

ΣΕΙΡΑ ΑΣΚΗΣΕΩΝ ΠΥΡΗΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΣΩΜΑΤΙΔΙΑΚΗΣ ΦΥΣΙΚΗΣ

Να μελετήσετε τις λύσεις των ασκήσεων Πυρηνικής, και

ΝΑ ΛΥΣΕΤΕ ΤΙΣ ΑΣΚΗΣΕΙΣ 10, 11, 12, 13 και 14, που αναφέρονται σε Σωματιδιακή Φυσική.

Διδάσκων: Θεόδωρος Ν. Τομαράς

1. Η θεωρία των μαγνητικών μονοπόλων προβλέπει ότι αυτά αντιδρούν με πρωτόνια και δίνουν



με ενεργό διατομή $\sigma \simeq 0.01 \text{ barn}$. Το παραγόμενο πόνιο διασπάται σε δύο φωτόνια, ενώ το ποζιτρόνιο αντιδρά με κάποιο ηλεκτρόνιο της ύλης και δίνει επίσης δύο φωτόνια σχεδόν ταυτόχρονα με τα άλλα. Οπότε, από κάθε αντίδραση του μονοπόλου προκύπτουν τέσσερα φωτόνια. Επίσης, τα μονόπολα έχουν πολύ μεγάλη μάζα ($m \sim 10^{16} \text{ GeV}/c^2$), με συνέπεια να επηρεάζονται ελάχιστα από τις κρούσεις με τους πυρήνες και να κινούνται σε ευθεία γραμμή.

Ενα τέτοιο μονόπολο πέφτει με ταχύτητα $v \sim 10^{-5}c$ στην επιφάνεια μιας λίμνης. Θα δούμε φωτόνια να εκπέμπονται ανά διαστήματα. (α) Εκτιμήστε την μέση απόσταση ανάμεσα σε δύο τέτοια γεγονότα. (β) Κάθε πόση ώρα θα συμβαίνει ένα τέτοιο γεγονός;

Λύση: (α) Η μέση απόσταση ανάμεσα σε δύο αντιδράσεις είναι η μέση ελεύθερη διαδρομή του μονοπόλου $l = 1/n_{proton}\sigma$ στο νερό. Η πυκνότητα πρωτονίων στο νερό υπολογίζεται από το γεγονός ότι 18 γραμμάρια νερού, που είναι 18 cm^3 , περιέχουν N_A μόρια, και επομένως $10N_A$ πρωτόνια. Άρα,

$$n_{proton} = \frac{10N_A}{18 \text{ cm}^3} \quad (2)$$

$$l = \frac{1}{n\sigma} \simeq \frac{18 \text{ cm}^3}{10 \times 6 \times 10^{23} \times 10^{-2} \times 10^{-24} \text{ cm}^2} \simeq 3 \text{ m} \quad (3)$$

(β) Η χρονική απόσταση δύο τέτοιων γεγονότων θα είναι

$$\Delta t = l/v \simeq \frac{3 \text{ m}}{10^{-5} \times 3 \times 10^8 \text{ m/sec}} \simeq 1 \text{ msec} \quad (4)$$

2. Θεωρητικός φυσικός ισχυρίζεται ότι τα πρωτόνια δεν είναι ευσταθή, αλλά διασπώνται με μέσο χρόνο ζωής $\tau = 1/\lambda = 10^{33}$ έτη. (α) Πόσα πρωτόνια πρέπει να παρακολουθούμε ώστε βέβαια να ελπίζουμε να δούμε περί τα 10 να διασπαστούν σε ένα χρόνο; (β) Σε πόσο όγκο νερού υπάρχουν τόσα πρωτόνια;

Λύση: (α) Μετά από χρόνο t έχουν μείνει

$$N(t) = N_0 e^{-t/\tau} \quad (5)$$

πρωτόνια. Για $t = 1 \text{ year}$ έχουμε

$$e^{-t/\tau} = e^{-10^{-33}} \simeq 1 - 10^{-33} \quad (6)$$

Σε ένα χρόνο θέλουμε να έχουν διασπαστεί περί τα 10 πρωτόνια. Δηλαδή

$$\Delta N = N_0 - N(t = 1 \text{ year}) = N_0 \times 10^{-33} = 10 \quad (7)$$

Αυτό δίνει

$$N_0 \simeq 10^{34} \quad (8)$$

πρωτόνια, που πρέπει να παρακολουθούμε.

(β) Τα 18 cm^3 περιέχουν N_A μόρια νερού, δηλαδή $10N_A$ πρωτόνια. Επομένως, τα 10^{34} πρωτόνια θα υπάρχουν σε νερό όγκου

$$V = \frac{18 \text{ cm}^3 \times 10^{34}}{10 \times 6 \times 10^{23}} = 3 \times 10^4 \text{ m}^3 \quad (9)$$

3. Περιγράψτε ένα πείραμα, ανάλογο αυτού της *Wu* που έγινε μετά από υπόδειξη των *T.D. Lee* και *C.N. Yang*, αλλά βασισμένο στην αντίδραση $n \rightarrow pe\bar{\nu}$, που να δείχνει ότι η ασθενής αλληλεπίδραση, που είναι υπεύθυνη για την αντίδραση αυτή παραβιάζει την *parity* (ομοτιμία).

Λύση: Κάνω το ίδιο ακριβώς πείραμα με εκείνο, μόνο που αντί να χρησιμοποιώ πολωμένο κοβάλτιο, χρησιμοποιώ πολωμένα νετρόνια και παρατηρώ πώς κατανέμονται τα ηλεκτρόνια που παράγονται σε σχέση με την κατεύθυνση της πόλωσης των νετρονίων. Αν εκπέμπονται ομοιόμορφα σε όλες τις κατευθύνσεις, τότε ΔΕΝ έχω παραβίαση της ομοτιμίας. Αντίθετα, αν εκπέμπονται κατά προτίμηση στην κατεύθυνση της πόλωσης του νετρονίου, ή αντίθετα προς αυτήν, τότε έχω παραβίαση της ομοτιμίας. Η εξήγηση είναι ΑΚΡΙΒΩΣ η ίδια με αυτή που περιέγραψα στο μάθημα.

4. Φορτισμένο πόνιο π^+ διασπάται εν πτήσει σε μόνιο και νεutrino $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$. Το μόνιο εκπέμπεται σε γωνία 30° σχετικά με την αρχική κατεύθυνση του πιονίου. Να υπολογιστεί η ορμή (μέτρο, διεύθυνση και φορά) και η ενέργεια του νεutrίνου.

Δίδονται: ενέργεια πιονίου $E = 1 \text{ GeV}$, μάζα πιονίου $m_\pi \simeq 140 \text{ MeV}$, μάζα μιονίου $m_\mu \simeq 110 \text{ MeV}$, μάζα νεutrίνου $m_\nu \simeq 0$.

Λύση: Απλή εφαρμογή των νόμων διατήρησης ενέργειας και ορμής με τους σχετικιστικούς τύπους. Έχουμε λύσει αντίστοιχες ασκήσεις σε προηγούμενες σειρές ασκήσεων.

5. Οι ασταθείς πυρήνες A (λ_A) και B (λ_B) συμμετέχουν στις εξής δύο αντιδράσεις



(α) Γράψτε τις διαφορικές εξισώσεις για τους αριθμούς $N_A(t)$ και $N_B(t)$ των πυρήνων A και B σε κάθε χρονική στιγμή.

(β) Υποθέστε ότι αρχικά είχαμε N_0 πυρήνες A και τίποτε άλλο. Λύστε την εξίσωση για το $N_A(t)$.

(γ) Αντικαταστήστε αυτό που βρήκατε στην άλλη εξίσωση, που έτσι θα έχει μόνη άγνωστη συνάρτηση την $N_B(t)$. Λύστε την και βρείτε το $N_B(t)$.

$$(\text{Λύση: } N_B(t) = \left((N_0 \lambda_A) / (\lambda_B - \lambda_A) \right) (e^{-\lambda_A t} - e^{-\lambda_B t}).)$$

Υπόδειξη: Αν δεν έχετε σημειώσεις από το μάθημα, μπορείτε να βρείτε βοήθεια είτε σε εμένα είτε σε βιβλία πυρηνικής φυσικής όπως του *Kaplan* ή του *Enge* στη βιβλιοθήκη.

Λύση: (α) Οι πυρήνες A ικανοποιούν την

$$\frac{dN_A}{dt} = -\lambda_A N_A \quad (11)$$

και οι B την

$$\frac{dN_B}{dt} = -\lambda_B N_B + \lambda_A N_A \quad (12)$$

(β) Λύνοντας την πρώτη εξίσωση με τη δοσμένη αρχική συνθήκη βρίσκω, ως γνωστόν

$$N_A(t) = N_0 e^{-\lambda_A t} \quad (13)$$

(γ) Αντικαθιστώ στη δεύτερη εξίσωση και παίρνω για τον πληθυσμό των πυρήνων B την γραμμική μη ομογενή εξίσωση

$$\frac{dN_B}{dt} = -\lambda_B N_B + \lambda_A N_0 e^{-\lambda_A t} \quad (14)$$

Εφαρμόζω τη γνωστή μέθοδο λύσης τέτοιων εξισώσεων και βρίσκω τη λύση

$$N_B(t) = \frac{N_0 \lambda_A}{\lambda_B - \lambda_A} \left(e^{-\lambda_A t} - e^{-\lambda_B t} \right) \quad (15)$$

για τους πυρήνες B.

6. Να εξηγήσετε αναλυτικά γιατί το σωματίο Ω^- μπορεί να διασπαστεί μόνο με χρήση της ασθενούς δύναμης. Τί τάξης μεγέθους θα είναι επομένως ο μέσος χρόνος ζωής του?

Λύση: Η λεπτομερής εξήγηση δόθηκε στο μάθημα.

7. Ποιές από τις παρακάτω αντιδράσεις στον *LHC* (συγκρούσεις πρωτονίων με πρωτόνια) είναι δυνατόν (Δ) να γίνουν και ποιές αδύνατον (A) και γιατί; (Θεωρείστε ότι οι τρεις λεπτονικοί αριθμοί διατηρούνται και οι τρεις χωριστά)

$$\begin{aligned} (i) & p + p \rightarrow \pi^+ + \pi^-, & (ii) & p + p \rightarrow \Lambda^0 + \Delta^{++}, & (iii) & p + p \rightarrow \pi^+ + \mu^+, \\ (iv) & p + p \rightarrow n + n + e^+ + e^+, & (v) & p + p \rightarrow \Delta^+ + \Delta^- + \pi^+ + \pi^+, \\ (vi) & p + p \rightarrow \Delta^{++} + \nu_e + \bar{\nu}_e \end{aligned} \quad (16)$$

Λύση: (i) $\mathbf{A} : Q, B$, (ii) $\mathbf{\Delta}$, (iii) $\mathbf{A} : J, B, L_\mu$, (iv) $\mathbf{A} : L_e$, (v) $\mathbf{\Delta}$, (vi) $\mathbf{A} : J, B$.

8. Να γράψετε μία αντίδραση που μπορεί να γίνει στον *LHC* και μία που δεν μπορεί. Εξηγήστε λεπτομερώς.

9. Τα σωματίδια A, B, C, D, E, F, G συμμετέχουν στην παρακάτω αλυσίδα διασπάσεων με τα τελικά F, G να είναι ευσταθή.

$$A \rightarrow B + C, \quad C \rightarrow D + E, \quad E \rightarrow F + G \quad (17)$$

Να γράψετε τις διαφορικές εξισώσεις που ικανοποιούν οι πληθυσμοί των A, C, E, F .

Λύση: Το διάστημα $(t, t + dt)$ ο πληθυσμός των πυρήνων A αλλάζει λόγω διασπάσεων κατά $dN_A(t) = -\lambda_A N_A(t)dt$. Αντίστοιχα ο πληθυσμός των C αλλάζει κατά $dN_C^{(1)}(t) = +\lambda_A N_A(t)dt$ λόγω της μετατροπής των A σε C και επίσης κατά $dN_C^{(2)}(t) = -\lambda_C N_C(t)dt$ λόγω της διάσπασής τους σε D + E. Ομοίως για τους E, F. Οπότε οι ζητούμενες εξισώσεις είναι:

$$\frac{dN_A}{dt} = -\lambda_A N_A$$

$$\begin{aligned}
\frac{dN_C}{dt} &= +\lambda_A N_A - \lambda_C N_C \\
\frac{dN_E}{dt} &= +\lambda_C N_C - \lambda_E N_E \\
\frac{dN_F}{dt} &= +\lambda_E N_E
\end{aligned}
\tag{18}$$

10. Να μελετήσετε αν η αντίδραση



είναι επιτρεπτή ή απαγορευμένη. Αν ισχύει το δεύτερο να καταγράψετε όλους τους νόμους διατήρησης (και μόνο αυτούς) που την απαγορεύουν. Να θεωρήσετε ότι δεν υπάρχει περιορισμός στην αρχική ενέργεια.

11. Το αυτό για την αντίδραση



12. Να προσδιορίσετε ποίο σωματίο λείπει από την αντίδραση



13. Υποθέσετε ότι δεν ισχύει ο νόμος διατήρησης του ηλεκτρικού φορτίου Q . Να εξηγήσετε γιατί τότε το ηλεκτρόνιο θα μπορούσε να διασπαστεί γράφοντας μία δυνατή αντίδραση διασπασής του.

14. Κατά τη σύγκρουση ενός ηλεκτρονίου και ενός ποζιτρονίου στο σύστημα Κέντρου Μάζας τους με συνολική ενέργεια E , παράγεται και ένα φωτόνιο σύμφωνα με την αντίδραση



το οποίο εκπέμπεται κάθετα προς την κατεύθυνση κίνησης των αρχικών σωματίων. Τα δε τελικά e και e^+ έχουν ίσες κατά μέτρο ορμές, που σχηματίζουν γωνία 120 μοιρών με τη κατεύθυνση κίνησης του φωτονίου.

Να υπολογίσετε την ορμή και την ενέργεια του φωτονίου. Να διερευνήσετε για ποιές τιμές της αρχικής ενέργειας E είναι δυνατή η παραπάνω κατανομή των ορμών των σωματιδίων της τελικής κατάστασης.