

Εισαγωγή στη Φυσική Στοιχειωδών Σωματιδίων

Δήμος Σαμψωνίδης
(10-12-2014)

Στοιχεία Πυρηνικής Φυσικής & Φυσικής Στοιχειωδών Σωματιδίων
5 ο Εξάμηνο

Φερμιόνια & Μποζόνια

Συμπεριφορά της Κυματοσυνάρτησης δύο
ταυτόσημων σωματίων κάτω από την εναλλαγή τους
στο χώρο

Φερμιόνια, Μποζόνια

Φερμιόνια

- Σωματίδια με ημιακέραιο spin $\left(\frac{1}{2}\hbar, \frac{3}{2}\hbar, \frac{5}{2}\hbar\ldots\right)$
- Ακολουθούν στατιστική Fermi-Dirac

Μποζόνια

- Σωματίδια με ακέραιο spin $(0\hbar, 1\hbar, 2\hbar\ldots)$
- Ακολουθούν στατιστική Bose-Einstein

Φερμιόνια, Μποζόνια

Η κυματοσυνάρτηση **δύο ταυτόσημων φερμιονίων** κάτω από την εναλλαγή τους στο χώρο:

- Έστω κυματοσυνάρτηση δύο ταυτόσημων σωματίων : $\Psi(1,2)$
- Η πιθανότητα $|\Psi(1,2)|^2 = |\Psi(2,1)|^2$ **ΔΕΝ** μεταβάλλεται αν **εναλλάξουμε** τα δύο σωματία στο χώρο $1 \longleftrightarrow 2$
- $\Psi(1,2) = -\Psi(2,1)$: **αντισυμμετρική** αν **εναλλάξουμε** τα δύο **ταυτόσημα φερμιόνια** στο χώρο

Φερμιόνια, Μποζόνια

Η κυματοσυνάρτηση **δύο ταυτόσημων μποζονίων** κάτω από την εναλλαγή τους στο χώρο:

- Έστω κυματοσυνάρτηση δύο ταυτόσημων σωματίων : $\Psi(1,2)$
- Η πιθανότητα $|\Psi(1,2)|^2 = |\Psi(2,1)|^2$ **ΔΕΝ** μεταβάλλεται αν **εναλλάξουμε** τα δύο σωματία στο χώρο $1 \longleftrightarrow 2$
- $\Psi(1,2) = + \Psi(2,1)$: **συμμετρική** αν **εναλλάξουμε** τα δύο **ταυτόσημα μποζόνια** στο χώρο

Φερμιόνια, Μποζόνια

Η **ολική** κυματοσυνάρτηση ενός ή περισσότερων σωματίων είναι **γινόμενο** των **συναρτήσεων** του **χώρου** και του **σπιν** και... (ισοτοπικό σπίν)

$$\Psi = \Psi_{\alpha}(\text{χώρου}) * \Psi_{\beta}(\text{σπιν})$$

Γενικά ισχύει:

$$\Psi_{\alpha}(\text{χώρου}) = \Psi_{\alpha}(r, \theta, \varphi) = \Psi_{\alpha}(r) * Y^m_l(\theta, \varphi)$$

όπου $Y^m_l(\theta, \varphi)$: σφαιρικές αρμονικές

Αν έχουμε σωματΙΑ (1) & (2):

l είναι η σχετική στροφορμή των (1), (2)

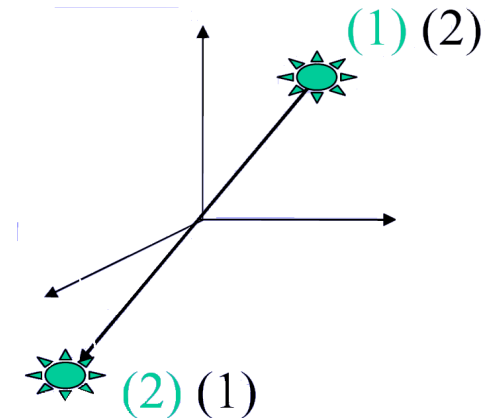
όταν $1 \leftrightarrow 2$: $\theta \rightarrow \pi - \theta$

$$\varphi \rightarrow \pi + \varphi$$

$$\begin{aligned} \text{Η } Y^m_l(\theta, \varphi)(1,2) &\rightarrow Y^m_l(\theta, \varphi)(2,1) \equiv Y^m_l(\pi - \theta, \pi + \varphi)(1,2) = \\ &= (-1)^l Y^m_l(\theta, \varphi)(1,2) \text{ (ισοδυναμεί με αντιστροφή του χώρου)} \end{aligned}$$

αν l = άρτιος η $Y^m_l(\theta, \varphi)(1,2)$ συμμετρική στην εναλλαγή (1,2)

αν l = περιττός η $Y^m_l(\theta, \varphi)$ αντισυμμετρική στην εναλλαγή (1,2)



Φερμιόνια, Μποζόνια

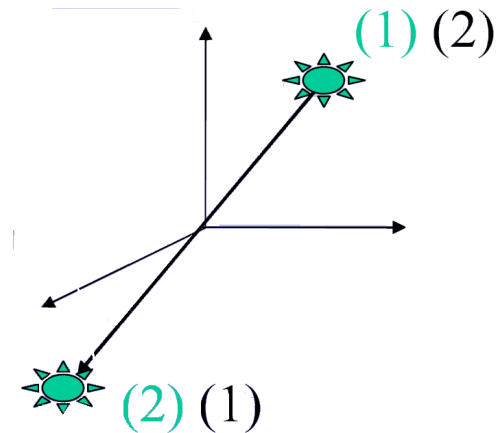
Η κυματοσυνάρτηση του **χώρου** δύο ταυτόσημων σωματίων

$$\Psi_\alpha = \Psi_\alpha(\text{χώρου})(1,2)$$

Η κυματοσυνάρτηση: $\Psi_\alpha(\text{χώρου})(1,2) = \Psi_\alpha(r)(1,2) * Y^m_l(\theta, \phi)(1,2)$

- Η $\Psi_\alpha(r)(1,2) = \Psi_\alpha(r)(2,1)$ (Συμμετρική)
- Η $Y^m_l(\theta, \phi)(2,1) = Y^m_l(\pi-\theta, \pi+\phi)(1,2) = (-1)^l Y^m_l(\theta, \phi)(1,2)$

ΑΡΑ: αν $l =$ **αρτιος** η Y^m_l **συμμετρική**
αν $l =$ **περιττός** η Y^m_l **αντισυμμετρική**



Φερμιόνια, Μποζόνια

Η κυματοσυνάρτηση του **σπιν** δύο ταυτόσημων σωματίων

$$\Psi_{\beta} = \Psi_{\beta}(\text{σπιν})(1,2)$$

Αν σπιν ομοπαράλληλα $\uparrow\uparrow \Psi_{\beta(\text{σπιν})}(1,2) = \Psi_{\beta(\text{σπιν})}(1,2)$ **συμμετρική**

Αν σπιν αντιπαράλληλα $\uparrow\downarrow \Psi_{\beta(\text{σπιν})}(1,2) = -\Psi_{\beta(\text{σπιν})}(1,2)$ **αντισυμμετρική**

$$\Psi = \Psi_{\alpha}(\text{χώρου}) * \Psi_{\beta}(\text{σπιν})$$

⇒ Για ταυτόσημα:

Μποζόνια

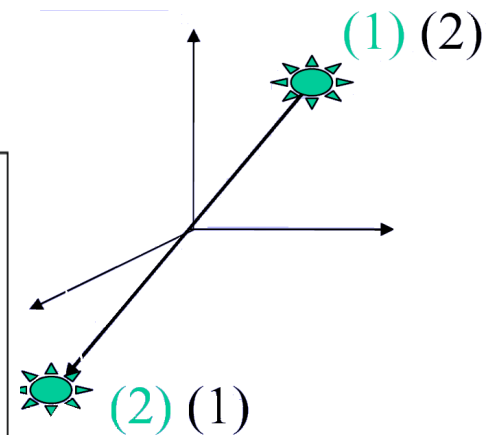
$l = \text{άρτιο} \rightarrow \text{ομοπαράλληλα}$

$l = \text{περιττό} \rightarrow \text{αντιπαράλληλα}$

Φερμιόνια

$l = \text{άρτιο} \rightarrow \text{αντιπαράλληλα}$

$l = \text{περιττό} \rightarrow \text{παράλληλα}$



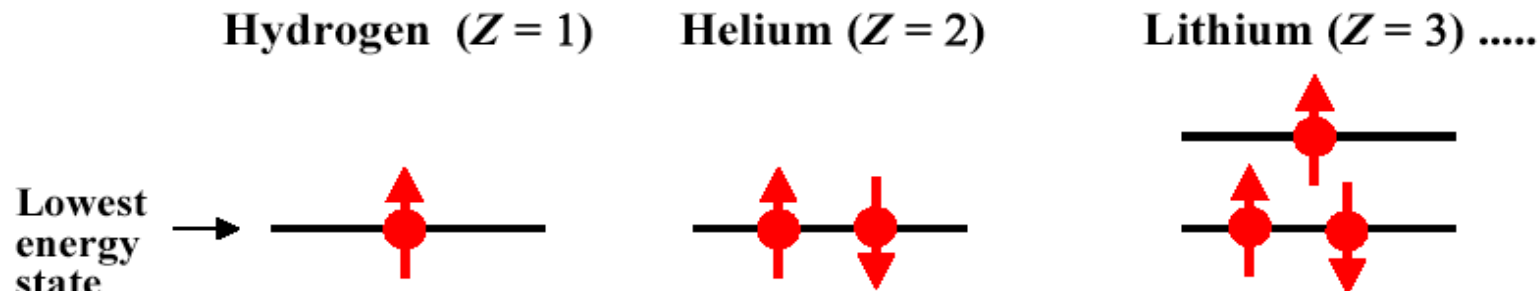
Εφαρμογή της ιδιότητας της συμμετρίας της κυματοσυνάρτησης δύο ταυτόσημων μποζονίων

- Παράδειγμα : η διάσπαση του μεσονίου $\rho^0 \rightarrow 2\pi^0$
- $\rho^0 : \text{σπιν} = 1, l=0 \Rightarrow J=1$
- $\pi^0 : \text{σπιν} = 0, l=0 \Rightarrow J=0 \Rightarrow$ **ταυτόσημα μποζόνια**
- J διατηρείται $\Rightarrow l_{\text{σχετ}} [(\pi^0_1) + (\pi^0_2)] = 1 = J(\rho^0) = 1$
- Η $\Psi_{\beta(\text{σπιν})}(1,2)$ **συμμετρική** $\Rightarrow \Psi_{\alpha(\text{χώρου})}(1,2)$ **πρέπει να είναι**
συμμετρική $\Rightarrow$ / **αρτίο** $\Rightarrow J \neq 1 \Rightarrow$ **Μη διατήρηση της ολικής**
στροφορμής
- $\Rightarrow$ Η διάσπαση $\rho^0 \rightarrow 2\pi^0$ **απαγορεύεται**
- Ενώ η διάσπαση $\rho^0 \rightarrow \pi^+ \pi^- \rightarrow$ **μη ταυτόσημα** σωματ**ια**
επιτρέπεται

Η απαγορευτική αρχή του Pauli

- Στην Κβαντομηχανική οι τροχιές του ηλεκτρονίου γύρω από τον πυρήνα είναι 'κβαντισμένες' Μόνον ορισμένες τροχιές (που χαρακτηρίζονται με ακέραιους κβαντικούς αριθμούς) είναι επιτρεπτές.
- Σε άτομα με $Z > 2$ μόνο δύο ηλεκτρόνια υπάρχουν στην 'βαθύτερη' στιβάδα.

ANSWER (Pauli, 1925): two electrons (spin = $\frac{1}{2}$) can never be in the same physical state



Wolfgang Pauli

Η απαγορευτική αρχή του Pauli ισχύει για **όλα** τα σωματίδια με **ημιακέραιο spin: Φερμιόνια**

Σωματία & Αντισωματία
Κουάρκ & Λεπτόνια
Αδρόνια &
Διατήρηση κβαντικών αριθμών

Αντισωματία

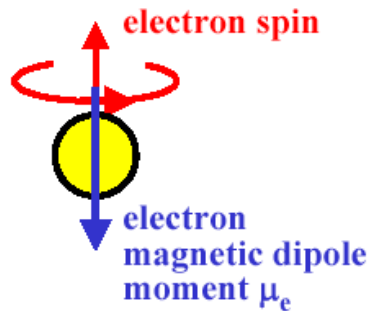
- Η ύπαρξη των αντισωματίων προτάθηκε από τον P.A.M. Dirac (1928)
- Η εξίσωση Dirac: Σχετικιστική Κυματική εξίσωση για το ηλεκτρόνιο που συμπεριλάμβανε και το σπιν
- Η λύση της: κυματοσυνάρτηση με 4-συνιστώσες (Dirac field)



P.A.M. Dirac

$$(i\hbar\gamma_{\mu}\partial^{\mu} - m)\psi = 0$$

- Δύο οι προβλέψεις της εξίσωσης Dirac:
 - Ύπαρξη εσωτερικής μαγνητικής διπολικής ροπής του ηλεκτρονίου με κατεύθυνση αντίθετη του spin



$$\mu_e = \frac{e\hbar}{2m_e} \approx 5.79 \times 10^{-5} [\text{eV/T}]$$

- Για κάθε λύση της εξίσωσης για ηλεκτρόνιο με $E > 0$ υπάρχει μια ακόμη λύση με $E < 0$
Ποιά είναι η φυσική ερμηνεία των λύσεων “αρνητικής ενέργειας”?

Αντισωματία

Η γενικευμένη λύση της εξίσωσης Dirac: μιγαδική κυματοσυνάρτηση $\Psi(\mathbf{r}, t)$. Παρουσία ηλεκτρομαγνητικού πεδίου, για κάθε λύση “αρνητικής ενέργειας” η συζυγής μιγαδική κυματοσυνάρτηση Ψ^* είναι η λύση “θετικής ενέργειας” στην εξίσωση Dirac, για ένα ‘ηλεκτρόνιο’ με θετικό φορτίο

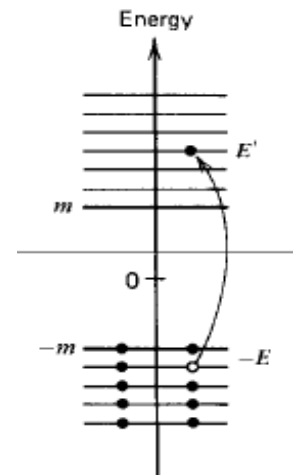


P.A.M. Dirac

Οι υποθέσεις του Dirac :

- Οι μεταπτώσεις ηλεκτρονίων από στάθμη με θετική ενέργεια σε κατειλημμένη στάθμη αρνητικής ενέργειας απαγορεύεται από την αρχή του Pauli
- Μεταπτώσεις ηλεκτρονίων από θετική ενέργεια σε κενή αρνητική στάθμη είναι επιτρεπτές => εξαφάνιση του ηλεκτρονίου. Για να διατηρηθεί το φορτίο ένα θετικό ηλεκτρόνιο πρέπει να εξαφανιστεί => e^+e^- εξαύλωση
- Μεταπτώσεις ηλεκτρονίων από αρνητική ενέργεια σε κενή θετική στάθμη είναι επιτρεπτές => εμφάνιση του ηλεκτρονίου. Για να διατηρηθεί το φορτίο ένα θετικό ηλεκτρόνιο πρέπει να εμφανιστεί=> δημιουργία ζεύγους e^+e^-

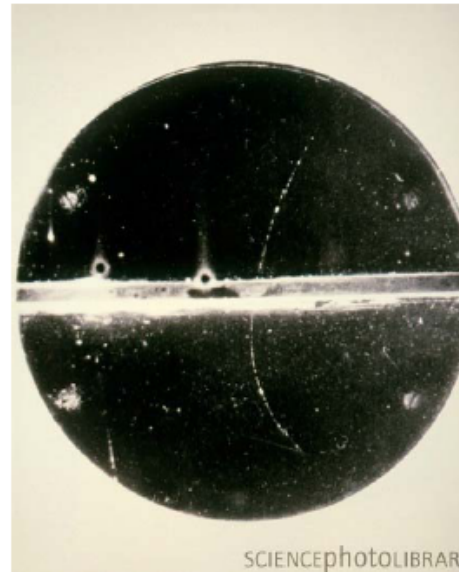
=> κενή αρνητική ενέργεια ηλεκτρονίου περιγράφει θετική ενέργεια ποζιτρονίου



Το τελειο κενό του Dirac είναι η περιοχή που όλες οι θετικής ενέργειας στάθμες είναι κενές και όλες οι αρνητικής κατειλημένες

Σωματρία & Αντισωματρία

- Οι καταστάσεις αρνητικής ενέργειας στην εξίσωση Dirac για το ηλεκτρόνιο ερμηνεύονται σαν καταστάσεις ενός **αντισωματίου** του **ποζιτρονίου**



- Το **ποζιτρόνιο** παρατηρήθηκε από τον Anderson το 1932 στην κοσμική ακτινοβολία σε πείραμα με θάλαμο φυσαλίδων

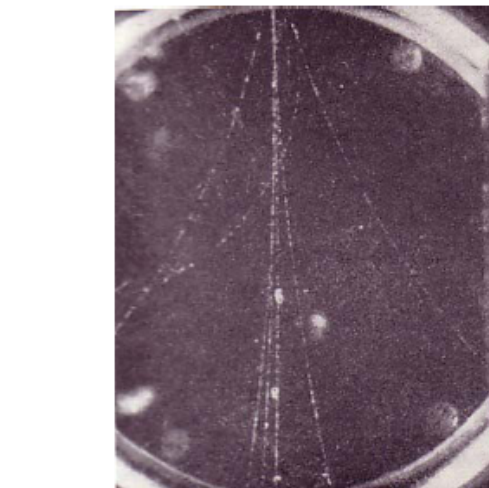
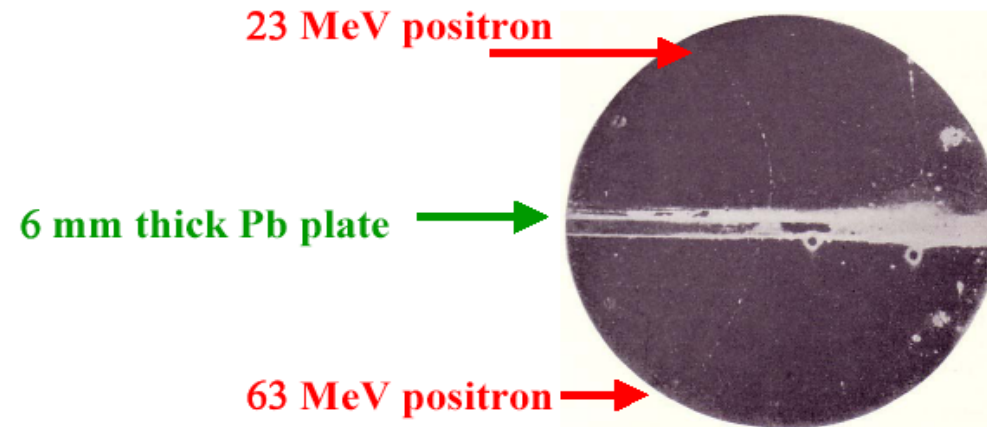
Σωματία & Αντισωματία

Πρώτη πειραματική
παρατήρηση Ποζιτρονίου-
Αντιύλης 1932

direction of
high-energy photon



Production of an
electron-positron pair
by a high-energy photon
in a Pb plate



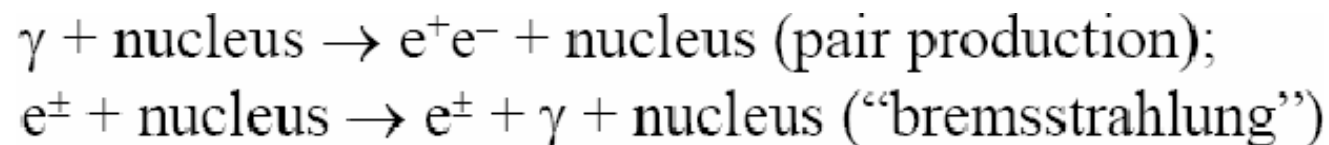
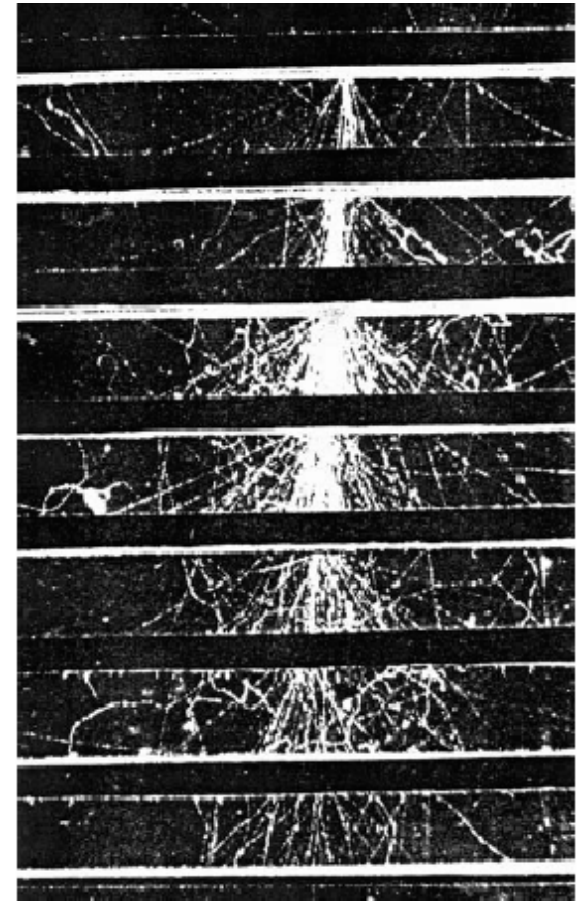
Cosmic-ray “shower”
containing several $e^+ e^-$ pairs

Σωματρία & Αντισωματρία

Πειραματική παρατήρηση Ποζιτρονίων (αντιϋλης) στους ηλεκτρομαγνητικούς καταιγισμούς

Ηλεκτρομαγνητικοί καταιγισμοί προερχόμενοι κυρίως από φωτόνια ή ηλεκτρόνια/ποζιτρόνια της κοσμικής ακτινοβολίας

- Εικόνα καταιγισμού σε θάλαμο φουσαλίδων



Σωματάρια & Αντισωματάρια

Γενικευμένη Ιδιότητα φερμιονίων & μποζονίων:

Σε κάθε σωματάριο αντιστοιχεί ένα αντισωματάριο, το οποίο έχει:

- **ίδια μάζα** με το σωματάριο,
- **ίδιο σπιν** με το σωματάριο,
- **αντίθετο φορτίο** και επομένως
- **αντίθετη μαγνητική ροπή**.

Φερμιόνιο		Φερμιονικός Αριθμός +1
Αντιφερμιόνιο		Φερμιονικός Αριθμός -1

Φερμιόνια και αντιφερμιόνια δημιουργούνται και καταστρέφονται σε ζεύγη

Ο Φερμιονικός Αριθμός διατηρείται!

$$\begin{aligned}\gamma &\rightarrow e^+ + e^- \\ 0 &\rightarrow (-1) + (+1)\end{aligned}$$

Για τα μποζόνια δεν υπάρχει αντίστοιχος νόμος διατήρησης.

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

Πειραματική μαρτυρία ύπαρξης δύο ειδών θεμελιωδών φερμιονίων, χωρίς δομή και με διάσταση μικρότερη του 10^{-18} m (mfm):

Κουάρκ και Λεπτόνια

Κουάρκ

- Κλασματικά ηλεκτρικά φορτία $\{ +2/3|e|, -1/3|e| \}$
- Ποικιλία από 6 συνολικά γεύσεις $\{u, d, s, c, b, t\}$
- Υπόκεινται σε ισχυρές αλληλεπιδράσεις
- Σε κάθε κουάρκ αντιστοιχεί ένα αντικουάρκ με αντίθετο φορτίο

Λεπτόνια

- Τρία ζεύγη λεπτονίων $\{e, \nu_e\}$ $\{\mu, \nu_\mu\}$ $\{\tau, \nu_\tau\}$ με φορτία $\{0, \pm|e| \}$
- Τα ουδέτερα λεπτόνια ονομάζονται νετρίνα
- Συμμετέχουν σε ηλεκτρομαγνητικές & ασθενείς αλληλεπιδράσεις
- Σε κάθε λεπτόνιο αντιστοιχεί ένα αντιλεπτόνιο με αντίθετο φορτίο

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

Οι τρεις γενιές των Θεμελιωδών
συστατικών:

**Κουάρκ και Λεπτόνια(σωμάτια
Υλης: φερμιόνια)**

και

οι διαδότες των Θεμελιωδών
δυνάμεων:

**Θεμελιώδη Μποζόνια
(σωμάτια 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
				Bosons (Forces)
Leptons	<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	
	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	91.2 GeV 0 1 Z weak force
				80.4 GeV ± 1 1 W weak force

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

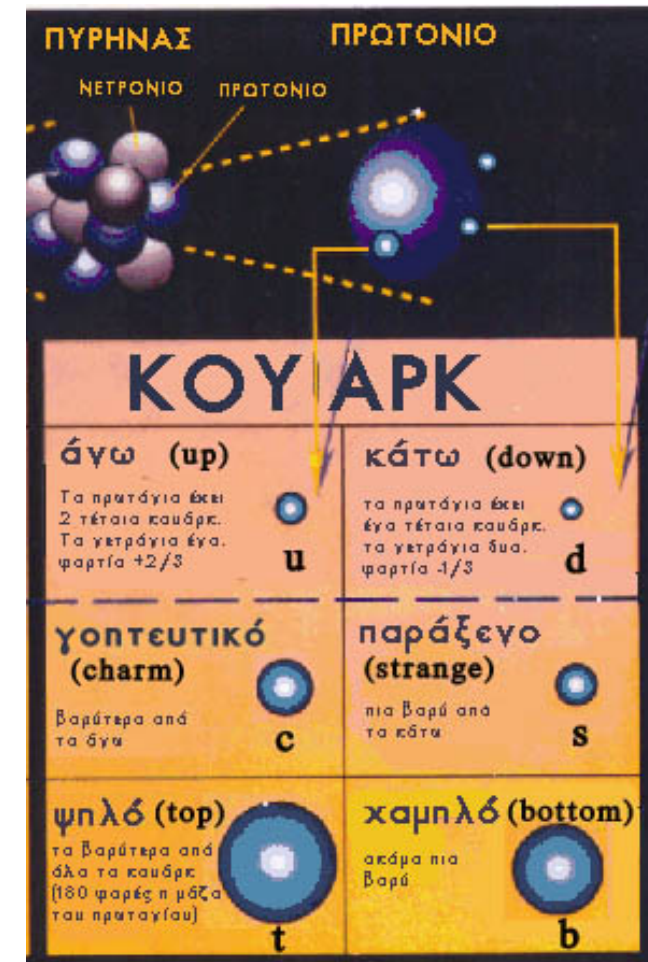
BOSONS			force carriers spin = 0, 1, 2, ...		
Unified Electroweak spin = 1			Strong (color) spin = 1		
Name	Mass GeV/c ²	Electric charge	Name	Mass GeV/c ²	Electric charge
γ photon	0	0	g gluon	0	0
W^-	80.4	-1			
W^+	80.4	+1			
Z^0	91.187	0			

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

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: $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \rightarrow e^+$

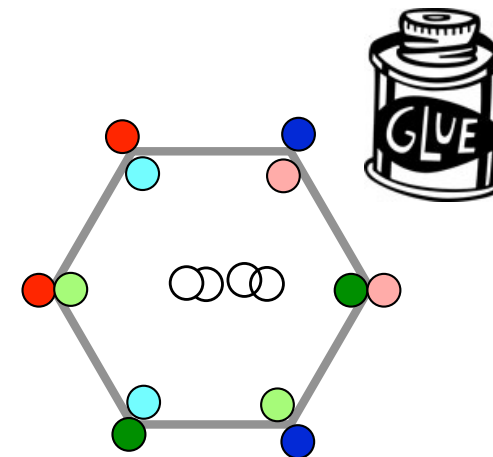
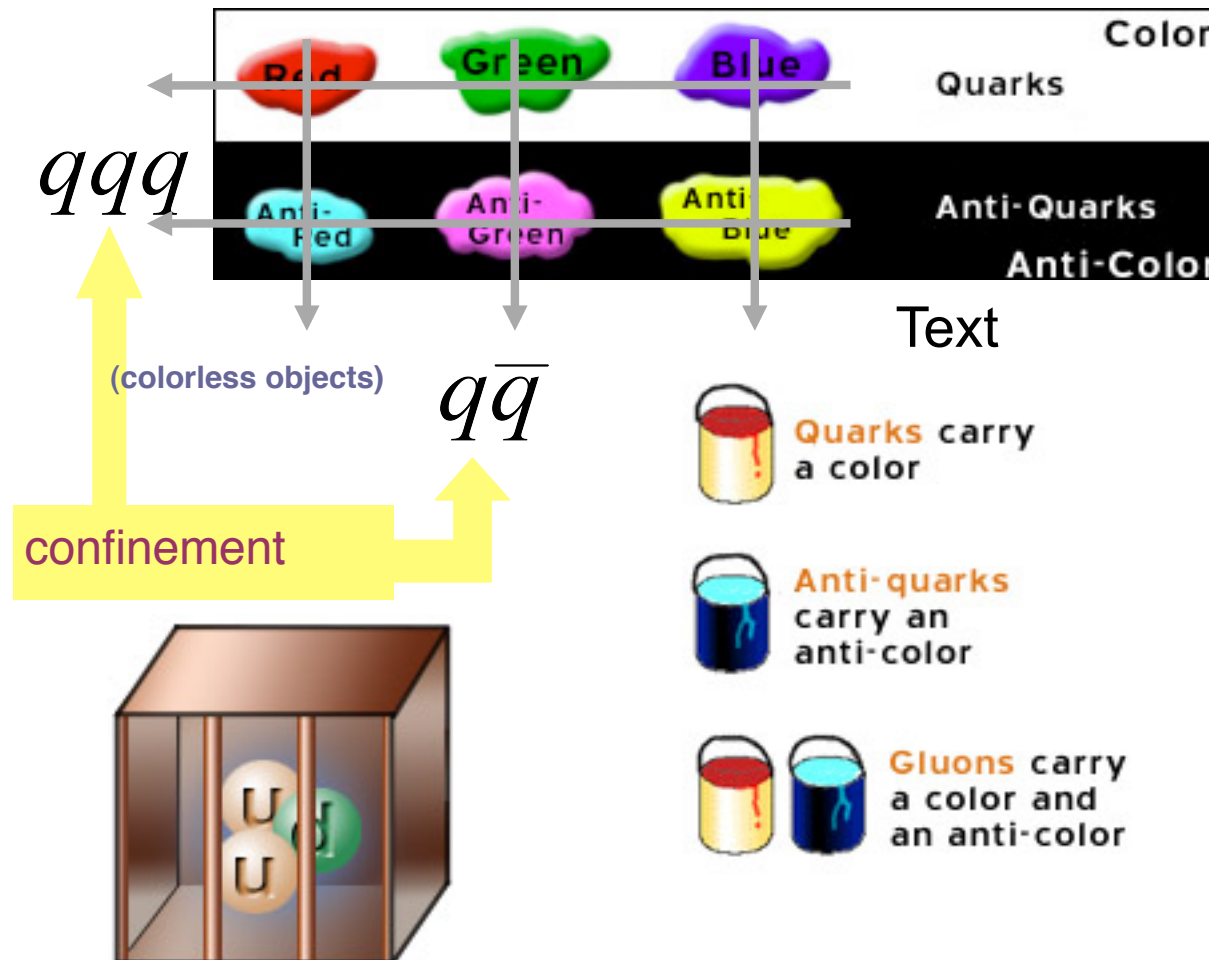
Αδρόνια: Μεσόνια

- 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



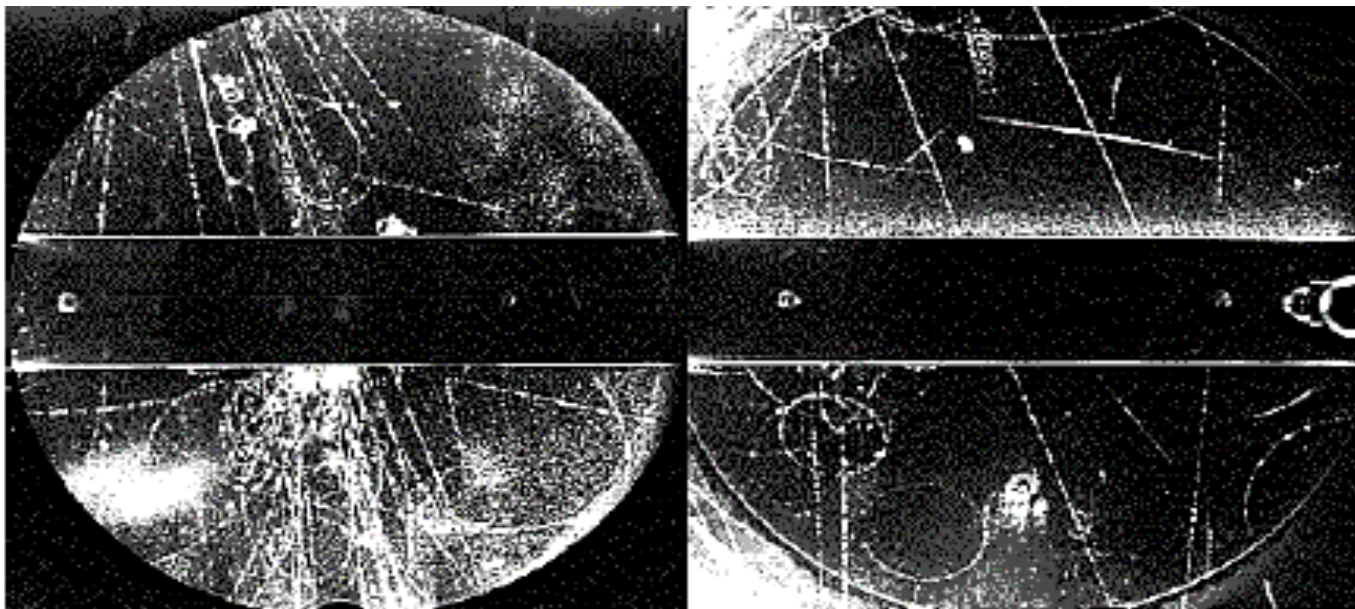
Αδρόνια: Βαρυόνια & Μεσόνια

Η ιδιότητα του Χρώματος



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

Παράδοξα/Παράξενα Αδρόνια

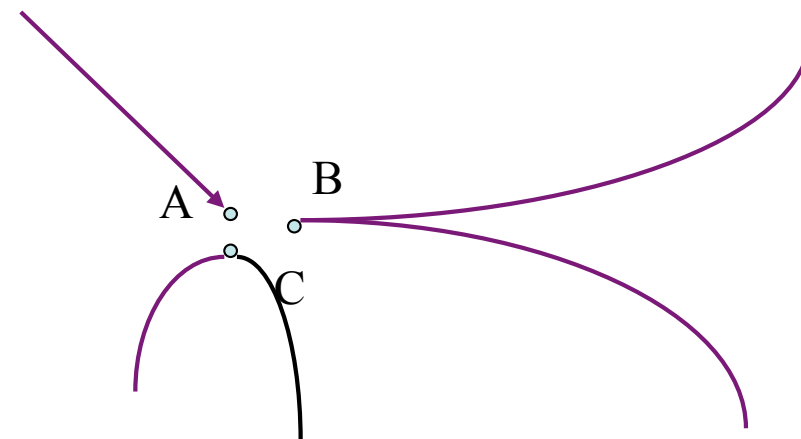


$$\pi^-(A) + p \rightarrow K^0(B) + \Lambda(C)$$

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

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

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



Παράδοξα/Παράξενα Αδρόνια

- 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)

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

Παραγωγή charm

$$\begin{array}{c} e^+ + e^- \\ C = 0 \end{array} \rightarrow \begin{array}{c} D^+ \\ \bar{d}c \\ C = 1 \end{array} + \begin{array}{c} D^- \\ \bar{c}d \\ C = -1 \end{array}$$

Τα Λεπτόνια



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

Η δομή των οικογενειών...

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

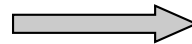
$m_e = 0.5 \text{ MeV}$	$m_\mu = 106 \text{ MeV}$	$m_\tau = 1777 \text{ MeV}$
$\tau_e > 4 \cdot 10^{24} \text{ y}$	$\tau_\mu = 2 \cdot 10^{-6} \text{ s}$	$\tau_\tau = 3 \cdot 10^{-13} \text{ s}$
$m_{\nu_e} < 3 \text{ eV}$	$m_{\nu_\mu} < 0.2 \text{ MeV}$	$m_{\nu_\tau} < 18 \text{ MeV}$

Γιατί 3 οικογένειες?

Τα Λεπτόνια

Για κάθε λεπτόνιο
υπάρχει το
αντιλεπτόνιό του

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



 ΑΤΟΜΟ	
ΛΕΠΤΟΝΙΑ	
ηλεκτρόνιο υπεύθυνο για τα ηλεκτρίδια και τις χημικές αντιδ/σεις. φορτία -1	νεutrίνο ηλ/νίου Αλληλεπιδρά σπάνια με την ύλη. φορτία 0
μυόνιο πια βαρύτερο από τα ηλεκτρόνια	νεutrίνο μυονίου δημιουργείται μαζί με τα μύονια σε μερικές διασπάσεις
ταυ ακόμα πιο βαρύτερο	νεutrίνο ταυ δεν έχει παρατηρηθεί ακόμα, αλλά πιστεύεται ότι υπάρχει

$-1|e|$

$0|e|$

Τα Ουδέτερα Λεπτόνια - Νετρίνο

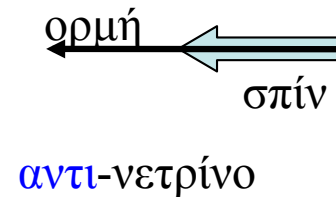
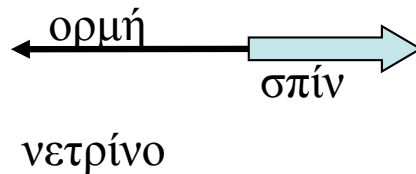
Δεν έχουν φορτίο => Δεν έχουν ηλεκτρομαγνητικές αλληλεπιδράσεις

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

$$\begin{array}{c} \tau^- \Rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu + \nu_\tau \\ \quad \quad \quad \downarrow \\ \quad \quad \quad \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu \end{array}$$

- 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)

2.6 An electron and a μ^+ bound by the Coulomb attraction is called *muonium*. Which of the following decays can occur?

(a) $(\mu^+ e^-) \rightarrow \gamma + \gamma$

(b) $(\mu^+ e^-) \rightarrow \nu_e + \bar{\nu}_\mu$

(c) $(\mu^+ e^-) \rightarrow e^+ + e^- + \nu_e + \bar{\nu}_\mu$