνομα ενός πυρήνα (X) δίνεται από τον αριθμό πρωτονίων (Z) που περιέχει και να είναι σε θέση να αναγνωρίζει έναν πυρήνα τόσο από τον αναλυτικό του συμβολισμό A_ZX όσο και από τη συνοπτική του αναγραφή AX .
- Να γνωρίζει ότι κάποια σωματίδια, ακόμα και θεμελιώδη που δεν έχουν δομή, μπορούν να “διασπαστούν”, δηλαδή να πάνε να υπάρχουν δίνοντας τη θέση τους σε κάποια άλλα. Να γνωρίζει το νόμο των “ραδιενεργών διασπάσεων” και πώς συνδέονται ο ρυθμός διάσπασης, ο μέσος χρόνος ζωής και ο χρόνος ημισείας ζωής ενός σωματιδίου (είτε στοιχειώδους, όπως, π.χ., το μίονιο, είτε σύνθετου, όπως, π.χ., ένας πυρήνας). Να γνωρίζει επίσης πώς συνδέεται ο μέσος χρόνος ζωής με το “ρυθμό διάσπασης”, που ονομάζεται και “σταθερά διάσπασης” ή αποδιέγερσης.
- Να γνωρίζει την έννοια της ενεργού διατομής για τη σκέδαση σωματιδίων καθώς και ότι η πιθανότητα αλληλεπίδρασής τους και ο ρυθμός πραγματοποίησης της αντίδρασής τους είναι ποσότητες ανάλογες της ενεργού διατομής. Επίσης να γνωρίζει την έννοια της μέσης ελεύθερης διαδρομής ενός σωματιδίου κατά τη διέλευσή του μέσα από ένα υλικό.

Έννοιες-Κλειδιά

Φερμιόνια, μποζόνια, ομοτιμία (parity), λεπτόνια, κουάρκ, βαρυόνια, μεσόνια, στοιχειώδη σωμάτια, σύνθετα σωμάτια, ηλεκτρονιοβόλτ (eV), fermi (fm), λεπτονικός αριθμός, βαρυονικός αριθμός, μαζικός αριθμός A, ατομικός αριθμός Z, ισότοποι, ισότονοι και ισοβαρείς πυρήνες, ραδιενεργός νόμος διάσπασης, μέσος χρόνος ζωής, χρόνος ημισείας ζωής, ρυθμός διάσπασης (αποδιέγερσης), σταθερά διάσπασης (αποδιέγερσης), σκέδαση σωματιδίων, ενεργός διατομή, μέση ελεύθερη διαδρομή.

Βιβλιογραφία

- Cottingham, W. N., & Greenwood, D. A. (1995/2002). *Εισαγωγή στην Πυρηνική Φυσική*, (μτφρ. Κ. Σαρηγιάννης). Αθήνα: εκδόσεις Τυπωθήτω (“Πυρηνική C&G”):
 - Κεφ. 1: σελ. 19-24.
 - Κεφ. 2: παράγραφοι 2.1 και 2.2 (σελ. 25-30) για απλή ανάγνωση, παράγραφοι 2.3, 2.4, 2.5 (σελ. 30-34).
 - Κεφ. 3: παράγραφοι 3.1, 3.2 (σελ. 37-41) και 3.5, 3.6 (σελ. 47-50).
 - Κεφ. 4: 1η παράγραφος μόνο (σελ. 52).
 - Παράρτημα Ε: παράγραφος Ε.1 μόνο (σελ. 248).
 - Παράρτημα Α: (σελ. 223-228).
- Χ. Α. Ελευθεριάδης (2014), *Πυρηνική Φυσική – Βασικές Αρχές και Πυρηνοσύνθεση* (Θεσσαλονίκη, εκδόσεις C. C. Publish).
 - Κεφ. 1: όλο (σελ. 1-25).
 - Κεφ. 5: παράγραφος 5.1 (σελ. 77-83).

Δραστηριότητες

- Προβλήματα από το βιβλίο των Cottingham & Greenwood (με υποδείξεις λύσεων στο τέλος του βιβλίου): προβλήματα 1.1, 1.2, 1.3 (σελ. 24), 2.1, 2.3, 2.4, 2.5, 2.6 (σελ. 36), 3.4 και 3.5 (σελ. 51).
- Προβλήματα από το βιβλίο του κ. Ελευθεριάδη: προβλήματα κεφαλαίου 1 (σελ. 25), και προβλήματα 1, 2, 3 κεφαλαίου 5 (σελ. 189),

ΕΝΟΤΗΤΑ 2

Μέγεθος και μάζα των πυρήνων – Εκλυόμενη ενέργεια κατά τις διασπάσεις – Πλεόνασμα μάζας και ενέργεια σύνδεσης

Σκοπός

Σκοπός της ενότητας είναι να γνωρίσουν οι φοιτητές/-τριες πώς προσδιορίζεται το μέγεθος των πυρήνων, καθώς και πώς τα πρωτόνια και νετρόνια κατανέμονται στον όγκο του πυρήνα. Επίσης, να μπορούν να προσδιορίζουν τη μάζα ενός πυρήνα γνωρίζοντας είτε την ενέργεια σύνδεσης των συστατικών του είτε το πλεόνασμα (ή έλλειμμα) μάζας του πυρήνα. Τέλος, να μπορούν να υπολογίζουν την εκλυόμενη ενέργεια (ισοζύγιο ενέργειας) σε μια διάσπαση.

Προσδοκώμενα Αποτελέσματα

Μετά την ολοκλήρωση της μελέτης αυτής της ενότητας ο/η φοιτητής/-τρια θα είναι σε θέση:

- Να περιγράφει το σχήμα και τις διαστάσεις ενός πυρήνα και να γνωρίζει ότι ο πυρήνας έχει σφαιρικό σχήμα με όγκο που αυξάνει ανάλογα με το μαζικό αριθμό A , με σταθερά αναλογίας περίπου 1 κυβικό fm, καθώς και ότι το εσωτερικό του πυρήνα εμφανίζει σταθερή και πολύ υψηλή συγκέντρωση νουκλεονίων. Να γνωρίζει λοιπόν ότι το μέγεθος των πυρήνων είναι πολύ μικρότερο των ατόμων.
- Να περιγράφει ποιοτικά πώς η σκέδαση σωματιδίων πάνω σε πυρήνα μπορεί να δώσει πληροφορία για το μέγεθος του πυρήνα και πώς η κατανομή του φορτίου μέσα στον πυρήνα προσδιορίζεται από τη σκέδαση ηλεκτρονίων πάνω σε πυρήνες καθώς και με μιονικά άτομα.
- Να γνωρίζει ότι η ελάχιστη ενέργεια που έχει ένας πυρήνας είναι ίση με τη μάζα του και να μπορεί να υπολογίσει την εκλυόμενη ενέργεια, Q (που ονομάζεται και ισοζύγιο ενέργειας), σε μια αντίδραση ως τη διαφορά μαζών μεταξύ των αντιδρώντων και των προϊόντων της αντίδρασης.
- Να γνωρίζει ότι η αντίδραση γίνεται αυθόρμητα μόνο όταν το Q είναι θετικό και ότι η εκλυόμενη ενέργεια μοιράζεται ως κινητική ενέργεια στα προϊόντα, ενώ όταν το Q είναι αρνητικό σημαίνει ότι η ενέργεια των αντιδρώντων δεν αρκεί για να δημιουργηθούν τα προϊόντα.
- Να γνωρίζει τι σημαίνει η “ατομική μονάδα μάζας” (atomic mass unit = amu = u) και ότι 1amu είναι περίπου ίσο με 931.5 MeV. Επιπλέον, θα μπορεί να υπολογίσει τη μάζα ενός ουδέτερου ατόμου με γνωστά το μαζικό αριθμό, A , και το πλεόνασμα μάζας, Δ , από τη σχέση $M(A,Z) = A \cdot \text{amu} + \Delta$, με χρήση πυρηνικών δεδομένων όπως αυτά που δίνονται στη σελ. 257 του βιβλίου *Εισαγωγή στην Πυρηνική Φυσική* του Ασημακόπουλου. Να γνωρίζει επίσης ότι το πλεόνασμα μάζας, Δ , μπορεί να πάρει και αρνητικές τιμές, και ότι αν δίνουμε απλά την απόλυτη τιμή του, πρέπει να το ονομάζουμε έλλειμμα μάζας, ώστε να χρησιμοποιούμε τη σωστή αλγεβρική τιμή στην έκφραση $M(A,Z) = A \cdot \text{amu} + \Delta$, όπου το Δ μπορεί να πάρει θετικές ή αρνητικές τιμές.
- Να γνωρίζει τι σημαίνει “ενέργεια σύνδεσης”, B , ενός πυρήνα, και ότι μάζα του πυρήνα δίνεται ως $m(A,Z) = Z \cdot m(\text{πρωτονίου}) + N \cdot m(\text{νετρονίου}) - B$, όπου το B παίρνει μόνο θετικές τιμές. Θα μπορεί, ακόμη, να χρησιμοποιεί για τον υπολογισμό αυτό πυρηνικά δεδομένα όπως αυτά που δίνονται στον πίνακα 4.2 (σελ. 61) του βιβλίου *Εισαγωγή στην Πυρηνική Φυσική* των Cottingham και Greenwood. Τέλος, θα γνωρίζει ότι αυτός ο τύπος σημαίνει ότι η μάζα ενός πυρήνα είναι μικρότερη από το άθροισμα μαζών των συστατικών του νουκλεονίων.

- Να γνωρίζει ότι συνήθως με κεφαλαίο M γράφουμε τη μάζα του ατόμου, ενώ με μικρό m γράφουμε τη μάζα του πυρήνα. Επίσης, ότι η μάζα ενός ατόμου μπορεί να γραφεί ως άθροισμα των μαζών του πυρήνα και των ηλεκτρονίων του: $M(A,Z) = m(A,Z) + Z \cdot m(\text{ηλεκτρονίου})$ - “Ενέργεια σύνδεσης των ηλεκτρονίων με τον πυρήνα”, και ότι επειδή η ενέργεια σύνδεσης των ηλεκτρονίων με τον πυρήνα είναι αμελητέα (τάξης keV το πολύ) σε σχέση με τα πολλά MeV που είναι η μάζα ενός πυρήνα, ο όρος αυτός αγνοείται και γράφουμε απλά $M(A,Z) = m(A,Z) + Z \cdot m(\text{ηλεκτρονίου})$ για τη μάζα του ατόμου.

Έννοιες-Κλειδιά

Μέγεθος πυρήνα, όγκος πυρήνα, κατανομή φορτίου πυρήνα, κατανομή νουκλεονίων στον πυρήνα, σκέδαση ηλεκτρονίων, μιονικά άτομα, ατομική μονάδα μάζας, μάζα ουδέτερου ατόμου, μάζα πυρήνα, ενέργεια σύνδεσης, πλεόνασμα και έλλειμμα μάζας, εκλυόμενη ενέργεια, ισοζύγιο ενέργειας.

Βιβλιογραφία

- Cottingham, W. N., & Greenwood, D. A. (1995/2002). *Εισαγωγή στην Πυρηνική Φυσική* (μτφρ. Κ. Σαρηγιάννης). Αθήνα: εκδόσεις Τυπωθήτω (“Πυρηνική C&G”):
 - Κεφ. 4: παράγραφοι 4.1 – 4.4 (σελ. 52-62).
- Χ. Α. Ελευθεριάδης (2014), *Πυρηνική Φυσική – Βασικές Αρχές και Πυρηνοσύνθεση* (Θεσσαλονίκη, εκδόσεις C. C. Publish).
 - Κεφ. 3: όλο (σελ. 39-55).
 - Κεφ. 4: παράγραφοι 4.1, 4.2 (σελ. 57-61).

Δραστηριότητες

- Προβλήματα από το βιβλίο των Cottingham & Greenwood (με υποδείξεις λύσεων στο τέλος του βιβλίου): προβλήματα 4.1, 4.3, 4.4, 4.5 (σελ. 74-76).
- Προβλήματα από το βιβλίο του κ. Ελευθεριάδη: προβλήματα κεφαλαίου 3 (σελ. 55).

ΕΝΟΤΗΤΑ 3

Ημιεμπειρικός τύπος μάζας και κοιλάδα β-σταθερότητας

Σκοπός

Σκοπός της ενότητας είναι να γνωρίσουν οι φοιτητές το ημιεμπειρικό μοντέλο για τον προσδιορισμό της ενέργειας σύνδεσης ενός πυρήνα και να μάθουν πώς αυτό το μοντέλο οδηγεί στον προσδιορισμό των β-σταθερών πυρήνων. Θα γνωρίσουν επίσης τον τόπο των β-σταθερών πυρήνων στο διάγραμμα του πλήθους νετρονίων συναρτήσει του πλήθους πρωτονίων, καθώς και πού καταλήγει σε αυτό το διάγραμμα ένας πυρήνας όταν υποστεί διασπάσεις άλφα και βήτα. Τέλος, θα μάθουν ότι το μοντέλο αυτό αναπαράγει αρκετά καλά τη μέση ενέργεια σύνδεσης ανά νουκλεόνιο συναρτήσει του πλήθους των νουκλεονίων στους β-σταθερούς πυρήνες.

Προσδοκώμενα Αποτελέσματα

Μετά την ολοκλήρωση της μελέτης αυτής της ενότητας ο/η φοιτητής/-τρια θα είναι σε θέση:

- Να περιγράψει τον “ημιεμπειρικό τύπο μάζας”, όπως λέγεται το ημιεμπειρικό μοντέλο για τον προσδιορισμό της ενέργειας σύνδεσης ενός πυρήνα, και να γνωρίζει ότι το πρότυπο αυτό θεωρεί τον πυρήνα ως υγρή σταγόνα και ότι οι κύριοι όροι του προτύπου αυτού εκφράζουν τη μικρή εμβέλεια των πυρηνικών δυνάμεων, την προτίμηση του πυρήνα σε ίδιο αριθμό πρωτονίων και νετρονίων, καθώς και τις διαλυτικές τάσεις λόγω των πρωτονίων που απωθούνται. Να μπορεί δε να εξηγήει τη σημασία κάθε όρου σε αυτό τον τύπο.
- Να μπορεί να προβλέψει σε μια ομάδα ισοβαρών πυρήνων ποιος αριθμός πρωτονίων δίνει το σταθερότερο πυρήνα και να γνωρίζει ότι η ύπαρξη του “όρου Coulomb” στον ημιεμπειρικό τύπο οδηγεί στο ότι οι σταθεροί πυρήνες με αρκετά νουκλεόνια έχουν λιγότερα πρωτόνια από νετρόνια.
- Να μπορεί να προβλέψει σε μια ομάδα ισοβαρών πυρήνων ποιοι είναι σταθεροί, ποιοι ασταθείς και πώς οι ασταθείς μπορούν να μετατραπούν σε σταθερότερους πυρήνες. Να μπορεί να δείξει επίσης τον τόπο των β-σταθερών πυρήνων στο διάγραμμα του πλήθους νετρονίων συναρτήσει του πλήθους πρωτονίων, καθώς και πού καταλήγει σε αυτό το διάγραμμα ένας πυρήνας όταν υποστεί διασπάσεις άλφα ή βήτα.
- Να γνωρίζει ότι ο μόνος τρόπος αλλαγής του αριθμού των πρωτονίων και των νετρονίων σε έναν πυρήνα που διατηρεί το πλήθος νουκλεονίων αναλλοίωτο είναι οι βήτα διασπάσεις (ή αποδιεγέρσεις). Να γνωρίζει επίσης ότι οι βήτα-διασπάσεις προκύπτουν είτε από α) τη μετατροπή ενός πρωτονίου, μέσω της ασθενούς αλληλεπίδρασης, σε ένα νετρόνιο, με εκπομπή ποζιτρονίου ή με απορρόφηση ηλεκτρονίου, οπότε και ονομάζονται “αποδιέγερση β⁺” ή “ηλεκτρονική σύλληψη”, αντίστοιχα, είτε από β) τη μετατροπή ενός νετρονίου, μέσω της ασθενούς αλληλεπίδρασης, σε ένα πρωτόνιο με εκπομπή ηλεκτρονίου, οπότε και ονομάζεται “αποδιέγερση β⁻”.
- Να γνωρίζει ότι, για τους β-σταθερούς πυρήνες, το μέγιστο της ενέργειας σύνδεσης ανά νουκλεόνιο βρίσκεται στην περιοχή του σιδήρου ($Z=28$, $A=56$) και ότι τα βαρύτερα στοιχεία μπορεί να είναι ασταθή και να διασπώνται αυθόρμητα, είτε με διάσπαση άλφα είτε ακόμα και με σχάση, και ότι τα προϊόντα έχουν μεγαλύτερη ενέργεια σύνδεσης ανά νουκλεόνιο από ό,τι το αρχικό σύστημα. Να μπορεί λοιπόν να εξηγήσει γιατί το σταθερότερο στοιχείο στη φύση είναι ο σίδηρος, καθώς και γιατί κάποιοι βαρείς

πυρήνες μπορούν εν δυνάμει να κάνουν σχάση και κάποιοι ελαφροί πυρήνες να κάνουν σύντηξη.

Έννοιες-Κλειδιά

Ενέργεια σύνδεσης, υγρή σταγόνα, όρος όγκου, όρος επιφάνειας, όρος ασυμμετρίας, όγκος Coulomb, όρος (ενέργεια) ζευγαρώματος, κοιλάδα σταθερότητας, μέση ενέργεια σύνδεσης ανά νουκλεόνιο, άλφα-διάσπαση, σχάση, σύντηξη, αποδιεγέρσεις βήτα.

Βιβλιογραφία

- Cottingham, W. N., & Greenwood, D. A. (1995/2002). *Εισαγωγή στην Πυρηνική Φυσική* (μτφρ. Κ. Σαρηγιάννης). Αθήνα: εκδόσεις Τυπωθήτω (“Πυρηνική C&G”):
 - Κεφ. 4: παράγραφοι 4.5 - 4.8 (σελ. 62-72).
- Χ. Α. Ελευθεριάδης (2014), *Πυρηνική Φυσική – Βασικές Αρχές και Πυρηνοσύνθεση* (Θεσσαλονίκη, εκδόσεις C. C. Publish).
 - Κεφ. 4: παράγραφοι 4.3, 4.4 (σελ. 61-75).

Δραστηριότητες

- Προβλήματα από το βιβλίο των Cottingham & Greenwood (με υποδείξεις λύσεων στο τέλος του βιβλίου): προβλήματα 4.6, 4.7, 4.8, 4.9 (σελ. 76).
- Προβλήματα από το βιβλίο του κ. Ελευθεριάδη: προβλήματα κεφαλαίου 4 (σελ. 75).

ΕΝΟΤΗΤΑ 4

Αλληλεπίδραση νουκλεονίου-νουκλεονίου – Στροφορμή, σπιν και ομοτιμία ενός συστήματος νουκλεονίων – Το δευτέριο

Σκοπός

Σκοπός της ενότητας είναι να γνωρίσουν οι φοιτητές την αλληλεπίδραση του απλούστερου πυρηνικού συστήματος, δηλαδή δύο νουκλεονίων. Θα γνωρίσουν, επίσης, την αλληλεπίδραση δύο νουκλεονίων με το απλό δυναμικό Yukawa, καθώς και την πληρέστερη φαινομενολογική περιγραφή ως συνεισφορά διαφόρων όρων πέραν του κεντρικού δυναμικού. Θα επαναλάβουν το φορμαλισμό της στροφορμής και της πρόσθεσης στροφορμών που είδαν στην κβαντομηχανική και, τέλος, θα δουν το συμβολισμό για τους κβαντικούς αριθμούς ενός πυρήνα.

Προσδοκώμενα Αποτελέσματα

Μετά την ολοκλήρωση της μελέτης αυτής της ενότητας ο/η φοιτητής/-τρια θα είναι σε θέση:

- Να γνωρίζει ότι η αλληλεπίδραση μεταξύ δύο νουκλεονίων είναι τέτοια ώστε η δύναμη μεταξύ τους είναι ελκτική, ισχυρότερη από την απωστική δύναμη Coulomb, με μικρή εμβέλεια (της τάξης του 1fm), και να ότι αυτή ονομάζεται “ισχυρή δύναμη” ή “ισχυρή αλληλεπίδραση”.
- Να γνωρίζει ότι η αλληλεπίδραση δύο νουκλεονίων μπορεί να αποδίδεται στην ανταλλαγή “π μεσονίων” (πιονίων), που έχουν μάζα 275 φορές περίπου τη μάζα του ηλεκτρονίου, και ότι με βάση το μηχανισμό αυτό το δυναμικό δύο νουκλεονίων μειώνεται εκθετικά όσο αυξάνεται η μεταξύ τους απόσταση με εμβέλεια που είναι ίση με το μήκος κύματος Compton του ανταλασσόμενου σωματιδίου, άρα η εμβέλεια είναι αντιστρόφως ανάλογη της μάζας του σωματιδίου ανταλλαγής (εδώ, του πιονίου). Να γνωρίζει επίσης ότι ένα τέτοιο δυναμικό ονομάζεται “δυναμικό Yukawa” και ότι η μάζα του πιονίου δίνει εμβέλεια γύρω στο 1.4fm, που είναι συμβατή με την εμβέλεια της ισχυρής δύναμης.
- Να γνωρίζει ότι οι καταστάσεις που μπορούν να βρεθούν δύο νουκλεόνια, όπως και κάθε πυρηνικό σύστημα, έχουν μια σταθερή ολική στροφορμή, \mathbf{J} , δηλαδή χαρακτηρίζονται από τον κβαντικό αριθμό J της ολικής στροφορμής και τον κβαντικό αριθμό M της προβολής της σε κάποιον άξονα κβαντισμού. Να γνωρίζει δε ότι ο τελεστής \mathbf{J} αναφέρεται ως “το σπιν του πυρήνα” και ότι αναπαριστά το διανυσματικό άθροισμα των τροχιακών στροφορμών και των ιδιο-στροφορμών (σπιν) των συστατικών νουκλεονίων του συστήματος. Να γνωρίζει επίσης ότι η κυματοσυνάρτηση δύο νουκλεονίων, όπως και ενός πυρήνα, έχει συγκεκριμένη πάριτη.
- Να γνωρίζει ότι όταν αναφερόμαστε σε “κεντρικό δυναμικό” για την αλληλεπίδραση σωματιδίων, σημαίνει ότι η δυναμική τους ενέργεια $V(r)$ είναι σφαιρικά συμμετρική και συνάρτηση μόνο της απόστασης, δηλαδή της ακτινικής συνιστώσας r . Να γνωρίζει δε ότι όταν το δυναμικό μεταξύ δύο νουκλεονίων είναι κεντρικό, όλοι οι κβαντικοί αριθμοί των τελεστών της συνολικής τροχιακής στροφορμής \mathbf{L} , του συνολικού σπιν \mathbf{S} , και της ολικής στροφορμής $\mathbf{J}=\mathbf{L}+\mathbf{S}$, διατηρούνται. Ενώ, ότι για “μη κεντρικό δυναμικό” η μόνη ποσότητα που διατηρείται είναι η ολική στροφορμή \mathbf{J} .
- Να γνωρίζει ότι το δυναμικό μεταξύ δύο νουκλεονίων έχει όρους με “μη κεντρικό δυναμικό”, οι οποίοι φαινομενολογικά αποδίδονται στην αλληλεπίδραση των σπιν των νουκλεονίων, καθώς και των σπιν με τις τροχιακές στροφορμές τους, και ότι, ανάλογα με το ολικό σπιν τους, οι όροι αυτοί μπορούν να συνεισφέρουν αποφασιστικά ώστε το

δυναμικό δύο νουκλεονίων να είναι ένα αρκετά βαθύ πηγάδι δυναμικού για τη δημιουργία δέσμιων συστημάτων.

- Να γνωρίζει ότι, επειδή ένα πυρηνικό σύστημα περιγράφεται από μη κεντρικό δυναμικό, ένας πυρήνας χαρακτηρίζεται από τον κβαντικό αριθμό J της ολικής στροφορμής του (“το σπιν του πυρήνα”) και την πάριτη, που συμβολίζονται μαζί ως J^π (π.χ., το δευτέριο, που είναι σύστημα πρωτονίου-νετρονίου, έχει ολική στροφορμή 1 και πάριτη +1, οπότε για το δευτέριο γράφουμε ότι έχει κβαντικούς αριθμούς $J^\pi = 1+$).
- Να γνωρίζουν ότι για δύο σωματίδια, ή δύο συστήματα, με στροφορμές \mathbf{J}_1 και \mathbf{J}_2 , μπορούμε να σχηματίσουμε την ολική στροφορμή τους $\mathbf{J} = \mathbf{J}_1 + \mathbf{J}_2$, που είναι ένα διανυσματικό άθροισμα με την ιδιαιτερότητα ότι τόσο οι αθροιζόμενες στροφορμές όσο και η συνολική στροφορμή σέβονται τους κανόνες κβάντωσης της στροφορμής. Έτσι, αν j_1 και j_2 είναι οι κβαντικοί αριθμοί των μέτρων των στροφορμών \mathbf{J}_1 και \mathbf{J}_2 , ο κβαντικός αριθμός, j , του μέτρου της συνολικής στροφορμής μπορεί να πάρει μόνο τις τιμές $j = |j_1 - j_2|, |j_1 - j_2| + 1, \dots, j_1 + j_2$.

Έννοιες-Κλειδιά

Αλληλεπίδραση νουκλεονίου-νουκλεονίου, πηγάδι δυναμικού, κεντρικό δυναμικό, μη-κεντρικό δυναμικό, π μεσόνιο, πόνιο, δύναμη ανταλλαγής, δυναμικό Yukawa, ολική στροφορμή και πάριτη πυρηνικού συστήματος, δευτέριο, πρόσθεση στροφορμών.

Βιβλιογραφία

- Cottingham, W. N., & Greenwood, D. A. (1995/2002). *Εισαγωγή στην Πυρηνική Φυσική* (μτφρ. Κ. Σαρηγιάννης). Αθήνα: εκδόσεις Τυπωθήτω (“Πυρηνική C&G”):
 - Κεφ. 3: παράγραφοι 3.3 και 3.4 (σελ. 41-46).
 - Παράρτημα Γ: όλο (σελ. 233-238)
- Χ. Α. Ελευθεριάδης (2014), *Πυρηνική Φυσική – Βασικές Αρχές και Πυρηνοσύνθεση* (Θεσσαλονίκη, εκδόσεις C. C. Publish).
 - Κεφ. 6: παράγραφοι 6.1, 6.2 (σελ. 191-199).

Δραστηριότητες

- Προβλήματα από το βιβλίο των Cottingham & Greenwood (με υποδείξεις λύσεων στο τέλος του βιβλίου): προβλήματα 3.3 (σελ. 50) και Γ.3 (σελ. 238)

ΕΝΟΤΗΤΑ 5

Ιδιότητες της θεμελιώδους κατάστασης των πυρήνων – Το πρότυπο των φλοιών

Σκοπός

Σκοπός της ενότητας είναι να δουν οι φοιτητές πώς ένα απλό πηγάδι δυναμικού για τον πυρήνα οδηγεί στην εκτίμηση των κβαντισμένων ενεργειακών σταθμών των νουκλεονίων. Επίσης, πώς αυτό το μοντέλο των ενεργειακών φλοιών, μαζί με κάποιους απλούς κανόνες ζευγαρώματος των πρωτονίων και των νετρονίων στους πυρήνες, περιγράφει τη στροφορμή και την πάριτη της πλειονότητας των πυρήνων.

Προσδοκώμενα Αποτελέσματα

Μετά την ολοκλήρωση της μελέτης αυτής της ενότητας, ο/η φοιτητής/-τρια θα είναι σε θέση:

- Να εξηγήσει πώς η απαγορευτική αρχή του Pauli σε συνδυασμό με τον πεπερασμένο όγκο του πυρήνα εξηγούν την ενέργεια Fermi και το βάθος του πηγαδιού δυναμικού σε έναν πυρήνα με γνωστό αριθμό νουκλεονίων.
- Να εξηγήσει πώς, για το απλό μοντέλο με απειρόβαθο πηγάδι δυναμικού, η πεπερασμένη ακτίνα του πυρήνα σε συνδυασμό με τις συνοριακές συνθήκες οδηγούν στην κβάντωση των ενεργειακών σταθμών στο πηγάδι, όπου οι τιμές των ενεργειακών σταθμών εξαρτώνται και από την τιμή της στροφορμής.
- Να γνωρίζει ότι η εισαγωγή ενός όρου σύζευξης σπιν-τροχιάς ($\mathbf{L} \cdot \mathbf{S}$) στο δυναμικό οδηγεί στο διαχωρισμό των ενεργειακών καταστάσεων, ανάλογα με την τιμή του κβαντικού αριθμού j του μέτρου της ολικής στροφορμής. Να γνωρίζει επίσης ότι οι δυνατές τιμές του j για δεδομένο κβαντικό αριθμό του μέτρου της τροχιακής στροφορμής, l , είναι ή $j = l + 1/2$ ή $j = l - 1/2$, ανάλογα με το αν το σπιν του νουκλεονίου έχει προβολή $+1/2$ ή $-1/2$, αντίστοιχα.
- Να γνωρίζει ότι το πηγάδι δυναμικού για τα πρωτόνια είναι διαφορετικό από το πηγάδι δυναμικού για τα νετρόνια, γιατί παρόλο που κινούνται όλα στον ίδιο χώρο (στον όγκο του πυρήνα), υπόκεινται σε διαφορετικά δυναμικά, αφού τα πρωτόνια αισθάνονται τόσο την ισχυρή δύναμη όπως και τα νετρόνια, όσο και την αλληλεπίδραση Coulomb καθώς είναι φορτισμένα.
- Για έναν πυρήνα με γνωστό αριθμό πρωτονίων και νετρονίων, να μπορεί να τοποθετήσει τα πρωτόνια και τα νετρόνια στις διάφορες ενεργειακές στάθμες, γεμίζοντας κάθε πηγάδι από τη χαμηλότερη ενεργειακή στάθμη και προς τα επάνω.
- Να γνωρίζει ότι άρτιος αριθμός πρωτονίων δίνει σπιν μηδέν και πάριτη $+$, το ίδιο και ο άρτιος αριθμός νετρονίων. Να γνωρίζει λοιπόν ότι αν ένας πυρήνας έχει και άρτιο αριθμό πρωτονίων και άρτιο αριθμό νετρονίων, τότε ο πυρήνας αυτός έχει ολικό σπιν 0 και πάριτη $+$, οπότε γράφουμε για τον πυρήνα ότι έχει $J^\pi = 1^+$
- Να γνωρίζει ότι μόνο τα αζευγάρωτα νουκλεόνια είναι αυτά που καθορίζουν το ολικό σπιν J (δηλ. το άθροισμα των τροχιακών στροφορμών, l , και των σπιν) και την πάριτη του πυρήνα. Να γνωρίζει να υπολογίζει την πάριτη από το $(-1)^l$, όπου l είναι ο κβαντικός αριθμός του μέτρου της τροχιακής στροφορμής, που συμβολίζεται με s, p, d, f, \dots για $l=0, 1, 2, 3, \dots$ αντίστοιχα. Να μπορεί λοιπόν να βρίσκει σε ποια κατάσταση βρίσκεται το "τελευταίο" αζευγάρωτο νουκλεόνιο σε ένα σχήμα με τις ενεργειακές καταστάσεις και να βρίσκει έτσι το ολικό σπιν και την πάριτη όλου του πυρήνα.
- Να γνωρίζει ότι η στροφορμή είναι προσθετικός κβαντικός αριθμός: για να βρει την ολική στροφορμή να μπορεί να κάνει διανυσματικό άθροισμα των επιμέρους

στροφορμών (με τους κανόνες της κβαντικής βέβαια). Να γνωρίζει επίσης ότι η πάριτη είναι πολλαπλασιαστικός κβαντικός αριθμός, οπότε η ολική πάριτη του πυρήνα είναι το γινόμενο (πάριτη όλων των άλλων νουκλεονίων μαζί) * (πάριτη του αζευγάρωτου νουκλεονίου).

- Να γνωρίζει ότι ένα παλλόμενο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο κατάλληλης συχνότητας μπορεί να προκαλεί μεταπτώσεις μεταξύ των ενεργειακών επιπέδων που προκύπτουν από το διαχωρισμό λόγω αλληλεπίδρασης της μαγνητικής διπολικής ροπής του πυρήνα, μ , με το εξωτερικό μαγνητικό πεδίο, B . Να γνωρίζει ότι αυτό το φαινόμενο ονομάζεται “πυρηνικός μαγνητικός συντονισμός” και ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο για τη μέτρηση της μαγνητικής διπολικής ροπής του πυρήνα όσο και σε πλήθος άλλων εφαρμογών, όπως, π.χ., στη μαγνητική τομογραφία.

Έννοιες-Κλειδιά

Πυρηνικό πηγάδι δυναμικού, απαγορευτική αρχή Pauli, ενέργεια Fermi, πυκνότητα και πλήθος ενεργειακών καταστάσεων, σύζευξη σπιν-τροχιάς, πρότυπο φλοιών, μαγικοί αριθμοί, σπιν – πάριτη – μαγνητική διπολική ροπή πυρήνα.

Βιβλιογραφία

- Cottingham, W. N., & Greenwood, D. A. (1995/2002). *Εισαγωγή στην Πυρηνική Φυσική* (μτφρ. Κ. Σαρηγιάννης). Αθήνα: εκδόσεις Τυπωθήτω (“Πυρηνική C&G”):
 - Κεφ. 5: παράγραφοι 5.1 – 5.6 (σελ. 77-90).
 - Παράρτημα Β: όλο (σελ. 229-231).
- Χ. Α. Ελευθεριάδης (2014), *Πυρηνική Φυσική – Βασικές Αρχές και Πυρηνοσύνθεση* (Θεσσαλονίκη, εκδόσεις C. C. Publish).
 - Κεφ. 6: παράγραφοι 6.3, 6.4 (σελ. 199-218).

Δραστηριότητες

- Προβλήματα από το βιβλίο των Cottingham & Greenwood (με υποδείξεις λύσεων στο τέλος του βιβλίου): προβλήματα 5.1, 5.4, 5.5, 5.6., 5.7 (σελ. 93-94).
- Προβλήματα από το βιβλίο του κ. Ελευθεριάδη: προβλήματα κεφαλαίου 6 (σελ. 218).

ΕΝΟΤΗΤΑ 6

Άλφα διάσπαση (“α-διάσπαση”)

Σκοπός

Σκοπός της ενότητας είναι να μάθουν οι φοιτητές ποιοι πυρήνες μπορούν να κάνουν άλφα διάσπαση, πώς πραγματοποιείται αυτή με το γνωστό φαινόμενο σήραγγας που είδαν στην κβαντομηχανική και πώς συνδέεται ο χρόνος ζωής του πυρήνα που κάνει άλφα διάσπαση με τη διαθέσιμη ενέργεια για το εκπεμπόμενο σωματίδιο άλφα.

Προσδοκώμενα Αποτελέσματα

Μετά την ολοκλήρωση της μελέτης αυτής της ενότητας, ο/η φοιτητής/τρια θα είναι σε θέση:

- Να γνωρίζει πώς χρησιμοποιείται ο ημιεμπειρικός τύπος μάζας για τους β-σταθερούς πυρήνες, για να υπολογιστεί το κατώτερο όριο του μαζικού αριθμού A και του ατομικού αριθμού Z που πρέπει να έχει ένας πυρήνας, ώστε να επιτρέπεται ενεργειακά να υποστεί άλφα διάσπαση.
- Να υπολογίζει το Q μιας άλφα διάσπασης με χρήση της διατήρησης ενέργειας και ορμής (μη σχετικιστικά). Να γνωρίζει επίσης ότι για άλφα διάσπαση μεγάλων πυρήνων με μαζικό αριθμό $A \sim 200$, η κινητική ενέργεια του άλφα είναι $\sim 98\%$ του Q , δηλαδή σχεδόν όλο το Q .
- Να γνωρίζει ότι η άλφα διάσπαση μπορεί να θεωρηθεί ως δύο επιμέρους διαδικασίες:
 - σχηματισμός σωματιδίων άλφα μέσα στον πυρήνα, και
 - “απόδραση” κάποιου από αυτά έξω από τον πυρήνα.
- Να γνωρίζει ότι ο ρυθμός σχηματισμού σωματιδίων άλφα μέσα στον πυρήνα είναι πολύ μεγάλος, της τάξης του 10^{23} ανά δευτερόλεπτο, και δεν μεταβάλλεται ιδιαίτερα από πυρήνα σε πυρήνα, καθώς επίσης ότι τα 10^{-23} δευτερόλεπτα είναι χαρακτηριστικός χρόνος για τις ισχυρές αλληλεπιδράσεις.
- Να γνωρίζει ότι για να βγει ένα σωματίδιο άλφα από τον πυρήνα πρέπει να διαπεράσει το φράγμα δυναμικού που έχει μπροστά του με το κβαντομηχανικό φαινόμενο σήραγγας και ότι η πιθανότητα διέλευσης εξαρτάται από την κινητική ενέργεια και το φράγμα δυναμικού (Coulomb).
- Να μπορεί να υπολογίσει το φράγμα Coulomb όταν το σωματίδιο άλφα εκπέμπεται με τροχιακή στροφορμή μηδέν, αλλά όταν αυτή είναι διάφορη του μηδενός.
- Να γνωρίζει ότι η πιθανότητα διέλευσης του σωματιδίου άλφα έξω από το φράγμα είναι τόσο μικρότερη, όσο μεγαλύτερη σήραγγα έχει να διασχίσει μέσα στην “απαγορευμένη περιοχή”, οπότε όσο μεγαλύτερο το Q της άλφα διάσπασης, τόσο μεγαλύτερη είναι η πιθανότητα διέλευσης και τόσο μικρότερος ο χρόνος ζωής του πυρήνα που υπόκειται στην άλφα διάσπαση.
- Να γνωρίζει επίσης ότι η πιθανότητα διέλευσης μειώνεται εκθετικά με το μήκος της σήραγγας. Να γνωρίζει ότι το φράγμα είναι Coulomb και άρα μειώνεται ανάλογα με το $1/r$, όπου r η απόσταση από το κέντρο του πυρήνα, και αυτό σημαίνει ότι μικρές διαφορές στο Q κάνουν μεν σχετικά μικρές διαφορές στο μήκος της σήραγγας, αλλά λόγω του εκθετικού όρου κάνουν μεγάλη διαφορά στην πιθανότητα διέλευσης και κατά συνέπεια και στο χρόνο ζωής.
- Να μπορεί να εξηγήσει γιατί δύο πυρήνες με διαφορετικό ατομικό αριθμό Z , αλλά το ίδιο Q για την άλφα διάσπαση, έχουν διαφορετικούς χρόνους ζωής, γνωρίζοντας ότι ο πυρήνας με μεγαλύτερο Z έχει υψηλότερο φράγμα Coulomb και έτσι η σήραγγα που πρέπει να διασχίσει το σωματίδιο άλφα είναι μεγαλύτερη σε αυτό τον πυρήνα, οπότε η πιθανότητα διέλευσης είναι μικρότερη και ο χρόνος ζωής μεγαλύτερος.

Έννοιες-Κλειδιά

Άλφα διάσπαση, πυρηνικό πηγάδι δυναμικού, φράγμα Coulomb, φαινόμενο σήραγγας, συντελεστής διέλευσης, χρόνος ζωής

Βιβλιογραφία

- Cottingham, W. N., & Greenwood, D. A. (1995/2002). *Εισαγωγή στην Πυρηνική Φυσική* (μτφρ. Κ. Σαρηγιάννης). Αθήνα: εκδόσεις Τυπωθήτω (“Πυρηνική C&G”):
 - Κεφ. 6: παράγραφοι 6.1, 6.2 (σελ. 95-104).
- Χ. Α. Ελευθεριάδης (2014), *Πυρηνική Φυσική – Βασικές Αρχές και Πυρηνοσύνθεση* (Θεσσαλονίκη, εκδόσεις C. C. Publish).
 - Κεφ. 5: παράγραφοι 5.2, 5.3 (σελ. 84-99).
- Τραχανάς, Σ. (2011). *Κβαντομηχανική Ι*. Ηράκλειο: Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης.
 - Κεφ. 6: εδάφιο για τη διάσπαση άλφα ως εφαρμογή του φαινομένου σήραγγας.

Δραστηριότητες

- Προβλήματα από το βιβλίο των Cottingham & Greenwood (με υποδείξεις λύσεων στο τέλος του βιβλίου): προβλήματα 6.1, 6.2 (σελ. 108-109).

ΕΝΟΤΗΤΑ 7

Αποδιέγερση βήτα (“β-διάσπαση”)

Σκοπός

Σκοπός της ενότητας είναι να γνωρίσουν οι φοιτητές το μηχανισμό και τα διάφορα είδη της β-διάσπασης, τις ενεργειακές συνθήκες και το ρόλο της στροφορμής για την πραγματοποίησή τους, καθώς και το ενεργειακό φάσμα των εκπεμπόμενων σωματιδίων β.

Προσδοκώμενα Αποτελέσματα

Μετά την ολοκλήρωση της μελέτης αυτής της ενότητας, ο/η φοιτητής/-τρια θα είναι σε θέση:

- Να γνωρίζει ότι ένας πυρήνας μπορεί να μετατραπεί σε έναν άλλο, με ένα πρωτόνιο περισσότερο ή ένα λιγότερο, με μια διαδικασία που την ονομάζουμε “βήτα διάσπαση”, καθώς επίσης και τα διάφορα είδη β-διάσπασης: β-, β+ και “ηλεκτρονική σύλληψη”. Να γνωρίζει ακόμη ότι η β-διάσπαση οφείλεται στην ασθενή αλληλεπίδραση.
- Να μπορεί να υπολογίζει τις ενεργειακές συνθήκες για την πραγματοποίηση κάθε είδους, ξεκινώντας από τη βασική απαίτηση ότι για να επιτρέπεται ενεργειακά μια διάσπαση πρέπει το Q να είναι θετικό. Να γνωρίζει έτσι ότι, αν $\Delta M = M_{\text{μητρικού}} - M_{\text{θυγατρικού}}$ είναι η διαφορά των ατομικών μαζών μεταξύ του μητρικού και του θυγατρικού πυρήνα, το Q των διαφόρων διασπάσεων είναι:
 - $Q = \Delta M$ για β- και ηλεκτρονική σύλληψη
 - $Q = \Delta M - 2 m_e c^2$ για β+
- Να γνωρίζει ότι, αν επιτρέπεται ενεργειακά και η β+ και η ηλεκτρονική σύλληψη, τότε μπορεί να συμβούν και οι δύο, με κάποια πιθανότητα καθεμιά, και υπό αυτή την έννοια η β+ και η ηλεκτρονική σύλληψη είναι ανταγωνιστικές διαδικασίες για τη μετατροπή ενός πρωτονίου σε νετρόνιο μέσα στον πυρήνα.
- Να γνωρίζει ότι επειδή στη β- και β+ έχουμε τρία σώματα στην τελική κατάσταση, η διατήρηση ενέργειας και ορμής δεν προσδιορίζει απόλυτα τις κινητικές ενέργειες των προϊόντων (όπως γίνεται, π.χ., στην άλφα διάσπαση όπου υπάρχουν μόνο δύο προϊόντα), αλλά η κινητική ενέργεια του εκπεμπόμενου ηλεκτρονίου ή ποζιτρονίου, αντίστοιχα, μπορεί να πάρει τιμές από μηδέν έως όλο το Q. Να γνωρίζει επίσης ότι η μέση τιμή της κινητικής ενέργειας του εκπεμπόμενου ηλεκτρονίου ή ποζιτρονίου είναι περίπου ίση με Q/3 (δες δραστηριότητα).
- Να γνωρίζει ότι η “σταθερά διάσπασης” λ (που είναι “ο ρυθμός μεταπτώσεων”, δηλ. η πιθανότητα διάσπασης ανά μονάδα χρόνου) υπολογίζεται από το χρυσό κανόνα του Fermi, σύμφωνα με τον οποίο η σταθερά διάσπασης είναι ανάλογη της ενεργειακής πυκνότητας των τελικών καταστάσεων, και ανάλογη του τετραγώνου του μέτρου του “στοιχείου πίνακα” που συνδέει την αρχική και την τελική κατάσταση.
- Να γνωρίζει ότι ο Fermi ήταν ο πρώτος που υπολόγισε τη σταθερά διάσπασης για τις διασπάσεις β, θεωρώντας ότι η ασθενής αλληλεπίδραση έχει πολύ μικρή εμβέλεια και θέτοντας τον τελεστή της ασθενούς αλληλεπίδρασης ως μια σταθερά (η οποία ονομάστηκε προς τιμήν του σταθερά Fermi, G_F) η οποία αποτελεί ένα μέτρο της ισχύος της ασθενούς αλληλεπίδρασης. Η σταθερά διάσπασης είναι τότε ανάλογη του τετραγώνου του μέτρου του στοιχείου πίνακα που συνδέει τις κυματοσυναρτήσεις του μητρικού και του θυγατρικού πυρήνα και μιας συνάρτησης που περιγράφει τόσο την κινηματική του ηλεκτρονίου (ή του ποζιτρονίου, ανάλογα αν η διάσπαση είναι β- ή β+ , αντίστοιχα) όσο και την αλληλεπίδραση μεταξύ του ηλεκτρονίου (ή ποζιτρονίου) και

του πεδίου Coulomb του θυγατρικού πυρήνα. Να γνωρίζει, τέλος, ότι ο υπολογισμός αυτός εξηγεί ικανοποιητικά το ενεργειακό φάσμα των εκπεμπόμενων ηλεκτρονίων και ποζιτρονίων στις β^- και β^+ διασπάσεις, αντίστοιχα.

- Να γνωρίζει ότι οι αποδιεγέρσεις β κατηγοριοποιούνται σε επιτρεπτές και απαγορευμένες. “Επιτρεπτές” σημαίνει ότι έχουν πολύ μεγαλύτερη πιθανότητα να συμβούν, σε σχέση με άλλες που είναι πιο σπάνιες και λέγονται “απαγορευμένες”. Όσο μεγαλύτερου βαθμού “απαγόρευση” έχει μια διάσπαση, τόσο πιο σπάνιο είναι να πραγματοποιηθεί.
- Να γνωρίζει ότι η διατήρηση του ολικού σπιν πριν και μετά τη διάσπαση οδηγεί σε κάποιους κανόνες επιλογής, οι οποίοι παίρνουν υπ’ όψιν τους τόσο τα σπιν και παράρτη του μητρικού και του θυγατρικού πυρήνα (J_i^π και J_f^π , αντίστοιχα), όσο και τη συνολική τροχιακή στροφορμή (L_{ev}) και τη συνολική ιδιοστροφορμή (S_{ev}) του συστήματος “ηλεκτρονίου-αντινετρίνο” (για τις β^-) ή του συστήματος “ποζιτρονίου-νετρίνο” (για τις β^+).
- Να μπορεί, γνωρίζοντας τα σπιν και παράρτη του μητρικού και του θυγατρικού πυρήνα, να κατατάξει μια β -διάσπαση σε επιτρεπτή Fermi ($L_{ev}=0$ και $S_{ev}=0$), επιτρεπτή Gamow-Teller ($L_{ev}=0$ και $S_{ev}=1$), επιτρεπτή μεικτή (δηλ., που μπορεί να πραγματοποιηθεί και με τύπου Fermi και με τύπου Gamow-Teller), ή απαγορευμένη (όπου το απαραίτητο L_{ev} είναι διάφορο του μηδενός). Να μπορεί δε να προσδιορίσει την τάξη απαγόρευσης (π.χ. β -διάσπαση που πραγματοποιείται με ελάχιστη τιμή για το L_{ev} ίση με 2, ονομάζεται “απαγορευμένη 2ης τάξης”).

Έννοιες-Κλειδιά

β -διάσπαση, ενεργειακό φάσμα σωματιδίων β , χρυσός κανόνας Fermi, σταθερά διάσπασης, σταθερά Fermi, ηλεκτρονική σύλληψη, ενεργειακές συνθήκες, κανόνες επιλογής, παραβίαση παράρτη, επιτρεπτές και απαγορευμένες διασπάσεις, επιτρεπτή Fermi, επιτρεπτή Gamow-Teller, τάξη απαγόρευσης

Βιβλιογραφία

- Cottingham, W. N., & Greenwood, D. A. (1995/2002). *Εισαγωγή στην Πυρηνική Φυσική* (μτφρ. Κ. Σαρηγιάννης). Αθήνα: εκδόσεις Τυπωθήτω (“Πυρηνική C&G”):
 - Κεφ. 2: παράγραφος 2.5 (σελ. 33).
 - Κεφ. 4: παράγραφος 4.6 (σελ. 64-68).
 - Κεφ. 12: παράγραφοι 12.1 - 12.6 (σελ. 180-195).
- X. A. Ελευθεριάδης (2014), *Πυρηνική Φυσική – Βασικές Αρχές και Πυρηνοσύνθεση* (Θεσσαλονίκη, εκδόσεις C. C. Publish).
 - Κεφ. 5: παράγραφος 5.4 (σελ. 99-142).

Δραστηριότητες

- Εάν η ενέργεια της ακτινοβολίας β είναι πολύ μικρότερη της ενέργειας ηρεμίας, $m_e c^2$, του ηλεκτρονίου, όπου m_e είναι η μάζα του ηλεκτρονίου, δείξτε ότι η μέση τιμή της κινητικής ενέργειας, T_e , του εκπεμπόμενου ηλεκτρονίου είναι ίση με $Q/3$, όπου Q η εκλυόμενη ενέργεια. Δείτε στο σχήμα 12.1 (σελ. 181) του βιβλίου των Cottingham & Greenwood ότι το αποτέλεσμα αυτό συμφωνεί με το πείραμα.

Υπόδειξη: για το φάσμα της ακτινοβολίας β , θεωρήστε ότι η πιθανότητα ένα σωματίδιο β να έχει ενέργεια μεταξύ E_e και $E_e + dE_e$ δίνεται από τον τύπο 12.5 και 12.6 (σελ. 186-187)

στο βιβλίο των Cottingham & Greenwood. Επίσης θεωρήστε ότι η μάζα του νετρίνο είναι μηδέν και ότι $F(Z, E_e) = 1$, όπου $E_e = T_e + m_e c^2$

ΕΝΟΤΗΤΑ 8

Διεγερμένες καταστάσεις του πυρήνα και αποδιέγερση γάμμα (“γ-διάσπαση”)

Σκοπός

Σκοπός της ενότητας είναι να μάθουν οι φοιτητές ότι ένας πυρήνας έχει διεγερμένες καταστάσεις, ότι μπορεί να αποδιεγερθεί εκπέμποντας έναν ελαφρύ πυρήνα, καθώς και με αποδιέγερση γάμμα όπου εκπέμπει ακτινοβολία κατά την αποδιέγερσή του από μια ενεργειακή στάθμη σε μία κατώτερη ενεργειακά στάθμη. Θα γνωρίσουν επίσης το ρόλο της στροφορμής για την πραγματοποίηση της γάμμα διάσπασης καθώς και το φαινόμενο της εσωτερικής μετατροπής.

Προσδοκώμενα Αποτελέσματα

Μετά την ολοκλήρωση της μελέτης αυτής της ενότητας, ο/η φοιτητής/-τρια θα είναι σε θέση:

- Να γνωρίζει ότι οι πυρήνες έχουν διεγερμένες καταστάσεις και μάλιστα όσο βαρύτερος είναι ο πυρήνας, τόσο περισσότερες διεγερμένες καταστάσεις έχει, ενώ η πυκνότητα των διεγερμένων καταστάσεων μεγαλώνει με το μέγεθος του πυρήνα.
- Να γνωρίζει ότι οι διεγερμένες καταστάσεις των πυρήνων δεν είναι σταθερές και ότι οι ενέργειές τους είναι της τάξης των MeV (δηλ., πολύ μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες ενέργειες των διεγερμένων καταστάσεων των ατόμων).
- Να γνωρίζει ότι ένας διεγερμένος πυρήνας σε κατάλληλη στάθμη μπορεί να διασπαστεί εκπέμποντας έναν ελαφρύ πυρήνα.
- Να γνωρίζει ότι διεγερμένες καταστάσεις με ενέργεια κάτω από το χαμηλότερο κατώφλι για διάσπαση σε ελαφρύτερους πυρήνες, αποδιεγείρονται ηλεκτρομαγνητικά, είτε με “αποδιέγερση γάμμα”, δηλ. με απευθείας εκπομπή φωτονίου είτε με εκπομπή ηλεκτρονίου “εσωτερικής μετατροπής”.
- Να γνωρίζει ότι τα φωτόνια της αποδιέγερσης γάμμα έχουν ενέργεια όση η διαφορά των ενεργειακών σταθμών του πυρήνα, ενώ τα ηλεκτρόνια εσωτερικής μετατροπής εκπέμπονται με ενέργεια όση η ενέργεια αποδιέγερσης του πυρήνα μείον την ενέργεια σύνδεσής τους στο άτομο.
- Να γνωρίζει ότι τόσο η στροφορμή όσο και η ομοτιμία διατηρούνται στις ηλεκτρομαγνητικές μεταπτώσεις και ότι η ομοτιμία του εκπεμπόμενου φωτονίου είναι θετική αν η αρχική και τελική κατάσταση του πυρήνα έχουν ίδια ομοτιμία, ενώ είναι αρνητική αν έχουν αντίθετες ομοτιμίες.
- Να γνωρίζει ότι η ηλεκτρομαγνητική αυτή ακτινοβολία (γάμμα) μπορεί να είναι δύο τύπων: είτε “ηλεκτρική” όταν ο πυρήνας συζευγνύεται κυρίως με το ηλεκτρικό πεδίο του φωτονίου, είτε “μαγνητική” όταν ο πυρήνας συζευγνύεται με το μαγνητικό πεδίο του φωτονίου. Επίσης, ότι αν j είναι η στροφορμή του φωτονίου, η ομοτιμία του είναι $(-1)^j$ όταν η αποδιέγερση είναι “ηλεκτρική” και $-(-1)^j$ όταν η αποδιέγερση είναι “μαγνητική”.
- Να μπορεί, γνωρίζοντας τα σπιν και πάριτη της αρχικής και τελικής κατάστασης του πυρήνα, να προσδιορίσει τις πιθανές τιμές της στροφορμής, j , του εκπεμπόμενου φωτονίου, καθώς και τον τύπο της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας, ως E_j ή M_j , και να την ονοματίζει ως 2^j πολική (π.χ, αν $j=1$, τότε $2^1 = 2$ και ονομάζεται 2-πολική = διπολική, αν $j=2$, τότε $2^2 = 4$, και ονομάζεται 4-πολική = τετραπολική, αν $j=3$, τότε $2^3 = 8$, και λέγεται 8-πολική = οκταπολική, κ.ο.κ).

- Να γνωρίζει ότι η τιμή $j=0$ δεν επιτρέπεται για τις γάμμα διασπάσεις αφού το φωτόνιο έχει σπιν 1, οπότε η εκπομπή ακτινοβολίας $E0$ δεν γίνεται με εκπομπή φωτονίου. Η δε εκπομπή $M0$ δεν υπάρχει έτσι κι αλλιώς γιατί δεν υπάρχουν μαγνητικά μονόπολα (ενώ φυσικά υπάρχουν ηλεκτρικά μονόπολα, που είναι τα απλά μοναχικά φορτία, π.χ., ένα ηλεκτρόνιο).
- Να γνωρίζει ότι η εσωτερική μετατροπή γενικά συναγωνίζεται την αποδιέγερση του πυρήνα με εκπομπή φωτονίου. Να γνωρίζει όμως ότι οι αποδιεγέρσεις ενός πυρήνα από στάθμη με σπιν 0 σε στάθμη με σπιν 0 ($0 \rightarrow 0$) δεν μπορούν να γίνουν με απευθείας εκπομπή φωτονίου, γιατί δεν θα μπορεί να διατηρηθεί το σπιν (αφού το φωτόνιο έχει σπιν 1). Να γνωρίζει ότι τότε, μόνος τρόπος αποδιέγερσης είναι η εσωτερική μετατροπή.
- Να γνωρίζει ότι για κάθε τρόπο (ή κανάλι) διάσπασης/αποδιέγερσης/αποσύνθεσης, i , υπάρχει ένας επιμέρους (μερικός) ρυθμός αποσύνθεσης $1/\tau_i$, και ο ολικός ρυθμός αποσύνθεσης $1/\tau$ είναι το άθροισμα των επιμέρους ρυθμών αποσύνθεσης: $1/\tau = \sum 1/\tau_i$, όπου τ είναι ο μέσος χρόνος ζωής της αρχικής κατάστασης.
- Να γνωρίζει ότι το επιμέρους “πλάτος” του καναλιού i , ορίζεται σαν $\Gamma_i = \hbar / \tau_i$, και το ολικό πλάτος, $\Gamma = \hbar / \tau$, είναι το άθροισμα των επιμέρους πλατών. Να γνωρίζουν δε ότι τα πλάτη Γ_i και Γ έχουν διαστάσεις ενέργειας.

Έννοιες-κλειδιά

Διεγερμένες καταστάσεις, διάσπαση σε ελαφρύτερους πυρήνες, αποδιέγερση γάμμα, εσωτερική μετατροπή, κανόνες επιλογής, ηλεκτρικά και μαγνητικά πολύπολα, κανάλι αποσύνθεσης, επιμέρους ρυθμοί αποσύνθεσης και επιμέρους πλάτη.

Βιβλιογραφία

- Cottingham, W. N., & Greenwood, D. A. (1995/2002). *Εισαγωγή στην Πυρηνική Φυσική* (μτφρ. Κ. Σαρηγιάννης). Αθήνα: εκδόσεις Τυπωθήτω (“Πυρηνική C&G”):
 - Κεφ. 7: όλο, κυρίως όμως οι παράγραφοι 7.2-7.4 (σελ. 110-122).
 - Κεφ. 12: παράγραφοι 12.9 και 12.10 (σελ 199-204) για ανάγνωση.
- Χ. Α. Ελευθεριάδης (2014), *Πυρηνική Φυσική – Βασικές Αρχές και Πυρηνοσύνθεση* (Θεσσαλονίκη, εκδόσεις C. C. Publish).
 - Κεφ. 5: παράγραφος 5.5 (σελ. 142-167).

Δραστηριότητες

- Προβλήματα από το βιβλίο των Cottingham & Greenwood (με υποδείξεις λύσεων στο τέλος του βιβλίου): προβλήματα 7.3 (α και β), 7.4, 7.5, 7.6, 7.7 (σελ. 123).

ΕΝΟΤΗΤΑ 9

Σχάση και σύντηξη

Σκοπός

Σκοπός της ενότητας είναι να μάθουν οι φοιτητές ότι ένας μεγάλος πυρήνας μπορεί να υποστεί αυθόρμητη ή επαγόμενη σχάση και να δουν πώς η επαγόμενη σχάση χρησιμοποιείται σε πυρηνικούς αντιδραστήρες για την παραγωγή ενέργειας. Επίσης, θα γνωρίσουν τη διαδικασία της σύντηξης ελαφρών πυρήνων και την παραγωγή ενέργειας στον Ήλιο, καθώς και την αρχή των αντιδραστήρων σύντηξης για την παραγωγή ενέργειας.

Προσδοκώμενα Αποτελέσματα

Μετά την ολοκλήρωση της μελέτης αυτής της ενότητας, ο/η φοιτητής/-τρια θα είναι σε θέση:

- Να γνωρίζει ότι το μέγιστο της ενέργεια σύνδεσης ανά νουκλεόνιο (B/A) συναρτήσει του μαζικού αριθμού A εμφανίζεται για το σίδηρο ($Z=28$, $A=56$) και ότι η σταδιακή μείωση του λόγου B/A προς τις μεγαλύτερες τιμές του A συνεπάγεται ότι η σχάση βαρέων πυρήνων οδηγεί σε έκλυση μεγάλων ποσών ενέργειας. Να γνωρίζει δε ότι η αντίστοιχη μείωση του λόγου B/A από το $A=56$ προς τις μικρότερες τιμές του A συνεπάγεται ότι η σύντηξη ελαφρών πυρήνων οδηγεί επίσης σε έκλυση μεγάλων ποσών ενέργειας.
- Να υπολογίζει την ενέργεια που εκλύεται σε μια αυθόρμητη σχάση με χρήση του ημιεμπειρικού τύπου μάζας (πρότυπο υγρής σταγόνας) και να εξηγεί γιατί η αυθόρμητη σχάση γίνεται μόνο για αρκετά βαρείς πυρήνες.
- Να γνωρίζει ότι η σχάση ενός βαρέος πυρήνα μπορεί να προκληθεί και με την απορρόφηση νετρονίου, καθώς επίσης ότι τα χαμηλής ενέργειας νετρόνια προκαλούν σχετικά εύκολα σχάση στο ^{235}U , ενώ δεν προκαλούν σχάση στο, άφθονο στη φύση, ^{238}U .
- Να γνωρίζει ότι η πιθανότητα ένα νετρόνιο να αλληλεπιδράσει με οποιονδήποτε τρόπο με έναν πυρήνα είναι ανάλογη της ολικής ενεργού διατομής της αλληλεπίδρασης, ενώ η πιθανότητα να προκαλέσει σχάση του πυρήνα είναι μικρότερη και αντιστοιχεί σε ένα κλάσμα της ολικής ενεργού διατομής, οπότε είναι μια “επιμέρους” ενεργός διατομή και ονομάζεται “ενεργός διατομή σχάσης”. Να γνωρίζει επίσης ότι ο λόγος της πιθανότητας σχάσης προς την πιθανότητα οποιασδήποτε αλληλεπίδρασης είναι απλά ο λόγος της ενεργού διατομής σχάσης προς την ολική ενεργό διατομή.
- Να γνωρίζει ότι κατά την πυρηνική σχάση, εκτός από τα θραύσματα της σχάσης, δηλαδή τους δύο βαρείς πυρήνες στους οποίους διαχωρίζεται το αρχικό σύστημα, παράγονται και νετρόνια, τα οποία, αλληλεπιδρώντας εν συνεχεία με άλλους πυρήνες στο υλικό που τα περιβάλλει, μπορούν να προκαλέσουν μια αλυσιδωτή αντίδραση σχάσεων.
- Να γνωρίζει ότι, ανάλογα με την ποσότητα του σχάσιμου υλικού, η αλυσιδωτή αντίδραση μπορεί να σβήνει με το χρόνο (οπότε ονομάζεται *υποκρίσιμη*), να συντηρείται σε σταθερό ρυθμό (οπότε ονομάζεται *κρίσιμη*) ή να αυξάνει με το χρόνο (οπότε λέγεται *υπερκρίσιμη*).
- Να γνωρίζει ότι οι πυρηνικοί αντιδραστήρες είναι διατάξεις στις οποίες η αλυσιδωτή αντίδραση ελέγχεται ώστε να παραμένει κρίσιμη με αποτέλεσμα την παραγωγή ενέργειας.

- Να γνωρίζει ότι οι κύριες αντιδράσεις που τροφοδοτούν ενεργειακά τον Ήλιο είναι αντιδράσεις σύντηξης που ξεκινούν με τη σύντηξη δύο πρωτονίων σε πυρήνα δευτερίου, με αποτέλεσμα δύο άτομα υδρογόνου να μετατρέπονται σε ένα άτομο δευτερίου με ταυτόχρονη εκπομπή ποζιτρονίου και νετρίνο. Να γνωρίζουν επίσης ότι αυτή είναι η πρώτη από την αλυσίδα αντιδράσεων “PPI” όπου υδρογόνο μετατρέπεται σε ήλιο.
- Να γνωρίζει ότι η αντίδραση σύντηξης p-p περιλαμβάνει την ασθενή αλληλεπίδραση και άρα έχει μικρή ενεργό διατομή για την πραγματοποίησή της, οπότε είναι άχρηστη για την παραγωγή ενέργειας από σύντηξη στη Γη, σε αντίθεση με τον Ήλιο όπου η ποσότητα υδρογόνου και οι συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας είναι πολύ μεγαλύτερες.
- Να γνωρίζει ότι στις προσπάθειες σύντηξης στη Γη χρησιμοποιούνται ισότοπα του υδρογόνου (δευτέριο και τρίτιο) σε υψηλή θερμοκρασία (αντίστοιχη των 20 keV), οπότε τα σύγχρονα ερευνητικά προγράμματα χρησιμοποιούν παλμικές συσκευές που θερμαίνουν το προς σύντηξη υλικό και το φέρνουν σε κατάσταση πλάσματος για μικρά χρονικά διαστήματα. Να γνωρίζει δε ότι για να είναι χρήσιμη η σύντηξη για την παραγωγή ενέργειας, πρέπει η ενέργεια που εκλύεται από συντήξεις να είναι μεγαλύτερη από την εισροή ενέργειας που χρειάζεται για να συμπιέσει και να θερμάνει το προς σύντηξη υλικό.

Έννοιες-Κλειδιά

Αυθόρμητη σχάση, φράγμα Coulomb, σύλληψη νετρονίου, επαγόμενη σχάση, διαδικασία σχάσης, μέσος αριθμός παραγόμενων νετρονίων ανά σχάση, αλυσιδωτή αντίδραση, ενεργός διατομή σχάσης, ολική και επιμέρους ενεργός διατομή, πυρηνικός αντιδραστήρας, πυρηνικό καύσιμο, έλεγχος αντιδραστήρα, κρίσιμη, υποκρίσιμη και υπερκρίσιμη αλυσιδωτή αντίδραση, σύντηξη, ηλιακές πυρηνικές αντιδράσεις, νετρίνο, αντιδραστήρες σύντηξης, παραγωγή ενέργειας.

Βιβλιογραφία

- Cottingham, W. N., & Greenwood, D. A. (1995/2002). *Εισαγωγή στην Πυρηνική Φυσική* (μτφρ. Κ. Σαρηγιάννης). Αθήνα: εκδόσεις Τυπωθήτω (“Πυρηνική C&G”):
 - Κεφ. 6: παράγραφος 6.3 (σελ. 104-108).
 - Κεφ. 9: παράγραφοι 9.1 – 9.7 (σελ. 137-150).
 - Κεφ. 10: παράγραφοι 10.1 (σελ. 154-156), και 10.4 -10.5 (σελ. 163-168).
- Χ. Α. Ελευθεριάδης (2014), *Πυρηνική Φυσική – Βασικές Αρχές και Πυρηνοσύνθεση* (Θεσσαλονίκη, εκδόσεις C. C. Publish).
 - Κεφ. 5: παράγραφος 5.6 (σελ. 167-189).

Δραστηριότητες

- Με χρήση του σχήματος 9.1 (σελ. 139) στο βιβλίο των Cottingham & Greenwood επιβεβαιώστε τα γραφόμενα στο κείμενο (σελ. 138 και 142) ότι το ποσοστό σχάσης (ή αλλιώς η πιθανότητα σχάσης) ενός πυρήνα ^{235}U είναι περίπου 84% για νετρόνια ενέργειας 0.1 eV, ενώ είναι περίπου 18% για νετρόνια ενέργειας 2 MeV.
- Προβλήματα από το βιβλίο των Cottingham & Greenwood (με υποδείξεις λύσεων στο τέλος του βιβλίου): προβλήματα 6.3 (σελ. 109), 9.1, 9.2, 9.3, 9.5 (σελ. 151), 10.1, 10.2, 10.3 (σελ. 169).
- Προβλήματα από το βιβλίο του κ. Ελευθεριάδη: πρόβλημα 4, κεφ. 5 (σελ. 189).

ΕΝΟΤΗΤΑ 10

Φυσική ακτινοβολία – Ραδιοχρονολόγηση – Μονάδες ραδιενέργειας και βιολογικές επιπτώσεις

Σκοπός

Σκοπός της ενότητας είναι να γνωρίσουν οι φοιτητές τις ραδιενεργές σειρές και να δουν ότι υπάρχουν πυρήνες που διασπώνται αυθόρμητα αλλά ζουν αρκετά ώστε να χρησιμεύουν στη χρονολόγηση διαφόρων υλικών και σε άλλες εφαρμογές. Θα γνωρίσουν επίσης διάφορες πηγές ακτινοβολίας σε συνδυασμό με τις επιπτώσεις που έχουν στην υγεία, καθώς και τα μεγέθη που χρησιμοποιούνται στο χαρακτηρισμό των επιπέδων ακτινοβολίας.

Προσδοκώμενα Αποτελέσματα

Μετά την ολοκλήρωση της μελέτης αυτής της ενότητας, ο/η φοιτητής/-τρια θα είναι σε θέση:

- Να γνωρίζει ότι ένας τρόπος σχηματισμού στοιχείων βαρύτερων από το σίδηρο είναι η σύλληψη νετρονίου, που σε περιβάλλοντα με αφθονία ελεύθερων νετρονίων (π.χ. σε αστέρες νετρονίων) οδηγεί στο σχηματισμό πυρήνων πλούσιων σε νετρόνια, οι οποίοι εν συνεχεία μπορεί με β-διάσπαση να σχηματίσουν πυρήνες με διαφορετικό ατομικό αριθμό.
- Να γνωρίζει ότι το βαρύτερο σταθερό πυρηνικό σύστημα είναι ο μόλυβδος-208 ($^{208}_{82}\text{Pb}$) και ότι τα στοιχεία με $Z > 82$ διασπώνται αυθόρμητα με διαδοχικές διασπάσεις άλφα ή βήτα μέχρι να καταλήξουν σε σταθερούς πυρήνες με $Z \leq 82$. Να γνωρίζει επίσης ότι τα ραδιενεργά ισότοπα με $Z > 82$ κατατάσσονται σε τέσσερις διακριτές κατηγορίες, που ονομάζονται “ραδιενεργές σειρές”, καθεμία από τις οποίες αντιπροσωπεύει τη σταδιακή αποδιέγερση του μακροβιότερου πυρήνα της σειράς ($^{232}_{90}\text{Th}$, $^{237}_{93}\text{Np}$, $^{238}_{92}\text{U}$ και του $^{235}_{92}\text{U}$) και ονομάζονται “σειρά του Θορίου”, “σειρά του Ποσειδωνίου”, “σειρά του Ουρανίου” και “σειρά του Ακτινίου” (το Ακτίνιο είναι μέλος της σειράς του $^{235}_{92}\text{U}$ και δίνει το όνομά του στη σειρά αυτή ώστε να ξεχωρίζει από τη σειρά του Ουρανίου που αντιστοιχεί στο $^{238}_{92}\text{U}$).
- Να μπορεί να υπολογίζει την ηλικία του δείγματος (“ραδιοχρονολόγηση”) χρησιμοποιώντας την ενεργότητα του υλικού, τη σχετική αφθονία των ραδιενεργών στοιχείων σε αυτό και το ραδιενεργό νόμο διάσπασης. Να γνωρίζει επίσης ότι υπάρχουν και άλλες χρήσιμες εφαρμογές της ραδιενέργειας, π.χ. στην ιατρική διάγνωση και θεραπευτική.
- Να μην ξεχνά ότι τα όρια της χρονολόγησης με κάποιο ραδιενεργό στοιχείο εξαρτώνται από το χρόνο ζωής του στοιχείου και έτσι, π.χ., ο ^{14}C χρησιμοποιείται για τη χρονολόγηση αντικειμένων στην “ιστορική περίοδο” (χιλιάδες χρόνια), ενώ η σχετική αφθονία ουρανίου και μόλυβδου χρησιμοποιούνται για τη χρονολόγηση πετρωμάτων στην κλίμακα της ηλικίας της Γης (δισεκατομμύρια χρόνια).
- Να γνωρίζει ότι υπάρχουν τρεις κύριες φυσικές πηγές ιονίζουσας ακτινοβολίας: οι κοσμικές ακτίνες, οι ραδιενεργοί πυρήνες που συμμετέχουν στη χημεία του σώματος, και τα ραδιενεργά υλικά που υπάρχουν στα πετρώματα, τον αέρα και το έδαφος. Να γνωρίζει δε ότι λόγω των επιπτώσεων της ακτινοβολίας στην υγεία, έχουν θεσμοθετηθεί ανώτατα όρια ασφαλείας ως προς την έκθεση σε ακτινοβολία.
- Να γνωρίζει τις έννοιες και τις μονάδες για τα μεγέθη: “ενεργότητα”, “απορροφηθείσα δόση ακτινοβολίας”, “παράγοντες σχετικής βιολογικής δράσης (RBE factors)” και “ισοδύναμη δόση”:

- ο η “ενεργότητα” ορίζει το μέσο αριθμό διασπάσεων ανά μονάδα χρόνου και μετράται σε becquerels (1 Bq = 1 διάσπαση ανά δευτερόλεπτο) ή rad (1 rad = 3.7 x 10¹⁰ Bq),
- ο η “απορροφηθείσα δόση ακτινοβολίας” σε κάποιο σημείο ενός υλικού είναι η ενέργεια ανά μονάδα όγκου που έχει απορροφηθεί από το υλικό, διαιρεμένη με την πυκνότητα του υλικού στο σημείο αυτό, και μετράται σε gray (1 Gy = 1 joule απορροφηθείσας δόσης ανά kg υλικού),
- ο οι “παράγοντες σχετικής βιολογικής δράσης” (RBE factors) είναι αδιάστατοι αριθμοί οι οποίοι περιγράφουν τη σχετική βλάβη που μπορεί να προκαλέσει η ακτινοβολία σε ένα ζωντανό ιστό, ανάλογα με την ενέργεια και τον τύπο των σωματιδίων της ακτινοβολίας (α, β, γ, νετρόνια, πρωτόνια),
- ο η “ισοδύναμη δόση” είναι μια μονάδα που συνδυάζει τον παράγοντα RGE με την απορροφηθείσα δόση σε Gy και δηλώνεται σε μονάδες sievert (Sv), για να είναι εμφανές ότι αναφέρεται σε ισοδύναμη και όχι σε απορροφηθείσα δόση ακτινοβολίας.

Έννοιες-Κλειδιά

Σύλληψη νετρονίου, παραγωγή βαρέων στοιχείων, ραδιενεργές σειρές, ραδιοχρονολόγηση, ενεργότητα, απορροφηθείσα δόση ακτινοβολίας, παράγοντες σχετικής βιολογικής δράσης (RBE factors), ισοδύναμη δόση, επίπεδα ακτινοβολίας, όρια έκθεσης σε ακτινοβολία.

Βιβλιογραφία

- Cottingham, W. N., & Greenwood, D. A. (1995/2002). *Εισαγωγή στην Πυρηνική Φυσική* (μτφρ. Κ. Σαρηγιάννης). Αθήνα: εκδόσεις Τυπωθήτω (“Πυρηνική C&G”):
 - ο Κεφ. 9: παράγραφος 9.8 (σελ 150-151).
 - ο Κεφ. 11: παράγραφος 11.1 (σελ. 170-174) για ανάγνωση, 11.4 (σελ 176-177).
 - ο Παράρτημα Ε (σελ. 248-251).
- Χ. Α. Ελευθεριάδης (2014), *Πυρηνική Φυσική – Βασικές Αρχές και Πυρηνοσύνθεση* (Θεσσαλονίκη, εκδόσεις C. C. Publish).
 - ο Κεφ. 5: παράγραφος 5.2 (σελ. 84-86)
 - ο Κεφ. 9: παράγραφοι 9.1-9.9 (σελ. 167-189), 9.22,9.23 (σελ. 290-298).

Δραστηριότητες

- Προβλήματα από το βιβλίο των Cottingham & Greenwood (με υποδείξεις λύσεων στο τέλος του βιβλίου): προβλήματα 6.4 (σελ. 109), 11.4 (σελ. 178), Ε.1, Ε.2, Ε.4 (σελ. 252).
- Προβλήματα από το βιβλίο του κ. Ελευθεριάδη: προβλήματα 1, 2 κεφαλαίου 9 (σελ. 300).