

Εισαγωγή στη Φυσική Στοιχειωδών Σωματιδίων

Δήμος Σαμψωνίδης
(16-12-2014)

Στοιχεία Πυρηνικής Φυσικής & Φυσικής Στοιχειωδών Σωματιδίων
5 ο Εξάμηνο

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

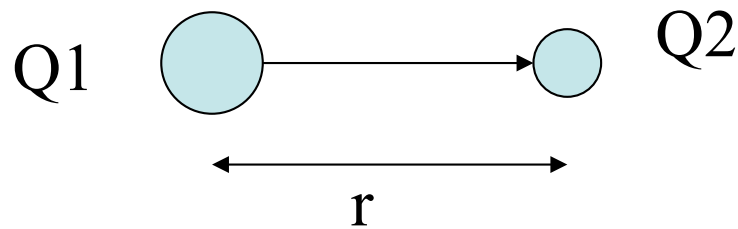
Name	Mass GeV/c ²	Electric charge
 photon	0	0
 W ⁻	80.39	-1
 W ⁺ W bosons	80.39	+1
 Z boson	91.188	0

Strong (color) spin = 1

Name	Mass GeV/c ²	Electric charge
 gluon	0	0

Η εικόνα στην Κλασσική 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



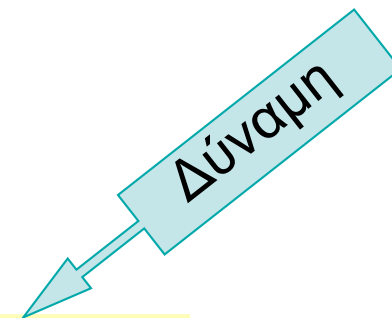
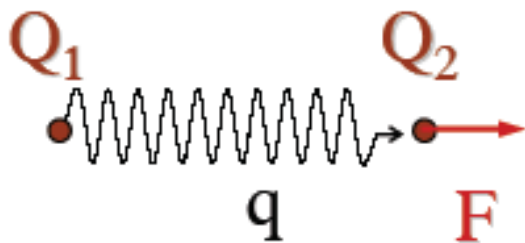
$$\vec{F}(r) = Q2 \cdot \vec{E}(r)$$

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

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

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 'δυνητικό' φωτόνιο με ορμή q



$$qr \approx \hbar \Rightarrow q \approx \frac{\hbar}{r} \Rightarrow q \approx \frac{\hbar}{ct} \Rightarrow \frac{dq}{dt} \approx \frac{\hbar}{ct^2} \Rightarrow \frac{dq}{dt} \approx \frac{\hbar c}{r^2}$$

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 επαναπορρόφηση του η ενέργεια ΔE διατηρείται

Η Αρχή της Απροσδιοριστίας του Heisenberg επιτρέπει:

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

⇒ 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 'δυνητικών' 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)
- Δυνητικό σωματίδιο: όταν $\Delta E \neq 0$ ισχύει: $E^2 = p^2 c^2 + m^2 c^4$
(ή αν το $m \neq 0$ αντιστοιχεί στη μάζα ηρεμίας του σωματιδίου)
- Το δυνητικό σωματίδιο μπορεί να υπάρξει ΜΟΝΟ για χρόνο που του επιτρέπεται από την αρχή της απροσδιοριστίας $\Delta t \leq \hbar / \Delta E$

Κλασική και Κβαντομηχανική Θεώρηση

- Η κβαντομηχανική θεώρηση της εκπομπής και απορρόφησης ‘**δυνητικών**’ φωτονίων ΔΕΝ είναι λιγότερο πλασματική από 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 ότι είναι η πλέον κατάλληλη
- ...κατ’έκταση η περιγραφή και των άλλων αλληλεπιδράσεων στον μικρόκοσμο βασίστηκε στην ανταλλαγή δυνητικών μποζονίων

Ανταλλαγή Μποζονίων-Θεωρία Yukawa

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

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

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

- 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

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

Ανταλλαγή Μποζονίων-Θεωρία Yukawa

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

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

← $U(r)$: 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):
(Το q είναι η μεταφορά της ορμής στο σκεδαζόμενο σωματίο)

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

Θεωρία Yukawa

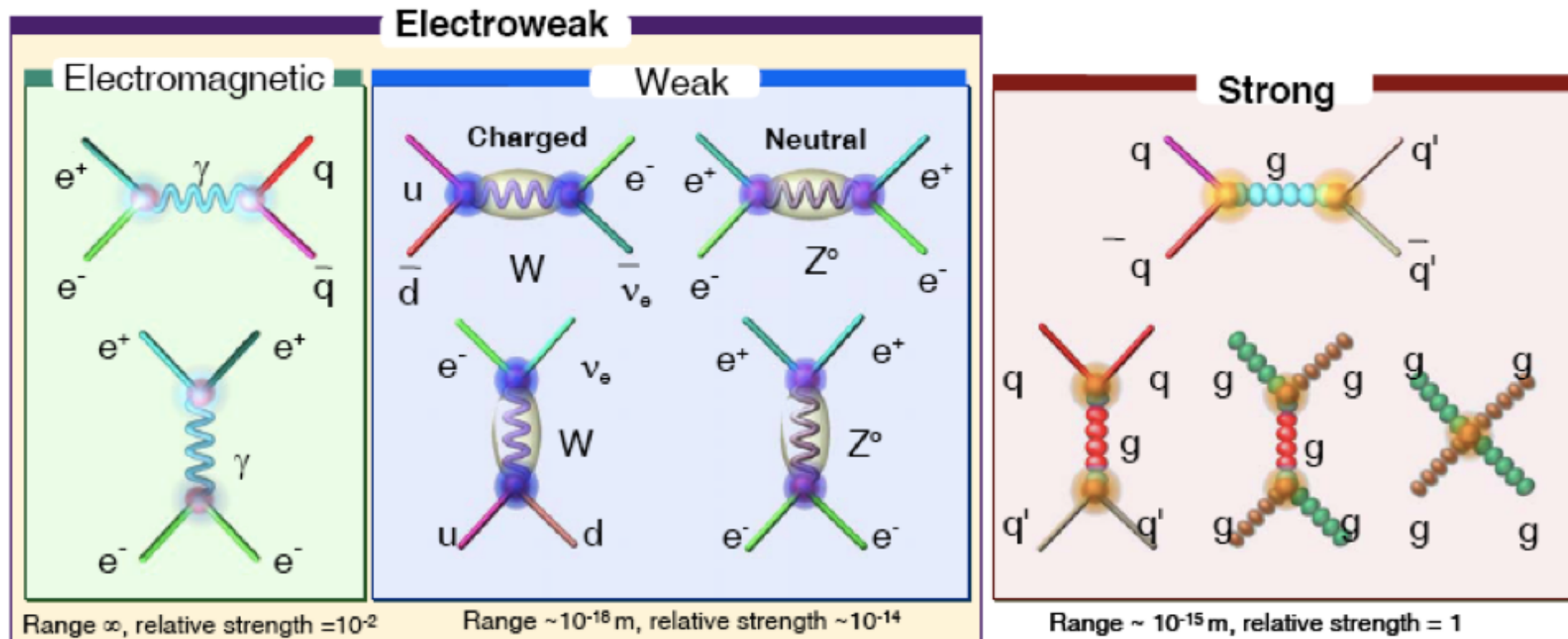
Η λύση της εξίσωσης για το δυναμικό σωματίου μάζας m

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

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

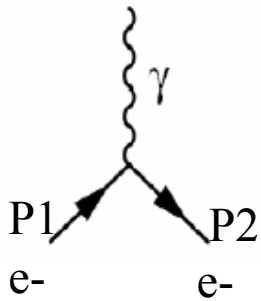
$$R = \frac{\hbar}{mc} \Rightarrow mc = \frac{\hbar}{R} \Rightarrow mc^2 = \frac{\hbar c}{R} \Rightarrow mc^2 \approx \frac{197 \text{ MeV} \cdot \text{fm}}{1.4 \text{ fm}} \approx 140 \text{ MeV}$$

Αλληλεπιδράσεις- Σύζευξη Σωματιδίων



Στη Θεωρία Υukawa -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



- Μεταφορά Ενέργειας και ορμής:

- $q = P1 - P2$

- $v = E1 - E2$

- Το πλάτος σκέδασης

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

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

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

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

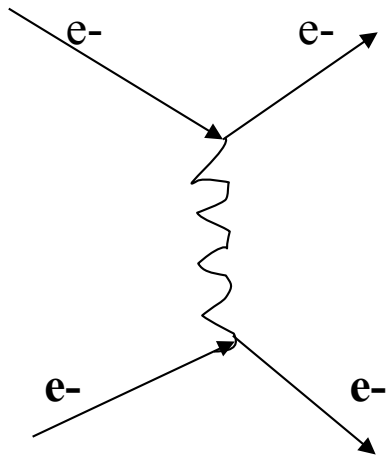
- $q^2 + m^2$ ορμή και μάζα του διαδότη

- αν ο διαδότης είναι φωτόνιο:

=> Πλάτος σκέδασης

$$f(q) \propto \frac{e^2}{q^2} \quad \begin{matrix} \propto e^2 \rightarrow a = e^2 / 4\pi\hbar c = 1/137... \\ \propto 1/q^2 \end{matrix}$$

Μποζόνια-οι φορείς των δυνάμεων



• Αν ο διαδότης είναι φωτόνιο το πλάτος σκέδασης:

είναι ανάλογο του φορτίου

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

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

=> η ενεργός διατομή

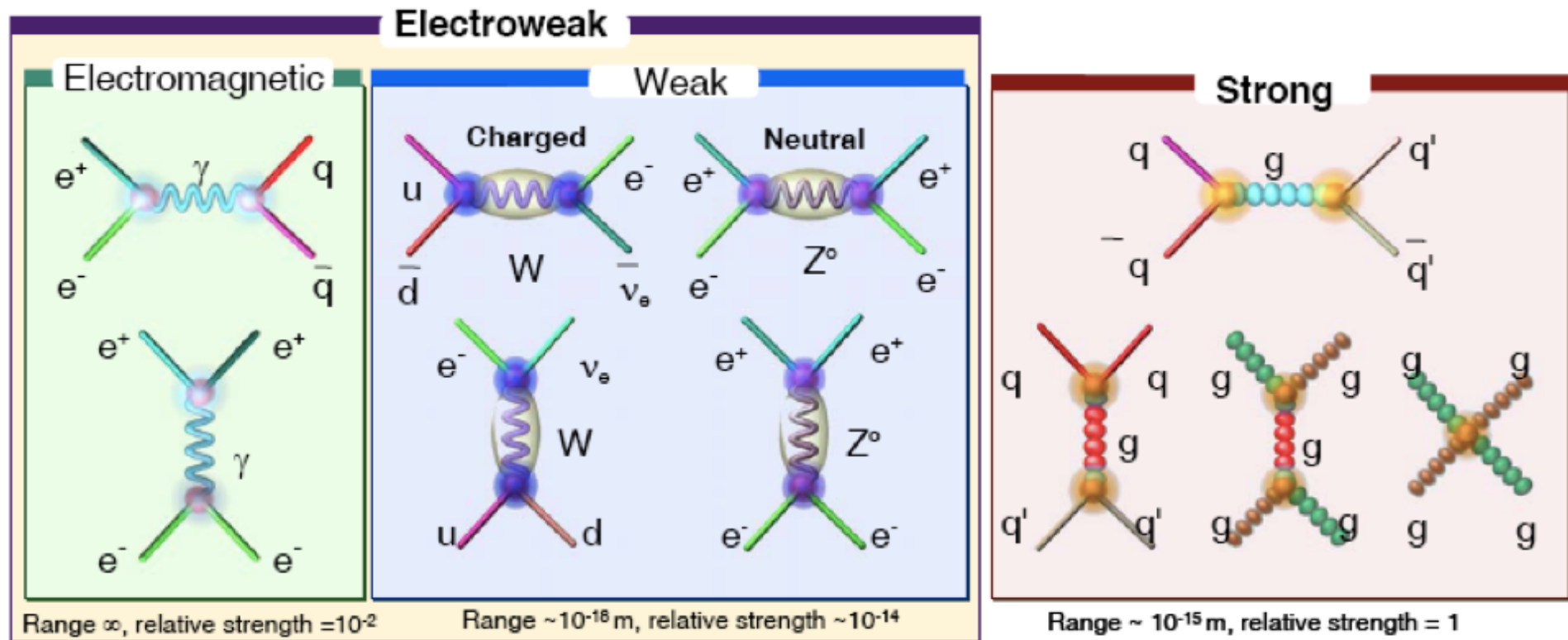
$$\propto |f(q)|^2$$

=>

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

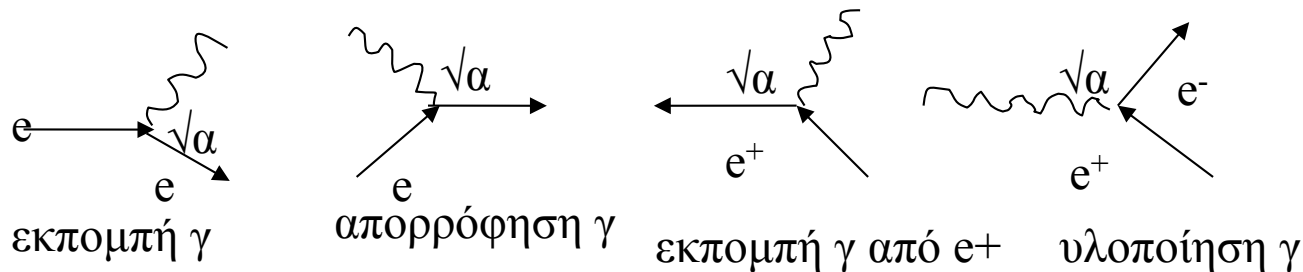
Διαγράμματα Feynmann

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



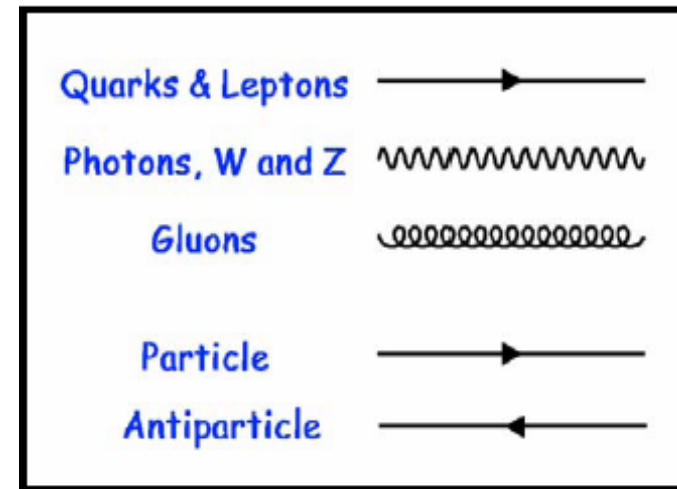
Διαγράμματα Feynmann

- 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)



Διαγράμματα Feynmann

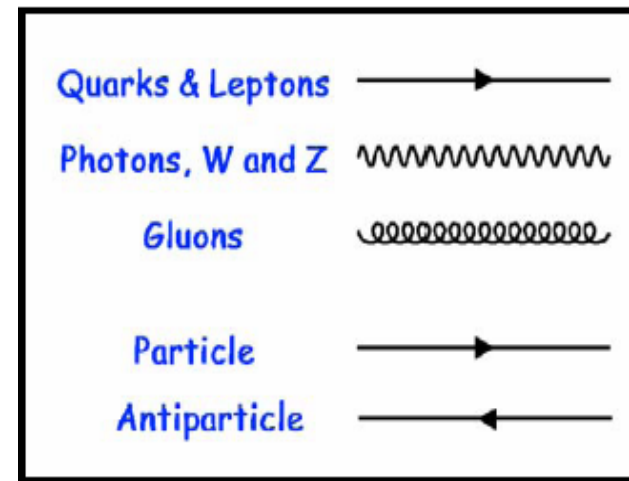
- Διαγράμματα αναπαράστασης της αλληλεπίδρασης στοιχειωδών σωματιδίων
 - Ο χρόνος εξελίσσεται οριζόντια
 - Τα βέλη δείχνουν τη φορά κίνησης των σωματιδίων που πλησιάζουν ή απομακρύνονται από τις κορυφές
 - εισερχόμενα σωματάρια (κινούνται κατά τη θετική φορά του χρόνου) ισοδυναμούν με εξερχόμενα αντισωματάρια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



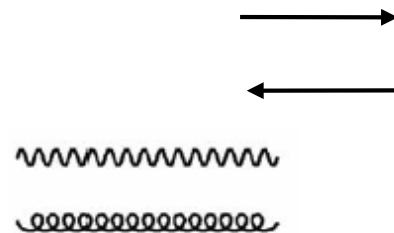
Διαγράμματα Feynmann

Βασικοί κανόνες σε κάθε κόμβο:

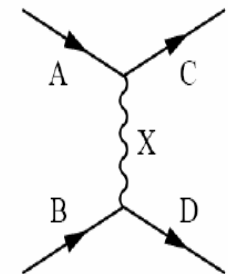
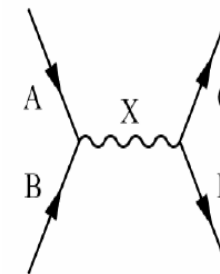
- E , p διατηρείται
- Q διατηρείται
- Σπιν διατηρείται
- Βαρυονικός Αριθμός
- Λεπτονικός Αριθμός



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



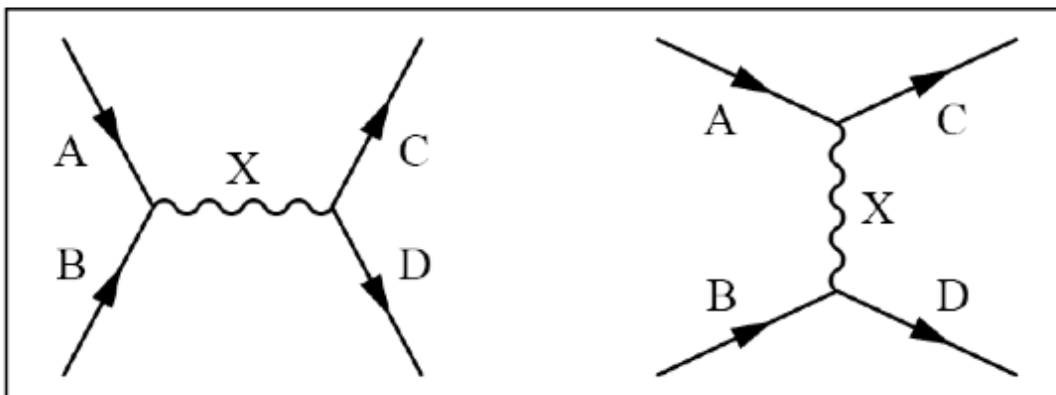
- Το σημείο σύζευξης (κόμβος) δηλώνει την ισχύ της σύζευξης



Διαγράμματα Feynmann

Παριστάνουν διεργασίες της μορφής

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



A, B, C, D

- Κουάρκ
- Λεπτόνια
- Αντικουάρκ
- Αντιλεπτόνια

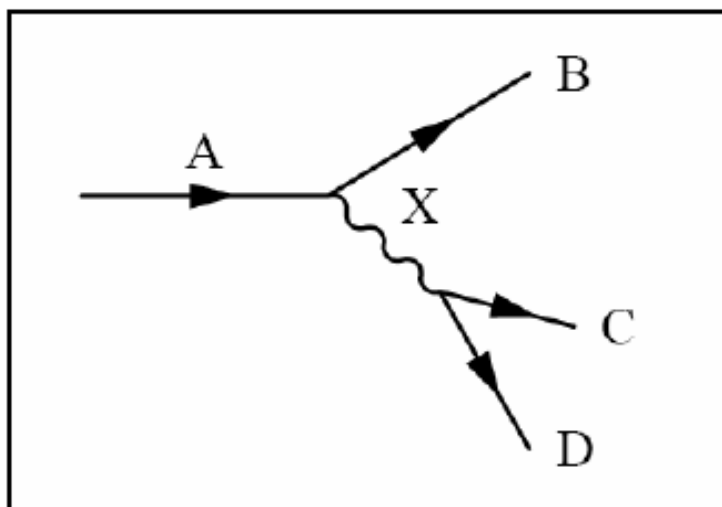
X

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

Διαγράμματα Feynmann

... ή της μορφής

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



A, B, C, D

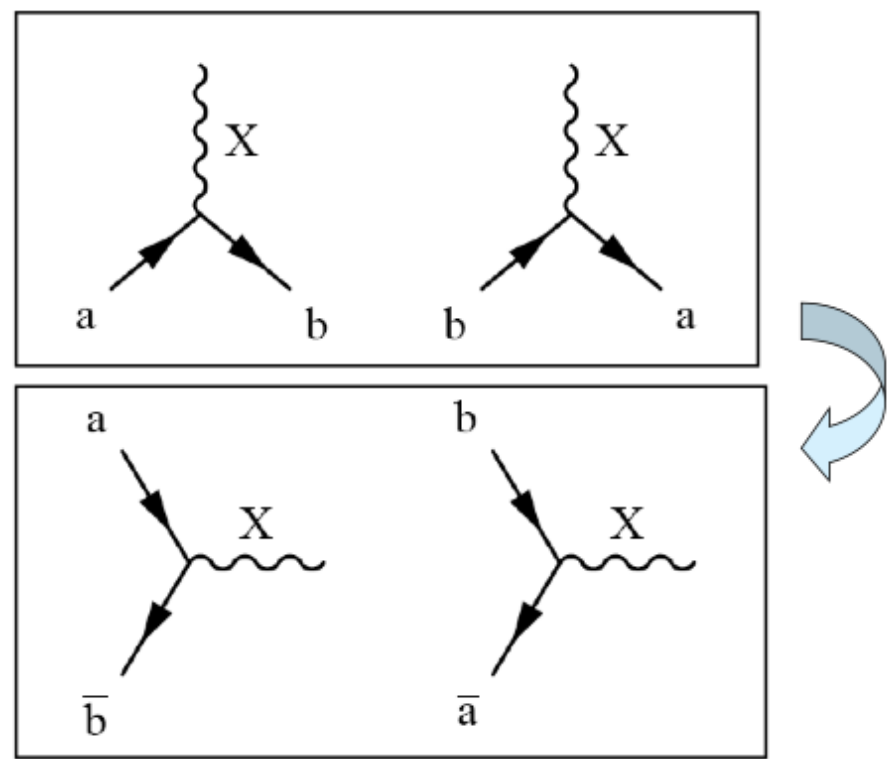
- Κουάρκ
- Λεπτόνια
- Αντικουάρκ
- Αντιλεπτόνια

X

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

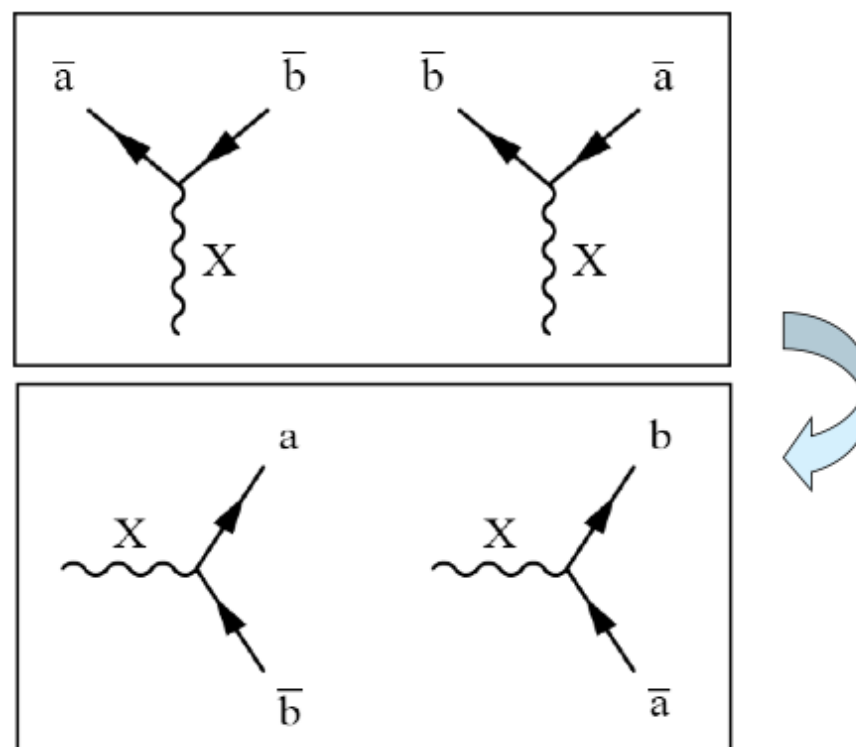
Διαγράμματα Feynmann

Γενικές ιδιότητες: Παραδείγματα περιστροφής διαγραμμάτων



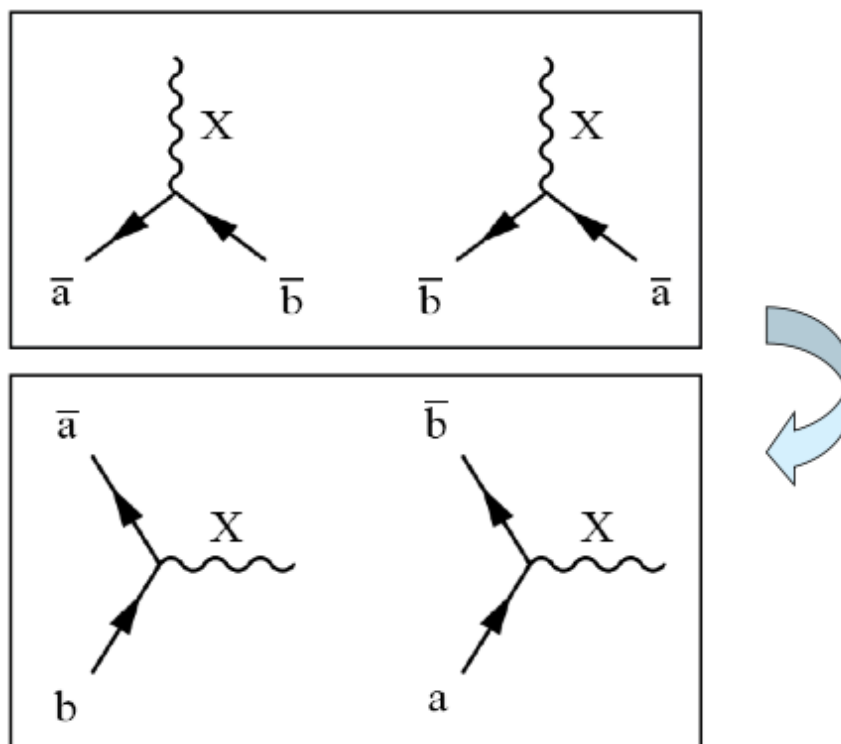
Διαγράμματα Feynmann

Γενικές ιδιότητες: Παραδείγματα περιστροφής διαγραμμάτων



Διαγράμματα Feynmann

Γενικές ιδιότητες: Παραδείγματα περιστροφής διαγραμμάτων

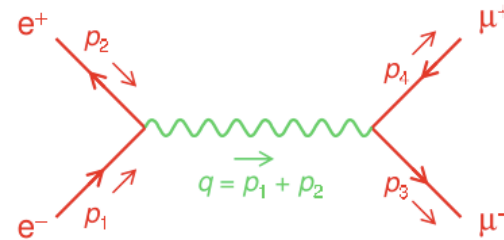


Διαγράμματα Feynmann

- Παραδείγματα απεικόνισης μιας αλληλεπίδρασης με Διαγράμματα Feynman

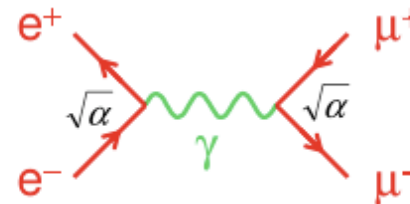
Σκέδαση

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



Διαγράμματα “χαμηλότερης τάξης”

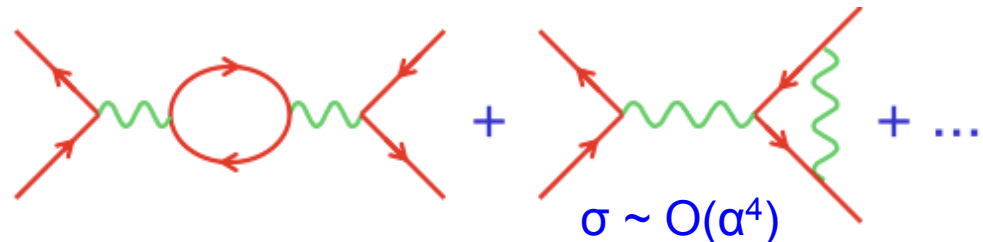
(πλάτος $f \sim \alpha$, ενεργός διατομή $\sigma \sim \alpha^2$)



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

Διαγράμματα “υψηλότερης τάξης”

(πλάτος $f \sim \alpha^2$, ενεργός διατομή $\sigma \sim \alpha^4$)



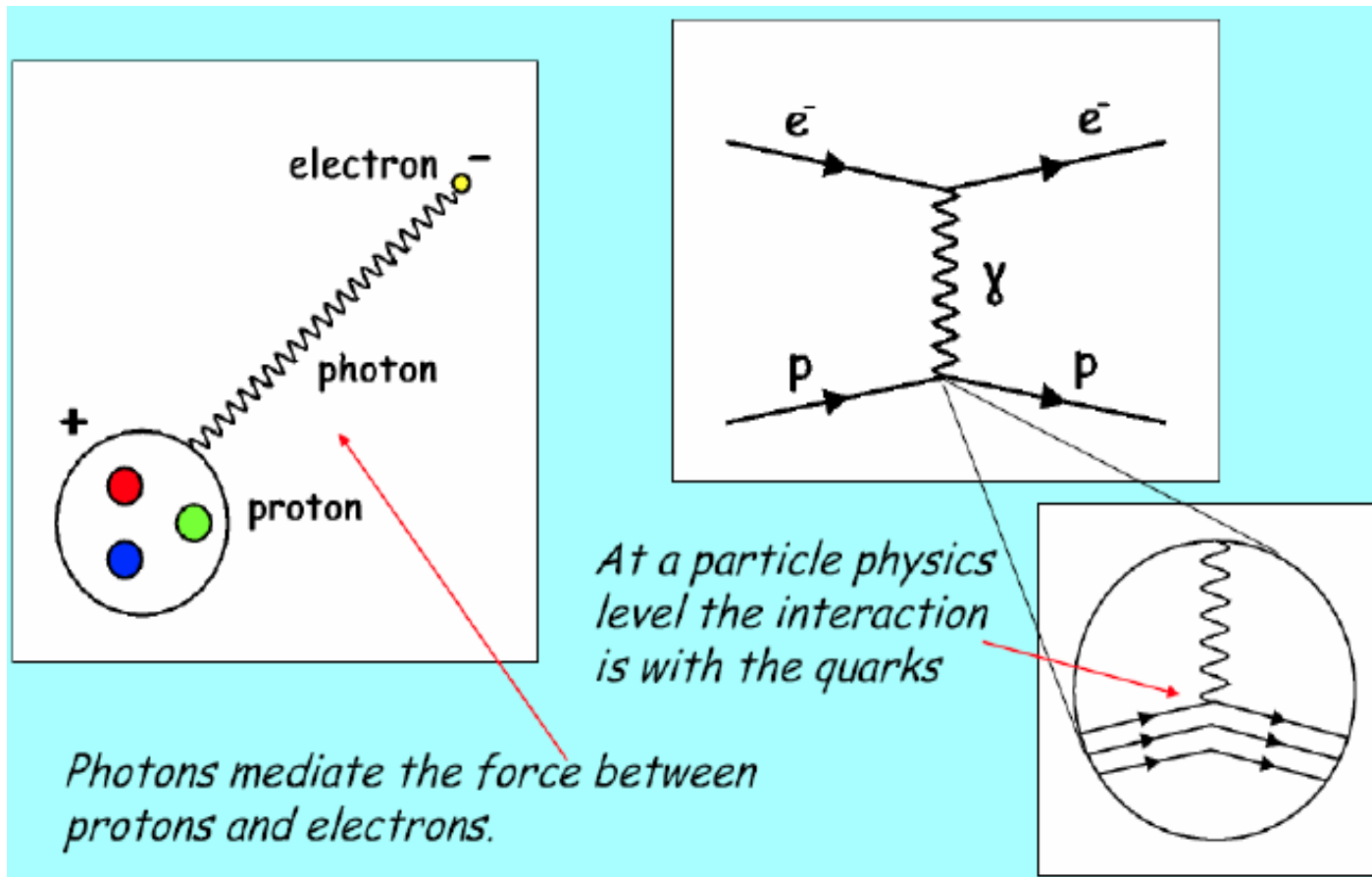
Διαγράμματα Feynmann

- **Δυνάμεις**

- Ασθενείς δυνάμεις: Σε όλα τα κουάρκ και λεπτόνια
- Ηλεκτρομαγνητικές δυνάμεις: Σε κάθε φορτισμένο σωματίδιο
- Ισχυρές δυνάμεις: Μόνο μεταξύ των κουάρκ

	ΑΣΘΕΝΕΙΣ	ΗΜΓ	ΙΣΧΥΡΕΣ
Quarks	✓	✓	✓
Φορτισμένα Λεπτόνια	✓	✓	✗
Ουδέτερα Λεπτόνια	✓	✗	✗

Ηλεκτρομαγνητικές Αλληλεπιδράσεις (I)



Ηλεκτρομαγνητικές Αλληλεπιδράσεις (I)

Η σταθερά σύζευξης α στις ηλεκτρομαγνητικές αλληλεπιδράσεις είναι:

- Μία αδιάστατη ποσότητα που μετράει την ένταση της σύζευξης

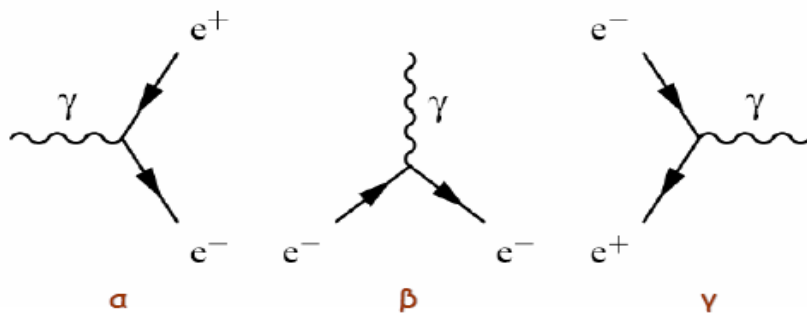
$$\alpha = \frac{V_c(r = r_c)}{m_e c^2} = \frac{\frac{e^2}{\hbar / m_e c}}{m_e c^2} = \frac{e^2}{\hbar c} \approx \frac{1}{137}$$

- Παριστάνει τον λόγο της ηλεκτροστατικής ενέργειας απώθησης δύο ηλεκτρονίων σε απόσταση ίση με το μήκος Compton του ηλεκτρονίου προς την ενέργεια που αντιστοιχεί στη μάζα ηρεμίας του ηλεκτρονίου
- Η ποσότητα $\alpha^{1/2} \sim e$ συνδέεται με την πιθανότητα εκπομπής ή απορρόφησης ενός φωτονίου

Ηλεκτρομαγνητικές Αλληλεπιδράσεις (III)

Το φωτόνιο συζεύγνυται μόνο με φορτισμένο σωματίδιο

Ηλεκτρομαγνητικές Αλληλεπιδράσεις



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

- Η ισχύς της αλληλεπίδρασης μεταξύ φορτισμένων σωματίων και φωτονίων:

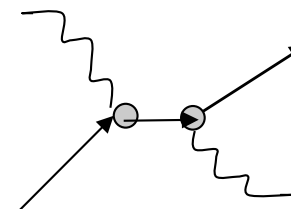
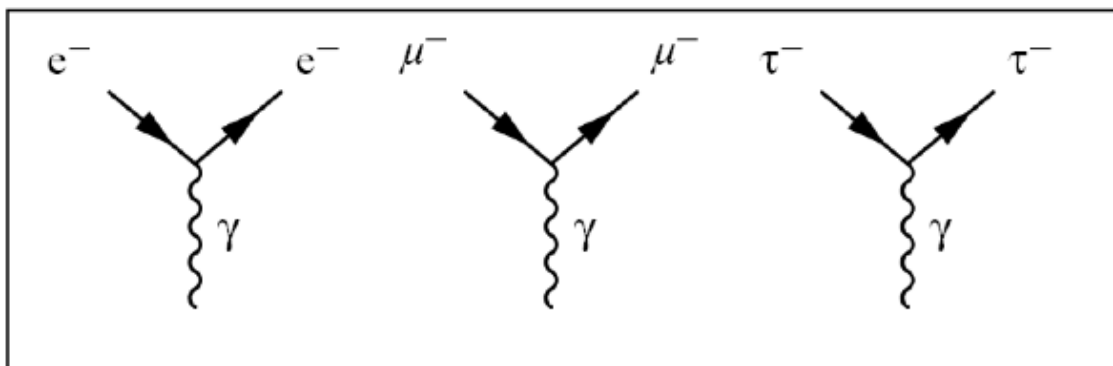
$$\alpha = e^2/mc \sim 1/137 \text{ (η σταθερά της λεπτής υφής)}$$

- **Φωτοηλεκτρικό φαινόμενο** : το πλάτος της αλληλεπίδρασης είναι

$$\sim \sqrt{\alpha} \Rightarrow \text{ενεργός διατομή: } \sim \alpha \text{ (1ης τάξης)}$$

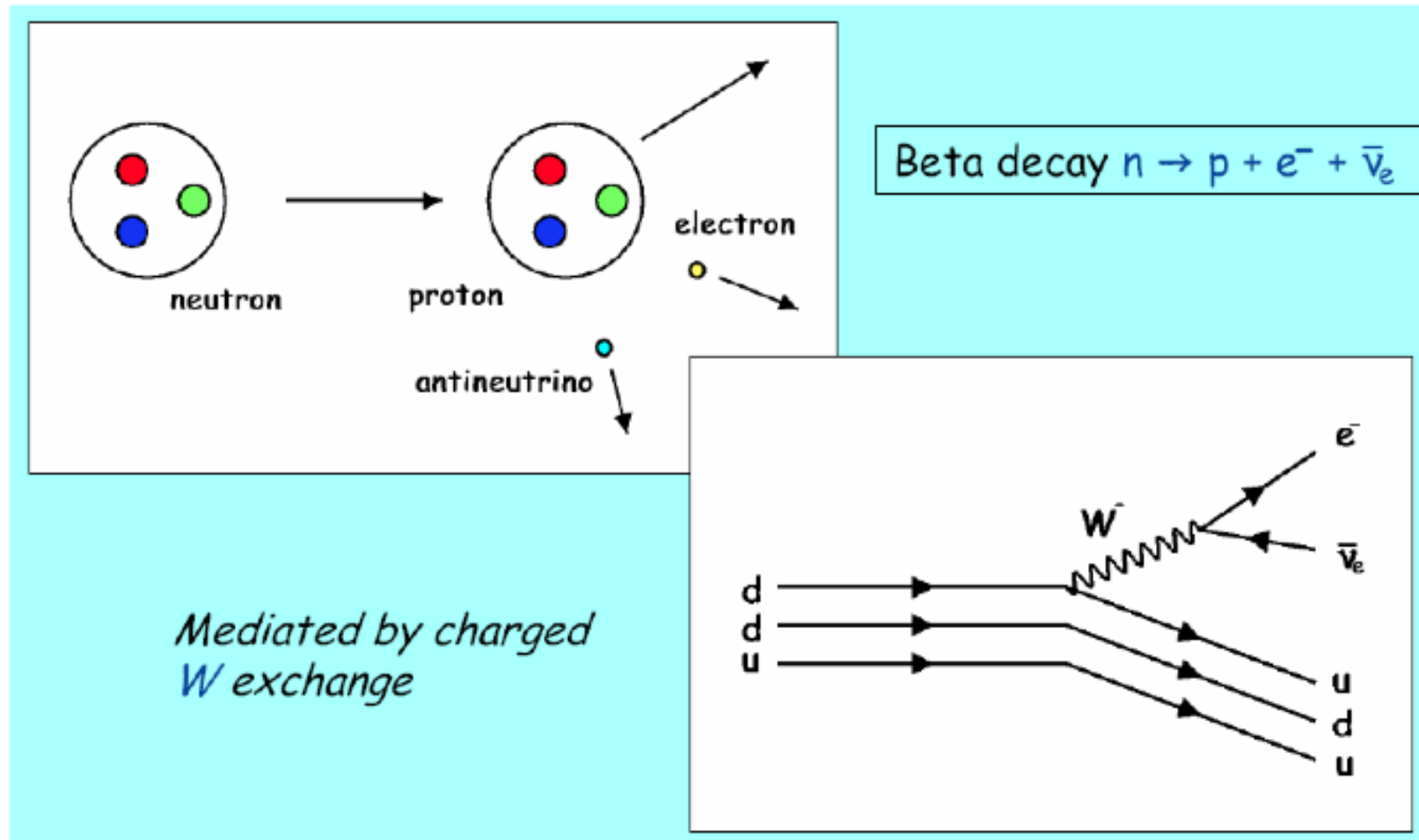
- **Σκέδαση Compton**: το πλάτος της αλληλεπίδρασης είναι

$$\sim \alpha \Rightarrow \text{ενεργός διατομή: } \sim \alpha^2 \text{ (2ης τάξης)}$$



Σκέδαση Compton

Ασθενείς Αλληλεπιδράσεις (I)



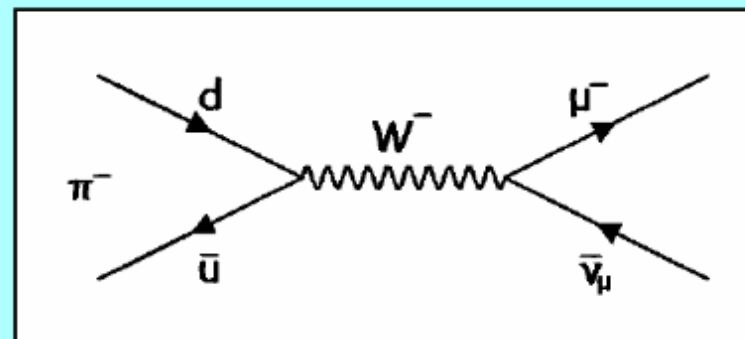
Ασθενείς Αλληλεπιδράσεις (II)

Οι Ασθενείς Αλληλεπιδράσεις αλλάζουν τις γεύσεις των κουάρκ και των λεπτονίων

Παράδειγμα διάσπασης μεσονίου σε λεπτόνια

$\Delta S = 0$ (No strangeness change)

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



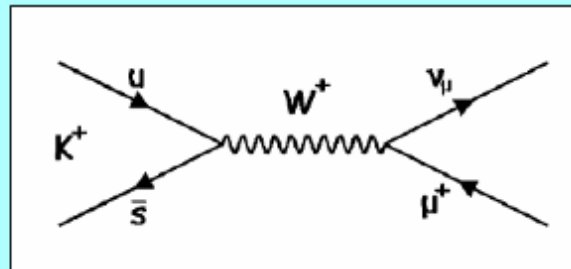
Ασθενείς Αλληλεπιδράσεις (III)

Οι Ασθενείς Αλληλεπιδράσεις αλλάζουν τις γεύσεις των κουάρκ και των λεπτονίων

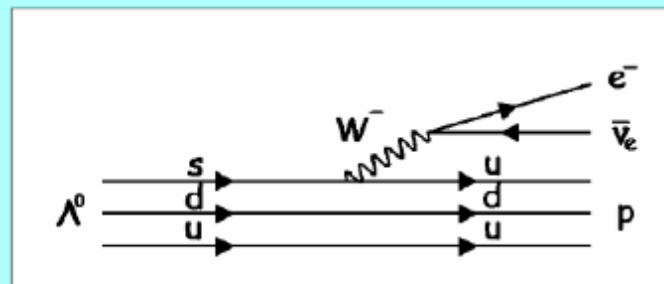
Παράδειγμα διάσπασης με αλλαγή της παραδοξότητας

$\Delta S = 1$ (Strangeness changes)

$$K^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$$



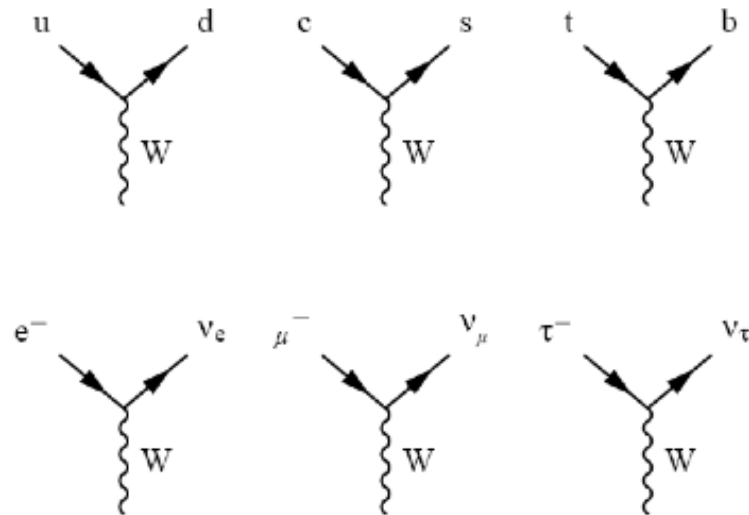
$$\Lambda^0 \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$$



Ασθενείς Αλληλεπιδράσεις (IV)

Οι Ασθενείς Αλληλεπιδράσεις αλλάζουν τις γεύσεις των κουάρκ και των λεπτονίων

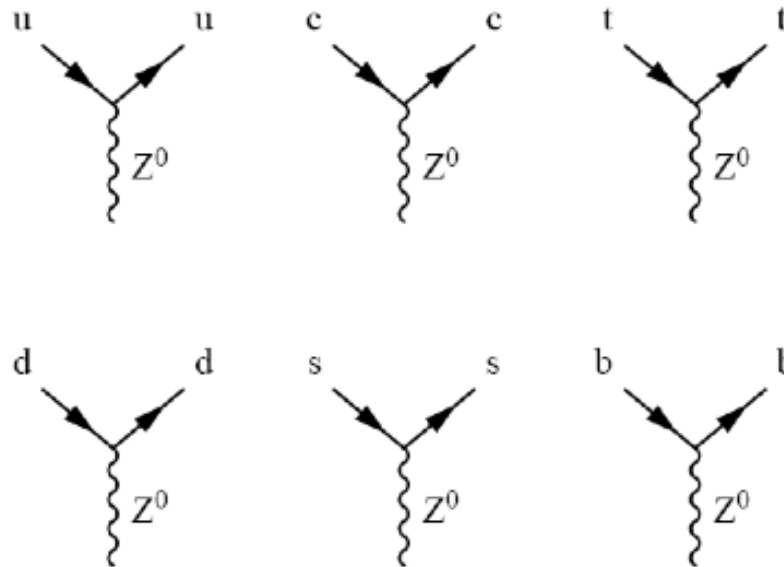
Όταν Ανταλλάσσονται οι διαδότες W , αλλάζει και το φορτίο



Ασθενείς Αλληλεπιδράσεις (V)

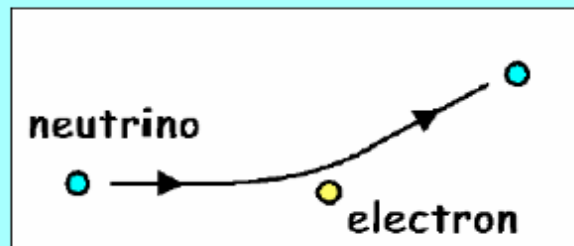
Οι Ασθενείς Αλληλεπιδράσεις αλλάζουν τις γεύσεις των κουάρκ και των λεπτονίων

Όταν Ανταλλάσσονται οι διαδότες Z , δεν αλλάζει το φορτίο



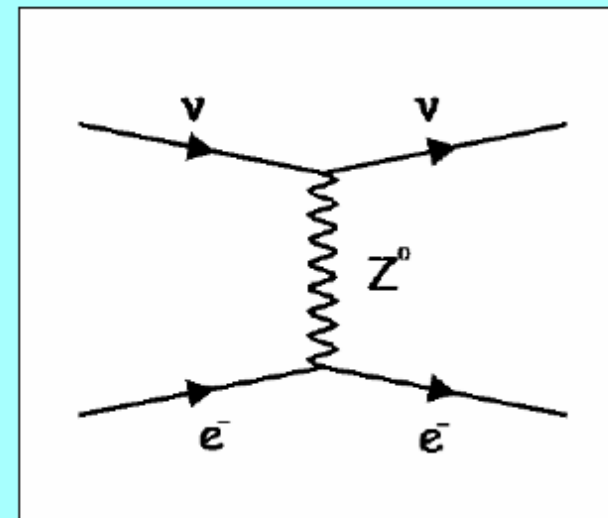
Ασθενείς Αλληλεπιδράσεις (VI)

Παράδειγμα σκέδασης νετρίνο



*Mediated by neutral
 Z exchange*

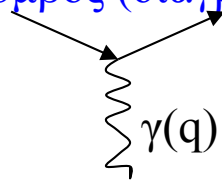
Neutrino scattering
off an electron



Ασθενείς Αλληλεπιδράσεις (VII)

Ηλεκτρομαγνητικές Δυνάμεις

- κόμβος (διάγραμμα Feynman)

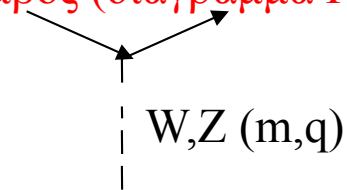


- Σταθερά Σύζευξης

$$a = e^2 / 4\pi\hbar c \quad f(q) \propto \frac{e^2}{q^2}$$

Ασθενείς Δυνάμεις

- κόμβος (διάγραμμα Feynman)



- Σταθερά Σύζευξης
- $$a_w = g^2 / 4\pi\hbar c, \quad f(q) \propto \frac{g^2}{q^2 + m^2}$$

$$f(q^2) = \frac{g^2}{q^2 + M_{W,Z}^2}$$

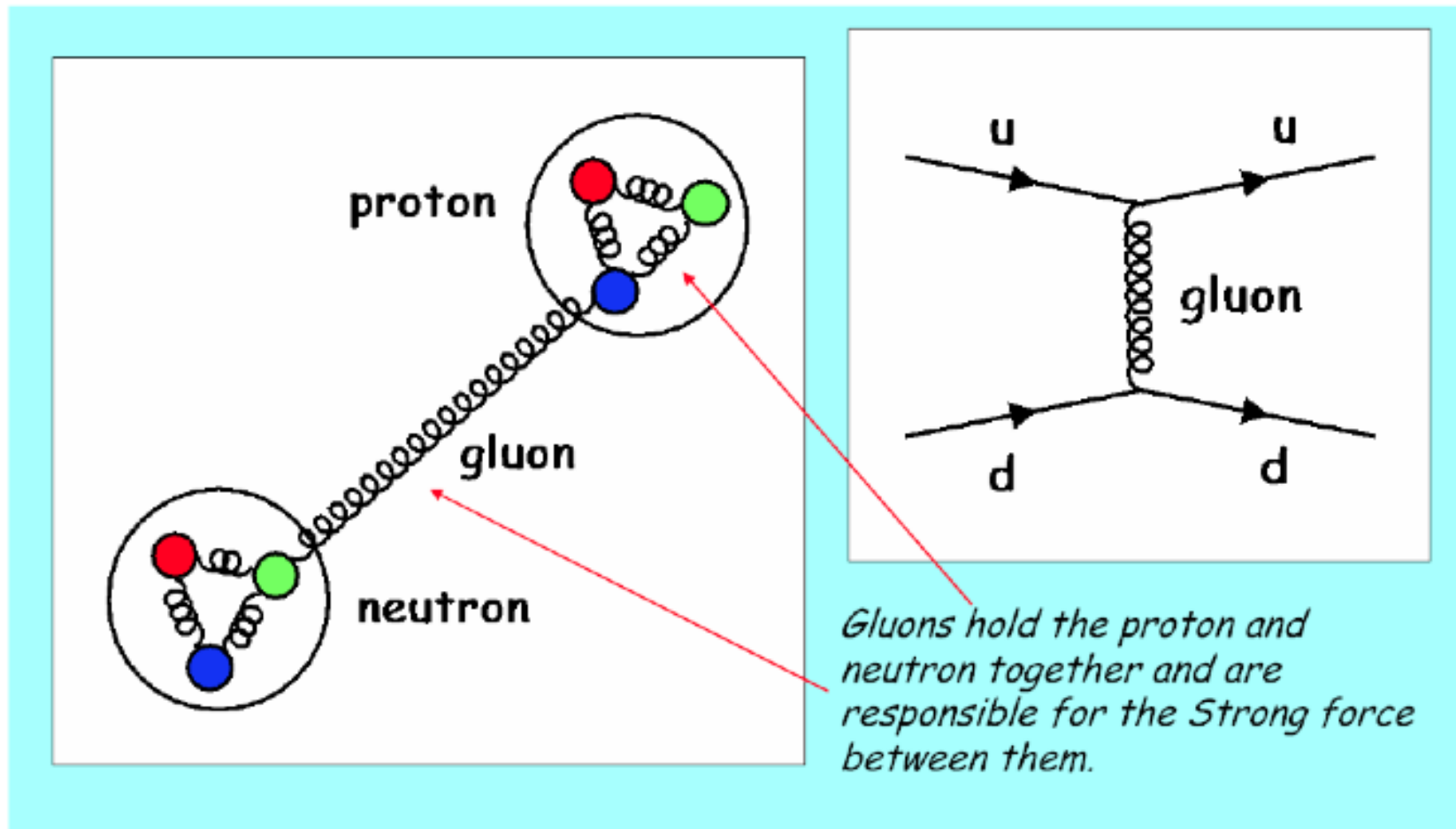
Για $q^2 \rightarrow 0$

$$f(q^2 \rightarrow 0) = \frac{g^2}{M_{W,Z}^2} = G \approx 10^{-5} \text{ GeV}^{-2}$$

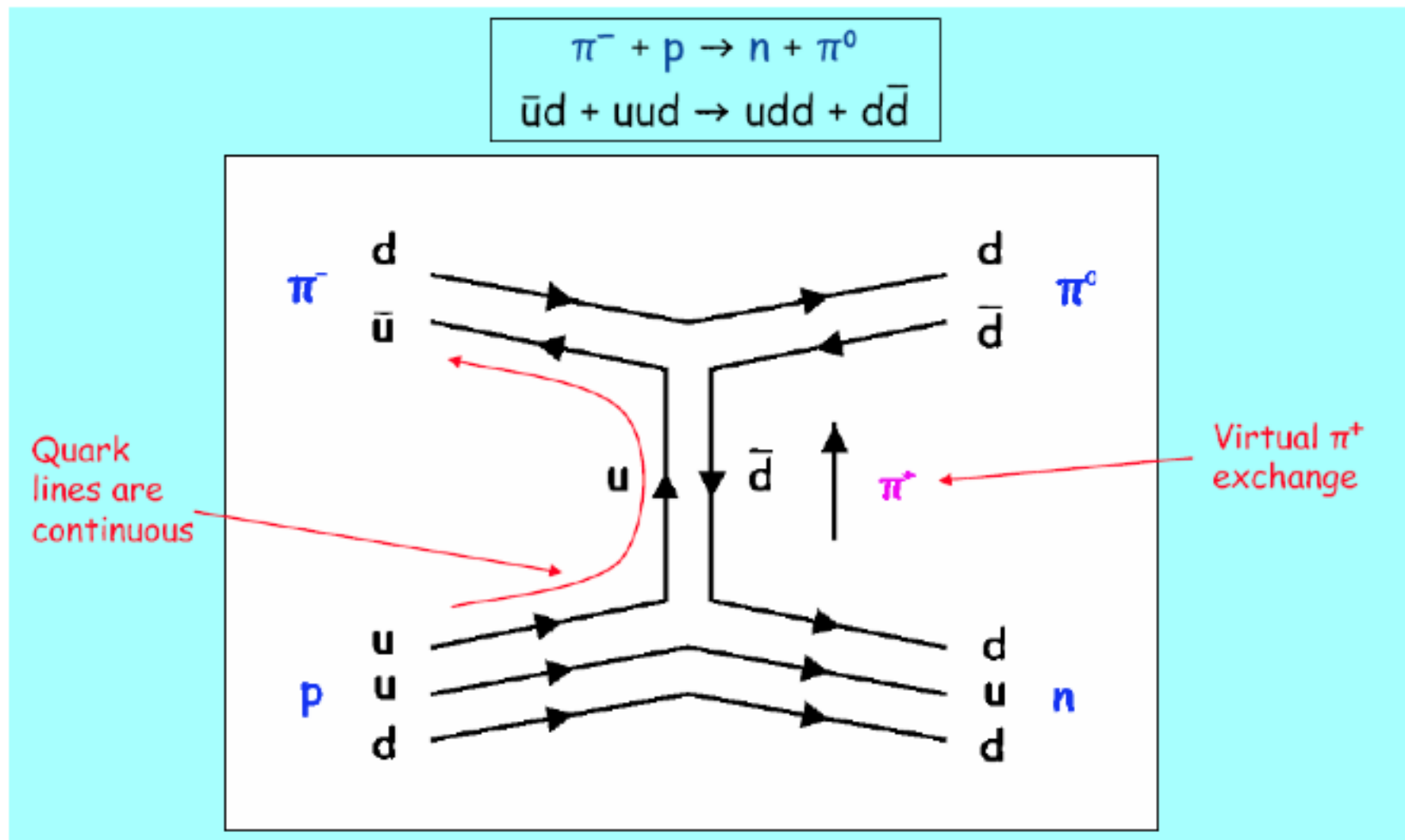
$$M_{W,Z} = \frac{e}{\sqrt{G}} = \sqrt{\frac{4\pi a}{G}} \approx 90 \text{ GeV}$$



Ισχυρές Αλληλεπιδράσεις (I)



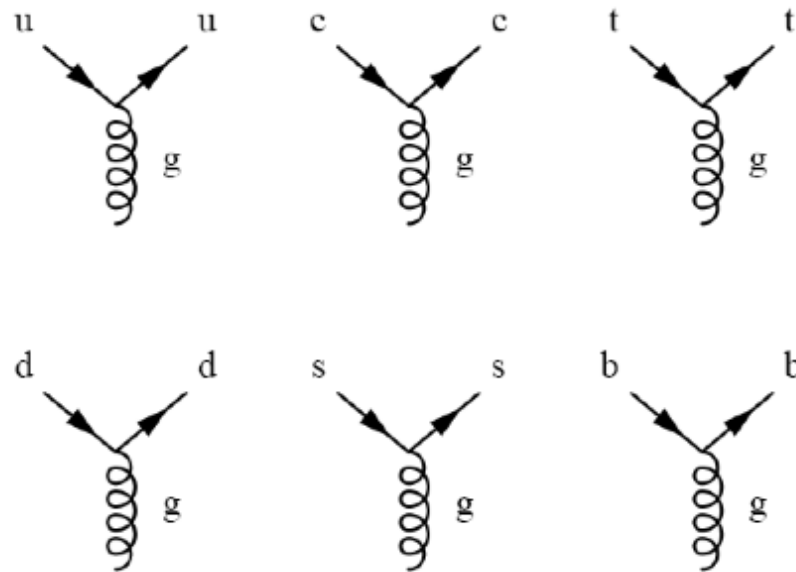
Ισχυρές Αλληλεπιδράσεις (II)



Ισχυρές Αλληλεπιδράσεις (III)

Οι Ισχυρές Αλληλεπιδράσεις **ΔEN** αλλάζουν τις γεύσεις των κουάρκ

Ανταλλάσσονται γλουόνια (gluons); **ΔEN** αλλάζει και το ηλεκτρικό φορτίο

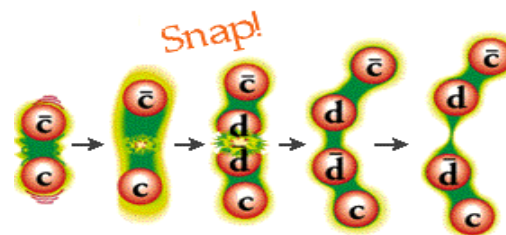
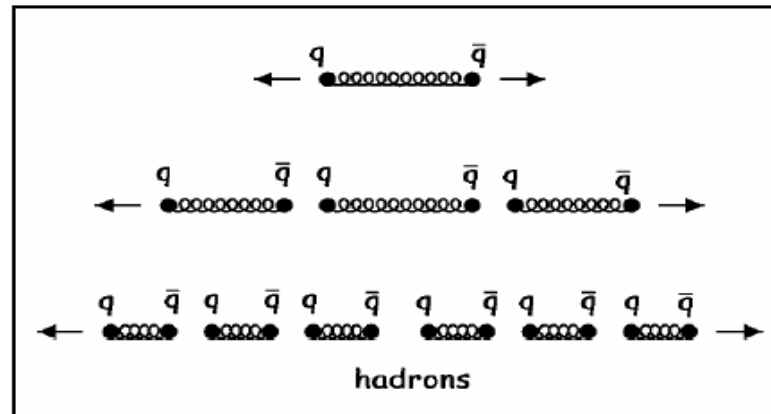
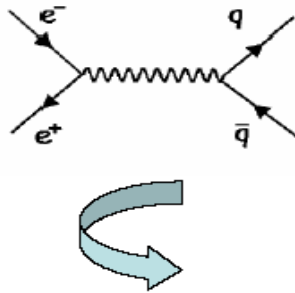


Ισχυρές Αλληλεπιδράσεις (IV)

Χαρακτηριστικό των ισχυρών αλληλεπιδράσεων είναι ο
“εγκλωβισμός” των κουάρκ

Όσο τα απομακρύνουμε η δυναμική τους ενέργεια αυξάνει τόσο ώστε αντί να τα διαχωρίσουμε δημιουργούμε νέο ζεύγος quark-antiquark

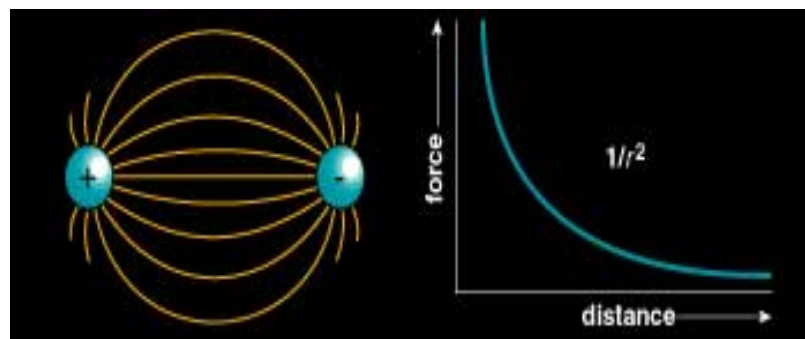
$$V_s = -\frac{4}{3} \frac{a_s}{r} + kr$$



Ισχυρές Αλληλεπιδράσεις (V)

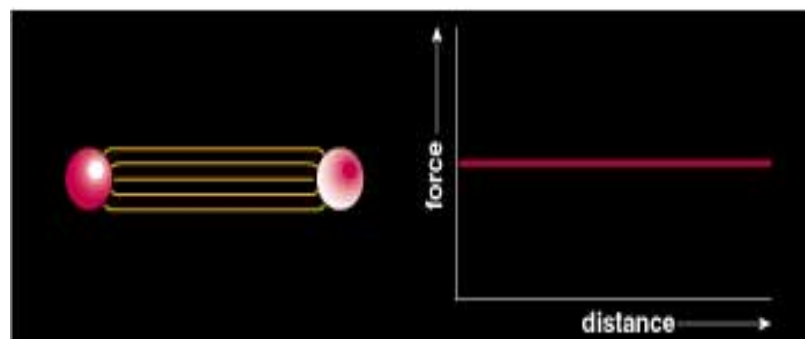
QED vs QCD

Dipole



- 1 electric charge
- γ carries no charge

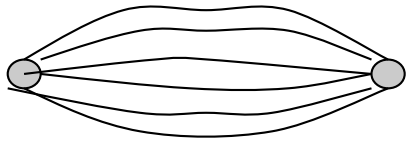
Flux Tube



- 3 Color charges
- g carry charge

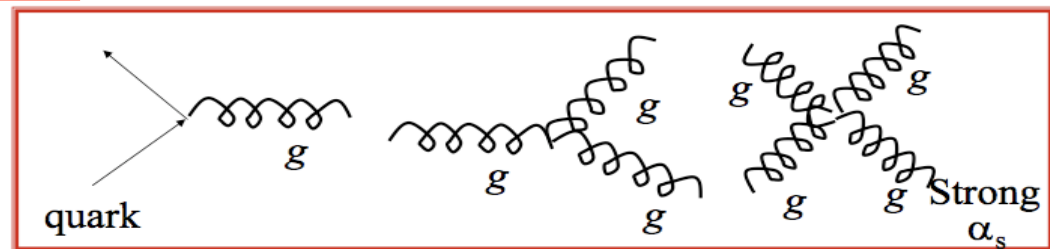
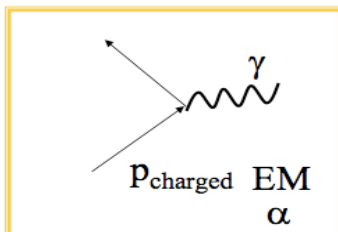
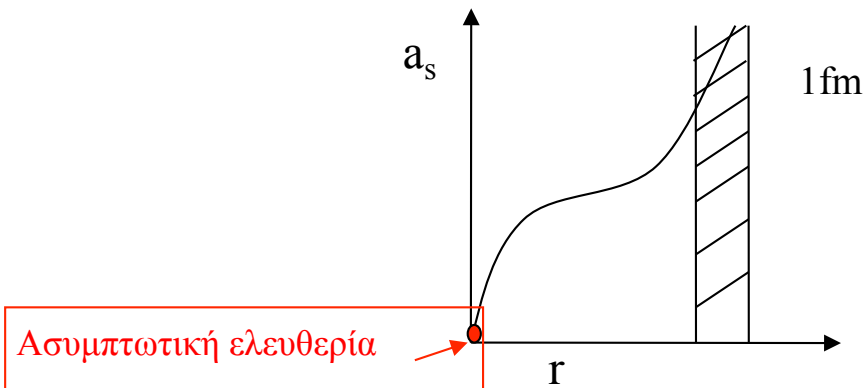
Ισχυρές Αλληλεπιδράσεις (VI)

Οι διαδότες των Ισχυρών Αλληλεπιδράσεων



Η δυναμική ενέργεια αυξάνει όσο προσπαθούμε να απομακρύνουμε τα κουάρκ $\approx kr$

γ , g έχουν μηδενική μάζα **ΑΛΛΑ:** g έχουν φορτίο $\Rightarrow$ μικρή εμβέλεια, επιπλέον κόμβους στα διαγράμματα Feynman (non Abelian)



Ισχυρές Αλληλεπιδράσεις (VII)

- Η δύναμη μεταξύ δύο κουάρκ είναι ανεξάρτητη του χρώματος

- Το δυναμικό μεταξύ των κουάρκ:

$$V_{\text{strong}}(r) = -\frac{4}{3} \left(\frac{a_s}{r} \right) + kr$$

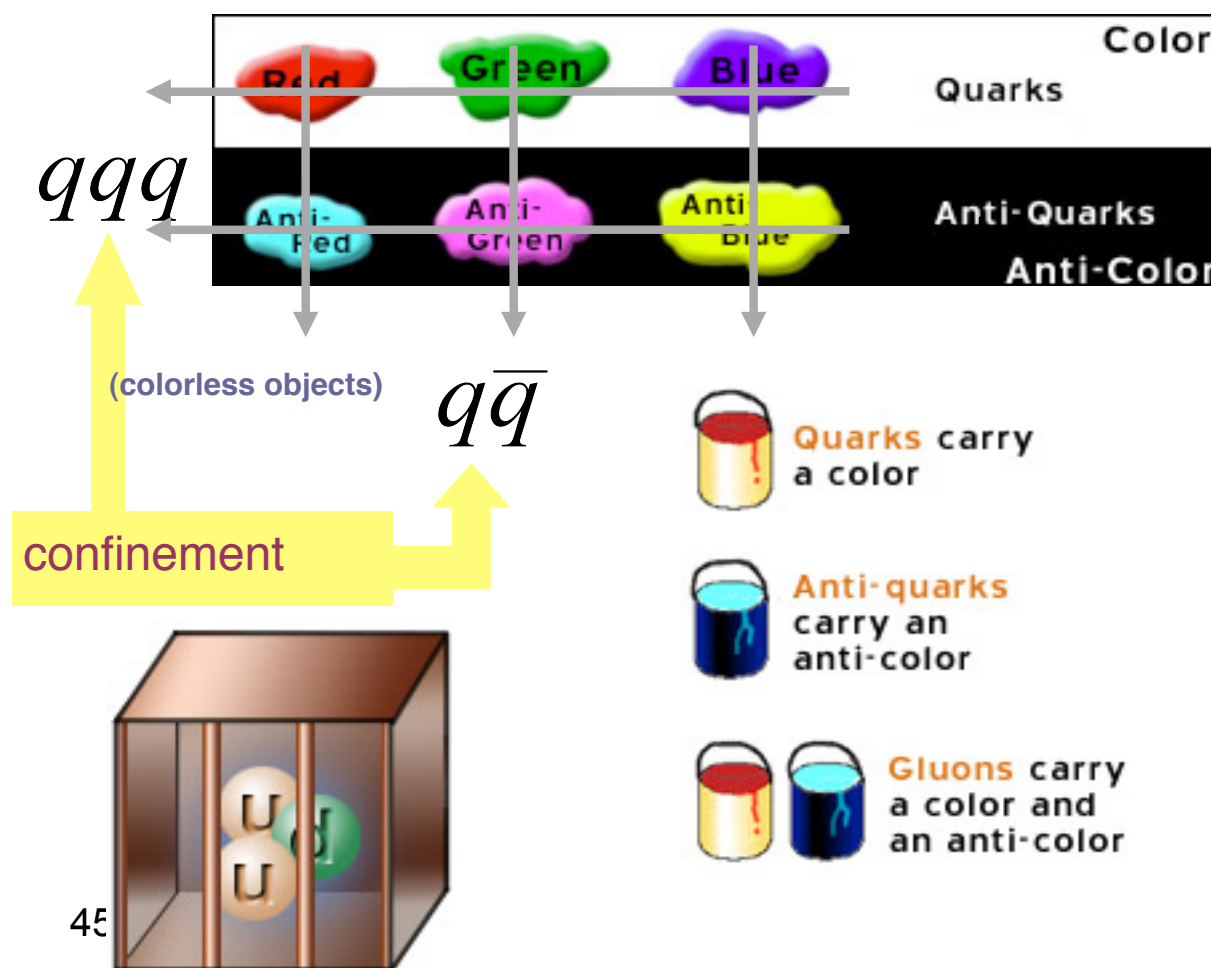
δεν μπορούμε να ελευθερώσουμε
τα κουάρκ! Όσο τα απομακρύνουμε
το δυναμικό αυξάνει...

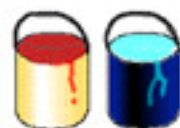
Δυναμικό Coulomb

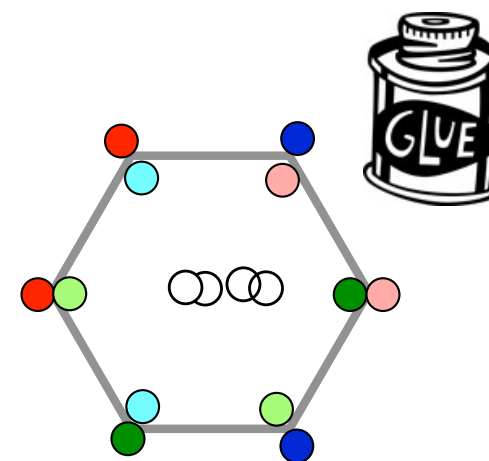
- Οι διαδότες των ισχυρών δυνάμεων : τα γκλουόνια (g), $m = 0$, $\text{spin} = 1$
- Φέρουν 'ισχυρό φορτίο' -> χρώμα => ΔΕΝ υπάρχουν ελεύθερα
- Ο,τι είναι παρατηρήσιμο ΔΕΝ έχει χρώμα

Ισχυρές Αλληλεπιδράσεις (VIII)

Η ιδιότητα του Χρώματος



-  Quarks carry a color
-  Anti-quarks carry an anti-color
-  Gluons carry a color and an anti-color



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

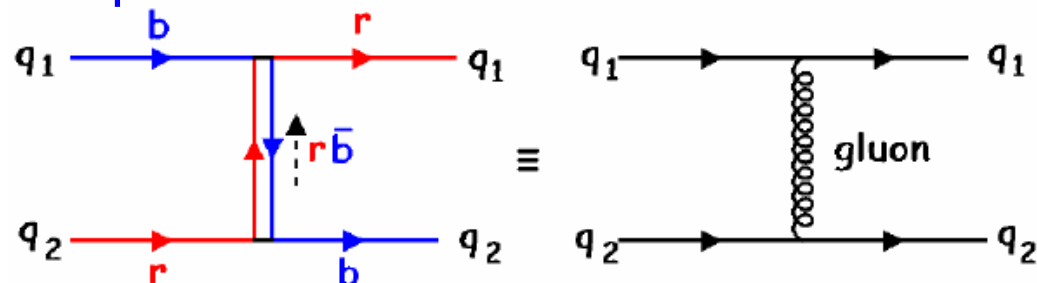
Ισχυρές Αλληλεπιδράσεις (IX)

Οι διαδότες των Ισχυρών Αλληλεπιδράσεων

- Τα κουάρκ έχουν ένα από τα 3 χρώματα. Τα γκλουόνια εμφανίζονται σε 8 συνδυασμούς: είναι οι 8 ανεξάρτητοι δυνατοί συνδυασμοί των 3 χρωμάτων και των 3 αντι-χρωμάτων: (R, G, B, R(bar), G(bar), B(bar)) με χρώμα $\neq 0$

**Το χρώμα (φορτίο)
διατηρείται σε κάθε κόμβο**

Η ανταλλαγή των γλουνίων μπορεί να συνοδεύεται και από αλλαγή του χρώματος των κουάρκ

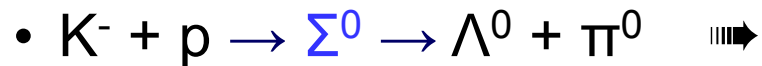


Βασικά Χαρακτηριστικά των Δυνάμεων

	Ισχυρή	Ασθενής	Ηλεκτρο- μαγνητική	Βαρυτική
Σταθερά σύζευξης	$\alpha_s:0.1-1$	$G_F=10^{-5} \text{ GeV}^{-2}$	$1/137$	$GM^2/\hbar c=0.5 \times 10^{-38}$
Τυπική ενεργός διατομή	10 mb	10 pb	10^{-2} mb	
Τυπικός χρόνος ζωής (sec)	10^{-23}	10^{-8}	10^{-20}	

Σταθερά Σύζευξης και Χρόνος ζωής σε μία Αλληλεπίδραση

- Οι ισχυρές αλληλεπιδράσεις συμβαίνουν μεταξύ κουάρκ
- Η σταθερά σύζευξης συνδέεται : με το πλάτος Γ και άρα με τον χρόνο ζωής: $\Delta E^* \Delta t \leq \hbar$



$$\tau = \hbar/\Gamma \rightarrow 10^{-23} \text{ sec}$$

(Ισχυρή Αλληλεπίδραση)



$$\Rightarrow (a_s / a) = (10^{-19} / 10^{-23})^{1/2} \approx 100 \rightarrow a_s = g_s^2 / 4\pi\hbar c$$

g_s είναι το αντίστοιχο φορτίο για τις ισχυρές αλληλεπιδράσεις:

χρώμα $\Leftrightarrow$ ισχυρό φορτίο

$\Rightarrow$ Αν το Κουάρκ είναι: **Red**, ή **Green**, ή **Blue** (R, G, B)

$\Rightarrow$ Το αντίστοιχο Αντικουάρκ είναι αντίστοιχα: anti-**Red**, anti-**Green**, anti-**Blue** (R(bar), G(bar), B(bar))

Μποζόνια : Οι Φορείς των Δυνάμεων

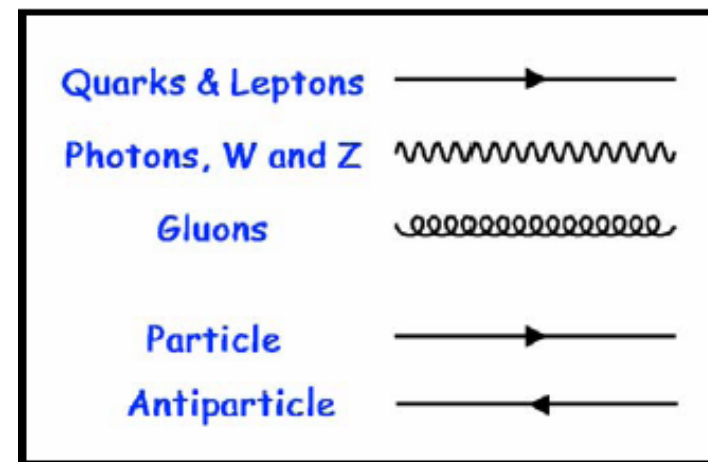
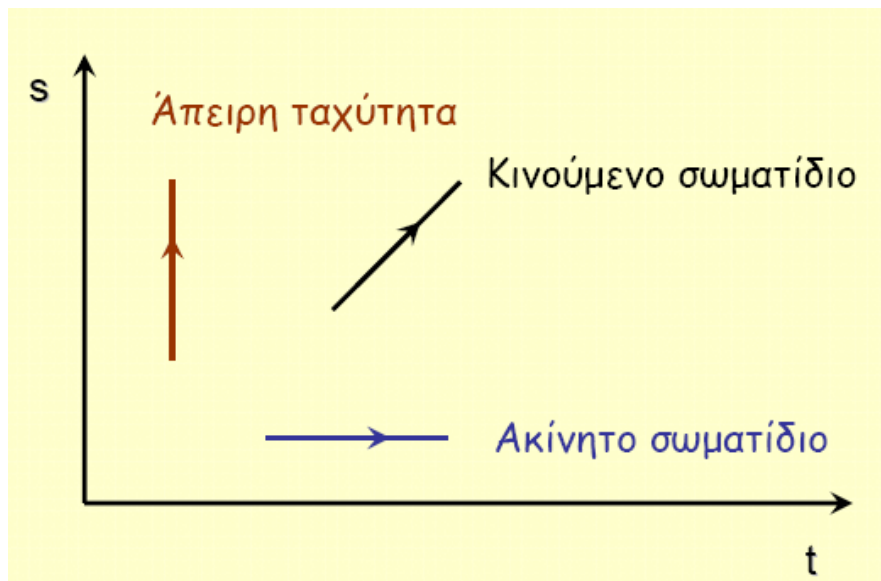
- Στον ηλεκτρομαγνητισμό: $\nabla^2 U(r) = 0 \Rightarrow U(r) = q/4\pi r$
- $\Rightarrow$ η σταθερά g στο δυναμικό Yukawa ισοδυναμεί με το φορτίο στον ηλεκτρομαγνητισμό
- Το πλάτος σκέδασης σωματίου από δυναμικό U (που προκύπτει από πηγή με ισχύ g): $f(q) = g \int U(r) e^{iq \cdot r} \cdot dV$
(q η μεταφορά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

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

Περιγράφει την αλληλεπίδραση δύο σωματιδίων μέσω ανταλλαγής μποζονίου

Διαγράμματα Feynman

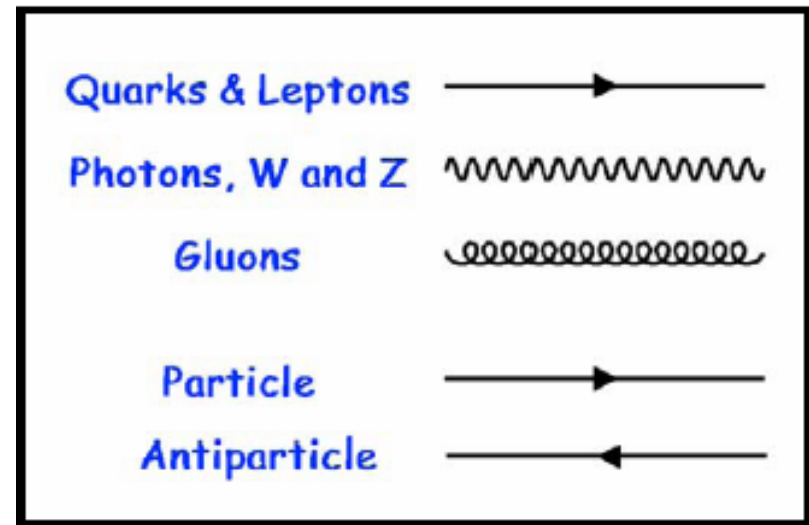
- Διαγράμματα Feynman είναι διαγράμματα για την αναπαράσταση της αλληλεπίδρασης στοιχειωδών σωματιδίων
 - Ο χρόνος εξελίσσεται οριζόντια, ο χώρος κατακόρυφα.
 - Τα βέλη δείχνουν τη φορά κίνησης των σωματίων που πλησιάζουν ή απομακρύνονται από τις κορυφές.
 - Εισερχόμενα σωματάρια ισοδυναμούν με εξερχόμενα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



Διαγράμματα Feynman

Βασικοί κανόνες σε κάθε κόμβο:

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



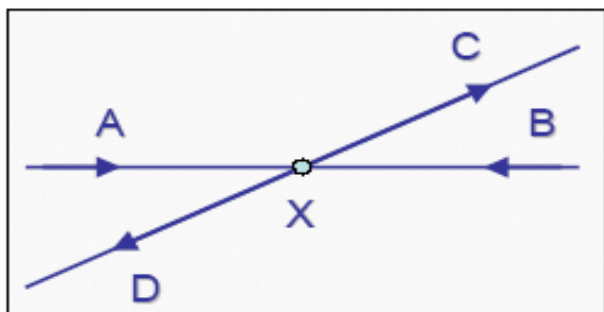
- φερμιόνια (θετικό t) $\longrightarrow$
- anti- φερμιόνια (αρνητικό t) $\longleftarrow$
- Μποζόνια $\begin{array}{l} \text{~~~~~} \\ \text{~~~~~} \end{array}$

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

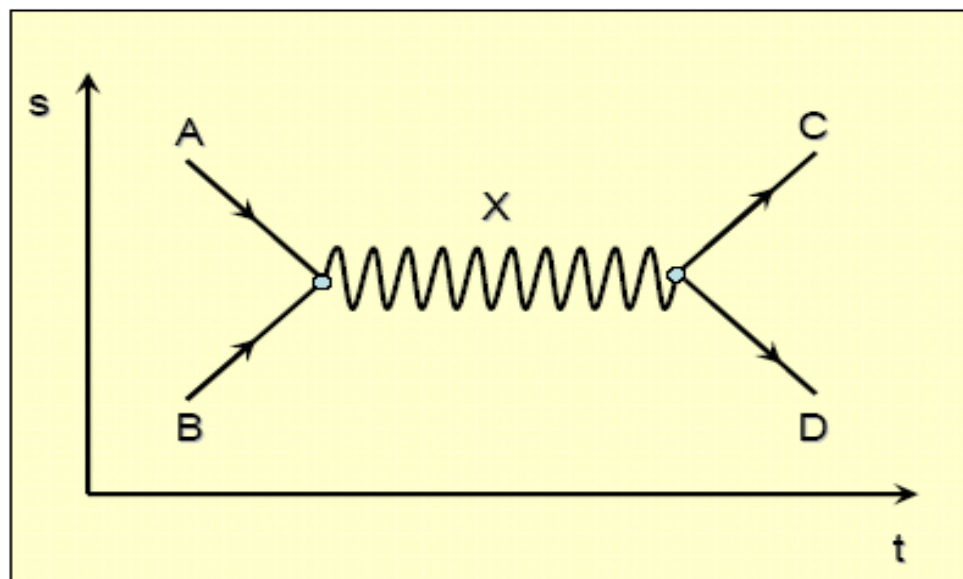
Διαγράμματα Feynman

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.

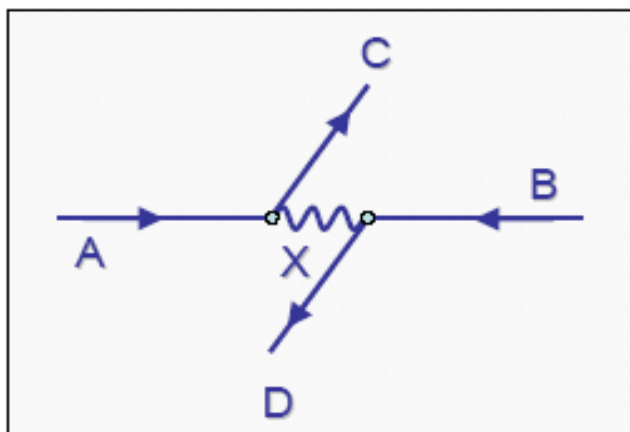


Σχηματική αναπαράσταση της αλληλεπίδρασης με διάγραμμα Feynman. Σε κάθε κορυφή τουλάχιστον το ηλεκτρικό φορτίο διατηρείται.

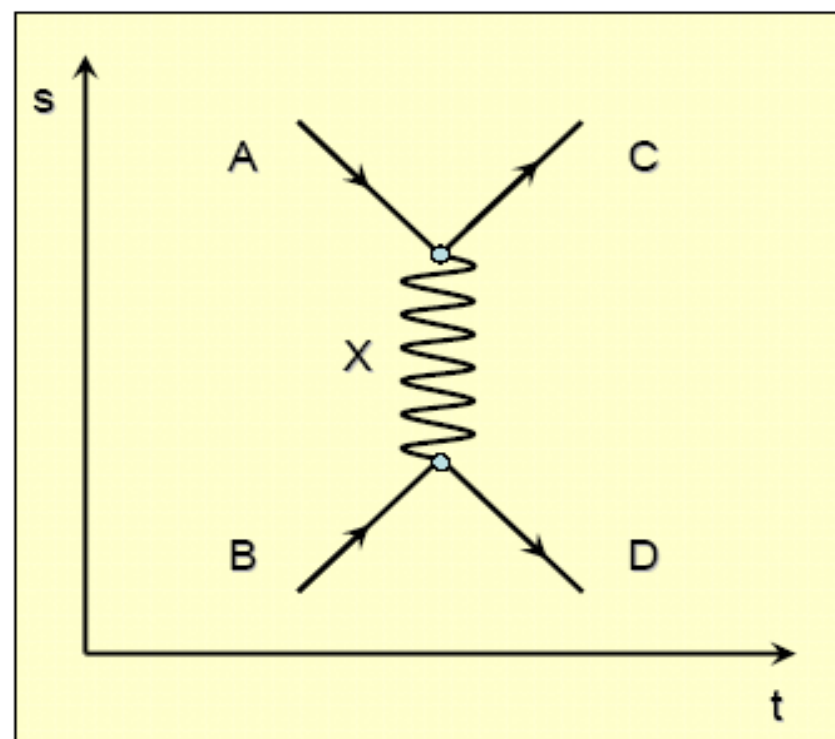
Διαγράμματα Feynman

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.

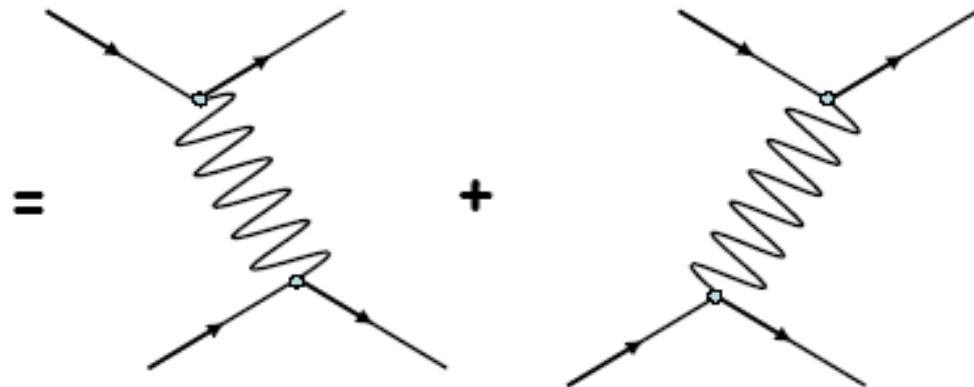
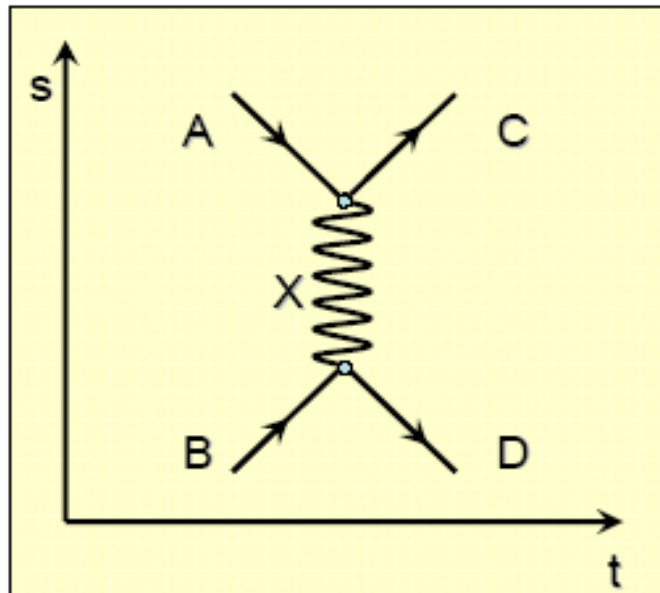


Αναπαράσταση με διάγραμμα Feynman.

Διαγράμματα Feynman

Διαγράμματα Ανταλλαγής (Exchange Diagrams)

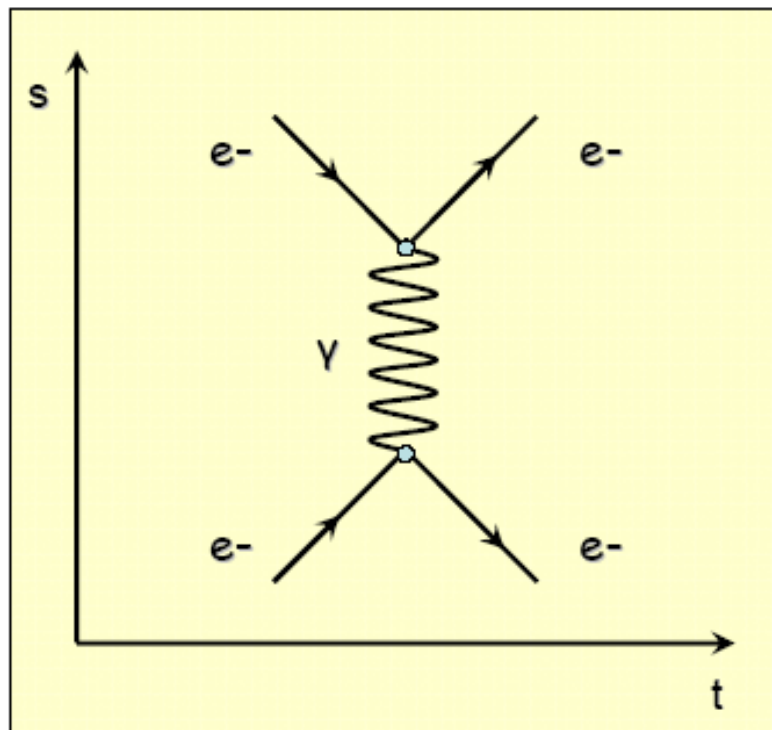
Δεν γνωρίζουμε αν το X εκπέμφθηκε από το A και απορροφήθηκε από το B ή αντίστροφα.



Διαγράμματα Feynman

Δυνητικά Σωματίδια Ανταλλαγής (Virtual Particles)

Σε όλες τις προηγούμενες περιπτώσεις το σωματίο X χαρακτηρίζεται σαν **δυνητικό**. 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: $m = 2ip_e/c$

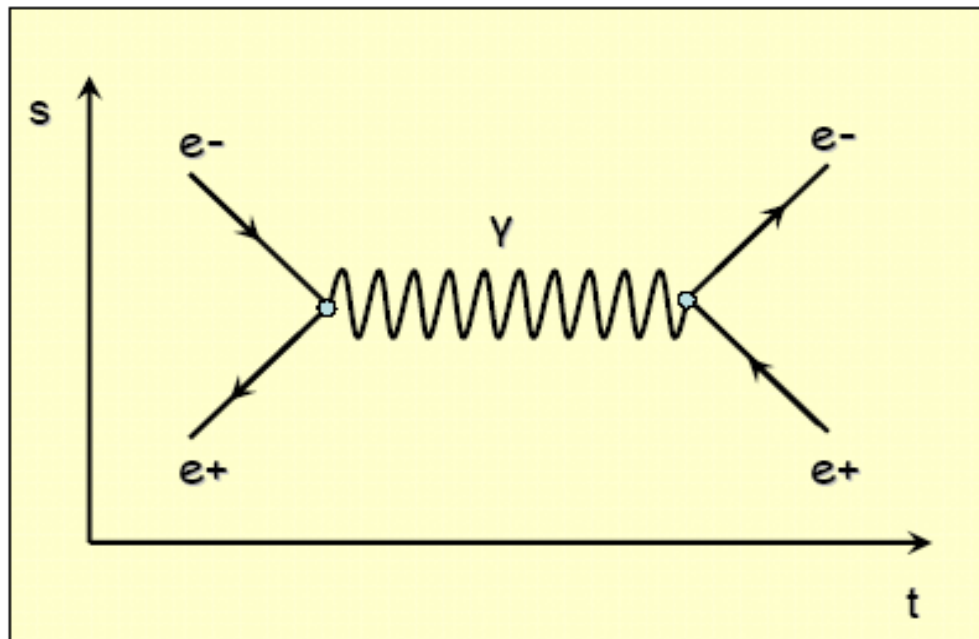
Φανταστική μάζα!

Διαγράμματα Feynman

Δυνητικά ΣωματΙΑ Ανταλλαγής (Virtual Particles)

Παράδειγμα 2

Εξαϋλωση 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
δυνητικό!

Διαγράμματα Feynman

Δυνητικά Σωματίδια 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 υπάρχει για χρονικό διάστημα:

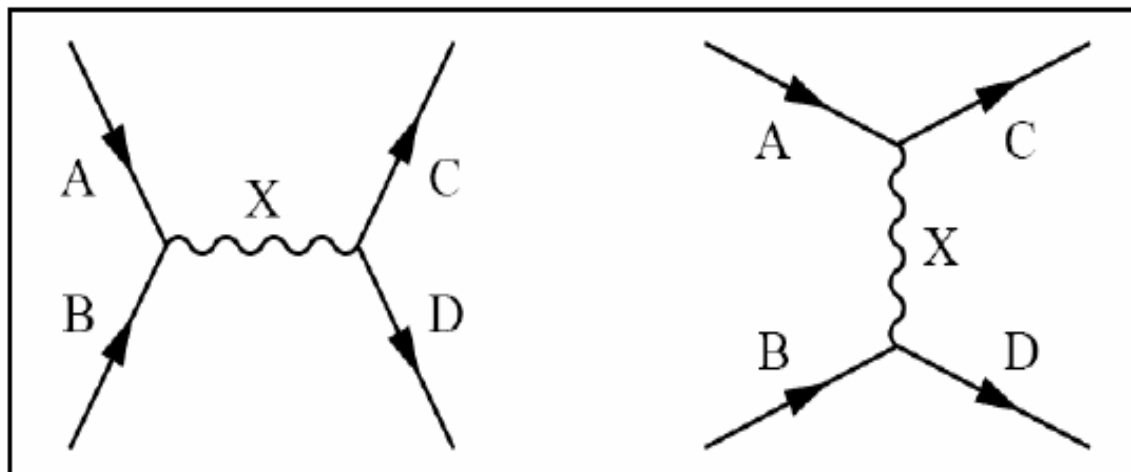
$$\Delta t \approx \hbar / 2E_e$$

Διαγράμματα Feynman

Γενικές Ιδιότητες

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

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

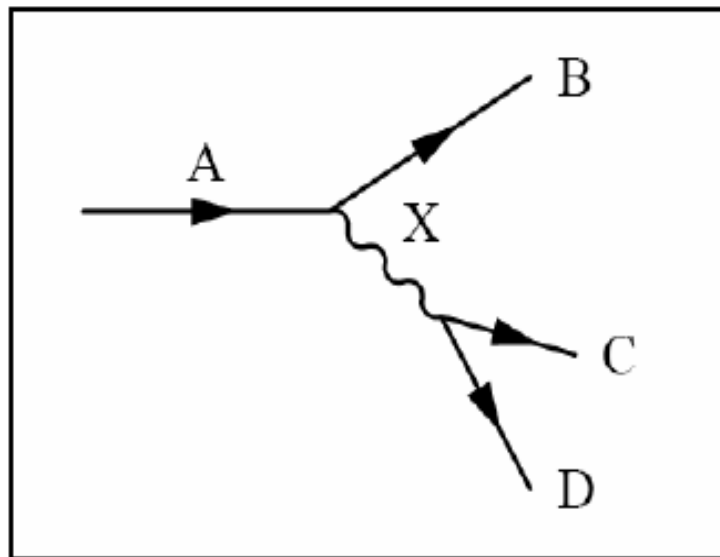


Διαγράμματα Feynman

Γενικές Ιδιότητες

ή της μορφής:

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



A, B, C, D

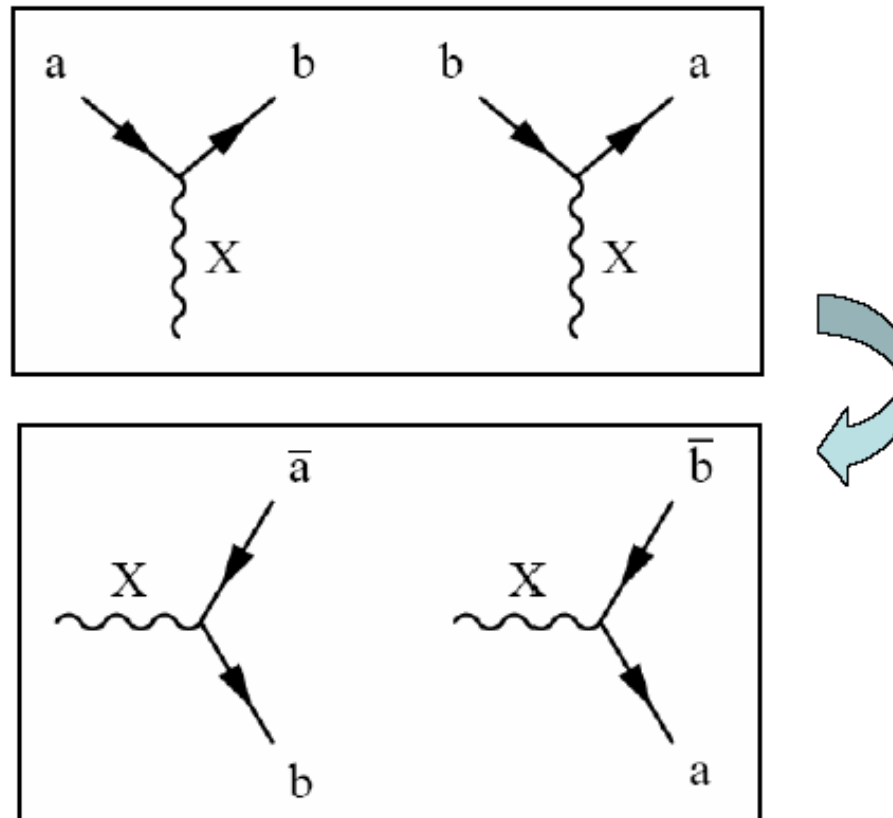
- Κουάρκ
- Λεπτόνια
- Αντικουάρκ
- Αντιλεπτόνια

X

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

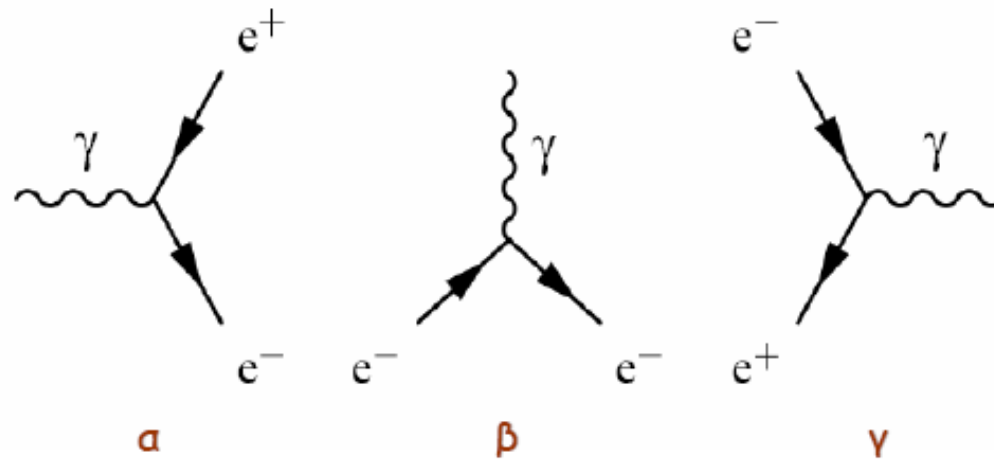
Διαγράμματα Feynman

Γενικές Ιδιότητες: Περιστροφή διαγραμμάτων



Διαγράμματα Feynman

Ηλεκτρομαγνητικές Αλληλεπιδράσεις



(α) Δίδυμη Γένεση

(β) Φωτοηλεκτρικό φαινόμενο

(γ) Εξαϋλωση ποζιτρονίου