Εισαγωγή στη Φυσική Στοιχειωδών Σωματιδίων

Ασκήσεις Στοιχειωδών Σωματιδίων

5ο Εξάμηνο

Δ. Σαμψωνίδης – Κ. Κορδάς

21 Ιανουαρίου 2011

Κουάρκ και Λεπτόνια

Κουάρκ

u	**c**	**t**
d	**s**	**b**

Φορτίο (Q)	Βαρυονικός Αριθμός (B)	Αντίστοιος Αριθμός “γεύσης”
+2/3	+1/3	+1
-1/3	+1/3	-1

Λεπτονικός Αριθμός = 0 γιά όλα τα κουάρκ

Λεπτόνια

ν_e	ν_μ	ν_τ
e^-	μ^-	τ^-

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

Κουάρκ

Μπορούν να συμμετέχουν σε όλες τις αλληλεπιδράσεις
(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	**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

Συνδυασμοί u και d (εννοείται και των αντι-κουάρκ τους)

Συνδυαμοί 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 "stangness/παραξενιά" και "charmness/χάρη" έχουν το πρόσημο του φορτίου του αντίστοιχου κουάρκ.
Π.χ., το s έχει φορτίο -1/3 , άρα: strangness=-1
το c έχει φορτίο +2/3 , άρα: charmness=+1

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

$$\Lambda^0=s\,d\,u\,,\Omega^-=sss$$

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

$\pi^0=$ γραμμικός συνδυασμός των $u\,\bar{u}$ και $d\,\bar{d}$

(Σημείωση: εμφανίζεται είτε ως $u\,\bar{u}$ είτε ως $d\,\bar{d}$)

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

$\eta'=\{u\,\bar{u}\;,\;d\,\bar{d}\;,\;s\,\bar{s}\}$ (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 γίνοται, ποιόν νόμο διατήρησης παραβιάζουν?

$$\mu^+ \to e^+ + \gamma$$
$$e^- \to \nu_e + \gamma$$
$$p + p \to p + \Sigma^+ + K^-$$
$$p \to e^+ + \nu_e$$
$$p \to e^+ + n + \nu_e$$
$$n \to p + e^- + \bar{\nu}_e$$
$$\pi^+ \to \mu^+ + \nu_\mu$$

Δίνονται οι μάζες των σωματιδίων

M(γ) = 0

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

$M(e^+) = Me^-) = 0.511$ MeV

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

$M(\pi^0) = 135$ MeV

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

M(p) = 938.3 MeV

M(n) = 939.6 MeV

$M(\Sigma^+) = 1189.4$ MeV

$M(K^+) = M(K^-) = 493.7$ MeV

Δίνονται:

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

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 γίνοται, 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 ελεγχθούν 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

$M(\gamma) = 0$
$M(\nu_e) = M(\nu_\mu) = 0$
$M(e^+) = Me^-) = 0.511$ MeV
$M(\pi^+) = M(\pi^-) = 139.6$ MeV
$M(\pi^0) = 135$ MeV
$M(\mu^+) = M(\mu^-) = 105.7$ MeV
$M(p) = 938.3$ MeV
$M(n) = 939.6$ MeV
$M(\Sigma^+) = 1189.4$ MeV
$M(K^+) = M(K^-) = 493.7$ MeV

Άσκηση 3 - λύση

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

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

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

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

$$n \to p + \gamma$$

1. Διατήρηση λεπτονικού αριθμού και στροφορμής
2. Διατήρηση βαρυονικού και λεπτονικού αριθμού
3. Διατήρηση ενέργειας
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. $pp \rightarrow \Sigma^{+}\,nK^{0}\,\pi^{+}\,\pi^{0}$
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
$M(\Sigma^{-}) = 1197.4$ MeV
$M(\Sigma^{0}) = 1192.6$ MeV
$M(K^{0}) = M(\bar{K}^{0}) = 497.7$ MeV
$M(\Xi^{-}) = 1321.3$ MeV
$M(\Lambda) = 1115.6$ MeV
$M(\Delta^{+}) = 1210$ MeV
$M(\eta) = 547.5$ MeV (σημ: η = ήτα)

Δίνονται:

$\Sigma^{0} = u\,d\,s\,,\ \Sigma^{-} = d\,d\,s$
$\Delta^{+} = u\,u\,d\,,\ \Xi^{-} = d\,s\,s$
$K^{-} = \bar{u}\,s\,,\ \bar{K}^{0} = \bar{d}\,s$
$K^{+} = u\,\bar{s}\,,\ K^{0} = d\,\bar{s}$

Αν επιτρέπεται, τότε:

- αν έχουμε νετρίνο, 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. $\bar{\nu}_{e}p\rightarrow ne^{+}$

1. * φορτίο
2. ΗΜ
3. * Ενέργεια
4. ασθενής
5. ΗΜ, ασθενής
6. * λεπτονικός
7. ισχυρή
8. ασθενής

9. $pp\rightarrow\Sigma^{+}nK^{0}\pi^{+}\pi^{0}$
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. $\Sigma^{-}\rightarrow ne\bar{\nu}_{e}$

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	Βαρυονικος	Λεπτονικός	Ενέργεια	Strangeness	Charmness
4	OK	OK	OK	OK	X κατά ΔS=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 νετρίνο, είναι ασθενής
- αν έχουμε φωτόνιο, είναι ηλεκτρομαγνητική
- αν έχουμε καθαρή αλλαγή γεύσης, αλλά κατά 1 μονάδα μόνο (π.χ., ΔS=1 , ΔC=1) είναι ασθενής. Αν η αλλαγή γεύσης είναι κατά 2 μονάδες (π.χ.,ΔS=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. * ΔS = -2 (άρα δεν γίνεται ούτε με ασθενή)
5. * λεπτονικός
6. ισχυρή (κυρίως)
7. ηλεκτρομαγνητική

Αν επιτρέπεται:

- αν έχουμε νετρίνο, είναι ασθενής
- αν έχουμε φωτόνιο, είναι ηλεκτρομαγνητική
- αν έχουμε καθαρή αλλαγή γεύσης, αλλά κατά 1 μονάδα μόνο (π.χ., ΔS=1 , ΔC=1) είναι ασθενής. Αν η αλλαγή γεύσης είναι κατά 2 μονάδες (π.χ.,ΔS=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.

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

- Οι στροφορμές, δράσεις, γενικά το γινόμενο xp ~ ħ ή Et ~ ħ

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

- Φυσικές διαστάσεις είναι το c και το ħ.
  - Είναι βολικό ένα σύστημα μονάδων όπου c = ħ =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	1GeV = $1.6\ 10^{-19}$ J
P	GeV	
M	GeV	1kg = $5.61\ 10^{26}$ GeV
length	1/GeV	1m = $5.07\ 10^{15}$ GeV^{-1}
time	1/GeV-1	1sec = $1.52\ 10^{24}$ 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 → 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 → Ενέργεια ηρεμίας ≈ 0.5 MeV

Περιγραφή σε βασικό επίπεδο - Διαγράμματα Feynman

- Έχουμε μιά πιό βασική ερμηνεία του συμβαίνει στις αντιδράσεις και διασπάσεις που βλέπουμε στη φύση

- Αλληλεπιδασεις μέσω μποζονίων διαδοτών των διαφόρων δυνάμεων
  - ΗΜ : **γ**
  - Ασθενείς : $\mathbf{W^+}$, $\mathbf{W^-}$, $\mathbf{Z^0}$
  - Ισχυρές: **g**

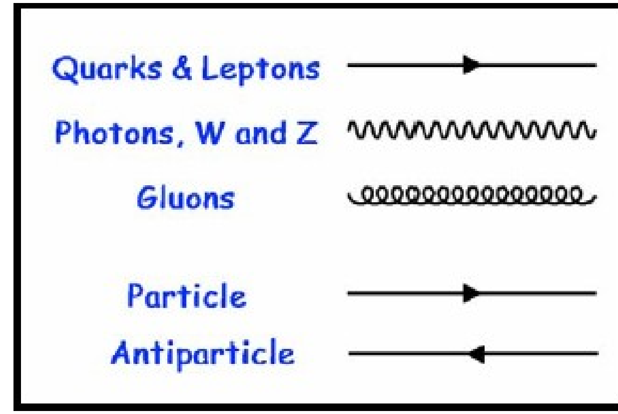
και

Αναπαράσταση με διαγράμματα Feynman

Διαγράμματα Feynman

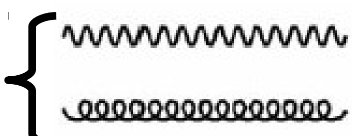
Βασικοί κανόνες σε κάθε κόμβο:

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

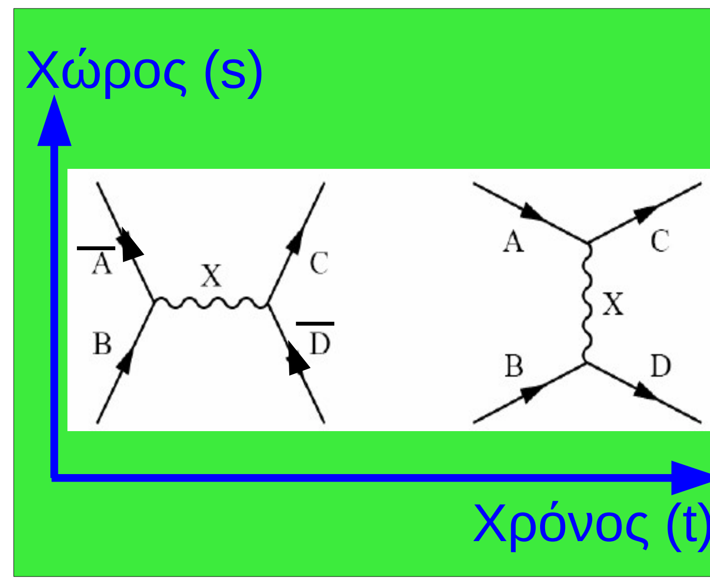


Συμβολισμοί πάνω στο διάγραμμα:

- Φερμιόνια: θετικός χρόνος
- anti-φερμιόνια: αρνητικός χρόνος
  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



- Το σημείο σύζευξης (κόμβος) δηλώνει την ισχύ της σύζευξης

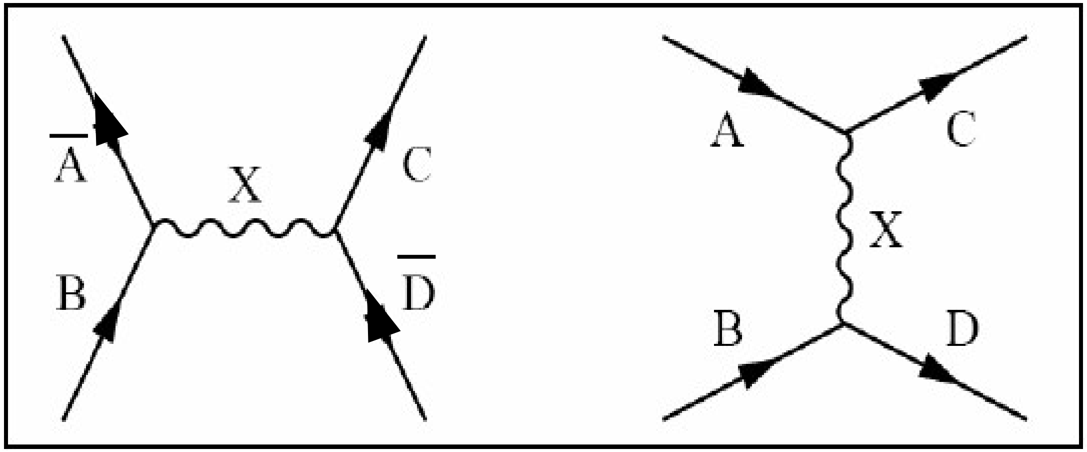


Διαγράμματα Feynman

Γενικές Ιδιότητες

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

$$\boxed{A + B \rightarrow C + D}$$

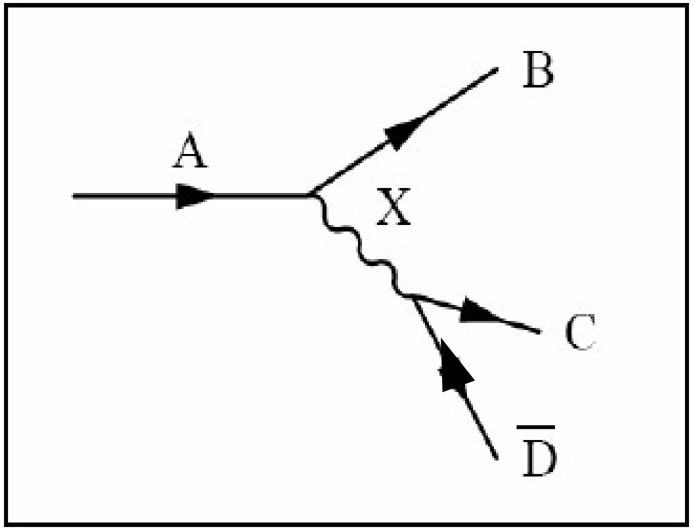


Διαγράμματα Feynman

Γενικές Ιδιότητες

ή της μορφής:

$$\boxed{A \rightarrow B + C + D}$$



A, B, C, D

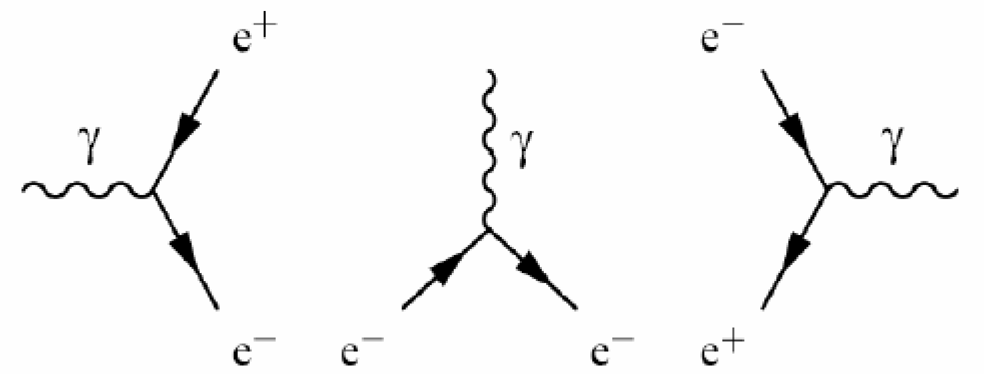
- Κουάρκ
- Λεπτόνια
- Αντικουάρκ
- Αντιλεπτόνια

X

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

Διαγράμματα Feynman

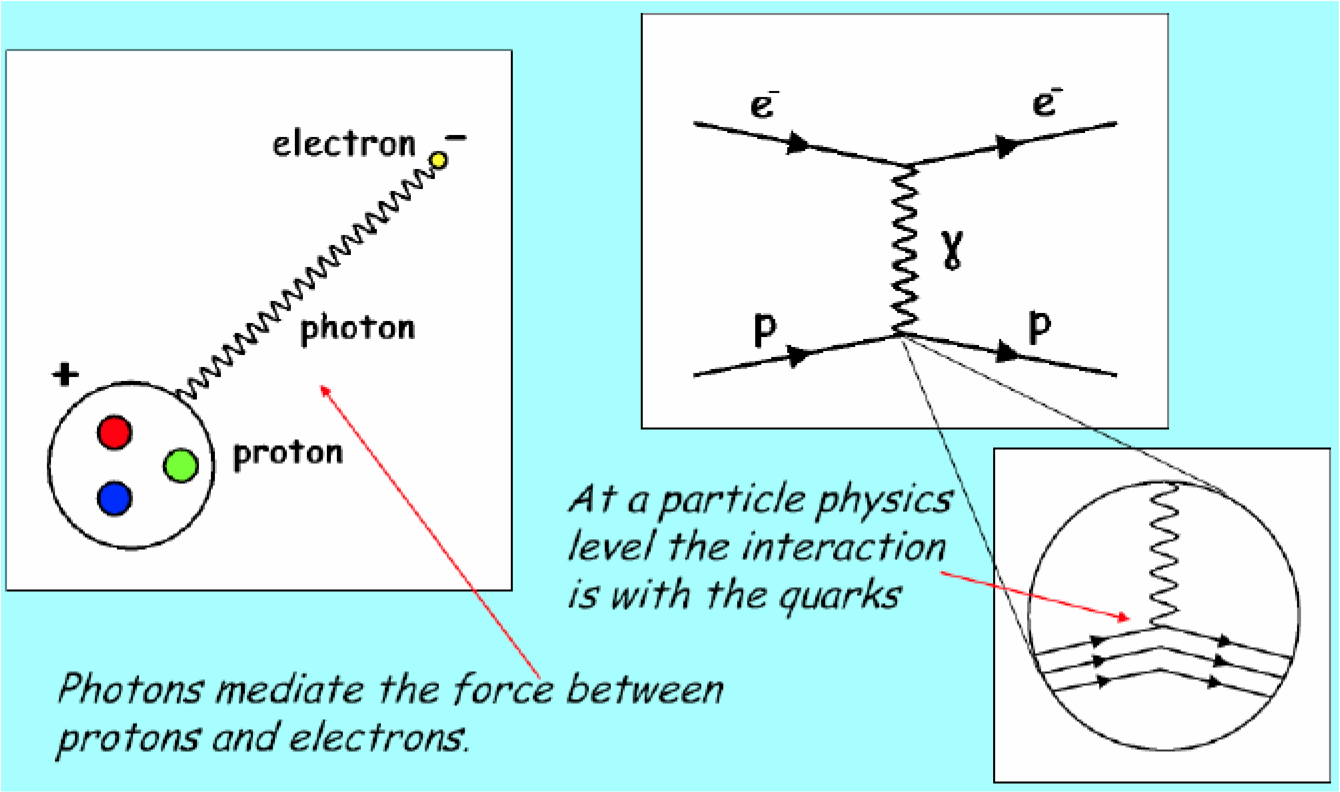
Ηλεκτρομαγνητικές Αλληλεπιδράσεις



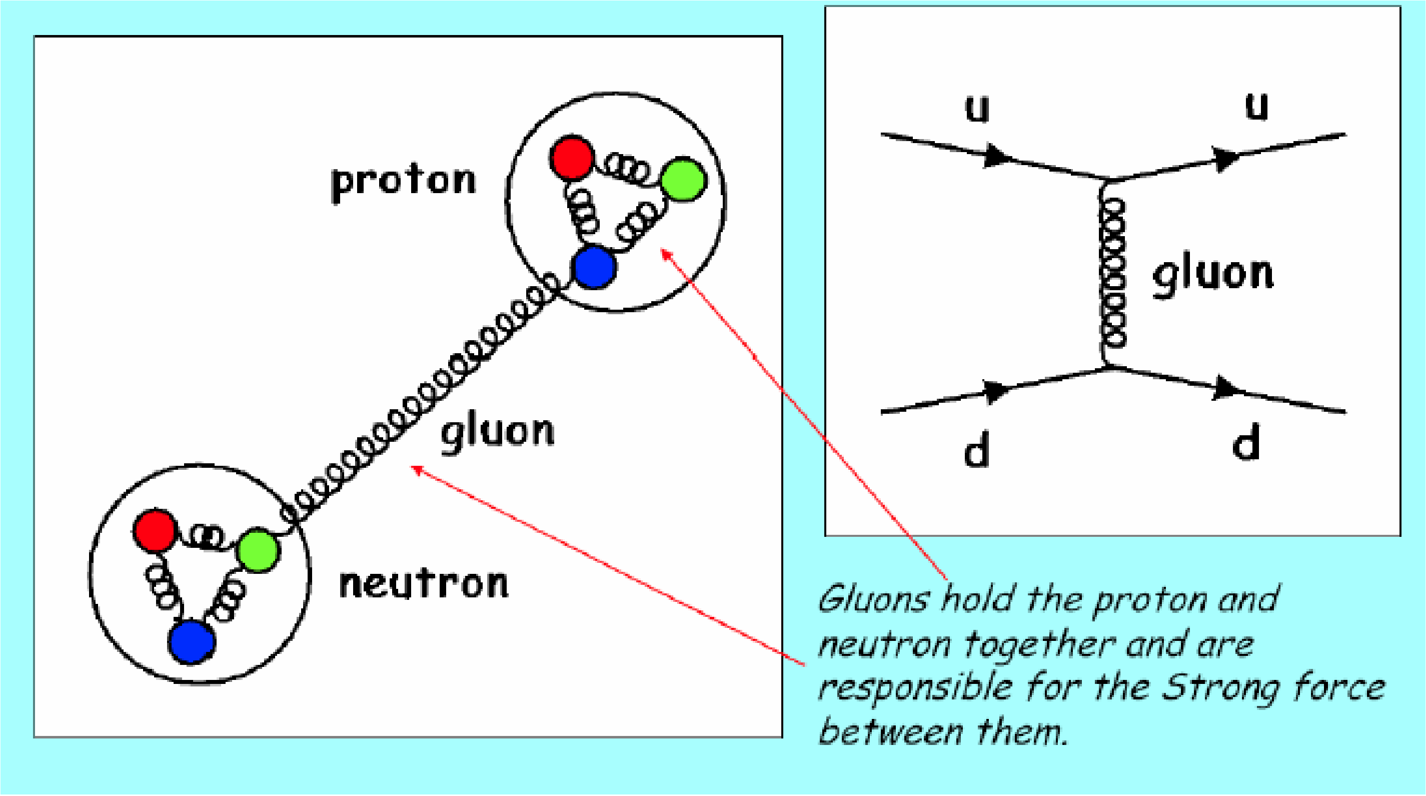
α β γ

(α) Δίδυμη Γένεση
(β) Φωτοηλεκτρικό φαινόμενο
(γ) Εξαΰλωση ποζιτρονίου

Ηλεκτρομαγνητικές Αλληλεπιδράσεις



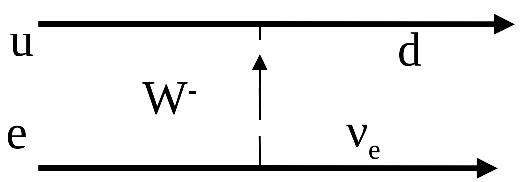
Ισχυρές Αλληλεπιδράσεις



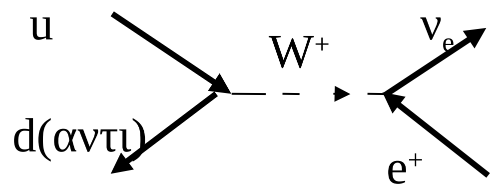
Οι διαδότες των ασθενών δυνάμεων

- Ανταλλαγή W± => μεταβολή του φορτίου των κουάρκ ή λεπτονίων που συμμετέχουν :
  - $u \rightarrow d$, $e^- \rightarrow \nu_e$

[ανταλλαγή W^-, W^+ αντίστοιχα]-> φορτισμένα ασθενή ρεύματα

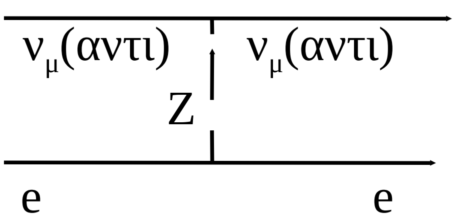


σκέδαση e p ($e\,p \rightarrow n\,\nu_e$)

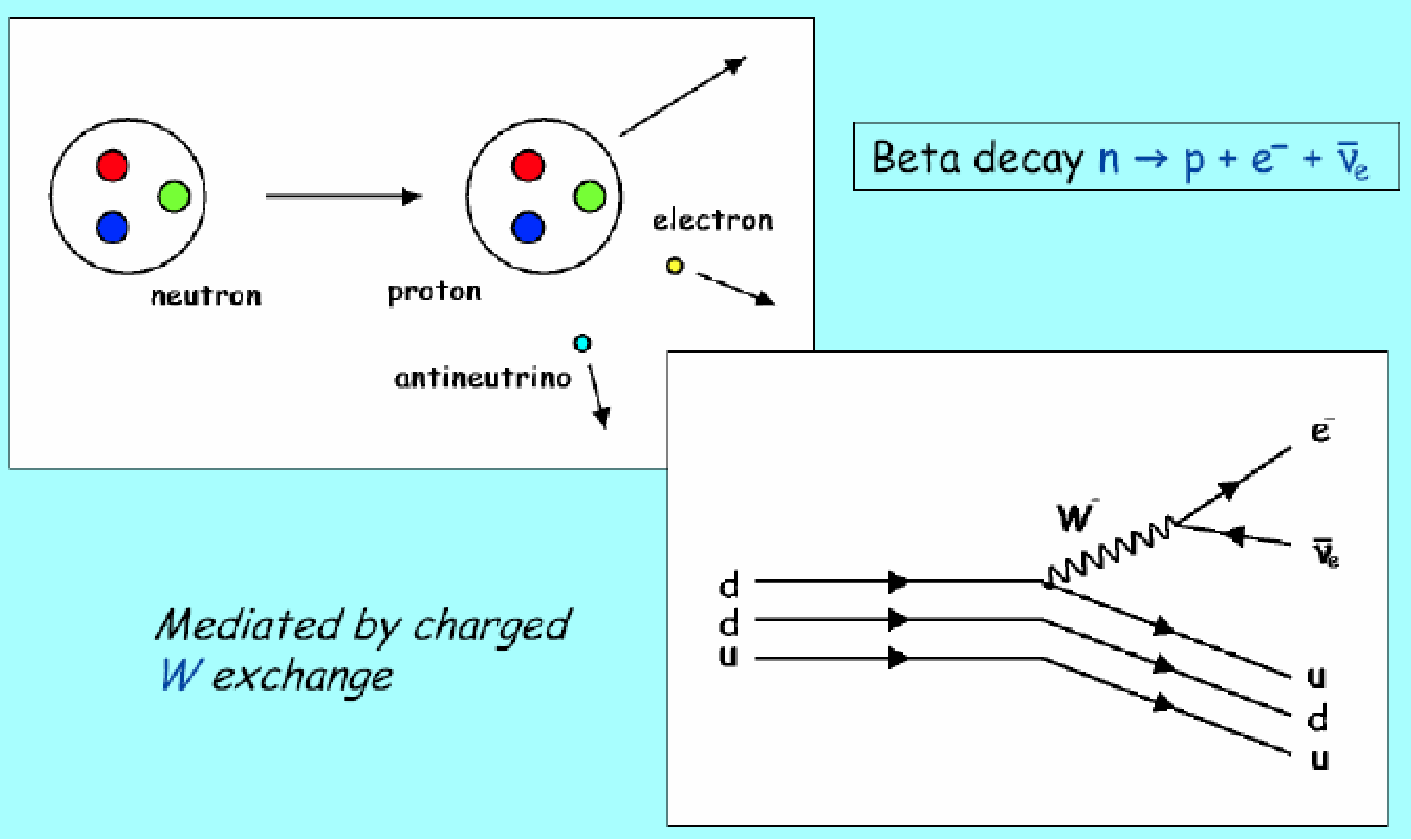


παραγωγή W^+ και διάσπαση σε $\nu_e e^+$

- Ανταλλαγή Z^0 -> ουδέτερα ασθενή ρεύματα



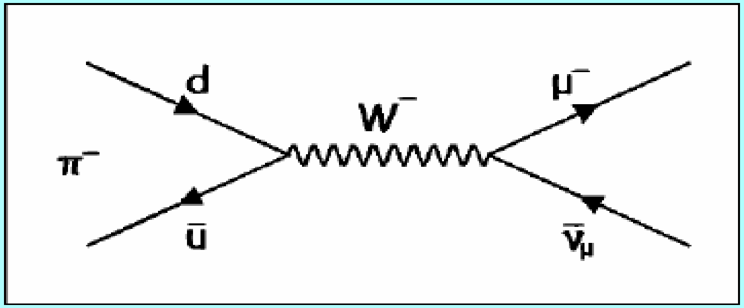
Ασθενείς Αλληλεπιδράσεις



Ασθενείς Αλληλεπιδράσεις

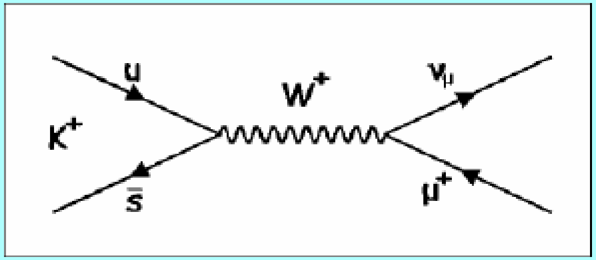
$\Delta S = 0$ (No strangeness change)

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

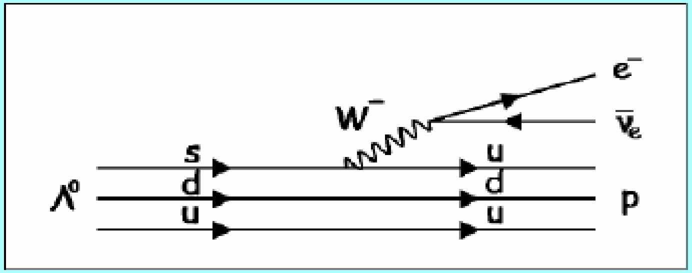


$\Delta S = 1$ (Strangeness changes)

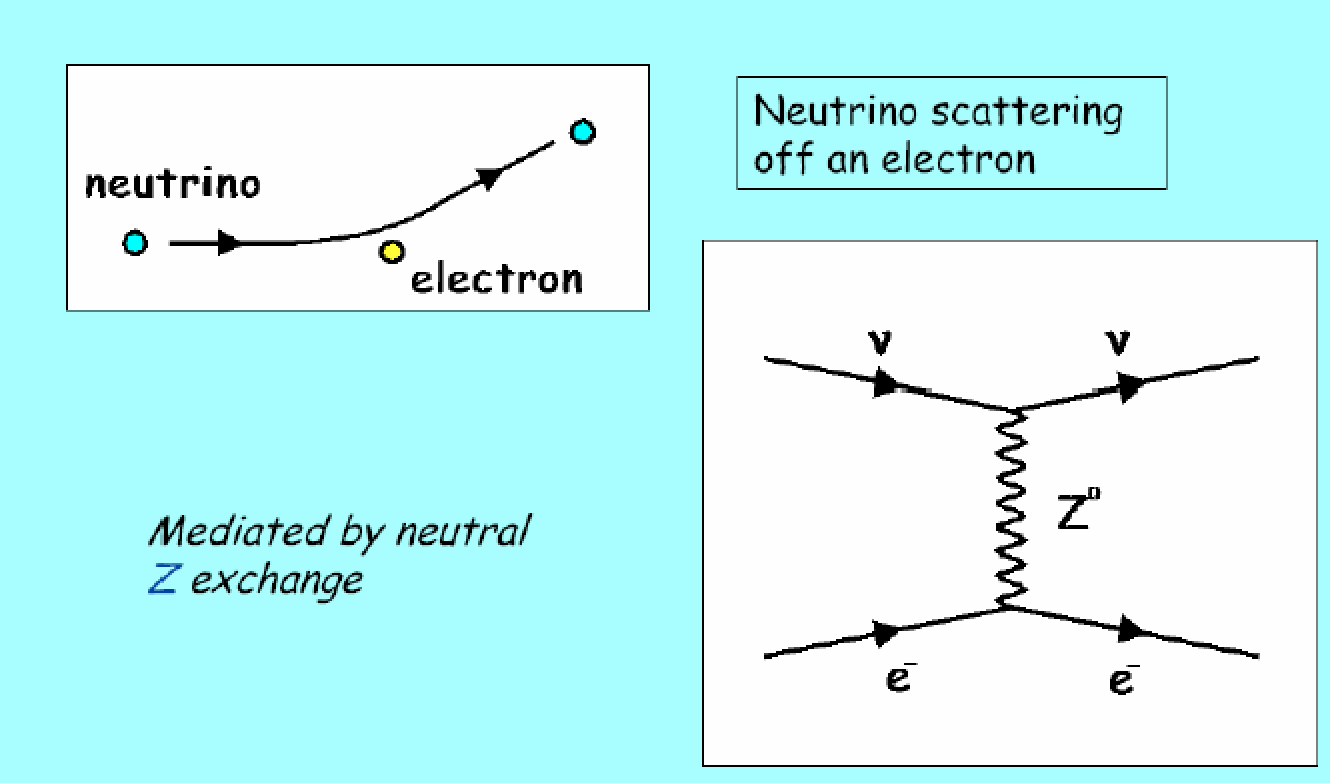
$K^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$



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



Ασθενείς Αλληλεπιδράσεις



Άσκηση 6

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

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

$\mu^+ \to e^+ \nu \nu$

$\mu^- \to e^- \nu \nu$

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

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

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

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

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

$\nu p \to n e^+$

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

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

$\nu n \to e^- p$

${}^3_1H \to {}^3_2He\, e^- \nu$

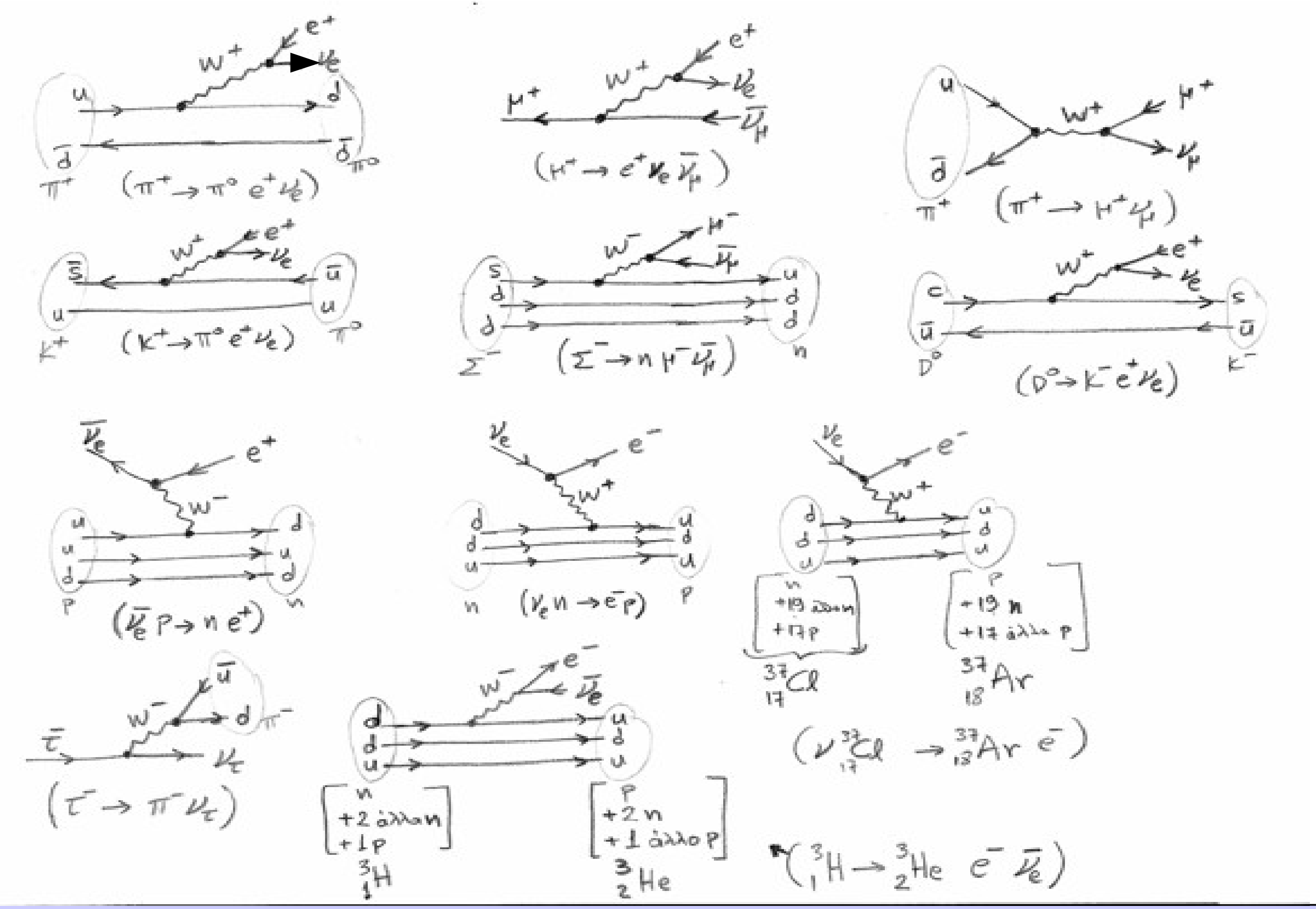
$\pi^+ \to \mu^+ \nu$

$\pi^- \to e^- \nu$

$\tau^- \to \pi^- \nu$

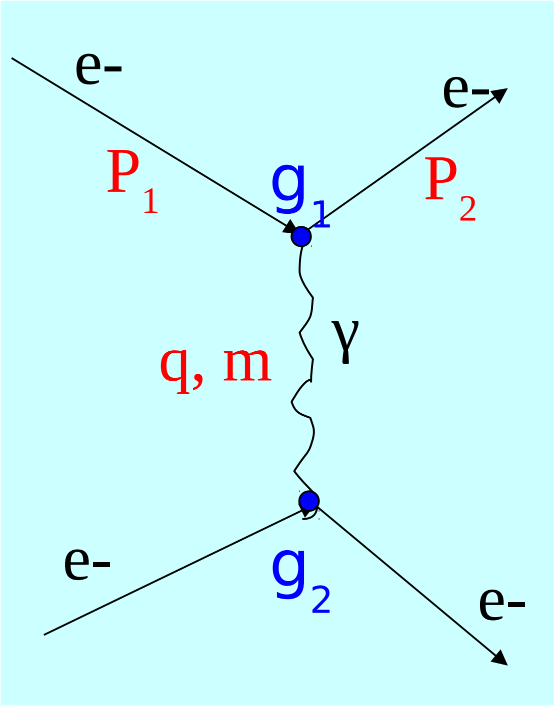
Άσκηση 6 - Λύση

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): $\mathbf{q=P_1-P_2}$ όπου P_1 = τετρα-ορμή = $\{E,p_x,p_y,p_z\}$ του σωματιδίου #1, κλπ.



Διαταραχή κυματοσυνάρτησης λόγω σκέδασης

Πλάτος σκέδασης f(q) είναι το στοιχείο πίνακα M της μετάβασης από την αρχική στην τελική κατάσταση

$$M = f(q) = \frac{g_1 g_2}{q^2 - m^2}$$

- $\mathbf{g_1, g_2}$ η ισχύς της σύζευξης του μποζονίου (διαδότη) με τα σκεδαζόμενα σωμάτια. Εδώ: $\mathbf{g_1 = g_2 = g}$

- $q^2 - m^2$ = πόσο μακρυά είναι η μάζα του διαδότη στην αλληλεπίδραση αυτή, από τη φυσιολογική τιμή της μάζας του διαδότη. (q=τετρα-ορμή, και m=μάζα του διαδότη)

Ρυθμός αλληλεπιδράσεων W, στοιχείο πίνακα M, και σταθερά σύζευξης g

- Ρυθμός αλληλεπίδράσεων W: αριθμός μεταβάσεων από την αρχική στην τελική κατάσταση ανά μονάδα χρόνου.

- Ο ρυθμός W εξαρτάται από το τετράγωνο του μέτρου του στοιχείου πίνακα M της μετάβασης: **W ~ |M|²**

$$M = f(q) = \frac{g_1 g_2}{q^2 - m^2} = \frac{g^2}{q^2 - m^2} \longrightarrow |M|^2 \sim \left| \frac{g^2}{q^2 - m^2} \right|^2$$

- Σκεδάσεις σωματιδίων: **ο ρυθμός αλληλεπιδράσεων (W) είναι ανάλογος της ενεργού διατομής (σ) της αλληλεπίδρασης**

- Διασπάσεις σωματιδίου με μέσο χρόνο ζωής **τ** πλάτος **Γ**:
  W = 1/τ = Γ/ ħ

$$\theta\upsilon\mu\eta\theta\acute{\eta}\tau\varepsilon : \Gamma\tau = \hbar \rightarrow \tau = \frac{\hbar}{\Gamma}$$

•Οπότε: σ ~ W ~ |M|² ~ g⁴ και Γ ~ W ~ |M|² ~ g⁴

Ηλεκτρομαγνητικές Αλληλεπιδράσεις

Η σταθερά σύζευξης σε κάθε κόμβο των Feynman είναι $\sqrt{\alpha}$

Σταθερά λεπτής υφής: **α**

Μια adιάστατη 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.

$$\alpha = \frac{\dfrac{e^2}{4\pi\varepsilon_0\left(\dfrac{\hbar}{mc}\right)}}{mc^2} = \frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 \hbar c} = \frac{1}{137}$$

Θα χρησιμοποιούμε παντού:
MeV για ενέργεια,
$1/4\pi\varepsilon_0 = 1$ σε όλους τους τύπους,
και θα βάζουμε:

$$\frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0} = e^2 = \alpha\hbar c, \quad \text{όπου} \quad \alpha = 1/137$$
$$\hbar c = 197\ MeV\ fm$$

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

$$\alpha = \frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 \hbar c} = (\mu\varepsilon\ 4\pi\varepsilon_0 = 1\ \kappa\alpha\iota\ \hbar c = 1) \rightarrow \sqrt{a} = e$$

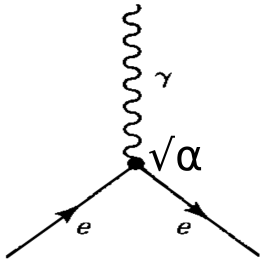
Ηλεκτρομαγνητικές Αλληλεπιδράσεις

Η ισχύς της αλληλεπίδρασης μεταξύ φορτισμένων σωματίων και φωτονίων είναι όσο το φορτίο του ηλεκτρονίου: g = e ~ sqrt(α) :

(η σταθερά της λεπτής υφής **α**)

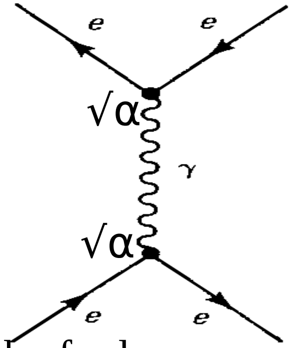
Σε κάθε κόμβο, ισχύς σύζευξης ~ $\sqrt{\alpha}$

Πιθανότητα σύζευξης ~ α



φωτοηλεκτρικό

Φωτοηλεκτρικό φαινόμενο :
πλάτος της αλληλεπίδρασης ~√α
=> ενεργός διατομή: ~ α (1ης τάξης)



Σκέδαση Rutherford

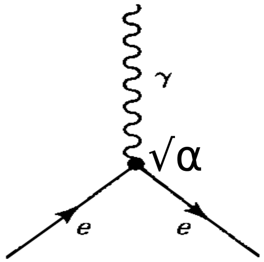
Σκέδαση Coulomb:
πλάτος της αλληλεπίδρασης ~ α
=> ενεργός διατομή: ~ α^2 (2ης τάξης)

Ηλεκτρομαγνητικές Αλληλεπιδράσεις

Η ισχύς της αλληλεπίδρασης μεταξύ φορτισμένων σωματίων και φωτονίων είναι όσο το φορτίο του ηλεκτρονίου: g = e ~ sqrt(α) :
(η σταθερά της λεπτής υφής **α**)

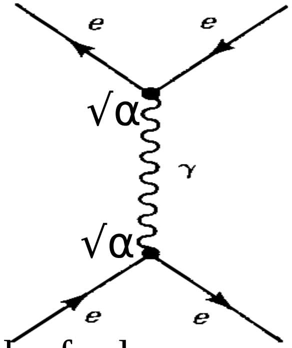
Σε κάθε κόμβο, ισχύς σύζευξης ~ $\sqrt{\alpha}$

Πιθανότητα σύζευξης ~ α



φωτοηλεκτρικό

Φωτοηλεκτρικό φαινόμενο :
πλάτος της αλληλεπίδρασης ~√α
=> ενεργός διατομή: ~ α (1ης τάξης)

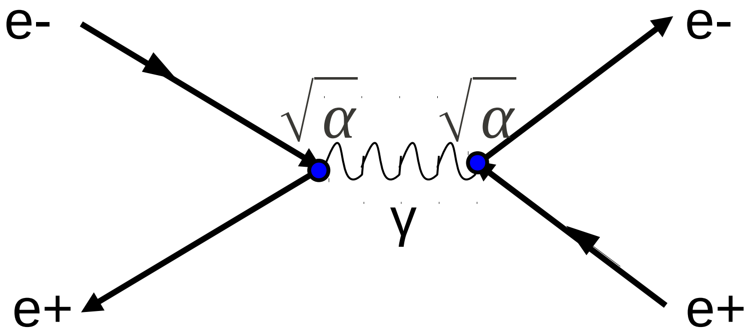


Σκέδαση Rutherford

Σκέδαση Coulomb:
πλάτος της αλληλεπίδρασης ~ α
=> ενεργός διατομή: ~ α^2 (2ης τάξης)

Άσκηση 7
Ποιά απ'τις 2 εκδοχές είναι η πιθανότερη να γίνει? Κατά πόσο σε σχέση με την άλλη?

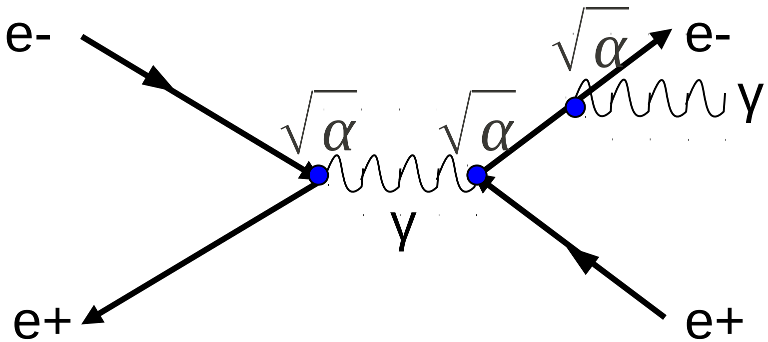
Διαφορά στην πιθανότητα να συμβούν οι δύο αυτές εκδοχές:



ενεργός διατομή σ ~ α²

$e^+ e^- \rightarrow e^+ e^-$

Το πάνω είναι πιθανότερο (κατά 1/α = 137) να εκπέμψει φωτόνιο



ενεργός διατομή σ ~ α³

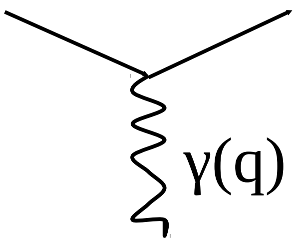
$e^+ e^- \rightarrow e^+ e^- \gamma$

Οι διαδότες των ασθενών δυνάμεων

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

Ηλεκτρομαγνητικές Δυνάμεις

- κόμβος (διάγραμμα Feynman)



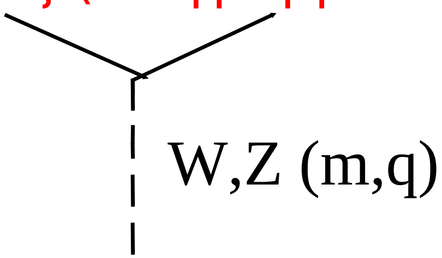
- Σταθερά Σύζευξης

$\alpha = e^2$,

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

Ασθενείς Δυνάμεις

- κόμβος (διάγραμμα Feynman)



- Σταθερά Σύζευξης

$a_w = g^2$,

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

Ασθενείς Αλληλεπιδράσεις

Η σταθερά σύζευξης σε κάθε κόμβο των Feynman είναι $\sqrt{G}$

$$f(q) = \frac{g^2}{q^2 - M_{W,Z}^2} \qquad \text{Για } q^2 \to 0: |f(q)| = \left|\frac{g^2}{M_{W,Z}^2}\right| = G \simeq 10^{-5}\, GeV^{-2}$$

Στην ενοποιημένη θεωρία των ηλεκτρομαγμητικών και των ασθενών δυνάμεων (την “ηλεκτρασθενή θεωρία” των Weinberg, Salam και Glasgow, 1968) προτάθηκε η σταθερά της σύζευξης (g) των W και Z με τα λεπτόνια και τα κουάρκ, να ειναι ίση με την ηλεκτρομαγητική σύζευξη του φωτονίου με ηλεκτρόνια (e). Οπότε **g=sqrt(α) = e**.

Η ασθενής σύζευξη εμφανίζεται με σταθερά **G** (τη σταθερά Fermi) που είναι μικρότερη από την **e^2** του ηλεκτρομαγνητισμού κατά $M^2_{W,Z}$ λόγω της μάζας των διαδοτών W και Z

Γνωρίζοντας τη σταθερά του Fermi, G (από διάφορες μετρήσεις χρόνων ζωής με χρήση του χρυσού κανόνα του Fermi, π.χ., στο χρόνο ζωής του μιονίου), Περιμένουμε:

$$M_{W,Z} = \frac{g}{\sqrt{G}} = \frac{\sqrt{\alpha}}{\sqrt{G}} = \sqrt{\frac{\alpha}{G}} \simeq 90\, GeV$$

όπως και βρέθηκε στο CERN το 1983!

Ασθενείς Αλληλεπιδράσεις

- Κουάρκς και λεπτόνια φέρουν ‘ασθενές’ φορτίο .
- Τα νετρίνο έχουν μόνο ασθενές: ΔΕΝ έχουν ούτε ισχυρό, ούτε ηλεκτρομαγνητικό φορτίο

- Οι ασθενέις δυνάμεις είναι 10^3-10^5 φορές ασθενέστερες από τις ηλεκτρομαγνητικές → μικρότερη πιθανότητα σύζευξης

- Μπορουν να παραβιάζουν τις γεύσεις ΔC, ΔS≠0 (αλλά μέχρι ΔC, ΔS = +-1)

- Περιλαμβάνουν είτε μονο κουάρκς ή κουάρκς και λεπτόνια

- Παραδείγματα: διάσπαση νετρονίου, σκέδαση αντινετρίνο-πρωτονίου

$\Sigma^- \rightarrow n + \pi^-$ ($\tau \approx 10^{-10}$ sec) → ασθενής (ΔS=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 $\Delta t = \tau$ →

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

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

- 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 ~1fm ~ 10^{-15} m). Προφανώς και δεν μπορεί να μετρηθεί μια τροχιά ενός σωματίου με χρόνο ζωής 10^{-23} s …

- Οπότε, μετρώντας τα προϊόντα της διάσπασης και με την αρχη 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 τςω διαφόρων αλληλεπιδράσεων

Γ = 1/τ = 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 “α”^{2}

(όπου “α”^{2} = α^2 ή α_W^2 ή α_s^2 : ανάλογα αν η αλληλεπίδραση είναι ηλεκτρομαγνητική, ασθενής ή ισχυρή, αντίστοιχα)

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

Άσκηση 8
Συγκρίνετε τις σταθερές σύζευξης για τις εξής διασπάσεις

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

=> σημειώσεις στοιχειωδών, παράγραφο 1.8.

Άσκηση 8 – λύση
Και Ισχυρές Αλληλεπιδράσεις

- Οι ισχυρές αλληλεπιδράσεις συμβαίνουν μεταξύ κουάρκ

- $K^- + p \rightarrow \Sigma^0 \rightarrow \Lambda^0 + \pi^0$

  $\tau = \hbar/\Gamma \rightarrow 10^{-23}$ sec

- $\Sigma^0 \rightarrow \Lambda^0 + \gamma \quad \tau = 10^{-19}$ sec

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

g_s είναι το αντίστοιχο φορτίο για τις ισχυρές αλληλεπιδράσεις:

χρώμα <=> 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	$G = G_F = 10^{-5}$ GeV^{-2}	a= 1/137	$KM^2/\hbar c$= $0.5x10^{-38}$
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:

$$E = mc^2$$

ενέργεια (E), μάζα (m), c = ταχύτητα του φωτός

$$\text{γενικά, με κινητική ενέργεια } T\text{, έχουμε}: E = T + mc^2$$

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

$$p = m\gamma\upsilon = m\gamma\beta c, \text{ όπου } p = \text{ ορμή}$$

$$E^2 = (pc)^2 + (mc^2)^2$$ → E [MeV], p [MeV/c], m [MeV/c^2]

Μονάδες:

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

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

$$\alpha = \frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 \hbar c} = \frac{1}{137}$$

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

έξτρα

Extras

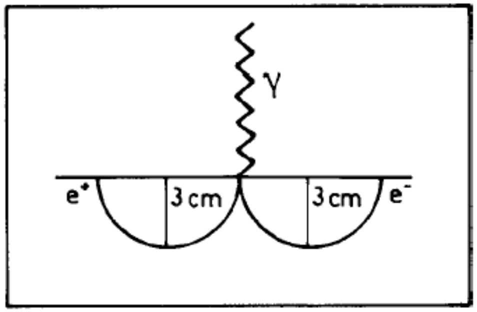
Έχοντας 4.5 GeV διαθέσιμη ενέργεια, ποιο είναι το βαρύτερο ισότοπο που μπορεί να κανείς να παράγει θεωρητικά;

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

<u>Λύση</u>

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 τν παραγωγή βαρυονίων. Από τα τρία ισότοπα μόνο το 2D έχει μάζα ηρεμίας μικρότερη των 2.5 GeV. Η σωστή απάντηση είναι (1)

Extras



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?

$$evB = \frac{m\gamma v^2}{\rho} = \frac{pv}{\rho},$$

$$pc = ecB\rho$$

$$= \frac{1.6 \times 10^{-19} \times 3 \times 10^8}{1.6 \times 10^{-13}} B\rho$$

$$= 300B\rho$$

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

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

Extras

Σε μια σύγκρουση μεταξύ ενός ακίνητου πρωτονίου και κινούμενου πρωτονίου παράγεται σωματίδιο με μάζα ηρεμίας Μ 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

$$p + p \to M + p + p\,,$$

τα σωματίδια στο δεξί σκέλος παράγονται σε ηρεμία. Η ενέργεια και η ορμή του κινούμενου σωματιδίου είναι Ep pp αντίστοιχα. Η αναλλοίωτη μάζα του συστήματος στο κατώφλι είναι :

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

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

$$E_p = \frac{(2m_p + M)^2 - 2m_p^2}{2m_p}$$

$$= m_p + 2M + \frac{M^2}{2m_p}\,.$$

Extras

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 σωμάτιο παράγεται σε ηρεμία και το τετράγωνο της αναλλοίωτης μάζας είναι

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

Με $E^2-p^2=m^2$, έχουμε $M^2=E^2+2Em+m^2-p^2=2Em+2m^2=8m^2$,

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