

Θέμα [03]

Το μεσόνιο ω έχει χβαντικούς αριθμούς σπιν, ομοτιμίας και συζυγίας $J^{PC} = 1^{--}$ και μπορεί να θεωρηθεί ως ‘συντονισμός’ 3 πιονίων. Το φορτισμένο πιόνιο έχει χβαντικούς αριθμούς $J^P = 0^-$, ενώ το ουδέτερο πιόνιο έχει $J^{PC} = 0^{-+}$. Με αυτά τα δεδομένα, εξηγήστε γιατί κυριαρχεί ο τρόπος διάσπασης $\omega \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$, ενώ δεν παρατηρείται η διάσπαση $\omega \rightarrow \pi^0\pi^0\pi^0$.

Λύση

Η διάσπαση του ω σε 3 πιόνια γίνεται με την ισχυρή αλληλεπίδραση, η οποία διατηρεί τη συζυγία, καθώς είναι ‘τυφλή’ στο ηλεκτρικό φορτίο. Η συζυγία του ω είναι $C(\omega) = -1$. Η συζυγία του συστήματος $\pi^0\pi^0\pi^0$ είναι $C(\pi^0)^3 = (+1)^3 = +1$. Άρα $C(\omega) \neq C(\pi^0\pi^0\pi^0)$, οπότε ο τρόπος διάσπασης $\omega \rightarrow \pi^0\pi^0\pi^0$ απαγορεύεται.

Για τη συζυγία του συστήματος $\pi^+\pi^-\pi^0$, μελετάμε πρώτα τη στροφορμή του, χωρίζοντάς το σε ένα ζεύγος $\pi^+\pi^-$ που αλληλεπιδρά στην τελική κατάσταση περισσότερο χρόνο μέσω της ηλεκτρομαγνητικής αλληλεπίδρασης (η οποία είναι μεγάλης εμβέλειας) και στο μοναχικό π^0 . Το ω έχει σπιν 1, άρα η στροφορμή της τελικής κατάστασης είναι επίσης 1. Εφαρμόζοντας την τριγωνική ανισότητα στη σύνθεση στροφορμής του ζεύγους $\pi^+\pi^-$ με το μοναχικό π^0 που έχει σπιν $J(\pi^0) = 0$, παίρνουμε

$$\begin{aligned} |J(\pi^+\pi^-) - J(\pi^0)| &\leq 1 \leq J(\pi^+\pi^-) + J(\pi^0) \\ \Rightarrow J(\pi^+\pi^-) &\leq 1 \leq J(\pi^+\pi^-) \Rightarrow J(\pi^+\pi^-) = 1. \end{aligned}$$

Για τη συζυγία τώρα έχουμε $C(\pi^+\pi^-\pi^0) = C(\pi^+\pi^-)C(\pi^0)$. Αλλά $C(\pi^0) = +1$, ενώ η συζυγία του ζεύγους $C(\pi^+\pi^-)$ έχει την ίδια ιδιοτιμή με την ομοτιμία του, αφού η δράση του τελεστή συζυγίας στο ζεύγος έχει το ίδιο αποτέλεσμα με τη δράση του τελεστή ομοτιμίας, δηλαδή τη μετάθεση των δύο φορτισμένων πιονίων. Η ομοτιμία του ζεύγους είναι $P(\pi^+\pi^-) = (-1)^{J(\pi^+\pi^-)}P(\pi^+)P(\pi^-) = (-1)^1(-1)(-1) = -1$, συνεπώς $C(\pi^+\pi^-\pi^0) = (-1)(+1) = -1$ και η συζυγία διατηρείται στον τρόπο διάσπασης $\omega \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$, άρα αυτός επιτρέπεται.

Θέμα [04]

Θεωρήστε την αλυσίδα διασπάσεων

$$X_0 \rightarrow X_1 + X_2 \rightarrow \pi^0 \mu^+ \nu_\mu + \pi^0 \mu^- \bar{\nu}_\mu$$

και υποθέστε ενεργές μόνο τις 3 ελαφρότερες γεύσεις κουάρκ.

- α. (50%) Προτείνετε τη δομή των τριών σωματιδίων $X_{0,1,2}$ και ταυτοποιήστε τις αλληλεπιδράσεις που είναι υπεύθυνες για την αλυσίδα διασπάσεων.
- β. (50%) Σχεδιάστε τα διαγράμματα Feynman των διασπάσεων $X_0 \rightarrow X_1 + X_2$ και $X_1 \rightarrow \pi^0 \mu^+ \nu_\mu$.

Λύση

- α. Οι διασπάσεις $X_1 \rightarrow \pi^0 \mu^+ \nu_\mu$ και $X_2 \rightarrow \pi^0 \mu^- \bar{\nu}_\mu$ είναι ηλεκτρικά συζυγείς. Συνεπώς το X_2 πρέπει να είναι το αντισωματίδιο του X_1 . Εξάλλου, η παρουσία του ζεύγους μιονίου-νετρίνου υποδηλώνει την παρουσία ενός μποζονίου W^+ στη διάσπαση του X_1 κι ενός W^- στη διάσπαση του X_2 , άρα αυτά τα δύο σωματίδια διασπώνται με την ασθενή αλληλεπίδραση.

Οι δύο αυτές διασπάσεις είναι λοιπόν συμμετρικές, οπότε μελετάμε μόνο την $X_1 \rightarrow \pi^0 \mu^+ \nu_\mu$. Το ουδέτερο πιόνιο είναι μίγμα καταστάσεων $u\bar{u}$ και $d\bar{d}$. Εφόσον υποθέτουμε ενεργές μόνο τις ελαφρότερες γεύσεις u, d, s , θεωρούμε το πιόνιο σε μια αμιγή κατάσταση $u\bar{u}$, ώστε το φορτίο της επάνω γεύσης να μπορεί να συνδυαστεί με το αντίθετο φορτίο μιας από τις δύο κάτω γεύσεις και να εξισορροπήσει το φορτίο του μποζονίου W^+ . Επομένως, το κουάρκ u πρέπει αρχικά να συνδυάζεται με ένα αντικουάρκ κάτω γεύσης, το οποίο θα διασπαστεί σε ένα αντικουάρκ $\bar{u}$ κι ένα μποζόνιο W^+ , σχηματίζοντας το π^0 και το ζεύγος $\mu^+ \bar{\nu}_\mu$ στην τελική κατάσταση. Το αρχικό αντικουάρκ κάτω γεύσης δεν μπορεί να είναι $\bar{d}$, γιατί τότε το X_1 θα είχε δομή $u\bar{d}$, δηλαδή θα ήταν ένα π^+ που δεν έχει αρκετή μάζα για να διασπαστεί σε $\pi^0 \mu^+ \nu_\mu$. Άρα το αρχικό αντικουάρκ κάτω γεύσης πρέπει να είναι $\bar{s}$, οπότε το X_1 έχει δομή $u\bar{s}$, δηλαδή είναι ένα μεσόνιο K^+ και συνεπώς το X_2 είναι ένα μεσόνιο K^- με δομή $\bar{u}s$.

$$K^+ = u\bar{s} \rightarrow u + \bar{u}W^+ \rightarrow u\bar{u} + W^+ = \pi^0 \mu^+ \nu_\mu$$

Το X_0 πρέπει να περιέχει τα δύο παράδοξα κουάρκ που διανέμονται στα δύο καόνια με τη διάσπαση $X_0 \rightarrow K^+ K^-$. Αφού λοιπόν περιέχει ένα ζεύγος κουάρκ-αντικουάρκ, πρέπει να είναι ένα μεσόνιο με δομή $s\bar{s}$. Το μεσόνιο αυτό υπάρχει και είναι το φ με μάζα 1020 MeV. Η διάσπασή του σε δύο καόνια είναι ενεργειακά επιτρεπτή και μπορεί να γίνει μέσω ενός γλουονίου που διακλαδίζεται σε ένα ζεύγος $u\bar{u}$, με τα δύο επάνω κουάρκ να συνδυάζονται στη συνέχεια με τα δύο παράδοξα κουάρκ και να σχηματίζουν τα δύο καόνια. Άρα η διάσπαση του φ γίνεται (κυρίως) με την ισχυρή αλληλεπίδραση.

$$\varphi = s\bar{s} \rightarrow s\bar{s} + g \rightarrow s\bar{s} + u\bar{u} \rightarrow u\bar{s} + \bar{u}s = K^+ + K^-$$

- β. Τα διαγράμματα Feynman των διασπάσεων φαίνονται στο ακόλουθο σχήμα.

