

Εισαγωγή στη Φυσική Στοιχειωδών Σωματιδίων

5 ο Εξάμηνο
Δεκέμβριος 2009

ΔΥΟ Μεγάλες , απλές κατηγοριοποιήσεις σωματίων,

I. Φερμιόνια-Μποζόνια

Στατιστική Συμπεριφορά

Νόμοι διατήρησης. Τα φερμιόνια δεν «καταστρέφονται»

II: Σωματία-Αντισωματία

Για κάθε σωματίο, υπάρχει το αντισωματίο του.

Στο ορατό Σύμπαν, παρατηρείται μια κατάφωρη ασυμμετρία ανάμεσα στα σωματία και αντισωματία.

Φερμιόνια και Μποζόνια

- Εξαιρετικά σημαντική ιδιότητα των σωματίων. Προσδιορίζεται από το σπιν τους.
- Καθορίζει την Στατιστική τους συμπεριφορά

Φερμιόνια

- Στατιστική Fermi-Dirac
- Ημιακέραιο 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

- Η κυματοσυνάρτηση δύο ταυτόσημων σωματίων 1 και 2: $\Psi(1,2)$

Η πιθανότητα $|\Psi(1,2)|^2 = |\Psi(2,1)|^2$ **ΔΕΝ** μεταβάλλεται αν εναλλάξουμε τα δύο σωματρία στο χώρο $1 \leftrightarrow 2$

- Για δύο ταυτόσημα **φερμιόνια** 1 και 2 $\psi(1,2) = -\psi(2,1)$

Αντισυμμετρική κυματοσυνάρτηση στην εναλλαγή

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

- Για δύο ταυτόσημα **μποζόνια** 1 και 2 $\psi(1,2) = \psi(2,1)$

Συμμετρική κυματοσυνάρτηση στην εναλλαγή

Φερμιόνια και Μποζόνια

Η ολική κυματοσυνάρτηση δύο ταυτόσημων σωματίων 1 και 2 είναι γινόμενο των συναρτήσεων του χώρου και του σπιν

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

Η $\Psi_{\alpha}(\text{χώρου})$ περιγράφει την τροχιακή κίνηση του (1) ως προς το (2)

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

όπου $Y^m_l(\theta, \phi)$: σφαιρική αρμονική

l είναι η σχετική στροφορμή των 1, 2

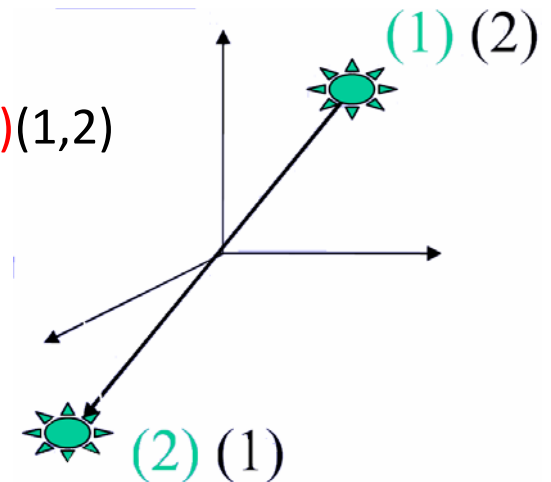
όταν $1 \leftrightarrow 2$: $\theta \rightarrow \pi - \theta$

$\phi \rightarrow \pi + \phi$

$$\text{Η } Y^m_l(\theta, \phi)(2,1) = Y^m_l(\theta, \phi)(\pi - \theta, \pi + \phi)(1,2) = (-1)^l Y^m_l(\theta, \phi)(1,2)$$

αν $l = \text{άρτιος}$ η $Y^m_l(\theta, \phi)$ συμμετρική

αν $l = \text{περιττός}$ η $Y^m_l(\theta, \phi)$ αντισυμμετρική



Φερμιόνια και Μποζόνια

Η κυματοσυνάρτηση του σπιν δύο ταυτόσημων σωματίων

$$\Psi_{\beta}(\text{σπιν})$$

σπιν

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

↑↓ αντιπαράλληλα $\Psi_{\beta}(\text{σπιν})(1,2) = -\Psi_{\beta}(\text{σπιν})(1,2)$ αντισυμμετρική

Η ολική κυματοσυνάρτηση ενός ή περισσότερων σωματίων

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

Μποζόνια

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

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

Φερμιόνια

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

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

Φερμιόνια και Μποζόνια

Εφαρμογή της ιδιότητας της συμμετρίας της κυματοσυνάρτησης δύο ταυτόσημων μποζονίων

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

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

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

$$\rho^0 \rightarrow 2\pi^0$$

$$J=1 \Rightarrow J=1$$

Για τα $2\pi^0$

Η $\Psi_\beta(\text{σπιν}) (1,2)$ συμμετρική $\Rightarrow \Psi_\alpha(\text{χώρου}) (1,2)$ συμμετρική $\Rightarrow l$ άρτιο $\Rightarrow J \neq 1 \Rightarrow$ **Μη διατήρηση της ολικής στροφορμής**

Η διάσπαση $\rho^0 \rightarrow 2\pi^0$ **απαγορεύεται**

Ενώ η διάσπαση $\rho^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$ μη ταυτόσημα σωμάτια επιτρέπεται

Η απαγορευτική αρχή του Pauli

Εφαρμογή της ιδιότητας της συμμετρίας της κυματοσυνάρτησης δύο ταυτόσημων φερμιονίων

Δύο ταυτόσημα σωμάτια στην ίδια κβαντική κατάσταση $\rightarrow \Psi$ συμμετρική
Για τα φερμιόνια όμως η $\Psi =$ αντισυμμετρική

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

Hydrogen ($Z = 1$) Helium ($Z = 2$) Lithium ($Z = 3$)

Lowest energy state \rightarrow

Wolfgang Pauli

Η απαγορευτική αρχή του Pauli ισχύει για όλα τα σωματίδια με ημιακέραιο spin (Φερμιόνια) όχι όμως για τα μποζόνια.

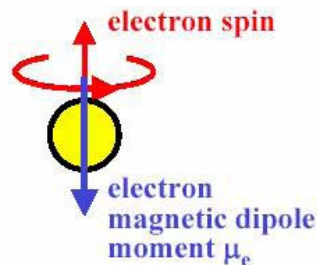
Αντιϋλη

Στη Θεωρία ‘ανακαλύφτηκε’ από τον P.A.M. Dirac (1928)

- Η εξίσωση Dirac: Σχετικιστική Κυματική εξίσωση για το ηλεκτρόνιο που συμπεριλάμβανε και το σπιν

$$-\hbar^2 \frac{\partial^2 \Psi(\mathbf{x}, t)}{\partial t^2} = -\hbar^2 c^2 \nabla^2 \Psi(\mathbf{x}, t) + m^2 c^4 \Psi(\mathbf{x}, t)$$

- Δύο τα παράδοξα στην εξίσωση Dirac
 - Εμφάνιση εσωτερικής μαγνητικής διπολικής ροπής του ηλεκτρονίου με κατεύθυνση αντίθετη του spin
 - Για κάθε λύση της εξίσωσης για ηλεκτρόνιο με $E > 0$ υπάρχει μια ακόμη λύση με $E < 0$



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

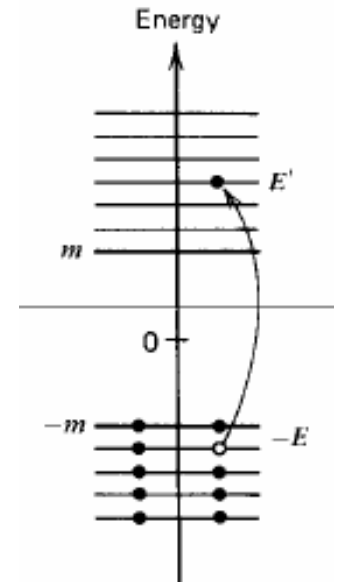
Ποιά είναι η φυσική ερμηνεία των λύσεων “αρνητικής ενέργειας”?

Αντιϋλη

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

Οι υποθέσεις του Dirac :

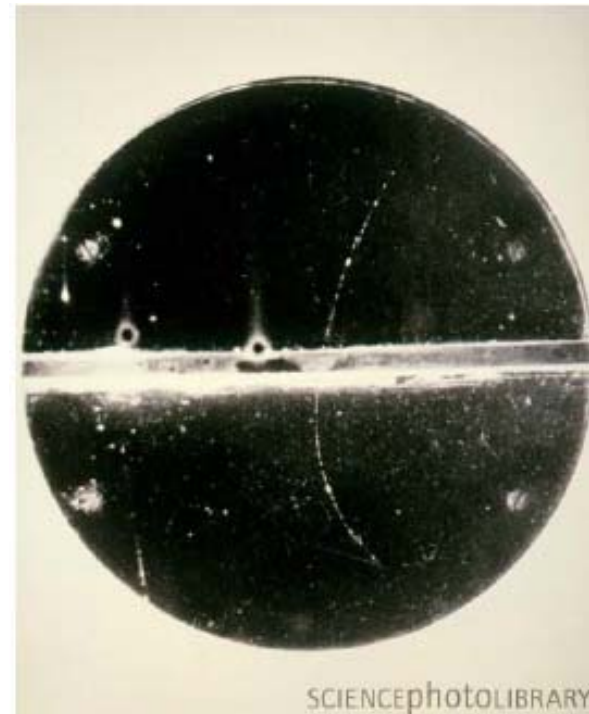
- Οι μεταπτώσεις ηλεκτρονίων από στάθμη με θετική ενέργεια σε κατειλημμένη στάθμη αρνητικής ενέργειας απαγορεύεται από την αρχή του Pauli
- Μεταπτώσεις ηλεκτρονίων από θετική ενέργεια σε κενή αρνητική στάθμη είναι επιτρεπτές => εξαφάνιση του ηλεκτρονίου. Για να διατηρηθεί το φορτίο ένα θετικό ηλεκτρόνιο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



Σωματίια και Αντισωματίια

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

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

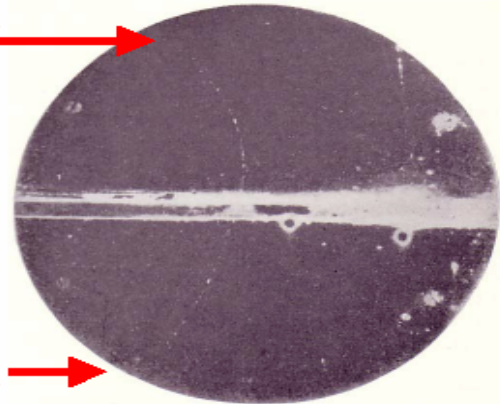


Πρώτη πειραματική παρατήρηση
Ποζιτρονίου- Αντιύλης 1932

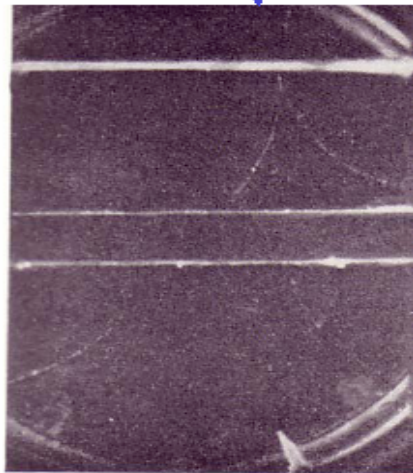
23 MeV positron

6 mm thick Pb plate

63 MeV positron



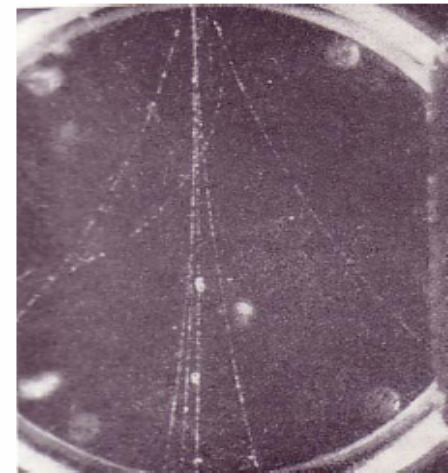
direction of
high-energy photon



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



Carl D. Anderson



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

Σωματίια και Αντισωματίια

Γενικευμένη Ιδιότητα φερμιονίων & μποζονίων: Σε κάθε σωματίιο αντιστοιχεί ένα αντισωματίιο, το οποίο έχει ίδια μάζα με το σωματίιο, αντίθετο φορτίο και αντίθετη μαγνητική ροπή.

Φερμιόνιο



Φερμιονικός Αριθμός +1

Αντιφερμιόνιο



Φερμιονικός Αριθμός -1

Φερμιόνια και αντιφερμιόνια δημιουργούνται και καταστρέφονται σε ζεύγη

Ο Φερμιονικός Αριθμός διατηρείται!

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

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

Για τα μποζόνια δεν υπάρχει αντίστοιχος νόμος διατήρησης.

Φερμιόνια: Κουάρκ & Λεπτόνια

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

Οι τρεις γενιές των
 Θεμελιωδών
 συστατικών και οι
 διαδότες των
 Θεμελιωδών
 δυνάμεων

Leptons	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 0 1 Z⁰ weak force
0.511 MeV -1 $\frac{1}{2}$ e electron	105.7 MeV -1 $\frac{1}{2}$ μ muon	1.777 GeV -1 $\frac{1}{2}$ τ tau	80.4 GeV ± 1 1 W[±] weak force	
	Quarks			Bosons (Forces)

Φερμιόνια: Κουάρκ & Λεπτόνια

FERMIONS

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

Leptons spin = 1/2

Flavor	Mass GeV/c ²	Electric charge
ν_L lightest neutrino*	$(0-0.13)\times 10^{-9}$	0
e electron	0.000511	-1
ν_M middle neutrino*	$(0.009-0.13)\times 10^{-9}$	0
μ muon	0.106	-1
ν_H heaviest neutrino*	$(0.04-0.14)\times 10^{-9}$	0
τ tau	1.777	-1

Quarks spin = 1/2

Flavor	Approx. Mass GeV/c ²	Electric charge
u up	0.002	2/3
d down	0.005	-1/3
c charm	1.3	2/3
s strange	0.1	-1/3
t top	173	2/3
b bottom	4.2	-1/3

Αλληλεπιδράσεις

Properties of the Interactions

The strengths of the interactions (forces) are shown relative to the strength of the electromagnetic force for two u quarks separated by the specified distances.

Property	Gravitational Interaction	Weak Interaction (Electroweak)	Electromagnetic Interaction	Strong Interaction
Acts on:	Mass – Energy	Flavor	Electric Charge	Color Charge
Particles experiencing:	All	Quarks, Leptons	Electrically Charged	Quarks, Gluons
Particles mediating:	Graviton (not yet observed)	W^+ W^- Z^0	γ	Gluons
Strength at $\left\{ \begin{array}{l} 10^{-18} \text{ m} \\ 3 \times 10^{-17} \text{ m} \end{array} \right.$	10^{-41} 10^{-41}	0.8 10^{-4}	1 1	25 60

Κουάρκ

Κβαντικοί Αριθμοί

Κάθε γεύση αντιστοιχεί σε ένα κβαντικό αριθμό

- Παραξενιά (strangeness) $S = -1$
- Χάρη (charm) $C = +1$
- Ομορφιά (beauty) $B = -1$
- Αλήθεια (truth) $T = +1$

	S	C	B	T
d	0	0	0	0
u	0	0	0	0
s	-1	0	0	0
c	0	1	0	0
b	0	0	-1	0
t	0	0	0	1

Αδρόνια: Μεσόνια και Βαρυόνια

Δύο τύποι σχηματισμών των κουάρκ

Βαρυόνια

συνδυασμός 3 κουάρκ

$q \ q \ q$

πρωτόνιο $p = (u \ u \ d)$

νετρόνιο $n = (u \ d \ d)$

Λάμδα $\Lambda = (u \ d \ s)$

Μεσόνια

συνδυασμός κουάρκ-αντικουάρκ

$q \ \bar{q}$

πιόνιο $\pi^+ = (u \ \bar{d})$

K^0 καόνιο $= (\bar{s} \ d)$

Ψ -μεσόνιο $= (c \ \bar{c})$

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

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

Βαρυόνια

Βαρυονικός Αριθμός: B

Δηλώνει το πλήθος των βαρυονίων σε μία αλληλεπίδραση

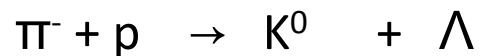
Οποιοδήποτε βαρυόνιο έχει $B = +1$

Οποιοδήποτε αντι-βαρυόνιο έχει $B = -1$

Κανόνας Διατήρησης:

Ο Βαρυονικός Αριθμός διατηρείται σε ΟΛΕΣ τις αλληλεπιδράσεις

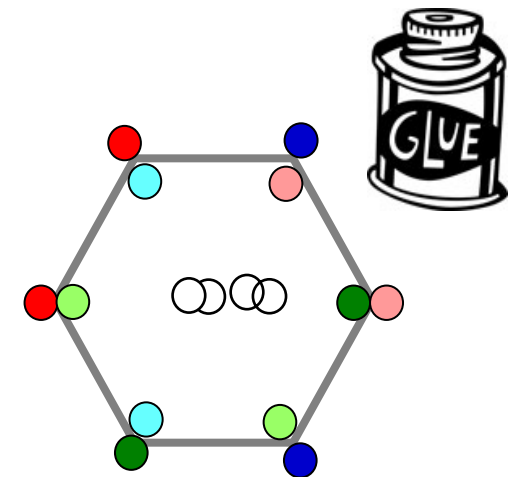
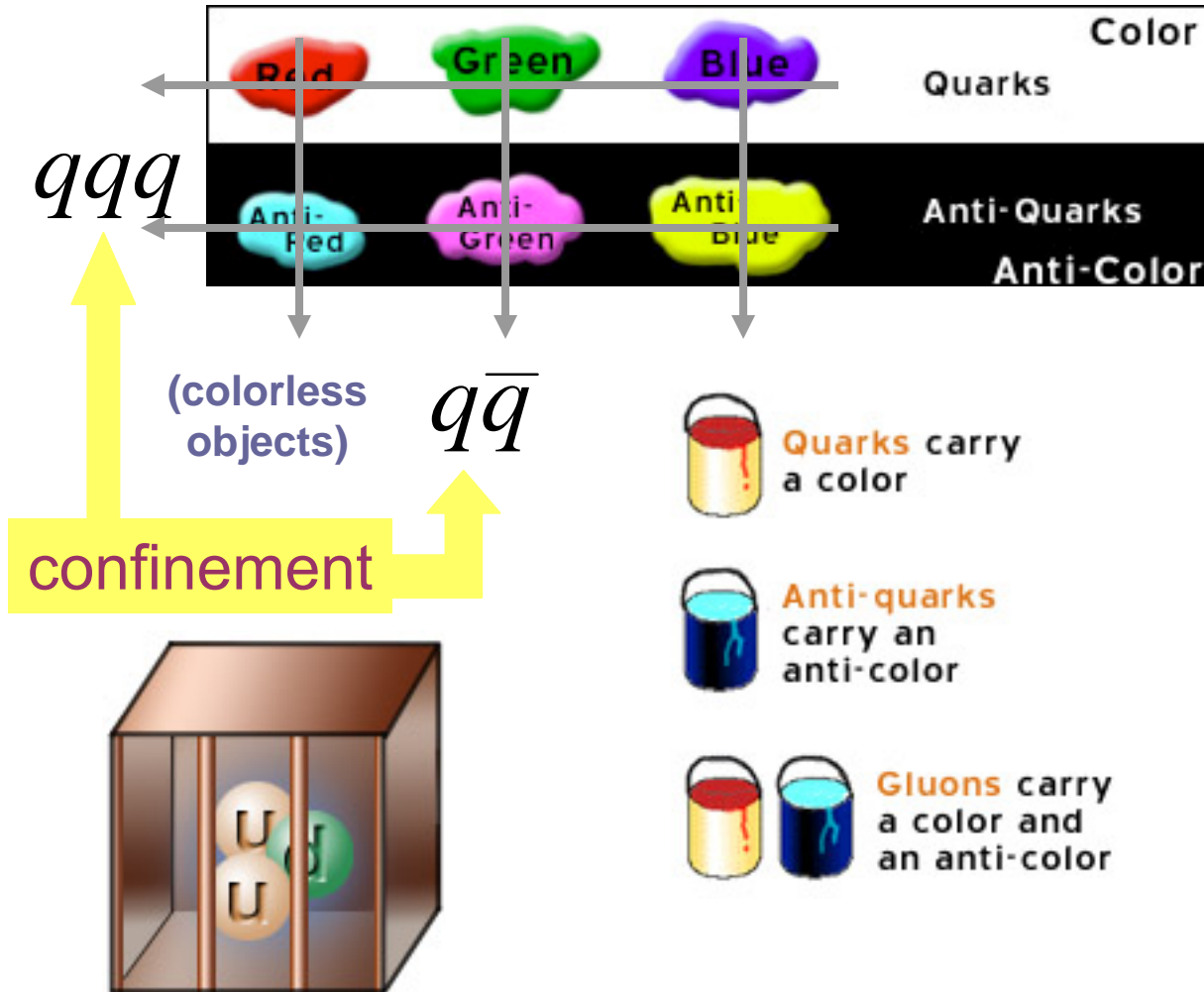
Παράδειγμα:



Anti-ud uud anti-sd usd

$B = 0 + 1 \rightarrow 0 + 1$ διατηρείται

Χρώμα

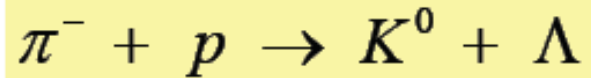


8 Gluons, each with a color and an anti-color charge.

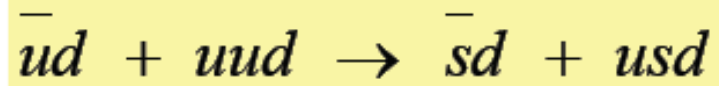
Βαρυόνια

- Παράδειγμα παραγωγής ζεύγους παράξενων σωματίων

Αντίδραση:



Περιγραφή με κουάρκ:



Παραξενιά:

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

Διατήρηση Παραξενιάς!

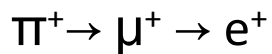
Μεσόνια

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

Μεσόνια

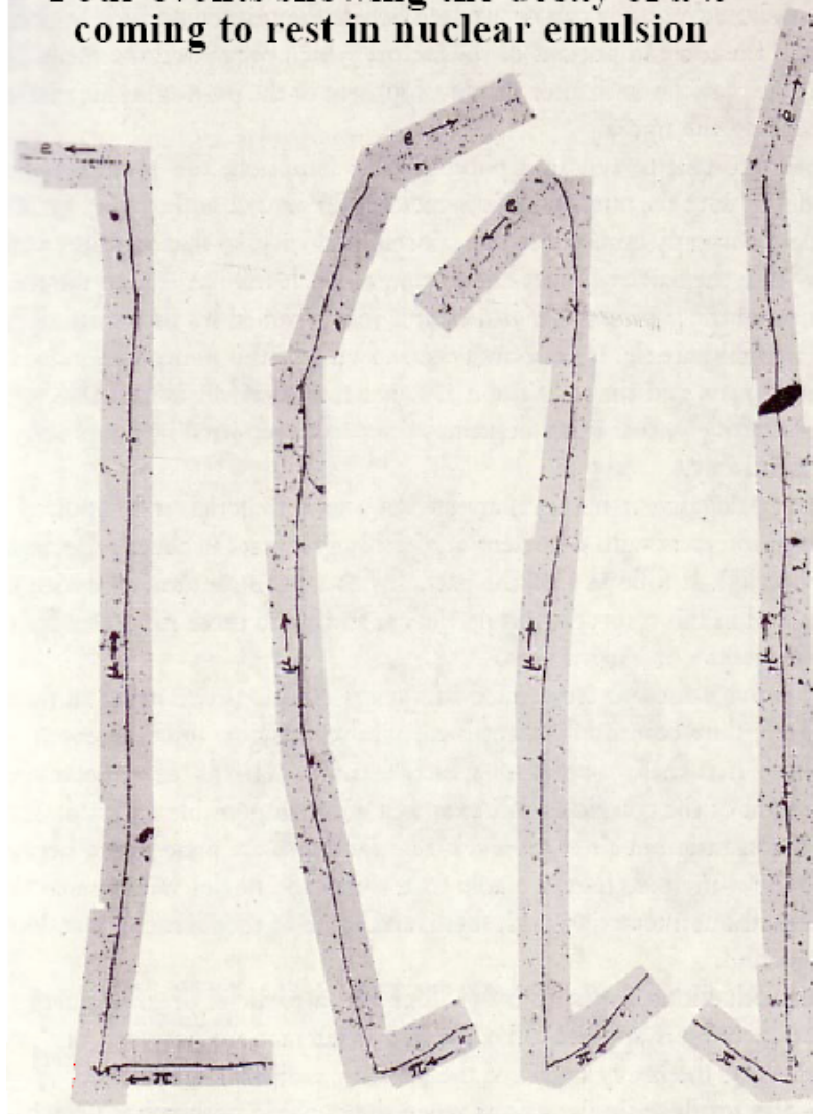
- 1947: Ανακάλυψη του π-μεσονίου (το 'πραγματικό' σωματίδιο Yukawa)

- Παρατήρηση της αλυσιδωτής διάσπασης του :

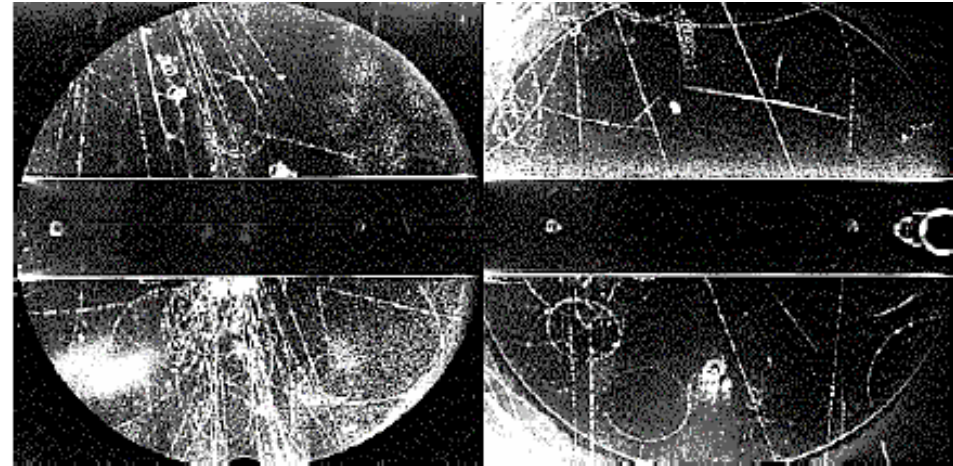
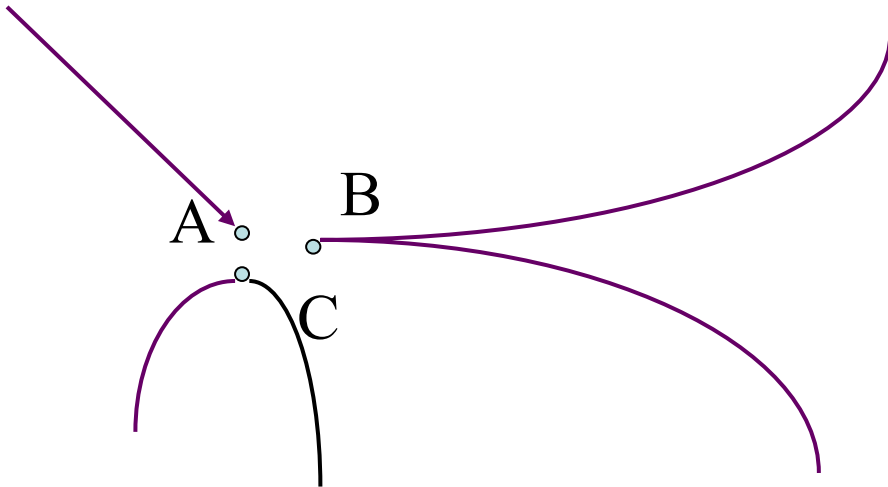
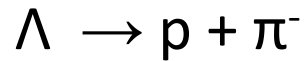
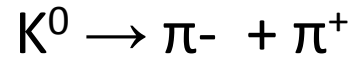
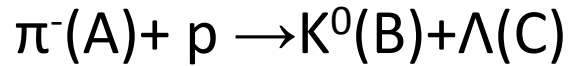


σε γαλακτώματα εκτεθειμένα στην κοσμική ακτινοβολία

Four events showing the decay of a π^+ coming to rest in nuclear emulsion



Παράδοξα/Παράξενα σωματίδια



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

Κουάρκ

Κβαντικοί Αριθμοί

των κουάρκ

	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

και

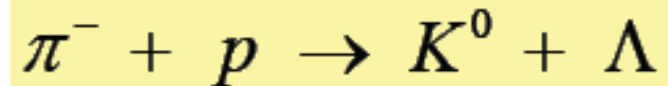
των αντικουάρκ

	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

Κουάρκ

Παράδειγμα παραγωγής ζεύγους παράξενων σωματίων

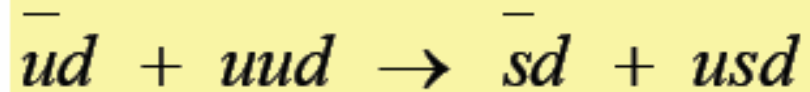
Αντίδραση:



Βαρυονικός Αριθμός:

$$0 + 1 = 0 + 1$$

Περιγραφή με κουάρκ:



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:

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

Λεπτόνια



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

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

$$m_e = 0.5 \text{ MeV}$$

$$\tau_e > 4 \cdot 10^{24} \text{ y}$$

$$m_{\nu_e} < 3 \text{ eV}$$

$$m_\mu = 106 \text{ MeV}$$

$$\tau_\mu = 2 \cdot 10^{-6} \text{ s}$$

$$m_{\nu_\mu} < 0.2 \text{ MeV}$$

$$m_\tau = 1777 \text{ MeV}$$

$$\tau_\tau = 3 \cdot 10^{-13} \text{ s}$$

$$m_{\nu_\tau} < 18 \text{ MeV}$$

Τα ουδέτερα λεπτόνια - νεutrίνο

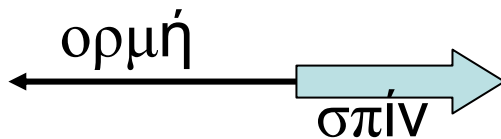
Δεν έχουν φορτίο => Δεν έχουν ηλεκτρομαγνητικές αλληλεπιδράσεις

Τα νεutrίνα είναι 'αριστερόστροφα' =>

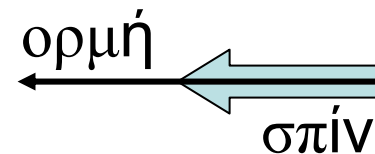
Το σπίν έχει διεύθυνση **αντίθετη** από το διάνυσμα της **ορμής**

Τα **αντι**-νεutrίνα είναι 'δεξιόστροφα' =>

το **σπιν** έχει διεύθυνση **ομόρροπη** με το διάνυσμα της **ορμής**



νεutrίνο



αντι-νεutrίνο

ν_e (Pauli 1930)

Στην προσπάθεια να εξηγηθεί η β-διάσπαση

$$(Z,A) \rightarrow (Z+1, A) + e^- + \bar{\nu}_e$$

$$(Z',A') \rightarrow (Z'-1, A') + e^+ + \nu_e$$

Είναι η διάσπαση δέσμιων στον πυρήνα p και n

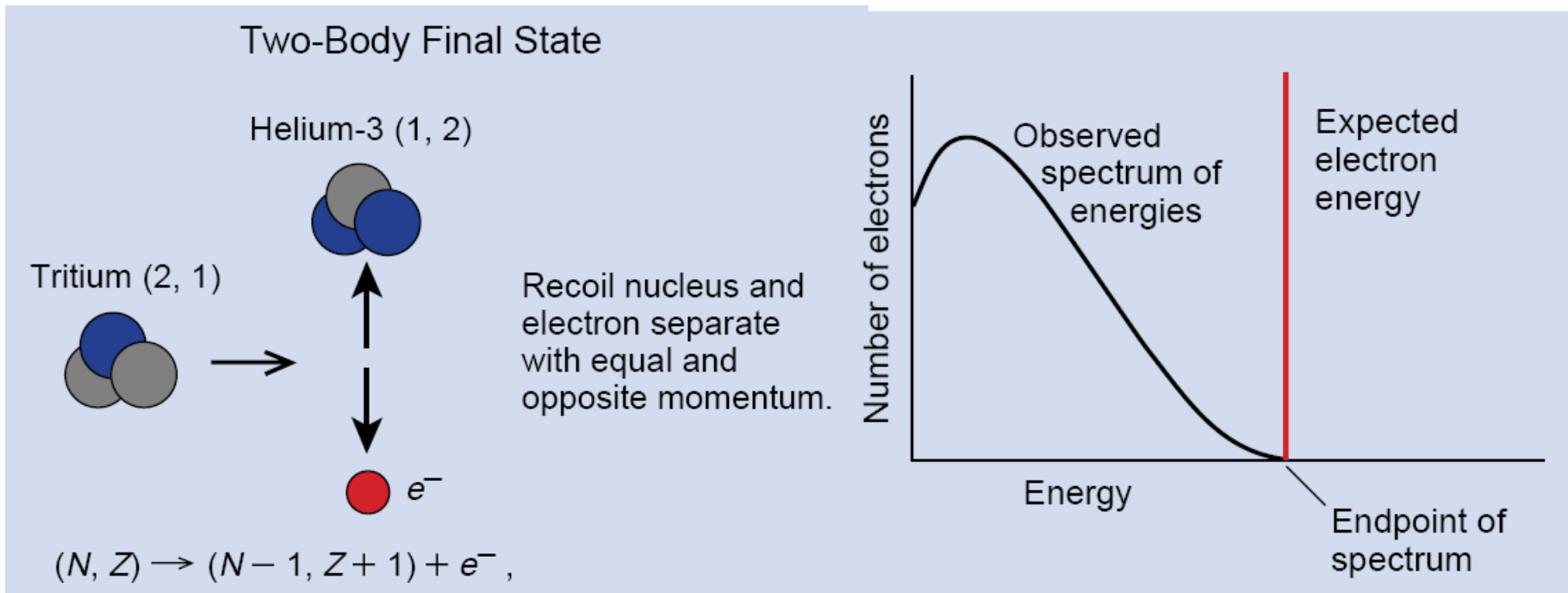
$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$$

$$p \rightarrow n + e^+ + \nu_e$$

Μόνο το ελεύθερο n μπορεί να διασπαστεί $m_n > (m_p + m_e)$

β-διάσπαση

Αν δεν υπάρχει νεutrino $E_e = \Delta M = M(Z, A) - M(Z+1, A)$



β-διάσπαση

Αν υπάρχει νεutrino $m_e \leq E_e \leq \Delta M - m_{\nu e}$

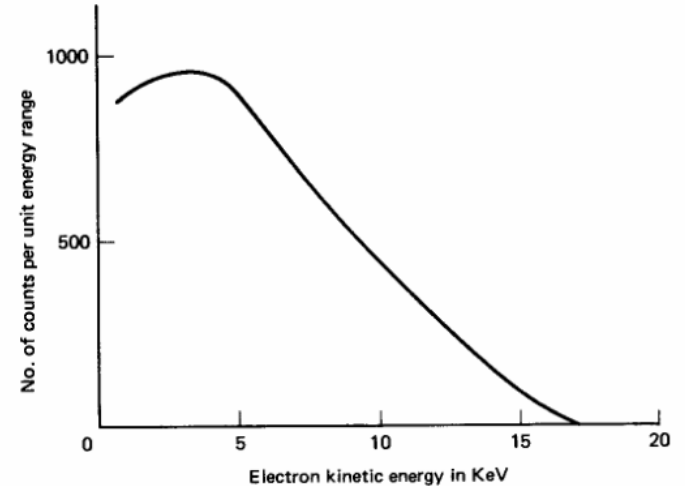
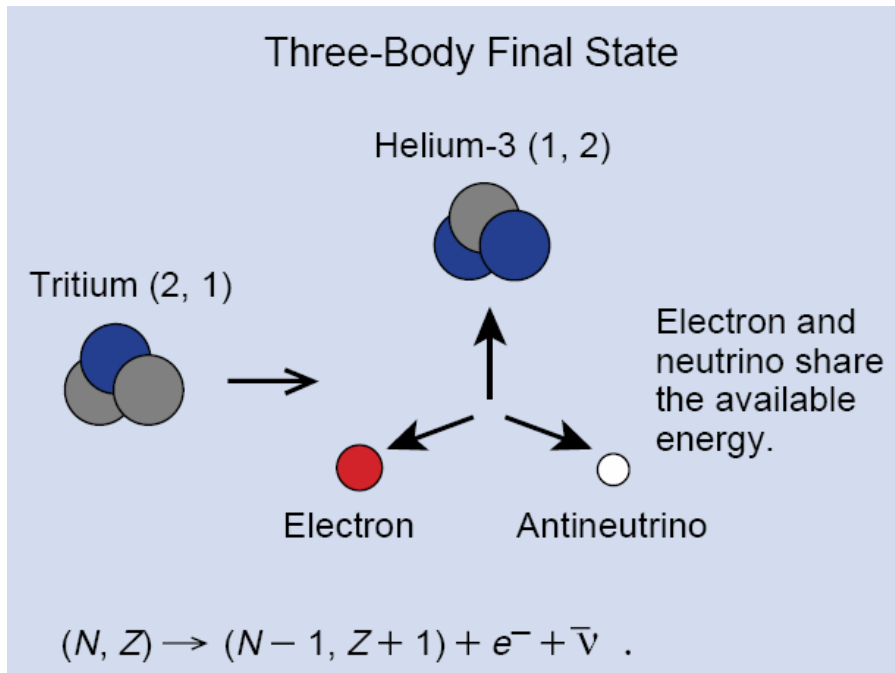
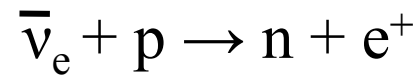
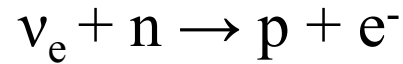


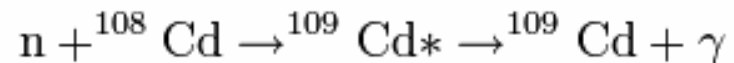
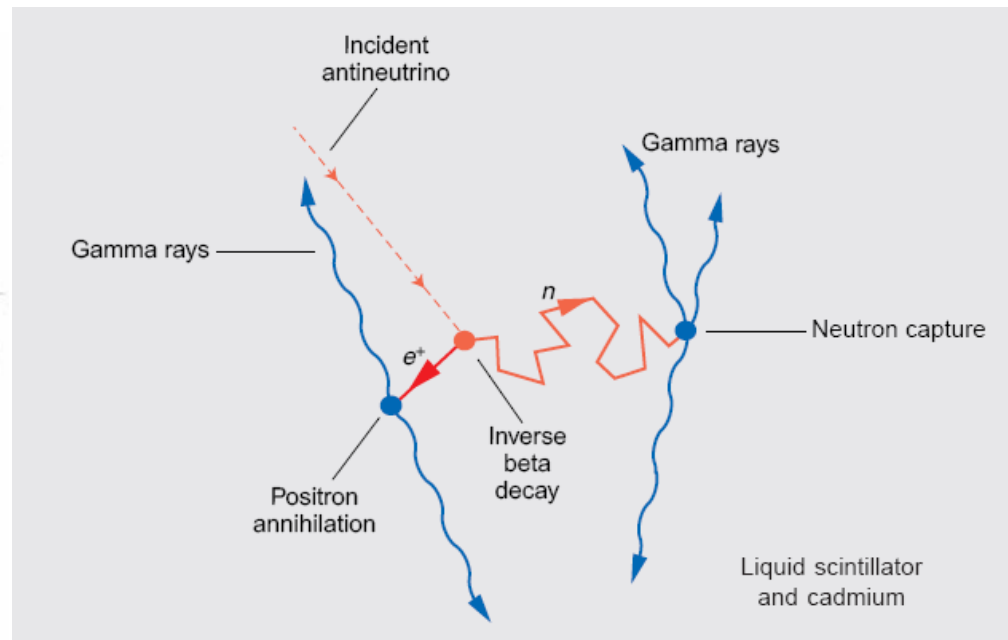
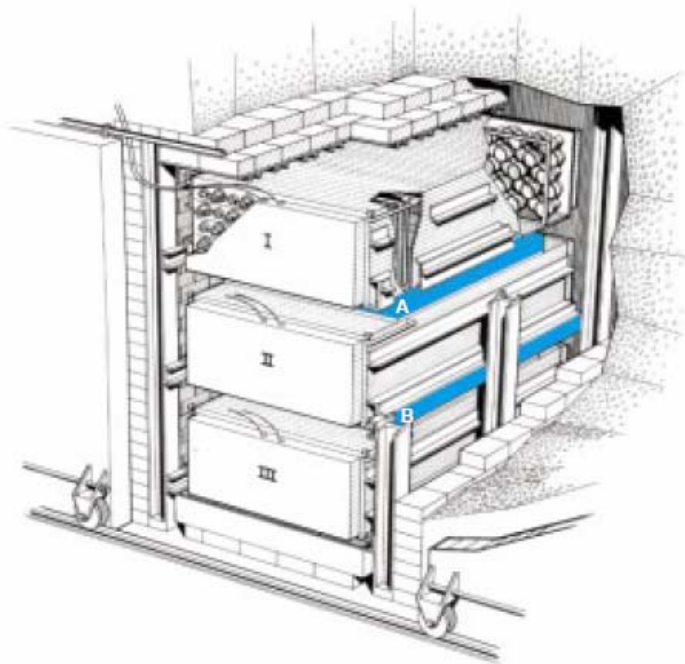
Figure 1.6 The beta decay spectrum of tritium (${}^3_1\text{H} \rightarrow {}^3_2\text{He}$). (Source: G. M. Lewis, *Neutrinos* (London: Wykeham, 1970), p. 30.)

Πείραμα Reines – Cowan

νετρίνα και αντινετρίνα μπορούν να ανιχνευτούν μέσω των αντίστροφων β-διασπάσεων

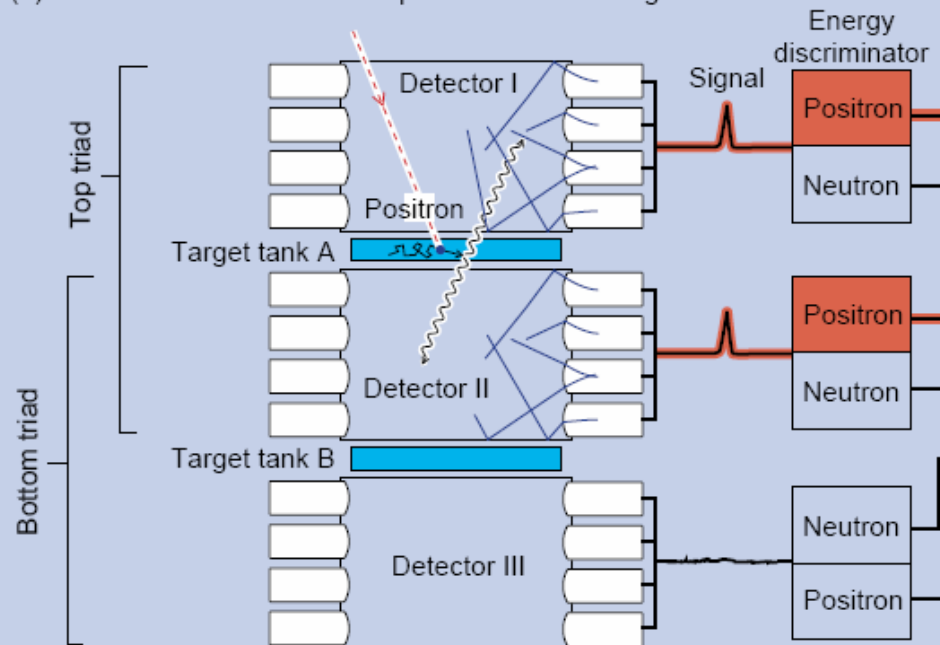


Πείραμα Reines – Cowan

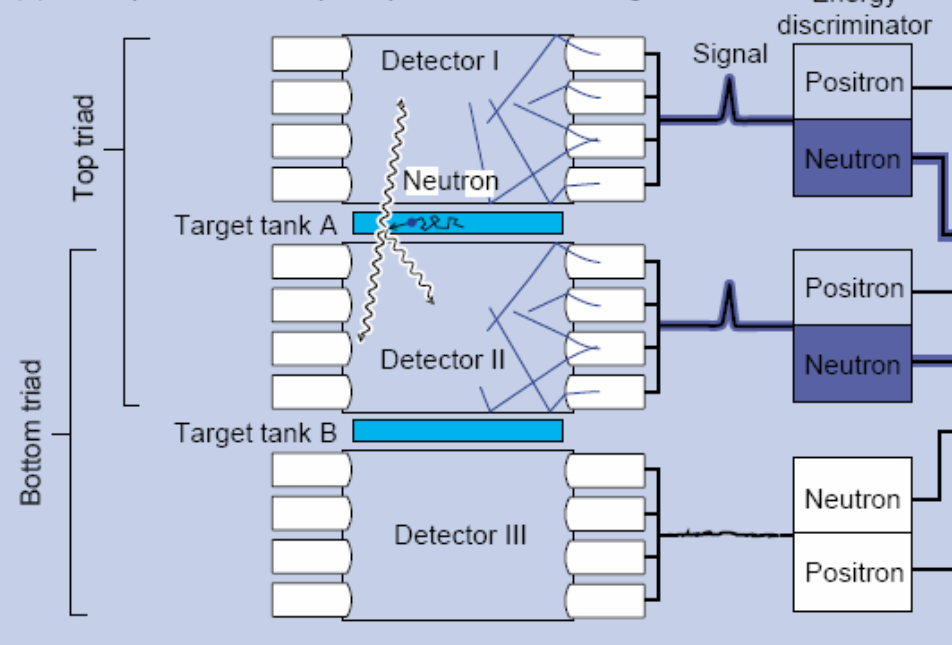


Πείραμα Reines – Cowan

(a) $T = 0$ Positron annihilation produces electron signal.



(b) $T = 3 \mu\text{s}$ Neutron capture produces neutron signal.



Λεπτόνια

Λεπτονικός Αριθμός

	e^-	ν_e	μ^-	ν_μ	τ^-	ν_τ
L_e	+1	+1	0	0	0	0
L_μ	0	0	+1	+1	0	0
L_τ	0	0	0	0	+1	+1

	e^+	$\bar{\nu}_e$	μ^+	$\bar{\nu}_\mu$	τ^+	$\bar{\nu}_\tau$
L_e	-1	-1	0	0	0	0
L_μ	0	0	-1	-1	0	0
L_τ	0	0	0	0	-1	-1

- Κάθε 'οικογένεια' λεπτονίων **ΔΙΑΤΗΡΕΙ** τον αντίστοιχο Λεπτονικό Αριθμό
- Ο Λεπτονικός αριθμός **ΔΙΑΤΗΡΕΙΤΑΙ ΠΑΝΤΑ**

Λεπτόνια

Διατήρηση Λεπτονικού Αριθμού

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Διάσπαση των Λεπτονίων

Χρόνοι ζωής μ ($2.2 \times 10^{-6}\text{s}$) τ ($2.9 \times 10^{-13}\text{s}$)

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

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

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

$$\tau^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu + \nu_\tau$$

Για το τ υπάρχουν και πολλές διασπάσεις με αδρόνια στις τελικές καταστάσεις.

Κουάρκ

Διατήρηση του συνολικού αριθμού των κουάρκ

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

Κουάρκ και Λεπτόνια

Σύνοψη

- **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)

Οι κβαντικοί αριθμοί των κουάρκ

Παραγωγή παράδοξων σωματιδίων (ισχυρές)

$$\begin{array}{ccc} p & + & p \\ uud & + & uud \end{array} \rightarrow \begin{array}{ccc} p & + & \Lambda & + & K^+ \\ uud & + & uds & + & \bar{s}u \end{array}$$

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

Παραγωγή charm (E&M)

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

$C = 0$ $C = 1 + (-1)$

Αλληλεπιδράσεις και Πεδία στη Σωματιδιακή Φυσική

Κλασική & κβαντική εικόνα πεδίου

- Κλασική εικόνα αλληλεπίδρασης αλληλεπίδρασης: Το δυναμικό ή το πεδίο ενός σώματος που επιδρά στο άλλο σώμα.
- Κβαντική θεώρηση θεώρηση: Η αλληλεπίδραση περιγράφεται με την ανταλλαγή κβάντων (μποζονίων) συγκεκριμένων για κάθε τύπο αλληλεπίδρασης.

Η διαδικασία πραγματοποιείται σε χρονικό διάστημα που καθορίζεται από την Αρχή της Αβεβαιότητας





$$\Delta E \cdot \Delta t \sim \hbar$$

Μποζόνια : μεταδότες δυνάμεων


BOSONS

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

Unified Electroweak spin = 1

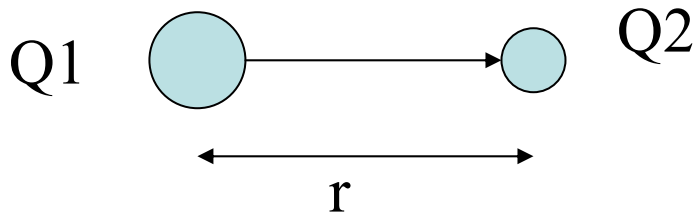
Name	Mass GeV/c ²	Electric charge
 photon	0	0
  W bosons	80.39	-1 +1
 Z boson	91.188	0

Strong (color) spin = 1

Name	Mass GeV/c ²	Electric charge
 gluon	0	0

Η εικόνα στην Κλασική Φυσική

- Η αλληλεπίδραση μεταξύ δύο φορτισμένων σωμάτων σε απόσταση εκφράζεται-περιγράφεται με το **πεδίο ή το δυναμικό** του ενός σώματος το οποίο επιδρά πάνω στο άλλο σώμα



$$\vec{F}(r) = Q2 \bullet \vec{E}(r)$$

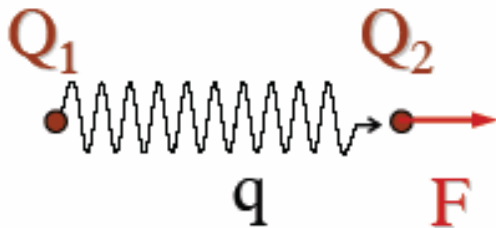
$$\vec{E}(r) \propto Q1 \bullet \frac{\hat{r}}{r^2}$$

$$\vec{F}(r) \propto Q1 \bullet Q2 \frac{\hat{r}}{r^2}$$

Η εικόνα στην Κβαντική Φυσική

• Η αλληλεπίδραση μεταξύ δύο σωμάτων σε απόσταση εκφράζεται - περιγράφεται την **ανταλλαγή κβάντων -των μποζονίων-** που διαφέρουν ανάλογα με το είδος της αλληλεπίδρασης.

• Μεταξύ των δύο προηγούμενων φορτίων ανταλλάσσεται ένα 'δυναμικό' φωτόνιο με ορμή p



$$\delta x \bullet \delta p \approx \hbar$$

$$r \bullet \delta p \approx \hbar \Rightarrow \delta p \approx \hbar / r$$

$$r \bullet c = \delta t \Rightarrow \delta t = r / c \Rightarrow \delta p / \delta t = \frac{\hbar c}{r^2}$$

$$\frac{\delta p}{\delta t} = \frac{\hbar c}{r^2}$$

Η εικόνα στην Κβαντική Φυσική

- Η δύναμη μεταξύ των δύο φορτίων είναι ανάλογη της μεταβολής της ορμής των φωτονίων που εκπέμπουν τα φορτία
- Ο αριθμός των φωτονίων που εκπέμπονται-ανταλλάσσονται είναι ανάλογος των φορτίων $Q_1 \cdot Q_2$ που αλληλεπιδρούν
- Το μποζόνιο-κβάντουμ μεταφέρει ενέργεια και ορμή => οι νόμοι διατήρησης E, p ισχύουν ΜΟΝΟ αν η ανταλλαγή του μποζονίου πραγματοποιείται σε χρόνο $\delta t \leq \hbar / \delta E$ που τον ορίζει η Αρχή της Απροσδιοριστίας
- Αυτά τα πρόσκαιρα κβάντα-μποζόνια λέγονται “ΔΥΝΗΤΙΚΑ” (virtual)

Η εικόνα στην Κβαντική Φυσική

Μετά την εκπομπή του φωτονίου και πριν την επανααπορρόφησή του η ενέργεια ΔE διατηρείται

Η Αρχή της Απροσδιοριστίας του Heisenberg επιτρέπει: $\Delta E \cdot \Delta t \geq \hbar$

- Ο χρόνος που απαιτείται για να παρατηρηθεί ενέργεια με αβεβαιότητα ΔE : $\Delta t \geq \hbar / \Delta E$
- Παραβίαση της ενέργειας κατά ΔE μπορεί να συμβεί σε χρόνο μικρότερο από Δt : $\Delta t \leq \hbar / \Delta E$

Αλληλεπιδράσεις και πεδία

Σύνοψη

- Αλληλεπίδραση : ανταλλαγή ενέργειας και ορμής μεταξύ σωματιδίων
- Ηλεκτρομαγνητική αλληλεπίδραση : ανταλλαγή 'δυναμικών' φωτονίων μεταξύ φορτισμένων σωματιδίων → Σκέδαση Rutherford → δυνάμεις Coulomb
- 'Πραγματικό' σωματίδιο : όταν ισχύει: $E^2 = p^2 c^2 + m^2 c^4$
(το m αντιστοιχεί στη μάζα ηρεμίας του)
- Δυναμικό σωματίδιο: όταν $\Delta E \neq 0$ ισχύει: $E^2 = p^2 c^2 + m^2 c^4$
($m \neq 0$ αντιστοιχεί στη μάζα ηρεμίας του σωματιδίου)
- Το δυναμικό σωματίδιο μπορεί να υπάρξει ΜΟΝΟ για χρόνο που του επιτρέπεται από την αρχή της απροσδιοριστίας

Κλασική και Κβαντομηχανική Θεώρηση

- Η κβαντομηχανική θεώρηση της εκπομπής και απορρόφησης 'δυναμικών' φωτονίων ΔΕΝ είναι λιγότερο πλασματική από την κλασική θεώρηση του πεδίου που περιβάλλει το φορτίο
- *Ούτε το πεδίο ούτε τα 'δυναμικά' κβάντα είναι άμεσα παρατηρήσιμο-
το μετρήσιμο μέγεθος είναι η δύναμη*
- ΑΛΛΑ η διάδοση των πεδίων γίνεται με ελεύθερα φωτόνια => η περιγραφή των ηλεκτρομαγνητικών αλληλεπιδράσεων με την ανταλλαγή δυναμικών φωτονίων είναι κατάλληλη και σήμερα έχουμε αποδείξεις ότι είναι η πλέον κατάλληλη
- ...κατ'επέκταση η περιγραφή και των άλλων αλληλεπιδράσεων στον μικρόκοσμο βασίστηκε στην ανταλλαγή δυναμικών μποζονίων

Η πυρηνική δύναμη είναι απόρρηια ανταλλαγής μποζονίων (Yukawa)

- 1937: ο H. Yukawa προτείνει το π-μεσόνιο σαν φορέα των πυρηνικών δυνάμεων
- Η σχέση ανάμεσα στην εμβέλεια των πυρηνικών δυνάμεων και της μάζας του μεσονίου ανταλλαγής

$$R_{\text{int}} = \frac{\hbar}{mc} \quad \longrightarrow \quad mc^2 \approx 200 \text{ MeV for } R_{\text{int}} \approx 10^{-13} \text{ cm}$$

- Το μεσόνιο του Yukawa ανακαλύφθηκε το 1947 στην κοσμική ακτινοβολία

Μποζόνια : Οι Φορείς των Δυνάμεων

- Απο την εξίσωση ελεύθερου σωματίου προκύπτει η διαφορική εξίσωση του σωματιδίου κι απο την λύση της η κυματοσυνάρτηση του ελεύθερου σωματίου:

$$E^2 = p^2 c^2 + m^2 c^4 \quad \hat{E} = i\hbar \frac{\partial}{\partial t}$$
$$\hat{P} = -i\hbar \nabla$$

$$\nabla^2 \psi - \frac{m^2 c^2}{\hbar^2} \psi - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} = 0$$

- αν $m=0 \Rightarrow$ η λύση της εξίσωσης είναι το πλάτος κύματος του ελεύθερου (άμαζου) φωτονίου ή δηλώνει το δυναμικό ενός σημείου στο χώρο

Μποζόνια : Οι Φορείς των Δυνάμεων

- Η εξίσωση που δίνει το στατικό δυναμικό του πεδίου που προκύπτει από σωματίδιο μάζας m

$$\nabla^2 U(r) = m^2 U(r)$$

$U(r)$: το δυναμικό Yukawa

$$U(r) = \frac{g}{4\pi r} e^{-r/R}$$

όπου g δίνει την ισχύ της σημειακής πηγής.

- $R = \hbar c / mc^2$ είναι το μήκος κύματος Compton του σωματίου

Θεωρία Yukawa

Μελέτη της λύσης

$$U(r) = \frac{g}{4\pi r} e^{-r/R}, \quad R = \frac{\hbar}{mc}$$

- Το R εκφράζει την εμβέλεια του πεδίου.
- Δεδομένου ότι το R είναι της τάξεως του 10^{-15} m, μπορούμε να προβλέψουμε τη μάζα του διαδότη:

$$R = \frac{\hbar}{mc} \Rightarrow mc = \frac{\hbar}{R} \Rightarrow mc^2 = \frac{\hbar c}{R} \Rightarrow mc^2 \approx \frac{197 \text{ MeV} \cdot \text{fm}}{1.4 \text{ fm}} \approx 140 \text{ MeV}$$

Το αποτέλεσμα ταυτίζεται με τη **μάζα του πιονίου**, το οποίο ανακαλύφτηκε το 1947.

Μποζόνια : Οι Φορείς των Δυνάμεων

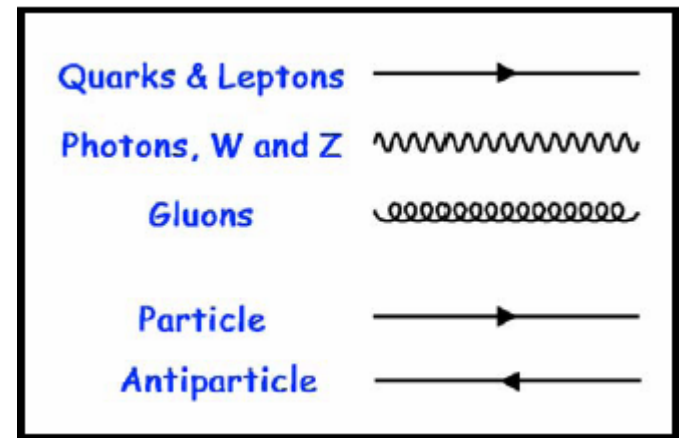
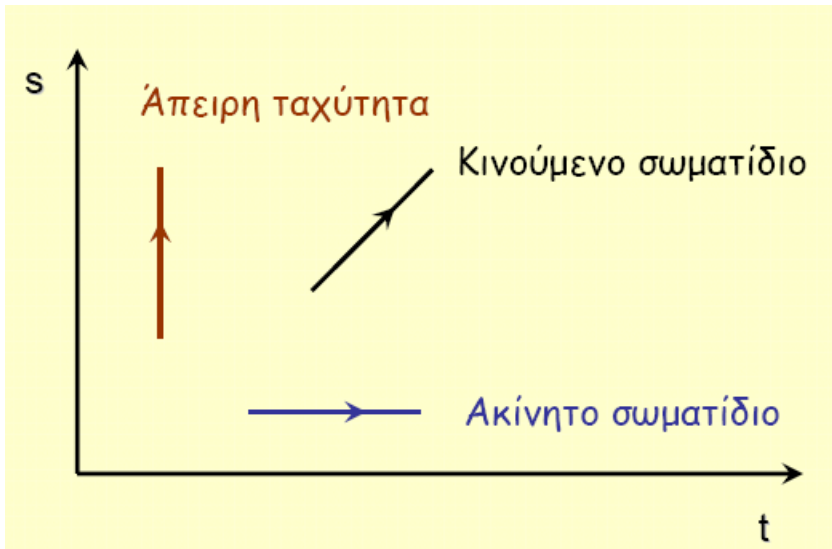
- Στον ηλεκτρομαγνητισμό: $\nabla^2 U(r) = 0 \Rightarrow U(r) = q/4\pi r$
- => η σταθερά g στο δυναμικό Yukawa ισοδυναμεί με το φορτίο στον ηλεκτρομαγνητισμό
- Το πλάτος σκέδασης σωματίου από δυναμικό U (που προκύπτει από πηγή με ισχύ g): $f(q) = g \int U(r) e^{iq \cdot r} \bullet dV$
(q η μεταφορά της ορμής)

$$\Rightarrow f(q) = \frac{g \cdot g}{|\vec{q}|^2 + m^2}$$

Περιγράφει την αλληλεπίδραση δύο σωματιδίων μέσω ανταλλαγής μποζονίου

Διαγράμματα Feynman

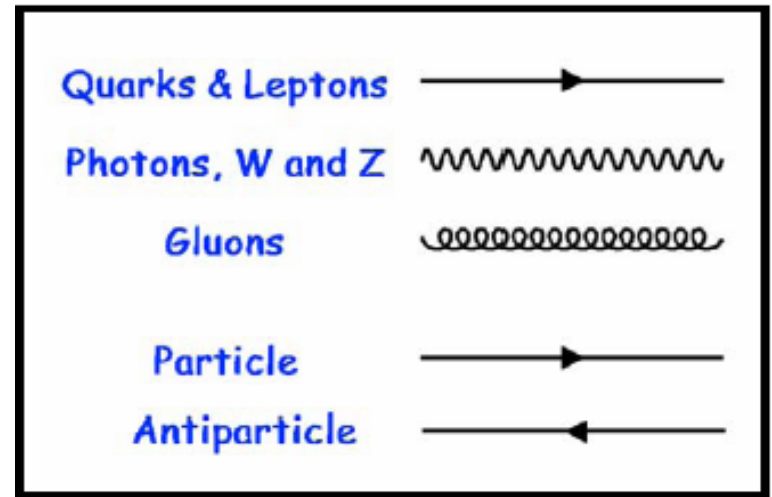
- Διαγράμματα Feynman είναι διαγράμματα για την αναπαράσταση της αλληλεπίδρασης στοιχειωδών σωματιδίων
 - Ο χρόνος εξελίσσεται οριζόντια, ο χώρος κατακόρυφα.
 - Τα βέλη δείχνουν τη φορά κίνησης των σωματιών που πλησιάζουν ή απομακρύνονται από τις κορυφές.
 - Εισερχόμενα σωματάρια ισοδυναμούν με εξερχόμενα αντισωματάρια.



Διαγράμματα Feynman

Βασικοί κανόνες σε κάθε κόμβο:

- E , p διατηρείται
- Q διατηρείται
- Σπιν διατηρείται
- Βαρυονικός Αριθμός
- Λεπτονικός Αριθμός



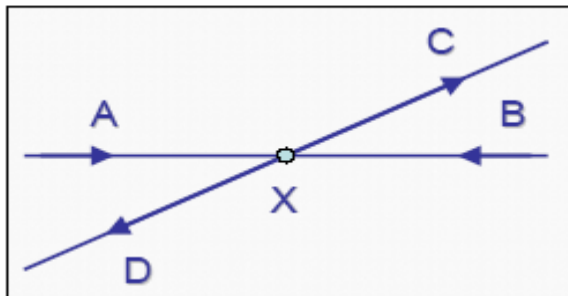
- φερμιόνια (θετικό t) \longrightarrow
- anti- φερμιόνια (αρνητικό t) \longleftarrow
- Μποζόνια $\begin{matrix} \text{~~~~~} \\ \text{~~~~~} \end{matrix}$

- Το σημείο σύζευξης (κόμβος) δηλώνει την ισχύ της σύζευξης

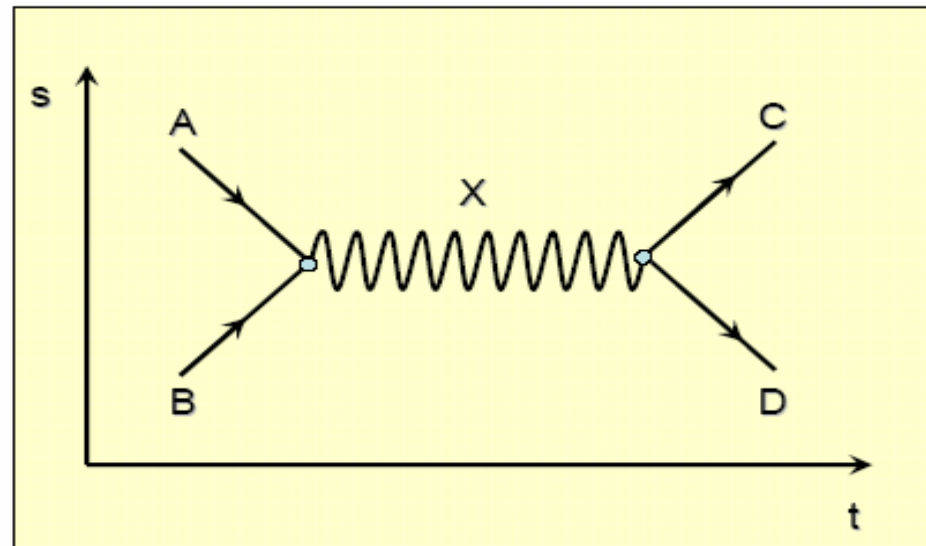
Διαγράμματα Feynman

Διαγράμματα Εξαϋλωσης (Annihilation) ή Σχηματισμού (Formation)

Τα σωματίδια A και B συγκρούονται σχηματίζοντας το ενδιάμεσο σωματίδιο X , το οποίο στη συνέχεια διασπάται στα C και D .



Η αλληλεπίδραση όπως φαίνεται στο σύστημα του εργαστηρίου.

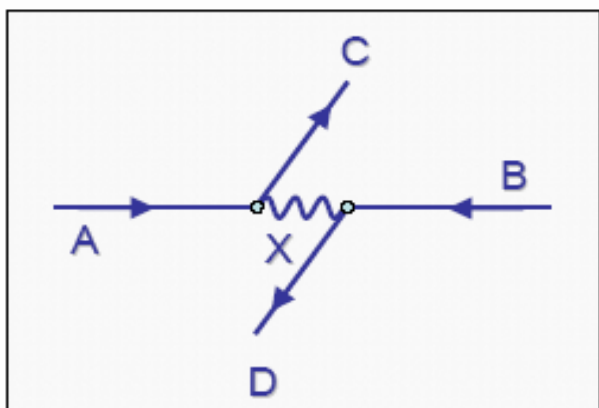


Σχηματική αναπαράσταση της αλληλεπίδρασης με διάγραμμα Feynman. Σε κάθε κορυφή τουλάχιστον το ηλεκτρικό φορτίο διατηρείται.

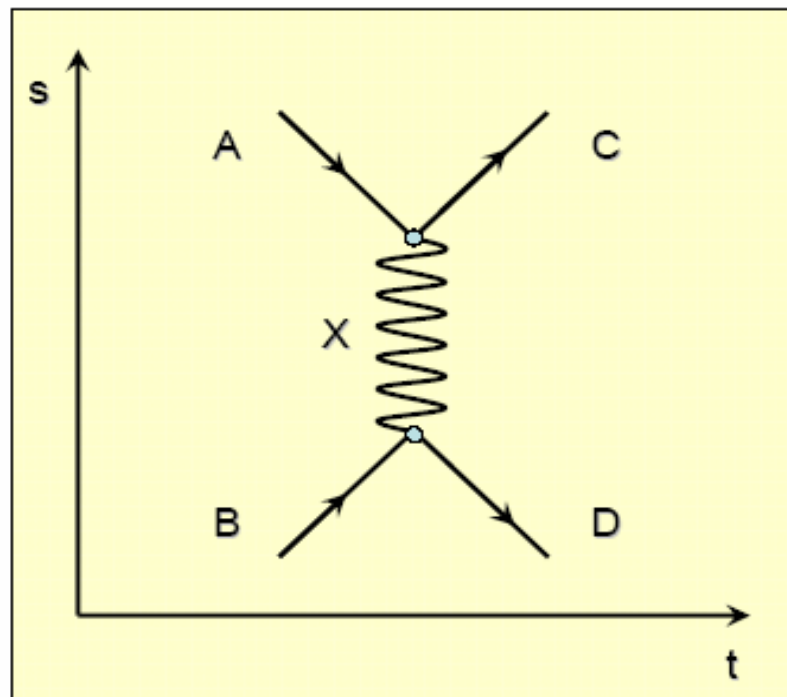
Διαγράμματα Feynman

Διαγράμματα Ανταλλαγής (Exchange Diagrams)

Τα σωματίδιο A σκεδάζεται από το σωματίδιο B ανταλλάσσοντας το ενδιάμεσο σωματίδιο X. Τα αρχικά σωματίδια μετασχηματίζονται αντίστοιχα στα C και D.



Η αλληλεπίδραση όπως φαίνεται στο σύστημα του εργαστηρίου.

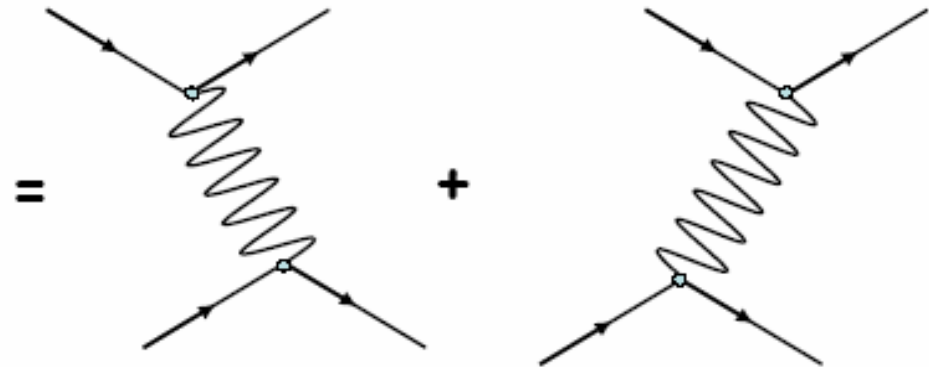
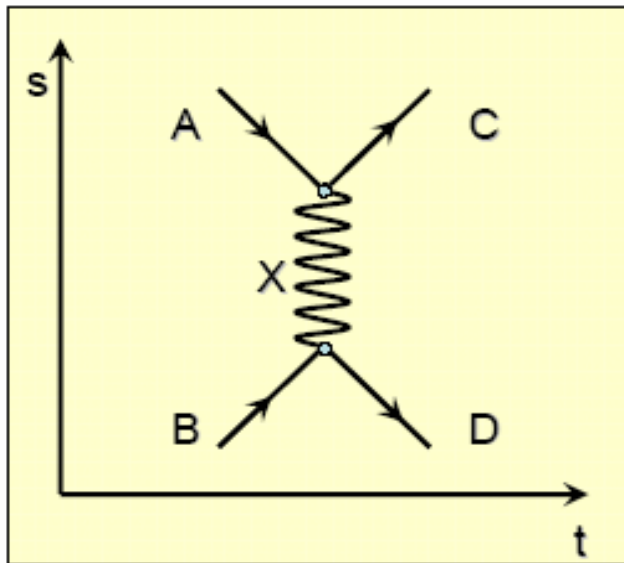


Αναπαράσταση με διάγραμμα Feynman.

Διαγράμματα Feynman

Διαγράμματα Ανταλλαγής (Exchange Diagrams)

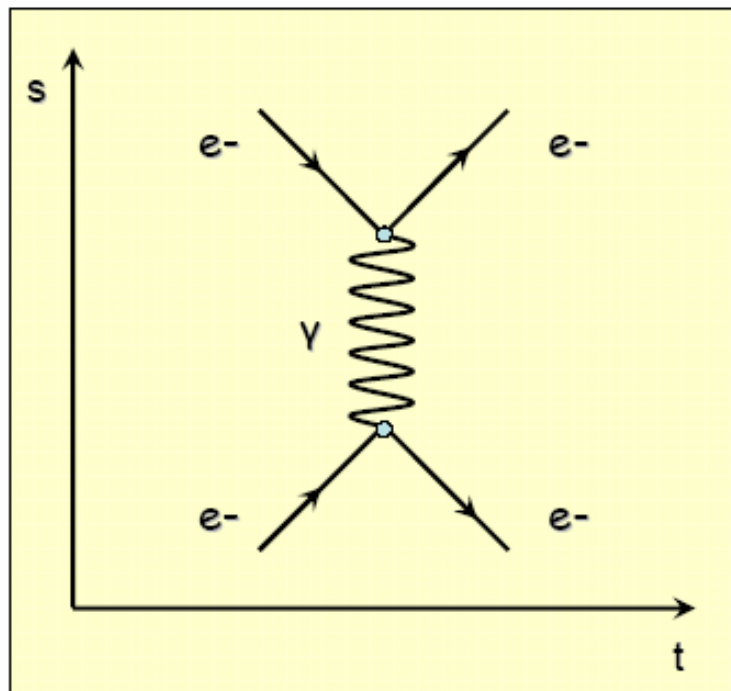
Δεν γνωρίζουμε αν το X εκπέμφθηκε από το A και απορροφήθηκε από το B ή αντίστροφα.



Διαγράμματα Feynman

Δυναμικά Σωματίδια Ανταλλαγής (Virtual Particles)

Σε όλες τις προηγούμενες περιπτώσεις το σωματίο X χαρακτηρίζεται σαν **δυναμικό**. Για το χρόνο που υπάρχει υπακούει στην αρχή της αβεβαιότητας $\Delta E \cdot \Delta t \sim \hbar$ αλλά η μάζα του **διαφέρει** από τη μάζα ηρεμίας!



Παράδειγμα 1

Στην σκέδαση δύο ηλεκτρονίων (ηλεκτρομαγνητική αλληλεπίδραση) το ενδιάμεσο φωτόνιο ($X=\gamma$) έχει:

Ενέργεια: $E = 0$

Ορμή: $p = 2p_e$

και από τη σχέση $E^2 = p^2 c^2 + m^2 c^4$

Μάζα: $m = 2ip_e/c$

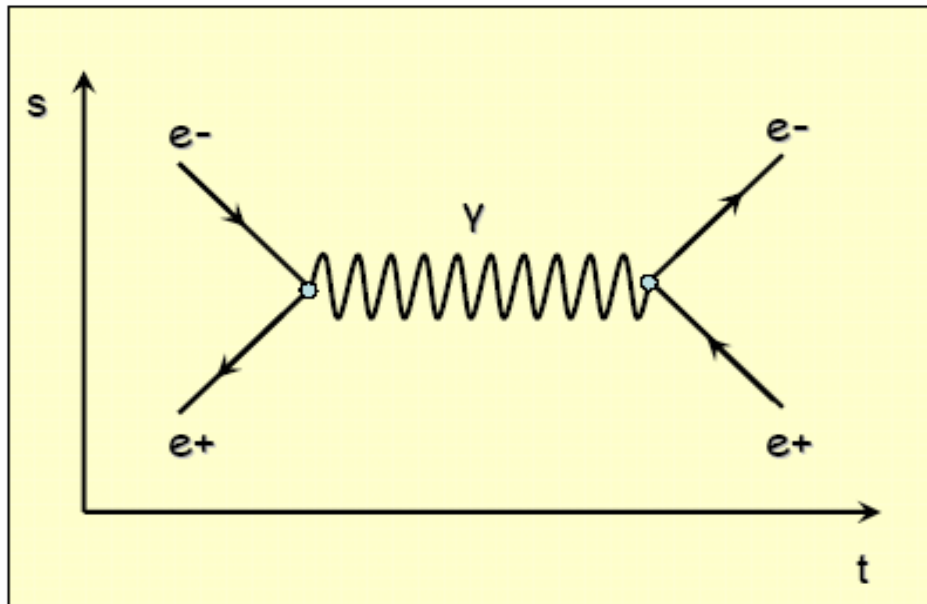
Φανταστική μάζα!

Διαγράμματα Feynman

Δυνητικά Σωματάρια Ανταλλαγής (Virtual Particles)

Παράδειγμα 2

Εξαΰλωση ηλεκτρονίου-ποζιτρονίου (ηλεκτρομαγνητική αλληλεπίδραση)



Για το φωτόνιο ισχύει:

Ενέργεια: $E = 2E_e$

Ορμή: $p = 0$

και από τη σχέση

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

Μάζα: $m = 2E_e / c^2$

Άρα το φωτόνιο είναι
δυναμικό!

Διαγράμματα Feynman

Δυνητικά Σωματάρια Ανταλλαγής (Virtual Particles)

Το φωτόνιο του προηγούμενου παραδείγματος με $E=2E_e$ και $p=0$ συμπεριφέρεται τελείως αφύσικα παραβιάζοντας την βασική σχέση μεταξύ ενέργειας και ορμής

$$E = p c$$

Για την άρση της δυσκολίας αυτής στηριζόμαστε στην αρχή της αβεβαιότητας. Μπορούμε να δεχτούμε ότι το δυνητικό αυτό φωτόνιο υφίσταται διακύμανση στην ενέργεια

$$\Delta E = 2E_e$$

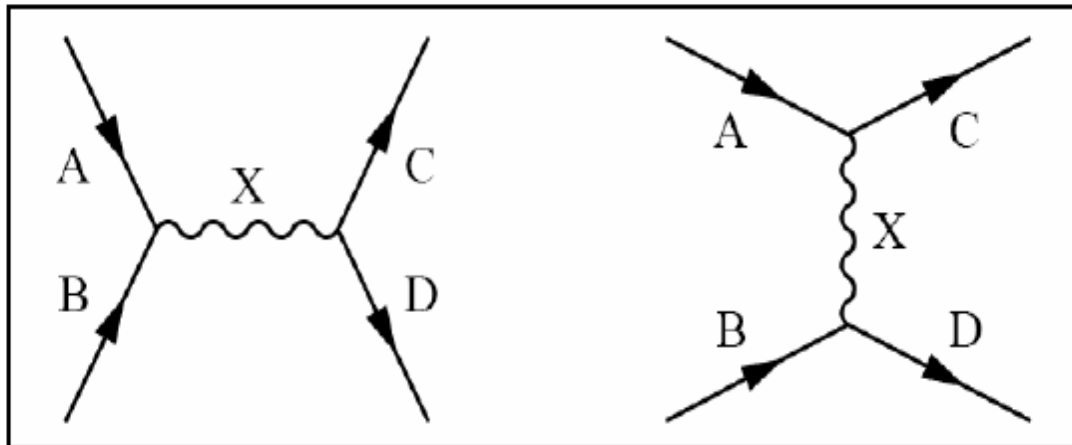
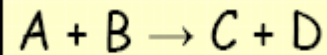
(όσο είναι δηλαδή η πλεονάζουσα ενέργεια). Άρα το δυνητικό φωτόνιο μπορεί να υπάρξει για χρονικό διάστημα:

$$\Delta t \approx \hbar / 2E_e$$

Διαγράμματα Feynman

Γενικές Ιδιότητες

Ως επί το πλείστον τα διαγράμματα Feynman παριστούν διεργασίες της μορφής:

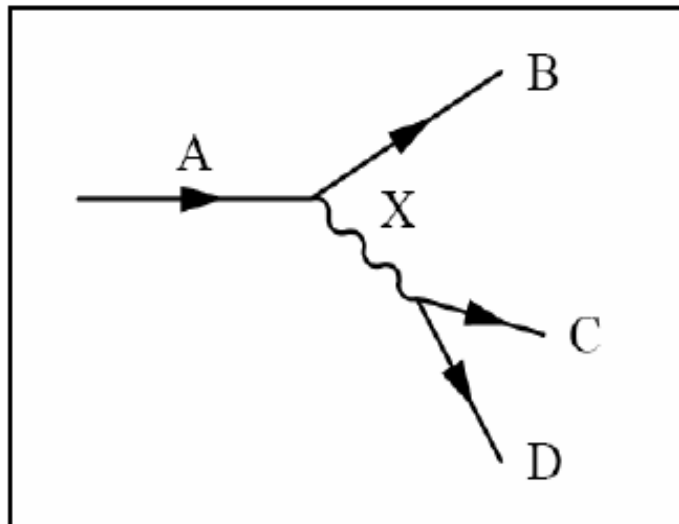


Διαγράμματα Feynman

Γενικές Ιδιότητες

ή της μορφής:

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



A, B, C, D

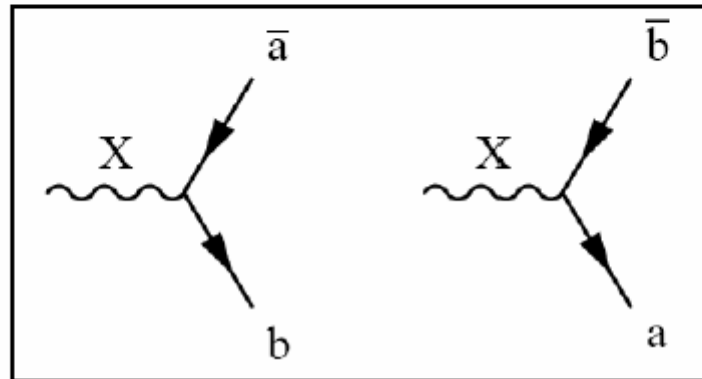
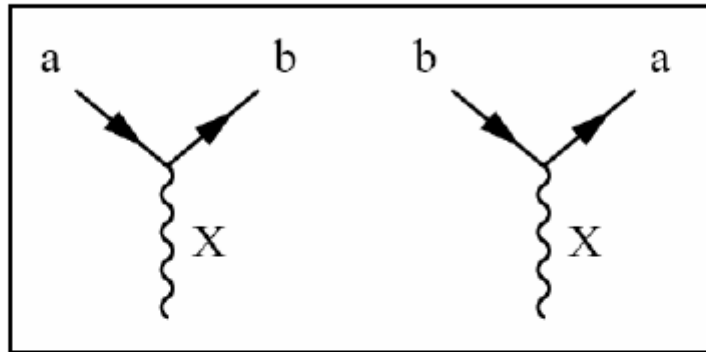
- Κουάρκ
- Λεπτόνια
- Αντικουάρκ
- Αντιλεπτόνια

X

- φωτόνιο (γ)
- γλουόνιο (g)
- $W^+ W^- Z^0$

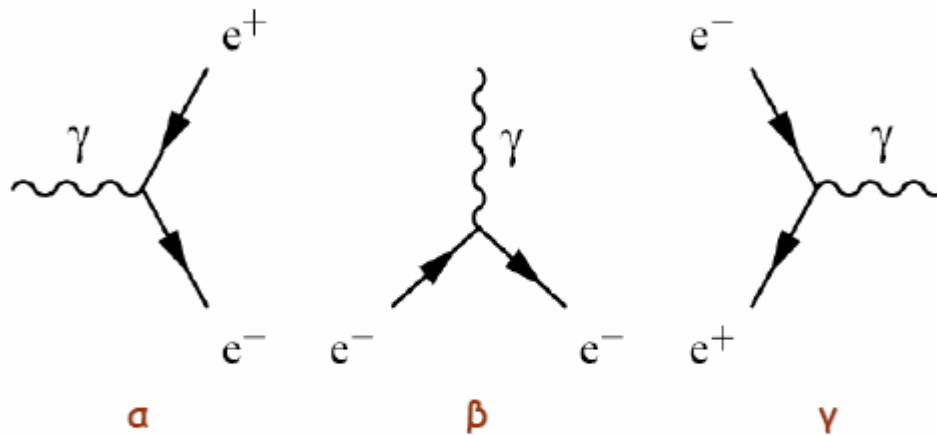
Διαγράμματα Φeynman

Γενικές Ιδιότητες: Περιστροφή διαγραμμάτων



Διαγράμματα Feynman

Ηλεκτρομαγνητικές Αλληλεπιδράσεις



- (α) Δίδυμη Γένεση
- (β) Φωτοηλεκτρικό φαινόμενο
- (γ) Εξαϋλωση ποζιτρονίου