

ΕΠΑΝΑΛΗΠΤΙΚΕΣ ΑΣΚΗΣΕΙΣ (II)
ΣΤΟΙΧΕΙΩΔΗ ΣΩΜΑΤΙΑ
ΚΑΙ
ΠΥΡΗΝΙΚΗ ΦΥΣΙΚΗ

Διδάσκων: Θεόδωρος Ν. Τομαράς

1. Δίδεται η αντίδραση

$$\Delta^{+++} \rightarrow n + \pi^+ + \pi^+ \quad (1)$$

όπου το βαρυόνιο Δ^{+++} έχει σπιν $1/2$, παραδοξότητα $S = 0$, ισοτοπικό σπιν $I = 3/2$ και $I_3 = 3/2$, και μάζα $1620 \text{ MeV}/c^2$.

(α) Προσδιορίστε το περιεχόμενο σε στοιχειώδη σωματλια των σωματιδίων που εμφανίζονται στην αντίδραση.

(β) Είναι η αντίδραση αυτή ισχυρή; Εξηγήστε.

(γ) Σχεδιάστε ένα όσο το δυνατόν πιο απλό διάγραμμα *Feynman* που την περιγράφει στη γλώσσα των στοιχειωδών σωματιδίων.

Λύση: (α) Από τα στοιχεία που δίνονται προκύπτει ότι $\Delta^{+++} = (uuu)$. Τα άλλα είναι γνωστά από τις σημειώσεις του μαθήματος.

(β) Μπορείτε να δείτε ότι ΔΕΝ παραβιάζεται κανείς κβαντικός αριθμός, και αφού όλα τα συμμετέχοντα σωματλια είναι αδρόνια, η αντίδραση είναι ισχυρή.

(γ) Αφού η αντίδραση μπορεί να είναι ισχυρή, το κύριο διάγραμμα που την περιγράφει θα είναι το απλούστερο με μόνο κουάρκς και γλιόνια. Ένα τέτοιο παίρνω ως εξής:

Δύο γλιόνια που εκπέμπονται από δύο από τα τρία αρχικά u κουάρκς δημιουργούν το καθένα από ένα ζευγάρι d και \bar{d} . Έτσι έχω 3 u , 2 d και 2 \bar{d} , που συνδυάζονται και δίνουν το νετρόνιο και τα δύο π^+ .

2. Τα ίδια για την αντίδραση

$$\Lambda^0 \rightarrow n + \pi^0 \quad (2)$$

3. Τα ίδια για τις αντιδράσεις

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu, \quad \pi^+ + n \rightarrow \Lambda^0 + K^+ \quad (3)$$

Λύση: Τα μ^\pm και ν_μ είναι στοιχειώδη. Το περιεχόμενο των υπολοίπων σε κουάρκς τα έχουμε πει στη τάξη. Θα τα βρείτε στις σημειώσεις.

Η πρώτη αντίδραση είναι ασθενής, αφού υπάρχει νεutrino. Η δεύτερη είναι ισχυρή, αφού όπως μπορείτε να ελέγξετε δεν παραβιάζει κανένα νόμο διατήρησης και τα συμμετέχοντα σωματλια είναι όλα αδρόνια.

Το κύριο διάγραμμα που περιγράφει τη πρώτη αντίδραση είναι ως εξής: Τα αρχικά u και \bar{d} εξουδετερώνονται και γίνονται W^+ , το οποίο στη συνέχεια δίνει μ^+ και ν_μ .

Το κύριο διάγραμμα που περιγράφει τη δεύτερη αντίδραση έχει ΜΟΝΟ γλιόνια (αφού μπορεί να γίνει ισχυρά) και είναι ως εξής: Το αρχικό \bar{d} του πιονίου με ένα από τα d του n δίνουν ένα γλιόνιο, το οποίο στη συνέχεια δίνει s και \bar{s} . Οπότε τα εναπομείναντα αρχικά u , u και d μαζί με τα νέα s και \bar{s} δίνουν το $\Lambda^0(uds)$ και το $K^+(u\bar{s})$.

4. Οι παρακάτω αντιδράσεις είναι απαγορευμένες. Εξηγήστε γιατί, για κάθε μία χωριστά.

$$p + p \rightarrow p + \pi^+ \quad (4)$$

$$p + p \rightarrow p + p + n \quad (5)$$

$$\gamma + p \rightarrow n + \pi^0 \quad (6)$$

$$p + \bar{p} \rightarrow e + e^+ + \nu_e \quad (7)$$

$$\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma + \nu_e + \nu_e \quad (8)$$

$$\Lambda^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^- \quad (9)$$

Λύση: (1) J, B , (2) J, B , (3) Q , (4) J, L , (5) L , (6) J, B .

5. Το αυτό για τις αντιδράσεις

$$(a) p \rightarrow e^+ + \pi^0 + \gamma, \quad (b) n \rightarrow p + \pi^0, \quad (c) \nu_e + p \rightarrow e^+ + n \quad (10)$$

6. Θεωρείστε τις παρακάτω δύο αντιδράσεις

$$\pi^- + p \rightarrow K^- + \Sigma^+ \quad (11)$$

$$\pi^- + p \rightarrow \pi^- + \Sigma^+ \quad (12)$$

(α) Είναι επιτρεπτές ή όχι; ;

(β) Ποιά είναι η πιο πιθανή να συμβεί; Εξηγήστε.

Λύση: (α) Η πρώτη παραβιάζει την παραδοξότητα κατά $|\Delta S| = 2$ και την συνιστώσα I_3 του ισотоπικού σπιν κατά 1. Άρα είναι ΜΗ επιτρεπτή¹.

Η δεύτερη παραβιάζει την παραδοξότητα κατά $|\Delta S| = 1$, το I_3 κατά 1/2 και το ισотоπικό σπιν $|\Delta I| = 1/2$, ενώ σέβεται όλους τους υπόλοιπους κβαντικούς αριθμούς. Αυτά επιτρέπουν να μπορεί να γίνει και να είναι ΑΣΘΕΝΗΣ.

(β) Σύμφωνα και με την υποσημείωση, η πρώτη απαιτεί διπλή δράση της ασθενούς αλληλεπίδρασης. Η δεύτερη μόνο με απλή δράση της ασθενούς αλληλεπίδρασης. Επομένως, η πρώτη είναι πολύ (100000 φορές) πιο σπάνια από την δεύτερη.

7. Το ίδιο για τις διασπάσεις

$$(a) \Xi^0 \rightarrow \Lambda^0 + e^+ + e^-, \quad (b) \Xi^0 \rightarrow p + \pi^- \quad (13)$$

8. Μέχρι πριν μερικά χρόνια πιστεύαμε ότι υπήρχαν τρεις διατηρούμενοι λεπτονικοί αριθμοί L_e , L_μ και L_τ , αναφερόμενοι ο καθένας στην αντίστοιχη οικογένεια λεπτονίων. Για παράδειγμα $L_e(e) = -1 = L_e(\nu_e) = -L_e(\bar{e}) = -L_e(\bar{\nu}_e)$ ενώ $L_e(\mu) = 0 = L_e(\tau) = L_e(\nu_\mu) = L_e(\nu_\tau)$, και αντίστοιχα με τους άλλους.

Υποθέστε ότι αυτό ισχύει ακόμα (ισχύει έτσι κι αλλιώς κατά προσέγγιση) και

(α) αποφασίστε τί νετρίνο λείπει από κάθε μία από τις παρακάτω αντιδράσεις

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + ?? \quad (14)$$

$$?? + p \rightarrow n + e^+ \quad (15)$$

$$?? + n \rightarrow p + \mu^- \quad (16)$$

$$K^+ \rightarrow \mu^+ + ?? \quad (17)$$

¹ Για να είμαι ακριβέστερος, η πιθανότητα να συμβεί μια τέτοια αντίδραση είναι χοντρικά το τετράγωνο της πιθανότητας να συμβεί μια ασθενής αντίδραση, άρα είναι περί τις 100000 φορές ασθενέστερη της ασθενούς.

(β) Εξηγήστε πώς διασπάται το μόνιο και γιατί η αντίδραση διάσπασής του είναι σχεδόν μονοσήμαντη.

Λύση: (α) (14): $\bar{\nu}_\mu$, (15): $\bar{\nu}_e$, (16): ν_μ , (17): ν_μ .

(β) Η κύρια αντίδραση διάσπασης του μιονίου είναι

$$\mu^- \rightarrow e + \bar{\nu}_e + \nu_\mu \quad (18)$$

Η παραπάνω αντίδραση είναι μονοσήμαντη με βάση το εξής σκεπτικό: (i) Τα προϊόντα της διάσπασης ενός σωματίου πρέπει να είναι ελαφρύτερα από το αρχικό σωματίο. Σωματία ελαφρύτερα από το μόνιο είναι το e , τα νευτρίνα και τα αντισωματίά τους, και το φωτόνιο. Μόνο σε τέτοια μπορεί να διασπαστεί το μόνιο.

(ii) Πρέπει να διατηρείται το ηλεκτρικό φορτίο. Άρα θα πάρουμε e σύν συνολικά ουδέτερο υπόλοιπο.

(iii) Για να διατηρούνται οι κβαντικοί αριθμοί L_e και L_μ πρέπει να έχουμε ακόμα και $\bar{\nu}_e$ και ν_μ στο δεξί μέλος. Επομένως, $\mu^- \rightarrow e + \bar{\nu}_e + \nu_\mu + \text{neutral}$.

Η απλούστερη διάσπαση είναι αυτή που γράφω παραπάνω. Πράγματι είναι ο τρόπος που διασπώνται 99% των μιονίων. Περί τις $1/\alpha \sim 137$ φορές σπανιότερη είναι η αντίδραση

$$\mu^- \rightarrow e + \bar{\nu}_e + \nu_\mu + \gamma \quad (19)$$

και ακόμα πίο σπάνια η

$$\mu^- \rightarrow e + \bar{\nu}_e + \nu_\mu + e^+ + e^- \quad (20)$$

9. Δέσμη πιονίων με ενέργεια 1GeV πέφτει σε στόχο ακίνητων πρωτονίων και δίνει την ισχυρή αντίδραση

$$\pi^- + p \rightarrow \Lambda^0 + ?? \quad (21)$$

Τί είναι το άγνωστο σωματίο;

Λύση: Δεδομένου ότι η αντίδραση είναι ισχυρή, διατηρεί την παραδοξότητα. Το βαρυόνιο Λ^0 έχει παραδοξότητα -1 . Άρα το άγνωστο μεσόνιο (ΔΕΝ μπορεί να είναι βαρυόνιο) έχει παραδοξότητα $+1$, φορτίο μηδέν και μάζα μικρότερη από $\sim 0.6\text{GeV}$ για να μπορεί να παραχθεί με τη διαθέσιμη ενέργεια της δέσμης (Πειστείτε για τη δήλωση αυτή με βάση την ενέργεια κατωφλίου.). Άρα είναι το K^0 .

10. Το μεσόνιο ρ^+ διασπάται κύρια

$$\rho^+ \rightarrow \pi^+ + \pi^0 \quad (22)$$

και έχει μέσο χρόνο ζωής $\tau_\rho \sim 10^{-23}\text{sec}$.

Αντίστοιχα το K^+ διασπάται κατά πολλούς τρόπους

$$\begin{aligned} K^+ &\rightarrow \pi^+ + \pi^0 \\ &\rightarrow \mu^+ + \nu_\mu \\ &\rightarrow \pi^+ + \pi^+ + \pi^+ + \pi^- \\ &\rightarrow \pi^0 + e^+ + \nu_e \end{aligned} \quad (23)$$

και έχει μέσο χρόνο ζωής ΠΟΛΥ ΜΕΓΑΛΥΤΕΡΟ, δηλαδή $\tau_K \sim 10^{-10}\text{sec}$.

Πώς εξηγείτε τη διαφορά αυτή; ;

Λύση: Το ρ^+ έχει παραδοξότητα μηδέν. Η διάσπασή του διατηρεί και την παραδοξότητα και επομένως είναι ισχυρή με τον χαρακτηριστικό για ισχυρή διάσπαση χρόνο ζωής.

Αντίθετα, το K^+ έχει μη μηδενική παραδοξότητα και είναι το ελαφρύτερο παράδοξο σωματίο. Άρα οι διασπάσεις του αναγκαστικά παραβιάζουν την παραδοξότητα. Επομένως είναι ασθενείς, με συνέπεια να είναι πολύ πιο αργές και να οδηγούν σε μεγάλο χρόνο ζωής του K^+ .

11. (α) Να γράψετε δύο υποθετικές αντιδράσεις με ηλεκτρόνια, ποζιτρόνια και φωτόνια με τα εξής χαρακτηριστικά: Η πρώτη να είναι αδύνατη λόγω παραβίασης ΜΟΝΟ του νόμου διατήρησης του ηλεκτρικού φορτίου και η δεύτερη ΜΟΝΟ λόγω παραβίασης του νόμου διατήρησης της ενέργειας. (β) Υπάρχει αντίδραση με τα παραπάνω σωματίδια, που παραβιάζει ΜΟΝΟ το ηλεκτρικό φορτίο κατά 1, ενώ διατηρεί τη στροφορμή;

Λύση: (α) (i) $e^- + \gamma \rightarrow e^- + e^- + e^-$ και (ii) $e^- \rightarrow e^- + e^- + e^+$.

(β) ΟΧΙ.

12. Το φαινόμενο *Compton* είναι η σκέδαση φωτός από ηλεκτρικό φορτίο. Περιγράφεται από την αντίδραση $\gamma + e^- \rightarrow \gamma + e^-$. Να σχεδιάσετε το βασικό διάγραμμα *Feynman* που περιγράφει το φαινόμενο.

13. Αδρόνιο αποτελείται από τα κουάρκς u , d και c . (α) Ποιοί είναι οι κβαντικοί αριθμοί ηλεκτρικό φορτίο, βαρυνικός αριθμός, παραδοξότητα, ισοτοπικό σπιν και τρίτη προβολή του ισοτοπικού σπιν του αδρονίου αυτού. (β) Ποιές είναι οι δυνατές τιμές της ολικής στροφορμής του εν λόγω αδρονίου;

Λύση: (α) $Q = 1, B = 1, S = 0, I = 0, 1$ και $I_3 = 0$. (β) Το ολικό σπιν των τριών κουάρκς είναι $spin = 1/2, 3/2$. Σύνθεση αυτών με την αέρια τροχιακή στροφορμή δίνει για τις δυνατές τιμές της ολικής στροφορμής δηλ. του σπιν του αδρονίου τις $1/2, 3/2, 5/2, 7/2, \dots$

14. Βαρυόνιο έχει κβαντικούς αριθμούς $Q = 0, S = -1, I = 0$, και μάζα μικρότερη από $2 GeV/c^2$. Να προσδιοριστούν τα συστατικά του quarks.

15. Βαρυόνιο έχει $Q = 2$ και μάζα μικρότερη από $3 GeV/c^2$. Να προσδιορίσετε τα συστατικά του κουάρκς και τις δυνατές τιμές του ισοτοπικού του σπιν.

16. (α) Να αποδείξετε ότι η αντίδραση $\Delta^{++} \rightarrow p + \pi^+$ είναι ισχυρή. (β) Να σχεδιάσετε το βασικό διάγραμμα *Feynman* που την περιγράφει.

Λύση: (α) Η δοσμένη αντίδραση έχει μόνο αδρόνια και δεν παραβιάζει κανένα κβαντικό αριθμό.

(β) Το Δ^{++} έχει 3 u κουάρκς, το πρωτόνιο 1 u και 2 d και το π^+ 1 u και 1 \bar{d} . Ο τρόπος που γίνεται η αντίδραση είναι: κάποιο από τα αρχικά u κουάρκς εκπέμπει ένα γλιόνιο, το οποίο στη συνέχεια δίνει ένα d και ένα \bar{d} . Δύο από τα αρχικά u και το d φτιάχνουν το p , ενώ το τρίτο u με το \bar{d} φτιάχνουν το π^+ .

17. Το ίδιο για την διάσπαση του μεσονίου $\phi(s\bar{s})$ μάζας $1020 MeV/c^2$ και σπιν 1

$$\phi(s\bar{s}) \rightarrow K^+ + K^- \quad (24)$$