

Στοιχεία Πυρηνικής Φυσικής και Στοιχειωδών Σωματιδίων (5ου εξαμήνου, χειμερινό 2017-18)

Τμήμα Τ2: Κ. Κορδάς & Δ. Σαμψωνίδης

Μάθημα 23-24

Στοιχειώδη Σωματίδια και κβαντικοί
αριθμοί τους - Αλληλεπίδραση
σωματιδίων και διαγράμματα Feynman

Κώστας Κορδάς

Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Πυρηνική & Στοιχειώδη, Αριστοτέλειο Παν. Θ/νίκης, 19-20 Δεκεμβρίου 2017

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

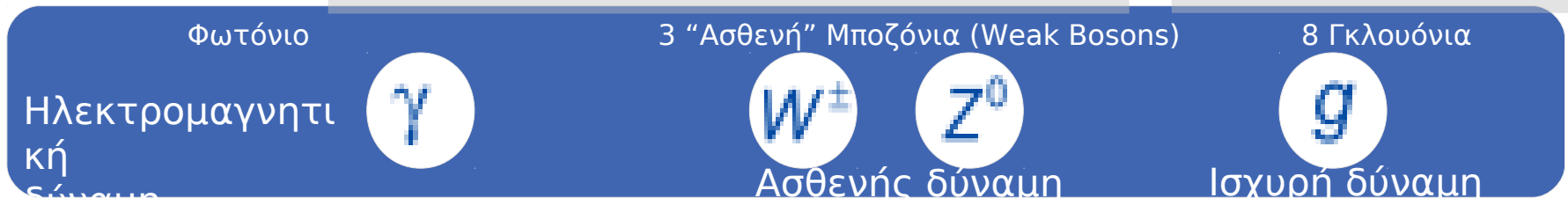
Κάθε κατηγορία σε 3 οικογένειες



Μποζόνια

Διαδότες/φορείς των δυνάμεων

3 δυνάμεις



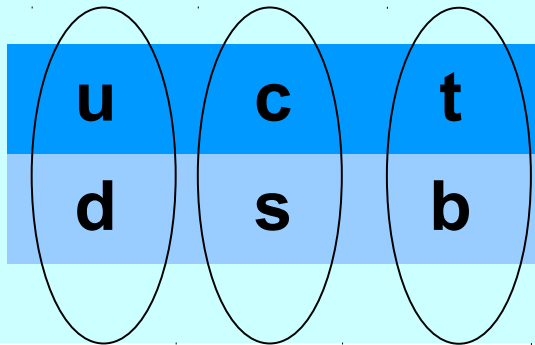
Μποζόνιο Higgs (BEH)



“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 αλληλεπιδράσεις
(Ισχυρές, Ασθενείς και ΗλεκτροΜαγνητικές)

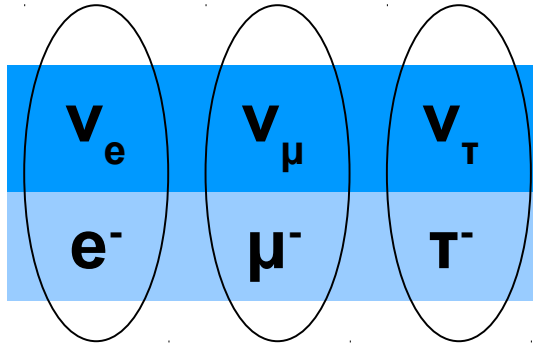
Κβαντικοί
Αριθμοί
των **κουάρκ**
και
των
αντικουάρκ
(αντίθετες
τιμές στους
κβαντικούς
αριθμούς τους)

	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^-

Βαρυονικός Αριθμός = 0 για όλα τα λεπτόνια

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

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 $B=0$

Οι νέοι κβαντικοί αριθμοί και οι νέοι νόμοι διατήρησης ανακαλύφθηκαν από παρατηρήσεις

• Λεπτόνια

- σημειακά - δεν έχουν δομή
 - Κάθε οικογένεια έχει τον δικό της Λεπτονικό αριθμό (λεπτονικός αριθμός ηλεκτρονίου, λεπτονικός αριθμός μιονίου, λεπτονικός αριθμός ταυ).
 - **π.χ., διάσπαση μιονίου σε ηλεκτρόνιο, ένα αντνετρίνο ηλεκτρονίου και ένα νετρομιονίου**

• 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 $B=1$
 - **π.χ διάσπαση νετρονίου σε πρωτόνιο με εκπομπή ηλεκτρονίου και αντνετρίνο του ηλεκτρονίου**

Ό,τι έχουμε παρατηρήσει, σέβεται και αυτούς τους νέους νόμους διατήρησης

Νέοι κβαντικοί αριθμοί και νόμοι διατήρησης : Λεπτονικοί αριθμοί (1)

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

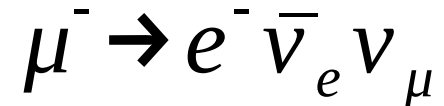
- λεπτονικός αριθμός του ηλεκτρονίου (e, ν_e) = L_e
- λεπτονικός αριθμός του μιονίου (μ, ν_μ) = L_μ
- λεπτονικός αριθμός του ταυ (τ, ν_τ) = L_τ

- Επίσης φυσικά πάντα διτηρείται το φορτίο = Q

Κάθε λεπτόνιο έχει αντίστοιχο λεπτονικό αριθμό = 1

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

Π.χ, βλέπουμε ότι η ακόλουθη “διάσπαση” του μιονίου γίνεται:



Κβαντικός αριθμός	μίωνιο	→	ηλεκτρόνιο	Αντινεutrino του ηλεκτρονίου	Νεutrino του μιονίου
Q	-1	=	-1	0	0
L_e	0	=	1	-1	0
L_μ	1	=	0	0	1
L_τ	0	=	0	0	0

Νέοι κβαντικοί αριθμοί και νόμοι διατήρησης : Λεπτονικοί αριθμοί (2)

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

Κάθε λεπτόνιο έχει αντίστοιχο λεπτονικό αριθμό =1,

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

Π.χ, βλέπουμε ότι η ακόλουθη “διάσπαση” του αντι-μιονίου γίνεται:

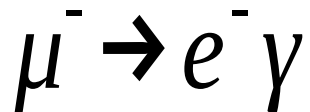
$$\mu^+ \rightarrow e^+ \nu_e \bar{\nu}_\mu$$

Κβαντικός αριθμός	Θετικό μιονίο (=“αντι-μιονίο”)	→	Ποζιτρόνιο (=“αντιηλεκτρόνιο”)	Νετρίνο του ηλεκτρονίου	Αντινετρίνιο του μιονίου
Q	+1	=	+1	0	0
Le	0	=	-1	1	0
Lμ	-1	=	0	0	-1
Lτ	0	=	0	0	0

Νέοι κβαντικοί αριθμοί και νόμοι διατήρησης : Λεπτονικοί αριθμοί (3)

Αν η αντίδρασή μας σέβεται ΟΛΟΥΣ τους νόμους διατήρησης , τότε γίνεται
Αν όμως παραβιάζει έστω και έναν, δεν μπορεί να γίνει!

Π.χ : βλέπουμε ότι η ακόλουθη “διάσπαση” του μιονίου ΔΕΝ γίνεται:



Κβαντικός αριθμός	μiónιο	→	ηλεκτρόνιο	Φωτόνιο	Αποτέλεσμα
Q	-1	=	-1	0	Διατηρείται: OK
Le	0	=	1	0	ΔΕΝ Διατηρείται: X
Lμ	1	=	0	0	ΔΕΝ Διατηρείται: X
Lτ	0	=	0	0	Διατηρείται: OK

Η παραπάνω αντίδραση ΔΕΝ διατηρεί ούτε τον λεπτονικό αριθμό του ηλεκτρονίου, ούτε τον λεπτονικό αριθμό του μιονίου: οπότε ΔΕΝ γίνεται
Και **όντως ΔΕΝ την έχουμε παρατηρήσει στη φύση.**

Νέοι κβαντικοί αριθμοί και νόμοι διατήρησης : Βαρυονικός αριθμός (1)

• Αδρόνια:

- Βαρυόνια – **συνδυασμοί 3 κουάρκ** . π.χ: $p=uud$, $n=udd$
 - Έχουν Βαρυονικό αριθμό $B=1$
- Κάθε κουάρκ λέμε ότι έχει βαρυονικό αριθμό $B = + 1/3$
- Κάθε αντι-κουάρκ έχει τον αντίθετο, δηλαδή: $B = - 1/3$
- Τα λεπτόνια δεν έχουν βαρυονικό αριθμό, όπως και τα κουάρκ δεν έχουν λεπτονικό αριθμό
- π.χ $d \rightarrow u e^- \bar{\nu}_e$

Κβαντικός αριθμός	d κουάρκ	→	u κουάρκ	ηλεκτρόνιο	αντινεutrino του ηλεκτρονίου
Q	-1/3	=	+2/3	-1	0
Le	0	=	0	1	-1
Lμ	0	=	0	0	0
Lτ	0	=	0	0	0
B	1/3	=	1/3	0	0

Νέοι κβαντικοί αριθμοί και νόμοι διατήρησης : Βαρυονικός αριθμός (2)

• Αδρόνια:

- Βαρυόνια – **συνδυασμοί 3 κουάρκ** . π.χ: $p=uud$, $n=udd$
 - Έχουν Βαρυονικό αριθμό $B=1$
- Κάθε κουάρκ λέμε ότι έχει βαρυονικό αριθμό $B = + 1/3$
- Κάθε αντι-κουάρκ έχει τον αντίθετο, δηλαδή: $B = - 1/3$
- Τα λεπτόνια δεν έχουν βαρυονικό αριθμό, όπως και τα κουάρκ δεν έχουν λεπτονικό αριθμό

• π.χ $n \rightarrow p e^- \bar{\nu}_e$

$$p=uud \quad n=udd$$

Κβαντικός αριθμός	νετρόνι 0	→	πρωτόνι 0	ηλεκτρόνιο	ανινετρίνο του ηλεκτρονίου
Q	0	=	+1	-1	0
Le	0	=	0	1	-1
Lμ	0	=	0	0	0
Lτ	0	=	0	0	0
B	1	=	1	0	0

Νέοι κβαντικοί αριθμοί και νόμοι διατήρησης : Βαρυονικός αριθμός (3)

• Αδρόνια:

- **Βαρυόνια** : συνδυασμοί 3 κουάρκ . π.χ: $p=uud$, $n=udd$
 - Έχουν Βαρυονικό αριθμό $B=1$
- Κάθε κουάρκ λέμε ότι έχει βαρυονικό αριθμό $B = + 1/3$
- Κάθε αντι-κουάρκ έχει τον αντίθετο, δηλαδή: $B = - 1/3$
- **Αντιβαρυόνια** : συνδυασμοί 3 αντικουάρκ, π.χ. $\bar{p}=\bar{u}\bar{u}\bar{d}$, $\bar{n}=\bar{u}\bar{d}\bar{d}$

• π.χ $\bar{n} \rightarrow \bar{p} e^+ \nu_e$

Κβαντικός αριθμός	Αντι-νετρόνιο	→	Αντι-πρωτόνιο	ποζιτρόνιο	νεutrino του ηλεκτρονίου
Q	0	=	-1	1	0
Le	0	=	0	-1	1
Lμ	0	=	0	0	0
Lτ	0	=	0	0	0
B	-1	=	-1	0	0

Νέοι κβαντικοί αριθμοί και νόμοι διατήρησης : Βαρυονικός αριθμός (4)

Αν η αντίδρασή μας σέβεται ΟΛΟΥΣ τους νόμους διατήρησης , τότε γίνεται
Αν όμως παραβιάζει έστω και έναν, δεν μπορεί να γίνει!

Π.χ : βλέπουμε ότι η ακόλουθη “διάσπαση” του νετρονίου ΔΕΝ γίνεται:



Κβαντικός αριθμός	νετρόνιο	→	ποζιτρόνιο	ηλεκτρόνιο	Αποτέλεσμα
Q	0	=	+1	-1	Διατηρείται: OK
Le	0	=	-1	1	Διατηρείται: OK
Lμ	0	=	0	0	Διατηρείται: OK
Lτ	0	=	0	0	Διατηρείται: OK
B	1		0	0	ΔΕΝ διατηρείται: X

Η παραπάνω αντίδραση ΔΕΝ διατηρεί το βαρυονικό αριθμό, οπότε ΔΕΝ γίνεται
Και **όντως ΔΕΝ την έχουμε παρατηρήσει στη φύση.**

Νέοι κβαντικοί αριθμοί και νόμοι διατήρησης : Γενικοί κανόνες

#1: για τη διατήρηση ενέργειας

- Στη διάσπαση ενός σωματιδίου ελέγχουμε και 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

#2: για τους κβαντικούς αριθμούς που ορίζουν τη “γεύση” των κουαρκ, π.χ., “strangeness/παραξενιά” και “charmness/χάρη”

Αυτοί έχουν το πρόσημο του φορτίου του αντίστοιχου κουάρκ.

Π.χ., το s έχει φορτίο $-1/3$, και έχει παραξενιά = -1 (το αντι-s έχει παραξενιά = $+1$)
το c έχει φορτίο $+2/3$, και έχει γοητεία = $+1$ (το αντι-c έχει γοητεία = -1)

#3: Ταξινόμηση σε ηλεκτρομαγνητική, ασθενής ή ισχυρή αλληλεπίδραση:

Αν η αντίδραση επιτρέπεται από τους νόμους διατήρησης, τότε:

- αν έχουμε νετρίνο, 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)

Διατήρηση των νέων κβαντικών αριθμών --> διατήρηση πλήθους λεπτονίων και κουάρκ

#1: Το άθροισμα των λεπτονίων “πρίν” και “μετά” (δηλ. στα αντιδρώντα και στα προϊόντα, αντίστοιχα) διατηρείται πάντα, σε όλων τως ειδών τις

- αλληλεπιδράσεις (ηλεκτρομαγνητικές, ισχυρές και ασθενείς).
- **** Το ίδιο ισχύει και για το άθροισμα των κουάρκ πρίν και μετά!**

• **Σημείωση:** Στα ξεχωριστά αθροίσματα των λεπτονίων και των κουάρκ, τα αντισωματίδια μετράνε αρνητικά! Π.χ., στην αντίσδραση $e^+ e^- \rightarrow u \bar{u}$ έχουμε
• μηδέν λεπτόνια αριστερά και μηδέν δεξιά, καθώς και μηδέν κουάρκ αριστερά-δεξιά!

#2: Για τα λεπτόνια,

εκτός από το συνολικό πλήθος τους, διατηρείται και χωριστά το πλήθος των λεπτονίων της κάθε μίας από τις 3 οικογένειες:

της 1ης οικογένειας (δηλ. “τύπου ηλεκτρονίου”), της 2ης οικογένειας (δηλ. “τύπου μιονίου”) και της 3ης οικογένειας (“τύπου ταυ”)

#3 Για τα κουάρκ,

Στις ηλεκτρομαγνητικές και στις ισχυρές διατηρείται το πλήθος του κάθε κουάρκ χωριστά (δηλ. η κάθε “γεύση” κουάρκ χωριστά).

Οι ασθενείς είναι οι μόνες που μπορούν να αλλάξουν το πλήθος του κάθε είδους κουάρκ. Η αλλαγή αυτή γίνεται εύκολα μέσα στην ίδια οικογένεια (πχ. ένα t σε ένα b), πιο δύσκολα όταν το κουάρκ αλλάζει σε καποιον από την επόμενη γενιά (πχ., $t \rightarrow s$) και πάρα πολύ σπάνια όταν πάμε δύο οικογένειες μακριά (πχ., $t \rightarrow d$).

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	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

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

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

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

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

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

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

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

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

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 πιο 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 πιο 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 πιο 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)

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

Διαγράμματα Feynman

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

$$\Delta E \Delta t \simeq \hbar \rightarrow m c^2 \Delta t \simeq \hbar$$
$$E_{\text{μβέ λει}} R = c \Delta t = \frac{\hbar}{m c}$$

→ 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 πiónιο)

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

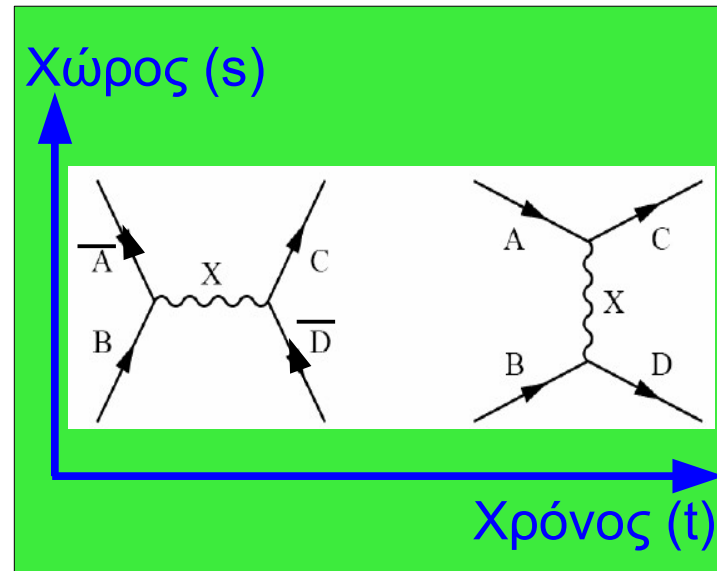
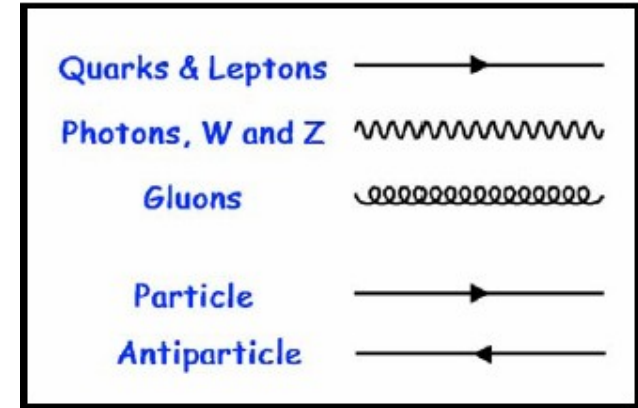
Διαγράμματα Feynman

Βασικοί κανόνες σε κάθε κόμβο:

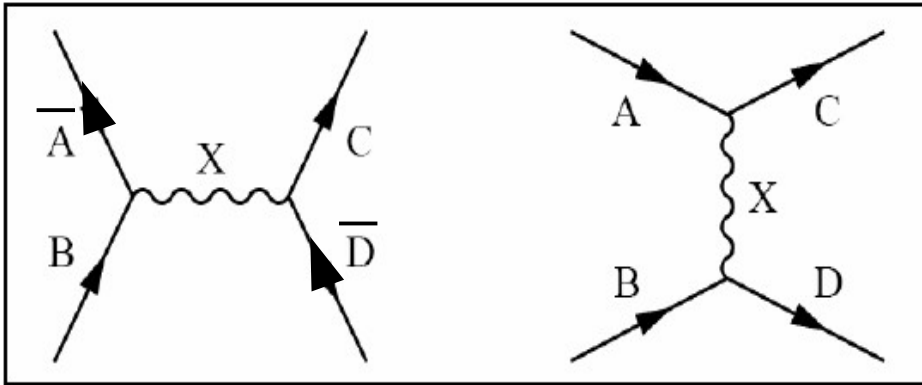
- E, p διατηρείται
- Q διατηρείται
- Σπιν διατηρείται
- Βαρυονικός Αριθμός
- Λεπτονικός Αριθμός

Συμβολισμοί πάνω στο διάγραμμα:

- Φερμιόνια: θετικός χρόνος $\longrightarrow$
- Αντι-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



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 διαδιασκία στο διάγραμμα περιγράφει μια “ιστορία” που εξελίσσεται από τα αριστερά προς τα δεξιά:

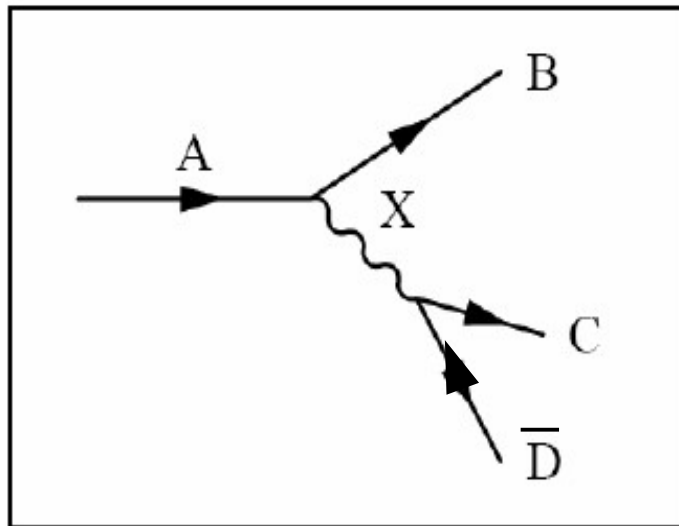
Αριστερά: το αντισωματίδιο $\bar{A}$ και το σωματίδιο B εξαϋλώνονται και δίνουν το σωματίδιο-διαδότη X , το οποίο εν συνεχεία διασπάται δημιουργώντας το σωματίδιο C και το αντισωματίδιο $\bar{D}$.

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)
- $W^+ W^- Z^0$

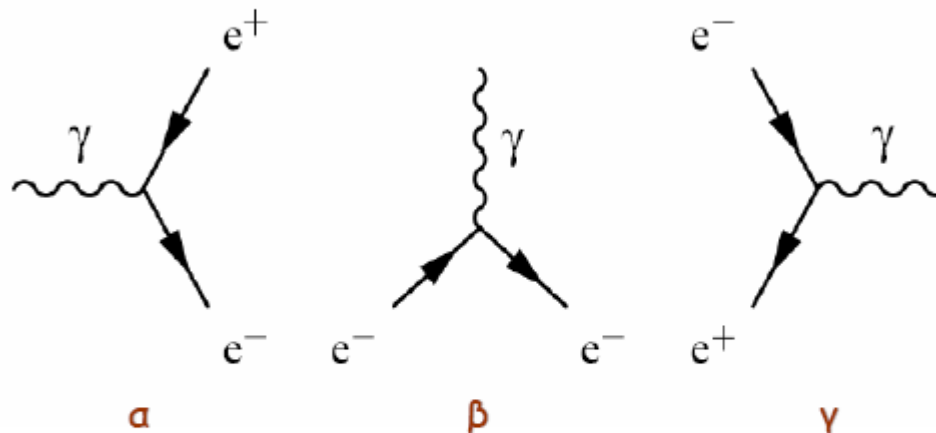
Τα σωματίδιο A μετατρέπεται στο σωματίδιο B εκπέμποντας ένα σωματίδιο-διαδότη X, το οποίο εν συνεχεία μετατρέπεται (“διασπάται”) στο σωματίδιο C και στο αντισωματίδιο $\bar{D}$

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

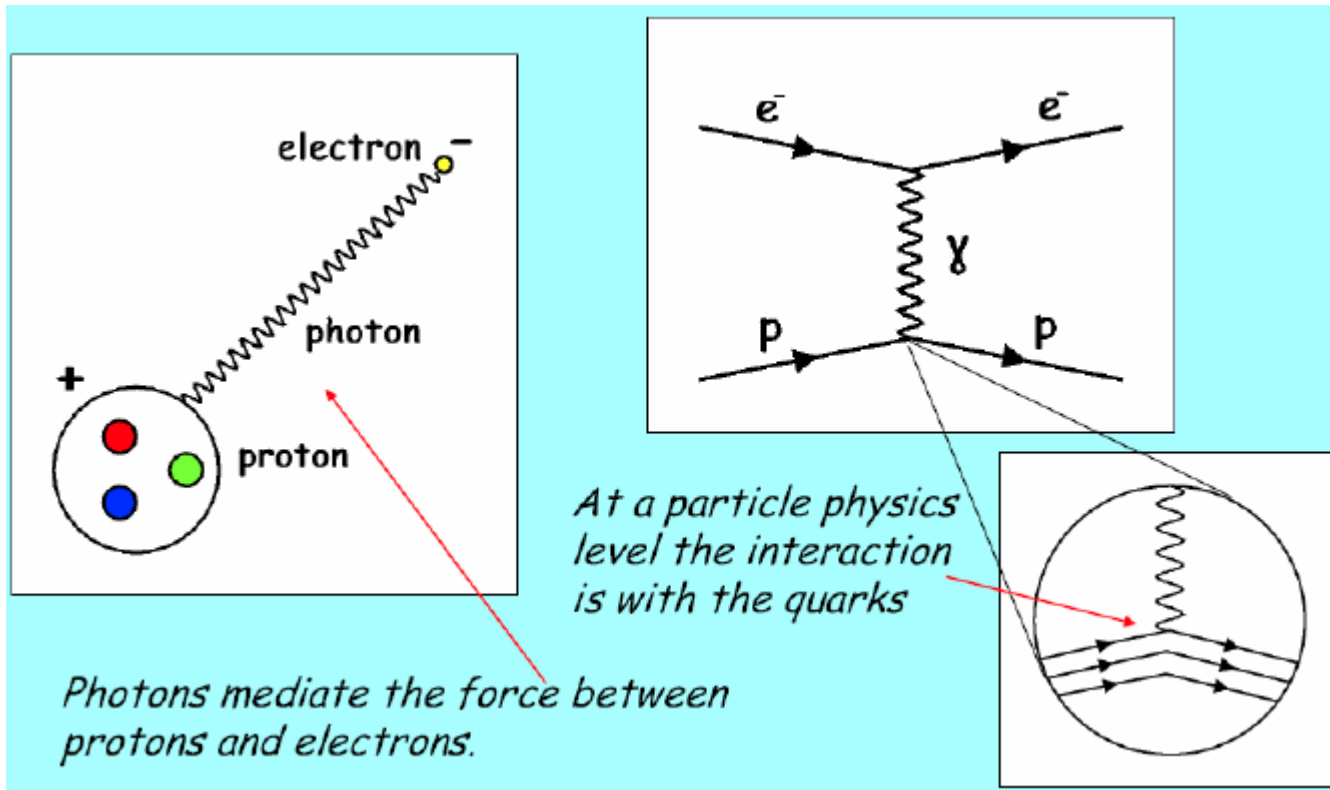


(α) Δίδυμη Γένεση

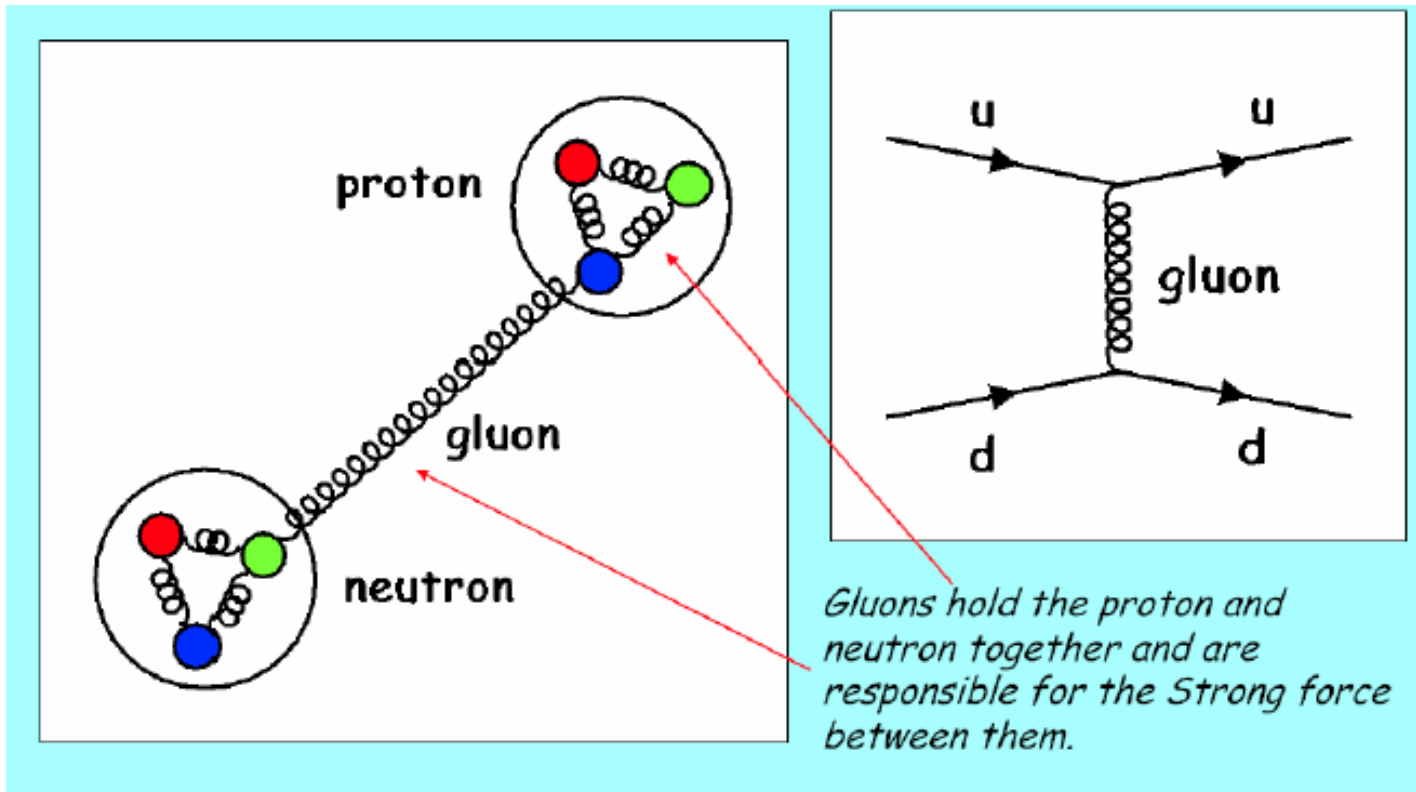
(β) Φωτοηλεκτρικό φαινόμενο

(γ) Εξαϋλωση ποζιτρονίου

Ηλεκτρομαγνητικές Αλληλεπιδράσεις



Ισχυρές Αλληλεπιδράσεις

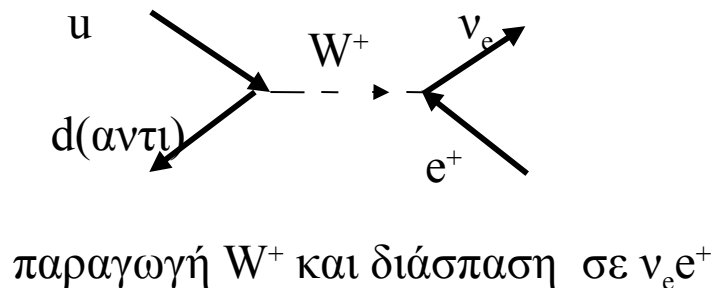
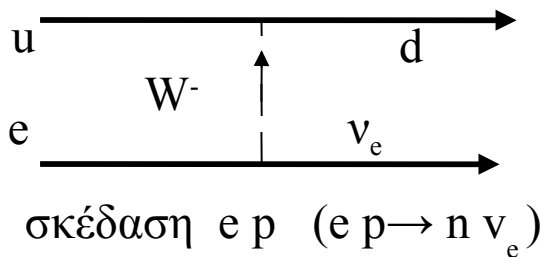


Οι διαδότες των ασθενών δυνάμεων

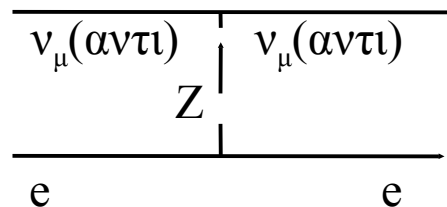
- Ανταλλαγή $W^\pm \Rightarrow$ μεταβολή του φορτίου των κουάρκ ή λεπτονίων που συμμετέχουν :

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

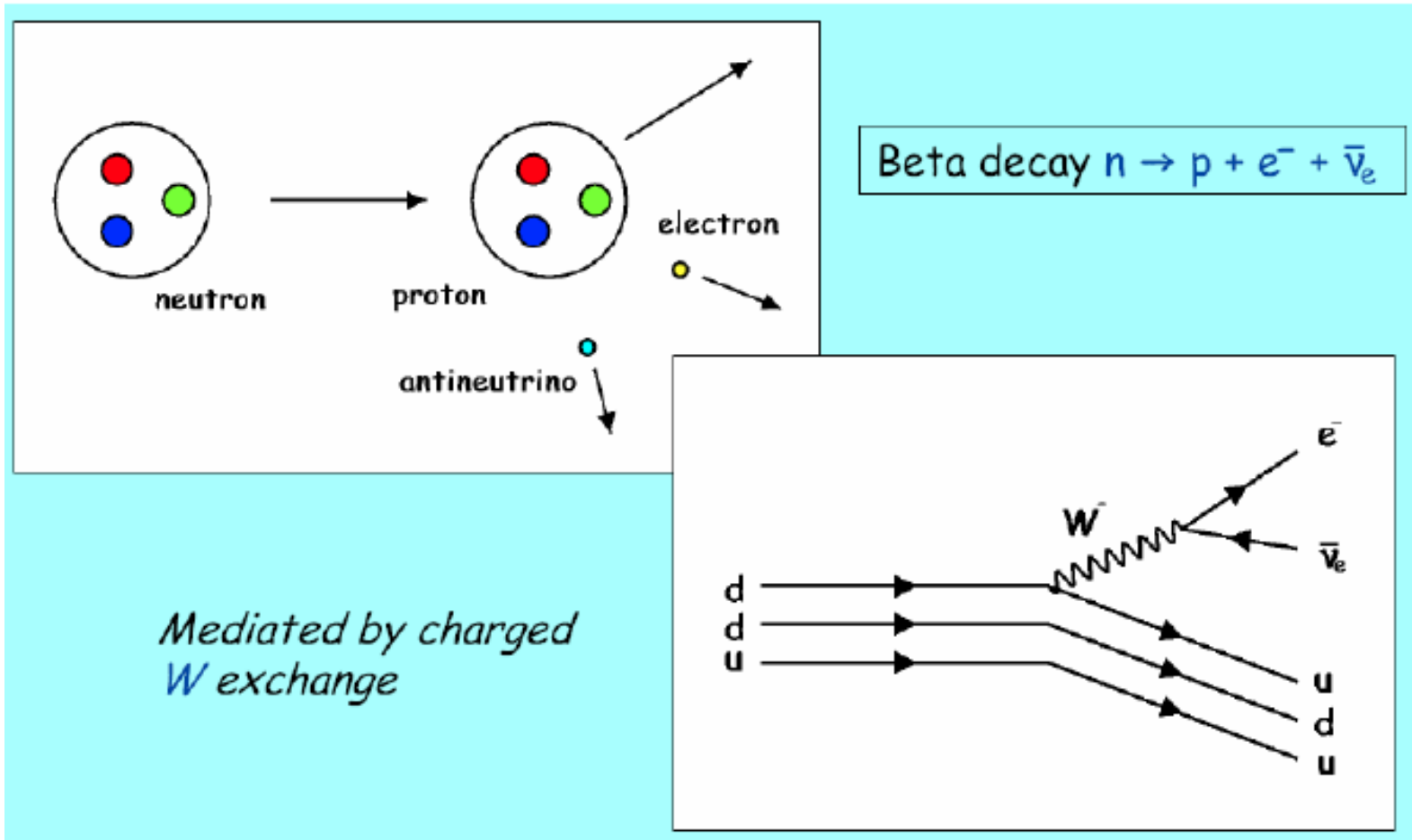
[ανταλλαγή W^- , W^+ αντίστοιχα] $\rightarrow$ φορτισμένα ασθενή ρεύματα



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



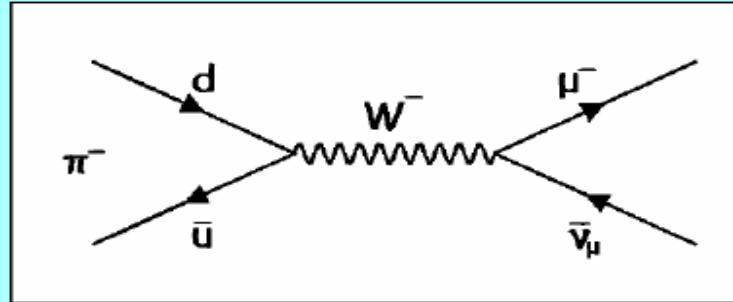
Ασθενείς Αλληλεπιδράσεις



Ασθενείς Αλληλεπιδράσεις

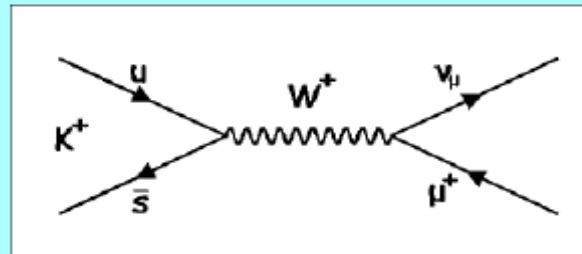
$\Delta S = 0$ (No strangeness change)

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

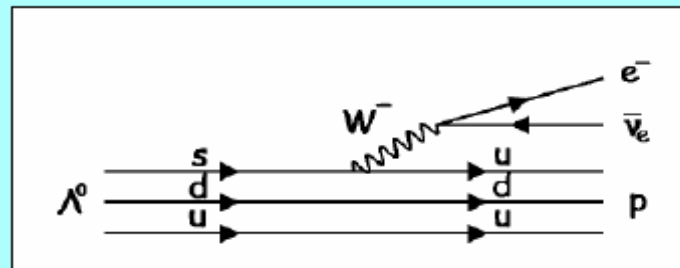


$\Delta S = 1$ (Strangeness changes)

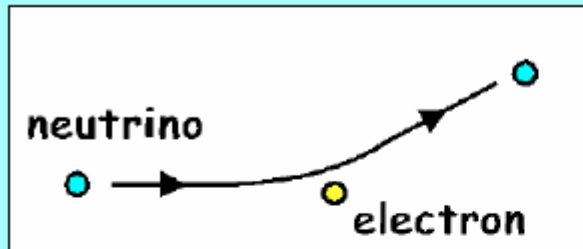
$$K^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$$



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

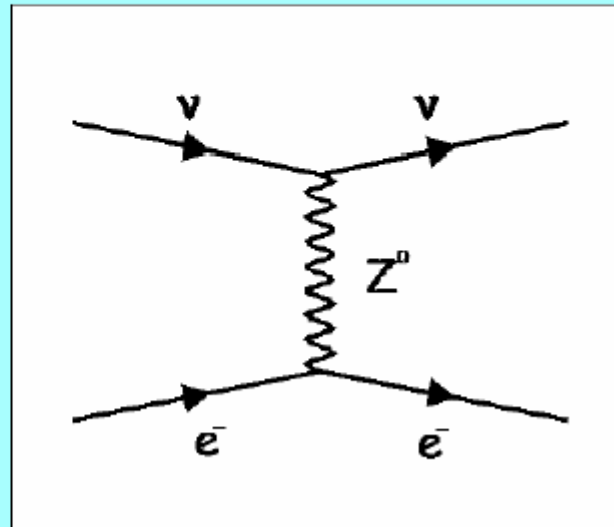


Ασθενείς Αλληλεπιδράσεις



*Mediated by neutral
 Z exchange*

Neutrino scattering
off an electron



Άσκηση 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

