

Θέμα [03]

Εξηγήστε γιατί οι ακόλουθες αντιδράσεις απαγορεύονται:

1. $p + \bar{p} \rightarrow \gamma$
2. $n \rightarrow p + \gamma$
3. $\Lambda \rightarrow \pi^+ + e^- + \bar{\nu}_e$
4. $K^- \rightarrow \pi^0 + e^-$
5. $p \rightarrow n + e^+ + \nu_e$
6. $\gamma \rightarrow e^+ + e^-$
7. $\pi^0 \rightarrow 3\gamma$
8. $p + \nu_\mu \rightarrow n + \mu^+$
9. $p + \bar{p} \rightarrow 2\Lambda$

Λύση

1. $p + \bar{p} \rightarrow \gamma$. Δεν διατηρείται η 4-ορμή: Η αναλλοίωτη μάζα της αρχικής κατάστασης είναι $\geq 2m_p > m_\gamma = 0$, διαφορετική από την τελική.
2. $n \rightarrow p + \gamma$. Δεν διατηρείται το ηλεκτρικό φορτίο: Είναι 0 στην αρχική κατάσταση και +1 στην τελική.
3. $\Lambda \rightarrow \pi^+ + e^- + \bar{\nu}_e$. Δεν διατηρείται ο βαρυονικός αριθμός: Είναι +1 στην αρχική κατάσταση και 0 στην τελική.
4. $K^- \rightarrow \pi^0 + e^-$. Δεν διατηρείται ο λεπτονικός αριθμός ηλεκτρονικής γεύσης: Είναι 0 στην αρχική κατάσταση και +1 στην τελική.
5. $p \rightarrow n + e^+ + \nu_e$. Δεν διατηρείται η 4-ορμή: Η αναλλοίωτη μάζα της αρχικής κατάστασης είναι $m_p < m_n + m_e \leq m_{n+e+\nu}$, διαφορετική από την τελική.
6. $\gamma \rightarrow e^+ + e^-$. Δεν διατηρείται η 4-ορμή: Η αναλλοίωτη μάζα της αρχικής κατάστασης είναι $m_\gamma = 0 < 2m_e \leq m_{2e}$, διαφορετική από την τελική.
7. $\pi^0 \rightarrow 3\gamma$. Δεν διατηρείται η συζυγία (η διάσπαση γίνεται με την ηλεκτρομαγνητική αλληλεπίδραση): Είναι $C_\pi = (-1)^{L+S} = (-1)^0 = +1$ στην αρχική κατάσταση και $C_\gamma^3 = (-1)^3 = -1$ στην τελική.
8. $p + \nu_\mu \rightarrow n + \mu^+$. Δεν διατηρείται ο μιονικός αριθμός: Είναι +1 στην αρχική κατάσταση και -1 στην τελική.
9. $p + \bar{p} \rightarrow 2\Lambda$. Δεν διατηρείται ο βαρυονικός αριθμός: Είναι $1 - 1 = 0$ στην αρχική κατάσταση και $1 + 1 = 2$ στην τελική.

Θέμα [04]

Θεωρήστε την αντίδραση

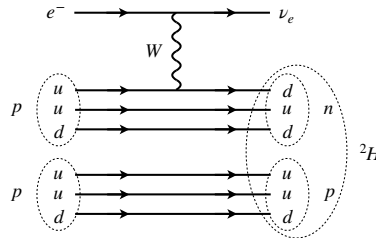
$$X_1 + X_2 + e^- \rightarrow Y + \nu_e$$

όπου $X_{1,2}$ και Y είναι σταθερά σωματίδια.

- (60%) Προτείνετε την ταυτότητα των τριών σωματιδίων $X_{1,2}$ και Y , δικαιολογώντας λεπτομερώς την απάντησή σας.
- (40%) Σχεδιάστε το διάγραμμα Feynman χαμηλότερης τάξης που περιγράφει την αντίδραση.

Λύση

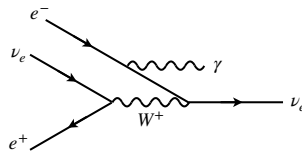
- Τα ζητούμενα σωματίδια δεν μπορούν να είναι όλα λεπτόνια, γιατί με τρία σωματίδια στην αρχική κατάσταση και δύο στην τελική δεν μπορούν να διατηρηθούν οι λεπτονικοί αριθμοί ανά γεύση. Δεν μπορούν επίσης να είναι μεσόνια, γιατί αυτά δεν είναι σταθερά. Μπορεί λοιπόν να υποθεθεί ότι είναι όλα βαρυόνια, από τα οποία τα μόνα σταθερά είναι τα πρωτόνια και τα (δέσμια) νετρόνια. Για να διατηρείται και ο βαρυονικός αριθμός θα πρέπει το Y να έχει βαρυονικό αριθμό ίσο με το άθροισμα των βαρυονικών αριθμών των $X_{1,2}$. Η απλούστερη επιλογή είναι τα $X_{1,2}$ να έχουν το καθεένα βαρυονικό αριθμό 1 και το Y να έχει βαρυονικό αριθμό 2. Για να διατηρείται και το ηλεκτρικό φορτίο θα πρέπει το άθροισμα των φορτίων των $X_{1,2}$ να είναι +2 και το φορτίο του Y να είναι +1. Άρα τα $X_{1,2}$ είναι και τα δύο πρωτόνια και το Y είναι δευτέριο, οπότε η αντίδραση είναι $p + p + e^- \rightarrow {}^2\text{H} + \nu_e$ (μια τριπλή σύντηξη που πραγματοποιείται με ψηλό ρυθμό στον Ήλιο). Θα μπορούσε να θεωρηθεί και η γενικότερη πυρηνική αντίδραση $(A_1, Z_1) + (A_2, Z_2) + e^- \rightarrow (A_1 + A_2, Z_1 + Z_2 - 1) + \nu_e$, όμως τότε ο τελικός πυρήνας είναι κατά κανόνα διεγερμένος και συνεπώς ασταθής.
- Το διάγραμμα Feynman χαμηλότερης τάξης που περιγράφει την αντίδραση φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα. Παραλείπονται οι (ισχυρές) αλληλεπιδράσεις μεταξύ σωματιδίων μέσα στις δέσμιες καταστάσεις (βαρυόνια), οπότε το δευτέριο πρωτόνιο εμφανίζεται ως 'θεατής'.



Υπάρχουν εναλλακτικές επιλογές που περιγράφονται παρακάτω.

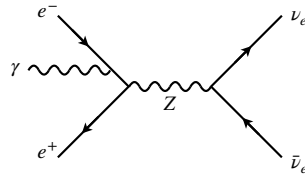
1.

$$X_1 = e^+ \quad X_2 = \nu_e \quad Y = \gamma \Rightarrow e^+ + \nu_e + e^- \rightarrow \gamma + \nu_e$$



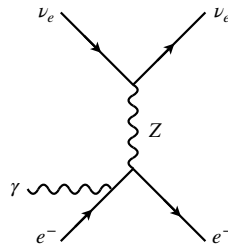
2.

$$X_1 = e^+ \quad X_2 = \gamma \quad Y = \bar{\nu}_e \Rightarrow e^+ + \gamma + e^- \rightarrow \bar{\nu}_e + \nu_e$$



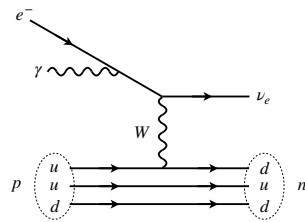
3.

$$X_1 = \nu_e \quad X_2 = \gamma \quad Y = e^- \Rightarrow \nu_e + \gamma + e^- \rightarrow e^- + \nu_e$$



4.

$$X_1 = p \quad X_2 = \gamma \quad Y = n \Rightarrow p + \gamma + e^- \rightarrow n + \nu_e$$



Από τις παραπάνω αντιδράσεις, η 2. και η 3. προκύπτουν από την 1. μεταθέτοντας πρώτα το φωτόνιο και το νεutrino και στη συνέχεια το ποζιτρόνιο και το αντineutrino μεταξύ της αρχικής και της τελικής κατάστασης, και παίρνοντας πάντα υπόψη ότι η μετάθεση συνεπάγεται συζυγία σωματιδίου-αντισωματιδίου (το αντισωματίδιο του φωτονίου είναι ο εαυτός του). Οι μεταθέσεις αυτές συνεπάγονται και αλλαγή του φορέα αλληλεπίδρασης, από W σε Z .

Στην 4. το τελικό ελεύθερο νεutrino θεωρείται σταθερό σωματίδιο, αν και στην πραγματικότητα δεν είναι, με μέσο χρόνο ζωής σχεδόν 15 λεπτά. Επίσης, στις 1. και 2. το ποζιτρόνιο μπορεί να αντικατασταθεί με μ^+ και το αντίστοιχο νεutrino να γίνει μιονικό, παρόλο που και το μόνιο δεν είναι σταθερό σωματίδιο, με μέσο χρόνο ζωής $2.2 \mu s$, αλλά με αρκετή κινητική ενέργεια μπορεί να διανύσει μεγάλες αποστάσεις και να ανιχνευτεί. Όμοια και στην 3. το εισερχόμενο νεutrino μπορεί να επιλεγεί μιονικό και το εξερχόμενο ηλεκτρόνιο να αντικατασταθεί με μ^- . Όλες αυτές οι αντιδράσεις, αν και πιο δύσκολες να πραγματοποιηθούν στη Φύση ή στο πείραμα από την αντίδραση $p + p + e^- \rightarrow {}^2H + \nu_e$, είναι αποδεκτές απαντήσεις του προβλήματος.