

Στοιχειώδη Σωματίδια

Διάλεξη 10η
Πετρίδου Χαρά

Τμήμα G3: Κ. Κορδάς & Χ. Πετρίδου

Σωμάτια & Αντισωμάτια
Κουάρκ & Λεπτόνια
Αδρόνια &
Διατήρηση κβαντικών αριθμών

16/12/2011

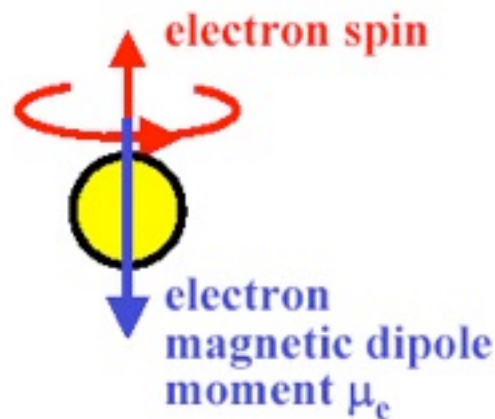
- Η ύπαρξη των αντισωματίων προτάθηκε από τον P.A.M. Dirac (1928)
- Η εξίσωση Dirac: Σχετικιστική Κυματική εξίσωση για το ηλεκτρόνιο που συμπεριλάμβανε και το spin
- Η λύση της: κυματοσυνάρτηση με 4-συνιστώσες (Dirac field)



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”?**

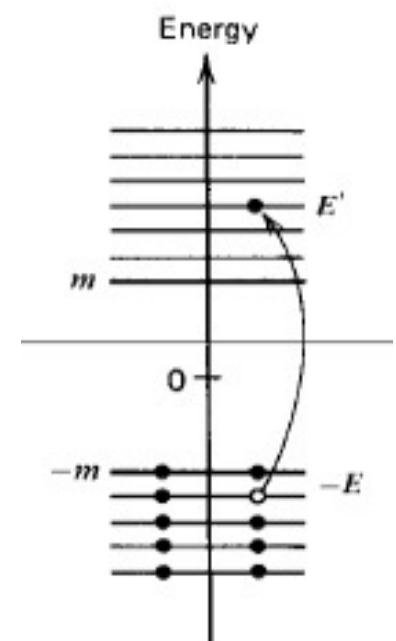


P.A.M. Dirac

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

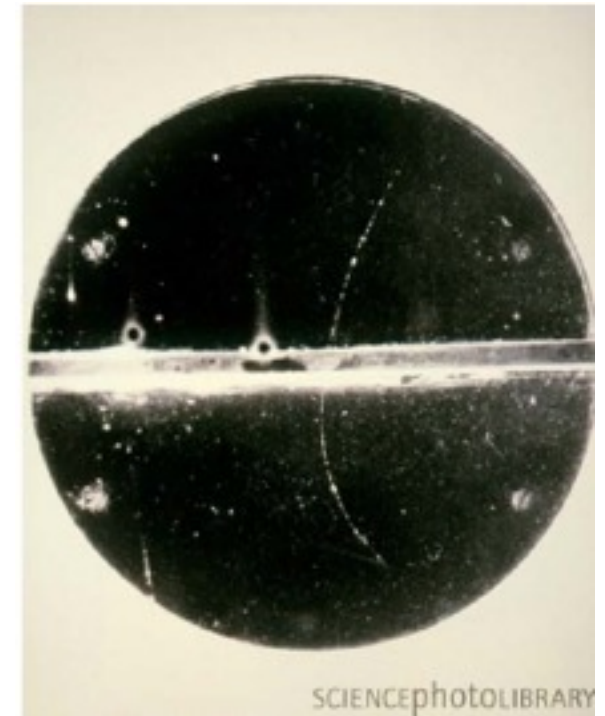
Οι υποθέσεις του Dirac :

- 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 κατειλημμένες

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

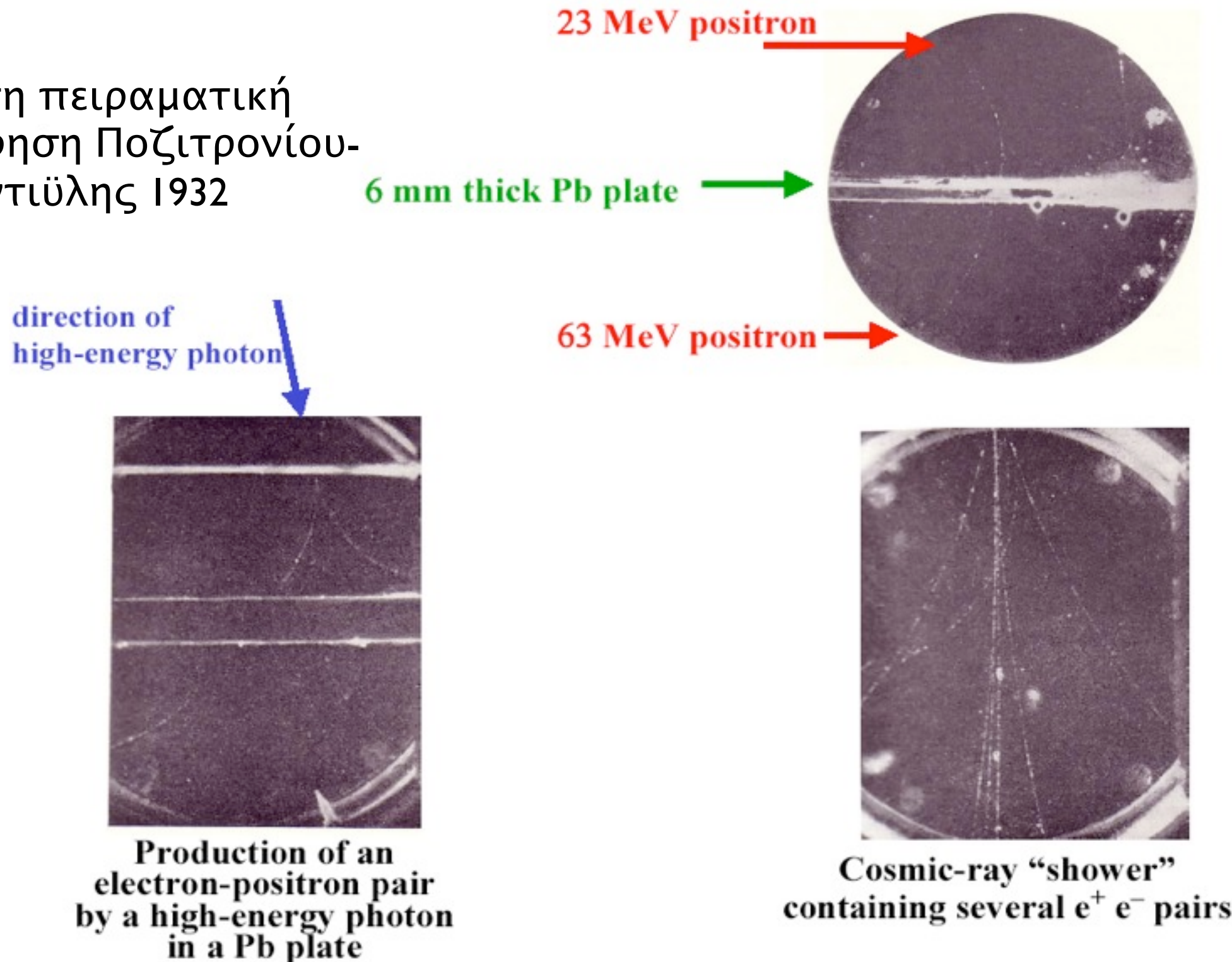


- Το **ποζιτρόνιο** παρατηρήθηκε από τον Anderson το 1932 στην κοσμική ακτινοβολία σε πείραμα με θάλαμο φυσαλίδων

Σωματία & Αντισωματία

6

Πρώτη πειραματική
παρατήρηση Ποζιτρονίου-
Αντιύλης 1932



Πετρίδου Χαρά

Θεσσαλονίκη 16 Δεκ. 2011

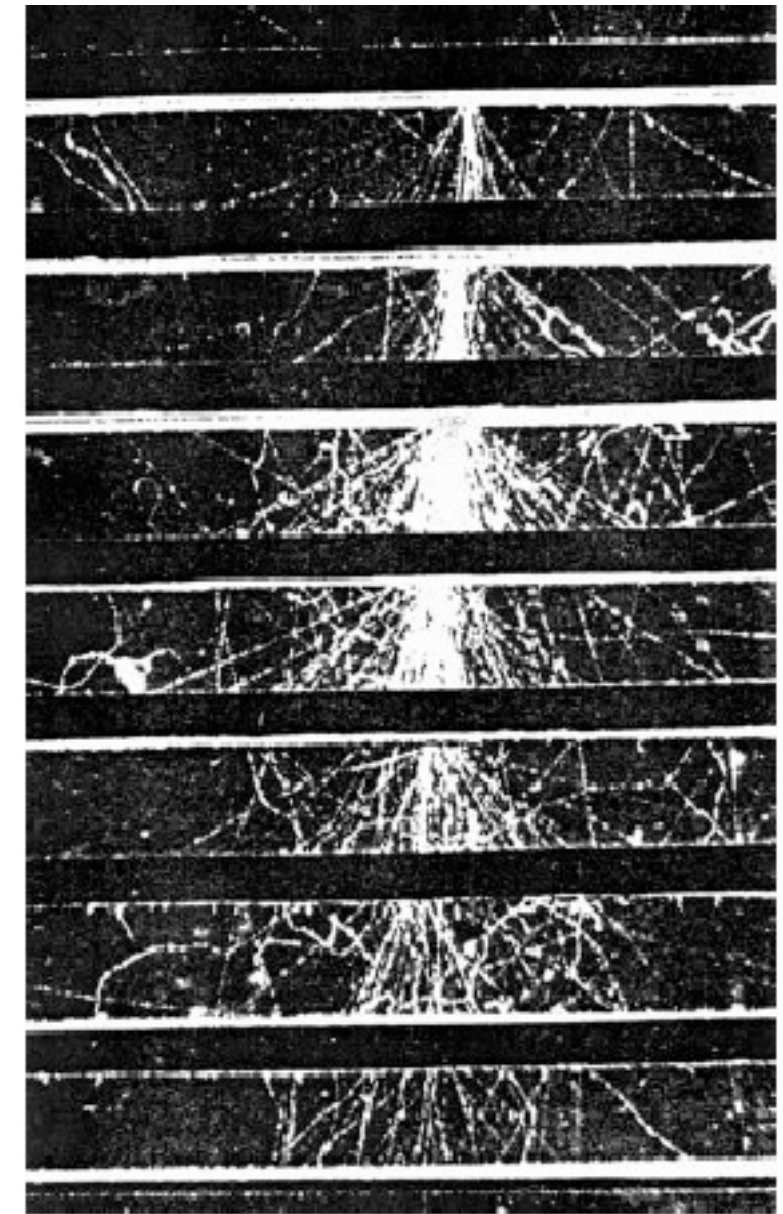
Σωματίια & Αντισωματίια

7

Πειραματική παρατήρηση Ποζιτρονίων (αντιϋλης)
στους ηλεκτρομαγνητικούς καταιγισμούς

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

- Εικόνα καταιγισμού σε
θάλαμο φυσαλίδων



$\gamma + \text{nucleus} \rightarrow e^+e^- + \text{nucleus}$ (pair production);
 $e^\pm + \text{nucleus} \rightarrow e^\pm + \gamma + \text{nucleus}$ (“bremsstrahlung”)

Γενικευμένη Ιδιότητα φερμιονίων & μποζονίων:

Σε κάθε σωματΙο αντιστοιχεί ένα αντισωματΙο, το οποίο έχει:

- **ίδια μάζα** με το σωματΙο,
- **ίδιο σπιν** με το σωματΙο,
- **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!

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

Για τα μποζόνια δεν υπάρχει αντίστοιχος νόμος διατήρησης.

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

9

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 Ύλη: Κουάρκ & Λεπτόνια

10

Οι τρεις γενιές των
Θεμελιωδών συστατικών:

Κουάρκ και Λεπτόνια
(σωμάτια Ύλης: 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
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	91.2 GeV 0 1 Z weak force
	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

II

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

12

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

13

BOSONS

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

Unified Electroweak spin = 1

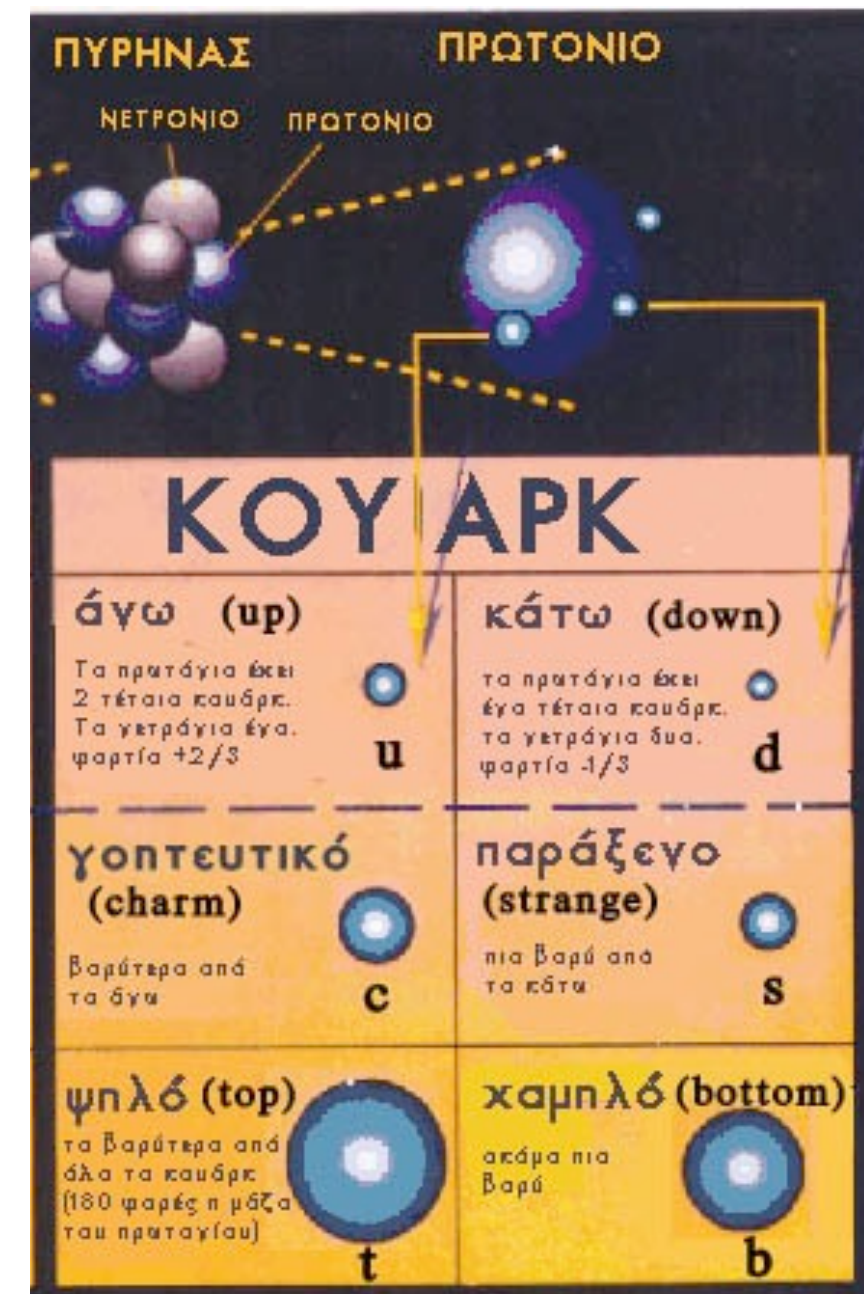
Name	Mass GeV/c ²	Electric charge
γ photon	0	0
W^-	80.4	-1
W^+	80.4	+1
Z^0	91.187	0

Strong (color) spin = 1

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

Τα κουάρκ
Για κάθε κουάρκ
υπάρχει το
αντικουάρκ του

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



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

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 $= (\bar{c} \ c)$

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

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

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:

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

$$\text{Anti-}ud \quad uud \quad \text{anti-}sd \quad usd$$

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

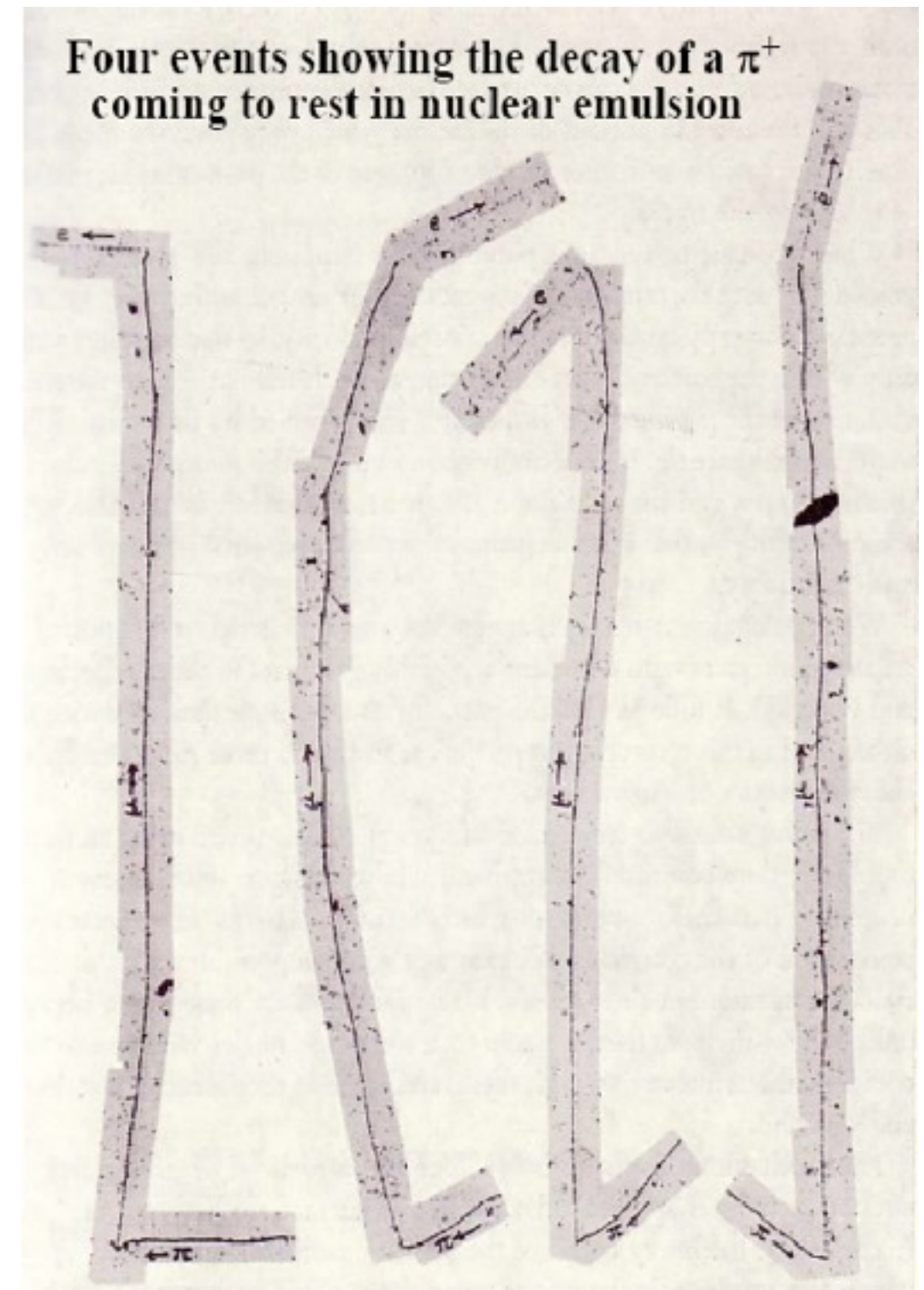
- **Ασταθή** => δεν υπάρχουν στην ‘κανονική’ ύλη
- Στην ανακάλυψή τους οφείλεται η γένεση της Σωματιδιακής Φυσικής
- π-μεσόνιο και το καόνιο παρατηρήθηκαν στην κοσμική ακτινοβολία το 1947!
- Παράδειγμα της ανακάλυψης του φορτισμένου πιονίου: $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \rightarrow e^+$

- 1947: Ανακάλυψη του π-μεσονίου (το 'πραγματικό' σωματίδιο Yukawa)

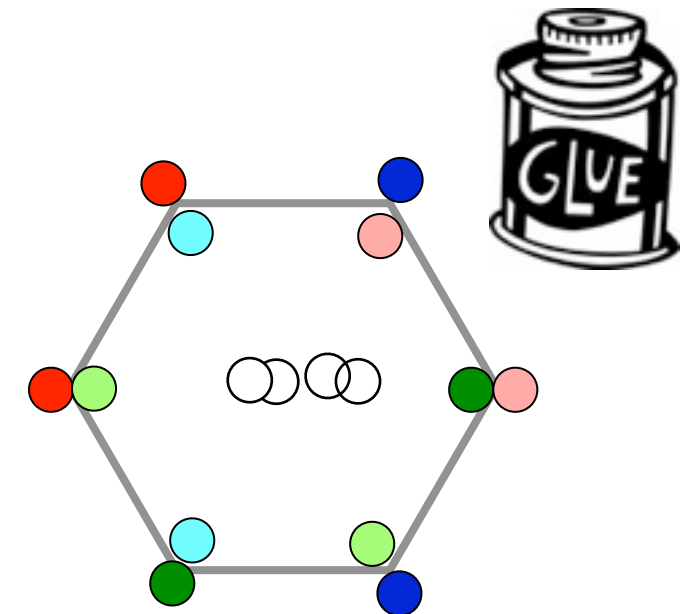
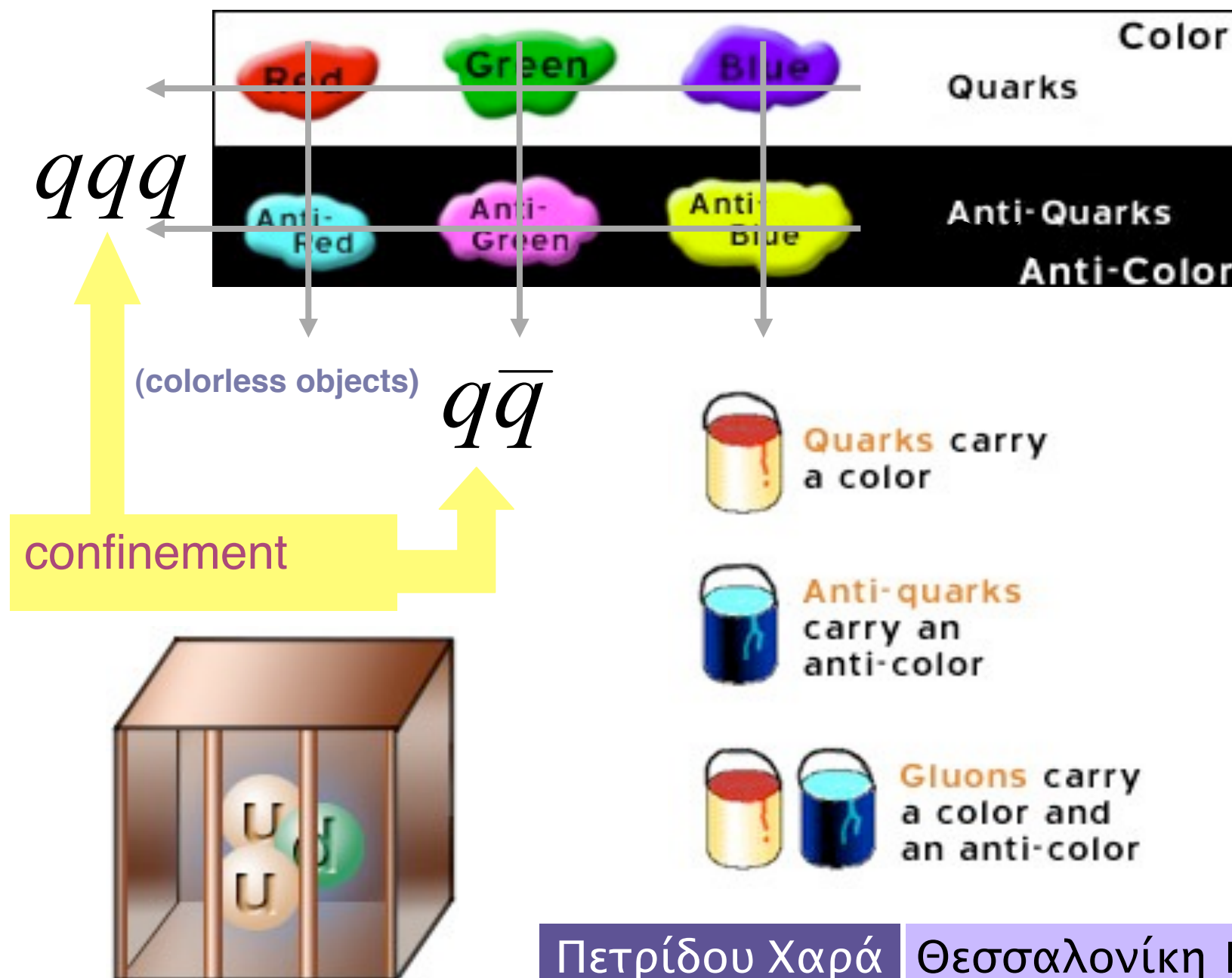
- Παρατήρηση της αλυσιδωτής διάσπασης του :

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

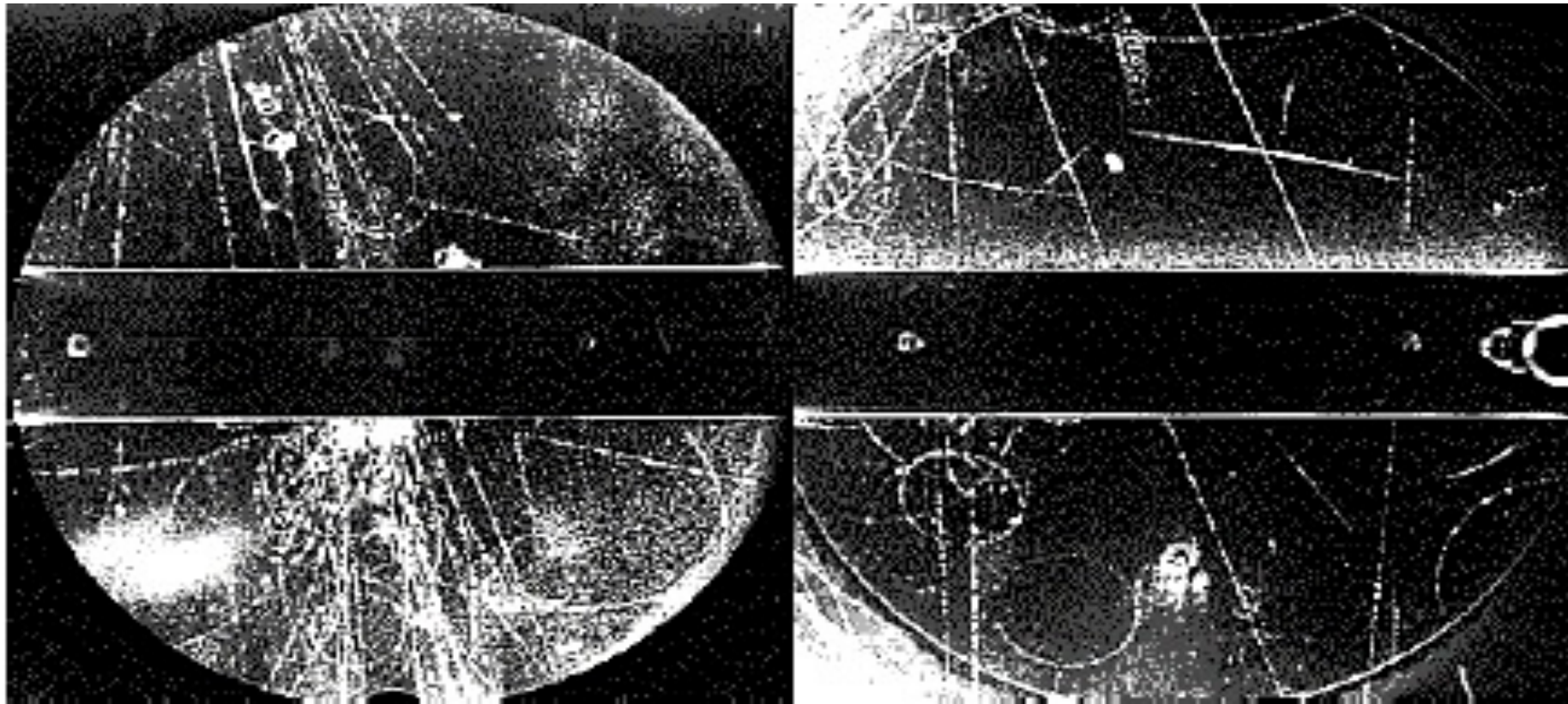
σε γαλακτώματα εκτεθειμένα στην κοσμική ακτινοβολία



Η ιδιότητα του Χρώματος



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

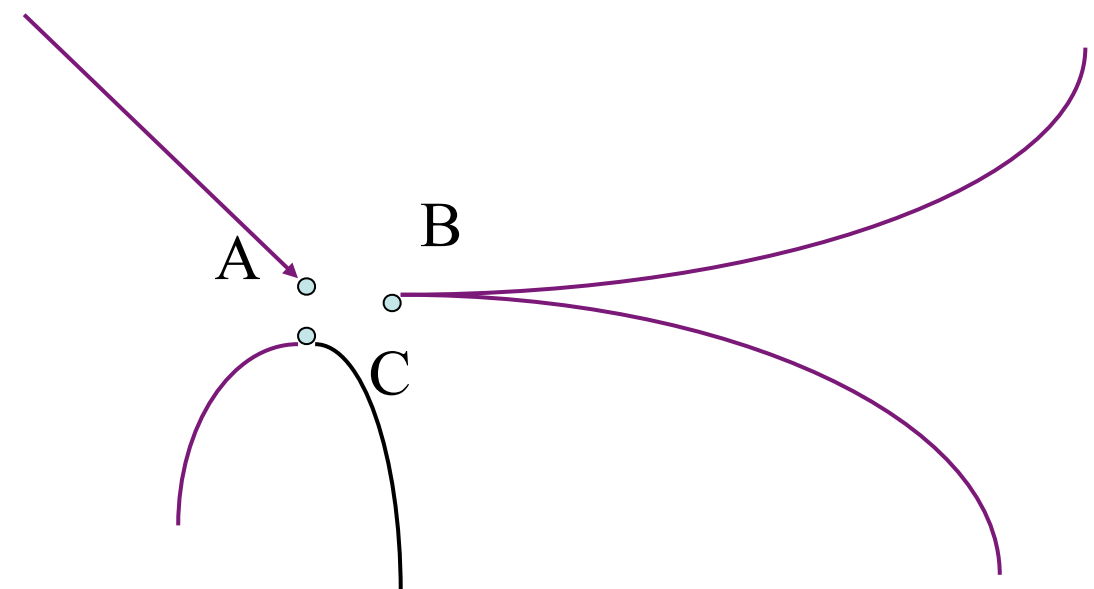


$$\pi^-(A) + p \rightarrow K^0(B) + \Lambda(C)$$

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

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

- Παράγονται σε ζεύγη : s **anti**- s
- Παράδειγμα : $\pi^- + p \rightarrow K^0 + \Lambda$
 $\text{anti-}u \ d \quad u u d \quad \text{anti-}s \ d \quad u s d$



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!

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

Κουάρκ: Παράδειγμα αλληλεπίδρασης

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:

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

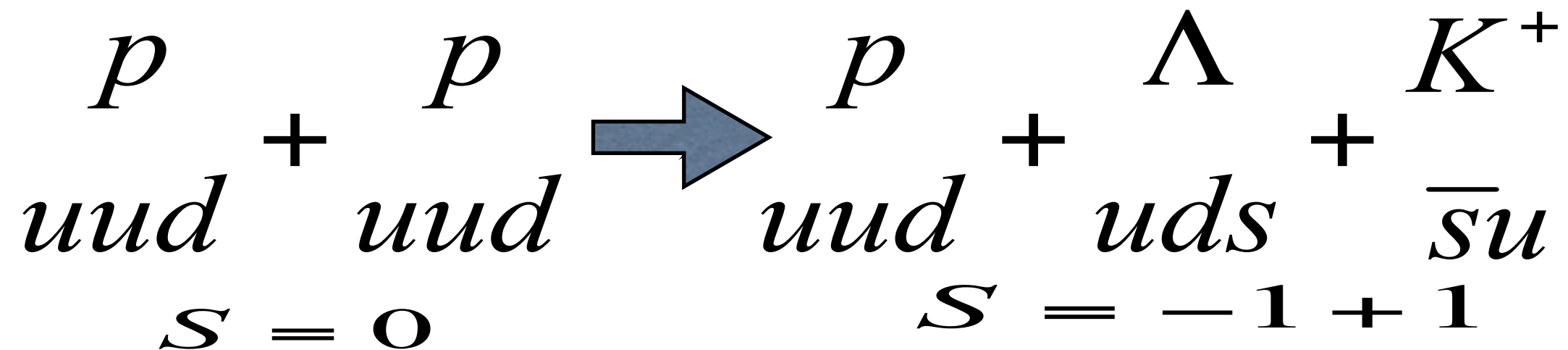
Διατήρηση του συνολικού αριθμού των κουάρκ

- 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 $\Delta S=1, \Delta C=1, \dots$

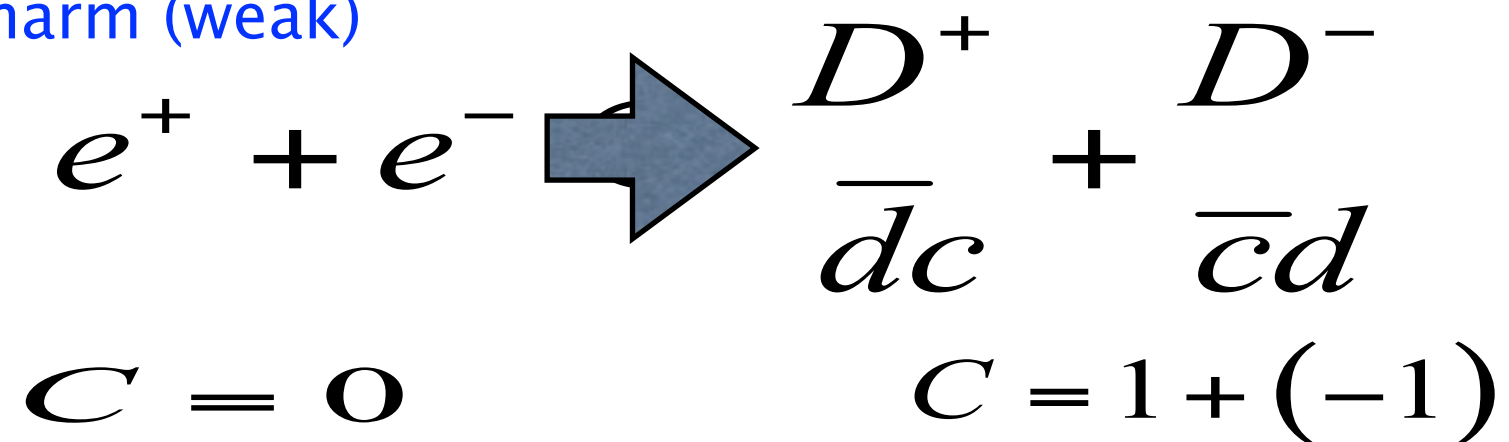
Παραδείγματα διατήρησης των κβαντικών αριθμών των κουάρκ

28

Παραγωγή παράδοξων σωματιδίων (ισχυρές)



Παραγωγή charm (weak)





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

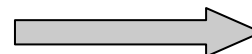
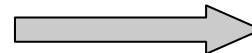
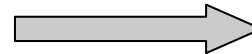
Η δομή των οικογενειών... $\begin{pmatrix} \nu_e \\ e^- \end{pmatrix}_L$, $\begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu^- \end{pmatrix}_L$, $\begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau^- \end{pmatrix}_L$

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

Γιατί 3 οικογένειες?

Για κάθε λεπτόνιο
υπάρχει το
αντιλεπτόνιό του

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



ΑΤΟΜΟ

ΛΕΠΤΟΝΙΑ	
πλεκτρόνιο υπεύθυνο για τον ηλεκτρισμό και τις χημικές αντιδράσεις. φορτίο -1	νεutrίνο ηλεκτρονίου Αλληλεπιδρά σπάνια με την ύλη. φορτίο 0
μυόνιο πιο βαρύ από τα πλεκτρόνια	νεutrίνο μυόνιου 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|

Τα Ουδέτερα Λεπτόνια - Νετρίνο

31

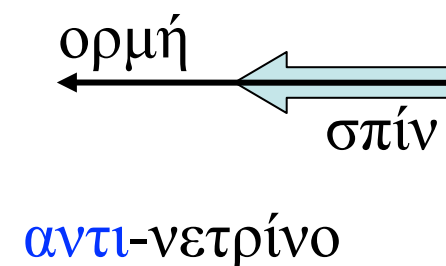
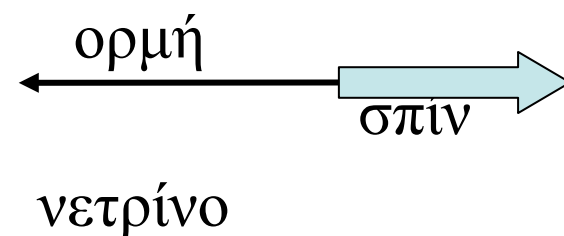
Δεν έχουν φορτίο => Δεν έχουν ηλεκτρομαγνητικές αλληλεπιδράσεις

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**



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**

Διατήρηση Λεπτονικού Αριθμού

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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.

$$\tau^- \Rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu + \nu_\tau$$
$$\quad \quad \quad \downarrow$$
$$\quad \quad \quad e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$$

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

- **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)