

Εισαγωγή στη Φυσική Στοιχειωδών Σωματιδίων

Ασκήσεις Στοιχειωδών Σωματιδίων

5^ο Εξάμηνο

Δ. Σαμψωνίδης – Κ. Κορδάς

21 Ιανουαρίου 2011

Κουάρκ και Λεπτόνια

Κουάρκ

u	c	t
d	s	b

Φορτίο (Q)	Βαρυονικός Αριθμός (B)	Αντίστοιχος Αριθμός "γεύσης"
+2/3	+1/3	+1
-1/3	+1/3	-1

Λεπτονικός Αριθμός = 0 για όλα τα κουάρκ

Λεπτόνια

ν_e	ν_μ	ν_τ
e^-	μ^-	τ^-

Φορτίο (Q)	Βαρυονικός Αριθμός (B)	Αντίστοιχος Λεπτονικός Αριθμός
0	0	+1
-1	0	+1

Κουάρκ

Μπορούν να συμμετέχουν σε όλες τις αλλήλεπιδράσεις
(Ισχυρές, Ασθενείς και ΗλεκτροΜαγνητικές)

Κβαντικοί
Αριθμοί

των κουάρκ

	B	Q	S	C	B	T
u	+1/3	+2/3	0	0	0	0
d	+1/3	-1/3	0	0	0	0
s	+1/3	-1/3	-1	0	0	0
c	+1/3	+2/3	0	+1	0	0
b	+1/3	-1/3	0	0	-1	0
t	+1/3	+2/3	0	0	0	+1

και

των
αντικουάρκ

	B	Q	S	C	B	T
$\bar{u}$	-1/3	-2/3	0	0	0	0
$\bar{d}$	-1/3	+1/3	0	0	0	0
$\bar{s}$	-1/3	+1/3	+1	0	0	0
$\bar{c}$	-1/3	-2/3	0	-1	0	0
$\bar{b}$	-1/3	+1/3	0	0	+1	0
$\bar{t}$	-1/3	-2/3	0	0	0	-1

Λεπτόνια

ΔΕΝ συμμετέχουν στις Ισχυρές αλληλεπιδράσεις
("αισθάνονται" μόνο τις Ασθενείς και ΗλεκτροΜαγνητικές)

Λεπτονικός Αριθμός

	e^-	ν_e	μ^-	ν_μ	τ^-	ν_τ
L_e	+1	+1	0	0	0	0
L_μ	0	0	+1	+1	0	0
L_τ	0	0	0	0	+1	+1

	e^+	$\bar{\nu}_e$	μ^+	$\bar{\nu}_\mu$	τ^+	$\bar{\nu}_\tau$
L_e	-1	-1	0	0	0	0
L_μ	0	0	-1	-1	0	0
L_τ	0	0	0	0	-1	-1

- Κάθε 'οικογένεια' λεπτονίων **ΔΙΑΤΗΡΕΙ** τον αντίστοιχο Λεπτονικό Αριθμό
- Ο Λεπτονικός αριθμός **ΔΙΑΤΗΡΕΙΤΑΙ ΠΑΝΤΑ**

Σωματίδια που παρατηρούμε στη φύση

• Λεπτόνια

- σημειακά - δεν έχουν δομή
 - Κάθε οικογένεια έχει τον δικό της Λεπτονικό αριθμό

• Αδρόνια

- Φτιαγμένα από κουάρκ (τα κουάρκ δεν τα βλέπουμε ελεύθερα - μόνο μέσα σε αδρόνια)
 - Βαρυόνια - συνδυασμοί 3 κουάρκ
 - π.χ, $p=uud$, $n=udd$
 - Έχουν Βαρυονικό αριθμό $B=1$
 - Μεσόνια - συνδυασμοί κουάρκ με αντι-κουάρκ
 - π.χ. $\pi^+=u\bar{d}$, $D^-=c\bar{d}$, $\pi^0 = u\bar{u}$ και $d\bar{d}$
 - Έχουν Βαρυονικό αριθμό $B=0$

Διατήρηση κβαντικών αριθμών στις διάφορες αλληλεπιδράσεις

- Πίνακας 1.4 στις Σημειώσεις
Στοιχειωδών

Ασκηση 1

Ποιά είναι τα συστατικά κουάρκ των παρακάτω αδρονίων?

Αν το αδρόνιο είναι συνδυασμός περισσότερων του ενός ζεύγους $q \bar{q}$ να δωθούν όλα τα ζεύγη

BARYONS	Strangenes s	Charm
n	0	0
p	0	0
Δ^{++}	0	0
Λ^0	-1	0
Ω^-	-3	0
MESONS		
π^+	0	0
π^0	0	0
ρ^0	0	0
η'^0	0	0
K^+	+1	0
K^-	-1	0
$\bar{K}^0$	-1	0
D^+	0	+1

} Συνδυασμοί u και d
(εννοείται και των
αντι-κουάρκ τους)
← Συνδυασμοί u , d και s

Ασκηση 1 - Λύση

Ποιά είναι τα συστατικά κουάρκ των παρακάτω αδρονίων?

Αν το αδρόνιο είναι συνδυασμός περισσότερων του ενός ζεύγους $q \bar{q}$ να δωθούν όλα τα ζεύγη

BARYONS	Strangeness	Charm
n	0	0
p	0	0
Δ^{++}	0	0
Λ^0	-1	0
Ω^-	-3	0
MESONS		
π^+	0	0
π^0	0	0
ρ^0	0	0
η'^0	0	0
K^+	+1	0
K^-	-1	0
$\bar{K}^0$	-1	0
D^+	0	+1

Σημείωση: οι κβαντικοί αριθμοί “strangeness/παραξενιά” και “charmness/χάρη” έχουν το πρόσημο του φορτίου του αντίστοιχου κουάρκ.

Π.χ., το s έχει φορτίο $-1/3$, άρα: strangeness=-1
το c έχει φορτίο $+2/3$, άρα: charmness=+1

$$n = udd, p = uud, \Delta^{++} = uuu$$

$$\Lambda^0 = sdu, \Omega^- = sss$$

$$\pi^+ = u\bar{d}$$

$$\pi^0 = \text{γραμμικός συνδυασμός των } u\bar{u} \text{ και } d\bar{d} \text{ (Σημείωση: εμφανίζεται είτε ως } u\bar{u} \text{ είτε ως } d\bar{d})$$

$$\rho^0 = \{u\bar{u}, d\bar{d}\} \text{ (αλλιώτικος γραμ. συνδ.)}$$

$$\eta' = \{u\bar{u}, d\bar{d}, s\bar{s}\} \text{ (γραμμικός συνδυασμός)}$$

$$K^+ = u\bar{s}, K^- = \bar{u}s, K^0 = \bar{s}d, \bar{K}^0 = s\bar{d}, D^+ = c\bar{d}$$

Άσκηση 2

Ποιές από τις παρακάτω αντιδράσεις/διασπάσεις γίνονται?
Αυτές που δεν γίνονται, ποιόν νόμο διατήρησης παραβιάζουν?

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \gamma$$

$$e^- \rightarrow \nu_e + \gamma$$

$$p + p \rightarrow p + \Sigma^+ + K^-$$

$$p \rightarrow e^+ + \nu_e$$

$$p \rightarrow e^+ + n + \nu_e$$

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$$

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$$

Δίνονται οι μάζες των σωματιδίων

$$M(\gamma) = 0$$

$$M(\nu_e) = M(\nu_\mu) = 0$$

$$M(e^+) = M(e^-) = 0.511 \text{ MeV}$$

$$M(\pi^+) = M(\pi^-) = 139.6 \text{ MeV}$$

$$M(\pi^0) = 135 \text{ MeV}$$

$$M(\mu^+) = M(\mu^-) = 105.7 \text{ MeV}$$

$$M(p) = 938.3 \text{ MeV}$$

$$M(n) = 939.6 \text{ MeV}$$

$$M(\Sigma^+) = 1189.4 \text{ MeV}$$

$$M(K^+) = M(K^-) = 493.7 \text{ MeV}$$

Δίνονται:

$$\Sigma^+ = u u s, K^- = \bar{u} s$$

Σημείωση:

- Στη διάσπαση ενός σωματιδίου ελέγχουμε τη διατήρηση της ενέργειας
- Όταν όμως έχουμε σκέδαση δύο σωματιδίων υποθέτουμε ότι η αρχική ενέργεια (που περιλαμβάνει την κινητική ενέργεια) μπορεί πάντα να γίνει είναι αρκετή για να επιτρέπεται η αντίδραση

Άσκηση 2 - λύση

Ποιές από τις παρακάτω αντιδράσεις/διασπάσεις γίνονται?
Αυτές που δεν γίνονται, ποιόν νόμο διατήρησης παραβιάζουν?

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \gamma$$

$$e^- \rightarrow \nu_e + \gamma$$

$$p + p \rightarrow p + \Sigma^+ + K^-$$

$$p \rightarrow e^+ + \nu_e$$

$$p \rightarrow e^+ + n + \nu_e$$

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$$

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$$

1. Διατήρηση λεπτονικού αριθμού

2. Διατήρηση φορτίου

3. Διατήρηση φορτίου

4. Διατήρηση βαρυονικού αριθμού

5. Διατήρηση ενέργειας

6. Επιτρέπεται

7. Επιτρέπεται

Βάζω σε πίνακα τις ποσότητες / κβαντικούς αριθμούς που διατηρούνται πάντα, σε όλες τις αλληλεπιδράσεις. Πρώτα βάζω τα πιό εύκολα να ελγχθούν και σταματάω με το πρώτο που παραβιάζεται!

	Φορτίο	Βαρυονικός	Λεπτονικός	Ενέργεια
1	OK	OK	X	
2	X			
3	X			
4	OK	X		
5	OK	OK	OK	X

Άσκηση 3

Οι παρακάτω διασπάσεις δεν γίνονται. Γιατί? (ποιόν νόμο διατήρησης παραβιάζουν?)

$$n \rightarrow p + e^{-}$$

$$n \rightarrow \pi^{+} + e^{-}$$

$$n \rightarrow p + \pi^{-}$$

$$n \rightarrow p + \gamma$$

Δίνονται οι μάζες των σωματιδίων

$$M(\gamma) = 0$$

$$M(\nu_e) = M(\nu_\mu) = 0$$

$$M(e^{+}) = M(e^{-}) = 0.511 \text{ MeV}$$

$$M(\pi^{+}) = M(\pi^{-}) = 139.6 \text{ MeV}$$

$$M(\pi^0) = 135 \text{ MeV}$$

$$M(\mu^{+}) = M(\mu^{-}) = 105.7 \text{ MeV}$$

$$M(p) = 938.3 \text{ MeV}$$

$$M(n) = 939.6 \text{ MeV}$$

$$M(\Sigma^{+}) = 1189.4 \text{ MeV}$$

$$M(K^{+}) = M(K^{-}) = 493.7 \text{ MeV}$$

Άσκηση 3 - λύση

Οι παρακάτω διασπάσεις δεν γίνονται. Γιατί? (ποιόν νόμο διατήρησης παραβιάζουν?)

$$n \rightarrow p + e^-$$

1. Διατήρηση λεπτονικού αριθμού και στροφορμής

$$n \rightarrow \pi^+ + e^-$$

2. Διατήρηση βαρυονικού και λεπτονικού αριθμού

$$n \rightarrow p + \pi^-$$

3. Διατήρηση ενέργειας

$$n \rightarrow p + \gamma$$

4. Διατήρηση φορτίου

Βάζω σε πίνακα τις ποσότητες / κβαντικούς αριθμούς που διατηρούνται πάντα, σε όλες τις αλληλεπιδράσεις. Πρώτα βάζω τα πιό εύκολα να ελγχθούν και σταματάω με το πρώτο που παραβιάζεται!

	Φορτίο	Βαρυονικός	Λεπτονικός	Ενέργεια
1	OK	OK	X	
2	OK	X	X	
3	OK	OK	OK	X
4	X			

Άσκηση 4

Ποιές από τις παρακάτω διασπάσεις επιτρέπονται και ποιές όχι.

Αν όχι, γιατί? Αν ναι, ποιά αλληλεπίδραση είναι υπεύθυνη (ηλεκτρομαγνητική, ασθενής, ισχυρή)?

$$1. p \bar{p} \rightarrow \pi^+ \pi^0$$

$$2. \eta \rightarrow \gamma \gamma$$

$$3. \Sigma^0 \rightarrow \Lambda \pi^0$$

$$4. \Sigma^- \rightarrow n \pi^-$$

$$5. e^+ e^- \rightarrow \mu^+ \mu^-$$

$$6. \mu^- \rightarrow e^+ \bar{\nu}_e$$

$$7. \Delta^+ \rightarrow p \pi^0$$

$$8. \bar{\nu}_e p \rightarrow n e^+$$

$$9. pp \rightarrow \Sigma^+ n K^0 \pi^+ \pi^0$$

$$10. p \rightarrow e^+ \gamma$$

$$11. pp \rightarrow ppp \bar{p}$$

$$12. \pi^0 \rightarrow \gamma \gamma$$

$$13. p \bar{p} \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0$$

$$14. \Xi^- \rightarrow \Lambda \pi^-$$

$$15. \Sigma^- \rightarrow n e \bar{\nu}_e$$

Δίνονται οι μάζες από πριν, και

$$M(\Sigma^-) = 1197.4 \text{ MeV}$$

$$M(\Sigma^0) = 1192.6 \text{ MeV}$$

$$M(K^0) = M(\bar{K}^0) = 497.7 \text{ MeV}$$

$$M(\Xi^-) = 1321.3 \text{ MeV}$$

$$M(\Lambda) = 1115.6 \text{ MeV}$$

$$M(\Delta^+) = 1210 \text{ MeV}$$

$$M(\eta) = 547.5 \text{ MeV} \text{ (σημ: } \eta = \text{ήτα)}$$

Δίνονται:

$$\Sigma^0 = u d s, \Sigma^- = d d s$$

$$\Delta^+ = u u d, \Xi^- = d s s$$

$$K^- = \bar{u} s, K^0 = \bar{d} s$$

$$K^+ = u \bar{s}, K^0 = d \bar{s}$$

Αν επιτρέπεται, τότε:

- αν έχουμε νεutrino, είναι Ασθενής
- αν έχουμε φωτόνιο, είναι Ηλεκτρομαγνητική
- αν έχουμε καθαρή αλλαγή γεύσης, κατά κύριο λόγο κατά 1 μονάδα (π.χ., $\Delta S=1$, $\Delta C=1$), είναι Ασθενής. Αλλαγή γεύσης κατά 2 μονάδες (π.χ., $\Delta S=2$) είναι σπάνια!!
- αν παράγονται ζεύγη νέας γεύσης είναι κυρίως ισχυρή (με τις άλλες, αν επιτρέπονται, να γίνονται με πολύ μικρότερη πιθανότητα)

Άσκηση 4 - λύσεις

Ποιές από τις παρακάτω διασπάσεις επιτρέπονται και ποιές όχι.

Αν όχι, γιατί? Αν ναι, ποιά αλληλεπίδραση είναι υπεύθυνη (ηλεκτρομαγνητική, ασθενής, ισχυρή)?

$$1. p \bar{p} \rightarrow \pi^+ \pi^0$$

$$2. \eta \rightarrow \gamma\gamma$$

$$3. \Sigma^0 \rightarrow \Lambda \pi^0$$

$$4. \Sigma^- \rightarrow n \pi^-$$

$$5. e^+ e^- \rightarrow \mu^+ \mu^-$$

$$6. \mu^- \rightarrow e^+ \bar{\nu}_e$$

$$7. \Delta^+ \rightarrow p \pi^0$$

$$8. \bar{\nu}_e p \rightarrow n e^+$$

1. * φορτίο

2. ΗΜ

3. * Ενέργεια

4. ασθενής

5. ΗΜ, ασθενής

6. * λεπτονικός

7. ισχυρή

8. ασθενής

$$9. pp \rightarrow \Sigma^+ n K^0 \pi^+ \pi^0$$

$$10. p \rightarrow e^+ \gamma$$

$$11. pp \rightarrow ppp \bar{p}$$

$$12. \pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$$

$$13. p \bar{p} \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0$$

$$14. \Xi^- \rightarrow \Lambda \pi^-$$

$$15. \Sigma^- \rightarrow n e \bar{\nu}_e$$

9. ισχυρή

10. * βαρυονικός,
* λεπτονικός

11. ισχυρή

12. ΗΜ

13. ισχυρή

14. ασθενής

15. ασθενής

Βάζω σε πίνακα τις ποσότητες / κβαντικούς αριθμούς που διατηρούνται στις διάφορες αλληλεπιδράσεις. Πρώτα βάζω τα πιό εύκολα να ελγχθούν και σταματάω με το πρώτο που παραβιάζεται!

αντίδραση	Φορτίο	Βαρυονικός	Λεπτονικός	Ενέργεια	Strangeness	Charmness
4	OK	OK	OK	OK	X κατά $\Delta S=1$, οπότε ασθενής	

Άσκηση 5

Ποιές από τις παρακάτω διασπάσεις επιτρέπονται και ποιές όχι.

Αν όχι, γιατί? Αν ναι, ποιά αλληλεπίδραση είναι υπεύθυνη (ηλεκτρομαγνητική, ασθενής, ισχυρή)?

1. $n \rightarrow \pi^0 \pi^0$

2. $\mu^- \rightarrow e^+ \gamma$

3. $\pi^- p \rightarrow \Sigma^- K^+ \pi^0$

4. $K^- n \rightarrow \Xi^- \bar{K}^0$

5. $\mu^+ \rightarrow e^+ \bar{\nu}_e \bar{\nu}_\mu$

6. $p \bar{p} \rightarrow B^+ B^-$

7. $\pi^0 \rightarrow e^+ e^- e^+ e^-$

Δίνονται:

$$B^- = \bar{u} b, B^0 = \bar{d} b$$

$$B^+ = u \bar{b}, \bar{B}^0 = d \bar{b}$$

Αν επιτρέπεται:

- αν έχουμε νεutrino, είναι ασθενής
- αν έχουμε φωτόνιο, είναι ηλεκτρομαγνητική
- αν έχουμε καθαρή αλλαγή γεύσης, αλλά κατά 1 μονάδα μόνο (π.χ., $\Delta S=1$, $\Delta C=1$) είναι ασθενής. Αν η αλλαγή γεύσης είναι κατά 2 μονάδες (π.χ., $\Delta S=2$) τότε δεν γίνεται!
- αν παράγονται ζεύγη νέας γεύσης είναι κυρίως ισχυρή (με τις άλλες, αν επιτρέπονται, να γίνονται με πολύ μικρότερη πιθανότητα)

Άσκηση 5 - Λύσεις

Ποιές από τις παρακάτω διασπάσεις επιτρέπονται και ποιές όχι.

Αν όχι, γιατί? Αν ναι, ποιά αλληλεπίδραση είναι υπεύθυνη (ηλεκτρομαγνητική, ασθενής, ισχυρή)?

1. $n \rightarrow \pi^0 \pi^0$

2. $\mu^- \rightarrow e^+ \gamma$

3. $\pi^- p \rightarrow \Sigma^- K^+ \pi^0$

4. $K^- n \rightarrow \Xi^- \bar{K}^0$

5. $\mu^+ \rightarrow e^+ \bar{\nu}_e \bar{\nu}_\mu$

6. $p \bar{p} \rightarrow B^+ B^-$

7. $\pi^0 \rightarrow e^+ e^- e^+ e^-$

1. * βαρυονικός

2. * ηλεκτρονικός λεπτονικός αριθμός

* μιονικός λεπτονικός αριθμός

3. ισχυρή (κυρίως)

4. * $\Delta S = -2$ (άρα δεν γίνεται ούτε με ασθενή)

5. * λεπτονικός

6. ισχυρή (κυρίως)

7. ηλεκτρομαγνητική

Αν επιτρέπεται:

- αν έχουμε νεutrino, είναι ασθενής
- αν έχουμε φωτόνιο, είναι ηλεκτρομαγνητική
- αν έχουμε καθαρή αλλαγή γεύσης, αλλά κατά 1 μονάδα μόνο (π.χ., $\Delta S=1$, $\Delta C=1$) είναι ασθενής. Αν η αλλαγή γεύσης είναι κατά 2 μονάδες (π.χ., $\Delta S=2$) τότε δεν γίνεται!
- αν παράγονται ζεύγη νέας γεύσης είναι **κυρίως ισχυρή** (με τις άλλες, αν επιτρέπονται, γίνεται με πολύ μικρότερη πιθανότητα)

Μονάδες

- Οι ταχύτητες που συναντάμε στη φυσική των σωματιδίων είναι κοντά στο c .

$$c = 3 \times 10^8 \text{ m/s} \equiv \text{μονάδα ταχύτητας} \equiv 1$$

- Οι στροφορμές, δράσεις, γενικά το γινόμενο $x p \sim \hbar$ ή $E t \sim \hbar$
 $\hbar c = 197 \text{ MeV fm}$, όπου: $\hbar = \frac{h}{2\pi} \equiv \text{μονάδα δράσης (ενέργειας} \times \text{χρόνου)} \equiv 1$

- Φυσικές διαστάσεις είναι το c και το $\hbar$.
 - Είναι βολικό ένα σύστημα μονάδων όπου $c = \hbar = 1$

- $M = E/c^2$ $[E]$,
- $L = \hbar c/E$ $[E^{-1}]$
- $T = \hbar/E$ $[E^{-1}]$,

$$\alpha = \frac{e^2}{4\pi \hbar c} = \frac{1}{137}$$

Μονάδες

Quantity N.U. Conv. Factor to SI

E	GeV	$1\text{GeV} = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{J}$
P	GeV	
M	GeV	$1\text{kg} = 5.61 \cdot 10^{26} \text{GeV}$
length	$1/\text{GeV}$	$1\text{m} = 5.07 \cdot 10^{15} \text{GeV}^{-1}$
time	$1/\text{GeV}$	$1\text{sec} = 1.52 \cdot 10^{24} \text{GeV}^{-1}$
J	dimensionless	
Q	dimensionless	

Μονάδες

Αυτό μας επιτρέπει

- Να εκφράζουμε όλα τα φυσικά μεγέθη σε μονάδες ενέργειας:
απόσταση είναι $[E]^{-1}$. Ορμή είναι $[E]$. Κοκ.

- Τα φυσικά μεγέθη να εκφράζονται σε “λογικές” μονάδες

Φυσική μονάδα μήκους: μήκος κύματος Compton: $\hbar / m_0 c = 1$

Φυσική μονάδα χρόνου: $\tau = \hbar / m_0 c^2 = 1$

Φυσική μονάδα ενέργειας: $E = m_0 c^2 = 1$

Μάζα πρωτονίου: 10^{-24} g $\rightarrow$ Ενέργεια ηρεμίας ≈ 1 GeV.

Άρα, αν πάρουμε ως ενέργεια αναφοράς το 1 GeV, όλα τα φυσικά μεγέθη

είναι ποσότητες κοντά στη μονάδα.

Ηλεκτρόνιο: 2000 φορές πιο ελαφρύ $\rightarrow$ Ενέργεια ηρεμίας ≈ 0.5 MeV

Περιγραφή σε βασικό επίπεδο - Διαγράμματα Feynman

- Έχουμε μιά πιο βασική ερμηνεία του συμβαίνει στις αντιδράσεις και διασπάσεις που βλέπουμε στη φύση
- Αλληλεπιδασίες μέσω μποζονίων διαδοτών των διαφόρων δυνάμεων
 - ΗΜ : γ
 - Ασθενείς : W^+ , W^- , Z^0
 - Ισχυρές: g

και

Αναπαράσταση με διαγράμματα Feynman

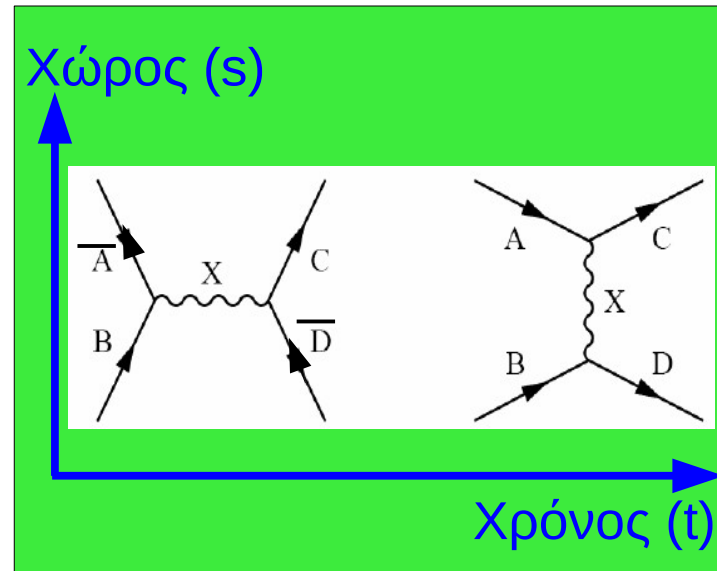
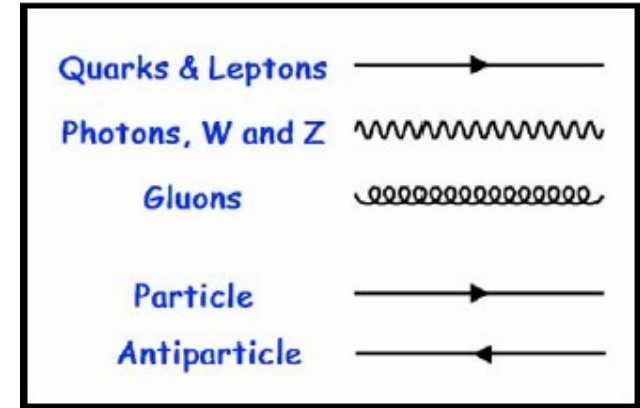
Διαγράμματα Feynman

Βασικοί κανόνες σε κάθε κόμβο:

- E , p διατηρείται
- Q διατηρείται
- Σπιν διατηρείται
- Βαρυονικός Αριθμός
- Λεπτονικός Αριθμός

Συμβολισμοί πάνω στο διάγραμμα:

- Φερμιόνια: θετικός χρόνος $\longrightarrow$
- anti-φερμιόνια: αρνητικός χρόνος $\longleftarrow$
π.χ., το αντι-A έρχεται από αντίθετη κατεύθυνση και εξαϋλώνεται με το B. Όμως το αντι-A συμβολίζεται να κινείται προς το παρελθόν
- Μποζόνια $\left\{ \begin{array}{l} \text{~~~~~} \\ \text{~~~~~} \end{array} \right.$
- Το σημείο σύζευξης (κόμβος) δηλώνει την ισχύ της σύζευξης

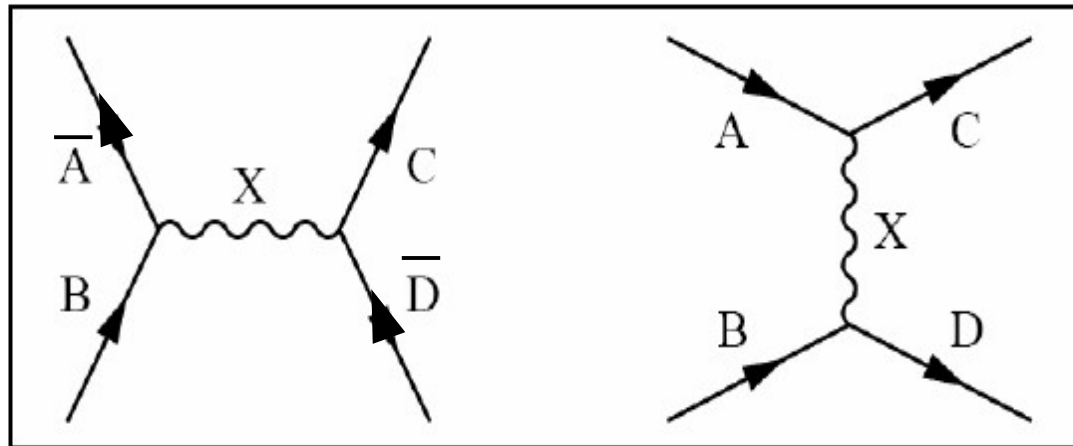


Διαγράμματα Feynman

Γενικές Ιδιότητες

Ως επί το πλείστον τα διαγράμματα Feynman παριστούν διεργασίες της μορφής:

$$A + B \rightarrow C + D$$

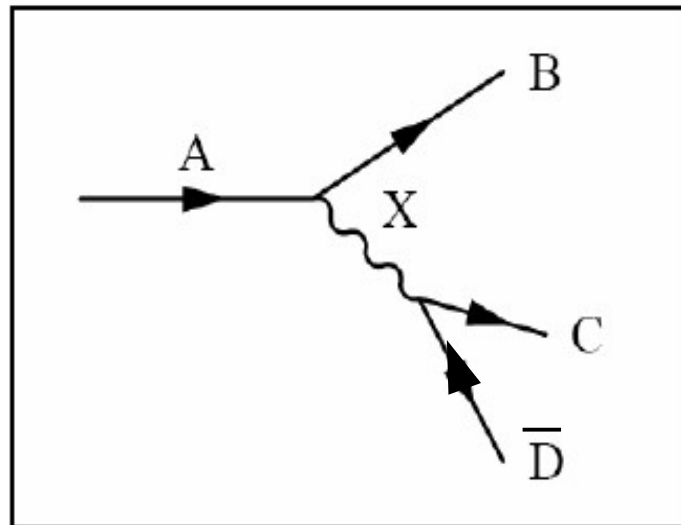


Διαγράμματα Feynman

Γενικές Ιδιότητες

ή της μορφής:

$$A \rightarrow B + C + D$$



A, B, C, D

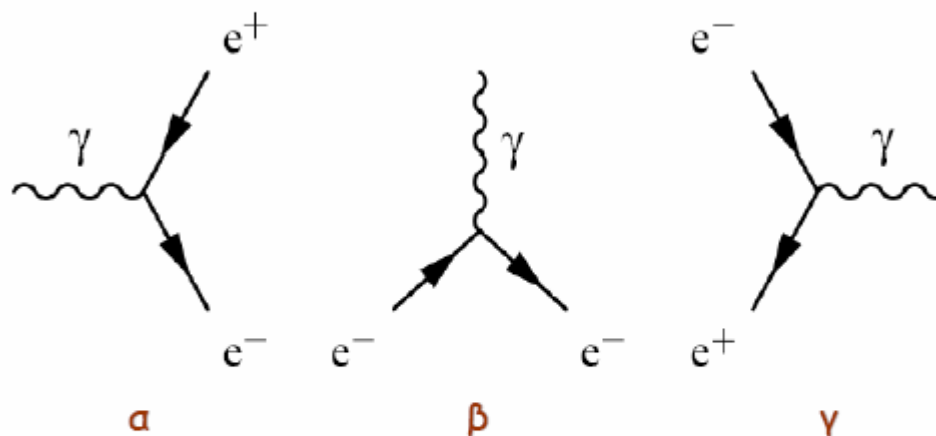
- Κουάρκ
- Λεπτόνια
- Αντικουάρκ
- Αντιλεπτόνια

X

- φωτόνιο (γ)
- γλουόνιο (g)
- $W^+ W^- Z^0$

Διαγράμματα Feynman

Ηλεκτρομαγνητικές Αλληλεπιδράσεις

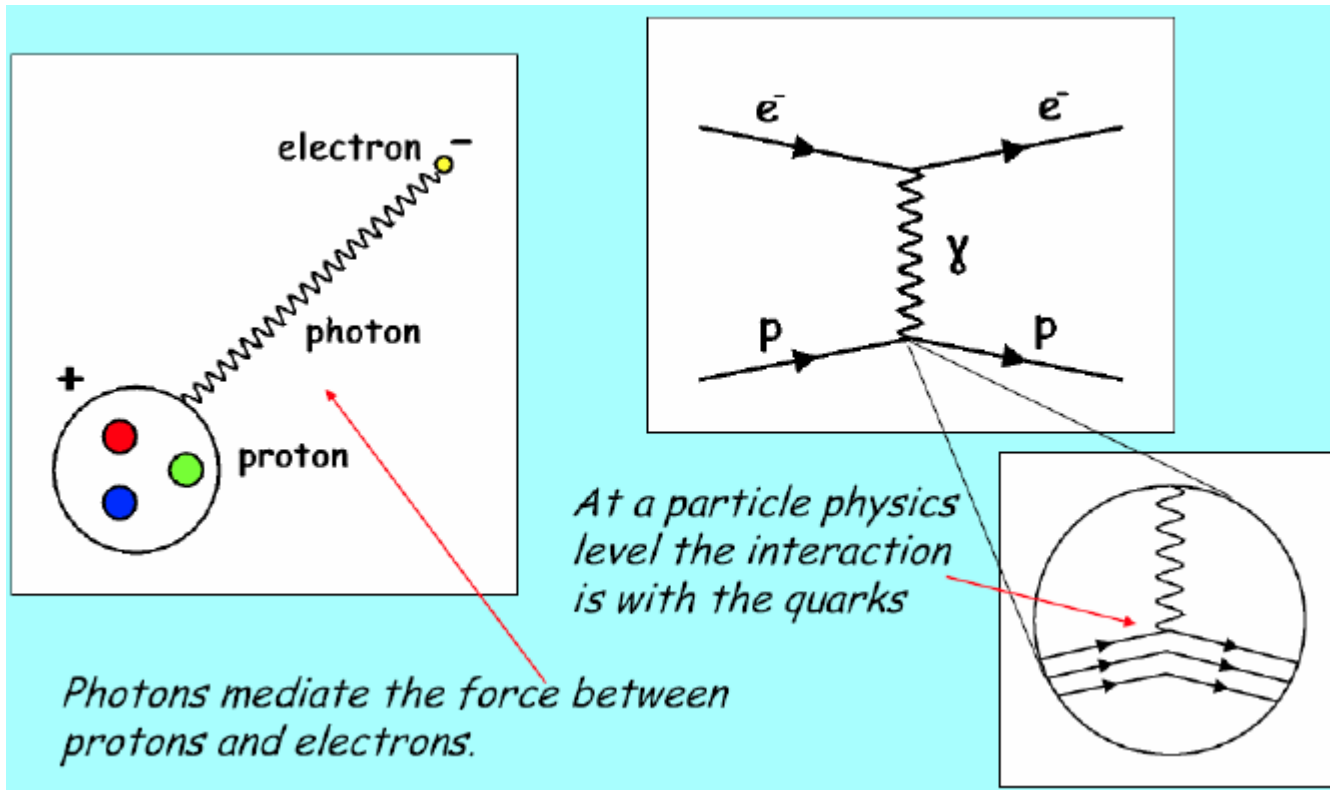


(α) Δίδυμη Γένεση

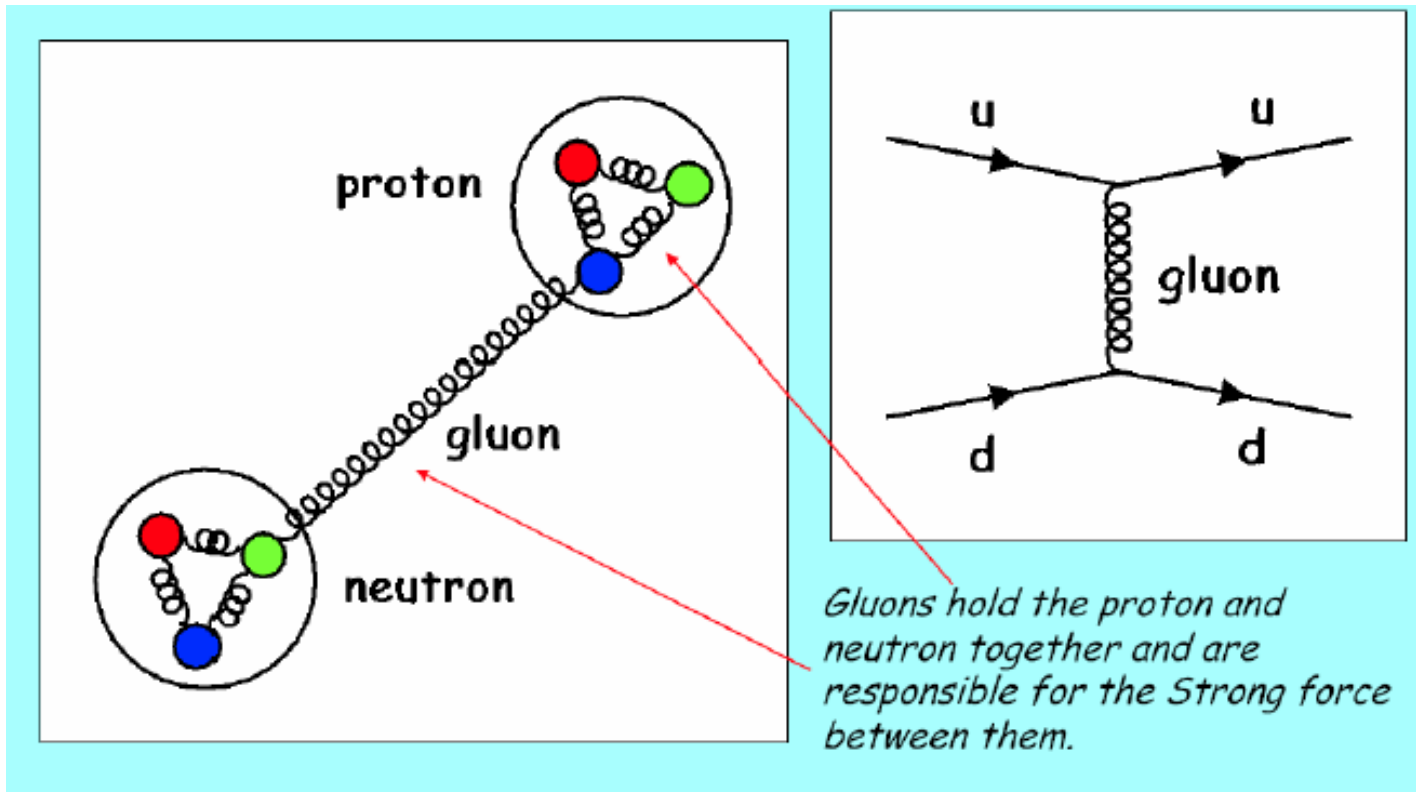
(β) Φωτοηλεκτρικό φαινόμενο

(γ) Εξαϋλωση ποζιτρονίου

Ηλεκτρομαγνητικές Αλληλεπιδράσεις



Ισχυρές Αλληλεπιδράσεις

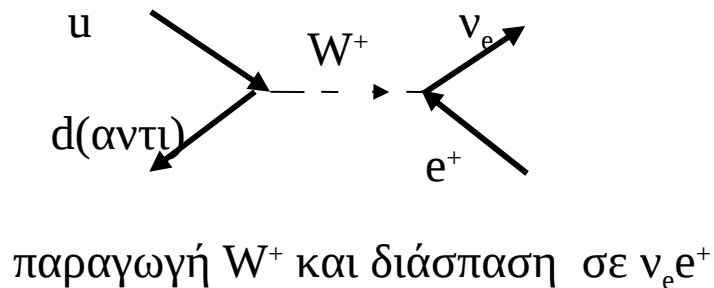
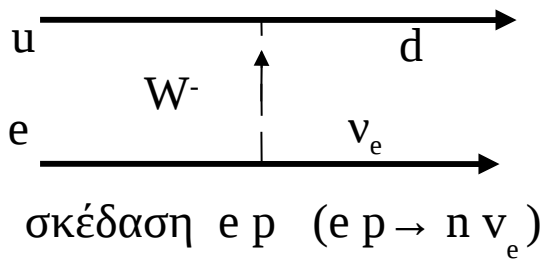


Οι διαδότες των ασθενών δυνάμεων

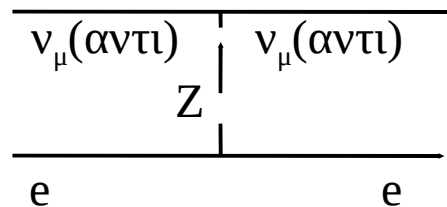
- Ανταλλαγή $W^\pm \Rightarrow$ μεταβολή του φορτίου των κουάρκ ή λεπτονίων που συμμετέχουν :

$$- u \rightarrow d, e^- \rightarrow \nu_e$$

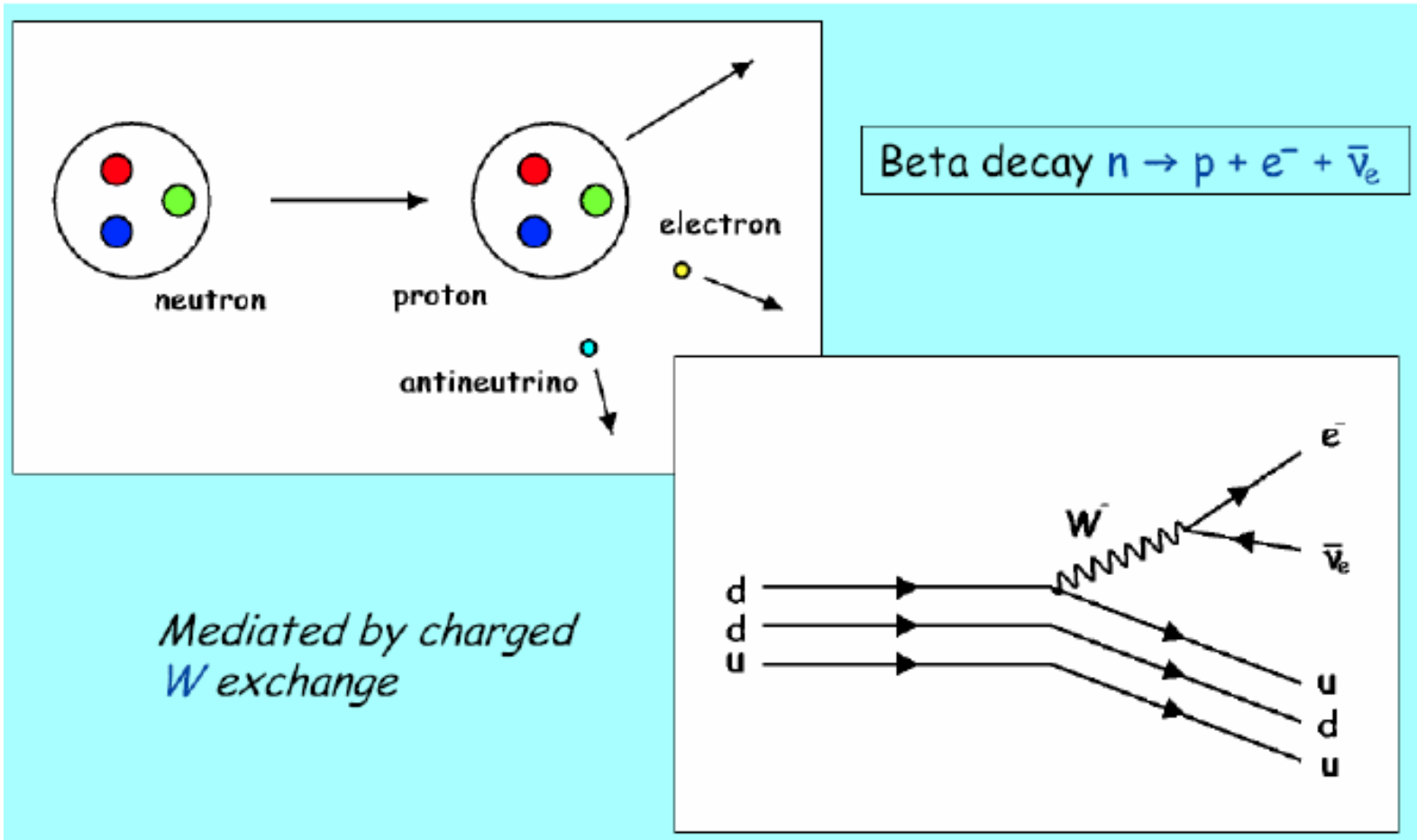
[ανταλλαγή W^- , W^+ αντίστοιχα] $\rightarrow$ φορτισμένα ασθενή ρεύματα



- Ανταλλαγή $Z^0 \rightarrow$ ουδέτερα ασθενή ρεύματα



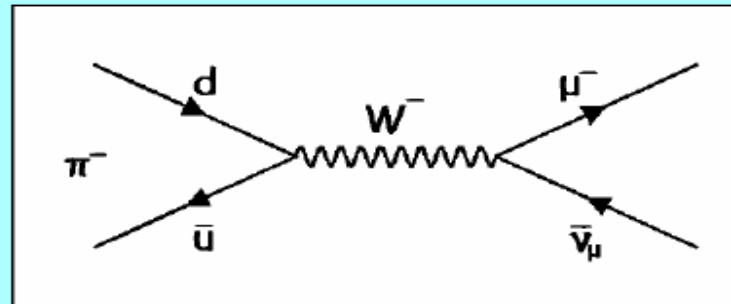
Ασθενείς Αλληλεπιδράσεις



Ασθενείς Αλληλεπιδράσεις

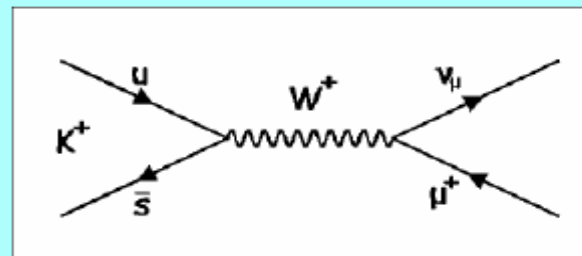
$\Delta S = 0$ (No strangeness change)

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$$

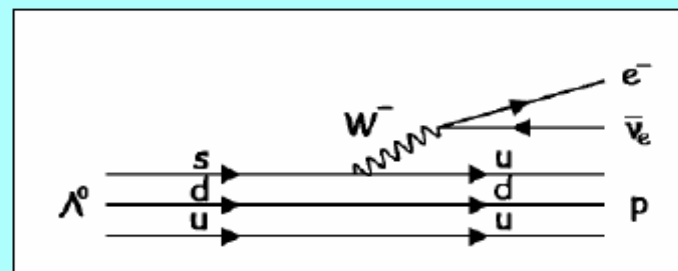


$\Delta S = 1$ (Strangeness changes)

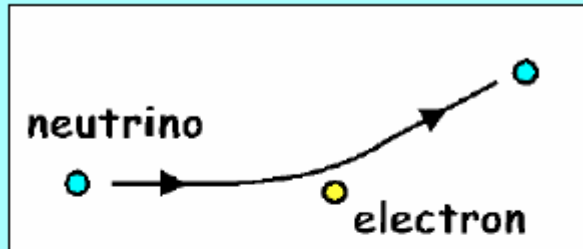
$$K^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$$



$$\Lambda^0 \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$$

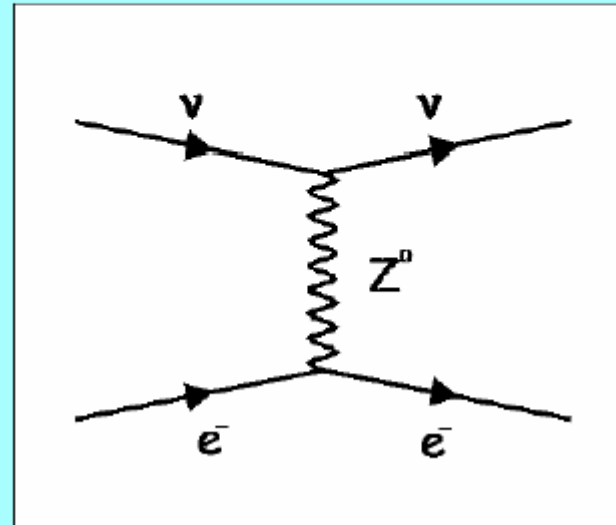


Ασθενείς Αλληλεπιδράσεις



*Mediated by neutral
 Z exchange*

Neutrino scattering
off an electron



Άσκηση 6

Αυτές οι αντιδράσεις επιτρέπονται: α) Τι είδος είναι τα νετρίνα? β) Ποιά η σύσταση κουάρκ των αδρονίων, γ) Κάνετε τα διαγράμματα Feynman

$$\pi^+ \rightarrow \pi^0 e^+ \nu$$

$$\nu p \rightarrow n e^+$$

$$\mu^+ \rightarrow e^+ \nu \nu$$

$$\nu {}^{37}_{17}\text{Cl} \rightarrow {}^{37}_{18}\text{Ar} e^-$$

$$\mu^- \rightarrow e^- \nu \nu$$

$$\nu p \rightarrow \mu^- n$$

$$K^+ \rightarrow \pi^0 e^+ \nu$$

$$\nu n \rightarrow e^- p$$

$$\bar{K}^0 \rightarrow \pi^+ e^- \nu$$

$${}^3_1\text{H} \rightarrow {}^3_2\text{He} e^- \nu$$

$$\Sigma^- \rightarrow n \mu^- \nu$$

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu$$

$$\Sigma^+ \rightarrow \Lambda^0 e^+ \nu$$

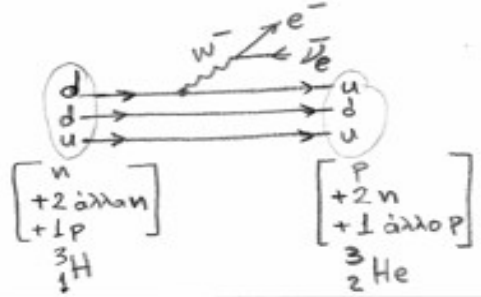
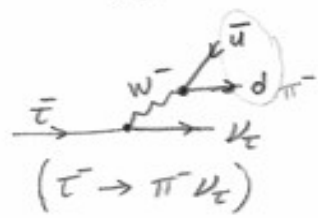
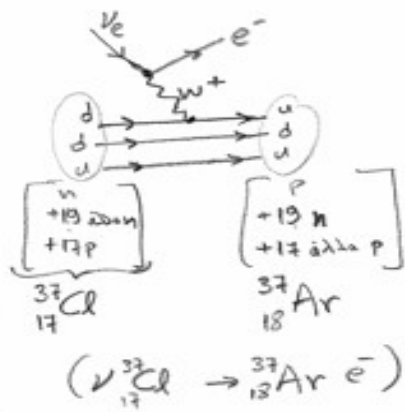
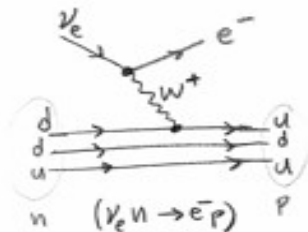
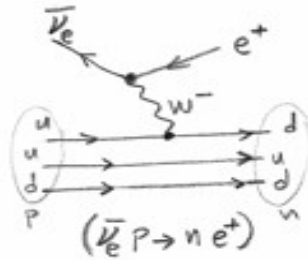
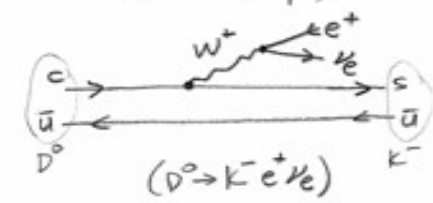
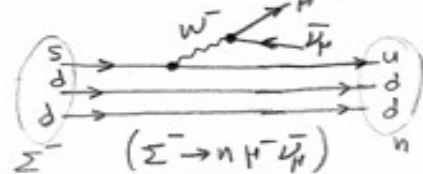
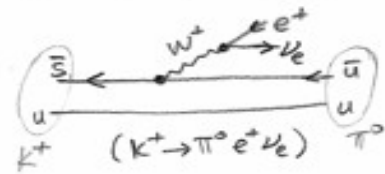
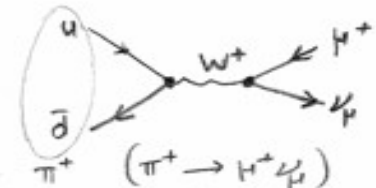
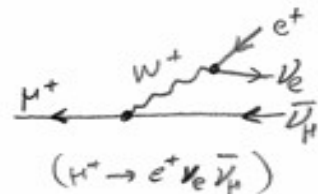
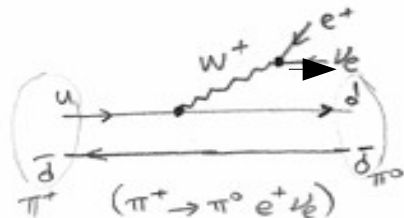
$$\pi^- \rightarrow e^- \nu$$

$$D^0 \rightarrow K^- e^+ \nu$$

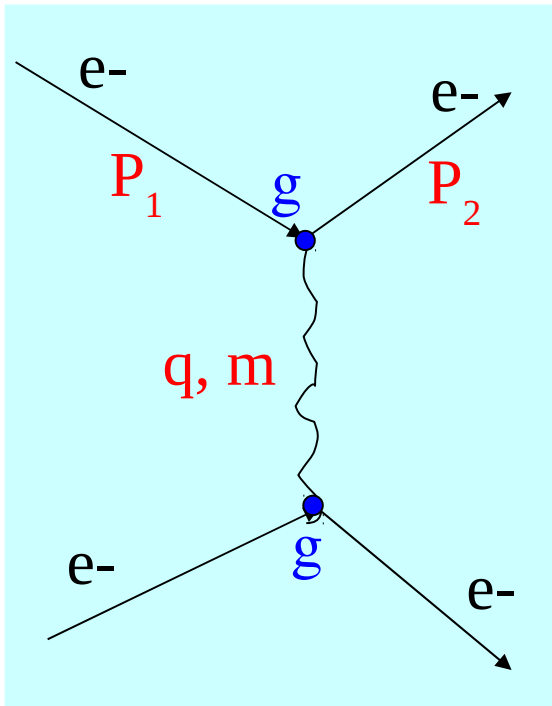
$$\tau^- \rightarrow \pi^- \nu$$

Άσκηση 6 - Λύση

Αυτές οι αντιδράσεις επιτρέπονται: α) Τι είδος είναι τα νετρίνα? β) Ποιά η σύσταση κουάρκ των αδρονίων, γ) Κάνετε τα διαγράμματα Feynman



Μποζονικός διαδότης και ισχύς σύζευξης



- Μεταφορά Ενέργειας & ορμής (τετρα-ορμής):

$$q = P_1 - P_2$$

- Διαταραχή κυματοσυνάρτησης λόγω σκέδασης -> Πλάτος σκέδασης

$$f(q) = \frac{g^2}{q^2 + m^2}$$

- g η ισχύς της σύζευξης του μποζονίου (διαδότη) με το σκεδαζόμενο σωματίο
- $q^2 + m^2$ ορμή και μάζα του διαδότη

- Μέτρο της πιθανότητας αλληλεπίδρασης είναι η ενεργός διατομή (σ) της αλληλεπίδρασης:

$$\sigma \sim |f(q)|^2$$

Ηλεκτρομαγνητικές Αλληλεπιδράσεις

Σταθερά σύζευξης α

Μια αδιάστατη ποσότητα που μετράει την ένταση της ζεύξης.

Ο λόγος της ηλεκτροστατικής ενέργεια απώθησης δύο e σε απόσταση ίση με το ισοδύναμο μήκος Compton προς την ενέργεια που αντιστοιχεί στην μάζα ηρεμίας του e .

$$\alpha = \frac{\frac{e^2}{4\pi \left(\frac{\hbar}{mc} \right)}}{mc^2} = \frac{e^2}{4\pi \hbar c} = \frac{1}{137}$$

Η ποσότητα $\alpha^{1/2} \sim e$ εκφράζει την πιθανότητα για την εκπομπή ή απορρόφηση ενός φωτονίου.

$$\alpha = \frac{e^2}{4\pi \hbar c} = \frac{e^2}{4\pi} \rightarrow \sqrt{\alpha} = \frac{e}{4\pi}$$

Ηλεκτρομαγνητικές Αλληλεπιδράσεις

Η ισχύς της αλληλεπίδρασης μεταξύ φορτισμένων σωματίων και φωτονίων είναι όσο το φορτίο του ηλεκτρονίου: $g = e \sim \sqrt{\alpha}$:
(η σταθερά της λεπτής υφής)

Σε κάθε κόμβο, ισχύς σύζευξης $\sim \sqrt{\alpha}$

Πιθανότητα σύζευξης $\sim \alpha$

Φωτοηλεκτρικό φαινόμενο :

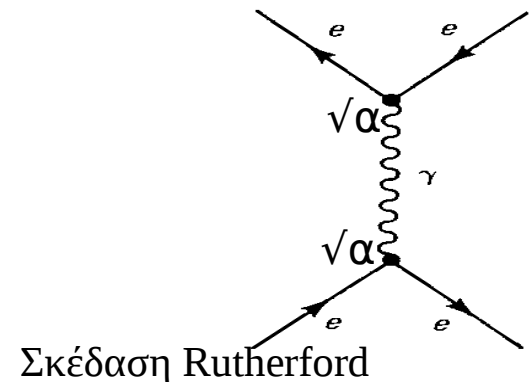
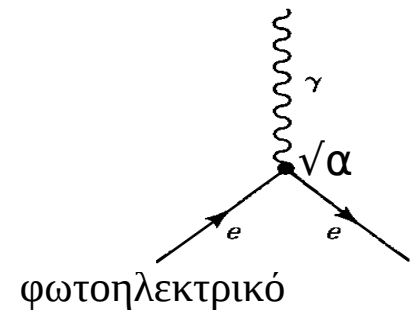
πλάτος της αλληλεπίδρασης $\sim \sqrt{\alpha}$

=> ενεργός διατομή: $\sim \alpha$ (1ης τάξης)

Σκέδαση Coulomb:

πλάτος της αλληλεπίδρασης $\sim \alpha$

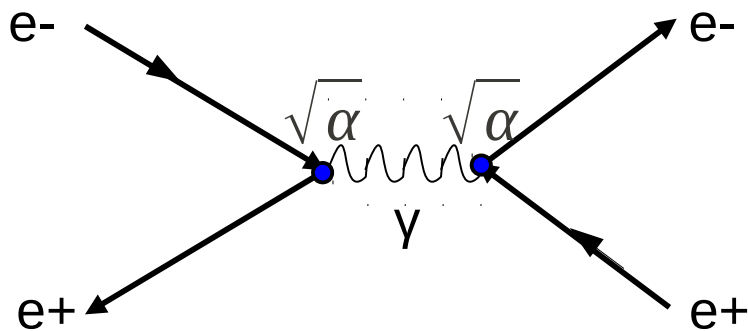
=> ενεργός διατομή: $\sim \alpha^2$ (2ης τάξης)



Άσκηση 7

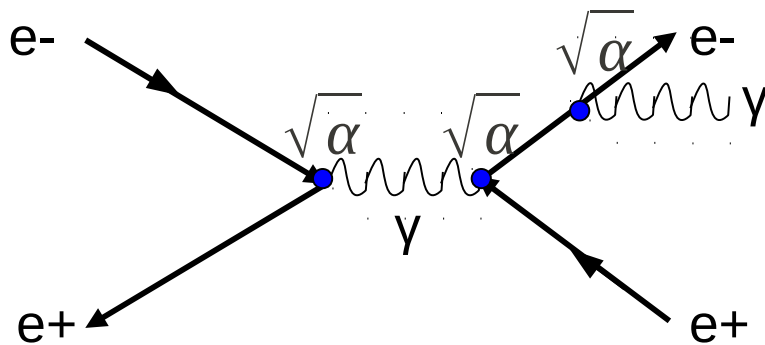
Ποιά απ' τις 2 εκδοχές είναι η πιθανότερη να γίνει? Κατά πόσο σε σχέση με την άλλη?

Διαφορά στην πιθανότητα να συμβούν οι δύο αυτές εκδοχές:



ενεργός διατομή $\sigma \sim \alpha^2$
 $e^+ e^- \rightarrow e^+ e^-$

Το πάνω είναι
πιθανότερο
(κατά $1/\alpha = 137$) να
εκπέμψει φωτόνιο



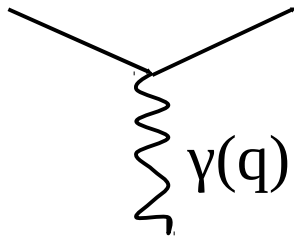
ενεργός διατομή $\sigma \sim \alpha^3$
 $e^+ e^- \rightarrow e^+ e^- \gamma$

Οι διαδότες των ασθενών δυνάμεων

- Τα μποζόνια βαθμίδας (gauge bosons): W^+ , W^- , Z^0
- Με μάζες : W^+ , W^- : $80 \text{ GeV}/c^2$,
 Z^0 : $90 \text{ GeV}/c^2$

Ηλεκτρομαγνητικές Δυνάμεις

- κόμβος (διάγραμμα Feynman)



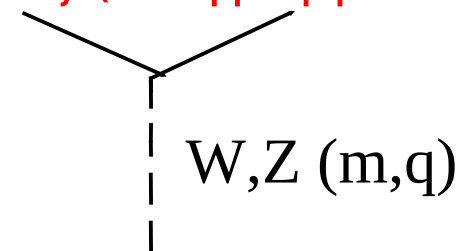
- Σταθερά Σύζευξης

$$\alpha = e^2/4\pi\hbar c,$$

$$f(q) = \frac{e^2}{q^2}$$

Ασθενείς Δυνάμεις

- κόμβος (διάγραμμα Feynman)



- Σταθερά Σύζευξης

$$a_w = g^2/4\pi\hbar c,$$

$$f(q) = \frac{g^2}{q^2 + m^2}$$

Ασθενείς Αλληλεπιδράσεις

Στην ηλεκτρασθενή θεωρία των Glashow, Salam και Weinberg (1968) προτάθηκε η ισότητα της σταθεράς σύζευξης g των $W^\pm$ και Z^0 με τα λεπτόνια και τα κουάρκ, με την αντίστοιχη σταθερά των φωτονίων:

$$g = e$$

$$f(q^2) = \frac{g^2}{q^2 + M_{W,Z}^2}$$

Για $q^2 \rightarrow 0$

$$f(q^2 \rightarrow 0) = \frac{g^2}{M_{W,Z}^2} = G \approx 10^{-5} \text{ GeV}^{-2}$$

$$M_{W,Z} = \frac{e}{\sqrt{G}} = \sqrt{\frac{4\pi\alpha}{G}} \approx 90 \text{ GeV}$$

Η ασθενής σύζευξη εμφανίζεται με σταθερά G (δηλ., μικρότερη από την α του ηλεκτρομαγνητισμού κατά $M_{W,Z}^2$) λόγω της μάζας των διαδοτών

Ασθενείς Αλληλεπιδράσεις

- Κουάρκς και λεπτόνια φέρουν 'ασθενές' φορτίο .
- Τα νετρίνο έχουν μόνο ασθενές: ΔΕΝ έχουν ούτε ισχυρό, ούτε ηλεκτρομαγνητικό φορτίο
- Οι ασθενείς δυνάμεις είναι 10^3 - 10^5 φορές ασθενέστερες από τις ηλεκτρομαγνητικές → μικρότερη πιθανότητα σύζευξης
- Μπορούν να παραβιάζουν τις γεύσεις $\Delta C, \Delta S \neq 0$ (αλλά μέχρι $\Delta C, \Delta S = \pm 1$)
- Περιλαμβάνουν είτε μόνο κουάρκς ή κουάρκς και λεπτόνια
- Παραδείγματα: διάσπαση νετρονίου, σκέδαση αντρινετρίνο-πρωτονίου
 $\Sigma^- \rightarrow n + \pi^-$ ($\tau \approx 10^{-10}$ sec) → ασθενής ($\Delta S=1$)
 $\Sigma^0 \rightarrow \Lambda + \gamma$ ($\tau \approx 10^{-19}$ sec) → ηλεκτρομαγνητική

Χρόνος ζωής (τ) και πλάτος (Γ) σωματίου

Πεπερασμένος χρόνος ζωής σημαίνει αβεβαιότητα στην τιμή της ενέργειας (μάζας) ενός σωματιδίου

- αρχής της αβεβαιότητας $\Delta E \Delta t = \hbar$,
όπου $\Delta E = (\Delta m)c^2$, και $\Delta t = \tau \rightarrow$

$$\tau = \frac{\hbar}{(\Delta m)c^2} = \frac{\hbar}{\Gamma}$$

$$\tau = \frac{1}{\Gamma}$$

- Η διασπορά στην κατανομή της μάζας είναι το πλάτος Γ του σωματιδίου και είναι μέτρηση του χρόνου ζωής τ
- Για σωματίδια που διασπώνται με τις ισχυρές αλληλεπιδράσεις, $\tau \sim 10^{-23}$ s είναι περίπου όσο χρόνο χρειάζεται το φως για να διαπεράσει ένα αδρόνιο (διάμετρος $\sim 1\text{fm} \sim 10^{-15}\text{m}$). Προφανώς και δεν μπορεί να μετρηθεί μια τροχιά ενός σωματίου με χρόνο ζωής $10^{-23}\text{s} \dots$
- Οπότε, μετρώντας τα προϊόντα της διάσπασης και με την αρχή διατήρησης ενέργεια και ορμής, κατασκευάζουμε τη **μάζα (ενέργεια) του διασπαζόμενου σωματιδίου**, η οποία έχει μια κατανομή κι από εκεί μπορούμε να βρούμε το Γ

Χρόνος ζωής (τ), πλάτος (Γ) σωματίου και σταθερές
σύζευξης τρω διαφόρων αλληλεπιδράσεων

$\Gamma = 1/\tau =$ πιθανότητα διάσπασης ανά μονάδα χρόνου



Άρα, όπως και η ενεργός διατομή (που είναι μέτρο της
πιθανότητας να γίνει μιά σκέδαση ή εξαύλωση), έτσι και το Γ
είναι ανάλογο του “ a ”²

(όπου “ a ”² = a^2 ή a_w^2 ή a_s^2 : ανάλογα αν η αλληλεπίδραση
είναι ηλεκτρομαγνητική, ασθενής ή ισχυρή, αντίστοιχα)

$$\frac{1}{\tau} = \Gamma \sim a^2$$

Άσκηση 8

Συγκρίνετε τις σταθερές σύζευξης για τις εξής διασπάσεις

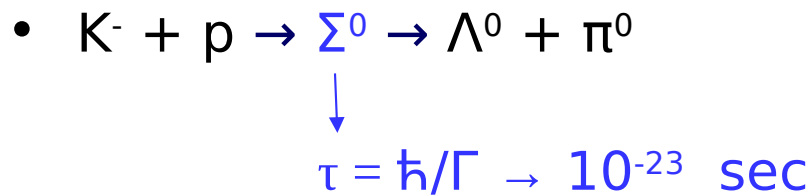
- $K^- + p \rightarrow \Sigma^0 \rightarrow \Lambda^0 + \pi^0$ $\tau = 10^{-23} \text{ sec}$
- $\Sigma^0 \rightarrow \Lambda^0 + \gamma$ $\tau = 10^{-19} \text{ sec}$
- $\Sigma^- \rightarrow n + \pi^-$ $(\tau \approx 10^{-10} \text{ sec})$

=> σημειώσεις στοιχειωδών, παράγραφο 1.8.

Άσκηση 8 – λύση

Και Ισχυρές Αλληλεπιδράσεις

- Οι ισχυρές αλληλεπιδράσεις συμβαίνουν μεταξύ κουάρκ



$$\Rightarrow (a_s / a) = (10^{-19} / 10^{-23})^{1/2} \approx 100 \rightarrow a_s = g_s^2 / 4\pi\hbar c$$

g_s είναι το αντίστοιχο φορτίο για τις ισχυρές αλληλεπιδράσεις:

χρώμα $\Leftrightarrow$ ισχυρό φορτίο

$\Rightarrow$ Κουάρκ : **Red**, **Green**, **Blue** (R, G, B)

$\Rightarrow$ Αντικουάρκ: anti-**Red**, anti-**Green**, anti-**Blue** : R(bar), G(bar), B(bar)

Βασικά χαρακτηριστικά των δυνάμεων

	Ισχυρή	Ασθενής	Ηλεκτρο- μαγνητική	Βαρυτική
Σταθερά σύζευξης	$a_s = 0.1-1$	$G = G_F = 10^{-5} \text{ GeV}^{-2}$	$a = 1/137$	$KM^2/\hbar c = 0.5 \times 10^{-38}$
Τυπική ενεργός διατομή	10 mb	10 pb	10^{-2} mb	
Τυπικός χρόνος ζωής (sec)	10^{-23}	$10^{-10} - 10^{-8}$ (στις ασθενείς υπάρχουν μεγάλες διαφοροποιήσεις στους χρόνους ζωής)	10^{-20}	

Ο χρόνος ζωής είναι ένδειξη για το ποιά αλληλεπίδραση είναι υπεύθυνη για τη διάσπαση, και τι “α” (σταθερά σύζευξης) έχει αυτή η αλληλεπίδραση. Να έχετε υπ’ όψιν σας αυτές τις τάξεις μεγέθους.

Πάντα χρήσιμα: Σχετικιστική κινηματική και μονάδες

Σχετικιστική κινηματική:

$$\begin{array}{c} \text{ενέργεια} \nearrow E = mc^2 \\ \text{μάζα} \nearrow \\ c = \text{ταχύτητα του φωτός} \end{array}$$



Η μάζα είναι μια μορφή ενέργειας

γενικά, με κινητική ενέργεια T , έχουμε: $E = T + mc^2$

$$E = \gamma mc^2, \text{ όπου } \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}}, \text{ και } \beta = v/c, \text{ με } v = \text{ταχύτητα σωματιδίου}$$

$$p = \gamma mv = \gamma \beta mc, \text{ όπου } p = \text{ορμή}$$

$$E^2 = (pc)^2 + (mc^2)^2 \quad \rightarrow \quad E [\text{MeV}], p [\text{MeV}/c], m [\text{MeV}/c^2]$$

Μονάδες:

$$c = 3 \times 10^8 \text{ m/s} \equiv \text{μονάδα ταχύτητας} \equiv 1$$

$$\hbar c = 197 \text{ MeV fm}, \text{ όπου: } \hbar = \frac{h}{2\pi} \equiv \text{μονάδα δράσης (ενέργειας} \times \text{χρόνου)} \equiv 1$$

$$\alpha = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 \hbar c} = \frac{1}{137}$$

Σημείωση: με $c=1$, έχουμε: $E^2 = p^2 + m^2$, κλπ.

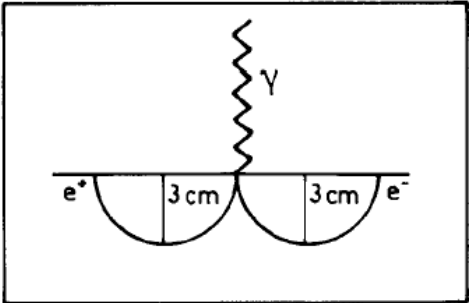
Έχοντας 4.5 GeV διαθέσιμη ενέργεια, ποιο είναι το βαρύτερο ισότοπο που μπορεί να κανείς να παράγει θεωρητικά;

1. ^2D
2. ^3He
3. ^3T

Λύση

Με 4.5 GeV διαθέσιμη ενέργεια μπορεί κανείς να παράγει βαρυόνια με ενέργεια μέχρι 2.25 GeV. Για να διατηρείτε ο βαρυονικός αριθμός θα πρέπει να παράγονται ο ίδιος αριθμός βαρυονίων και αντιβαρυονίων ταυτόχρονα. Άρα τελικά μόνο η μισή ενέργεια είναι διαθέσιμη για την παραγωγή βαρυονίων. Από τα τρία ισότοπα μόνο το ^2D έχει μάζα ηρεμίας μικρότερη των 2.5 GeV. Η σωστή απάντηση είναι (1)

A certain electron-positron pair produced cloud chamber tracks of radius of curvature 3 cm lying in a plane perpendicular to the applied magnetic field of magnitude 0.11 Tesla (Fig. 4.3). What was the energy of the γ -ray which produced the pair?



$$\begin{aligned} pc &= ecB\rho \\ evB &= \frac{m\gamma v^2}{\rho} = \frac{pv}{\rho}, & &= \frac{1.6 \times 10^{-19} \times 3 \times 10^8}{1.6 \times 10^{-13}} B\rho \\ & & &= 300B\rho \end{aligned}$$

with B in Tesla, ρ in meter and p in MeV/ c . Hence, on putting $c = 1$, the momentum of the e^+ or e^- is

$$p = 300B\rho = 300 \times 0.11 \times 0.03 = 0.99 \text{ MeV}/c,$$

and its energy is

$$E = \sqrt{p^2 + m_e^2} = \sqrt{0.99^2 + 0.51^2} = 1.1 \text{ MeV}.$$

Therefore the energy of the γ -ray that produced the e^+e^- pair is approximately

$$E_\gamma = 2E = 2.2 \text{ MeV}.$$

Σε μια σύγκρουση μεταξύ ενός ακίνητου πρωτονίου και κινούμενου πρωτονίου παράγεται σωματίδιο με μάζα ηρεμίας M επιπλέον των δύο πρωτονίων. Να βρεθεί η ελάχιστη ενέργεια που πρέπει να έχει το κινούμενο πρωτόνιο ώστε να είναι δυνατή αυτή η αντίδραση.

Λύση:
Στο ενεργειακό κατώφλι της αντίδρασης

$$p + p \rightarrow M + p + p,$$

τα σωματίδια στο δεξιό σκέλος παράγονται σε ηρεμία. Η ενέργεια και η ορμή του κινούμενου σωματιδίου είναι E_p p αντίστοιχα. Η αναλλοίωτη μάζα του συστήματος στο κατώφλι είναι :

$$S = (E_p + m_p)^2 - p_p^2 = (2m_p + M)^2 .$$

$$E_p^2 = m_p^2 + p_p^2 ,$$

$$\begin{aligned} E_p &= \frac{(2m_p + M)^2 - 2m_p^2}{2m_p} \\ &= m_p + 2M + \frac{M^2}{2m_p} . \end{aligned}$$

Ένα σωματίδιο με μάζα ηρεμίας m και κινητική ενέργεια διπλάσια της μάζας ηρεμίας του συγκρούεται με ένα ακίνητο σωματίδιο ίσης μάζας. Τα δύο σωματίδια συνδυάζονται και παράγουν ένα νέο σωματίδιο. Να υπολογιστεί η μάζα ηρεμίας του νέου σωματιδίου.

Λύση

Έστω M η μάζα του νέου σωματιδίου. Το κινούμενο σωματίδιο έχει συνολική ενέργεια $E=m+T=3m$.

Στο όριο όπου το σωματίδιο παράγεται σε ηρεμία και το τετράγωνο της αναλλοίωτης μάζας είναι

$$S=(E+m)^2-p^2=M^2$$

$$\text{Με } E^2-p^2=m^2, \text{ έχουμε } M^2=E^2+2Em+m^2-p^2=2Em+2m^2=8m^2,$$

$$M=2\sqrt{2}m$$