

Εισαγωγή στη Φυσική Στοιχειωδών Σωματιδίων

Δήμος Σαμψωνίδης
(21-12-2019)

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 $\left(\frac{1}{2}\hbar, \frac{3}{2}\hbar, \frac{5}{2}\hbar \dots\right)$
- Ακολουθούν στατιστική Fermi-Dirac

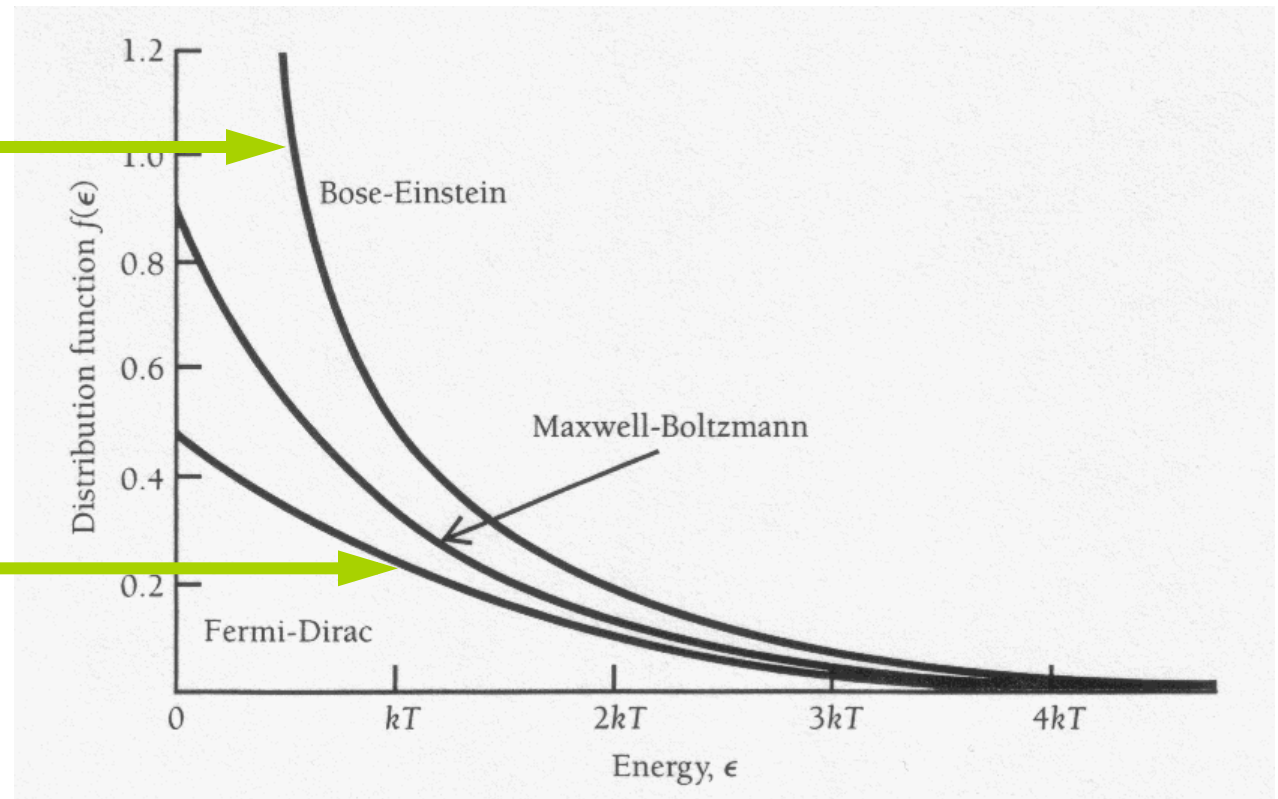
Μποζόνια

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

Fermi-Dirac , Bose-Einstein

Στα μποζόνια “αρέσει”
να είναι στην ίδια
ενεργειακή στάθμη
και άρα μπορεί να τα
βρείτε πολλά μαζί

Στα φερμιόνια δεν
“αρέσει” να είναι στην
ίδια ενεργειακή
στάθμη και άρα η
πιθανότητα είναι
ελάχιστη να τα βρείτε
πολλά μαζί



Φερμιόνια

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 $1 \longleftrightarrow 2$

Ισχύει ο κανόνας:

- $\Psi(1,2) = + \Psi(2,1)$: **συμμετρική** αν **εναλλάξουμε** τα δύο **ταυτόσημα μποζόνια** στο χώρο
- $\Psi(1,2) = - \Psi(2,1)$: **αντισυμμετρική** αν **εναλλάξουμε** τα δύο **ταυτόσημα φερμιόνια** 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:

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

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

Αν έχουμε σωματία (1) & (2):

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

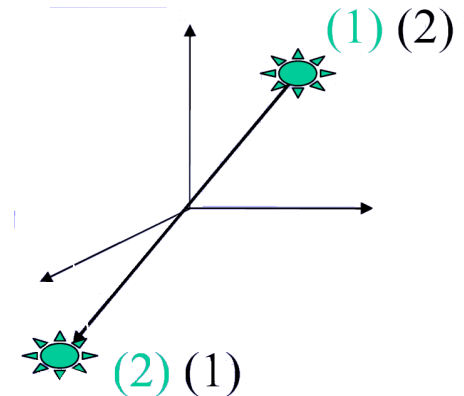
όταν $1 \leftrightarrow 2$: $\theta \rightarrow \pi - \theta$

$\phi \rightarrow \pi + \phi$

$$H Y^m_l(\theta, \phi)(1, 2) \rightarrow Y^m_l(\theta, \phi)(2, 1) \equiv Y^m_l(\pi - \theta, \pi + \phi)(1, 2) = (-1)^l Y^m_l(\theta, \phi)(1, 2) \text{ (ισοδυναμεί με αντιστροφή του χώρου)}$$

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

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



Φερμιόνια, Μποζόνια

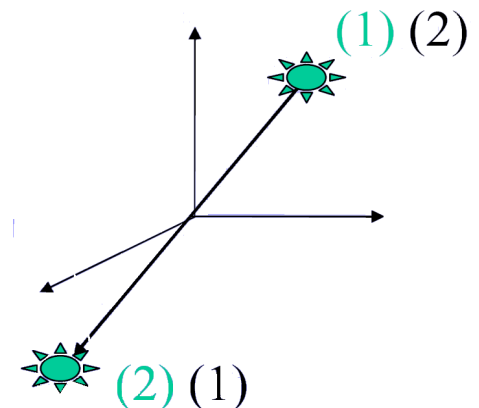
Η κυματοσυνάρτηση του **χώρου** δύο ταυτόσημων σωματίων

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

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

- Η $\Psi_\alpha(r)(1,2) = \Psi_\alpha(r)(2,1)$ (Συμμετρική)
- Η $Y_{m_l}(\theta, \varphi)(2,1) = Y_{m_l}(\pi-\theta, \pi+\varphi)(1,2) = (-1)^l Y_{m_l}(\theta, \varphi)(1,2)$

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

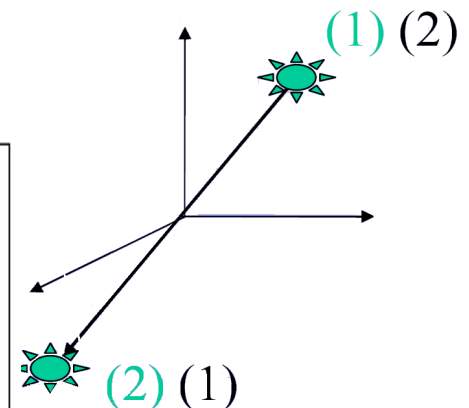
$l = \text{άρτιο} \rightarrow \text{ομοπαράλληλα}$

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

Φερμιόνια

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

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



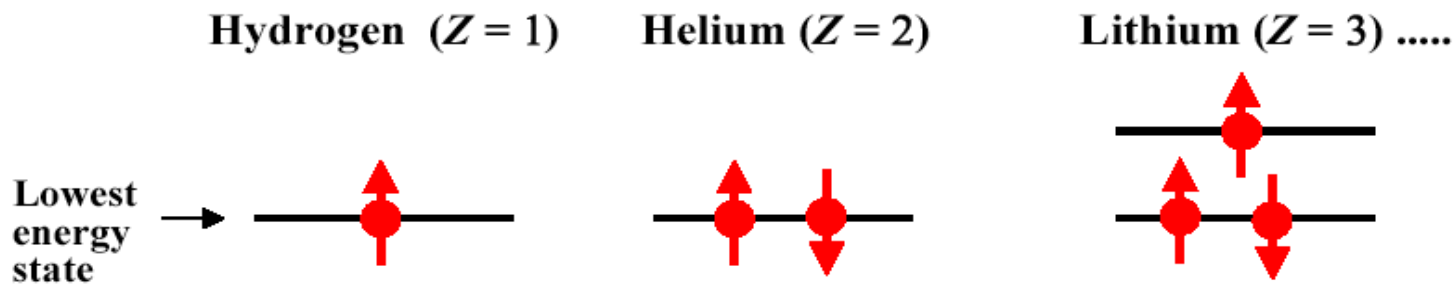
Εφαρμογή της ιδιότητας της συμμετρίας της κυματοσυνάρτησης δύο ταυτόσημων μποζονίων

- Παράδειγμα : η διάσπαση του μεσονίου $\rho^0 \rightarrow 2\pi^0$
- ρ^0 : σπιν = 1, $l=0 \Rightarrow J=1$
- π^0 : σπιν = 0, $l=0 \Rightarrow J=0 \Rightarrow$ **ταυτόσημα μποζόνια**
- J διατηρείται $\Rightarrow I_{\text{σχετ}} [(\pi^0_1) + (\pi^0_2)] = 1 = J(\rho^0) = 1$
- 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** σωμάτια
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

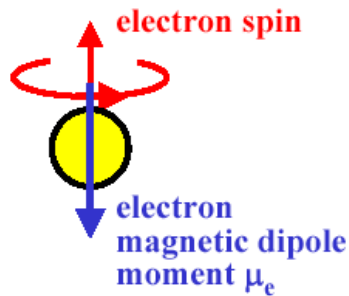
- Η ύπαρξη των αντισωματίων προτάθηκε από τον P.A.M. Dirac (1928)
- Η εξίσωση Dirac: Σχετικιστική Κυματική εξίσωση για το ηλεκτρόνιο που συμπεριλάμβανε και το σπιν
- Η λύση της: κυματοσυνάρτηση με 4-συνιστώσες (Dirac field)



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

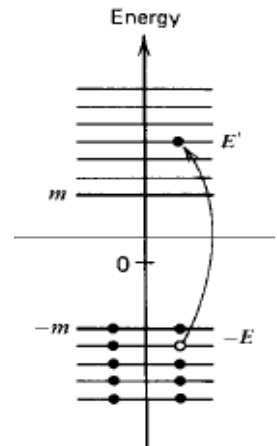


P.A.M. Dirac

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^-

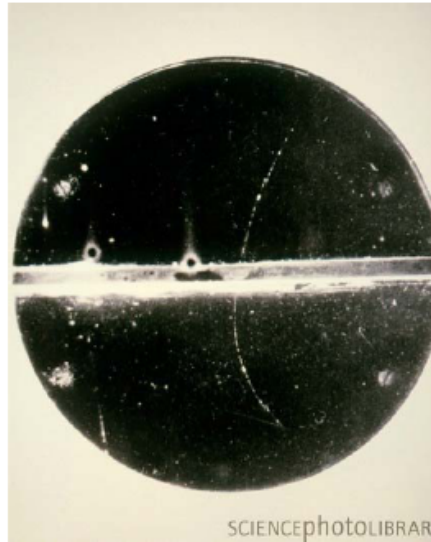
=> κενή αρνητική ενέργεια ηλεκτρονίου περιγράφει θετική ενέργεια ποζιτρονίου



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

Σωματία & Αντισωματία

- 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

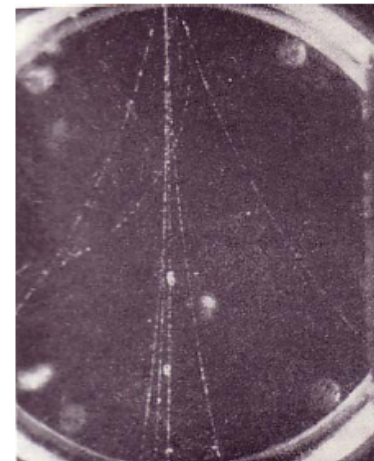
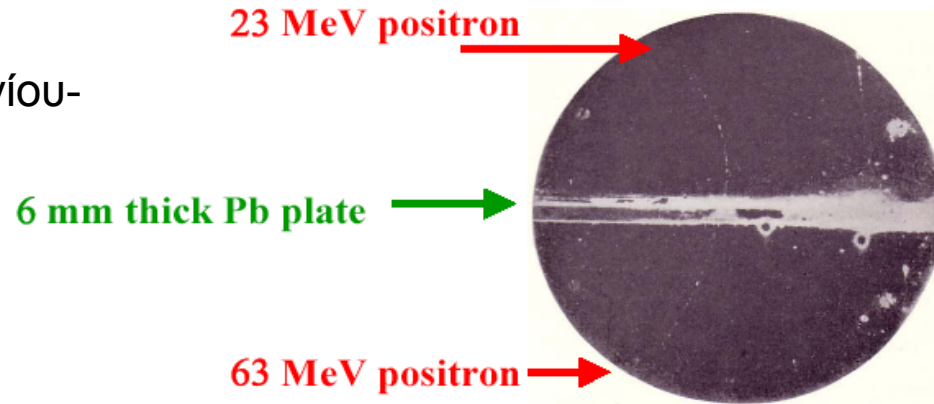
Σωματρία & Αντισωματρία

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



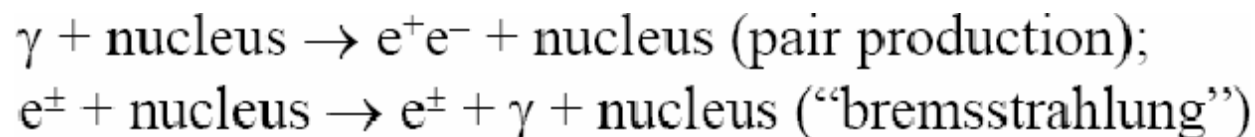
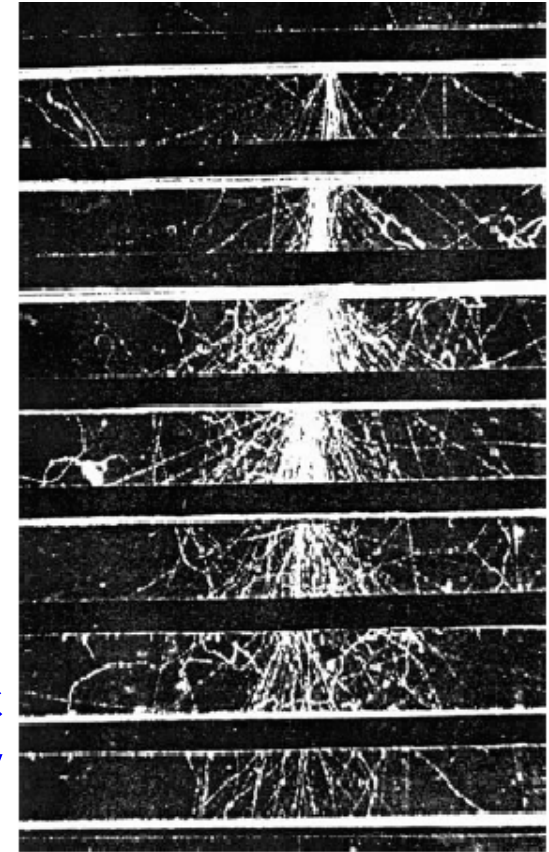
Cosmic-ray “shower”
containing several $e^+ e^-$ pairs

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 φυσαλίδων



Σωματία & Αντισωματία

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!

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

Για τα μποζόνια δεν υπάρχει αντίστοιχος νόμος διατήρησης.

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

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

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)

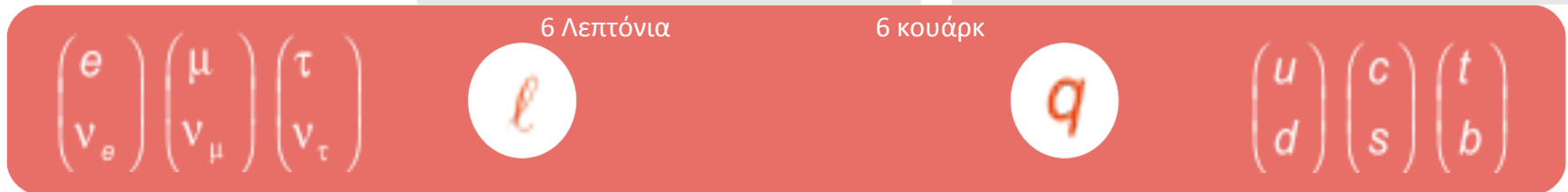
Όλα μαζί – η θεωρία μας για τα δομικά/βασικά συστατικά της ύλης και πώς αυτά αλληλεπιδρούν μεταξύ τους:

“Το Καθιερωμένο Πρότυπο”

Φερμιόνια

Σωματίδια ύλης

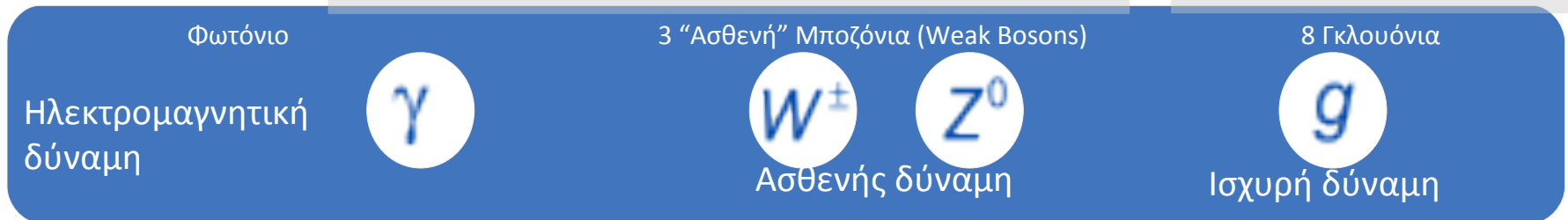
Κάθε κατηγορία σε 3 οικογένειες



Μποζόνια

Διαδότες/φορείς των δυνάμεων

3 δυνάμεις



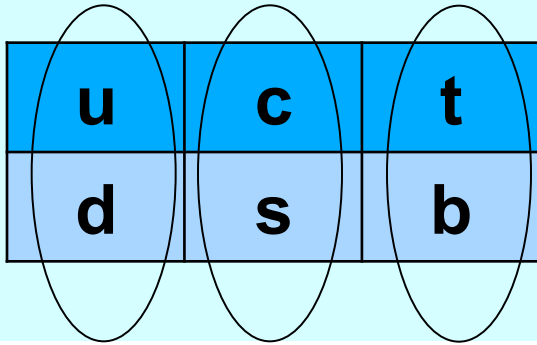
Μποζόνιο Higgs (BEH)



“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 κουάρκ 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 αλλήλεπιδράσεις
(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) = L_e
- λεπτονικός αριθμός του μιονίου (μ, ν) = L_μ
- λεπτονικός αριθμός του ταυ (τ, ν) = L_τ
- Επίσης φυσικά πάντα διατηρείται 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^-

Βαρυονικός Αριθμός = 0 για όλα τα λεπτόνια

Φορτίο (Q)	Βαρυονικός Αριθμός (B)	Αντίστοιχος Λεπτονικός Αριθμός
0	0	+1
-1	0	+1

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. $\pi^+=u\bar{d}$, $D^-=\bar{c}d$, $\pi^0 = u\bar{u}$ και $d\bar{d}$
 - Έχουν Βαρυονικό αριθμό $B=0$

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

•Λεπτόνια

- σημειακά – δεν έχουν δομή
 - Κάθε οικογένεια έχει τον δικό της Λεπτονικό αριθμό
 - (λεπτονικός αριθμός ηλεκτρονίου, λεπτονικός αριθμός μιονίου, λεπτονικός αριθμός ταυ).
 - π.χ., διάσπαση μιονιου σε ηλεκτρόνιο, ένα αντνετρίνο ηλεκτρονίου και ένα νετρομιονίου

•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 $B=1$ — —
 - π.χ διάσπαση νετρονίου σε πρωτόνιο με εκπομπή ηλεκτρονίου και αντνετρίνο του ηλεκτρονίου

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

Νέοι κβαντικοί αριθμοί και νόμοι διατήρησης : Λεπτονικοί αριθμοί (1)

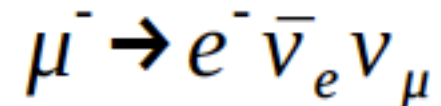
Λεπτόνια: Κάθε οικογένεια (ηλεκτρονίου, μιονίου, και ταυ) έχει δικό της Λεπτονικό αριθμό, που διατηρείται ανεξάρτητα από τους άλλους:

- λεπτονικός αριθμός του ηλεκτρονίου (e, ν) = L_e
- λεπτονικός αριθμός του μιονίου (μ, ν) = L_μ
- λεπτονικός αριθμός του ταυ (τ, ν) = L_τ
- Επίσης φυσικά πάντα διατηρείται το Φορτίο 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:



Κβαντικός αριθμός	μιόνιο	→	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

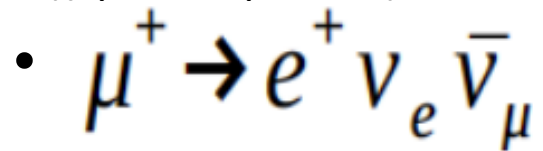
Νέοι κβαντικοί αριθμοί και νόμοι διατήρησης : Λεπτονικοί αριθμοί (2)

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:

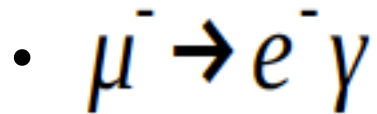


Κβαντικός αριθμός	Θετικό μιονίο (=”αντι-μιονίο”)	→	Ποζιτρόνιο (=”αντιηλεκτρόνιο”)	Νετρίνο του ηλεκτρονίου	Αντινετρίνιο του μιονίου
Q	+1	=	+1	0	0
Le	0	=	-1	1	0
L _μ	-1	=	0	0	-1
L _τ	0	=	0	0	0

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	$\rightarrow$	u κουάρκ	ηλεκτρόνιο	αντινεutrino του ηλεκτρονίου
Q	-1/3	=	2/3	-1	0
Le	0	=	0	1	-1
L μ	0	=	0	0	0
L τ	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	νετρόνιο	→	πρωτόνιο	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. $\bar{p}=\bar{u}\bar{u}\bar{d}$, $\bar{n}=\bar{u}\bar{d}\bar{d}$

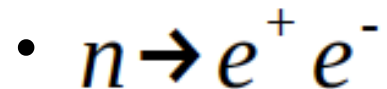
- π.χ $\bar{n} \rightarrow \bar{p} e^+ \nu_e$

Κβαντικός αριθμός	Αντι-νεutrόνιο	→	Αντι-πρωτόνιο	ποζιτρόνιο	νεutrίνο 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
LT	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 u σε ένα d),
πιό δύσκολα όταν το κουάρκ αλλάζει σε καποιον από την επόμενη γενιά (πχ., $c \rightarrow u$) και
πάρα πολύ σπάνια όταν πάμε δύο οικογένειες μακριά.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$M(\gamma) = 0$$

$$M(\nu_+) = M(\nu_-) = 0$$

$$M(e_+) = M(e_-) = 0.511 \text{ MeV}$$

$$M(\pi_0) = M(\pi^\pm) = 139.6 \text{ MeV}$$

$$M(\pi_+) = 135 \text{ MeV}$$

$$M(\mu^+) = M(\mu^-) = 105.7 \text{ MeV}$$

$$M(p) = 938.3 \text{ MeV}$$

$$M(n) = 939.6 \text{ MeV}$$

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

$$M(K^+) = M(K^-) = 493.7 \text{ MeV}$$

Δίνονται:

$$\Sigma^+ = uus, K^- = u(\bar{s})$$

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

$$M(\gamma) = 0$$

$$M(\nu_e) = M(\nu_\mu) = 0$$

$$M(e^+) = M(e^-) = 0.511 \text{ MeV}$$

$$M(\pi_0) = M(\pi^\pm) = 139.6 \text{ MeV}$$

$$M(\pi^\pm) = 135 \text{ MeV}$$

$$M(\mu^+) = M(\mu^-) = 105.7 \text{ MeV}$$

$$M(p) = 938.3 \text{ MeV}$$

$$M(n) = 939.6 \text{ MeV}$$

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

$$M(K^+) = M(K^-) = 493.7 \text{ MeV}$$

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 ελεγχθούν 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			