

Πυρηνική Φυσικής και Φυσική Στοιχειωδών Σωματιδίων (5ου εξαμήνου, χειμερινό)

Τμήμα Τ2: Κ. Κορδάς & Δ. Σαμψωνίδης

Μάθημα 22

Αλληλεπίδραση σωματιδίων και
διαγράμματα Feynman

Κώστας Κορδάς

Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

1.

Κουάρκ και λεπτόνια – επανάληψη

Σε μια οποιαδήποτε “αντίδραση” μεταξύ σωματιδίων:
εκτός από την ενέργεια, στροφορμή, φορτίο , τη συμμετρία
των κυματοσυναρτήσεων (για ταυτόσημα σωματίδια), και τη
διατήρηση ή την παραβίαση της πάριτυ,
ελέγχουμε και τη διατήρηση νέων κβαντικών αριθμών
(βαρυονικού και λεπτονικών)

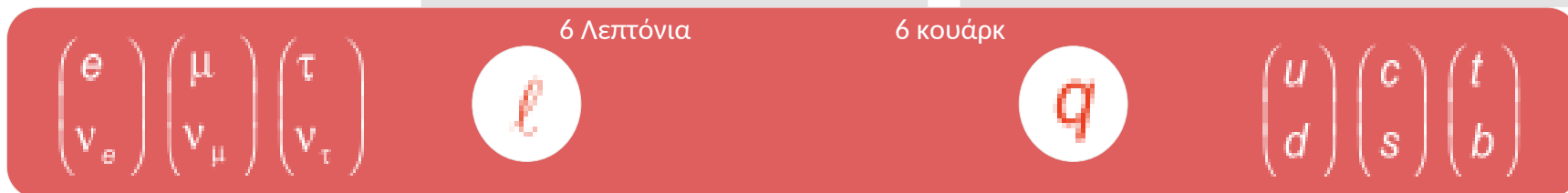
Όλα μαζί – η θεωρία μας για τα δομικά/βασικά συστατικά της ύλης και πώς αυτά αλληλεπιδρούν μεταξύ τους:

“Το Καθιερωμένο Πρότυπο”

Φερμιόνια

Σωματίδια ύλης

Κάθε κατηγορία σε 3 οικογένειες



Μποζόνια

Διαδότες/φορείς των δυνάμεων

3 δυνάμεις



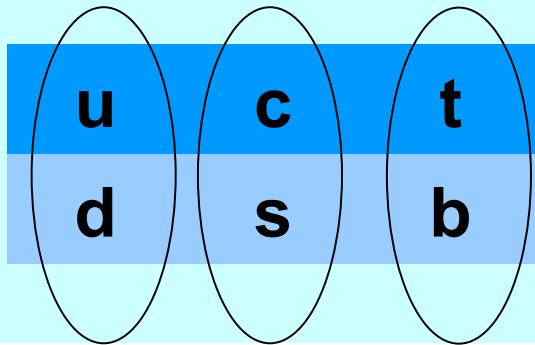
Μποζόνιο Higgs (BEH)



“Σπάει” την Ηλεκτρασθενή Συμμετρία
Δίνει μάζα στα **στοιχειώδη σωματίδια**

Κουάρκ & γεύσεις (quarks & flavors)

Κουάρκ



Φορτίο (Q)	Βαρυονικός Αριθμός (B)	Αντίστοιχος Αριθμός “γεύσης” (ίδιο πρόσημο με το φορτίο)
$+2/3$	$+1/3$	$+1$
$-1/3$	$+1/3$	-1

- * Η δεύτερη οικογένεια (c, s) είναι αντίγραφο της πρώτης (u, d), αλλά με πιο βαριά κουάρκ
 - * Και η τρίτη οικογένεια (t, b) είναι επίσης αντίγραφο της πρώτης με ακόμα βαρύτερα κουάρκ
- c=charm quark=“γοητευτικό” κουάρκ
s=strange quark=“παράξενο” κουάρκ
t= top quark , b = bottom quark

- Λέω ότι τα κουάρκς έρχονται σε **6 “γεύσεις”**: up, down, strange, κλπ.
- * Αντί να λέω ότι έχω ένα **charm** κουάρκ μπορώ να λέω ότι έχω ένα κουάρκ με “γεύση charm” και “charmness” = +1
 - * Αντί να λέω ότι έχω ένα **strange** κουάρκ μπορώ να λέω ότι έχω ένα κουάρκ με “γεύση strange” και “strangeness” = -1

Κουάρκ & κβαντικοί αριθμοί τους

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

Κβαντικοί Αριθμοί
των **κουάρκ**

και

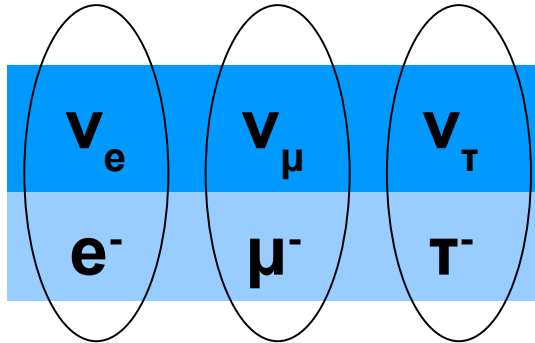
των **αντικουάρκ**
(αντίθετες τιμές
στους κβαντικούς
αριθμούς τους)

	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

	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: έχουν λεπτονικούς κβαντικούς αριθμούς (δεν έχουν “βαρυονικό” αριθμό)

Λεπτόνια



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

Λεπτόνια: Κάθε οικογένεια (ηλεκτρονίου, μιονίου, και ταυ) έχει δικό της Λεπτονικό αριθμό, που διατηρείται ανεξάρτητα από τους άλλους:

- λεπτονικός αριθμός του ηλεκτρονίου (e, ν_e) = L_e
- λεπτονικός αριθμός του μιονίου (μ, ν_μ) = L_μ
- λεπτονικός αριθμός του ταυ (τ, ν_τ) = L_τ
- Επίσης φυσικά πάντα διτηρείται το φορτίο = Q

Κάθε λεπτόνιο έχει αντίστοιχο λεπτονικό αριθμό = 1

Τα αντι-λεπτόνια έχουν λεπτονικό αριθμό = -1 ← ΠΡΟΣΟΧΗ

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**

Τα βασικά σωματίδια της ύλης: 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

Βαρυονικός Αριθμός = 0 για όλα τα λεπτόνια

2.

Αλληλεπιδράσεις σωματιδίων με
ανταλλαγή “διαμεσολαβητή” : εικόνα
Yukawa και εμβέλεια δύναμης

Δυνάμεις αλληλεπίδρασης

– κλασική και κβαντική εικόνα

- **Κλασική εικόνα αλληλεπίδρασης:** Το δυναμικό ή το πεδίο ενός σώματος που επιδρά στο άλλο σώμα.
- **Κβαντική θεώρηση θεώρηση:** Η αλληλεπίδραση περιγράφεται με την ανταλλαγή κβάντων (μποζονίων) συγκεκριμένων για κάθε τύπο αλληλεπίδρασης.

Η διαδικασία πραγματοποιείται σε χρονικό διάστημα που καθορίζεται από την Αρχή της Αβεβαιότητας

$$\Delta E \cdot \Delta t \sim \hbar$$

Δυναμικό Yukawa

Στις δυνάμεις μεταξύ των νουκλεονίων μέσα στους πυρήνες είχαμε δει ότι ο Yukawa είπε ότι η αλληλεπίδραση μεταξύ των νουκλεονίων γίνεται με την **ανταλλαγή ενός σωματιδίου-διαδότη με σχετικά μεγάλη μάζα, m**

- Ο διαδότης γεννιέται και εξαφανίζεται χωρίς ποτέ να τον δούμε: εμείς βλέπουμε τα αρχικά σωματίδια και τα τελικά σωματίδια, και μεταξύ αρχικών και τελικών μπορούμε να κάνουμε διατήρηση ενέργειας και ορμής.
- Ο ενδιάμεσος διαδότης όμως μπορεί να έχει ενέργεια που παραβιάζει τη διατήρηση της ενέργειας, για λίγο, αλλά αν εξαφανιστεί “πρίν τον δούμε”, δηλαδή υπάρχει για όσο του επιτρέπει η αβεβαιότητα του Heisenberg, τότε ούτε γάτα ούτε ζημιά.
- Εκπομπή και απορρόφηση του σωματιδίου διαδότη μάζας m , με παραβίαση της ενέργειας κατά mc^2 : δεν μπορεί να διαρκέσει πάνω από

$$\Delta E \Delta t \simeq \hbar \rightarrow m c^2 \Delta t \simeq \hbar$$
$$Εμβέλεια = R = c \Delta t = \frac{\hbar}{m c}$$

→ Πεπερασμένη ακτίνα δράσης για διαδότες με μάζα

- Χρησιμοποιώντας την **εμβέλεια ($\sim 1.4 \text{ fm}$)**, υπολογίζουμε **$m \sim 140 \text{ MeV}$** ($\sim$ μάζα πιονίου: οπότε αρχικά υποθέσαμε ότι ο διαδότης των πυρηνικών δυνάμεων μεταξύ **νουκλεονίων** είναι το πιόνιο)

Οι πραγματικοί διαδότες των δυνάμεων: “διανυσματικά” (σπιν=1) Μποζόνια

BOSONS

force carriers
spin = 0, 1, 2, ...

Unified Electroweak spin = 1

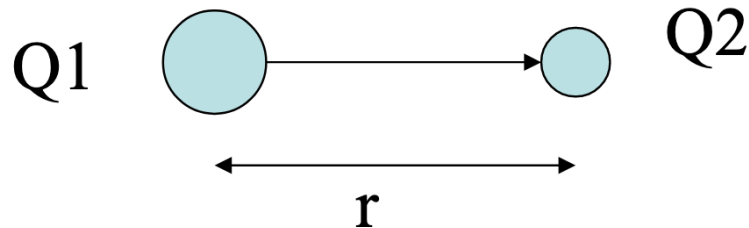
Name	Mass GeV/c ²	Electric charge
 photon	0	0
  W bosons	80.39	-1 +1
 Z boson	91.188	0

Strong (color) spin =1

Name	Mass GeV/c ²	Electric charge
 gluon	0	0

Κλασική εικόνα: Πεδία, δυναμικά

- Η αλληλεπίδραση μεταξύ δύο φορτισμένων σωμάτων σε απόσταση εκφράζεται-περιγράφεται με το **πεδίο ή το δυναμικό** του ενός σώματος το οποίο επιδρά πάνω στο άλλο σώμα



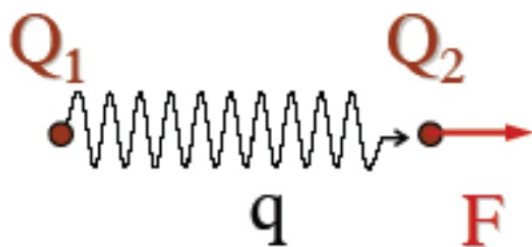
$$\vec{F}(r) = Q2 \cdot \vec{E}(r)$$

$$\vec{E}(r) \propto Q1 \cdot \frac{\hat{r}}{r^2}$$

$$\vec{F}(r) \propto Q1 \cdot Q2 \frac{\hat{r}}{r^2}$$

Εικόνα κβαντικής θεωρίας πεδίου (1)

- Η αλληλεπίδραση μεταξύ δύο σωμάτων σε απόσταση εκφράζεται - περιγράφεται την **ανταλλαγή κβάντων -των μποζονίων-** που διαφέρουν ανάλογα με το είδος της αλληλεπίδρασης.
- Μεταξύ των δύο προηγούμενων φορτίων ανταλλάσσεται ένα 'δυναμικό' φωτόνιο με ορμή q



Δύναμη

$$qr \approx \hbar \Rightarrow q \approx \frac{\hbar}{r} \Rightarrow q \approx \frac{\hbar}{ct} \Rightarrow \frac{dq}{dt} \approx \frac{\hbar}{ct^2} \Rightarrow \frac{dq}{dt} \approx \frac{\hbar c}{r^2}$$

Εικόνα κβαντικής θεωρίας πεδίου (2)

- Αλληλεπίδραση : ανταλλαγή ενέργειας και ορμής μεταξύ σωματιδίων
- Ηλεκτρομαγνητική αλληλεπίδραση : ανταλλαγή ‘**δυνητικών**’ φωτονίων μεταξύ φορτισμένων σωματιδίων → Σκέδαση Rutherford → δυνάμεις Coulomb
- ‘**Πραγματικό**’ σωματίδιο : όταν ισχύει: $E^2 = p^2 c^2 + m^2 c^4$
(το m αντιστοιχεί στη μάζα ηρεμίας του)
- **Δυνητικό** σωματίδιο: όταν **ΔE** ισχύει: **$E^2 = p^2 c^2 + m^2 c^4$**
(ή αν το $m \Delta E$ αντιστοιχεί στη μάζα ηρεμίας του σωματιδίου)
- Το δυνητικό σωματίδιο μπορεί να υπάρξει ΜΟΝΟ για χρόνο που του επιτρέπεται από την αρχή της απροσδιοριστίας **$\Delta t \leq \hbar / \Delta E$**

3. Διαγράμματα Feynman

Περιγραφή σε βασικό επίπεδο - Διαγράμματα Feynman

- Έχουμε μία 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

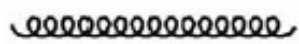
Βασικοί κανόνες σε κάθε κόμβο:

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

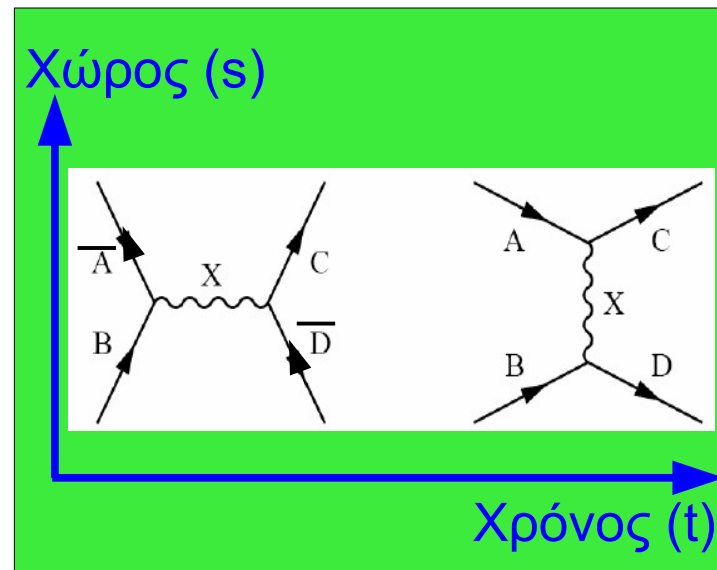
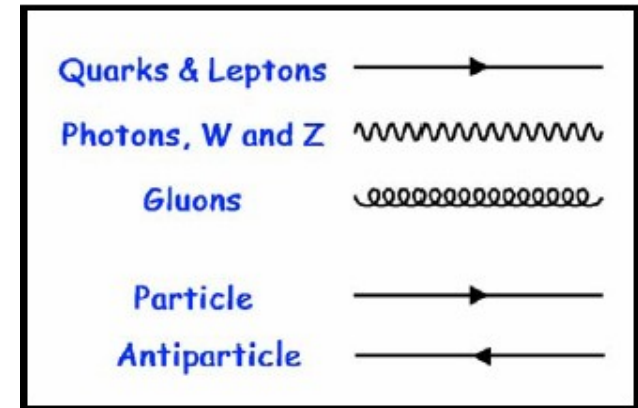
Συμβολισμοί πάνω στο διάγραμμα:

- Φερμιόνια: θετικός χρόνος
- Αντι-φερμιόνια: αρνητικός χρόνος

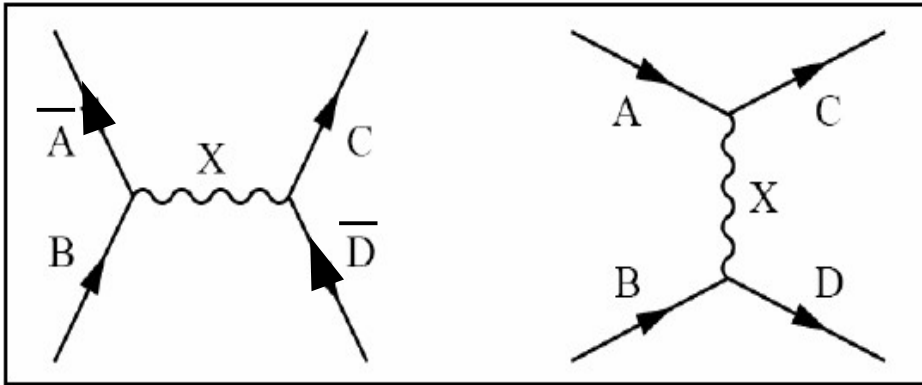
π.χ., το αντι-A έρχεται από αντίθετη κατεύθυνση και εξαϋλώνεται με το B. Όμως το αντι-A συμβολίζεται να κινείται προς το παρελθόν

- Μποζόνια {  

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



Διαγράμματα Feynman



Όταν ένα φερμιόνιο αναπαριστάται με βελάκι που πάει μπροστά στο χρόνο, είναι σωματίδιο. Ένα βελάκι που πάει προς τα πίσω, δηλώνει αντι-σωματίδιο.

Σε κάθε περίπτωση, η διαδικασκία στο διάγραμμα περιγράφει μια “ιστορία” που εξελίσσεται από τα αριστερά προς τα δεξιά:

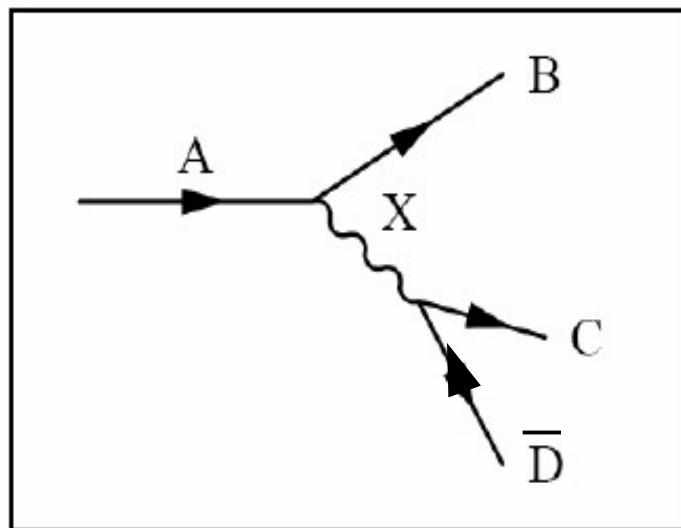
Αριστερά: το αντισωματίδιο $\bar{A}$ και το σωματίδιο B εξαϋλώνονται και δίνουν το σωματίδιο-διαδότη X , το οποίο εν συνεχεία διασπάται δημιουργώντας το σωματίδιο C και το αντισωματίδιο $\bar{D}$.

Δεξιά: τα σωματίδια A και B ανταλλάσσουν ένα σωματίδιο-διαδότη X και το μεν A μετατρέπεται στο σωματίδιο C , το δε σωματίδιο B μετατρέπεται στο σωματίδιο D .

Τα βελάκια στα διαγράμματα Feynman είναι βαλμένα έτσι ώστε να διευκολύνουν τους υπολογισμούς της πιθανότητας να γίνει αυτό που δείχνει το διάγραμμα.

Τα βέλη δείχνουν ένα “ρεύμα φερμιονίων”, όπου οι κόμβοι ούτε γεννάνε ούτε απορροφούν το ρεύμα. Στους κόμβους υπάρχει συνέχεια στο ρεύμα.

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



A, B, C, D

- Κουάρκ
- Λεπτόνια
- Αντικουάρκ
- Αντιλεπτόνια

X

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

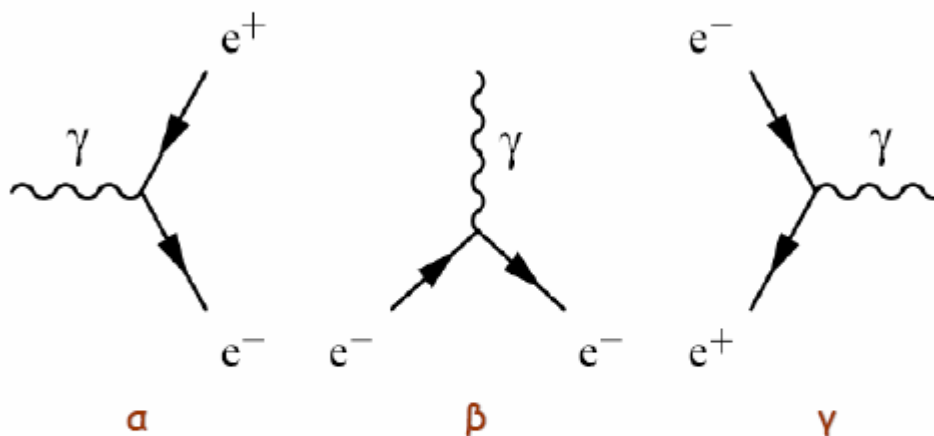
Τα σωματίδιο A μετατρέπεται στο σωματίδιο B εκπέμποντας ένα σωματίδιο-διαδότη X, το οποίο εν συνεχεία μετατρέπεται (“διασπάται”) στο σωματίδιο C και στο αντισωματίδιο $\bar{D}$

Εν συντομία λέμε:

το σωματίδιο A μετατρέπεται (“διασπάται”) στα σωματίδια B, C και $\bar{D}$ με τη μεσολάβηση του σωματιδίου-διαδότη X

Διαγράμματα Feynman

Ηλεκτρομαγνητικές Αλληλεπιδράσεις

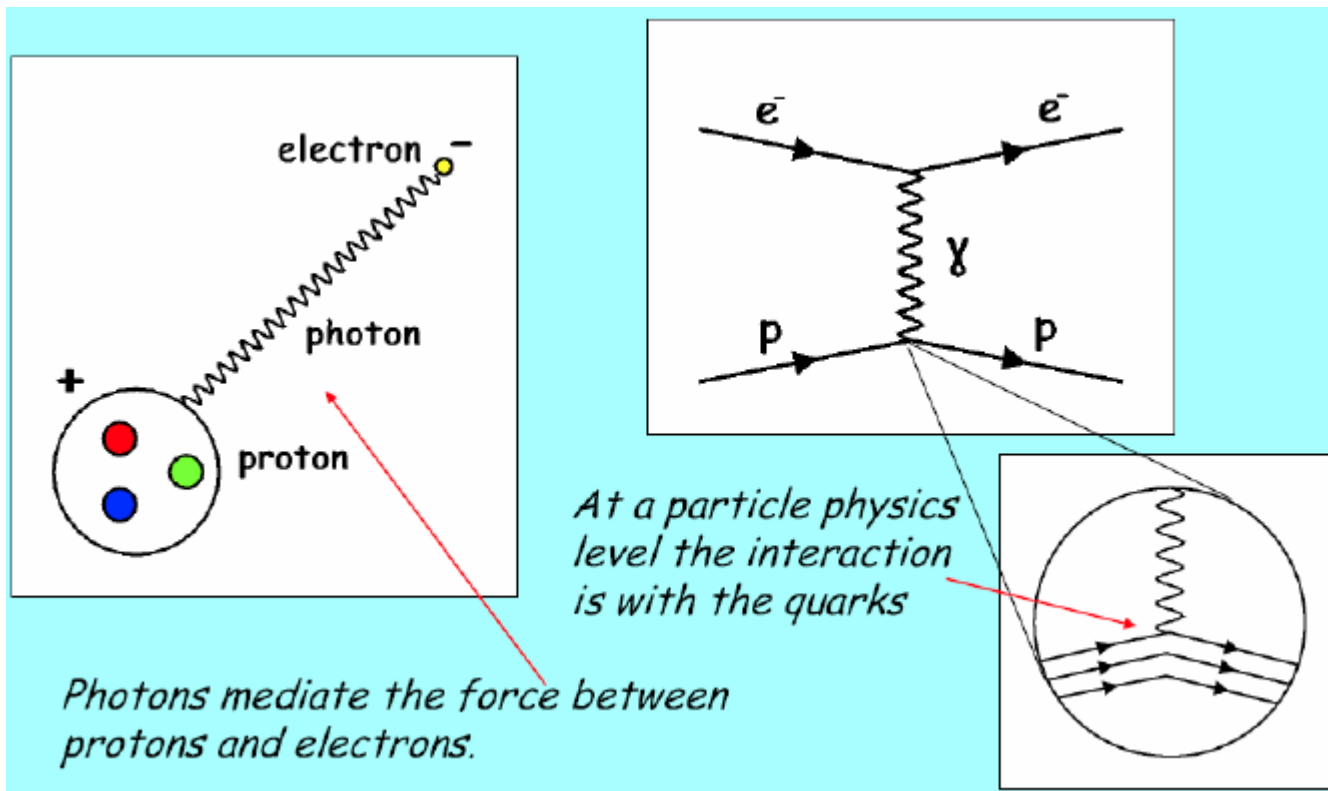


(α) Δίδυμη Γένεση

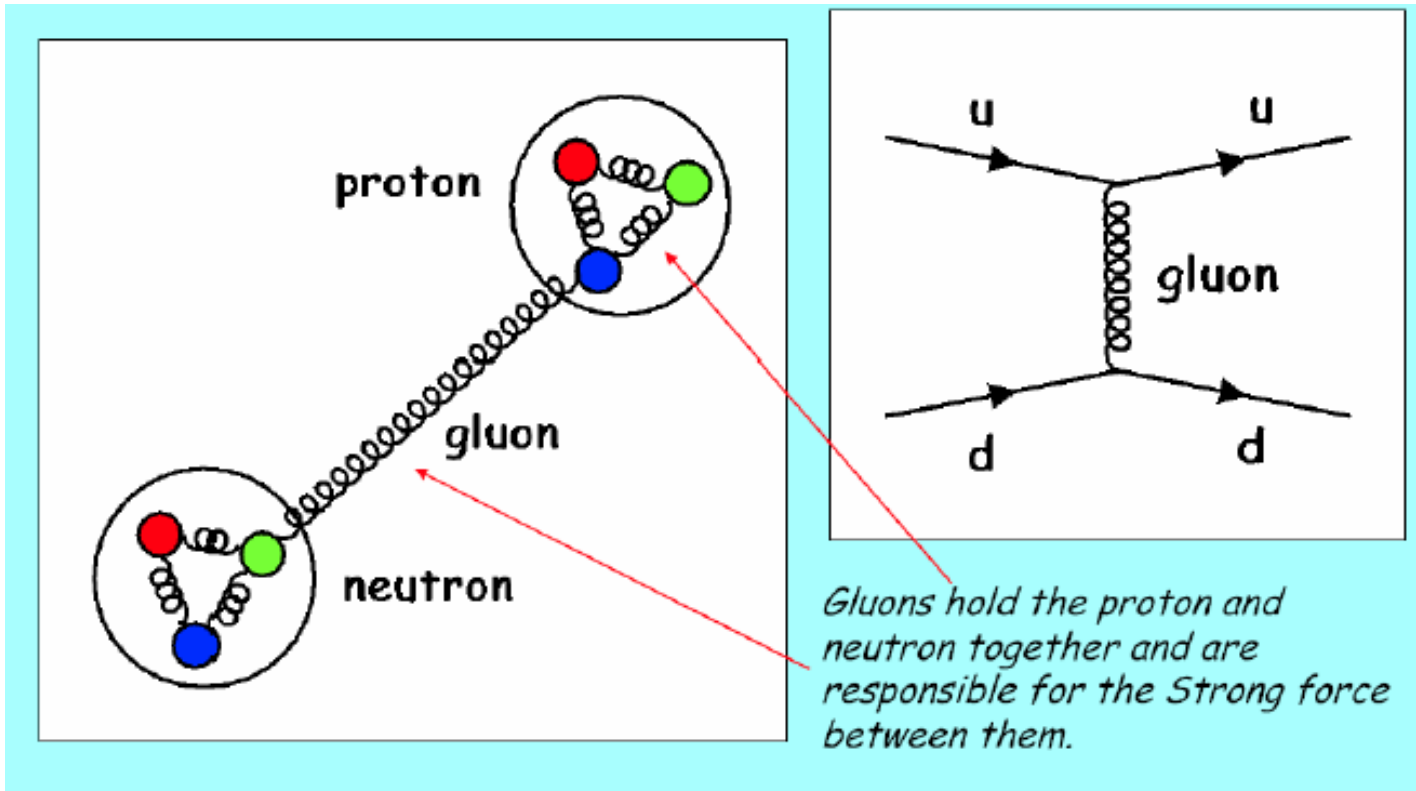
(β) Φωτοηλεκτρικό φαινόμενο

(γ) Εξαϋλωση ποζιτρονίου

Ηλεκτρομαγνητικές Αλληλεπιδράσεις



Ισχυρές Αλληλεπιδράσεις

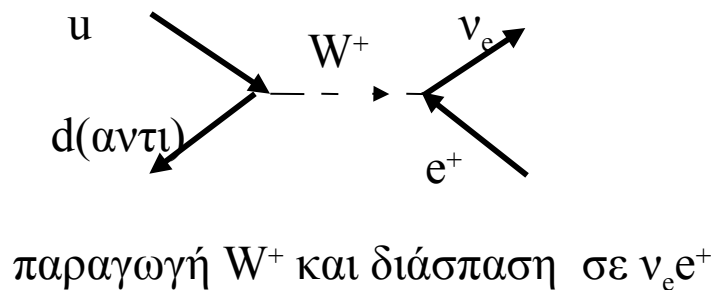
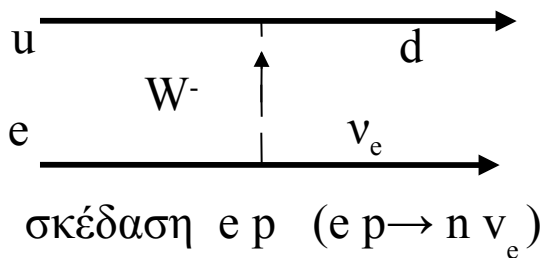


Οι διαδότες των ασθενών δυνάμεων

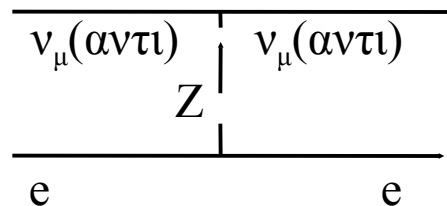
- Ανταλλαγή $W^\pm \Rightarrow$ μεταβολή του φορτίου των κουάρκ ή λεπτονίων που συμμετέχουν :

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

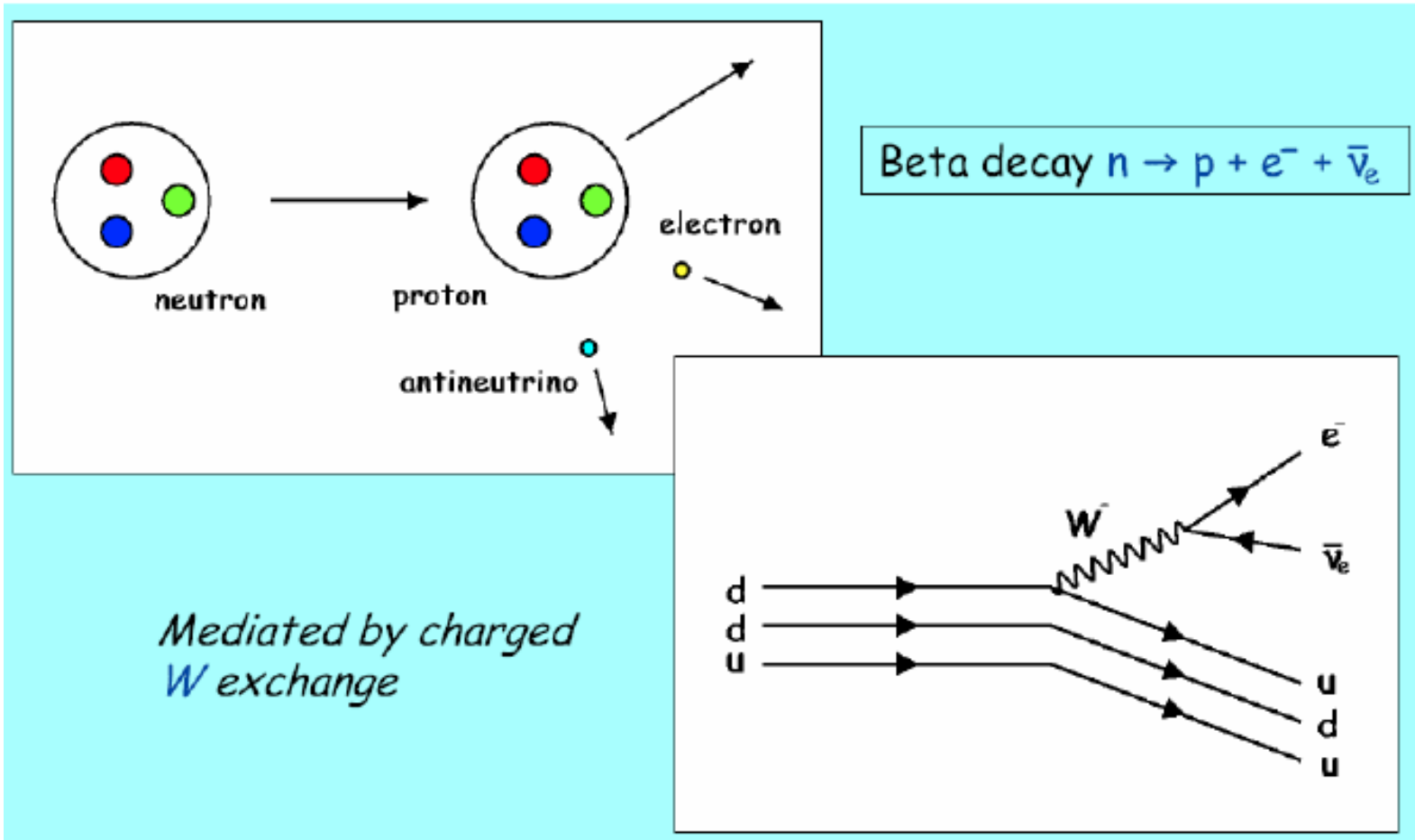
[ανταλλαγή W^- , W^+ αντίστοιχα] $\rightarrow$ φορτισμένα ασθενή ρεύματα



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



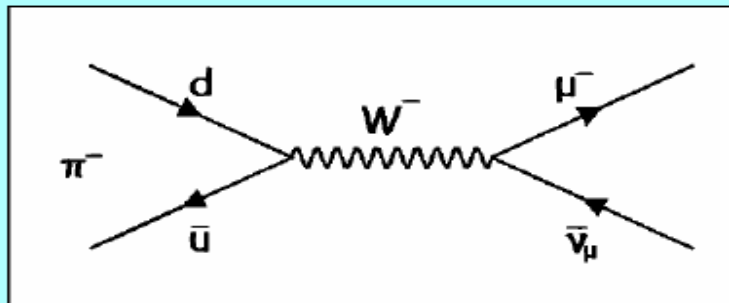
Ασθενείς Αλληλεπιδράσεις



Ασθενείς Αλληλεπιδράσεις

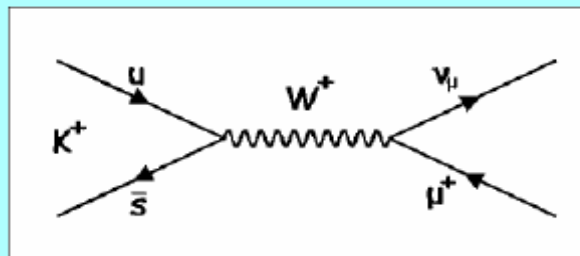
$\Delta S = 0$ (No strangeness change)

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

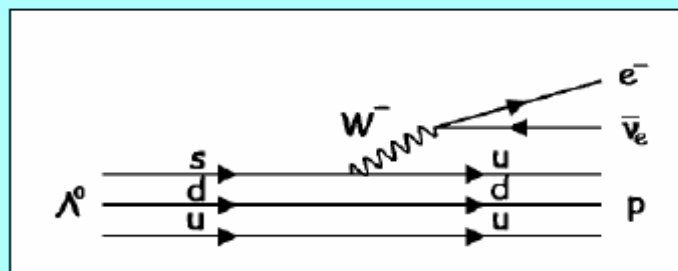


$\Delta S = 1$ (Strangeness changes)

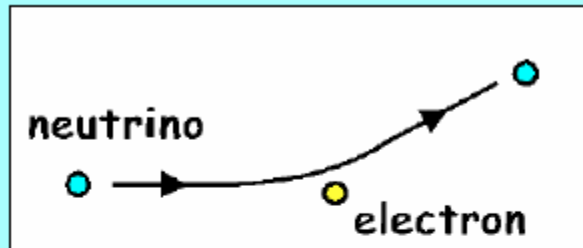
$$K^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$$



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

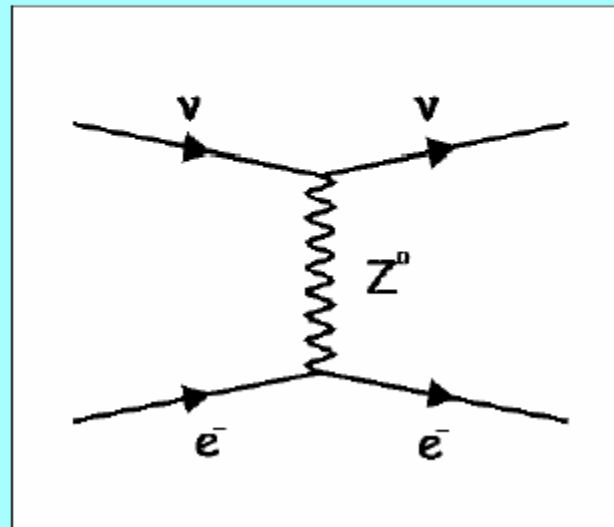


Ασθενείς Αλληλεπιδράσεις



*Mediated by neutral
 Z exchange*

Neutrino scattering
off an electron



Άσκηση

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

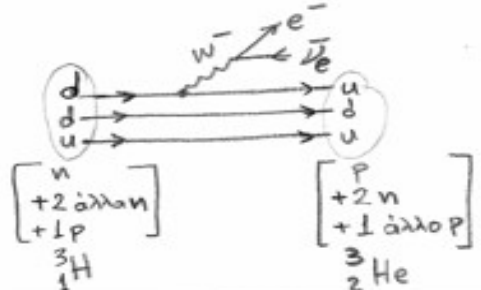
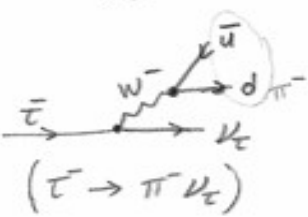
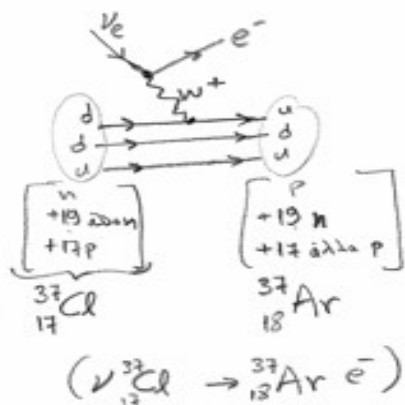
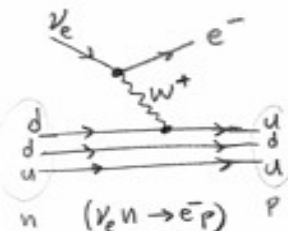
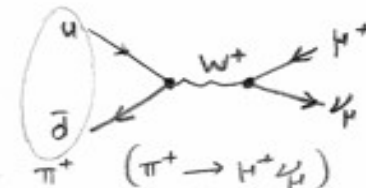
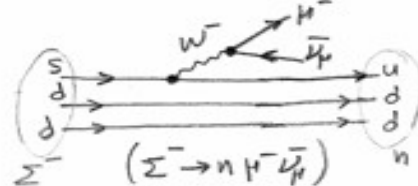
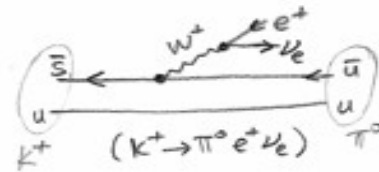
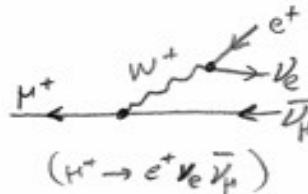
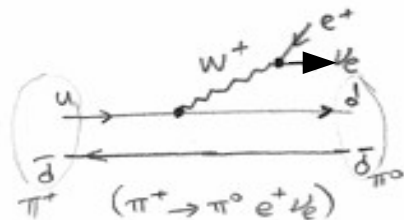
$$\pi^- \rightarrow e^- \nu$$

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

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

Άσκηση - Λύση

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



Άσκηση

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