

ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΠΥΡΗΝΙΚΗ ΦΥΣΙΚΗ & ΤΑ ΣΤΟΙΧΕΙΩΔΗ ΣΩΜΑΤΙΑ

Κ. Βελλίδης & Θ. Μερτζιμέκης
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ, 2022

Συντεταγμένες Κ. Βελλίδη (Στοιχειώδη Σωματάρια):

Τομέας ΠΦΣΣ: Νβ3, 210-727-6946

ΙΕΣΕ: β' όροφος, 210-727-6895

konstantinos.vellidis@cern.ch

Βιβλιογραφία Φυσικής Στοιχειωδών Σωματιδίων

- “Nuclear and Particle Physics”, Martin (Wiley): το ιδανικό μείγμα
- “Particle Physics”, Martin & Shaw (Wiley): καλό εισαγωγικό σύγγραμμα
- “Introductory High Energy Physics”, Perkins (Cambridge): σύγγραμμα προπτυχιακού επιπέδου κατεύθυνσης, υπάρχει και στα ελληνικά ως “Εισαγωγή στη Φυσική Υψηλών Ενεργειών” (τυπωθήτω)
- “Introduction to Elementary Particles”, Griffiths (Wiley): έμφαση στην ιστορική πορεία εξέλιξης της Σωματιδιακής Φυσικής
- “Modern Particle Physics”, Thomson (Cambridge): σύγχρονο σύγγραμμα μεταπτυχιακού επιπέδου
- “Quarks & Leptons”, Halzen & Martin (Wiley): κλασσικό σύγγραμμα μεταπτυχιακού επιπέδου

Εισαγωγή στη Φυσική Στοιχειωδών Σωματιδίων

- Φερμιόνια και Μποζόνια
- Σωματία και Αντισωματία
- Το Καθιερωμένο Πρότυπο: Quarks & Λεπτόνια
- Βασικές Αρχές Διατήρησης

Φερμιόνια και Μποζόνια

Εξαιρετικά σημαντική ιδιότητα των σωματίων. Προσδιορίζεται από το spin τους.

Φερμιόνια

- Στατιστική Fermi-Dirac
- Ημισακέραιο Spin

$$\left(\frac{1}{2} \hbar, \frac{3}{2} \hbar, \frac{5}{2} \hbar \dots \right)$$

Μποζόνια

- Στατιστική Bose-Einstein
- Ακέραιο Spin

$$(0\hbar, 1\hbar, 2\hbar \dots)$$

Φερμιόνια και Μποζόνια

Έστω δύο ίδια σωματάρια 1 & 2 περιγράφονται από την κυματοσυνάρτηση $\psi(1,2)$. Η εναλλαγή των σωματίων $1 \leftrightarrow 2$ δίνει την κυματοσυνάρτηση $\psi(2,1)$ για την οποία ισχύει:

Για δύο ταυτόσημα **φερμιόνια** 1 και 2

Αντισυμμετρική κυματοσυνάρτηση στην εναλλαγή

$$\psi(1, 2) = -\psi(2, 1)$$

Παρατηρούμε ότι η συνθήκη αυτή αποδίδει την απαγορευτική αρχή του Pauli.

Για δύο ταυτόσημα **μποζόνια** 1 και 2

Συμμετρική κυματοσυνάρτηση στην εναλλαγή

$$\psi(1, 2) = \psi(2, 1)$$

Φερμιόνια

Πειραματική μαρτυρία ύπαρξης δύο ειδών θεμελιωδών φερμιονίων, χωρίς δομή και με διάσταση μικρότερη του 10^{-19} m: 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 όλες τις γνωστές αλληλεπιδράσεις
- Σε κάθε κουάρκ αντιστοιχεί ένα αντικουάρκ με αντίθετο φορτίο
- Δεν παρατηρούνται ελεύθερα, αλλά μόνο δέσμια σε αδρόνια

Λεπτόνια

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

Φερμιόνια: Κουάρκ & Λεπτόνια

FERMIONS

matter constituents
spin = 1/2, 3/2, 5/2, ...

Leptons spin = 1/2

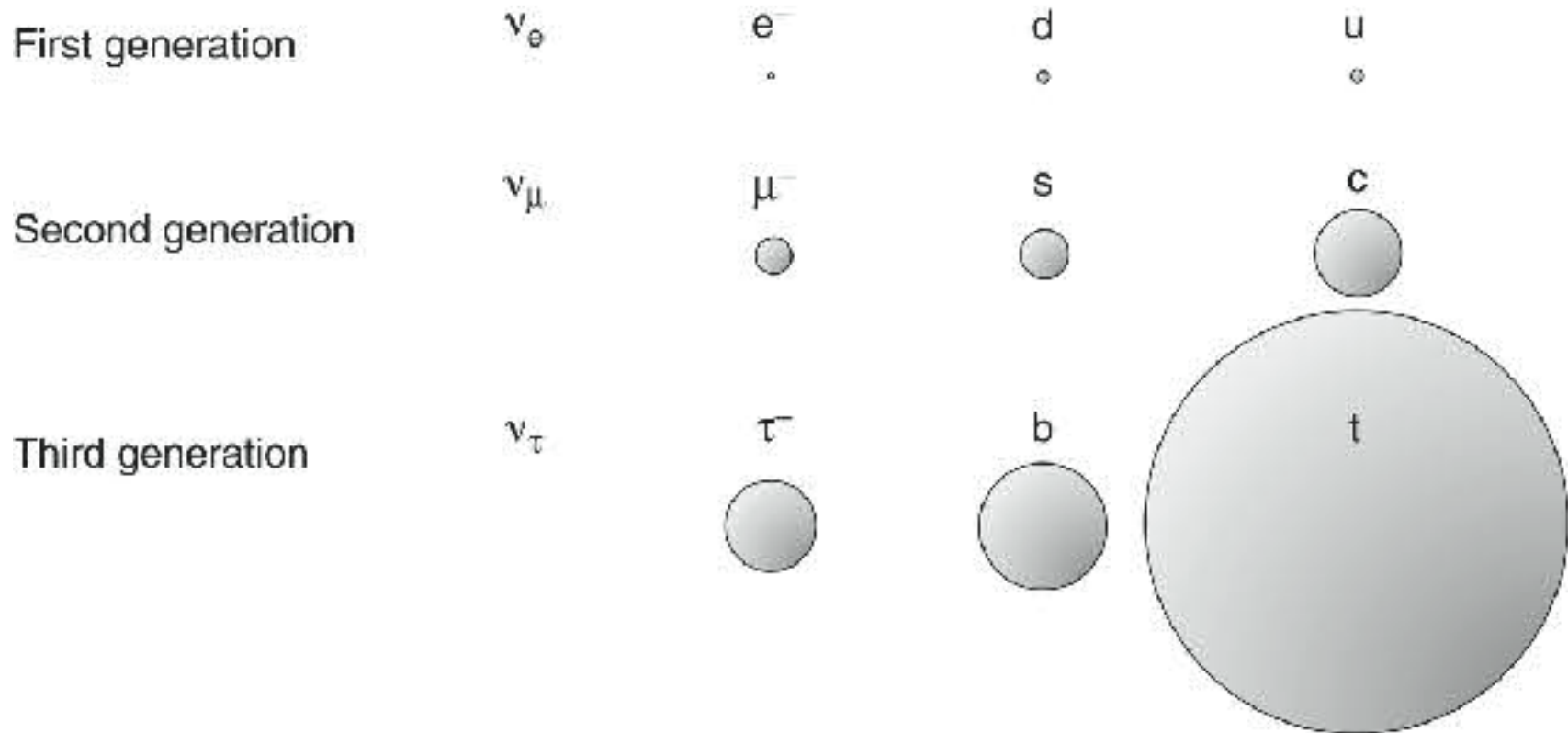
Flavor	Mass GeV/c ²	Electric charge
ν_e electron neutrino	$<1 \times 10^{-8}$	0
e electron	0.000511	-1
ν_μ muon neutrino	<0.0002	0
μ muon	0.106	-1
ν_τ tau neutrino	<0.02	0
τ tau	1.7771	-1

Quarks spin = 1/2

Flavor	Approx. Mass GeV/c ²	Electric charge
u up	0.003	2/3
d down	0.006	-1/3
C charm	1.3	2/3
S strange	0.1	-1/3
t top	175	2/3
b bottom	4.3	-1/3

Φερμιόνια: Κουάρκ & Λεπτόνια

Αναπαριστώνοντας τις μάζες των φερμιονίων με ομογενείς σφαίρες, με την εξαίρεση των νετρίνων, διαφαίνεται ότι οι μάζες των φερμιονίων της ίδιας οικογένειας είναι παρόμοιες → Συμμετρία γεύσης?



Φερμιόνια: Κουάρκ & Λεπτόνια

Κβαντικοί Αριθμοί Γεύσης

Παραξενιά

(strangeness) $S = -1$

Χάρη

(charm) $C = +1$

Πυθμενικός

(bottom) $\tilde{B} = -1$

Κορυφαίος

(top) $T = +1$

	S	C	\tilde{B}	T
d	0	0	0	0
u	0	0	0	0
s	-1	0	0	0
c	0	1	0	0
b	0	0	-1	0
t	0	0	0	1

Αδρόνια: Μεσόνια και Βαρυόνια

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 $= (s \ \bar{d})$

Ψ -μεσόνιο $= (c \ \bar{c})$

Σωματάρια και Αντισωματάρια

Η ύπαρξη αντισωματίων απορρέει από την σχετικιστική κυματική εξίσωση του Dirac (*The Quantum Theory of the Electron, 1928*) εισάγοντας την σχετικιστική κίνηση των ηλεκτρονίων (spin 1/2) στην κβαντική κυματοσυνάρτηση.

Κλασική κίνηση σωματιδίου σε δυναμικό

$$E = \frac{p^2}{2m} + V(\vec{r})$$

Μη σχετικιστική εξίσωση Schrödinger

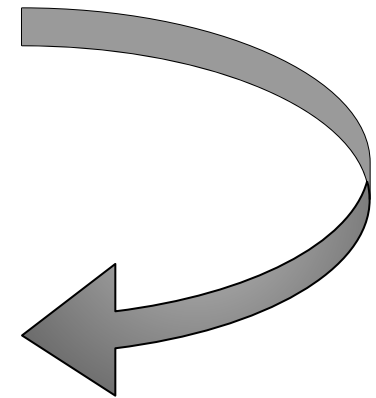
Αντικατάσταση φυσικών μεγεθών με τελεστές:

$$E \rightarrow i\hbar \frac{\partial}{\partial t}$$

$$\vec{r} \rightarrow \vec{r}$$

$$\vec{p} \rightarrow -i\hbar \nabla$$

$$i\hbar \frac{\partial \psi(\vec{r}, t)}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \psi(\vec{r}, t) + V(\vec{r}) \cdot \psi(\vec{r}, t)$$



Σωματία και Αντισωματία

Η αντίστοιχη σχετικιστική εξίσωση (*de Broglie, 1924*) προκύπτει από τη σχέση:

$$E^2 = p^2 c^2 + m^2 c^4$$

με παρόμοια αντικατάσταση, οπότε προκύπτει η εξίσωση για σωματία χωρίς spin, η οποία είναι γνωστή σαν εξίσωση *Klein-Gordon*:

$$-\hbar^2 \frac{\partial^2 \psi(\vec{r}, t)}{\partial t^2} = -\hbar^2 c^2 \nabla^2 \psi(\vec{r}, t) + m^2 c^4 \cdot \psi(\vec{r}, t)$$

Η εξίσωση αυτή έχει σαν λύση το επίπεδο κύμα με τις δύο συζυγείς μορφές:

$$\psi(\vec{r}, t) = A \cdot \exp\left[\frac{i}{\hbar} (\vec{p} \cdot \vec{r} - E_p t)\right] \quad \mu\epsilon \quad E_p = +\sqrt{p^2 c^2 + m^2 c^4} > 0$$

$$\psi^*(\vec{r}, t) = A^* \cdot \exp\left[\frac{i}{\hbar} (-\vec{p} \cdot \vec{r} + E_p t)\right] \quad \mu\epsilon \quad E_p = -\sqrt{p^2 c^2 + m^2 c^4} < 0$$

Σωματία και Αντισωματία

Η λύση με την αρνητική ενέργεια είναι άμεση συνέπεια της τετραγωνικής μορφής της εξίσωσης Klein-Gordon. Σε παρόμοιο αποτέλεσμα καταλήγει και η εξίσωση Dirac, η οποία εισάγεται για την επίλυση (σημειακών) σωματιδίων με $\frac{1}{2}$ spin. Η λύση της έχει επίσης την μορφή:

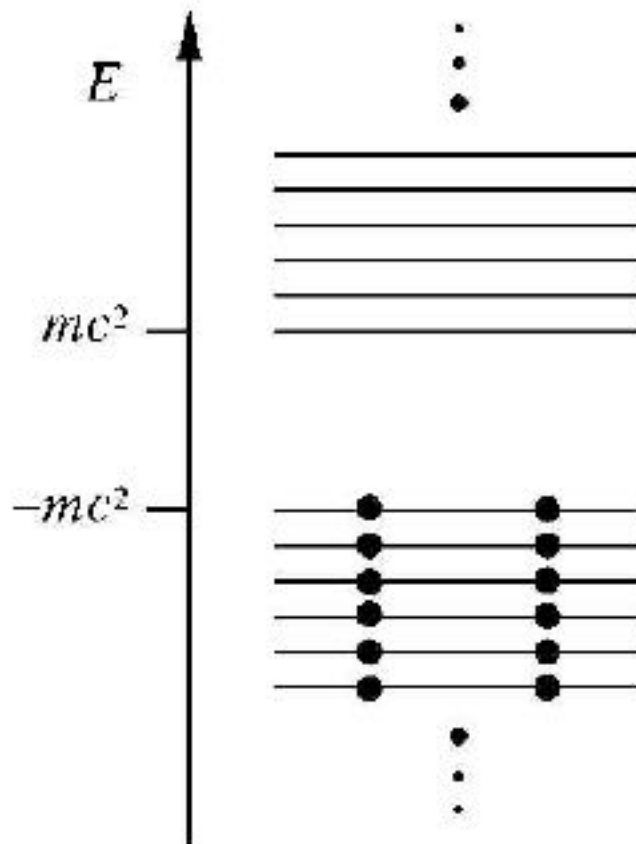
$$\psi(\vec{r}, t) = u(\vec{p}) \cdot \exp\left[\frac{i}{\hbar} (\vec{p} \cdot \vec{r} - E_p t)\right]$$

όπου $u(p)$ είναι οι βασικές λύσεις (ιδιολύσεις) της εξίσωσης Dirac (*spinors*). Στην κβαντομηχανική είναι απαραίτητη μια πλήρης βάση για την περιγραφή του χώρου καταστάσεων (χώρου Hilbert), επομένως οι βασικές καταστάσεις αρνητικής ενέργειας δεν μπορούν απλώς να απορριφθούν ως μη φυσικές.

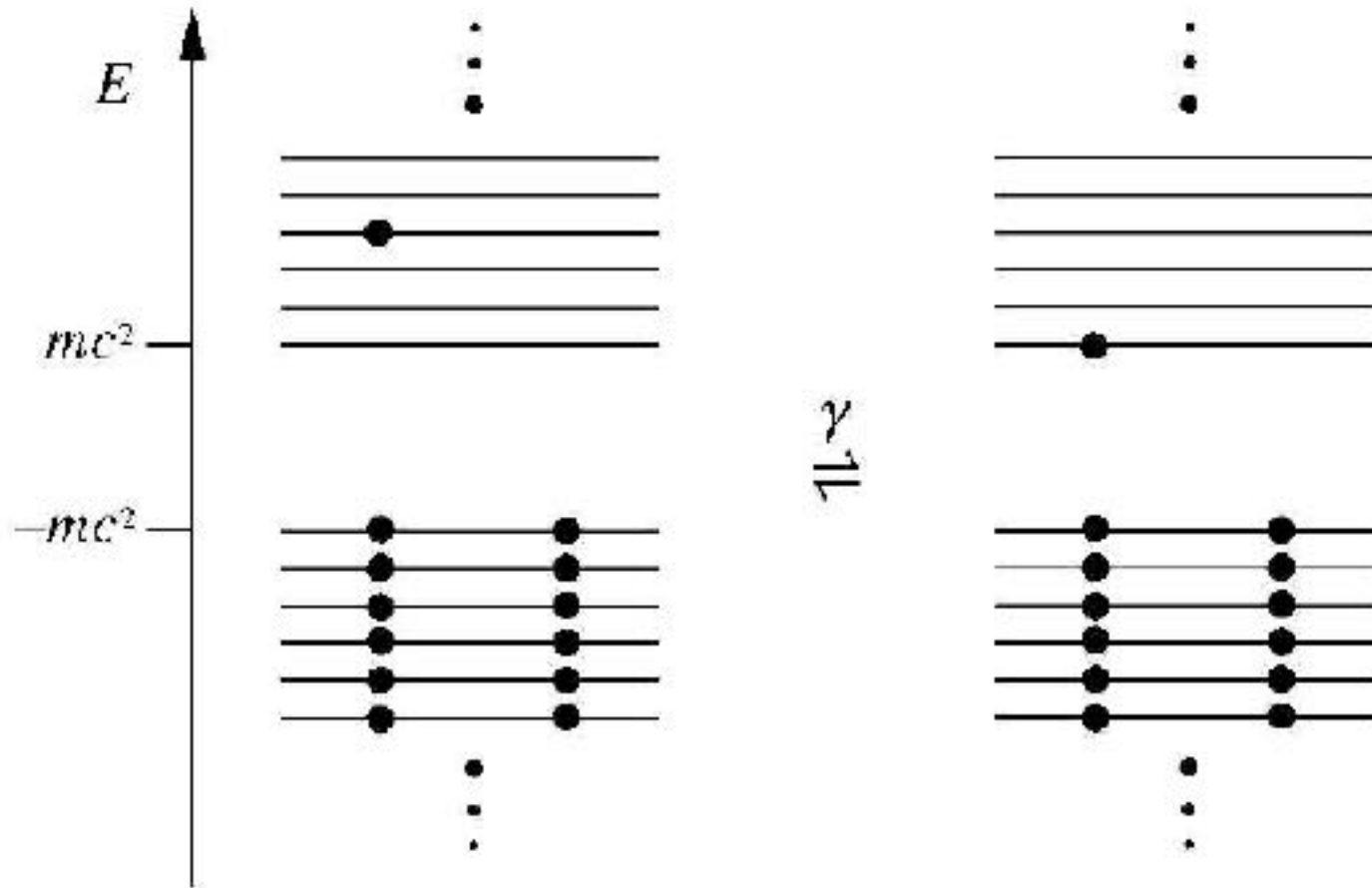
Η ύπαρξη αρνητικών ιδιοτιμών ενέργειας δημιουργεί λογική αντίφαση: Αν υπήρχαν τέτοιες ελεύθερες καταστάσεις, τότε τα ηλεκτρόνια με θετικές ιδιοτιμές ενέργειας θα μεταπηδούσαν αυθόρμητα σε αυτές, καταστρέφοντας την εικόνα ευστάθειας όλης της ατομικής φυσικής.

Σωματία και Αντισωματία (ερμηνεία κατά Dirac)

Ο Dirac πρότεινε πως *όλες* αυτές οι καταστάσεις είναι κατειλημμένες (*θάλασσα Dirac*). Απελευθέρωση κάποιας από τις καταστάσεις αυτές αρνητικής ενέργειας ισοδυναμεί με εμφάνιση σωματιδίου αρνητικής μάζας ηρεμίας, το οποίο αποκάλεσε *αντισωματίο* (αντι-ηλεκτρόνιο).

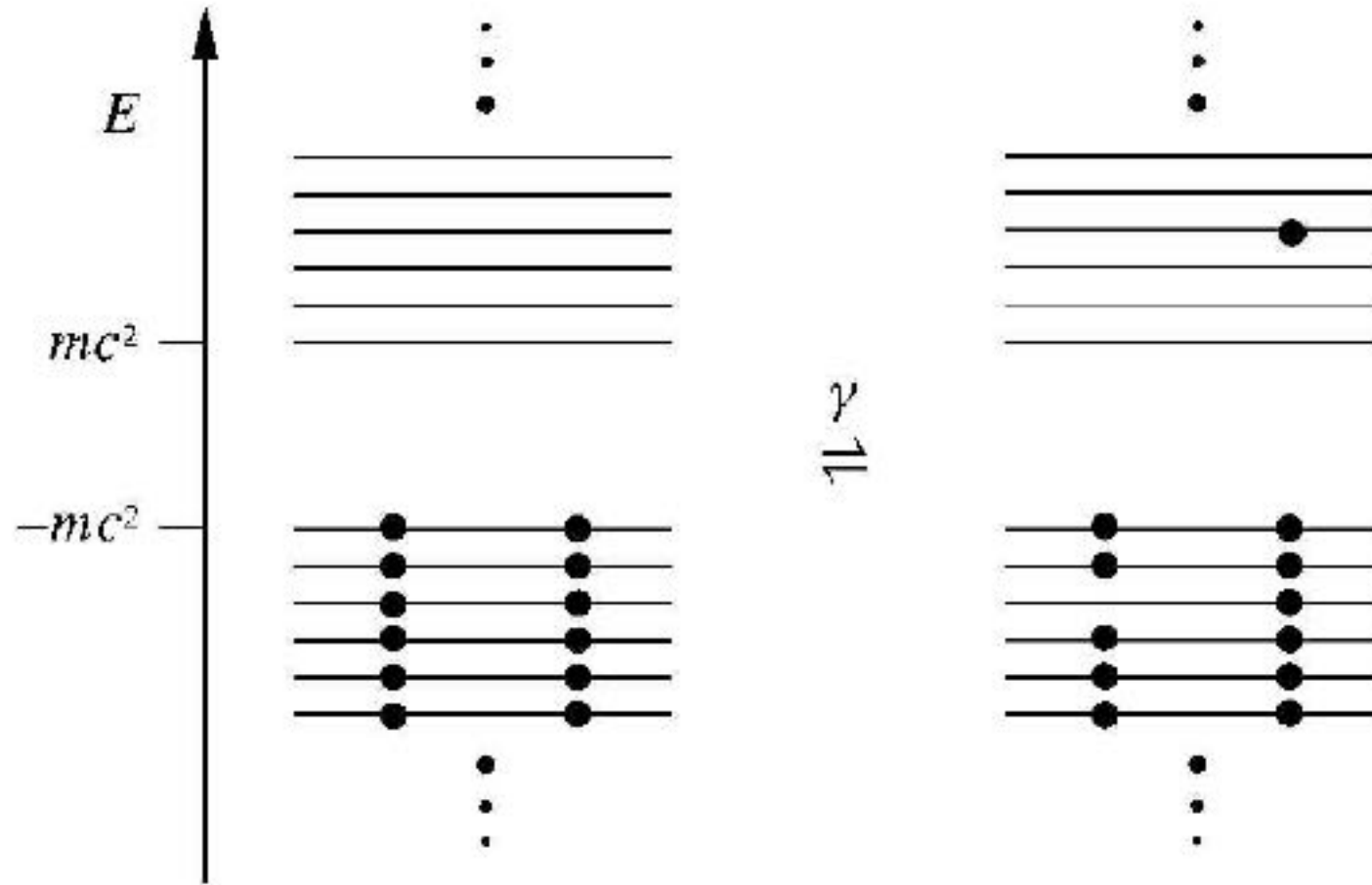


Σωματία και Αντισωματία (ερμηνεία κατά Dirac)



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

Σωματία και Αντισωματία (ερμηνεία κατά Dirac)



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

$$\text{vacuum} \rightarrow \gamma + e^- + e^+ \quad \& \quad \gamma + e^- + e^+ \rightarrow \text{vacuum}$$

Σωματία και Αντισωματία (ερμηνεία κατά Dirac)

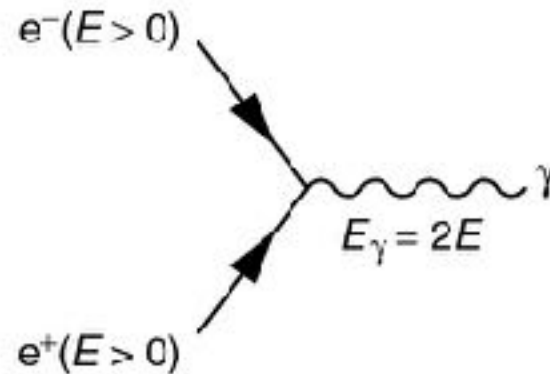
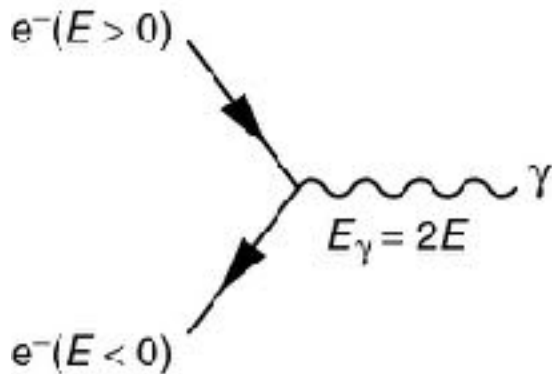
Η θεωρία “οπών” του Dirac εμπεριέχει εγγενείς δυσκολίες:

- (i) Η υπόθεση μιας πλήρως κατειλημμένης θάλασσας Dirac συνεπάγεται ότι το κενό έχει άπειρη αρνητική ενέργεια, ένα συμπέρασμα χωρίς ξεκάθαρο φυσικό νόημα.
- (ii) Η θεωρία οπών δεν εξηγεί την ύπαρξη αντι-μποζονίων, τα οποία επίσης έχουν παρατηρηθεί πειραματικά όπως τα αντι-φερμιόνια, επειδή στα μποζόνια δεν ισχύει η αρχή του Pauli για να εμποδίσει τη μεταπήδηση σωματίων θετικής ενέργειας σε κατειλημμένες καταστάσεις αρνητικής ενέργειας.

Σωματία και Αντισωματία (ερμηνεία κατά Feynman-Stueckelberg)

Η σύγχρονη ερμηνεία των καταστάσεων αρνητικής ενέργειας δόθηκε από τους Stueckelberg και Feynman, οι οποίοι τις περιέγραψαν ως καταστάσεις φυσικών σωματίων που διαδίδονται με αρνητική ενέργεια αντίθετα στο χρόνο, με βάση την αναλλοιότητα των κυματοσυναρτήσεων κάτω από ταυτόχρονη αντιστροφή των προσήμων του χρόνου και της ενέργειας:

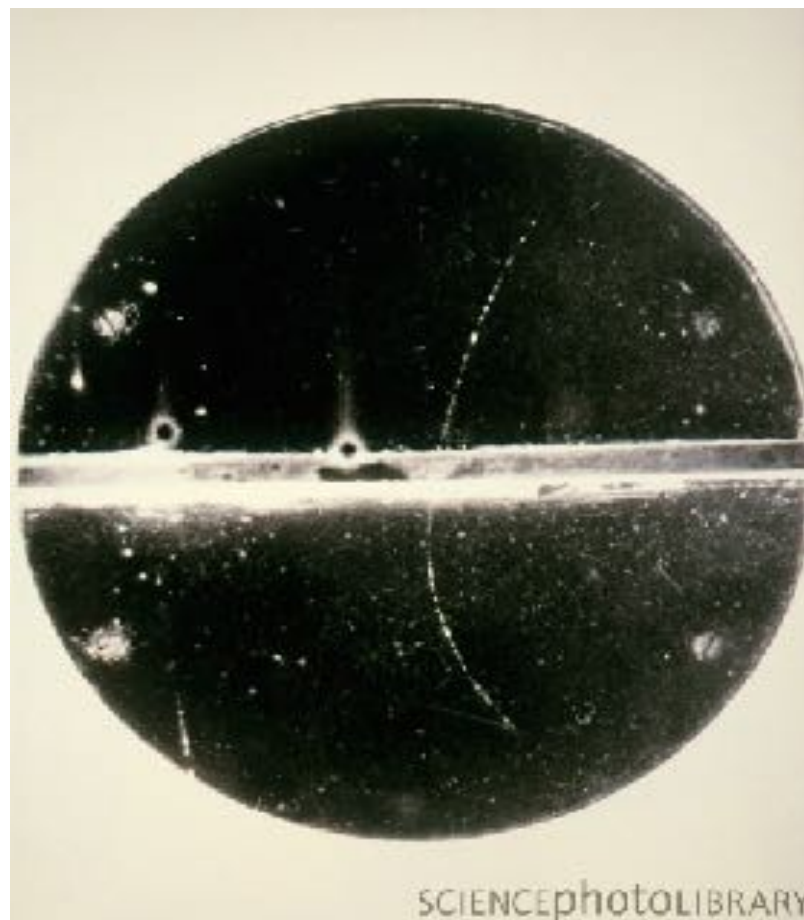
$$\exp(-iEt/\hbar) \equiv \exp[-i(-E)(-t)/\hbar]$$



Σωματίια και Αντισωματίια

Πρόβλεψη ύπαρξης αντισωματίων από την σχετικιστική κυματική εξίσωση του Dirac (1928): Καταστάσεις αρνητικής ενέργειας του ηλεκτρονίου ερμηνεύονται ως καταστάσεις ενός αντισωματίου, του **ποζιτρονίου**.

Πειραματική ανακάλυψη του ποζιτρονίου (e^+) από τον Anderson (1932) σε πείραμα θαλάμου φυσαλίδων με κοσμικές ακτίνες.



Σωματάρια και Αντισωματάρια

Γενικευμένη ιδιότητα φερμιονίων & μποζονίων: Σε κάθε σωματάριο αντιστοιχεί ένα αντισωματάριο, το οποίο έχει **ίδια μάζα** με το σωματάριο, **αντίθετο φορτίο** και **αντίθετη μαγνητική ροπή**.

Φερμιόνιο \rightarrow Φερμιονικός Αριθμός **+1**

Αντιφερμιόνιο \rightarrow Φερμιονικός Αριθμός **-1**

Ο Φερμιονικός Αριθμός διατηρείται !

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

$$0 \rightarrow (-1) + (+1)$$

Για τα μποζόνια δεν υπάρχει αντίστοιχος νόμος διατήρησης.

Σωματίια και Αντισωματίια

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

Σωματάρια και Αντισωματάρια

Διατήρηση Λεπτονικου Αριθμου

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$L_e: 0 \neq (-1) + 0$$

Σωματία και Αντισωματία

Κβαντικοί Αριθμοί των Κουάρκ

	B	Q	S	C	\tilde{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

Σωματία και Αντισωματία

Κβαντικοί Αριθμοί των Αντι-Κουάρκ

	B	Q	S	C	\tilde{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

Σωματία και Αντισωματία

Παράδειγμα παραγωγής ζευγαριού 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:

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

Βαρυόνια

Baryons qqq and Antibaryons $\bar{q}\bar{q}\bar{q}$

Baryons are fermionic hadrons.
There are about 120 types of baryons.

Symbol	Name	Quark content	Electric charge	Mass GeV/c^2	Spin
p	proton	uud	1	0.938	1/2
\bar{p}	anti-proton	$\bar{u}\bar{u}\bar{d}$	-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

Μεσόνια

Mesons $q\bar{q}$

Mesons are bosonic hadrons.
There are about 140 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	0.770	1
B^0	B-zero	$d\bar{b}$	0	5.279	0
η_c	eta-c	$c\bar{c}$	0	2.980	0

Αλληλεπιδράσεις

PROPERTIES OF THE INTERACTIONS

Property \ Interaction	Gravitational	Weak (Electroweak)	Electromagnetic	Strong	
				Fundamental	Residual
Acts on:	Mass – Energy	Flavor	Electric Charge	Color Charge	See Residual Strong Interaction Note
Particles experiencing:	All	Quarks, Leptons	Electrically charged	Quarks, Gluons	Hadrons
Particles mediating:	Graviton (not yet observed)	W^+ W^- Z^0	γ	Gluons	Mesons
Strength relative to electro-mag for two u quarks at:	10^{-41}	0.8	1	25	Not applicable to quarks
for two protons in nucleus	10^{-41}	10^{-4}	1	60	
	10^{-36}	10^{-7}	1	Not applicable to hadrons	20

Τα σωμάτια που είναι φορείς των δυνάμεων, είναι πάντα μποζόνια, είτε αυτά είναι «στοιχειώδη» λ.χ. φωτόνια, είτε αυτά είναι σύνθετα «λ.χ. μεσόνια».

Μποζόνια

BOSONS

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

Unified Electroweak spin = 1

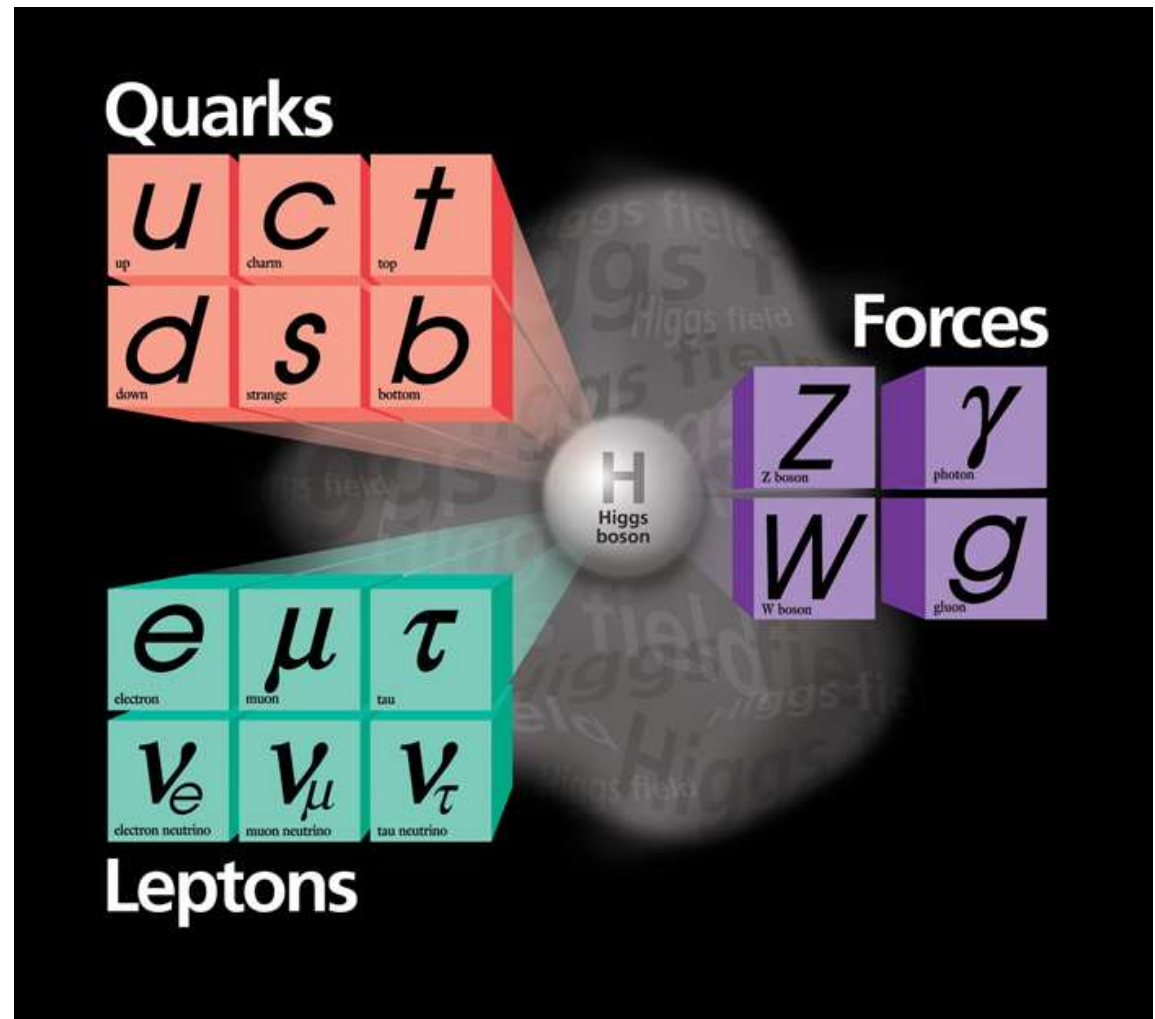
Name	Mass GeV/c ²	Electric charge
γ photon	0	0
W^-	80.4	-1
W^+	80.4	+1
Z^0	91.187	0

Strong (color) spin = 1

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

Το Καθιερωμένο
Πρότυπο
(Standard Model)
της Φυσικής
Στοιχειωδών
Σωματίων:

Οι τρεις γενιές των
θεμελιωδών
συστατικών της ύλης
και οι φορείς των
αλληλεπιδράσεών
τους



Το πεδίο Higgs

Το Καθιερωμένο Πρότυπο απαιτεί την ύπαρξη ενός σωματίου χωρίς φορτίο και σπιν (βαθμωτό μποζόνιο), το οποίο δημιουργείται από ένα βαθμωτό κβαντικό πεδίο που γεμίζει το Σύμπαν και **δίνει μάζα στα άλλα στοιχειώδη σωματρία**.

Το σωματίο αυτό ονομάζεται σωματίο Higgs (το αντίστοιχο πεδίο ονομάζεται πεδίο Higgs) και παρατηρήθηκε το 2012 από τα πειράματα ATLAS και CMS του μεγάλου επιταχυντή αδρονίων LHC. Η μάζα του βρέθηκε ίση με **125 GeV/c²**.

Η ανακάλυψη του σωματίου Higgs μετά από σχεδόν 50 χρόνια αναζήτησης ολοκλήρωσε το Καθιερωμένο Πρότυπο ως βασική θεωρία ερμηνείας των ιδιοτήτων όλων των στοιχειωδών σωματίων που γνωρίζουμε σήμερα και των θεμελιωδών αλληλεπιδράσεών τους.

Καθιερωμένο Πρότυπο και Βασικές Αρχές Διατήρησης: Περίληψη

- Σωματία — αντισωματία: ίδιες “ταυτότητες” (μάζα, σπιν), αντίθετα φορτία και κβαντικοί αριθμοί (λεπτονικός ή βαρυνικός)
- Μποζόνια (σπιν 1): φορείς των αλληλεπιδράσεων (ισχυρή, ασθενής, H/M)
- Φερμιόνια (σπιν 1/2): κουάρκ & λεπτόνια σε 6 γεύσεις (3 γενιές), δομούν την ύλη
- Βαρυόνια = τριάδες κουάρκ (ημιακέραιο σπιν), εντοπίζονται στους πυρήνες
μεσόνια = ζεύγη κουάρκ-αντικουάρκ (ακέραιο σπιν), ανταλλάσσονται μεταξύ βαρυνίων
- Διατηρούμενοι κβαντικοί αριθμοί στο Καθιερωμένο Πρότυπο:
 - * Βαρυνικός αριθμός: $1/3$ για κουάρκ \rightarrow 1 για βαρυόνια, 0 για μεσόνια
 - * Λεπτονικός αριθμός: 1, διατηρείται χωριστά για κάθε γεύση