

Στοιχειώδη Σωματία (M.Sc Υπολογιστικής Φυσικής)

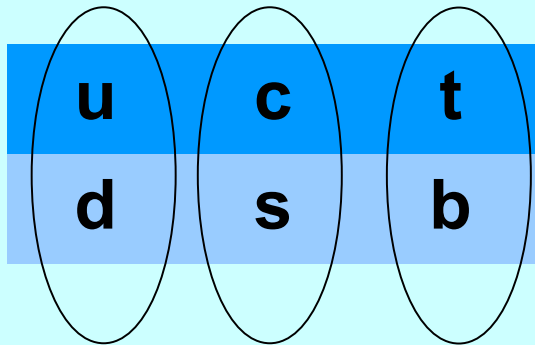
Μάθημα 7 Διαγράμματα Feynman

Κώστας Κορδάς
Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Στοιχειώδη M.Sc. Υπολ. Φυσ., ΑΠΘ, 2 Δεκεμβρίου 2013

Κουάρκ και Λεπτόνια

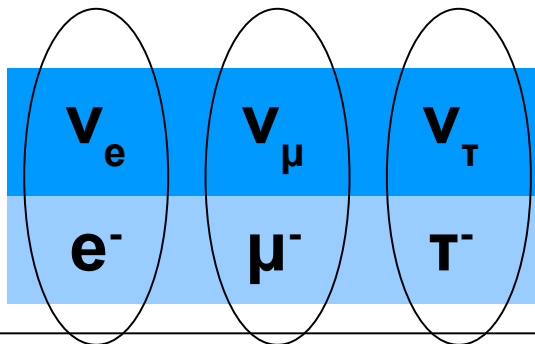
Κουάρκ



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



Φορτίο (Q)	Βαρυονικός Αριθμός (B)	Αντίστοιχος 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

•Ο Λεπτονικός αριθμός διατηρείται **ΞΕΧΩΡΙΣΤΑ** για κάθε 'οικογένεια' λεπτονίων

•Ο Λεπτονικός αριθμός **ΔΙΑΤΗΡΕΙΤΑΙ ΠΑΝΤΑ**

Σωματίδια που παρατηρούμε στη φύση

• Λεπτόνια

- στοιχειώδη – 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 $B=0$

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 $E t \sim \hbar$

$$\rightarrow x \sim \hbar/p, \text{ και } t = \hbar/E$$

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

- Φυσικές διαστάσεις είναι το c και το \hbar .

– Είναι βολικό ένα σύστημα μονάδων όπου $c = \hbar = 1$

- $M = E/c^2$ [E]

- $P = E/c$ [E]

- $L = \hbar c/E$ [E^{-1}]

- $T = \hbar/E$ [E^{-1}],

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

Μονάδες

	Quantity	N.U.	Conv. Factor to SI
E	GeV		$1\text{GeV} = 1.6 \cdot 10^{-10} \text{J}$
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 μία πιο βασική ερμηνεία του συμβαίνει στις αντιδράσεις και διασπάσεις που βλέπουμε στη φύση
- Αλληλεπιδράσεις μέσω **μποζονίων διαδοτών των διαφόρων δυνάμεων**
 - ΗΜ : γ
 - Ασθενείς : W^+ , W^- , Z^0
 - Ισχυρές: **gluons**

και

Αναπαράσταση με **διαγράμματα Feynman**

Διαγράμματα Feynman

Βασικοί κανόνες σε κάθε κόμβο:

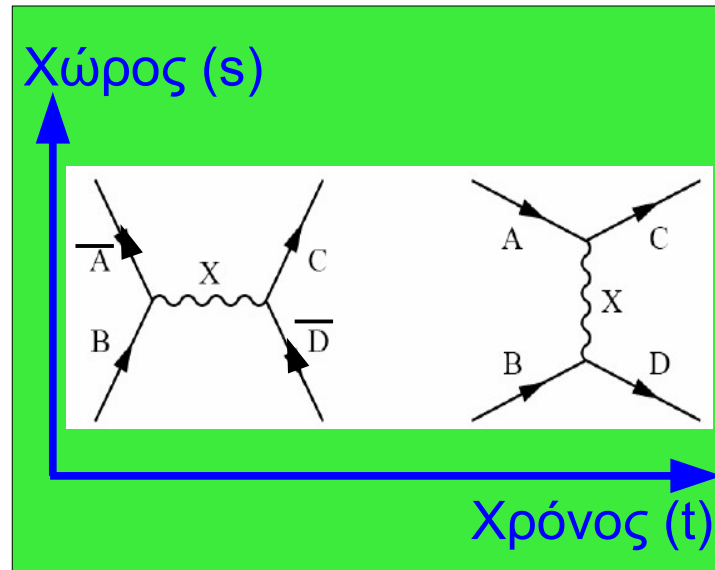
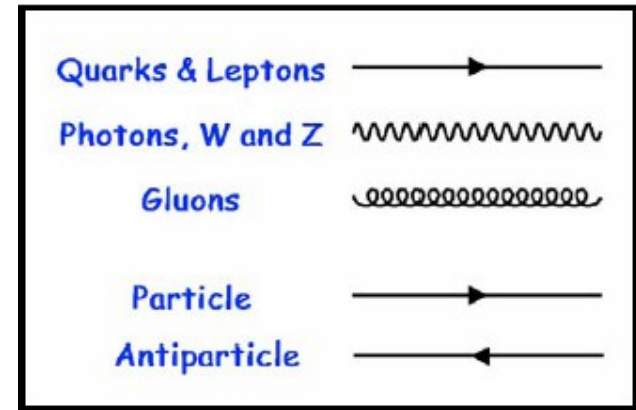
- E, p διατηρείται
- Q διατηρείται
- Σπιν διατηρείται
- Βαρυονικός Αριθμός
- Λεπτονικός Αριθμός

Συμβολισμοί πάνω στο διάγραμμα:

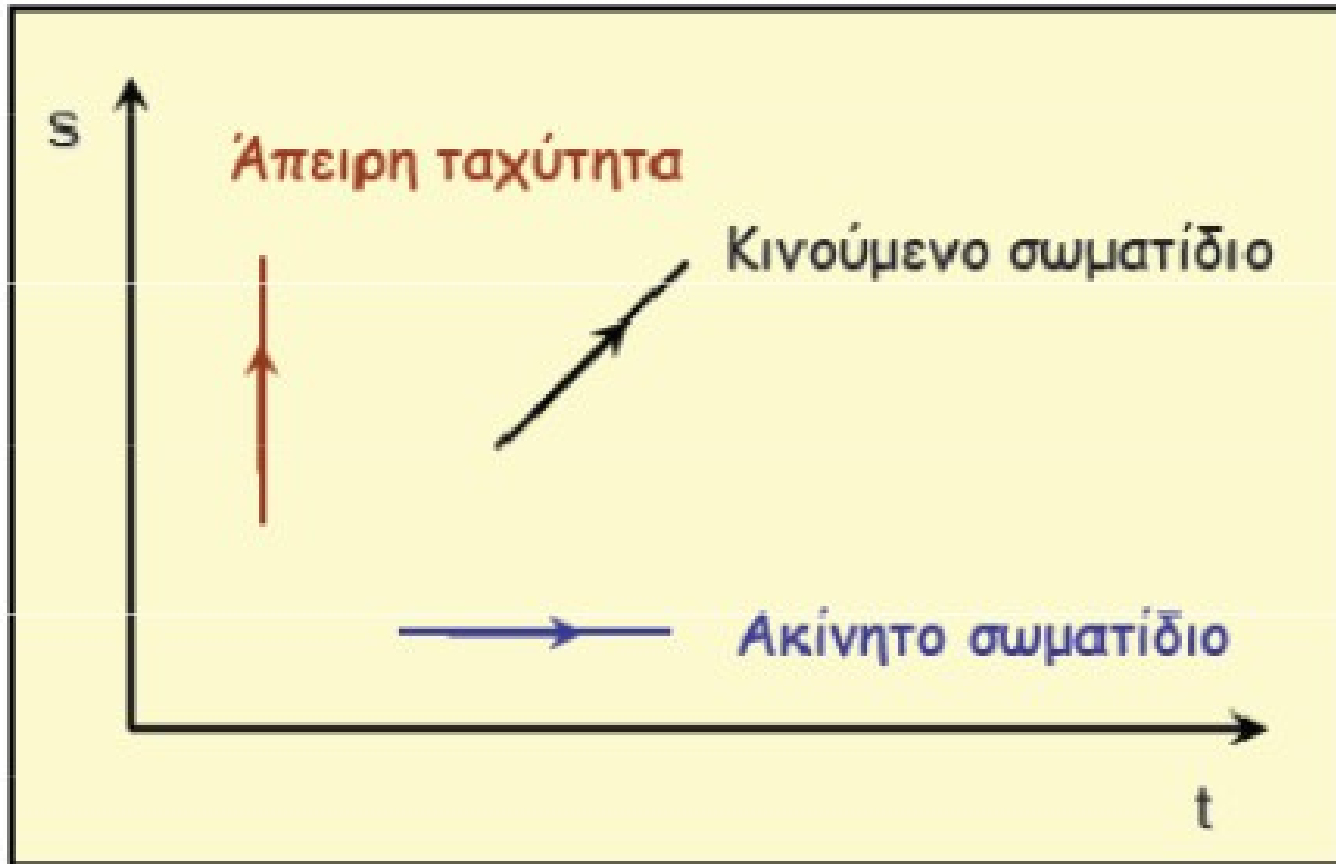
- Φερμιόνια: θετικός χρόνος
- αντι-φερμιόνια: αρνητικός χρόνος
π.χ., το αντι-A έρχεται από αντίθετη κατεύθυνση και εξαυλώνεται με το B. Όμως το αντι-A συμβολίζεται να κινείται προς το παρελθόν

- Μποζόνια $\left\{ \begin{array}{l} \text{~~~~~} \\ \text{~~~~~} \end{array} \right.$

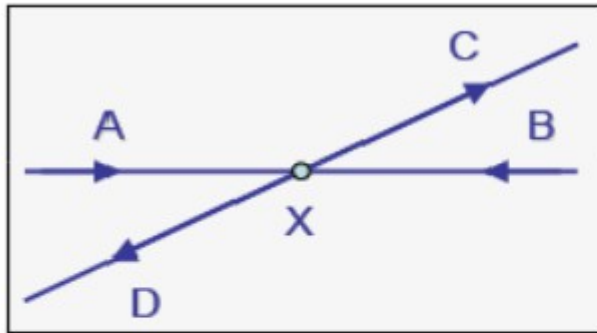
- Το σημείο σύζευξης (κόμβος) δηλώνει την ισχύ της σύζευξης



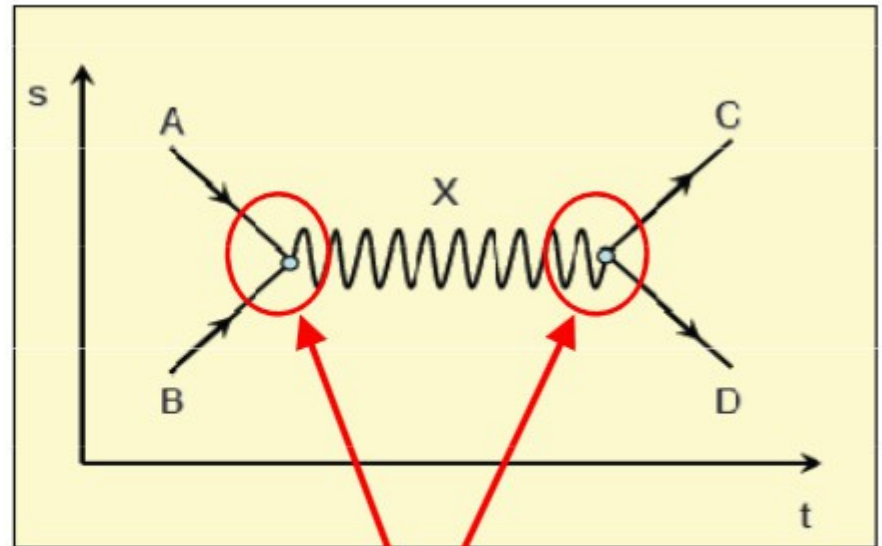
Τα σωματίδια κινούνται προς τη θετική φορά του χρόνου
Τα αντισωματίδια προς την αντίθετη



Αλληλεπίδραση μεταξύ σωματίων A και B, η οποία παράγει το υπερβατικό σωματίο X, το οποίο διασπάται στα σωματίδια C και D
Στο διάγραμμα αυτό έχουμε εξαϋλωση των A και B και μετά σχηματισμό των C και D

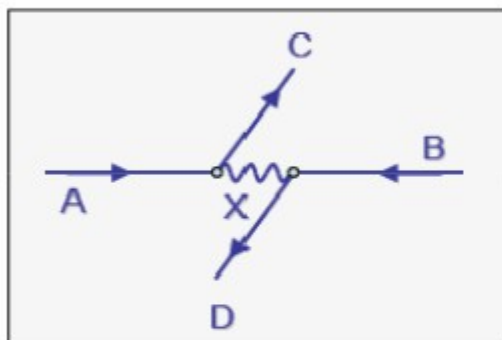


Αντίδραση όπως φαίνεται στο σύστημα εργαστηρίων

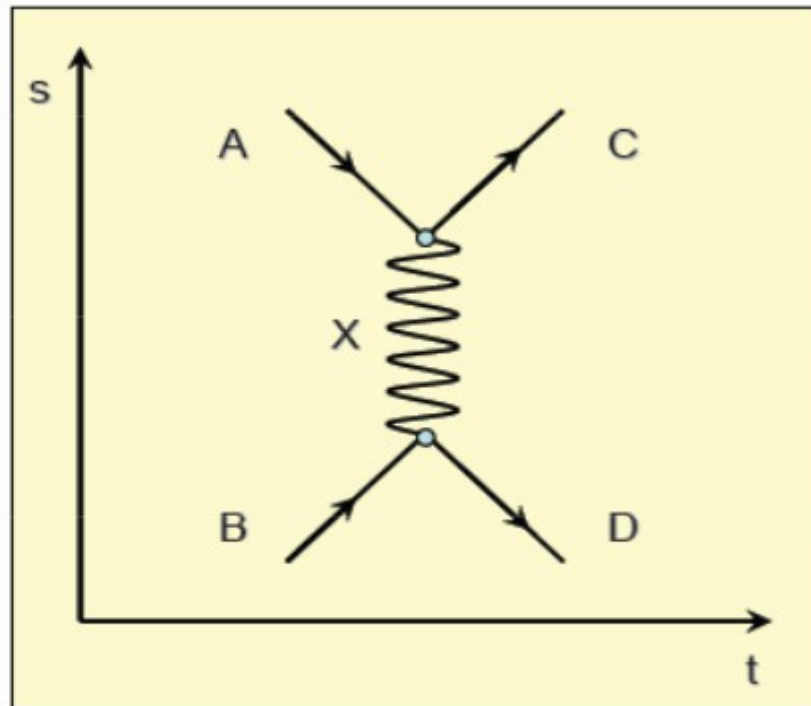


σε κάθε κορυφή διατηρείται το φορτίο

Διάγραμμα ανταλλαγής: Τα σωμάτια A και B ανταλλάσσουν το δυνητικό σωμάτιο X και δημιουργούνται τα σωμάτια C και D. Δεν έχει σημασία ποιο εκπέμπει το X. Είναι μια διαφορετική περιγραφή από το διάγραμμα εξαΰλωσης και δημιουργίας



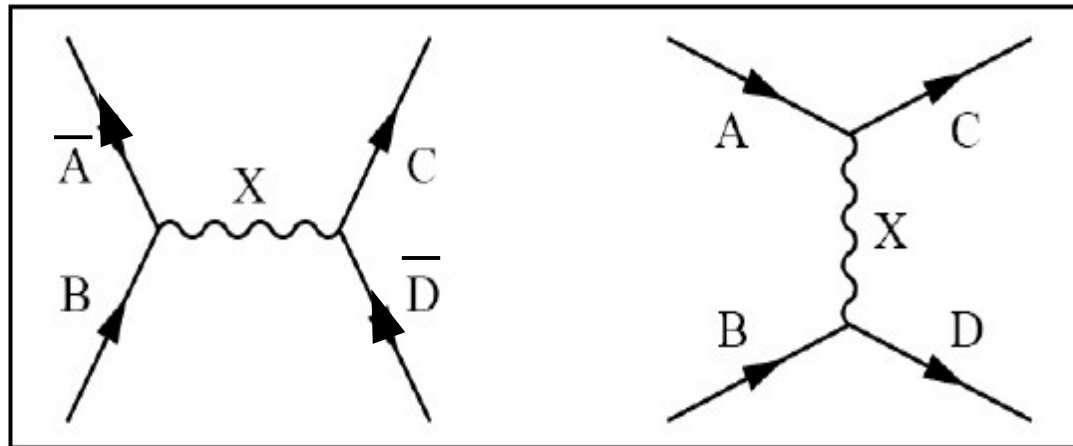
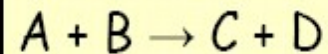
Αντίδραση όπως φαίνεται στο σύστημα εργαστηρίου



Διαγράμματα Feynman

Γενικές Ιδιότητες

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

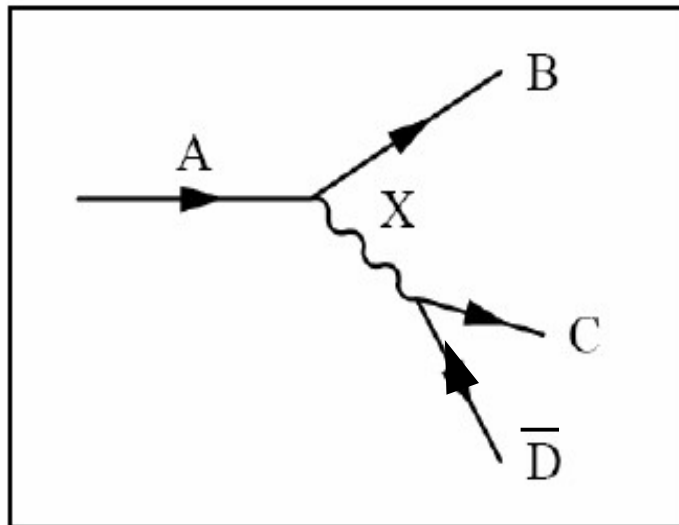


Διαγράμματα Feynman

Γενικές Ιδιότητες

ή της μορφής:

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



A, B, C, D

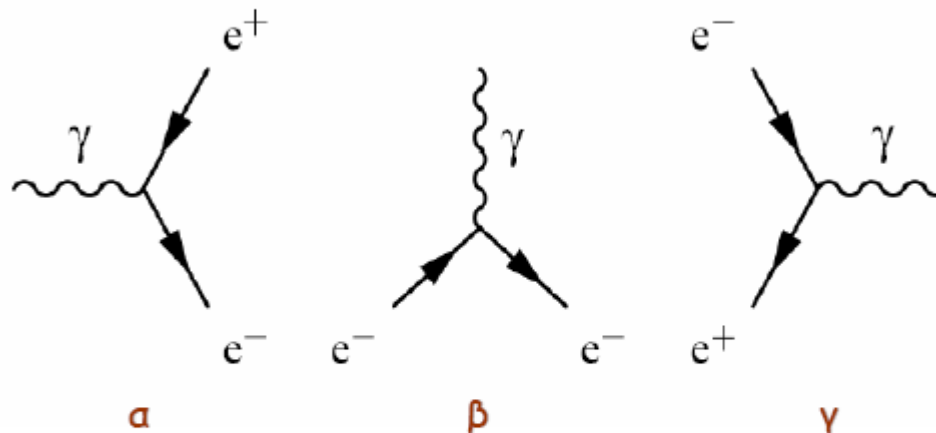
- Κουάρκ
- Λεπτόνια
- Αντικουάρκ
- Αντιλεπτόνια

X

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

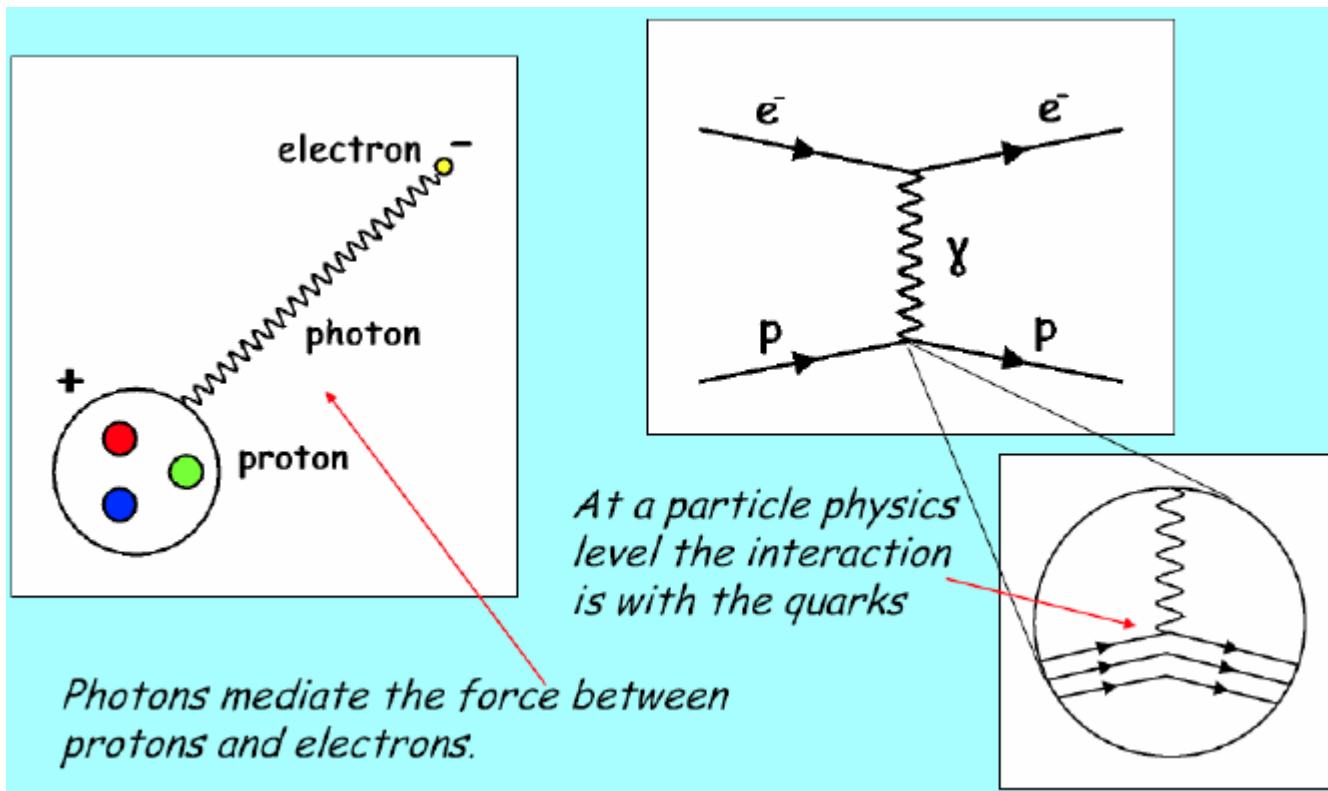
Διαγράμματα Feynman

Ηλεκτρομαγνητικές Αλληλεπιδράσεις

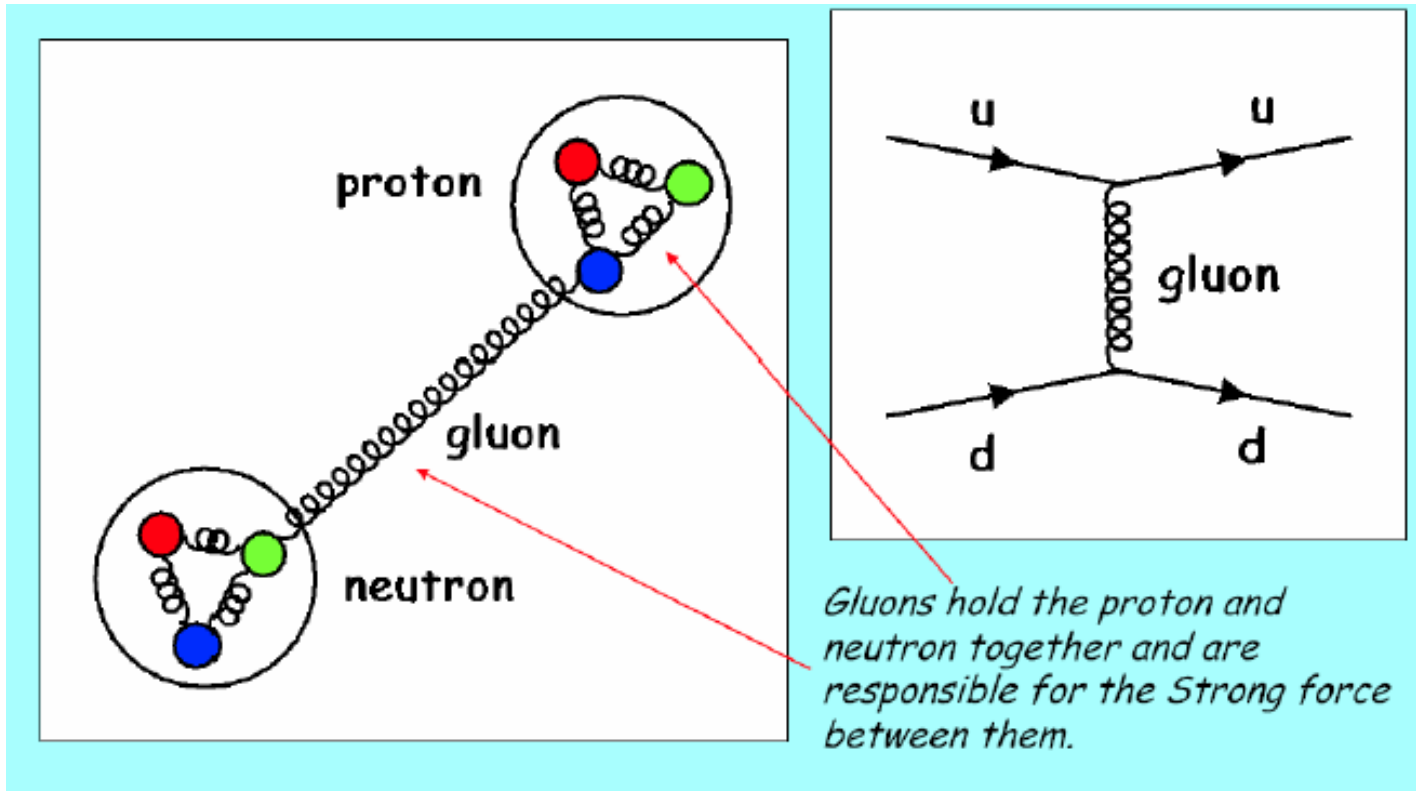


- (α) Δίδυμη Γένεση
- (β) Φωτοηλεκτρικό φαινόμενο
- (γ) Εξαΰλωση ποζιτρονίου

Ηλεκτρομαγνητικές Αλληλεπιδράσεις



Ισχυρές Αλληλεπιδράσεις

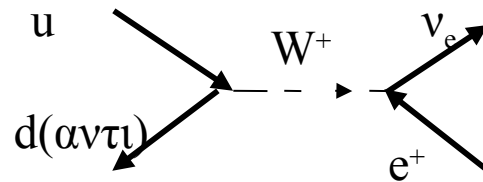
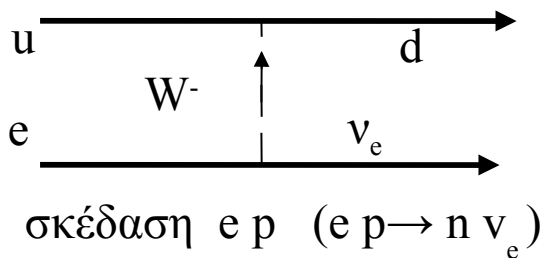


Οι διαδότες των ασθενών δυνάμεων

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

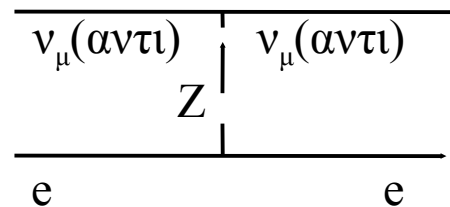
$$- u \rightarrow d, e^- \rightarrow \nu_e$$

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

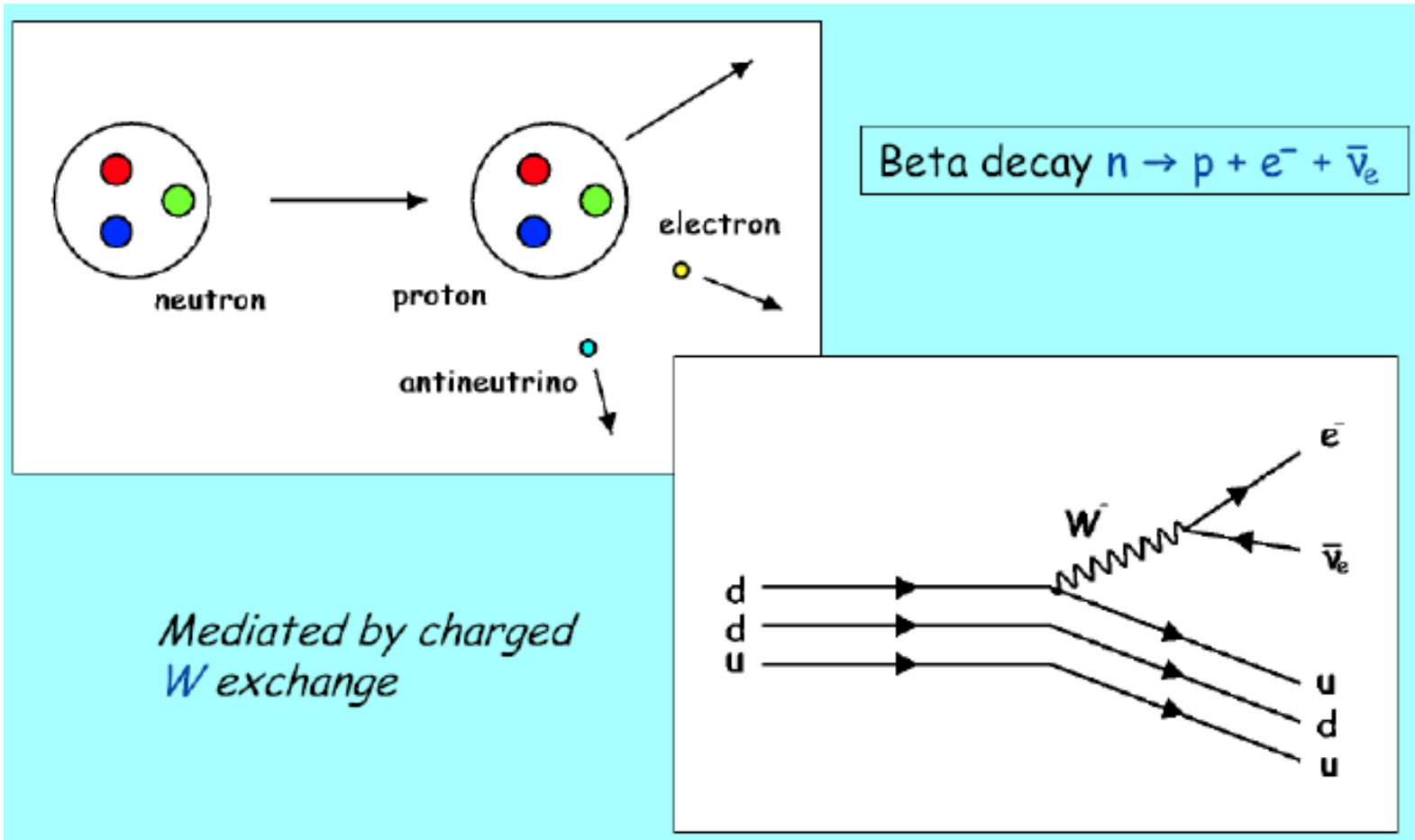


παραγωγή W^+ και διάσπαση σε $\nu_e e^+$

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



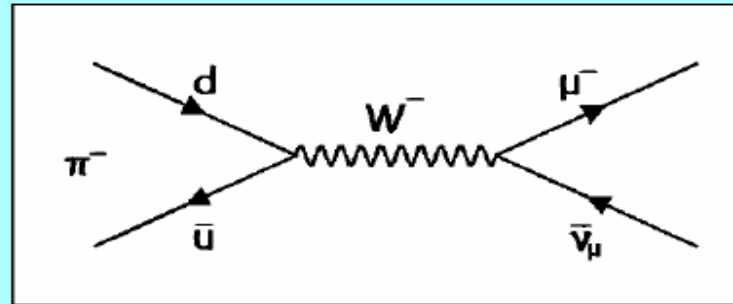
Ασθενείς Αλληλεπιδράσεις



Ασθενείς Αλληλεπιδράσεις

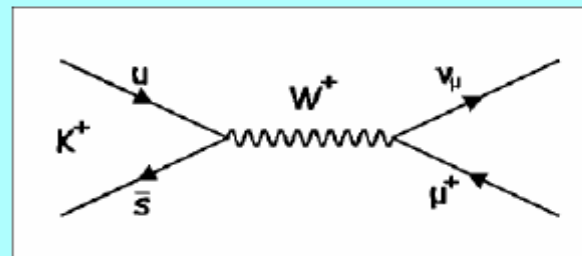
$\Delta S = 0$ (No strangeness change)

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

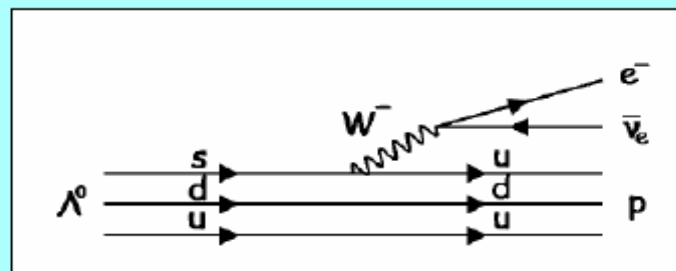


$\Delta S = 1$ (Strangeness changes)

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



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

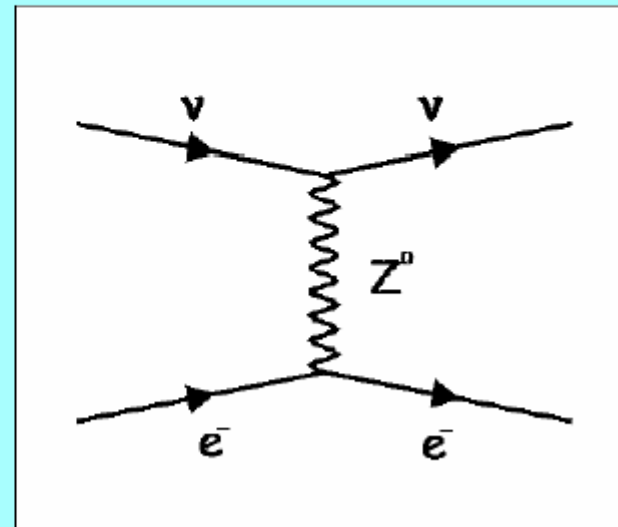


Ασθενείς Αλληλεπιδράσεις



*Mediated by neutral
Z exchange*

Neutrino scattering
off an electron



Άσκηση 1

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

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

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

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

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

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

$$\nu p \rightarrow \bar{\mu} n$$

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

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

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

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

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

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

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

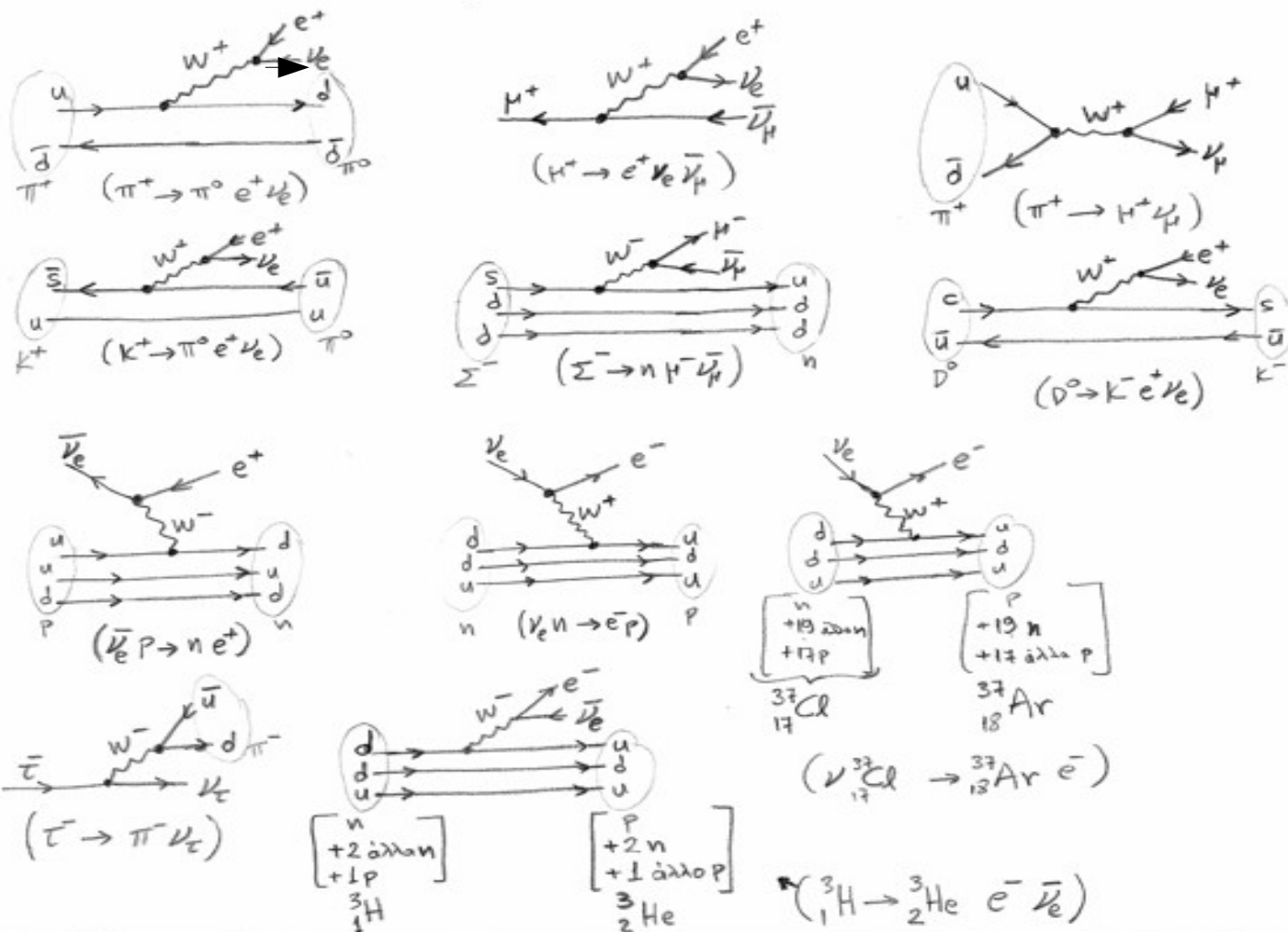
$$\pi^- \rightarrow e^- \nu$$

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

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

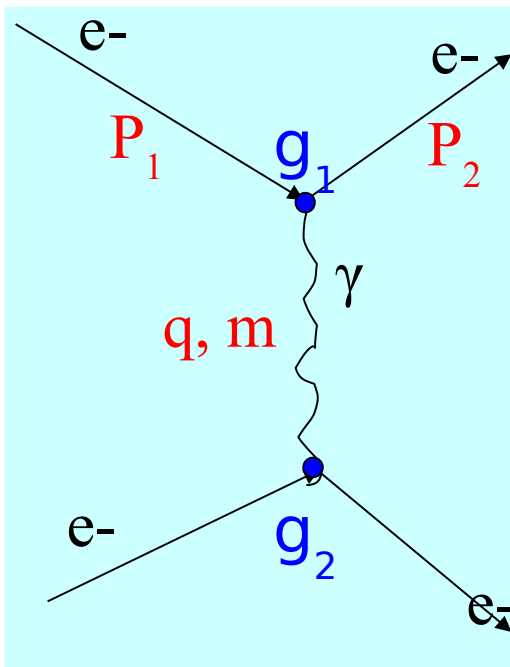
Άσκηση 1 - Λύση

Αυτές οι αντιδράσεις επιτρέπονται: α) Τι είδος είναι τα νευτρίνα?
 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 $f(q)$ είναι το matrix element M της μετάβασης από την αρχική στην τελική κατάσταση

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

- g_1, g_2 η ισχύς της σύζευξης του μποζονίου (διαδότη) με τα σκεδαζόμενα σωμάτια. Εδώ: $g_1 = g_2 = g$
- $q^2 + m^2$ τετρα-ορμή και μάζα του διαδότη

Matrix Element και σταθερά σύζευξης

$$W = \frac{2\pi}{\hbar} |M_{if}|^2 \cdot \rho_f$$

Golden rule: Χρυσός κανόνας του Fermi

- Ρυθμός αλληλεπιδράσεων W : αριθμ. μεταβάσεων από την αρχική (i) στην τελική κατάσταση (f) ανά μονάδα χρόνου. Ο ρυθμός W , εκτός από τον παράγοντα φάσεων, εξαρτάται και από το matrix element M της μετάβασης:

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

- Σκεδάσεις σταθερού στόχου: $W = \sigma * \Phi =$ (ενεργός διατομή) * (ροή σωματιδίων το ένα κοντά στο άλλο)

- Σκεδάσεις συγκρουόμενων δεσμών: $W = \sigma * L =$ (ενεργός διατομή) * Instantaneous Luminosity

- Διασπάσεις σωματιδίου: $W = 1/\tau = \Gamma / \hbar$

$$\text{Θυμηθείτε : } \Gamma \tau = \hbar \rightarrow \tau = \frac{\hbar}{\Gamma}$$

- Οπότε: $\sigma \sim W \sim |M|^2 \sim g^4$ και $\Gamma \sim W \sim |M|^2 \sim g^4$

Ηλεκτρομαγνητικές Αλληλεπιδράσεις

Η σταθερά σύζευξης σε κάθε κόμβο των Feynman είναι

$\sqrt{\alpha}$

Σταθερά λεπτής υφής: 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 .

$$\alpha = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 \left(\frac{\hbar}{mc}\right)^2} = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 \hbar c} = \frac{1}{137}$$

Θα χρησιμοποιούμε παντού:

MeV για ενέργεια,

$1/4\pi\epsilon_0 = 1$ σε όλους τους τύπους,

και θα βάζουμε:

$$\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} = e^2 = \alpha \hbar c, \text{ όπου } \alpha = 1/137$$
$$\hbar c = 197 \text{ MeV fm}$$

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

$$\alpha = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 \hbar c} = (\mu\epsilon \ 4\pi\epsilon_0 = 1 \text{ και } \hbar c = 1) \rightarrow \sqrt{\alpha} = e$$

Ηλεκτρομαγνητικές Αλληλεπιδράσεις

Η σταθερά σύζευξης σε κάθε κόμβο των Feynman είναι

$$\sqrt{\alpha}$$

Η ισχύς της αλληλεπίδρασης μεταξύ φορτισμένων σωματιών και φωτονίων είναι όσο το φορτίο του ηλεκτρονίου: $g = \text{sqrt}(\alpha) \sim e$:

(η σταθερά της λεπτής υφής α)

Σε κάθε κόμβο, ισχύς σύζευξης \sim

$$\sqrt{\alpha}$$

Πιθανότητα σύζευξης $\sim \alpha$

Φωτοηλεκτρικό φαινόμενο :

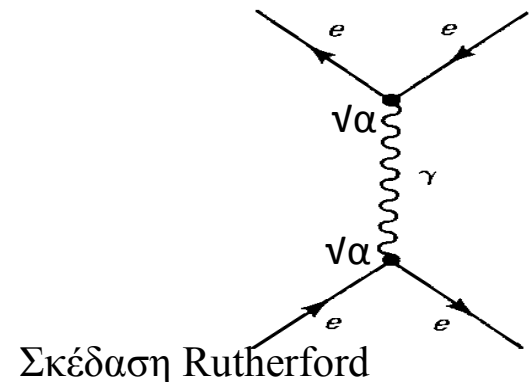
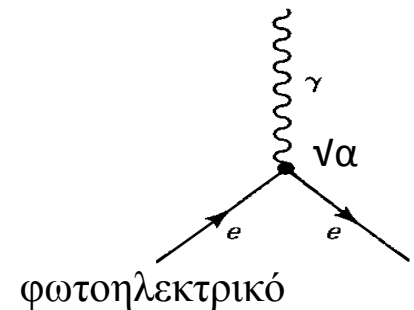
πλάτος της αλληλεπίδρασης $\sim \sqrt{\alpha}$

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

Σκέδαση Coulomb:

πλάτος της αλληλεπίδρασης $\sim \alpha$

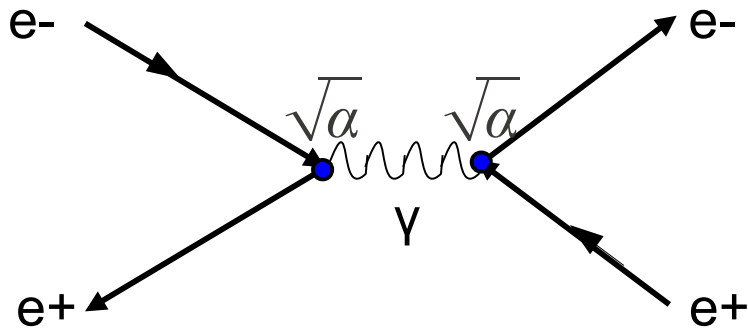
=> ενεργός διατομή: $\sim \alpha^2$ (2ης τάξης)



Άσκηση 2

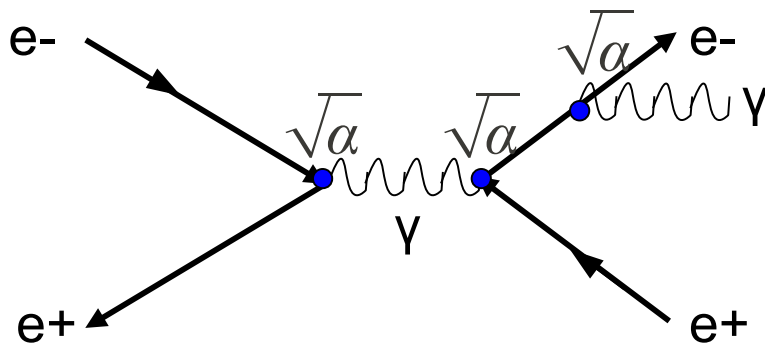
Ποιά απ'τις 2 εκδοχές είναι η πιθανότερη να γίνει? Κατά πόσο σε σχέση με την άλλη?

Διαφορά στην πιθανότητα να συμβούν οι δύο αυτές εκδοχές:

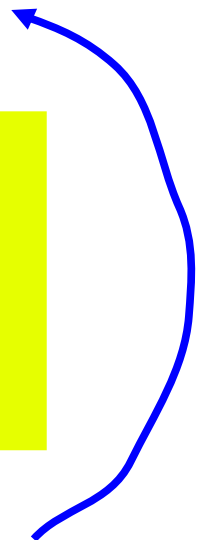


ενεργός διατομή $\sigma \sim \alpha^2$
 $e^+ e^- \rightarrow e^+ e^-$

Το πάνω είναι
πιθανότερο
κατά $1/\alpha = 137$



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

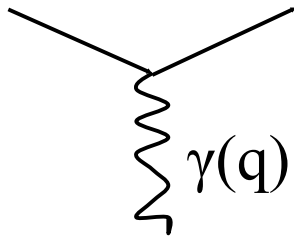


Οι διαδότες των ασθενών δυνάμεων

- 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)



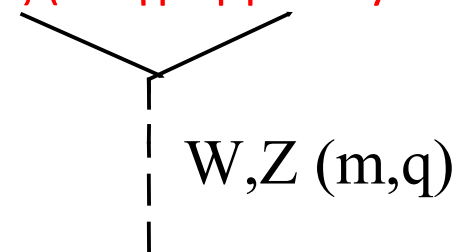
- Σταθερά Σύζευξης

$$\alpha = e^2,$$

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

Ασθενείς Δυνάμεις

- κόμβος (διάγραμμα Feynman)



- Σταθερά Σύζευξης

$$a_w = g^2,$$

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

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:

$$g = e$$

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

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

Η ασθενής σύζευξη εμφανίζεται με σταθερά G (τη σταθερά Fermi) που είναι 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 ΔC, ΔS≠0 (αλλά μέχρι ΔC, ΔS = +-1)
- Περιλαμβάνουν είτε μόνο 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 $\Delta t = \tau \rightarrow$

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

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

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

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

$\Gamma \sim 1/\tau =$ 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 “ α ”²

(όπου “ α ”² = α^2 ή α_w^2 ή α_s^2 : ανάλογο αν η αλληλεπίδραση είναι ηλεκτρομαγνητική, ασθενής ή ισχυρή, αντίστοιχα)

$$\frac{1}{\tau} \sim \Gamma \sim \alpha^2$$

Άσκηση 3

Συγκρίνετε τις σταθερές σύζευξης για τις εξής διασπάσεις.

- $\Sigma^0 \rightarrow \Lambda^0 + \pi^0$ $\tau = 10^{-23}$ sec (αυτή δεν μπορεί να γίνει, επειδή η μάζα του Σ βαρυονίου είναι μικρότερη από το άθροισμα μαζών των Λ και π . Πάντως οι διασπάσεις διά των ισχυρών αλληλεπιδράσεων όντως γίνονται με χαρακτηριστικό μέσο χρόνο ζωής της τάξης των 10^{-23} sec)
- $\Sigma^0 \rightarrow \Lambda^0 + \gamma$ $\tau = 10^{-19}$ sec (τυπικός χρόνος για ηλεκτρομαγνητικές διασπάσεις, από 10^{-16} ως 10^{-20} sec)
- $\Sigma^- \rightarrow n + \pi^-$ $\tau \approx 10^{-10}$ sec (τυπικός χρόνος για ασθενείς αλληλεπιδράσεις)

Οι χρόνοι διάσπασης επιβεβαιώνουν τη συσχέτιση με τις σταθερές σύζευξης!

Άσκηση 2 – λύση

Και Ισχυρές Αλληλεπιδράσεις

- Οι ισχυρές αλληλεπιδράσεις συμβαίνουν μεταξύ κουάρκ ή/και γκλουονίων



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

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

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

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	$a_s=0.1-1$	$G = G_F=10^{-5}$ GeV^{-2}	$a= 1/137$	$\text{KM}^2/\hbar c =$ 0.5×10^{-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}	

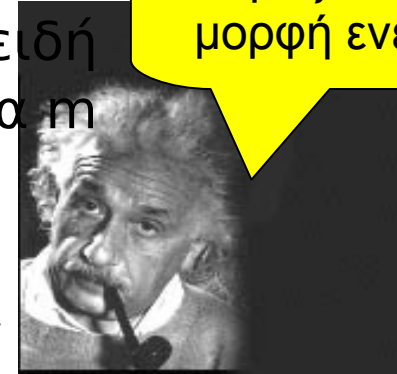
Ο χρόνος ζωής είναι ένδειξη για το ποιά αλληλεπίδραση είναι υπεύθυνη για τη διάσπαση, και τι “α” (σταθερά σύζευξης) έχει αυτή η αλληλεπίδραση. Να έχετε υπ’ όψιν σας αυτές τις τάξεις μεγέθους.

Σχετικιστική κινηματική

Σχετικιστική κινηματική:

$E = mc^2$ = η ενέργεια που έχω επειδή απλά και μόνο έχω μάζα m
 E → ενέργεια
 m → μάζα
 c = ταχύτητα του φωτός

Η μάζα είναι μια μορφή ενέργειας



γενικά, με κινητική ενέργεια K , έχουμε: $E = T + m c^2$

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

$p = m \gamma v = m \gamma \beta c$, όπου p = ορμή

$E^2 = (pc)^2 + (mc^2)^2$ → E [MeV], p [MeV/c], m [MeV/c²]

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

$\beta = pc/E$

Μονάδες

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

$$\text{μονάδα ενέργειας} \equiv eV = 1.6 * 10^{-19} \text{ Cb} * V = 1.6 * 10^{-19} \text{ Joule}$$

Συνήθως χρησιμοποιούμε το MeV (= 10^9 eV)

$$\text{Σταθερά του Planck} = \mathbf{h} = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J s}$$

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

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

$$\alpha = \text{η σταθερά λεπτής υφής} = 1/137$$

Θα χρησιμοποιούμε παντού:
eV για ενέργεια (ή MeV στην πυρηνική),
 $1/4\pi\epsilon_0 = 1$ σε όλους τους τύπους.

και θα βάζουμε: $e^2 = \alpha \hbar c$, όπου $\alpha = 1/137$

$$\hbar c = 197 \text{ MeV fm}$$

Μετράμε:

Μάζα: MeV/c² (αφού $E = mc^2$)

Ορμή: MeV/c (αφού $p = m\gamma v$)

Χρόνος σε: 1/MeV (αφού η μονάδα δράσης = Ενέργεια * Χρόνος = 1)

Μήκος σε: μονάδες χρόνου = 1/MeV (αφού η μονάδα ταχύτητας=1)

1 amu = 1/12 μάζας ουδέτρου ατόμου ¹²C = 931.5 MeV/c²

Μάζα ηλεκτρονίου = 0.511 MeV/c²

Μάζα πρωτονίου = 938.3 MeV/c², Μάζα νετρονίου = 939.6 MeV/c²