

Στοιχειώδη Σωματίδια

Διάλεξη 23η
Πετρίδου Χαρά

Τμήμα G3: Κ. Κορδάς & Χ. Πετρίδου

Αλληλεπιδράσεις & Πεδία
στη
Σωματιδιακή Φυσική

Τα Θεμελιώδη Μποζόνια των αλληλεπιδράσεων

Οι Θεμελιώδεις Αλληλεπιδράσεις

3

BOSONS

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

Unified Electroweak spin = 1

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

Strong (color) spin = 1

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

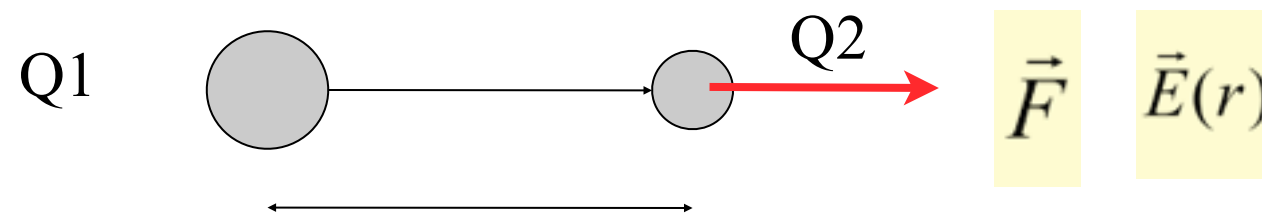
Τα Θεμελιώδη Μποζόνια των αλληλεπιδράσεων

Οι Θεμελιώδεις Αλληλεπιδράσεις

4

Properties of the Interactions				
The strengths of the interactions (forces) are shown relative to the strength of the electromagnetic force for two u quarks separated by the specified distances.				
Property	Gravitational Interaction	Weak Interaction (Electroweak)	Electromagnetic Interaction	Strong Interaction
Acts on:	Mass – Energy	Flavor	Electric Charge	Color Charge
Particles experiencing:	All	Quarks, Leptons	Electrically Charged	Quarks, Gluons
Particles mediating:	Graviton (not yet observed)	W^+ W^- Z^0	γ	Gluons
Strength at $\left\{ \begin{array}{l} 10^{-18} \text{ m} \\ 3 \times 10^{-17} \text{ m} \end{array} \right.$	10^{-41}	0.8	1	25
	10^{-41}	10^{-4}	1	60

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

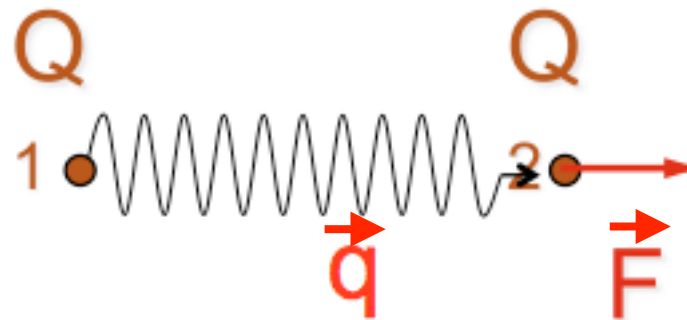


$$\vec{F} = \vec{E}(r) \cdot Q_2 = \frac{Q_1}{r^2} \hat{r} \cdot Q_2 = \frac{Q_1 Q_2}{r^2} \hat{r}$$

Η εικόνα στην Κβαντική Μηχανική

6

- Η αλληλεπίδραση μεταξύ δύο σωμάτων σε απόσταση εκφράζεται-περιγράφεται με την **ανταλλαγή κβάντα -των μποζονίων-** που διαφέρουν ανάλογα με το είδος της αλληλεπίδρασης.
- Μεταξύ των δύο προηγούμενων φορτίων ανταλλάσσεται ένα ‘**δυναμικό**’ φωτόνιο με ορμή $\vec{q}$



$$\vec{q}r \approx \hbar \Rightarrow \vec{q} \approx \frac{\hbar}{r} \Rightarrow \vec{q} \approx \frac{\hbar}{ct} \Rightarrow \frac{d\vec{q}}{dt} \approx \frac{\hbar}{ct^2} \Rightarrow \frac{d\vec{q}}{dt} \approx \frac{\hbar c}{r^2}$$

Δύναμη

- 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/ΥΠΕΡΒΑΤΙΚΑ”** (virtual)

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

Η Αρχή της Απροσδιοριστίας του Heisenberg επιτρέπει :

$$\Delta E * \Delta t \leq \hbar$$

$\Rightarrow$ Π α ρ α β ί α σ η της ενέργειας κατά ΔE μπορεί να συμβεί **ΜΟΝΟ** σε χρόνο μικρότερο από Δt :

$$\Delta t \leq \hbar / \Delta E$$

- Ένα σωματίδιο (διαδότης) είναι Δυνητικό/Υπερβατικό σωματίδιο: όταν ΔΕΝ ισχύει:

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

ή αν η μάζα m ΔΕΝ αντιστοιχεί στη μάζα ηρεμίας του σωματιδίου

- Το δυνητικό/υπερβατικό σωματίδιο μπορεί να υπάρξει **ΜΟΝΟ** για χρόνο που του επιτρέπεται από την αρχή της απροσδιοριστίας

$$\Delta t \leq \hbar / \Delta E$$

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

Ανταλλαγή Μποζονίων-Θεωρία Yukawa



Η πυρηνική δύναμη είναι απόρρεια ανταλλαγής μποζονίων

- 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

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

- Η εμβέλεια των πυρηνικών δυνάμεων είναι 1-2 fm
- Το μεσόνιο του Yukawa ανακαλύφθηκε το 1947 στην κοσμική ακτινοβολία

- Απο την εξίσωση ελεύθερου σωματίου προκύπτει η κυματική εξίσωση του ελεύθερου σωματιδίου κι απο την λύση της η κυματοσυνάρτηση του ελεύθερου σωματίου (εξ. Klein-Gordon):

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

$$\hat{E} = i\hbar \frac{\partial}{\partial t}$$

$$\hat{P} = -i\hbar \nabla$$

- Αν $m=0 \Rightarrow$ η λύση της εξίσωσης περιγράφει την διάδοση **ηλεκτρομαγνητικού κύματος** στο χώρο. Ισοδύναμα, δίνει το πλάτος κύματος του ελεύθερου (άμαζου) φωτονίου

$$\nabla^2 U(r) = 0 \Rightarrow U(r) = q/4\pi r$$

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

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

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

$U(r)$: το δυναμικό Yukawa

- $R = \hbar/mc$** (μήκος κύματος Compton του σωματίου)

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

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

U(r): το δυναμικό Yukawa

- Στον ηλεκτρομαγνητισμό: $\nabla^2 U(r) = 0 \Rightarrow U(r) = q/4\pi r$
- Η σταθερά g στο δυναμικό Yukawa ισοδυναμεί με το φορτίο (q) στην ηλεκτροστατική και δίνει το μέτρο του “ισχυρού πυρηνικού φορτίου”
- Το πλάτος σκέδασης σωματίου από δυναμικό U (το δυναμικό προκύπτει από πηγή με “ισχύ φορτίου” g):
(Προσοχή ! Το q είναι η μεταφορά της ορμής στο σκεδαζόμενο σωματίο)

Μετασχηματισμός Fourier του
Δυναμικού U

$$f(\vec{q}) = g \int U(r) e^{i\vec{q} \cdot \vec{r}} \cdot dV$$

Η λύση της εξίσωσης για το δυναμικό σωματίου μάζας m

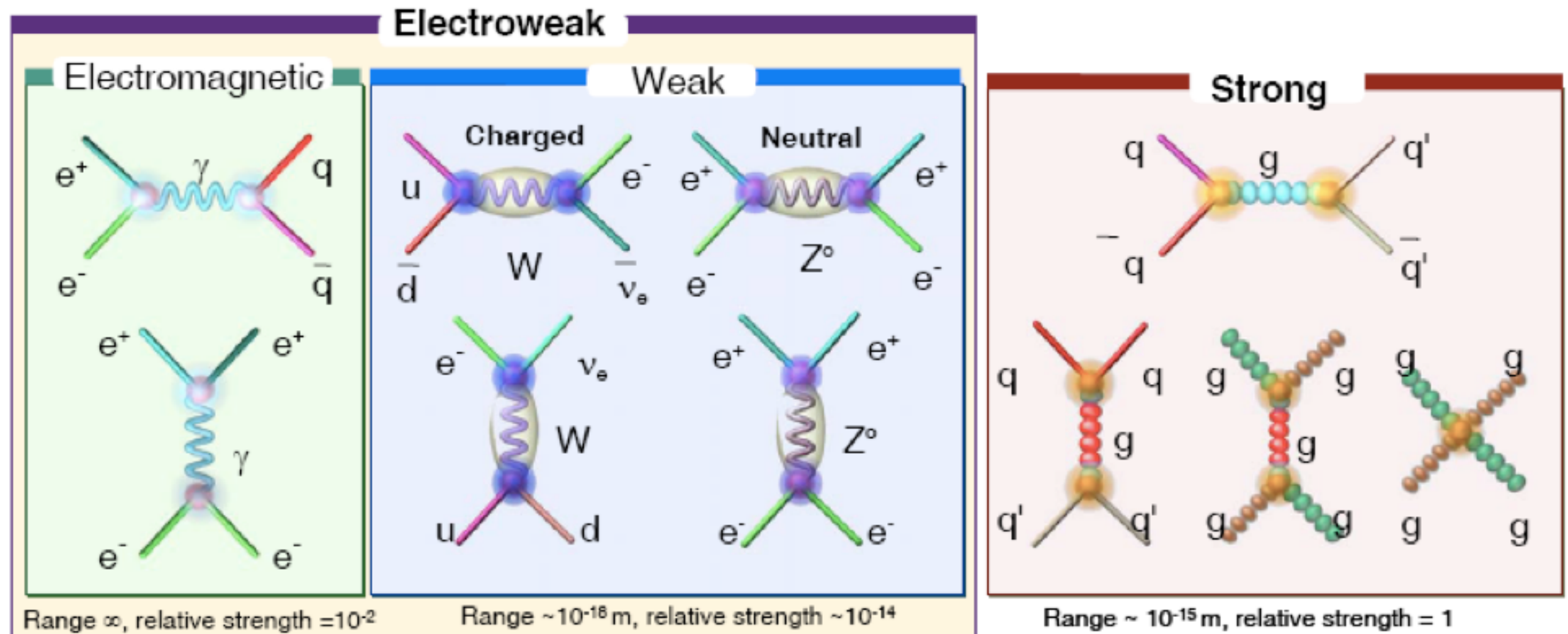
$$U(r) = \frac{g}{4\pi r} e^{-r/R}, \quad R = \frac{\hbar}{mc}$$

- Το R εκφράζει την εμβέλεια του πεδίου:
- Στις πυρηνικές δυνάμεις το R είναι της τάξης 10^{-15}m

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

Αλληλεπιδράσεις- Σύζευξη Σωματιδίων

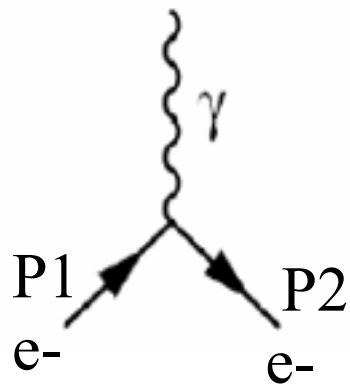
15



Στη Θεωρία Yukawa -σε λιγότερο “θεμελιακό επίπεδο” οι πυρηνικές δυνάμεις ανάμεσα σε πρωτόνια και νετρόνια μεταδίδονται μέσω των φορτισμένων ή ουδέτερων μποζονίων -των πιονίων (μεσόνια)

Μποζόνια-οι φορείς των δυνάμεων

16



- Μεταφορά Ενέργειας και ορμής:

- $\vec{q} = \vec{P}_1 - \vec{P}_2$

- $\nu = E_1 - E_2$

- Το πλάτος σκέδασης

- g η ισχύς της σύζευξης του μποζονίου με το σκεδαζόμενο σωματίο

- $q^2 + m^2$ ορμή και μάζα του διαδότη

- αν ο διαδότης είναι φωτόνιο:

=> Πλάτος σκέδασης

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

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

$$f(q) \propto \frac{g^2}{q^2 + m^2}$$

$$f(q) \propto \frac{e^2}{q^2}$$

$$\propto e^2 \rightarrow a = e^2 / 4\pi\hbar c = 1/137 \dots$$
$$\propto 1/q^2$$

- Αν ο διαδότης είναι φωτόνιο το πλάτος σκέδασης:

είναι ανάλογο του φορτίου e^2

$$f(q) \propto \frac{e^2}{q^2}$$

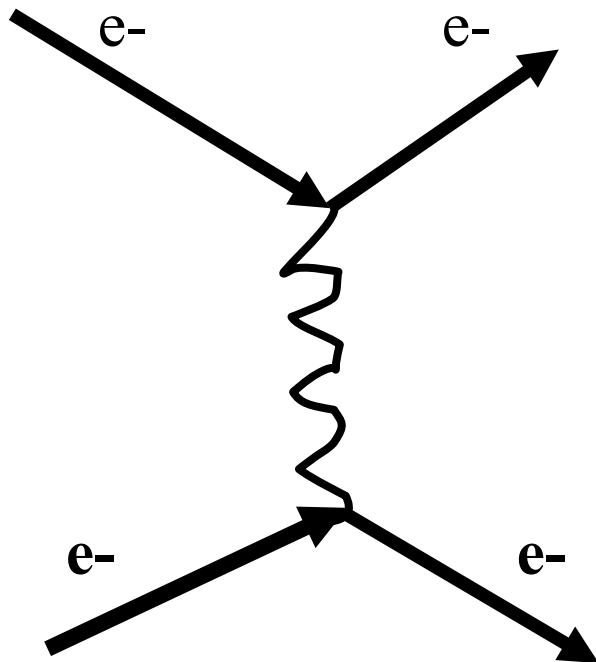
$$\propto e^2 \rightarrow a = e^2 / 4\pi\hbar c = 1/137....$$
$$\propto 1/q^2$$

=> η ενεργός διατομή

$$\propto |f(q)|^2$$

=>

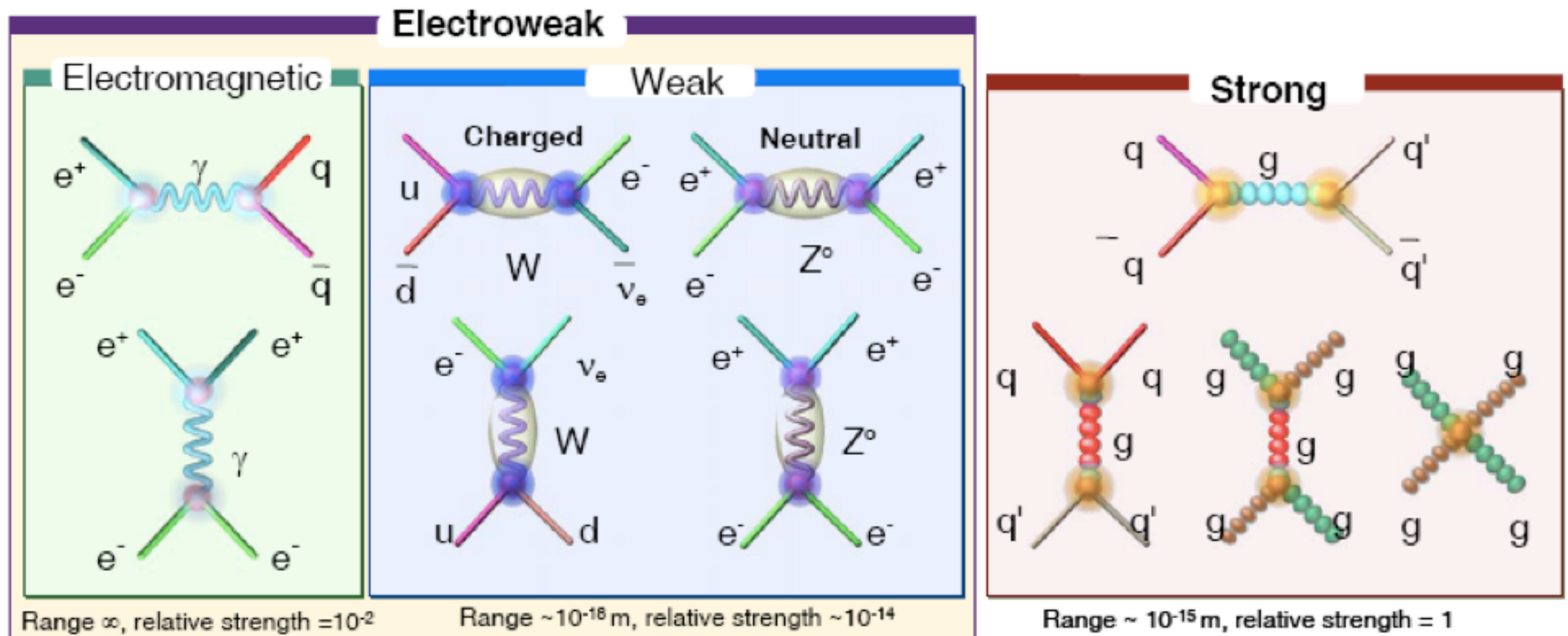
$$\propto e^4 \rightarrow a^2$$
$$\propto 1/q^4$$



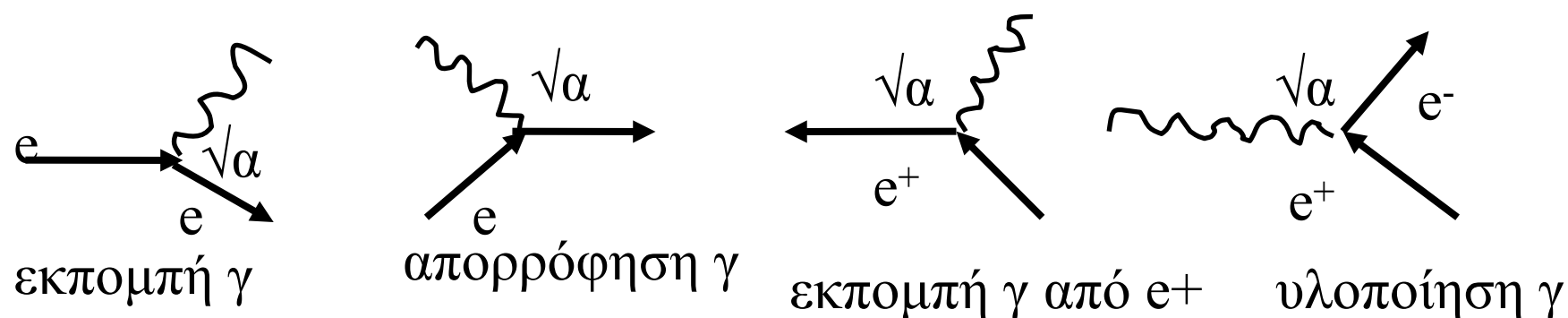
Διαγράμματα Feynmann

18

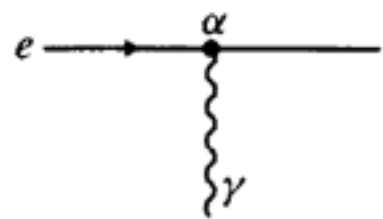
- Διαγράμματα Feynman είναι διαγράμματα για την αναπαράσταση της αλληλεπίδρασης και της κίνησης των στοιχειωδών σωματιδίων στο χωρόχρονο



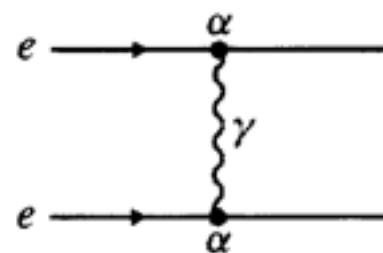
- Διαγράμματα αναπαράστασης της αλληλεπίδρασης στοιχειωδών σωματιδίων
- Η Θεωρία Dirac: περιγράφει την αλληλεπίδραση σημειακού φορτίου με σπιν $1/2$ (κουάρκ-λεπτόνια) με το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο (φωτόνιο)
- Η θεωρία λέγεται Κβαντική Ηλεκτροδυναμική θεωρία πεδίου: **QED**
- Από τα πλάτη σκέδασης υπολογίζουμε τις ενεργές διατομές (Θεωρία Διαταραχών)



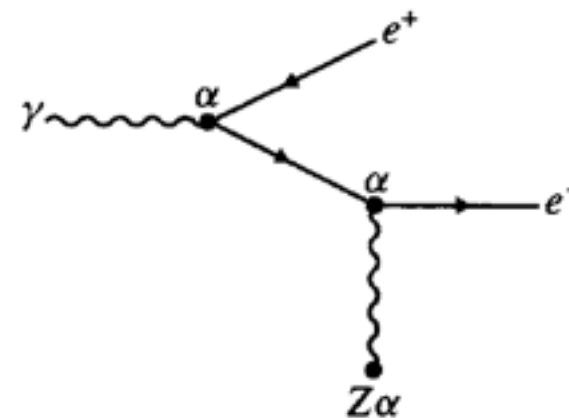
Βασικές Ηλεκτρομαγνητικές Αλληλεπιδράσεις



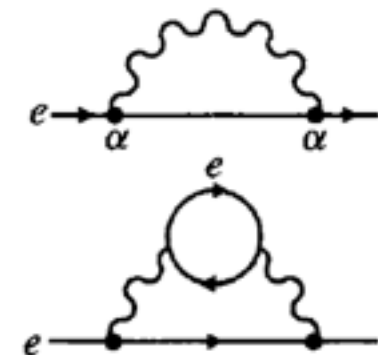
(a)



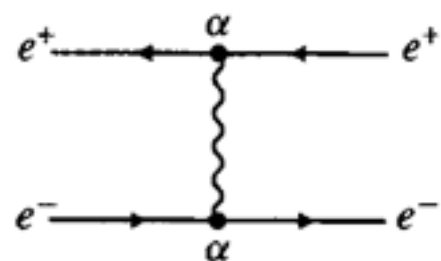
(b)



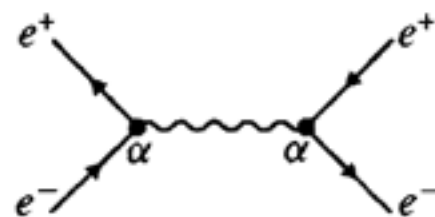
(e)



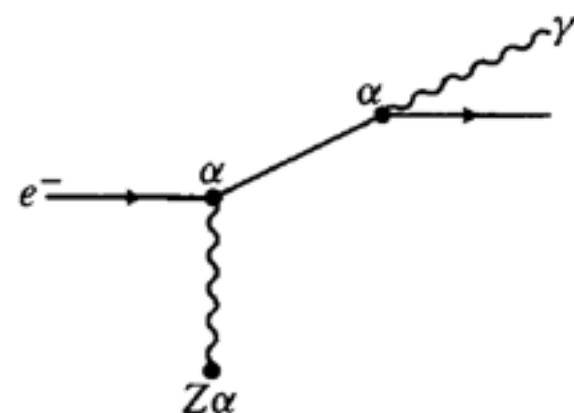
(f)



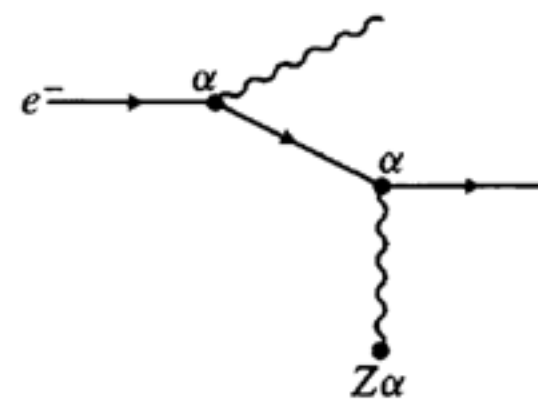
+



(c)



+

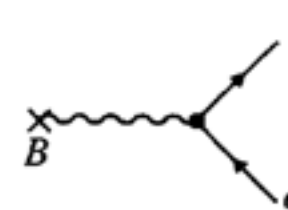


(d)

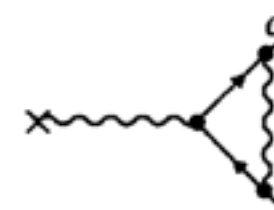
Η Μαγνητική ροπή του e

$$\left(\frac{g-2}{2}\right)^{\text{theory}} = 0.5 \left(\frac{\alpha}{\pi}\right) - 0.32848 \left(\frac{\alpha}{\pi}\right)^2 + 1.19 \left(\frac{\alpha}{\pi}\right)^3 + \dots$$

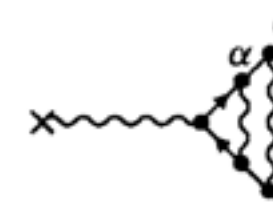
$$= (115\,965\,230 \pm 10) \times 10^{-11}$$



(a)



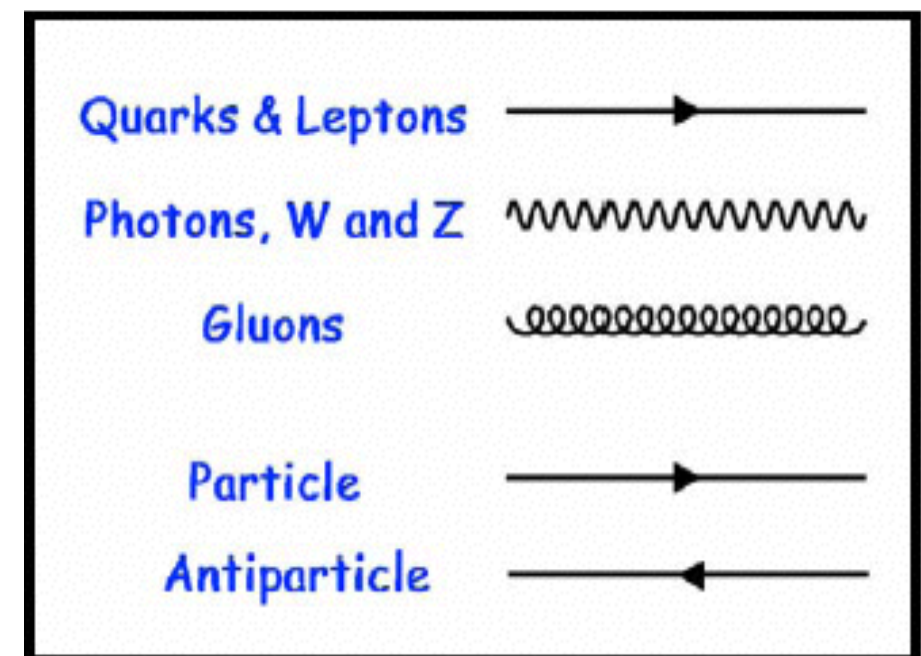
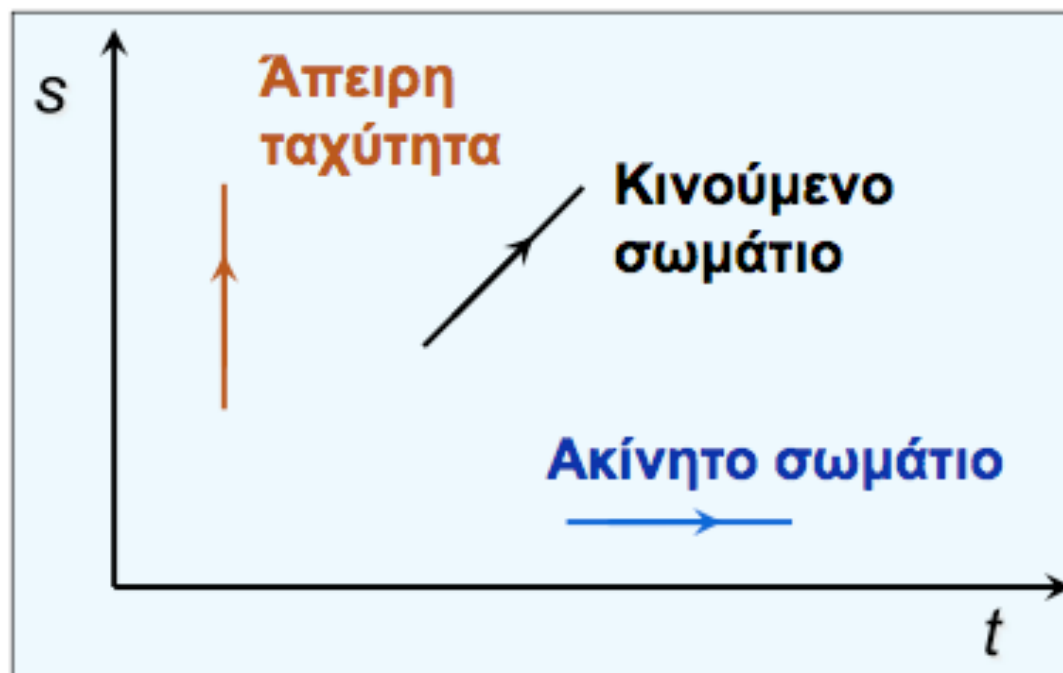
(b)



(c)

$$\left(\frac{g-2}{2}\right)^{\text{expt}} = (115\,965\,219 \pm 1) \times 10^{-11}$$

- Διαγράμματα αναπαράστασης της αλληλεπίδρασης στοιχειωδών σωματιδίων
 - Ο χρόνος εξελίσσεται οριζόντια
 - Τα βέλη δείχνουν τη φορά κίνησης των σωματιδίων που πλησιάζουν ή απομακρύνονται από τις κορυφές
 - εισερχόμενα σωματία (κινούνται κατά τη θετική φορά του χρόνου) ισοδυναμούν με εξερχόμενα αντισωματία (κινούνται κατά την αρνητική φορά του χρόνου)



Διαγράμματα Feynmann

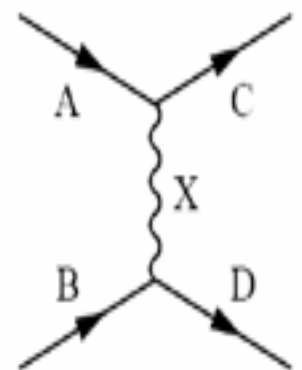
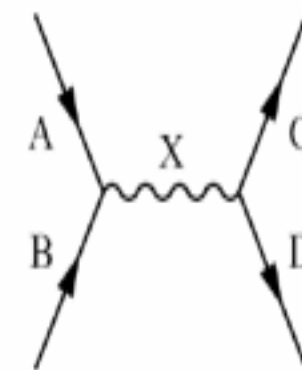
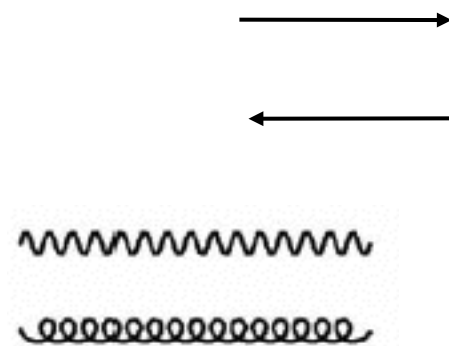
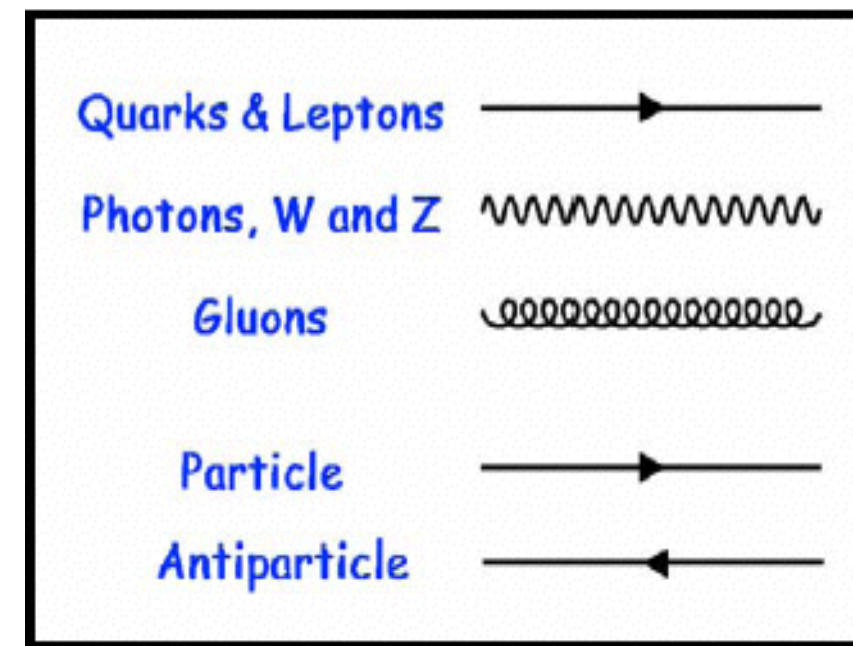
22

Βασικοί κανόνες σε κάθε κόμβο:

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

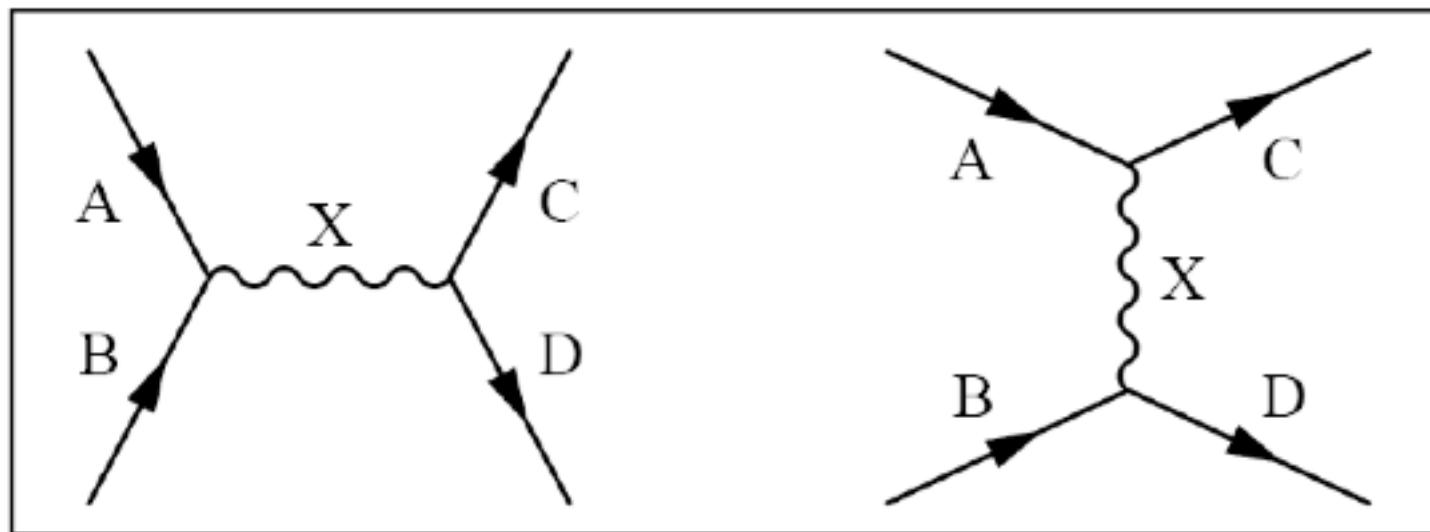
- φερμιόνια (θετικό t)
- anti- φερμιόνια (αρνητικό t)
- Μποζόνια

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



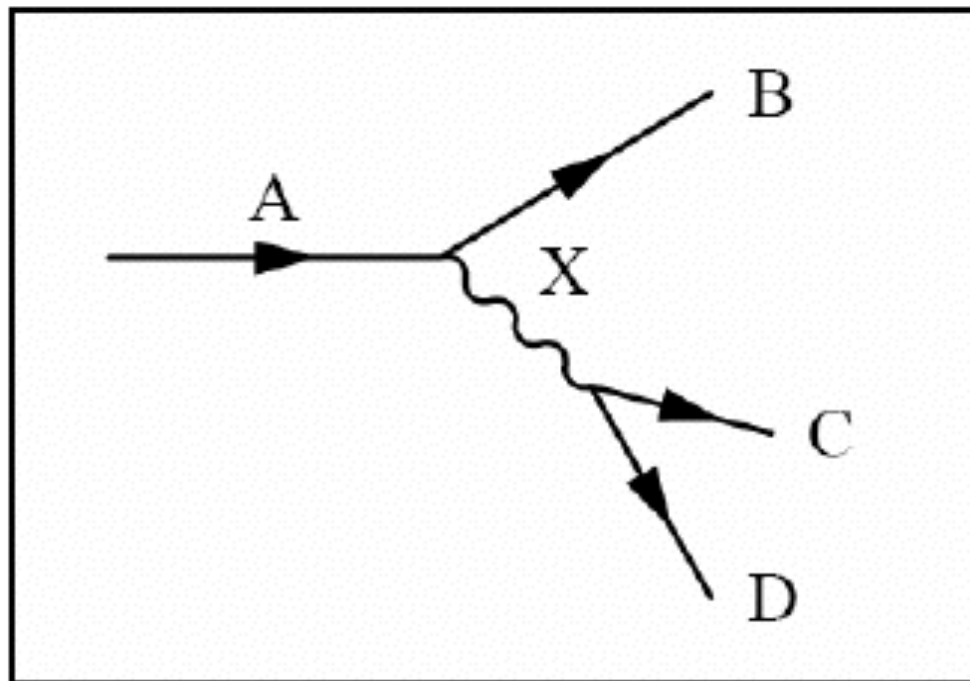
Παριστούν διεργασίες της μορφής

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



... ή της μορφής

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



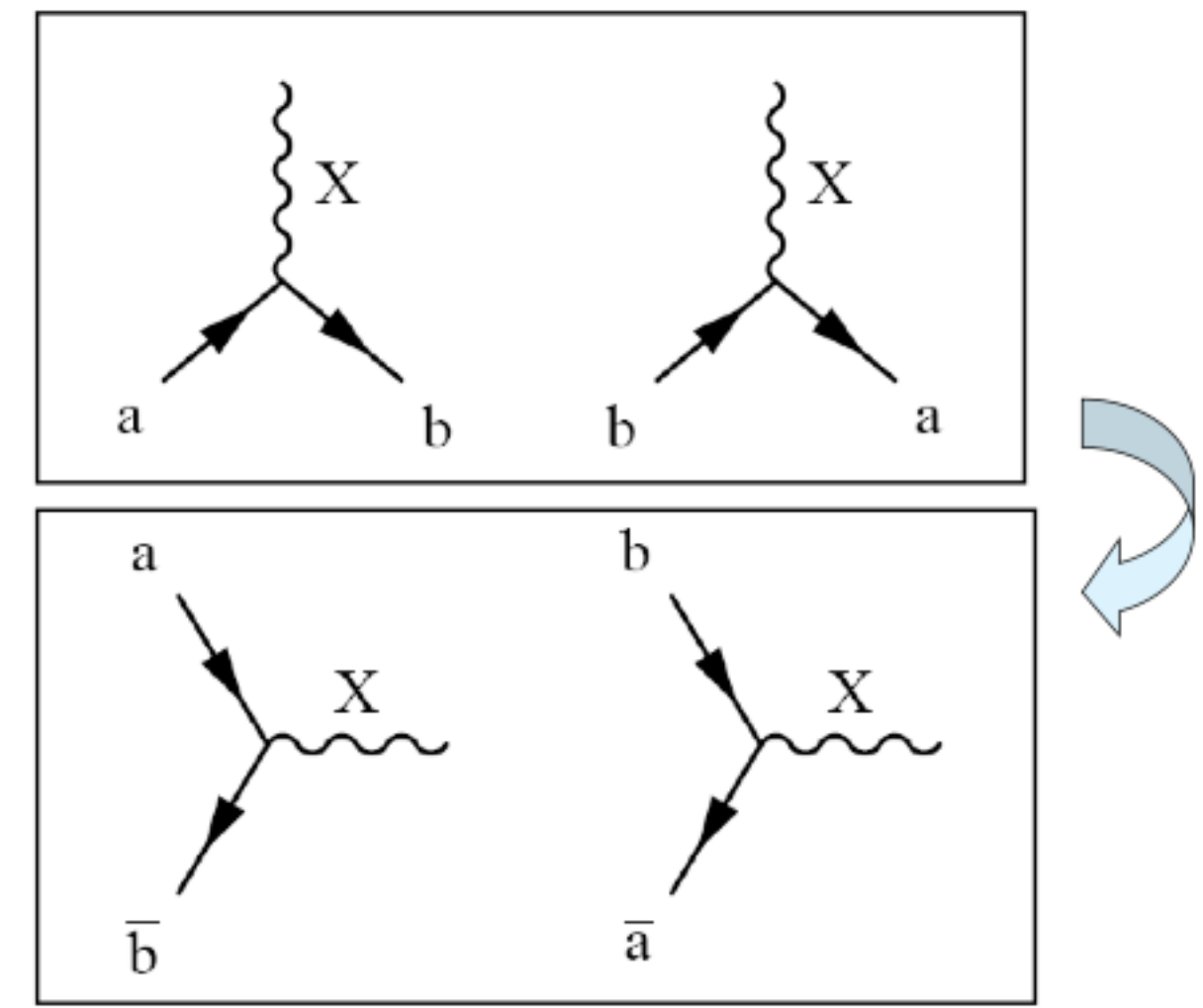
A, B, C, D

- Κουάρκ
- Λεπτόνια
- Αντικουάρκ
- Αντιλεπτόνια

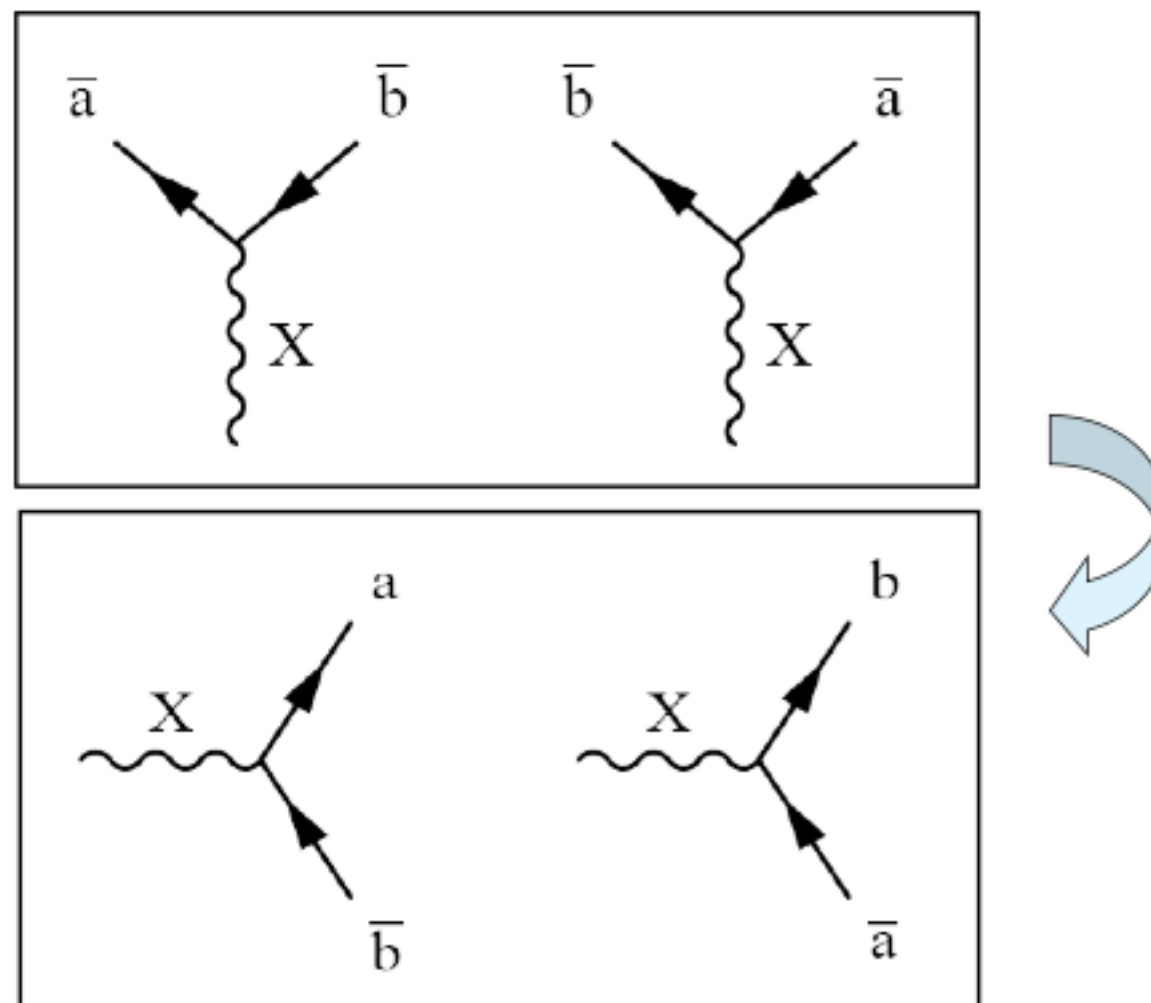
X

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

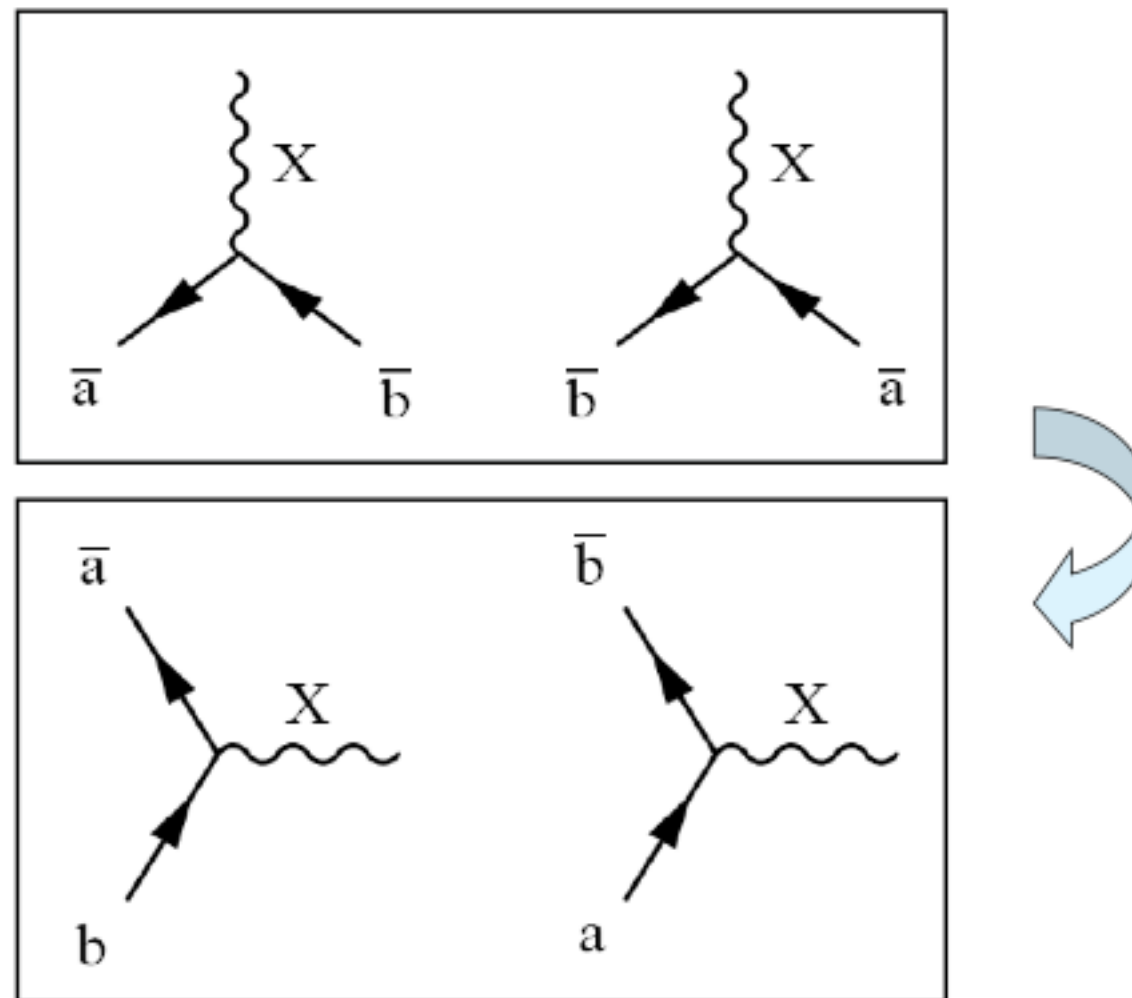
Γενικές ιδιότητες: Παραδείγματα περιστροφής διαγραμμάτων



Γενικές ιδιότητες: Παραδείγματα περιστροφής διαγραμμάτων



Γενικές ιδιότητες: Παραδείγματα περιστροφής διαγραμμάτων



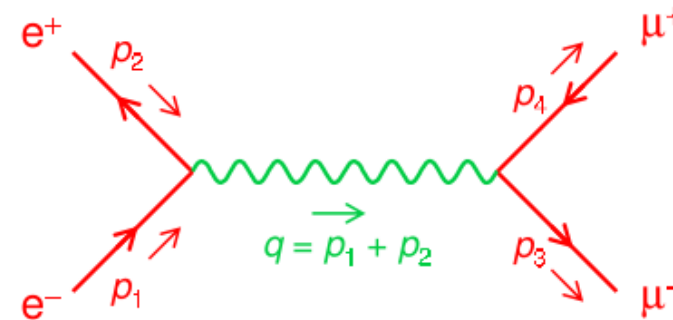
Διαγράμματα Feynmann

28

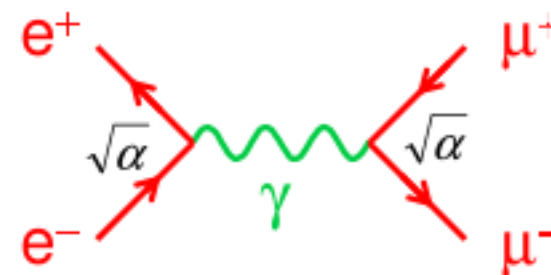
- Παραδείγματα απεικόνισης μιας αλληλεπίδρασης με Διαγράμματα Feynman

Σκέδαση

$$\underline{e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-}$$



Διαγράμματα
“χαμηλότερης τάξης”
(πλάτος $f \sim \alpha$, ενεργός διατομή $\sigma \sim \alpha^2$)



$$\sigma \sim O(\alpha^2)$$

Διαγράμματα “υψηλότερης
τάξης”
(πλάτος $f \sim \alpha^2$, ενεργός διατομή $\sigma \sim \alpha^4$)

