

Εισαγωγή στη Φυσική Στοιχειωδών Σωματιδίων

Δήμος Σαμψωνίδης
(19-12-2018)

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 Z⁰ 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

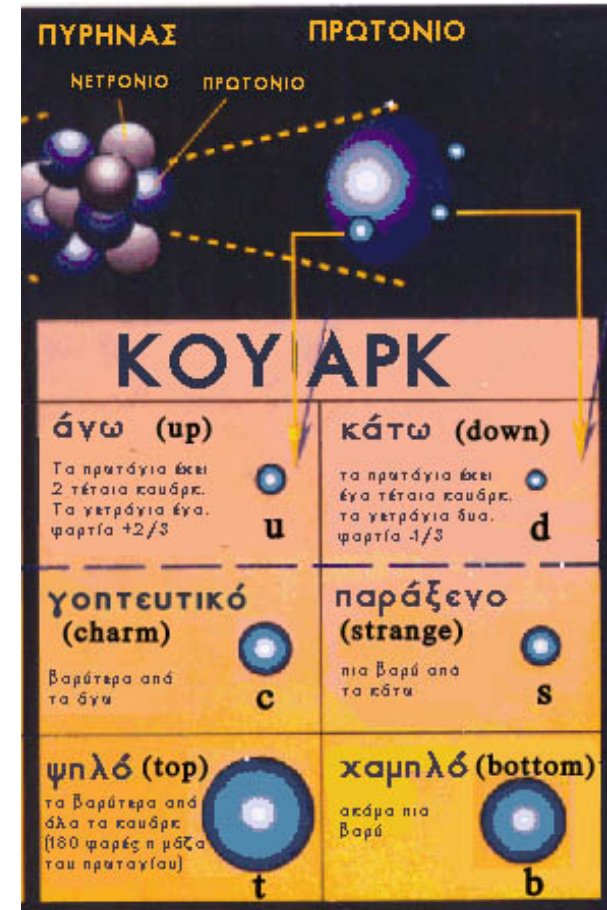
Name	Mass GeV/c ²	Electric charge
g gluon	0	0

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

$q\ \bar{q}$

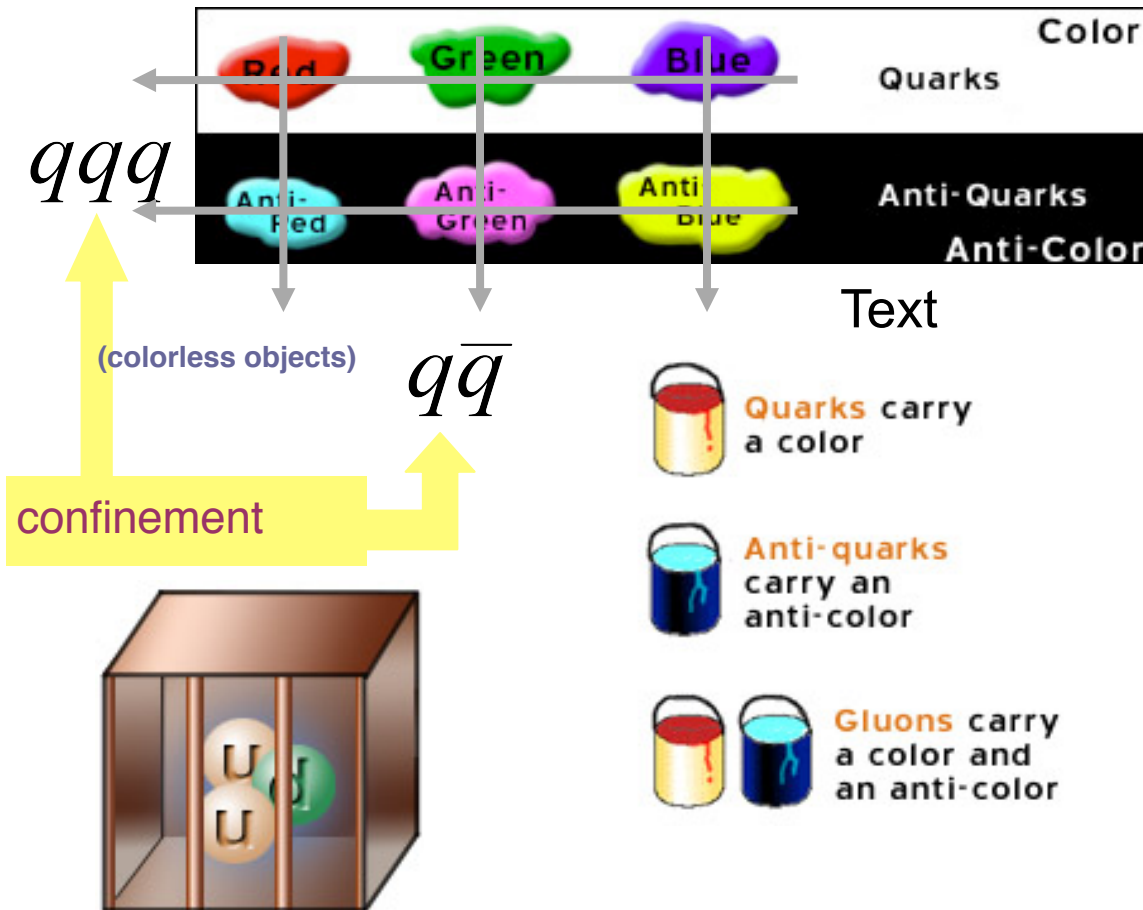
πιόνιο $\pi^+ = (u\ \bar{d})$

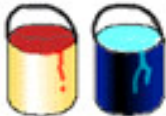
K^0 καόνιο $= (s\ \bar{d})$

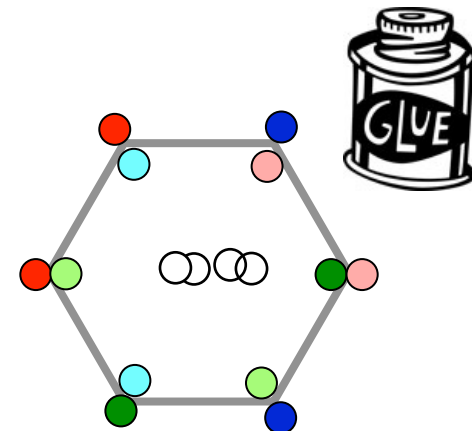
J/Ψ-μεσόνιο $= (c\ \bar{c})$

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

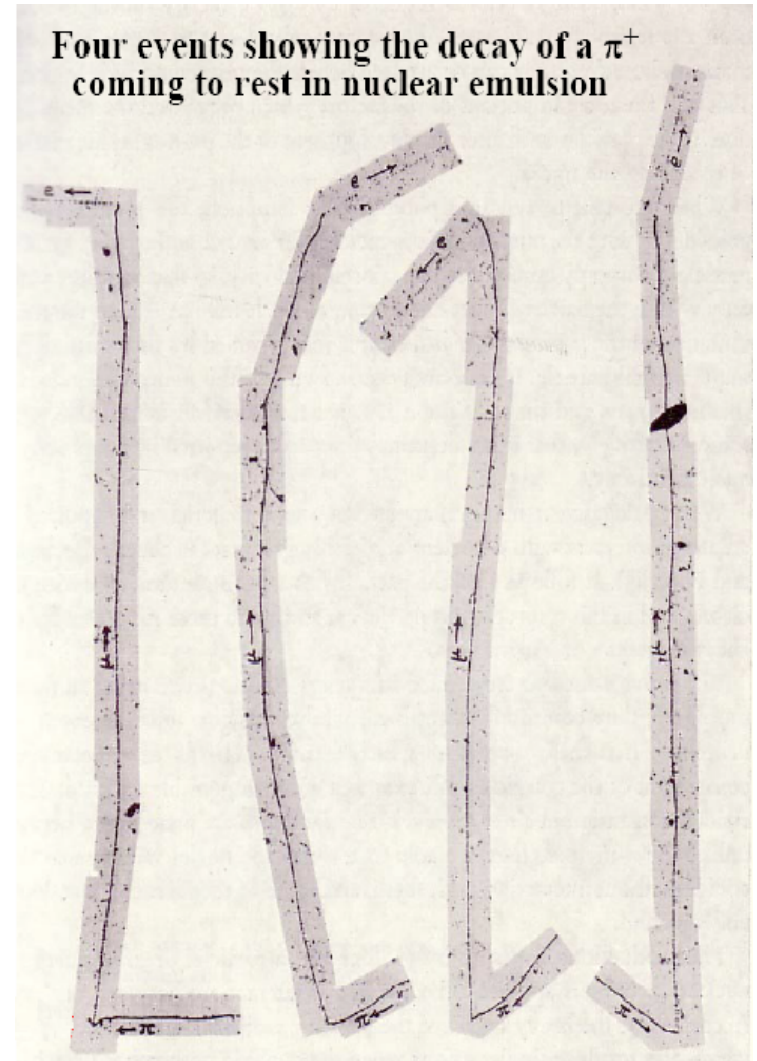
$$B = 0 + 1 \rightarrow 0 + 1 \text{ διατηρείται}$$

Αδρόνια: Μεσόνια

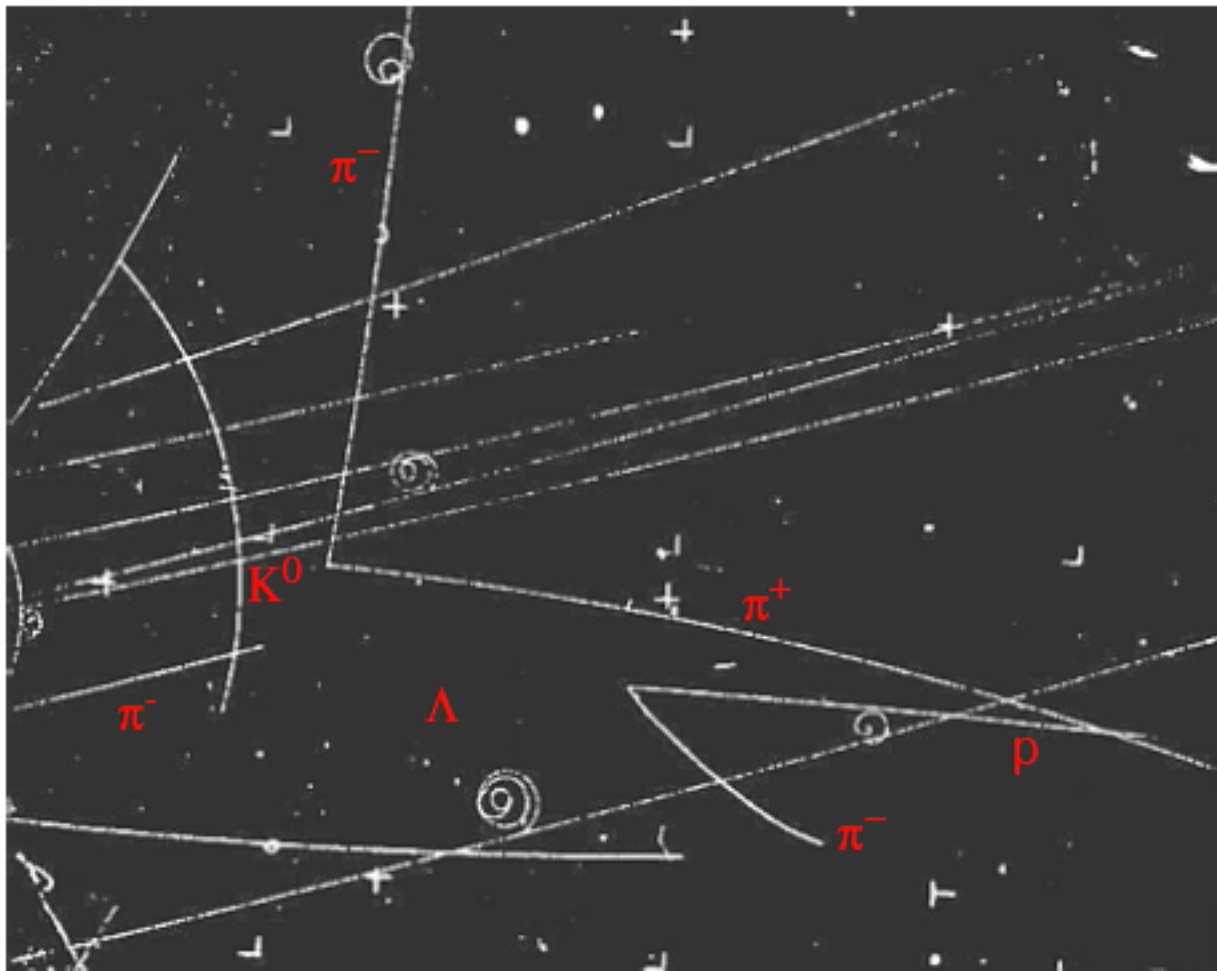
- **Ασταθή** => δεν υπάρχουν στην 'κανονική' ύλη
- Στην ανακάλυψή τους οφείλεται η γένεση της Σωματιδιακής Φυσικής
- π-μεσόνιο και το καόνιο παρατηρήθηκαν στην κοσμική ακτινοβολία το 1947!
- Παράδειγμα της ανακάλυψης του φορτισμένου πιονίου: $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \rightarrow e^+$

Αδρόνια: Μεσόνια

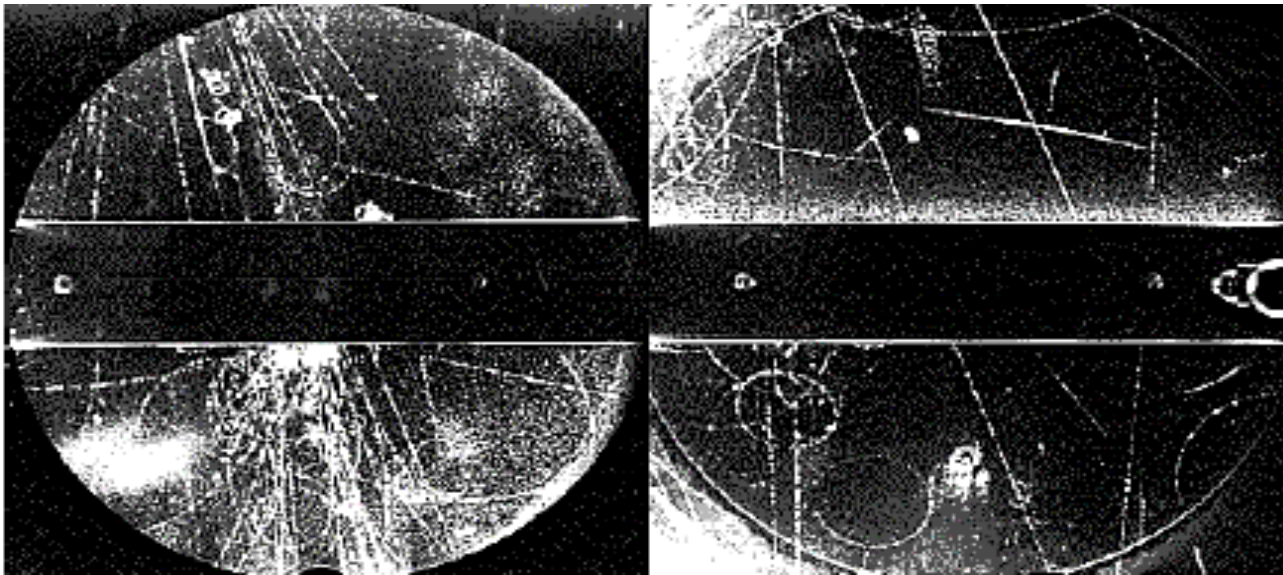
- 1947: Ανακάλυψη του π-μεσονίου (το ‘πραγματικό’ σωματίδιο Yukawa)
- Παρατήρηση της αλυσιδωτής διάσπασης του :
 $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \rightarrow e^+$
σε γαλακτώματα εκτεθειμένα στην κοσμική ακτινοβολία



Παράδοξα/Παράξενα Αδρόνια



Παράδοξα/Παράξενα Αδρόνια

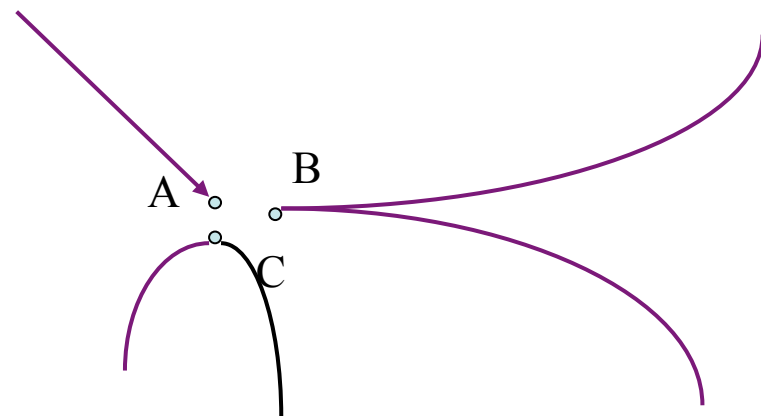


$$\pi^-(A) + p \rightarrow K^0(B) + \Lambda(C)$$

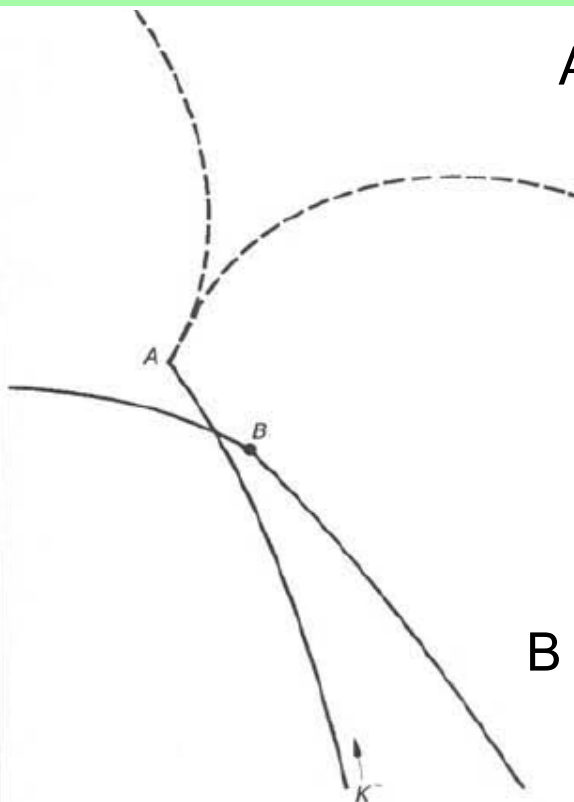
$$K^0 \rightarrow \pi^- + \pi^+$$

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

- 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.

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

$$s\bar{u} + uud \rightarrow sud + u\bar{u}$$

$$\pi^0 \rightarrow \gamma e^+ e^-$$

B : Ασθενής αλληλεπίδραση
μη διατήρηση S

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

$$sud \rightarrow uud + d\bar{u}$$

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:

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

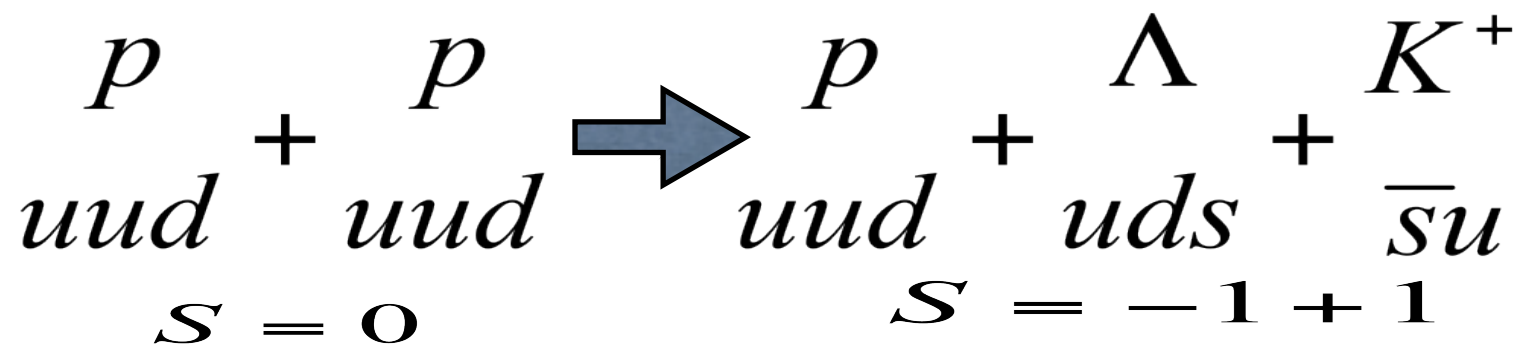
Σύνοψη: Κουάρκ

Διατήρηση του συνολικού αριθμού των κουάρκ

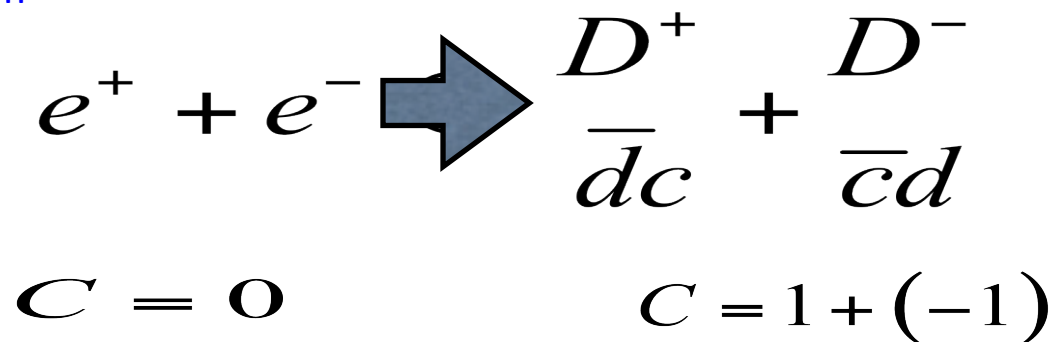
- Ο συνολικός αριθμός των κουάρκ **ΔΙΑΤΗΡΕΙΤΑΙ** σε όλες τις αλληλεπιδράσεις : Ισχυρές, ηλεκτρομαγνητικές, ασθενείς
- Ο αριθμός των κουάρκ συγκεκριμένης γεύσης διατηρείται **ΜΟΝΟ** στις ισχυρές και στις ηλεκτρομαγνητικές αλληλεπιδράσεις
- Στις ασθενείς αλληλεπιδράσεις η γεύση των κουάρκ μπορεί να μεταβάλλεται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

Παραδείγματα διατήρησης των κβαντικών αριθμών των κουάρκ

Παραγωγή παράδοξων σωματιδίων (ισχυρές)



Παραγωγή charm



Τα Λεπτόνια



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

Η δομή των οικογενειών...

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

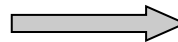
$m_e = 0.5 \text{ MeV}$	$m_\mu = 106 \text{ MeV}$	$m_\tau = 1777 \text{ MeV}$
$\tau_e > 4 \cdot 10^{24} \text{ y}$	$\tau_\mu = 2 \cdot 10^{-6} \text{ s}$	$\tau_\tau = 3 \cdot 10^{-13} \text{ s}$
$m_{\nu_e} < 3 \text{ eV}$	$m_{\nu_\mu} < 0.2 \text{ MeV}$	$m_{\nu_\tau} < 18 \text{ MeV}$

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

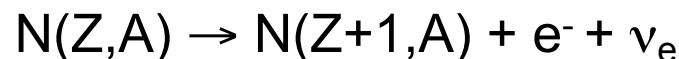
- ❖ Αντιλεπτόνια: positron e^+ , positive muon μ^+ , positive tau-lepton τ^+ , and antineutrinos:

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

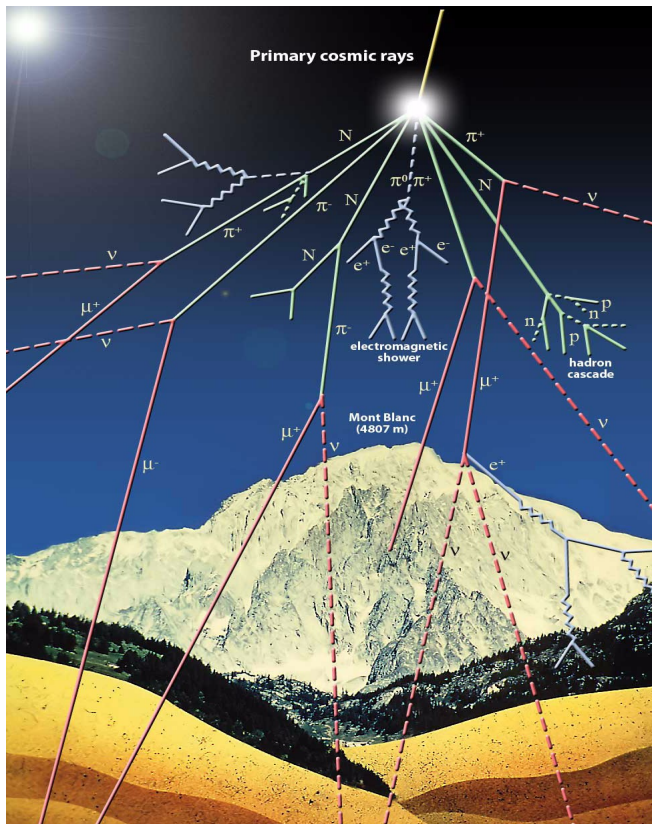
- ❖ Νετρίνα και αντineτρίνα διαφέρουν στο *λεπτονικό αριθμό*. Τα λεπτόνια έχουν λεπτονικούς αριθμούς $L_\alpha=1$ (όπου α : e, μ ή τ), και τα αντιλεπτόνια έχουν $L_\alpha=-1$.
- ❖ *Οι λεπτονικοί αριθμοί διατηρούνται σε όλες τις αλληλεπιδράσεις!*

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

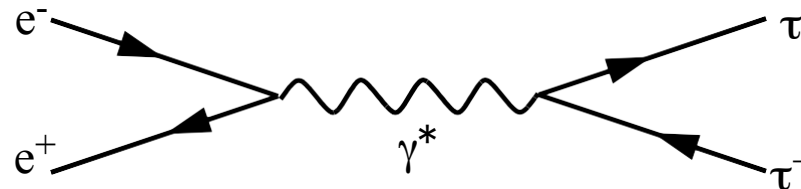
2) **Δευτερογενείς**, τα σωμάτια που παράγονται από τις συγκρούσεις των πρωταρχικών με τους πυρήνες στην ατμόσφαιρα. Τα μιόνια ανήκουν σ’ αυτή την κατηγορία.

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

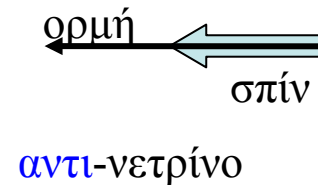
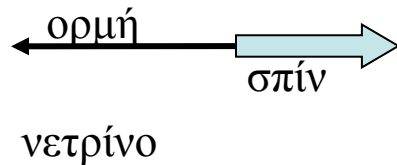
Δεν έχουν φορτίο => Δεν έχουν ηλεκτρομαγνητικές αλληλεπιδράσεις

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 : $(2.9 \times 10^{-13}\text{s})$

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

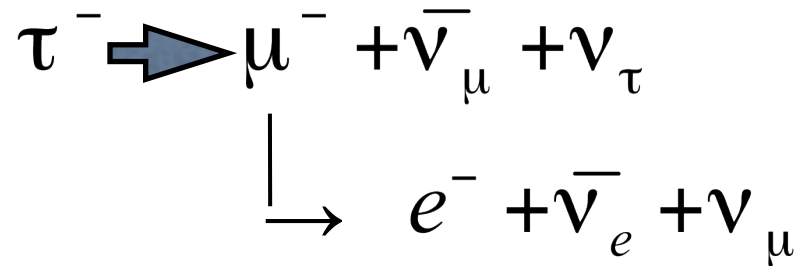
$$\mu^- \Rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$$

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

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

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)