

Πυρηνική Φυσική και Φυσική Στοιχειωδών Σωματιδίων (5ου εξαμήνου)

Τμήμα Τ2: Κ. Κορδάς & Δ. Σαμψωνίδης

Μάθημα 19-20

**Στοιχειώδη Σωματίδια.
Κβαντικοί αριθμοί τους. Νόμοι διατήρησης**

Κώστας Κορδάς

Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

1.

Κουάρκ και λεπτόνια

- επανάληψη της ματιάς που ρίξαμε στο “τοπίο” αυτό στην αρχή του εξαμήνου

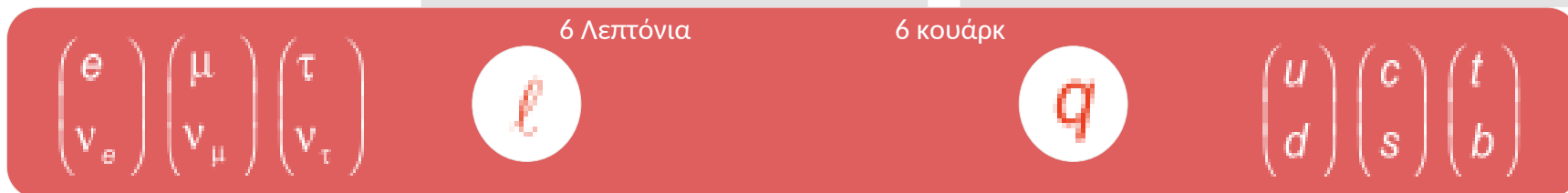
Όλα μαζί – η θεωρία μας για τα δομικά/βασικά συστατικά της ύλης και πώς αυτά αλληλεπιδρούν μεταξύ τους:

“Το Καθιερωμένο Πρότυπο”

Φερμιόνια

Σωματίδια ύλης

Κάθε κατηγορία σε 3 οικογένειες



Μποζόνια

Διαδότες/φορείς των δυνάμεων

3 δυνάμεις



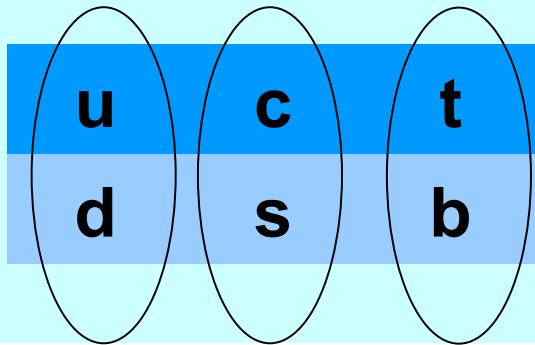
Μποζόνιο Higgs (BEH)



“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

ν_e	ν_μ	ν_τ
e^-	μ^-	τ^-

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^-

Φορτίο (Q)

Βαρυονικός
Αριθμός (B)

Αντίστοιχος
Λεπτονικός
Αριθμός

0

0

+1

-1

0

+1

Βαρυονικός Αριθμός = 0 για όλα τα λεπτόνια

2.

Σωματία και αντισωματία

(είπαμε πριν ότι για κάθε σωματίο υπάρχει το αντίστοιχο αντισωματίο. Πάμε να δούμε πώς ήρθαν στο προσκήνιο αυτά)

Εξίσωση Dirac: σωστή σχετικιστική περιγραφή, φερμιόνια με σπιν $\frac{1}{2}$, αλλά... αρνητικές ενέργειες...

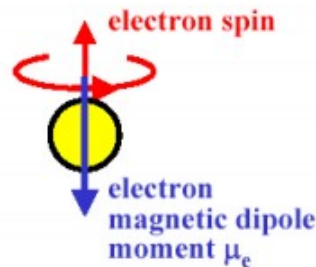


P.A.M. Dirac

- 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)

$$\left(i\hbar\gamma_\mu \partial^\mu - m \right) \psi = 0$$

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



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

Η εξίσωση Dirac περιγράφει φερμιόνια με σπιν $\frac{1}{2}$

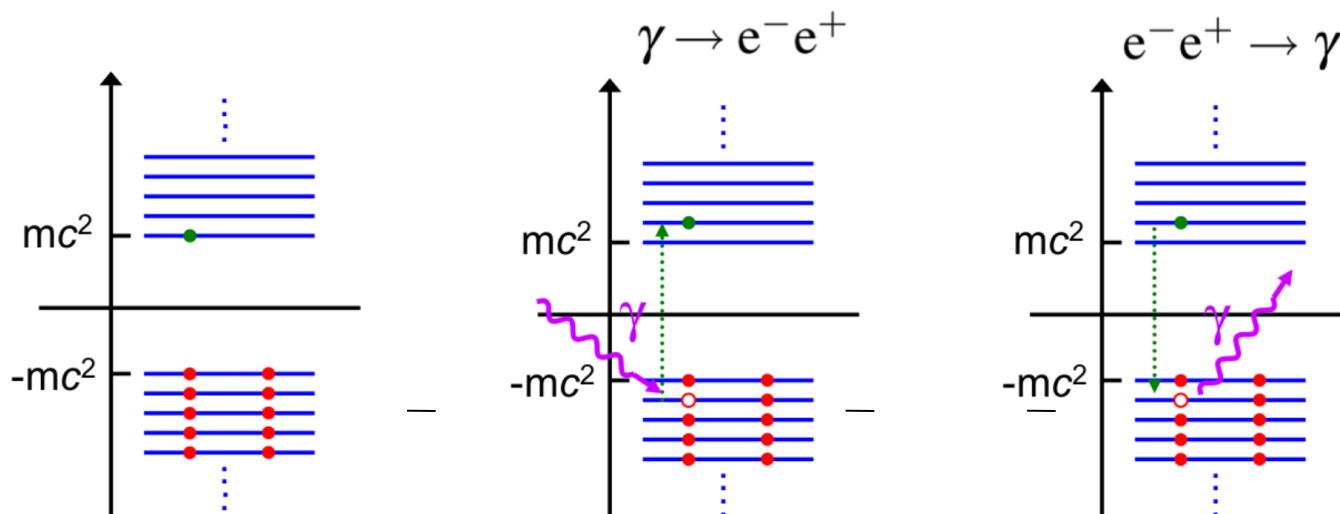
- Για κάθε λύση της εξίσωσης για ηλεκτρόνιο με $E > 0$ υπάρχει μια ακόμη λύση με $E < 0$
Ποιά είναι η φυσική ερμηνεία των λύσεων “αρνητικής ενέργειας”?

Θεώρηση Dirac για την Αρνητική Ενέργεια

οι καταστάσεις χαμηλότερης
ενεργειας είναι αρνητικές και τα e θα έπρεπε να καταλαμβάνουν κατά προτίμηση
αρνητικές ενέργειες !!!!

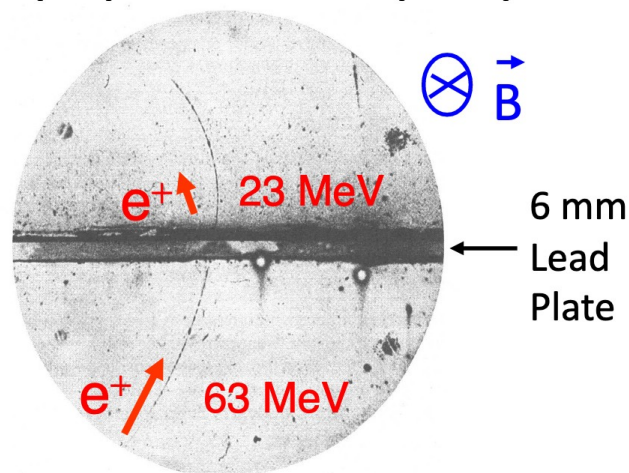
Η «εικόνα» Dirac : το κενό αντιστοιχεί σε καταστάσεις αρνητικής ενέργειας, οι
οποίες είναι πλήρως κατειλημμένες. Η απαγορευτική αρχή του Pauli απαγορεύει
στα ελεύθερα e να πέσουν σ' αυτές τις καταστάσεις. Οπές στις καταστάσεις αρνητικής
αντιστοιχούν σε αντι-σωμάτια, θετικής ενέργειας.

Η εικόνα αυτή περιγράφει τα φαινόμενα της εξαϋλωσης και της δίδυμη γένεσης.



Το ποζιτρόνιο (e^+) παρατηρήθηκε από τον Anderson το 1932 στην κοσμική ακτινοβολία σε πείραμα με θάλαμο φυσσαλίδων

★ Κοσμική ακτίνα σε θάλαμο νεφώσεων:

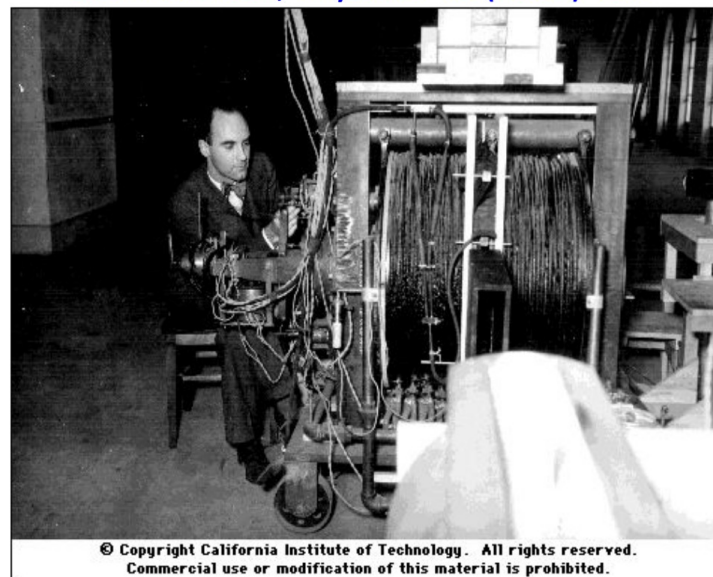


- e^+ εισέρχεται από κάτω, επιβραδύνεται στον μόλυβδο
- Η καμπύλωση στο B-πεδίο δείχνει πως είναι θετικό σωματίο
- Δεν θα μπορούσε να είναι πρωτόνιο, διότι θα είχε σταματήσει στον μόλυβδο

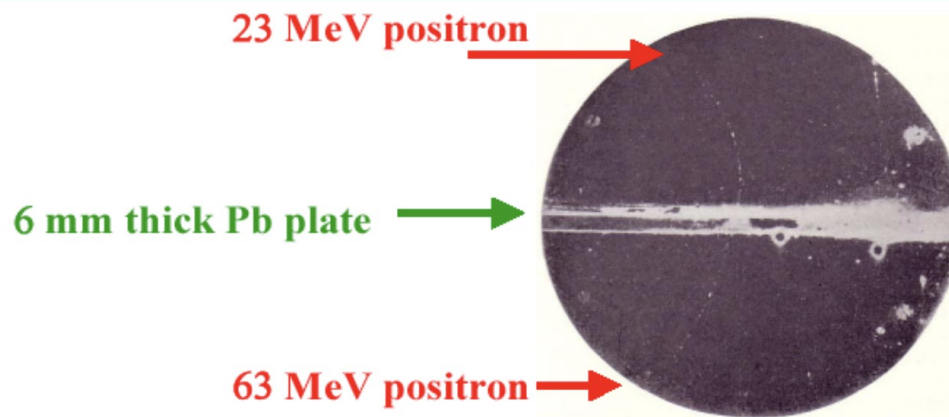
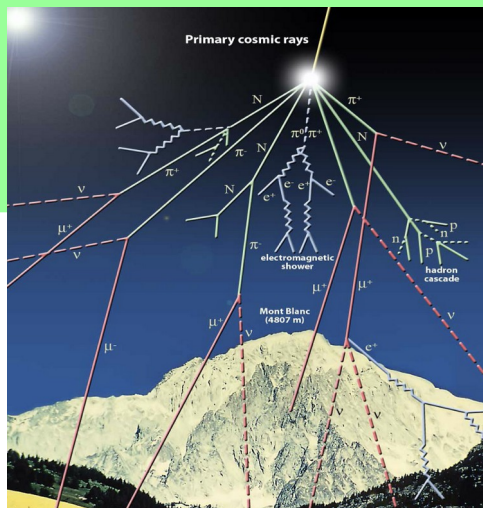


Προσέφερε την απόδειξη για τις λύσεις του Dirac

C.D.Anderson, Phys Rev 43 (1933) 491



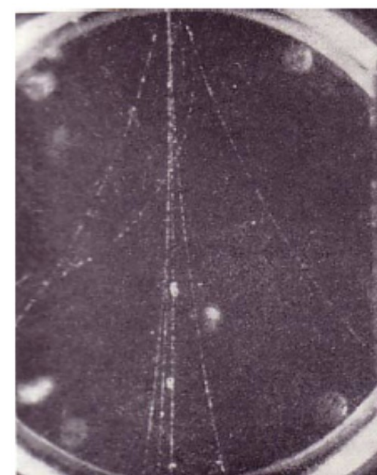
Παρατήρηση ποζιτρονίου (e^+) σε κοσμική ακτινοβολία



direction of
high-energy photon



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



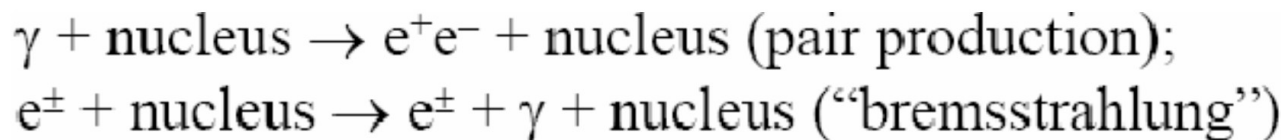
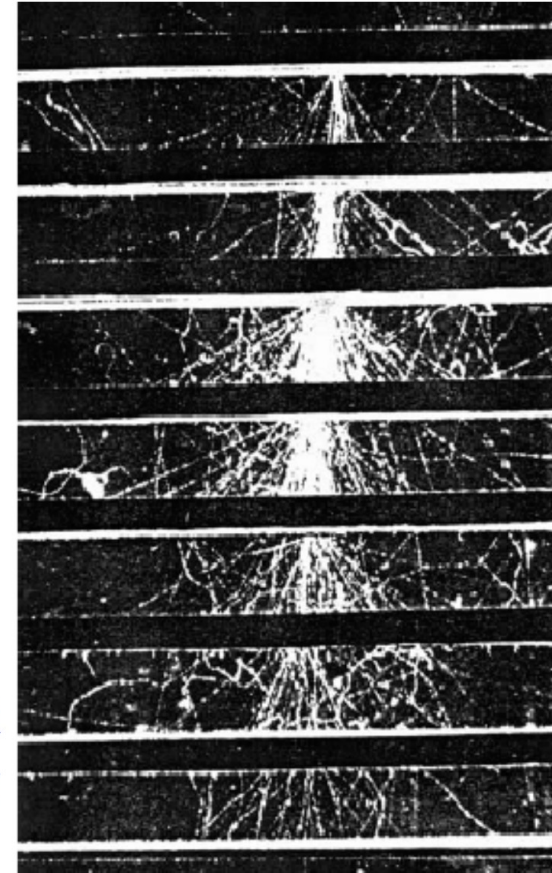
Cosmic-ray "shower"
containing several $e^+ e^-$ pairs

Παρατήρηση ηλεκτρομαγνητικών καταιγισμών σε κοσμική ακτινοβολία

Πειραματική παρατήρηση Ποζιτρονίων (αντιϋλης) στους ηλεκτρομαγνητικούς καταιγισμούς

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

- Εικόνα καταιγισμού σε θάλαμο φυσαλίδων



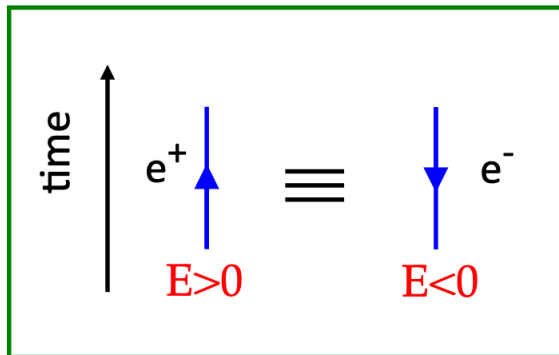
Σωματάρ αρνητικής ενέργειας – ερμηνεία Feynman-Stückelberg

Παρατήρηση
 e^+

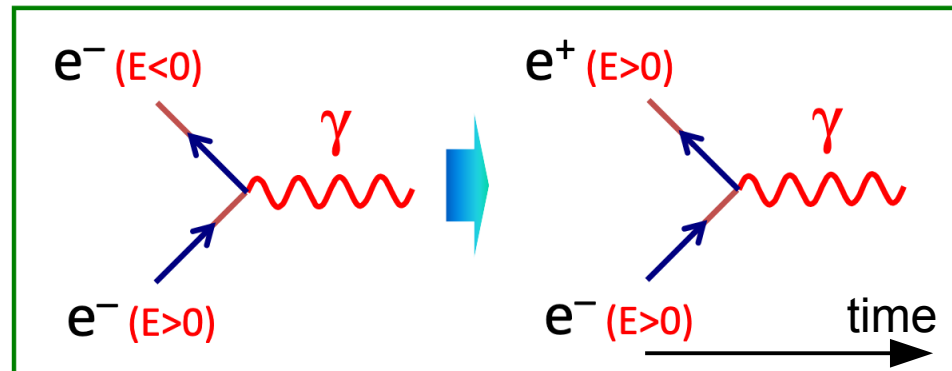
★ Απόδειξη της ύπαρξης αντισωματίων ! Αλλά η εικόνα του κενού με καταστάσεις αρνητικής ενέργειας, πλήρως κατειλημμένες, δεν είναι ικανοποιητική. **Τι συμβαίνει στην περίπτωση των μποζονίων που δεν δεσμεύονται από την απογορευτική αρχή;;;**

Η εικόνα Feynman-Stückelberg :

★ Οι λύσεις αρνητικής ενέργειας παριστούν **σωμάτιο αρνητικής ενέργειας** το οποίο κινείται **αντίστροφα στον χρόνο** ή αντίστοιχα παριστούν θετικής ενέργειας **αντισωματίο** το οποίο κινείται **θετικά στον χρόνο**



$$e^{-i(-E)(-t)} \rightarrow e^{-iEt}$$



Στα Feynman διαγράμματα, τα βέλη για τα αντι-σωμάτια δείχνουν προς τα αρνητικά του χρόνου (όπως αριστερά στην εικόνα) για να δηλώνουν $E < 0$.

★ Είναι πιο εύχρηστο να χρησιμοποιούμε κυματοσυναρτήσεις αντισωματιδίων με ενέργεια $E = \sqrt{|\vec{p}|^2 + m^2}$ σύμφωνα με την εικόνα Feynman-Stückelberg

Κβαντικοί αριθμοί σωματιδίων & αντισωματιδίων

Γενικευμένη Ιδιότητα φερμιονίων & μποζονίων:

Σε κάθε σωματίο αντιστοιχεί ένα αντισωματίο, το οποίο έχει:

- **ίδια μάζα** με το σωματίο,
- **ίδιο σπιν** με το σωματίο,
- **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.

3.
Σύνθετα σωματία:
Αδρόνια
(=Μεσόνια και Βαρυόνια)

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. $\pi^+=u\bar{d}$, $D^-=c\bar{d}$, $\pi^0 = \frac{1}{\sqrt{2}}(u\bar{u} - d\bar{d})$ και $\bar{d}\bar{u}$
 - Έχουν Βαρυονικό αριθμό $B=0$

Αδρόνια = σύνθετα από κουάρκ: δύο τύποι
→ βαρυόνια και μεσόνια

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

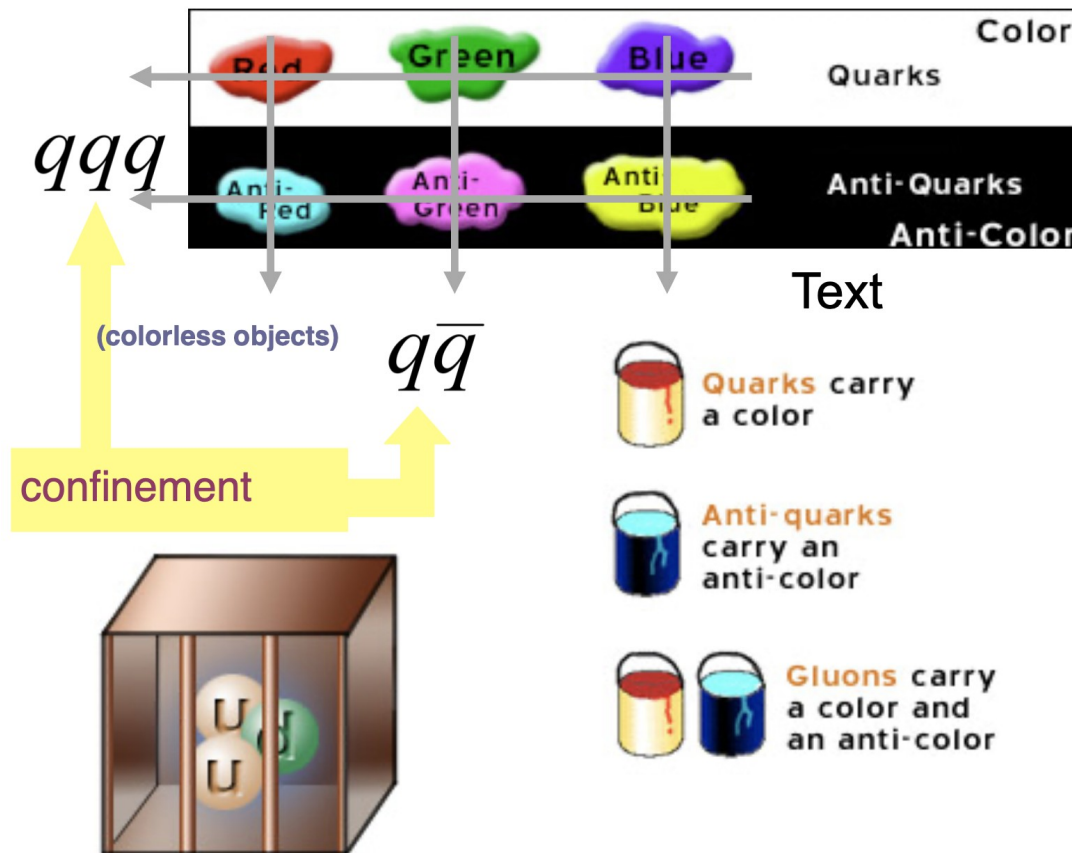
K^0 καόνιο $= (s \ \bar{d})$

J/Ψ-μεσόνιο $= (c \ \bar{c})$

Αδρόνια = σύνθετα από κουάρκ: γιατί είτε 3 κουάρκ, είτε 3 αντικουάρκ, είτε ένα κι ένα (1 κουαρκ κι 1 αντικουάρκ);

“Χρώμα” : ένας νέος κβαντικός αριθμός με τρεις τιμές
 (“red, green, blue” = “κόκκινο, πράσινο, μπλέ”)

Η ιδιότητα του Χρώματος



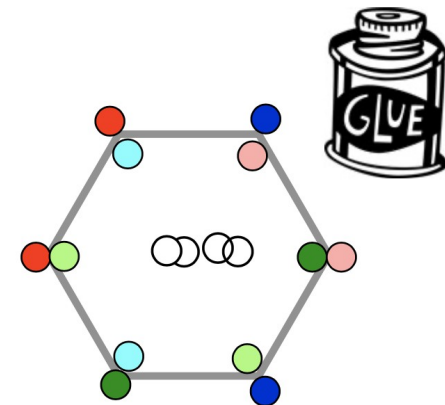
Quarks carry a color



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.

Μερικά 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

Μερικά 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

Βαρυονικός αριθμός: διατηρείται σε όλες τις αλληλεπιδράσεις

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

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

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

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

Λεπτόνια

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

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 $B=1$. **Ο Βαρυονικός διατηρείται πάντα**
 - π.χ διάσπαση νετρονίου σε πρωτόνιο με εκπομπή ηλεκτρονίου και αντισειτρίνιο του ηλεκτρονίου

Μεσόνια

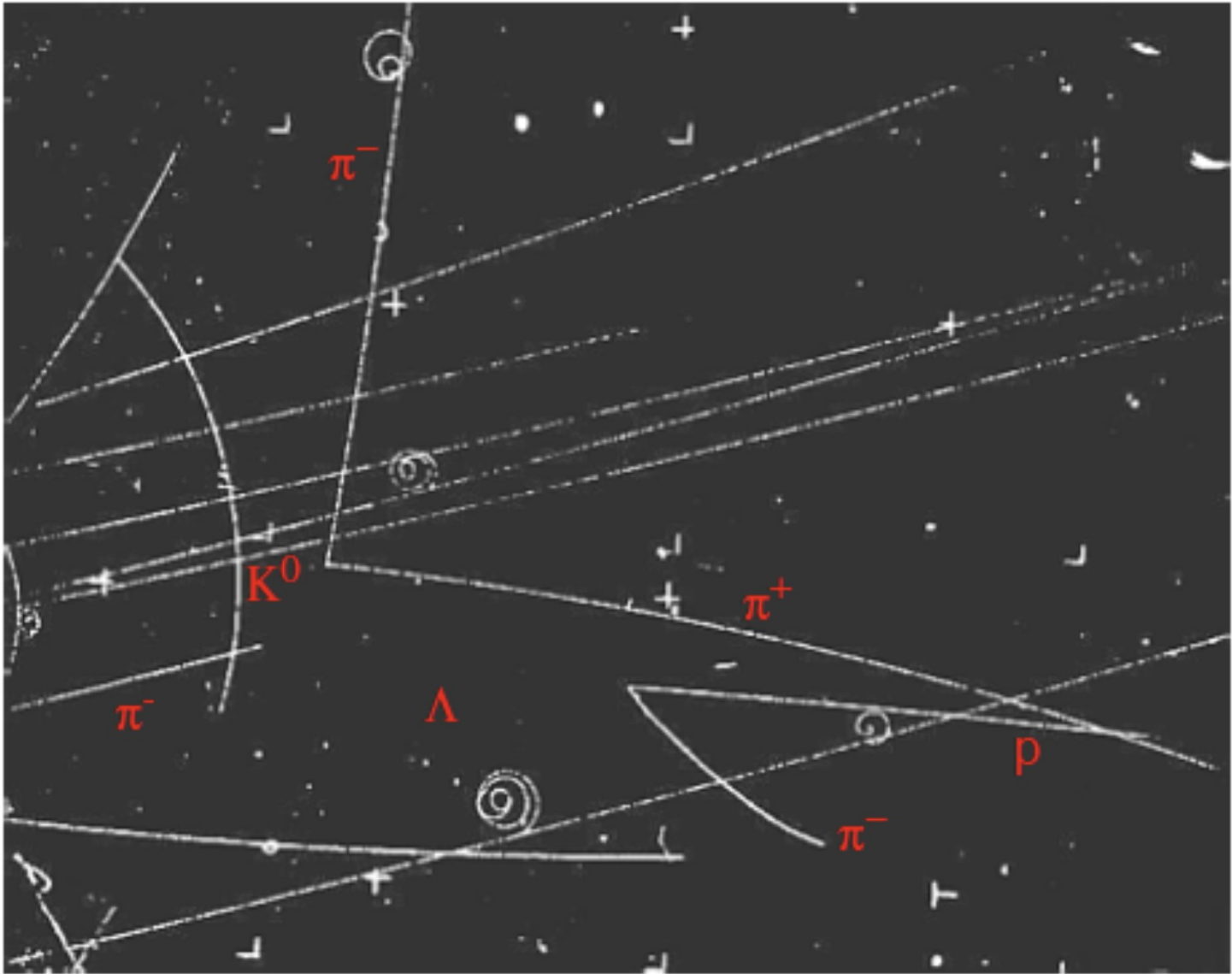
- **Ασταθή** => δεν υπάρχουν στην 'κανονική' ύλη
- Στην ανακάλυψή τους οφείλεται η γένεση της Σωματιδιακής Φυσικής
- π-μεσόνιο και το καόνιο παρατηρήθηκαν στην κοσμική ακτινοβολία το 1947!
- Παράδειγμα της ανακάλυψης του φορτισμένου πιονίου: $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \rightarrow e^+$

Το πιόνιο (π) : το πρώτο μεσόνιο που ανακαλύφθηκε

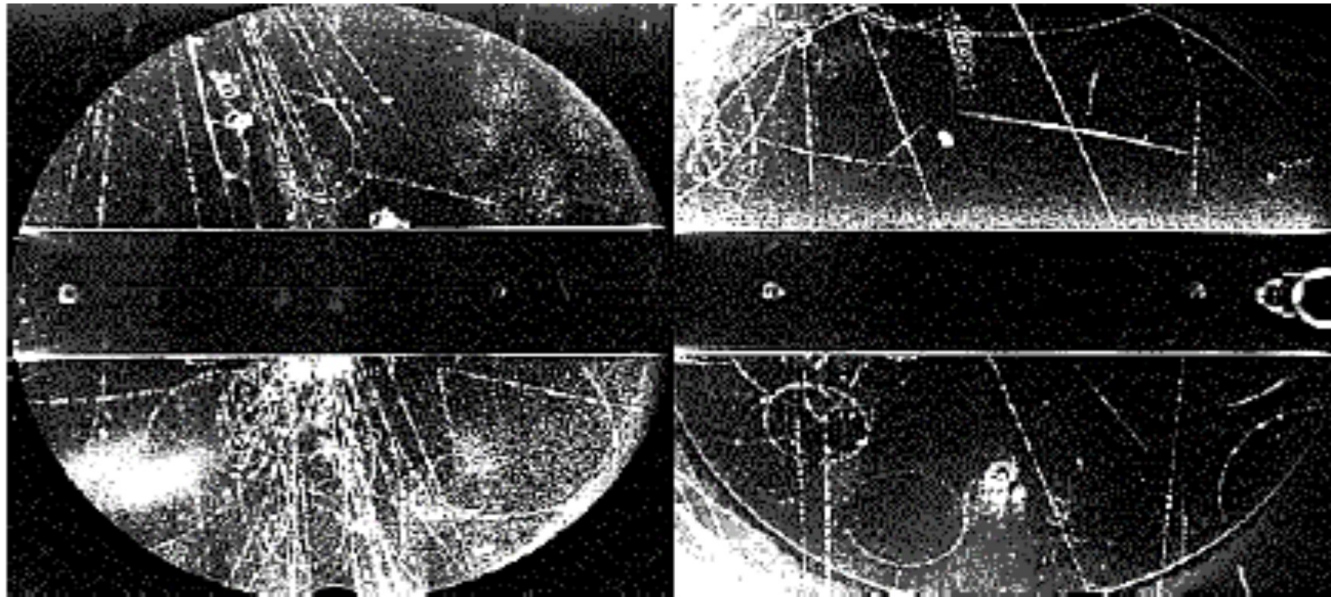
- 1947: Ανακάλυψη του π -μεσονίου (το 'πραγματικό' σωματίδιο Yukawa)
- Παρατήρηση της αλυσιδωτής διάσπασης του :
 $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \rightarrow e^+$
σε γαλακτώματα εκτεθειμένα στην κοσμική ακτινοβολία



“Παράξενα” σωματίδια (εδώ: K , Λ που έχουν μεγάλο χρόνο ζωής)



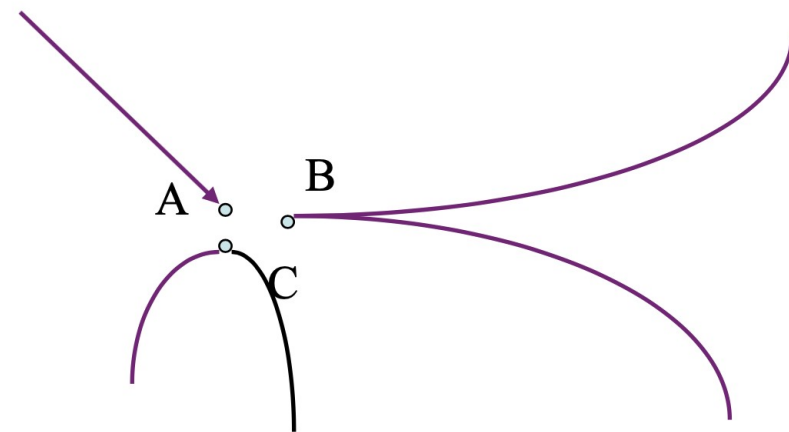
“Παράξενα” σωματίδια (εδώ: K , Λ που έχουν μεγάλο χρόνο ζωής)



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

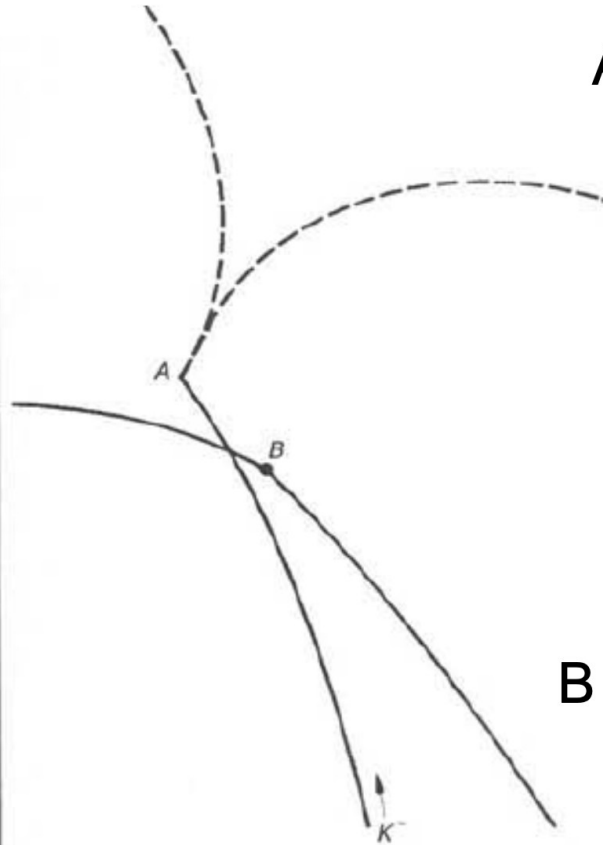
$$K^0 \rightarrow \pi^- + \pi^+$$

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



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

“Παράξενα” σωματίδια (εδώ: K , Λ που έχουν μεγάλο χρόνο ζωής)



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

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

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

Υπενθύμιση κβαντικών αριθμών των κουάρκ

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

Παραγωγή “παράξενων” σωματιδίων σε συγκρούσεις $\pi + p$

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:

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

Η παραξενιά διατηρείται !

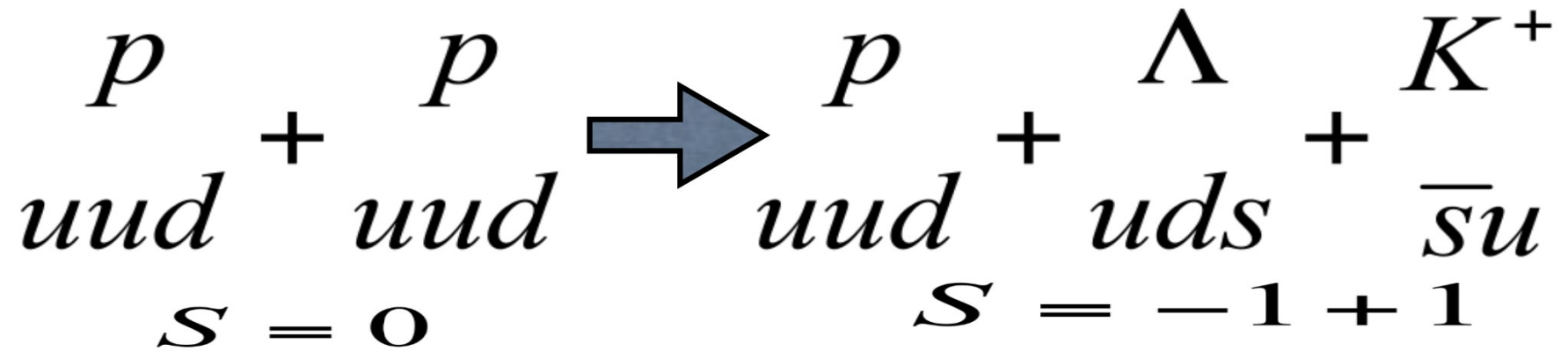
Όταν γράφουμε τις αντιδράσεις με τα συστατικά κουάρκ, βλέπουμε τα εξής:

Διατήρηση του συνολικού αριθμού των κουάρκ

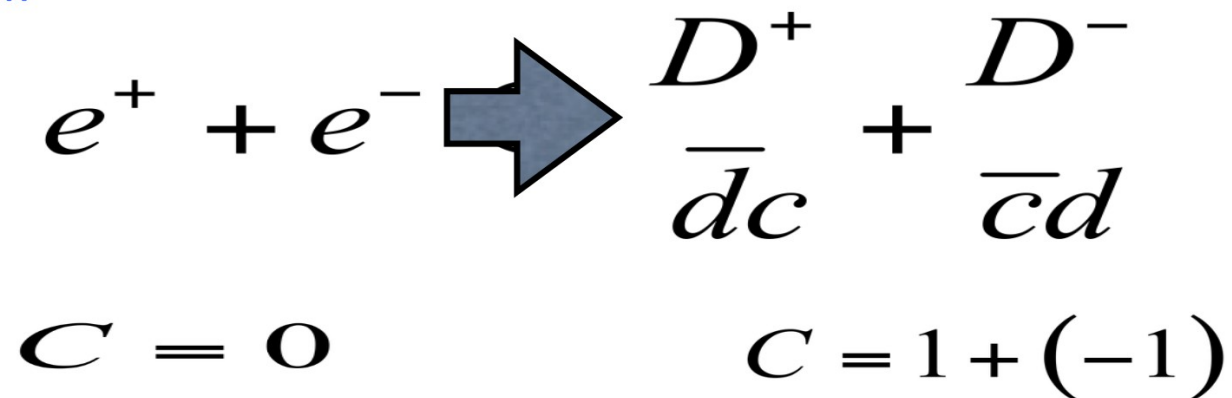
- Ο συνολικός αριθμός των κουάρκ **ΔΙΑΤΗΡΕΙΤΑΙ** σε όλες τις αλληλεπιδράσεις : Ισχυρές, ηλεκτρομαγνητικές, ασθενείς
- Ο αριθμός των κουάρκ συγκεκριμένης γεύσης διατηρείται **ΜΟΝΟ** στις ισχυρές και στις ηλεκτρομαγνητικές αλληλεπιδράσεις
- Στις ασθενείς αλληλεπιδράσεις η γεύση των κουάρκ μπορεί να μεταβάλλεται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

Παράδειγμα διατήρησης αριθμού κουάρκ. Στις ισχυρές (& στις ηλεκτρομαγνητικές) διατηρείται και κάθε γεύση χωριστά.

Παραγωγή παράδοξων σωματιδίων (ισχυρές)



Παραγωγή charm



4. Λεπτόνια

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?

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^- , μίονιο μ^- και ταυ τ^- έχουν τα αντίστοιχα νετρίνα ν_e, ν_μ και ν_τ .

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

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

Λεπτόνια

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

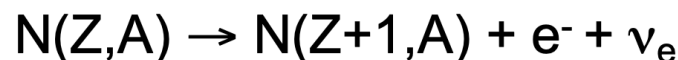
$$\begin{pmatrix} e^+ \\ \bar{\nu}_e \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} \mu^+ \\ \bar{\nu}_\mu \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} \tau^+ \\ \bar{\nu}_\tau \end{pmatrix}$$

- ❖ 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 $L_\alpha=-1$.

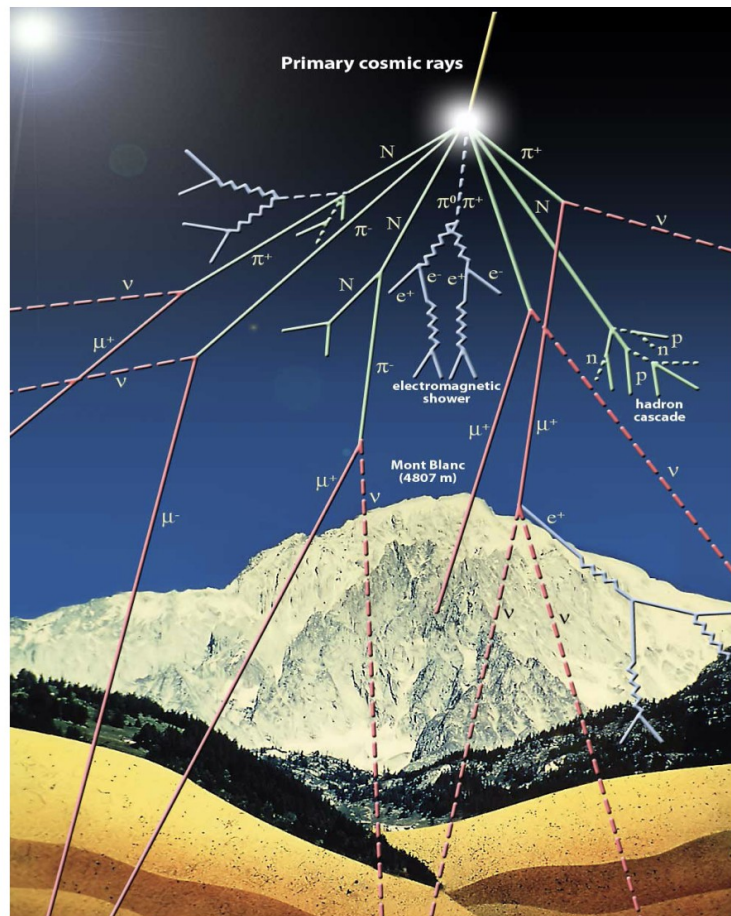
- ❖ *Οι λεπτονικοί αριθμοί διατηρούνται σε όλες τις αλληλεπιδράσεις!*

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:



Λεπτόνια



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

Οι κοσμικές ακτίνες έχουν δύο “συστατικά”:

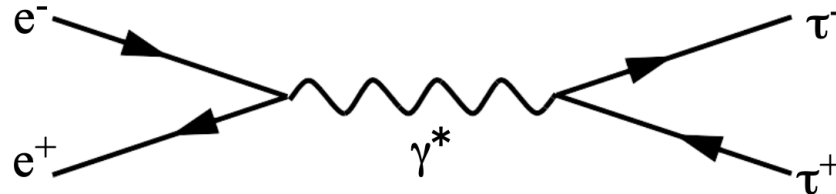
- 1) **Πρωταρχικές**, οι οποίες είναι σωμάτια υψηλών ενεργειών που έρχονται από το εξωτερικό διάστημα, κυρίως πυρήνες υδρογόνου
- 2) **Δευτερογενείς**, τα σωμάτια που παράγονται από τις συγκρούσεις των πρωταρχικών με τους πυρήνες στην ατμόσφαιρα. Τα μίονια ανήκουν σ’ αυτή την κατηγορία.

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:

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

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

Λεπτόνια ταυ (τ)

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

Νετρίνα: τα ουδέτερα λεπτόνια

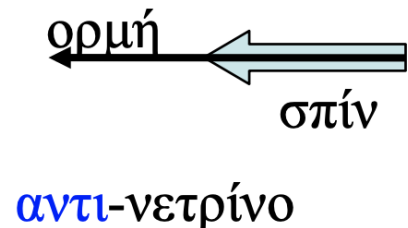
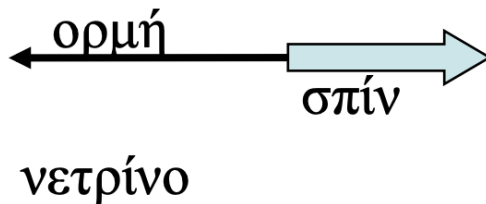
Δεν έχουν φορτίο => Δεν έχουν ηλεκτρομαγνητικές αλληλεπιδράσεις

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**



Οι κβαντικοί αριθμοί των Λεπτονίων

Τα 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**

5.

Περισσότερα παραδείγματα διασπάσεων, αντιδράσεων και εφαρμογή των νόμων διατήρησης

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)

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 διατηρείται 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:

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

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

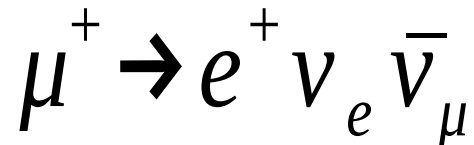
Νέοι κβαντικοί αριθμοί και νόμοι διατήρησης : Λεπτονικοί αριθμοί (2)

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:

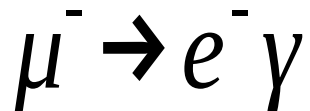


Κβαντικός αριθμός	Θετικό μιονίο (=“αντι-μιονίο”)	→	Ποζιτρόνιο (=“αντιηλεκτρόνιο”)	Νετρίνο του ηλεκτρονίου	Αντινετρίνιο του μιονίου
Q	+1	=	+1	0	0
Le	0	=	-1	1	0
Lμ	-1	=	0	0	-1
Lτ	0	=	0	0	0

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.

$$\bar{p} = \bar{u}\bar{u}\bar{d} \quad \bar{n} = \bar{u}\bar{d}\bar{d}$$

- 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), πίο 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	Strangeness	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

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

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

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

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

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

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

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

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)

Σύνοψη νόμων διατήρησης κβαντικών αριθμών στοιχειωδών σωματιδίων

- **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)
- * Το άθροισμα κάθε είδους λεπτονίων ξεχωριστά διατηρείται σε όλες τις αλληλεπιδράσεις.
— Το ίδιο ισχύει και για το άθροισμα των κουάρκ πριν και μετά.
- ** Το άθροισμα κάθε είδους κουάρκ ξεχωριστά, διατηρείται μόνο στις ισχυρές και ηλεκτρομαγνητικές
— Μόνο οι ασθενείς είναι ικανές να δημιουργούν καθαρή διαφορά σε κάποιο είδος κουάρκ (π.χ. $\Delta S = 1$).

Επίσης, crossing symmetry

* Αν επιτρέπεται η

$$A + B \rightarrow C + D$$

Τότε επιτρέπονται (κατ' αρχάς*) και οι εξείς:

$$A \rightarrow \bar{B} + C + D$$

$$A + \bar{C} \rightarrow \bar{B} + D$$

$$\bar{C} + \bar{D} \rightarrow \bar{A} + \bar{B}$$

*Αρκεί να φτάνει η ενέργεια

Π.χ.,

η διαδικασία σκέδασης Compton:

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

είναι κατά βάση ίδια αλληλεπίδραση με τη δίδυμη γέννηση: $e^- + e^+ \rightarrow \gamma + \gamma$

6.

Ακόμα κι αν (έχοντας ελέγξει φορτίο,
ενέργεια, λεπτονικούς και
βαρυονικούς αριθμούς)
επιτρέπεται μια αντίδραση,
μπορεί,
ελέγχοντας τη διατήρηση της
στροφορμής, να δούμε ότι δεν
επιτρέπεται λόγω της απαγορευτικής
αρχής του Pauli...

Ομοτιμία (Parity)

Ο τρόπος που συμπεριφέρεται η κυματοσυνάρτηση ενός συστήματος (ένα ή περισσότερα σωματίδια) σε αναστροφή του χώρου (που είναι το αποτέλεσμα της εφαρμογής του τελεστή της ομοτιμίας/parity, P , πάνω της) μπορεί να ορίσει κι άλλον έναν κβαντικό αριθμό: την **ομοτιμία ή parity**

Αν η δράση της πάριτυ κάνει την κυματοσυνάρτηση $+1$ ή -1 φορές ό,τι ήταν, λέμε ότι η κυματοσυνάρτηση έχει “καθορισμένη πάριτυ”:

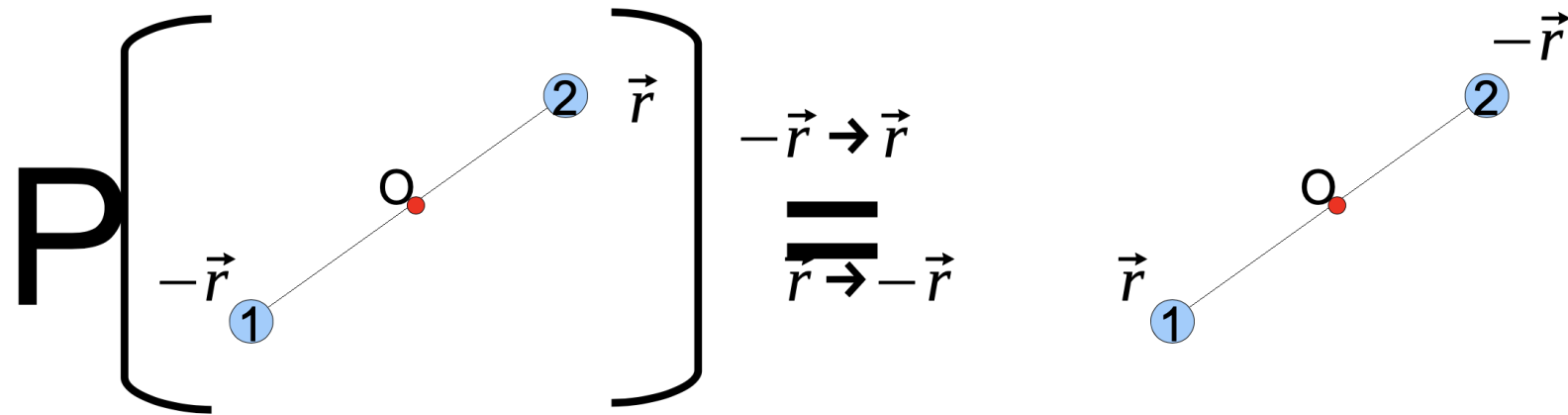
$$P(\vec{r}) = -\vec{r} \left\{ \begin{array}{l} P(\psi(\vec{r})) = \psi(-\vec{r}) = \psi(\vec{r}) : \text{άρτια συνάρτηση} \rightarrow \text{Parity} = +1 \\ P(\psi(\vec{r})) = \psi(-\vec{r}) = -\psi(\vec{r}) : \text{περιττή συνάρτηση} \rightarrow \text{Parity} = -1 \end{array} \right.$$

Για κεντρικά δυναμικά, **το κομμάτι της κυματοσυνάρτησης που περιγράφει το χώρο ($\psi_{\text{χώρου}}$) γράφεται** $\psi(\vec{r}) = R(r) Y(\theta, \varphi)$

Αφού η $R(r)$ δεν αλλάζει, η τιμή της πάριτυ της $\psi_{\text{χώρου}}$ βρίσκεται από τη συμπεριφορά των “σφαιρικών αρμονικών” συναρτήσεων Y_{lm} :

$$\vec{r} \rightarrow -\vec{r} : P(Y(\theta, \varphi)) = Y(\pi - \theta, \pi + \varphi) = (-1)^l Y(\theta, \varphi), \text{ οπότε: } \text{Parity} = (-1)^l$$

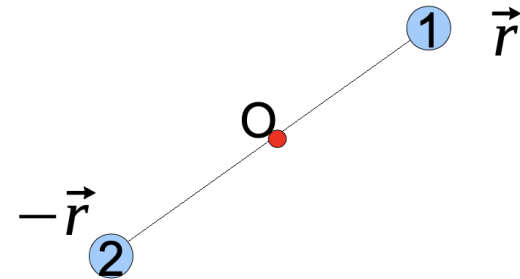
Parity: για την κυματοσυνάρτηση δύο ταυτόσημων σωματιδίων, η αναστροφή του χώρου είναι ίδια με την ανταλλαγή τους



Με την εφαρμογή της πάριτυ πάνω στην αριστερή κατάσταση

(το #1 στη θέση $-\vec{r}$, και το #2 στη θέση $\vec{r}$)
έχουμε το #1 στη θέση $\vec{r}$, και το #2 στη θέση $-\vec{r}$:

→ ακριβώς το ίδιο αποτέλεσμα έχουμε και με την ανταλλαγή των σωματιδίων #1 και #2



Η ομοτιμία εκδηλώνεται με κάποιον τρόπο, η
είναι κάτι εντελώς “εσωτερικό”;

Αν ένα σύστημα έχει καθορισμένη ομοτιμία
(parity), αυτή είναι είτε +1 είτε -1, οπότε το
 $|\psi|^2$ μένει αμετάβλητο στη δράση της
ομοτιμίας (δηλ. της αντιστροφής του χώρου) ,
οπότε η πιθανότητα ανά μονάδα όγκου μένει
αμετάβλητη.

Ερώτηση:
επηρεάζει η ομοτιμία κάτι
μετρήσιμο/παρατηρήσιμο;

→ Βεβαίως και ναι.

Parity: η αναστροφή του χώρου και η γενικευμένη Αρχή του Pauli

Η απαγορευτική αρχή του Pauli

και η μη διακρισιμότητα των ταυτόσημων σωματιδίων στην Κβαντομηχανική

Στην «ρίζα» της γενικευμένης αρχής του Pauli βρίσκεται το θεμελιώδες γεγονός ότι στην Κβαντομηχανική τα ταυτόσημα σωματίδια που ανήκουν στο ίδιο φυσικό σύστημα (π.χ. ένα άτομο) είναι μη διακρίσιμα διότι περιγράφονται από αλληλοεπικαλυπτόμενες κυματοσυναρτήσεις, κι επομένως είναι αδύνατον να πούμε ποιο είναι το #1 ποιο είναι το #2 κ.ο.κ. Αυτή η αδυναμία διάκρισης διασφαλίζεται κβαντομηχανικά μόνο με κύματοσυναρτήσεις $\psi(x_1, x_2)$ που είναι συμμετρικές [$\psi(x_2, x_1) = \psi(x_1, x_2)$] ή αντισυμμετρικές [$\psi(x_2, x_1) = -\psi(x_1, x_2)$] κι επομένως οδηγούν σε πιθανότητα $|\psi(x_1, x_2)|^2$ που είναι συμμετρική στην εναλλαγή $x_1 \leftrightarrow x_2$ κι άρα δεν επιτρέπει τη διάκριση των δύο σωματιδίων.

ΜΕΛΕΤΗ: Σ. Τραχανά, Κβαντομηχανική I, σελ. 468 – 480.

Όλα τα σωματίδια με ακέραιο σπιν ($s=0, 1, 2, \dots$) - τα αποκαλούμενα **μποζόνια** - περιγράφονται από **συμμετρικές κυματοσυναρτήσεις** (**Parity = +1**), ενώ

όλα τα σωματίδια με ημι-ακέραιο σπιν ($s=1/2, 3/2, \dots$) - τα αποκαλούμενα **φερμιόνια** - περιγράφονται από **αντισυμμετρικές κυματοσυναρτήσεις** (**Parity = -1**)

(είδαμε σε παλαιότερο μάθημα, πώς αυτή η αρχή δεν αφήνει ταυτόσημα φερμιόνια με σπίν=1/2 να έχουν όλους τους κβαντικούς αριθμούς ίδιους → εξήγηση της κατανομής των ηλεκτρονίων των ατόμων και των νουκλεονίων των πυρήνων σε διάφορες “στάθμες”)

Parity και η Αρχή του Pauli : ο κόσμος των μποζονίων και των φερμιονίων

Το σπιν και η γενικευμένη αρχή του Pauli

Φερμιόνια και Μποζόνια:

Οι δύο θεμελιώδεις κατηγορίες σωματιδίων και ο ρόλος τους στη φύση

	Σπιν	Είδος συμπεριφοράς	Ποια είναι ποια	...και γιατί
 Φερμιόνια	Ημιακέραιο $s = \frac{1}{2}, \frac{3}{2}, \dots$	« Ατομικιστική » Υπόκειται στην αρχή του Pauli (είναι αδύνατη η συνύπαρξη τους στην ίδια κβαντική κατάσταση). Περιγράφονται από <u>αντισυμμετρικές κυμ/σεις</u> .	Όλα τα σωματίδια <u>δομικοί λίθοι</u> της ύλης. (e, p, n, ν κουάρκς). Όλα έχουν $s = \frac{1}{2}$	Διαφορετικά θα ήταν δυνατή η απεριόριστη συσσώρευσή τους στην ίδια περιοχή του χώρου υπό την επίδραση των αμοιβαίων έλξεων, με αποτέλεσμα την πλήρη κατάρρευση της ύλης σε μια «σταγόνα» άπειρης πυκνότητας.
 Μποζόνια	Ακέραιο $s = 0, 1, 2, \dots$	« Κολλεκτιβιστική » Δεν υπόκειται στην αρχή του Pauli (Είναι δυνατή η απεριόριστη συνύπαρξη τους στην ίδια κβαντική κατάσταση) περιγράφονται από <u>συμμετρικές κυμ/σεις</u> .	Όλα τα σωματίδια <u>φορείς δυνάμεων</u> της φύσης (γ , $w^\pm$, z, γλοιόνια, βαρυτόνιο). Όλα έχουν $s = 1$ πλήν του βαρυτονίου που (εικάζεται ότι) έχει $s = 2$.	Έτσι είναι δυνατή η απεριόριστη συνύπαρξη τους στην ίδια κβαντική κατάσταση και η δημιουργία μ' αυτό τον τρόπο ενός μακροσκοπικού πεδίου δυνάμεων (ΗΜ πεδίο, πεδίο βαρύτητας, πυρηνικά πεδία).

Εφαρμογή της ιδιότητας της **συμμετρίας** της κυματοσυνάρτησης **δύο ταυτόσημων** **μποζονίων**

Η κυματοσυνάρτηση
έχει δύο μέρη:

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

→ $\Psi(1,2) = \Psi(2,1)$ ολική
κυματοσυνάρτηση συμμετρική

• Παράδειγμα : η διάσπαση του μεσονίου $\rho^0 \rightarrow 2\pi^0$

$$\rho^0 : \text{σπιν} = 1, l=0 \Rightarrow J=1$$

$$\pi^0 : \text{σπιν} = 0, l=0 \Rightarrow J=0 \Rightarrow \text{ταυτόσημα μποζόνια}$$

$$J \text{ διατηρείται} \Rightarrow l_{\text{σχετ}} [(\pi^0_1) + (\pi^0_2)] = 1 = J(\rho^0) = 1$$

Το σπιν των π^0 είναι μηδέν, οπότε:

$$\text{Η } \Psi_{\beta(\text{σπιν})}(1,2) \text{ συμμετρική} \Rightarrow \Psi_{\alpha(\text{χώρου})}(1,2) \text{ πρέπει να}$$

είναι **συμμετρική** $\Rightarrow l$ **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** σωματΙΑ
επιτρέπεται

7.

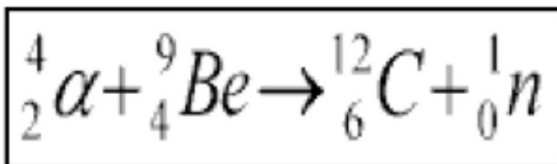
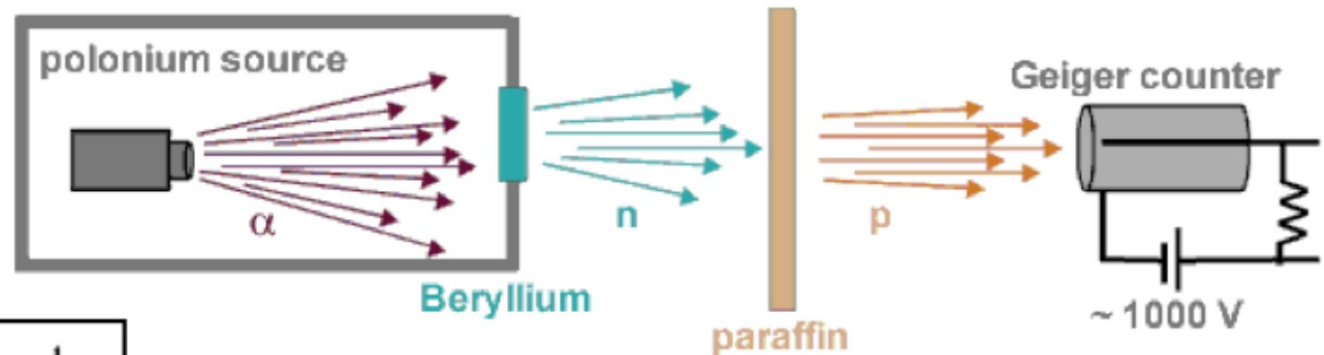
(Πολύ) Σύντομη ιστορική αναδρομή

Πολύ ωραία ιστορική αναδρομή
στο κεφ. 1 του βιβλίου

” Introduction to Elementary Particles” , David
Griffiths, published 2008 Willey-VCH

Άτομο, πυρήνας, πρωτόνια και νετρόνια

- **1911 – Rutherford (Geiger & Marsden)**
 - ♦ Σκέδαση σωματιδίων α
 - Σημειακή μάζα πυρήνα με σημειακό φορτίο
- **1919 – Rutherford**
 - ♦ Πρώτη πυρηνική αντίδραση ($14\text{N} + \alpha \rightarrow 17\text{O} + \text{p}$)
 - Ανακάλυψη του πρωτονίου
- **1920 – Rutherford**
 - ♦ Υπόθεση ύπαρξης ουδετέρου σωματιδίου στον πυρήνα
- **1932 – Chadwick**
 - ♦ Ανακάλυψη του νετρονίου από τη σκέδαση σωματιδίων α σε Be



Αντισωματία, νέα σωματία, δομή πρωτονίων

- **1933 – Anderson**
 - ◆ Ανακάλυψη του ποζιτρονίου (αντιύλης)
- **1937 – Street & Stevenson**
 - ◆ Ανακάλυψη του μιονίου («βαρύ ηλεκτρόνιο»!)
- **1938 – Hahn, Strassmann & Meitner, 1942 – Fermi**
 - ◆ Ανακάλυψη της πυρηνικής σχάσης
 - ◆ Ελεγχόμενη Σχάση, πρώτος πυρηνικός αντιδραστήρας
- **1947 – Powell et al.**
 - ◆ Ανακάλυψη του πιονίου (ακολουθούν: καόνιο, Λ , ρ , η , K^* , ...!)
- **1956 – Raines & Cowan**
 - ◆ Ανακάλυψη νετρίνου
- **1969 – Kendall-Friedman-Taylor**
 - ◆ Ανακάλυψη δομής πρωτονίων (των κουάρκ)

Συμπλήρωση γενιών κουάρκ και λεπτονίων, Φορείς δυνάμεων

- **1974 – Ting & Richter**
 - ◆ Ανακάλυψη c quark (November revolution)
- **1976 – Perl**
 - ◆ Ανακάλυψη λεπτονίου τ (τρίτη γενιά ύλης!)
- **1977 – Lederman**
 - ◆ Ανακάλυψη b-quark
- **1983-84 – Rubbia (πείραμα UA1)**
 - ◆ Ανακάλυψη μποζονίων W&Z (ηλεκτρασθενής αλληλεπίδραση)
- **1995 – CDF/D0 (FermiLab)**
 - ◆ Ανακάλυψη του t quark (Περιοδικός πίνακας Καθιερωμένου Προτύπου)
- * **1999 – LEP experiments (CERN)** : Τρία τα είδη νετρίνων
- * **2012 – ATLAS/CMS (CERN)** : Ανακάλυψη μποζονίου Higgs