

Εισαγωγή στη Φυσική Στοιχειωδών Σωματιδίων

Δήμος Σαμψωνίδης
(22-12-2019)

Στοιχεία Πυρηνικής Φυσικής & Φυσικής Στοιχειωδών Σωματιδίων
5 ο Εξάμηνο

Τα Θεμελιώδη Φερμιόνια απο τα οποία αποτελείται η Ύλη: Κουάρκ & Λεπτόνια

Οι τρεις γενιές των Θεμελιωδών
συστατικών:

**Κουάρκ και Λεπτόνια(σωματΙΑ
Ύλης: φερμιόνια)**

και

οι διαδότες των Θεμελιωδών
δυνάμεων:

**Θεμελιώδη Μποζόνια
(σωματΙΑ Δυνάμεων)**

Quarks	2.4 MeV $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ u up	1.27 GeV $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ c charm	171.2 GeV $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ t top	0 0 1 γ photon
	4.8 MeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ d down	104 MeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ s strange	4.2 GeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ b bottom	0 0 1 g gluon
	<2.2 eV 0 $\frac{1}{2}$ ν_e electron neutrino	<0.17 MeV 0 $\frac{1}{2}$ ν_μ muon neutrino	<15.5 MeV 0 $\frac{1}{2}$ ν_τ tau neutrino	91.2 GeV 0 1 Z weak force
Leptons	0.511 MeV -1 $\frac{1}{2}$ e electron	105.7 MeV -1 $\frac{1}{2}$ μ muon	1.777 GeV -1 $\frac{1}{2}$ τ tau	80.4 GeV ± 1 1 W[±] weak force
				Bosons (Forces)

Θεμελιώδη Φερμιόνια: Κουάρκ & Λεπτόνια

FERMIONS

matter constituents
spin = 1/2, 3/2, 5/2, ...

Leptons spin = 1/2

Flavor	Mass GeV/c ²	Electric charge
ν_L lightest neutrino*	$(0-0.13)\times 10^{-9}$	0
e electron	0.000511	-1
ν_M middle neutrino*	$(0.009-0.13)\times 10^{-9}$	0
μ muon	0.106	-1
ν_H heaviest neutrino*	$(0.04-0.14)\times 10^{-9}$	0
τ tau	1.777	-1

Quarks spin = 1/2

Flavor	Approx. Mass GeV/c ²	Electric charge
u up	0.002	2/3
d down	0.005	-1/3
c charm	1.3	2/3
s strange	0.1	-1/3
t top	173	2/3
b bottom	4.2	-1/3

Τα Θεμελιώδη Μποζόνια των αλληλεπιδράσεων Οι Θεμελιώδεις Αλληλεπιδράσεις

Properties of the Interactions

The strengths of the interactions (forces) are shown relative to the strength of the electromagnetic force for two u quarks separated by the specified distances.

Property	Gravitational Interaction	Weak Interaction (Electroweak)	Electromagnetic Interaction	Strong Interaction
Acts on:	Mass – Energy	Flavor	Electric Charge	Color Charge
Particles experiencing:	All	Quarks, Leptons	Electrically Charged	Quarks, Gluons
Particles mediating:	Graviton (not yet observed)	W^+ W^- Z^0	γ	Gluons
Strength at $\left\{ \begin{array}{l} 10^{-18} \text{ m} \\ 3 \times 10^{-17} \text{ m} \end{array} \right.$	10^{-41}	0.8	1	25
	10^{-41}	10^{-4}	1	60

Τα Θεμελιώδη Μποζόνια των αλληλεπιδράσεων Οι Θεμελιώδεις Αλληλεπιδράσεις

BOSONS

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

Unified Electroweak spin = 1

Name	Mass GeV/c ²	Electric charge
γ photon	0	0
W^-	80.4	-1
W^+	80.4	+1
Z^0	91.187	0

Strong (color) spin = 1

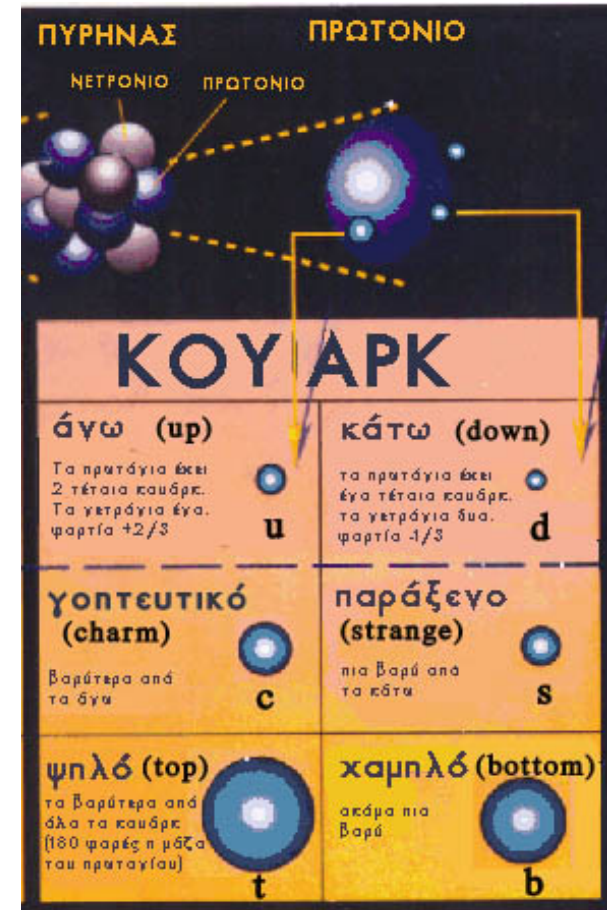
Name	Mass GeV/c ²	Electric charge
g gluon	0	0

Θεμελιώδη Φερμιόνια: Κουάρκ

Τα κουάρκ

Για κάθε κουάρκ υπάρχει
το αντικουάρκ του

- 1η οικογένεια →
- 2η οικογένεια →
- 3η οικογένεια →



Θεμελιώδη Φερμιόνια: Κουάρκ

Κβαντικοί Αριθμοί

Κάθε γεύση αντιστοιχεί σε ένα κβαντικό αριθμό

- Παραξενιά
(strangeness) $S = -1$
- Χάρη
(charm) $C = +1$
- Ομορφιά
(beauty) $B = -1$
- Κορυφαίο
(top) $T = +1$

	S	C	B	T
d	0	0	0	0
u	0	0	0	0
s	-1	0	0	0
c	0	1	0	0
b	0	0	-1	0
t	0	0	0	1

Αδρόνια: Μεσόνια & Βαρυόνια

Δύο τύποι σχηματισμών των κουάρκ

Βαρυόνια

συνδυασμός 3 κουάρκ

$q \ q \ q$

πρωτόνιο $p = (u \ u \ d)$

νετρόνιο $n = (u \ d \ d)$

Λάμδα $\Lambda = (u \ d \ s)$

Μεσόνια

συνδυασμός κουάρκ-αντικουάρκ

$q \ \bar{q}$

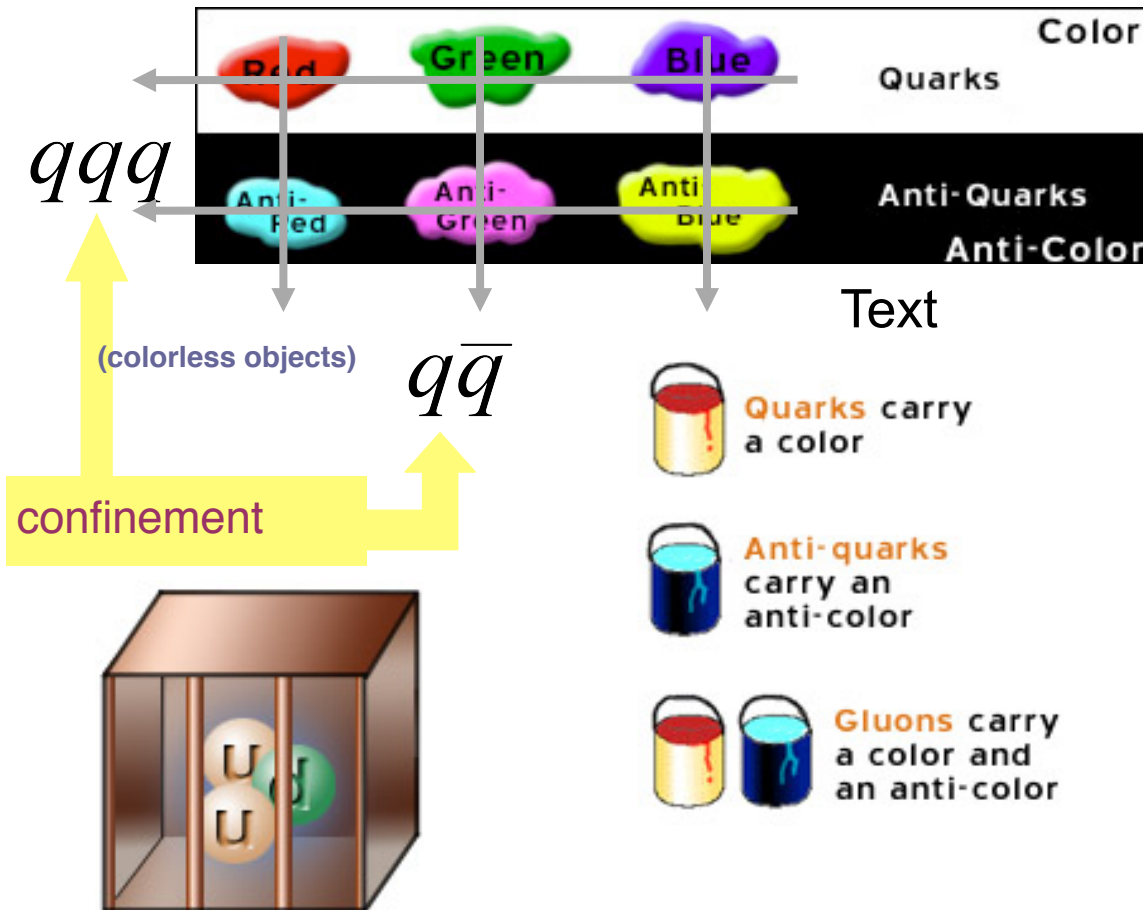
πιόνιο $\pi^+ = (u \ \bar{d})$

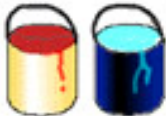
K^0 καόνιο $= (s \ \bar{d})$

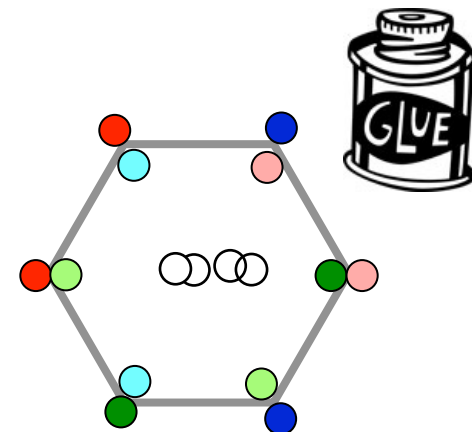
J/Ψ-μεσόνιο $= (c \ \bar{c})$

Αδρόνια: Βαρυόνια & Μεσόνια

Η ιδιότητα του Χρώματος



-  Quarks carry a color
-  Anti-quarks carry an anti-color
-  Gluons carry a color and an anti-color



8 Gluons, each with a color and an anti-color charge.

Αδρόνια: Βαρυόνια

Baryons qqq and Antibaryons $\bar{q}\bar{q}\bar{q}$

Baryons are fermionic hadrons.

These are a few of the many types of baryons.

Symbol	Name	Quark content	Electric charge	Mass GeV/c^2	Spin
p	proton	uud	1	0.938	1/2
$\bar{p}$	antiproton	$\bar{u}\bar{u}\bar{d}$	-1	0.938	1/2
n	neutron	udd	0	0.940	1/2
Λ	lambda	uds	0	1.116	1/2
Ω^-	omega	sss	-1	1.672	3/2

Αδρόνια: Μεσόνια

Mesons $q\bar{q}$

Mesons are bosonic hadrons

These are a few of the many types of mesons.

Symbol	Name	Quark content	Electric charge	Mass GeV/c^2	Spin
π^+	pion	$u\bar{d}$	+1	0.140	0
K^-	kaon	$s\bar{u}$	-1	0.494	0
ρ^+	rho	$u\bar{d}$	+1	0.776	1
B^0	B-zero	$d\bar{b}$	0	5.279	0
η_c	eta-c	$c\bar{c}$	0	2.980	0

Αδρόνια: Βαρυόνια

Βαρυονικός Αριθμός: B

Δηλώνει το πλήθος των βαρυονίων σε μία αλληλεπίδραση

Οποιοδήποτε βαρυόνιο έχει $B = +1$

Οποιοδήποτε αντι-βαρυόνιο έχει $B = -1$

Κανόνας Διατήρησης:

Ο Βαρυονικός Αριθμός διατηρείται σε **ΟΛΕΣ** τις αλληλεπιδράσεις

Παράδειγμα:

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

Anti-ud uud anti-sd usd

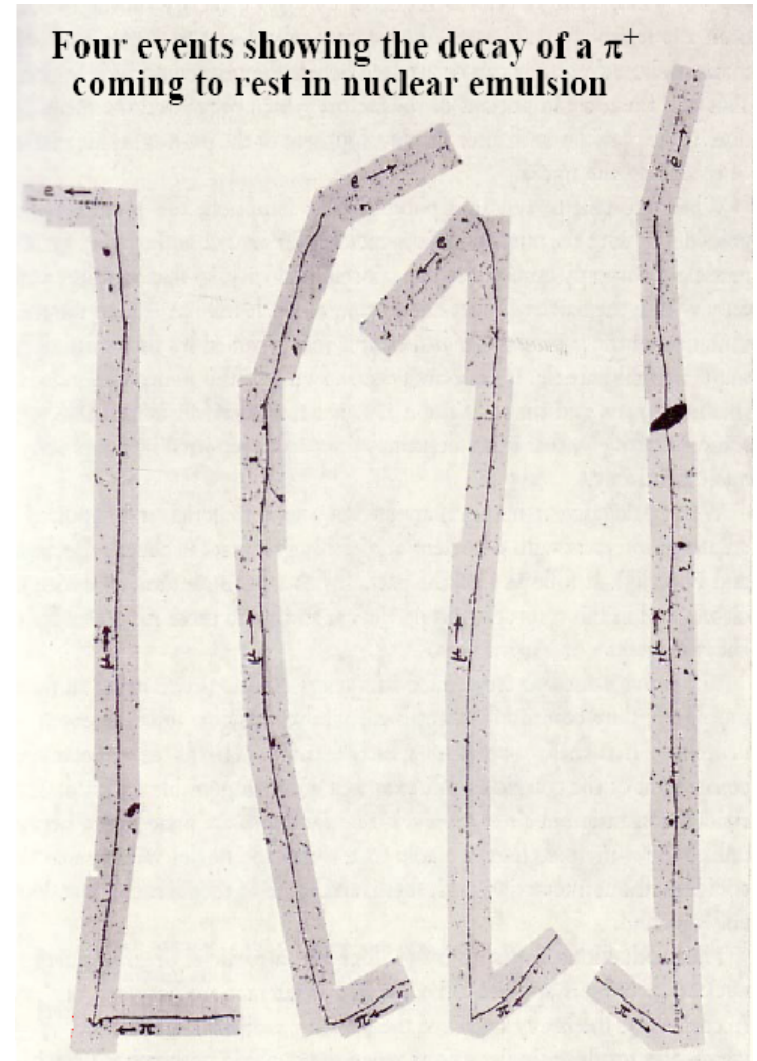
$$B = 0 + 1 \rightarrow 0 + 1 \text{ διατηρείται}$$

Αδρόνια: Μεσόνια

- **Ασταθή** => δεν υπάρχουν στην 'κανονική' ύλη
- Στην ανακάλυψή τους οφείλεται η γένεση της Σωματιδιακής Φυσικής
- π-μεσόνιο και το καόνιο παρατηρήθηκαν στην κοσμική ακτινοβολία το 1947!
- Παράδειγμα της ανακάλυψης του φορτισμένου πιονίου: $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \rightarrow e^+$

Αδρόνια: Μεσόνια

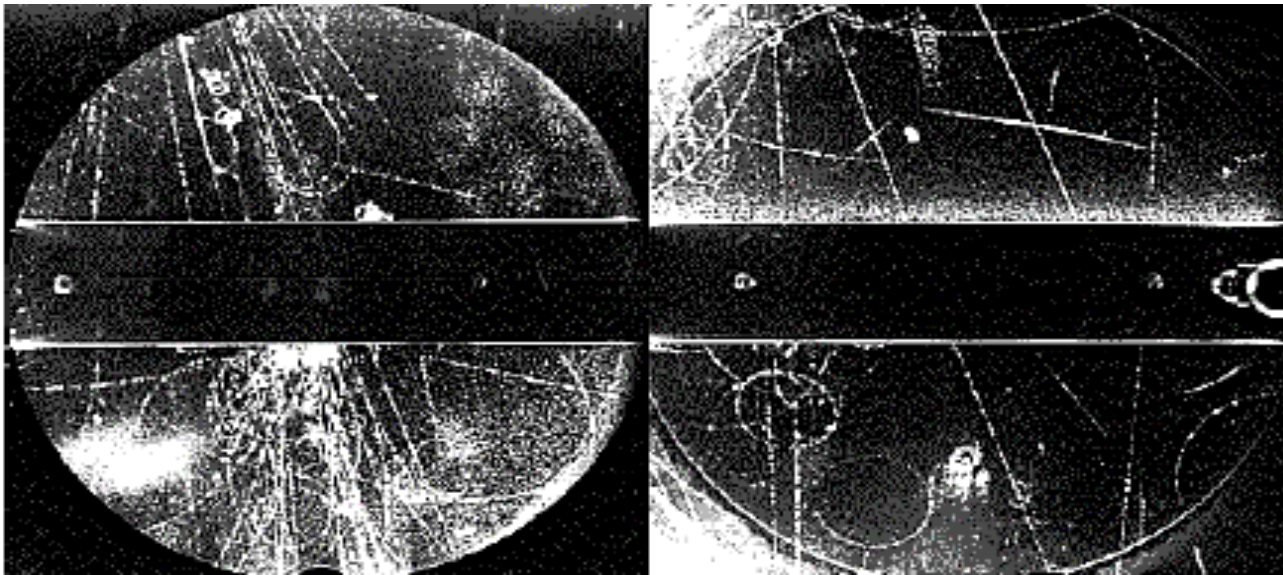
- 1947: Ανακάλυψη του π-μεσονίου (το 'πραγματικό' σωματίδιο Yukawa)
- Παρατήρηση της αλυσιδωτής διάσπασης του :
 $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \rightarrow e^+$
σε γαλακτώματα εκτεθειμένα στην κοσμική ακτινοβολία



Παράδοξα/Παράξενα Αδρόνια



Παράδοξα/Παράξενα Αδρόνια

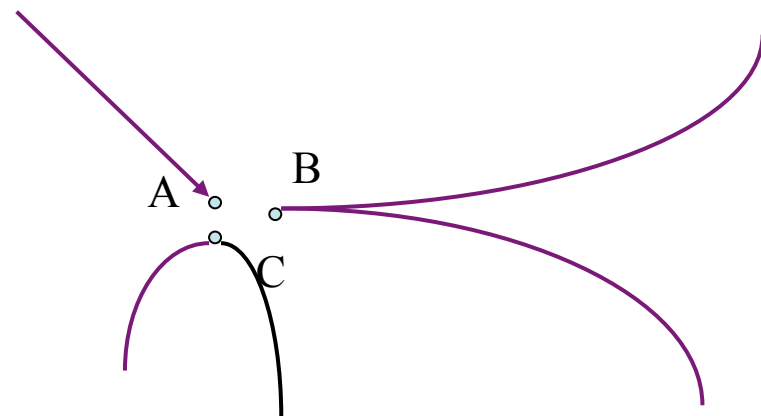


$$\pi^-(A) + p \rightarrow K^0(B) + \Lambda(C)$$

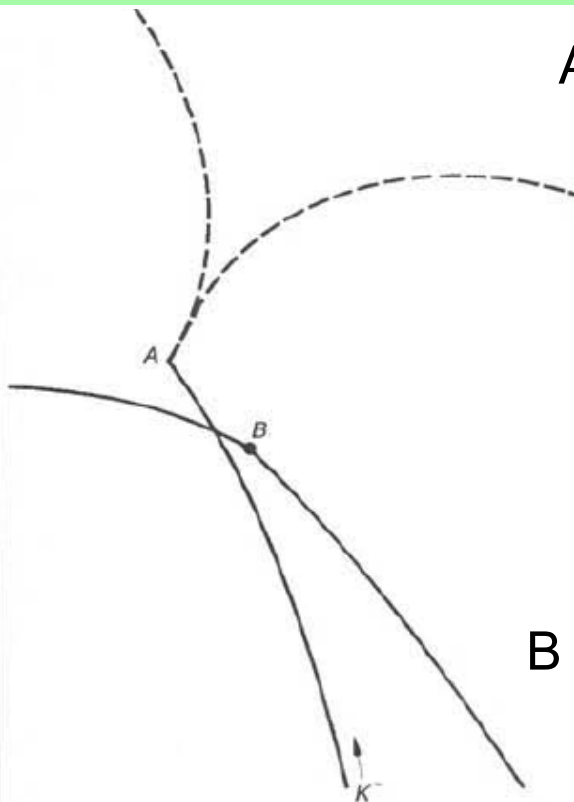
$$K^0 \rightarrow \pi^- + \pi^+$$

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

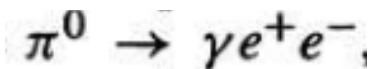
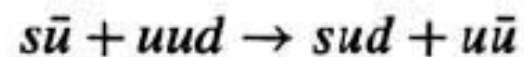
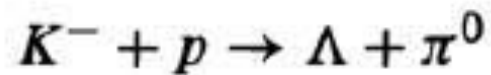
- Παράγονται σε ζεύγη : s **anti-s**
- Παράδειγμα : $\pi^- + p \rightarrow K^0 + \Lambda$
 anti-u d uud **anti-s** d **usd**



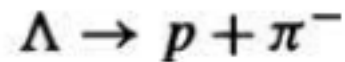
Παράδοξα/Παράξενα Αδρόνια



A : Ισχυρή αλληλεπίδραση
διατήρηση S.



B : Ασθενής αλληλεπίδραση
μη διατήρηση S



Παράδοξα/Παράξενα Αδρόνια

- Παράδειγμα παραγωγής ζεύγους παράξενων σωματίων

Αντίδραση:

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

Περιγραφή με κουάρκ:

$$\bar{u}d + uud \rightarrow \bar{s}d + usd$$

Παραξενιά:

$$0 + 0 = +1 - 1$$

- Διατήρηση Παραξενιάς!

Σύνοψη: Κουάρκ

Κβαντικοί Αριθμοί

των κουάρκ

και

των αντικουάρκ

	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
$\overline{\mathbf{u}}$	-1/3	-2/3	0	0	0	0
$\overline{\mathbf{d}}$	-1/3	+1/3	0	0	0	0
$\overline{\mathbf{s}}$	-1/3	+1/3	+1	0	0	0
$\overline{\mathbf{c}}$	-1/3	-2/3	0	-1	0	0
$\overline{\mathbf{b}}$	-1/3	+1/3	0	0	+1	0
$\overline{\mathbf{t}}$	-1/3	-2/3	0	0	0	-1

Παράδειγμα παραγωγής ζεύγους παράξενων σωματίων

Αντίδραση:

$$\pi^{-} + p \rightarrow K^0 + \Lambda$$

Βαρυονικός Αριθμός:

$$0 + 1 = 0 + 1$$

Περιγραφή με κουάρκ:

$$\bar{u}d + uud \rightarrow \bar{s}d + usd$$

Βαρυονικός Αριθμός:

$$\left(-\frac{1}{3} + \frac{1}{3}\right) + \left(\frac{1}{3} + \frac{1}{3} + \frac{1}{3}\right) = \left(-\frac{1}{3} + \frac{1}{3}\right) + \left(\frac{1}{3} + \frac{1}{3} + \frac{1}{3}\right)$$

Παραξενιά:

$$0 + 0 = +1 - 1$$

Σύνοψη: Κουάρκ

Διατήρηση του συνολικού αριθμού των κουάρκ

- Ο συνολικός αριθμός των κουάρκ **ΔΙΑΤΗΡΕΙΤΑΙ** σε όλες τις αλληλεπιδράσεις : Ισχυρές, ηλεκτρομαγνητικές, ασθενείς
- Ο αριθμός των κουάρκ συγκεκριμένης γεύσης διατηρείται **ΜΟΝΟ** στις ισχυρές και στις ηλεκτρομαγνητικές αλληλεπιδράσεις
- Στις ασθενείς αλληλεπιδράσεις η γεύση των κουάρκ μπορεί να μεταβάλλεται $\Delta S=1$, $\Delta C=1$, ...

Παραδείγματα διατήρησης των κβαντικών αριθμών των κουάρκ

Παραγωγή παράδοξων σωματιδίων (ισχυρές)

$$\begin{array}{ccc} p & + & p \\ uud & + & uud \\ S = 0 & & \end{array} \longrightarrow \begin{array}{ccc} p & + & \Lambda & + & K^+ \\ uud & + & uds & + & \bar{s}u \\ S = -1 & + & 1 & & \end{array}$$

Παραγωγή charm

$$\begin{array}{ccc} e^+ & + & e^- \\ & & \end{array} \longrightarrow \begin{array}{ccc} D^+ & + & D^- \\ \bar{d}c & + & \bar{c}d \\ C = 0 & & C = 1 + (-1) \end{array}$$

Τα Λεπτόνια



- Δεν έχουν Ισχυρές Αλληλεπιδράσεις
- Spin 1/2
- Παρατηρούνται ως ελεύθερα σωματίδια
- Είναι σημειακά ($r < 10^{-17}$ cm)

Η δομή των οικογενειών...

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e^- \end{pmatrix}_L, \quad \begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu^- \end{pmatrix}_L, \quad \begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau^- \end{pmatrix}_L$$

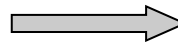
$m_e = 0.5 \text{ MeV}$	$m_\mu = 106 \text{ MeV}$	$m_\tau = 1777 \text{ MeV}$
$\tau_e > 4 \cdot 10^{24} \text{ y}$	$\tau_\mu = 2 \cdot 10^{-6} \text{ s}$	$\tau_\tau = 3 \cdot 10^{-13} \text{ s}$
$m_{\nu_e} < 3 \text{ eV}$	$m_{\nu_\mu} < 0.2 \text{ MeV}$	$m_{\nu_\tau} < 18 \text{ MeV}$

Γιατί 3 οικογένειες?

Τα Λεπτόνια

Για κάθε λεπτόνιο
υπάρχει το
αντιλεπτόνιό του

- 1η οικογένεια
- 2η οικογένεια
- 3η οικογένεια



 ΑΤΟΜΟ	
ΛΕΠΤΟΝΙΑ	
ηλεκτρόνιο υπεύθυνο για τον ηλεκτρισμό και τις χημικές αντιδράσεις. φορτίο -1	νεutrίνο ηλ/νίου Αλλάζει πολύ σπάνια με την ύλη. φορτίο 0
μυόνιο πιο βαρύ από τα ηλεκτρόνια	νεutrίνο μυονίου δημιουργείται μαζί με τα μύονια σε μερικές διασπάσεις
ταυ ακόμα πιο βαρύ	νεutrίνο ταυ δεν έχει παρατηρηθεί ακόμα, αλλά πιστεύεται ότι υπάρχει

-1|e|

0 |e|

Λεπτόνια

❖ *Έχουν* spin-1/2 φερμιόνια, δε συμμετέχουν στις ισχυρές αλληλεπιδράσεις

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e^- \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu^- \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau^- \end{pmatrix}$$

$$M_e < M_\mu < M_\tau$$

Ηλεκτρόνιο e^- , μόνιο μ^- και ταυ τ^- έχουν τα αντίστοιχα νετρίνα ν_e, ν_μ και ν_τ .

Ηλεκτρόνιο, μόνιο και ταυ έχουν φορτίο $-e$. Τα νετρίνα είναι ουδέτερα.

Τα νετρίνα έχουν *πολύ μικρές* μάζες (θεωρούνταν άμαζα).

Αντι-Λεπτόνια

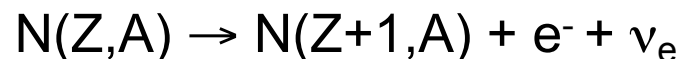
- ❖ Αντιλεπτόνια: positron e^+ , positive muon μ^+ , positive tau-lepton τ^+ , and antineutrinos:

$$\begin{pmatrix} e^+ \\ \bar{\nu}_e \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} \mu^+ \\ \bar{\nu}_\mu \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} \tau^+ \\ \bar{\nu}_\tau \end{pmatrix}$$

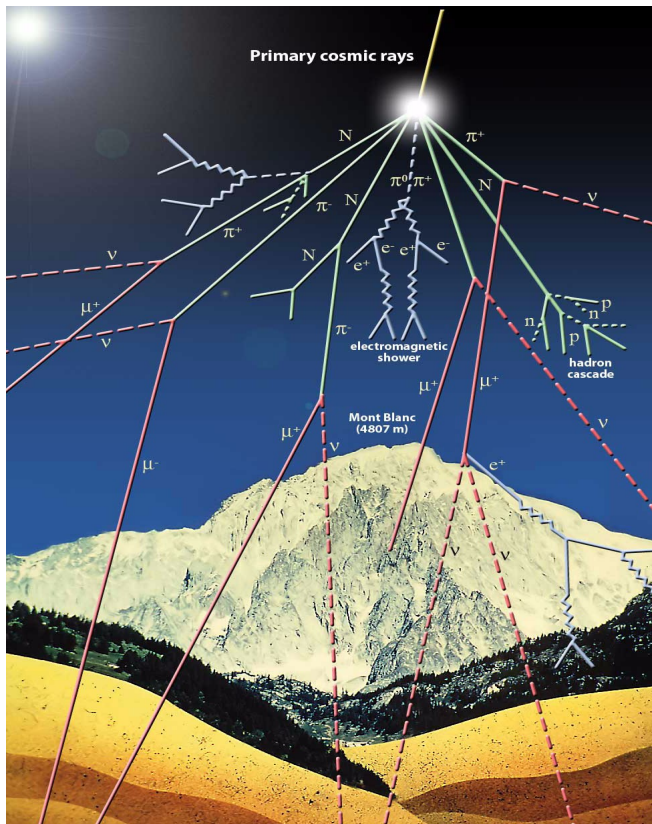
- ❖ Νετρίνα και αντineτρίνα διαφέρουν στο *λεπτονικό αριθμό*. Τα λεπτόνια έχουν λεπτονικούς αριθμούς $L_\alpha=1$ (όπου α : e, μ ή τ), και τα αντιλεπτόνια έχουν $L_\alpha=-1$.
- ❖ *Οι λεπτονικοί αριθμοί διατηρούνται σε όλες τις αλληλεπιδράσεις!*

Τα νετρίνα δεν ανιχνεύονται απ'ευθείας στους ανιχνευτές, αλλά μόνο με έμμεσες μετρήσεις των ιδιοτήτων τους.

- % Πρώτες ενδείξεις της ύπαρξής τους στις β -διασπάσεις των πυρήνων, N:



Μιόνια



❖ Τα μιόνια παρατηρήθηκαν πρώτη φορά το 1936, στις **κοσμικές ακτίνες**

Οι κοσμικές ακτίνες έχουν δύο “συστατικά”:

1) **Πρωταρχικές**, οι οποίες είναι σωμάτια υψηλών ενεργειών που έρχονται από το εξωτερικό διάστημα, κυρίως πυρήνες υδρογόνου

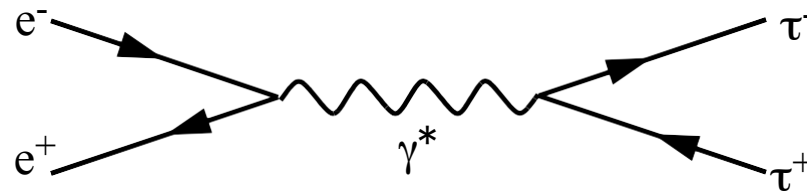
2) **Δευτερογενείς**, τα σωμάτια που παράγονται από τις συγκρούσεις των πρωταρχικών με τους πυρήνες στην ατμόσφαιρα. Τα μιόνια ανήκουν σ’αυτή την κατηγορία.

Μιόνια

% Μιόνια: 200 φορές βαρύτερα των ηλεκτρονίων αλλά πολύ δεισδυτικά.

% Ηλεκτρομαγνητικές ιδιότητες των μιονίων είναι ταυτόσιμες με αυτές των ηλεκτρονίων (εκτός τη διαφορά μαζών)

❖ Το ταυ είναι το βαρύτερο λεπτόνιο, ανακαλύφθηκε σε πειράματα συγκρούσεων e^+e^- το 1975



τ pair production in e^+e^- annihilation

❖ Το ηλεκτρόνιο είναι σταθερό, ενώ το μ και το τ έχουν πεπερασμένο χρόνο ζωής:

$$\tau_\mu = 2.2 \times 10^{-6} \text{ s} \text{ and } \tau_\tau = 2.9 \times 10^{-13} \text{ s} \quad _$$

Το μιόνιο διασπάτε καθαρά λεπτονικά : $\mu^- \rightarrow e^- + \nu_e + \nu_\mu$

τ λεπτόνια

Το ταυ έχει αρκετή μάζα να διασπαστεί σε αδρόνια, αλλά έχει και λεπτονικές διασπάσεις :

$$\tau^- \rightarrow e^- + \nu_e + \nu_\tau$$

$$\tau^- \rightarrow \mu^- + \nu_\mu + \nu_\tau$$

❖ Οι λεπτονικοί αριθμοί διατηρούνται

Τα Ουδέτερα Λεπτόνια - Νετρίνο

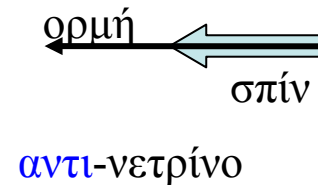
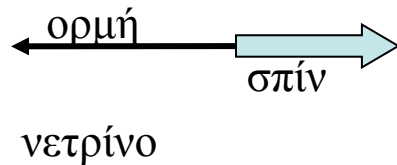
Δεν έχουν φορτίο => Δεν έχουν ηλεκτρομαγνητικές αλληλεπιδράσεις

Τα νετρίνα είναι 'αριστερόστροφα' =>

Το **σπίν** έχει διεύθυνση **αντίθετη** από το διάνυσμα της **ορμής**

Τα **αντι**-νετρίνα είναι 'δεξιόστροφα' =>

το **σπιν** έχει διεύθυνση **ομόρροπη** με το διάνυσμα της **ορμής**



Τα Λεπτόνια

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 Λεπτόνια

Διατήρηση Λεπτονικού Αριθμού

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

$$L_e: 0 = (-1) + (+1)$$

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

$$L_\mu: 0 = (-1) + (+1)$$

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

$$L_\mu: (-1) = 0 + 0 + (-1)$$

$$L_e: 0 = (-1) + (+1) + 0$$

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

$$L_\mu: (-1) = 0 + 0$$

$$L_e: 0 = (-1) + 0$$

Διασπάσεις των Λεπτονίων

Χρόνοι ζωής μ : $(2.2 \times 10^{-6}\text{s})$ τ : $(2.9 \times 10^{-13}\text{s})$

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

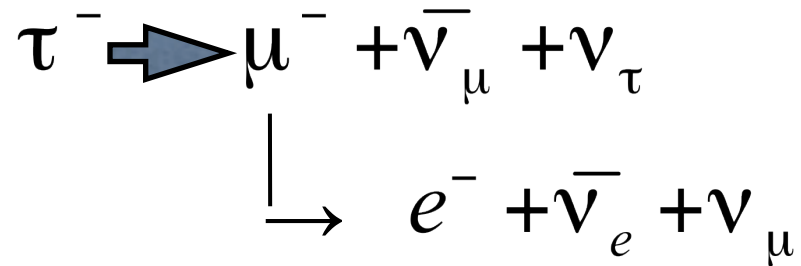
$$\mu^- \Rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$$

$$\tau^- \Rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\tau$$

$$\tau^- \Rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu + \nu_\tau$$

Για το τ υπάρχουν και διασπάσεις με αδρόνια στην τελική κατάσταση.

Διασπάσεις των Λεπτονίων



- Ξεκινάμε με ένα ταυ λεπτόνιο
- Καταλήγουμε σε ένα ταυ-νεutrino, 2 μ-νεutrino (νεutrino-αντινεutrino) και 1 ηλεκτρόνιο κι ένα αντι-e-νεutrino
- Τίποτα ΔΕΝ παραβιάζεται !

Σύνοψη: Κουάρκ & Λεπτόνια

- **Ισχυρές** αλληλεπιδράσεις έχουν μόνο τα κουάρκ
- Τα φορτισμένα λεπτόνια συμμετέχουν στις **ηλεκτρομαγνητικές** -λόγω του φορτίου τους- και στις **ασθενείς αλληλεπιδράσεις**
- Τα ουδέτερα λεπτόνια -νεutrino- αλληλεπιδρούν **ΜΟΝΟ** με **ασθενείς αλληλεπιδράσεις**
- Τα κουάρκ συμμετέχουν στις **ισχυρές**, στις **ηλεκτρομαγνητικές** και στις **ασθενείς αλληλεπιδράσεις**
(δηλ. σε όλες)

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Δίνονται:

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

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

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

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

Αν επιτρέπεται, τότε:

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

Άσκηση 4 - λύσεις

Ποιές από τις παρακάτω διασπάσεις επιτρέπονται και ποιές όχι.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

1. * φορτίο

2. ΗΜ

3. * Ενέργεια

4. ασθενής

5. ΗΜ, ασθενής

6. * λεπτονικός

7. ισχυρή

8. ασθενής

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

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

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

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

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

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

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

9. ισχυρή

10. * βαρυονικός,
* λεπτονικός

11. ισχυρή

12. ΗΜ

13. ισχυρή

14. ασθενής

15. ασθενής

Βάζω σε πίνακα τις ποσότητες / κβαντικούς αριθμούς που διατηρούνται στις διάφορες αλληλεπιδράσεις.

Πρώτα βάζω τα πιό εύκολα να ελγχθούν και σταματάω με το πρώτο που παραβιάζεται!

αντί δρα ση	Φορτίο	Βαρυον ικός	Λεπτονι κός	Ενέργ εια	Strangen ess	Charmn ess
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:

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

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

$$\Xi^- = d s s$$

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)