

Εισαγωγή στη Φυσική Στοιχειωδών Σωματιδίων

Δήμος Σαμψωνίδης
(21-12-2016)

Στοιχεία Πυρηνικής Φυσικής & Φυσικής Στοιχειωδών Σωματιδίων
5 ο Εξάμηνο

Αλληλεπιδράσεις και Πεδία στη Σωματιδιακή Φυσική

Κλασική & κβαντική εικόνα πεδίου

- **Κλασική εικόνα 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

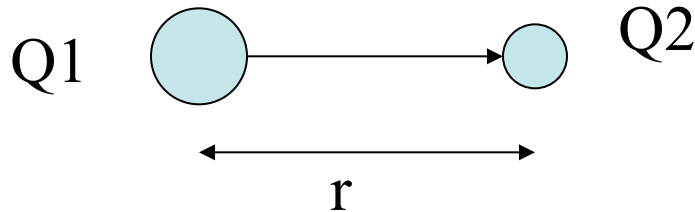
Name	Mass GeV/c ²	Electric charge
 photon	0	0
 W bosons	80.39	-1
 W bosons	80.39	+1
 Z boson	91.188	0

Strong (color) spin = 1

Name	Mass GeV/c ²	Electric charge
 gluon	0	0

Η εικόνα στην 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



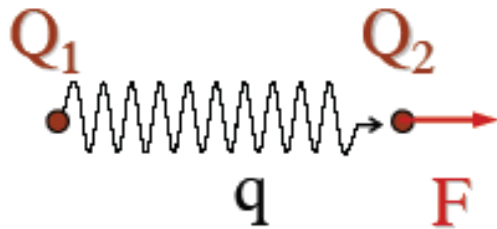
$$\vec{F}(r) = Q2 \cdot \vec{E}(r)$$

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

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

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 'δυναμικό' φωτόνιο με ορμή q



Δύναμη

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

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 **ΔE** ισχύει: $E^2 = p^2 c^2 + m^2 c^4$
(ή αν το m ΔE 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 ‘**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 παρατηρήσιμα- 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’έκταση η περιγραφή και των άλλων αλληλεπιδράσεων στον μικρόκοσμο βασίστηκε στην ανταλλαγή δυναμικών μποζονίων

Ανταλλαγή Μποζονίων-Θεωρία Yukawa

Η πυρηνική δύναμη είναι απόρρηια 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

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:

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

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

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

- Αν $m=0 \Rightarrow$ η λύση της εξίσωσης 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

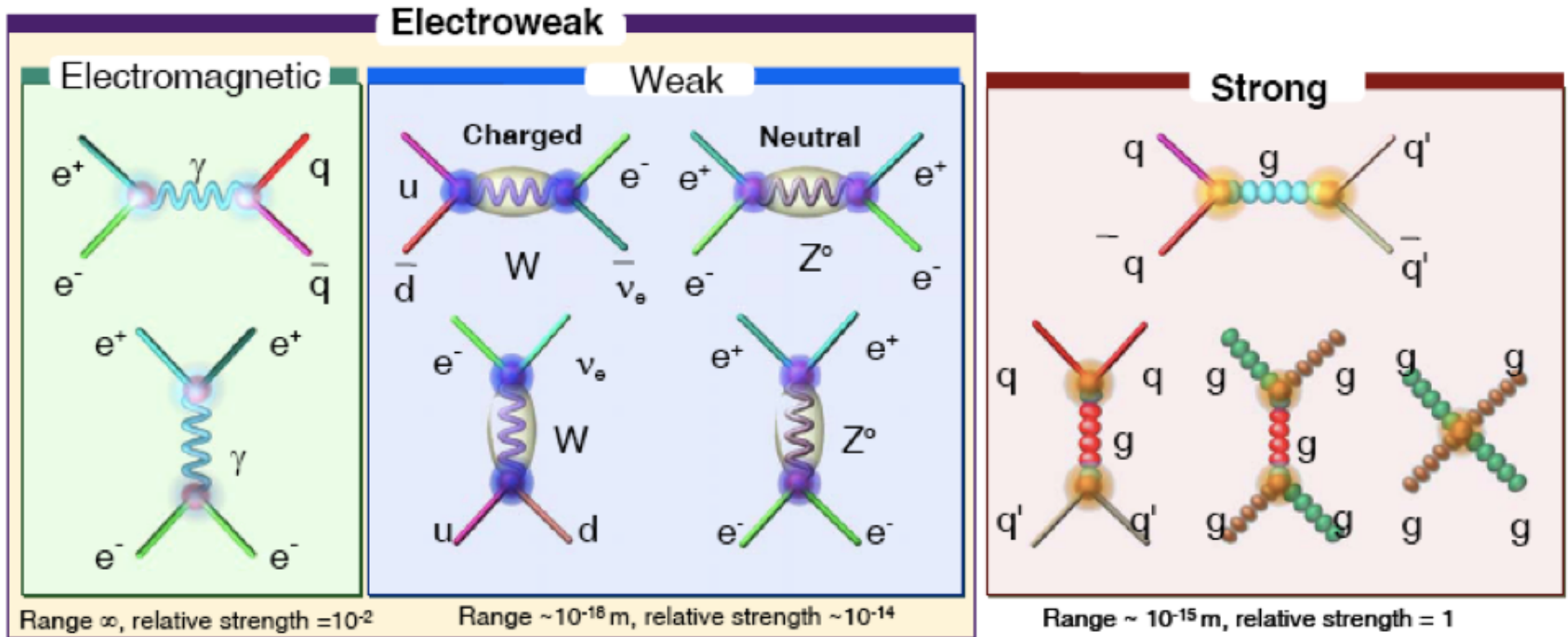
Η λύση της εξίσωσης για το δυναμικό σωματίου μάζας m

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

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

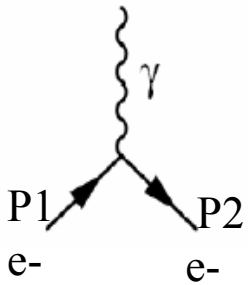
$$R = \frac{\hbar}{mc} \Rightarrow mc = \frac{\hbar}{R} \Rightarrow mc^2 = \frac{\hbar c}{R} \Rightarrow mc^2 \approx \frac{197 \text{ MeV} \cdot \text{fm}}{1.4 \text{ fm}} \approx 140 \text{ MeV}$$

Αλληλεπιδράσεις- Σύζευξη Σωματιδίων



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

Μποζόνια-οι φορείς των δυνάμεων



- Μεταφορά Ενέργειας και ορμής:

- $q = P1 - P2$

- $v = E1 - E2$

- 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

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

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

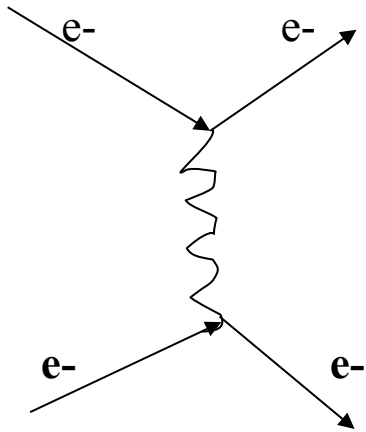
$$f(q) \propto \frac{g^2}{q^2 + m^2}$$

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

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

$$\propto 1/q^2$$

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

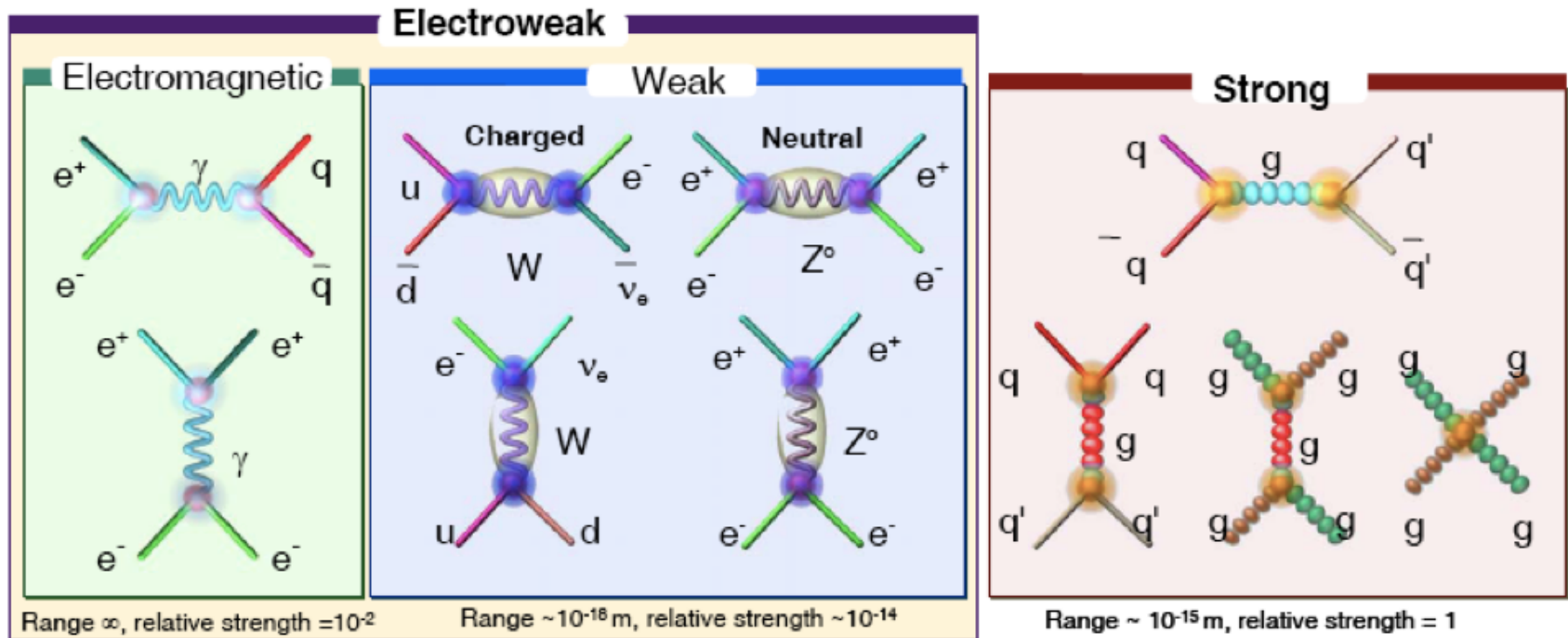
$$\propto |f(q)|^2$$

=>

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

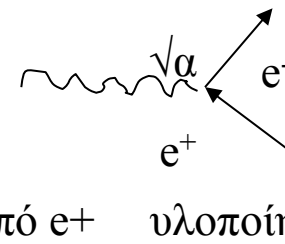
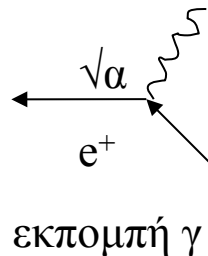
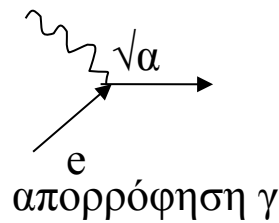
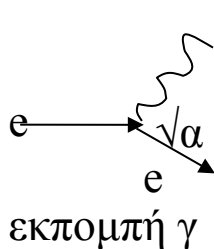
Διαγράμματα Feynman

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



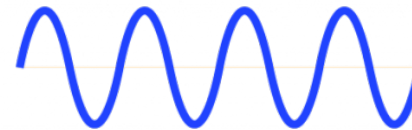
Διαγράμματα Feynmann

- 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 Feynman

Μπορείτε να σχεδιάσετε δύο είδη γραμμών, μια ευθεία γραμμή με ένα βέλος ή κινούμενη γραμμή:

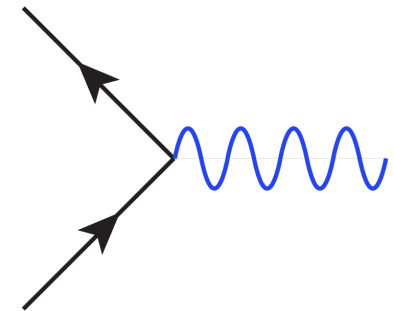


σε οποιαδήποτε διεύθυνση

Μπορείτε να συνδέσετε αυτές τις γραμμές μόνο αν έχετε δύο γραμμές με βέλη που συναντούν μια κινούμενη γραμμή.

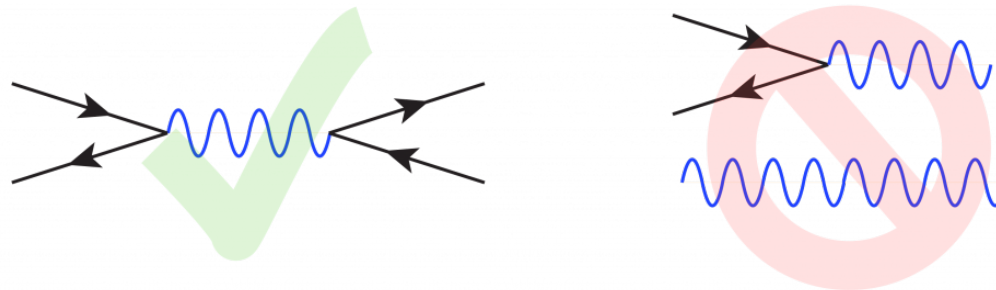
Ο προσανατολισμός των βελών είναι σημαντικό!

Θα πρέπει να έχετε ακριβώς ένα βέλος να πηγαίνει προς την κορυφή και ακριβώς ένα βέλος που από βγαίνει.



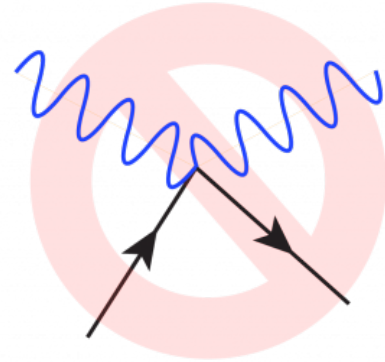
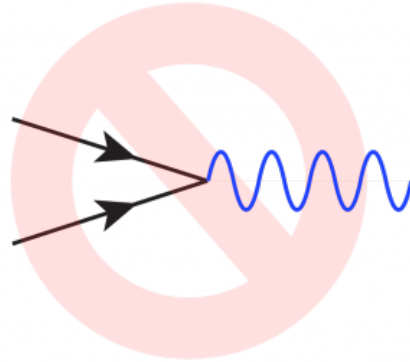
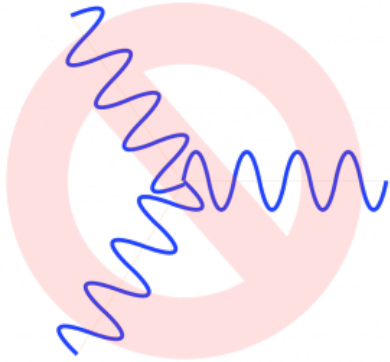
Διαγράμματα Feynman

Τα διαγράμματα πρέπει να περιέχουν μόνο συνδεδεμένα κομμάτια. Κάθε γραμμή πρέπει να συνδεθεί με τουλάχιστον μία κορυφή. Δεν πρέπει να υπάρχει κανένα αποσυνδεδεμένο μέρος του διαγράμματος.



Αυτό που είναι σημαντικό είναι τα τελικά σημεία της κάθε γραμμής. Αρα μπορούμε να απαλλαγούμε από περίσσειες καμπύλες. Θα πρέπει κάθε γραμμή να θεωρείται ως κορδόνι. Θα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν ευθεία. (Αλλά η κυματοειδής γραμμή παραμένει κινούμενα!)





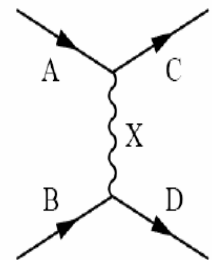
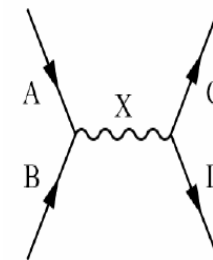
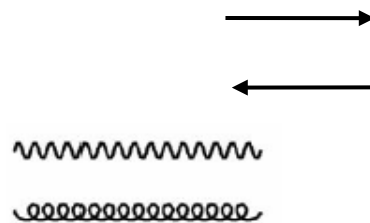
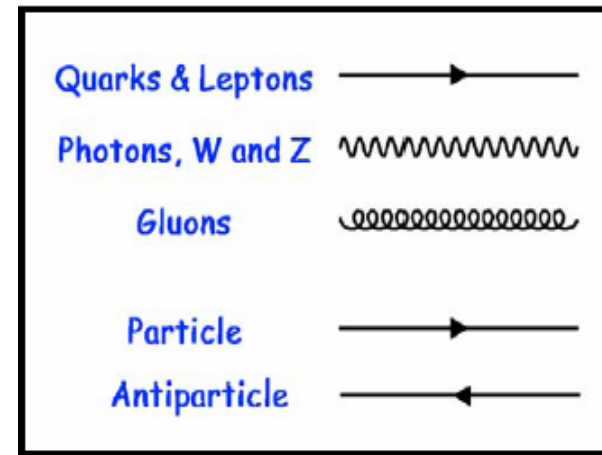
Διαγράμματα Feynmann

Βασικοί κανόνες σε κάθε κόμβο:

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

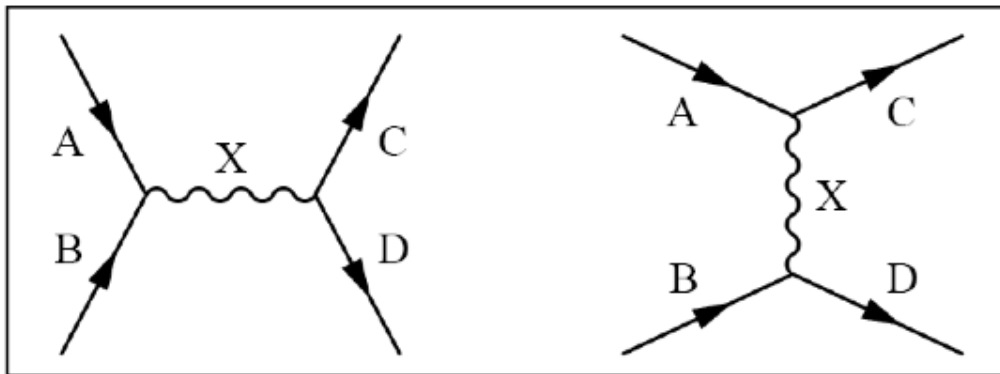
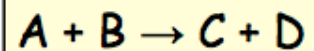
- φερμιόνια (θετικό t)
- anti- φερμιόνια (αρνητικό t)
- Μποζόνια

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



Διαγράμματα Feynmann

Παριστάνουν διεργασίες της μορφής



A, B, C, D

- Κουάρκ
- Λεπτόνια
- Αντικουάρκ
- Αντιλεπτόνια

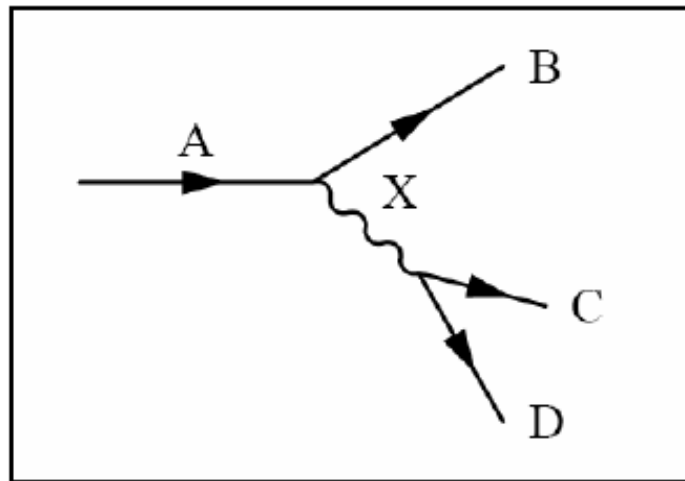
X

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

Διαγράμματα Feynmann

... ή της μορφής

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



A, B, C, D

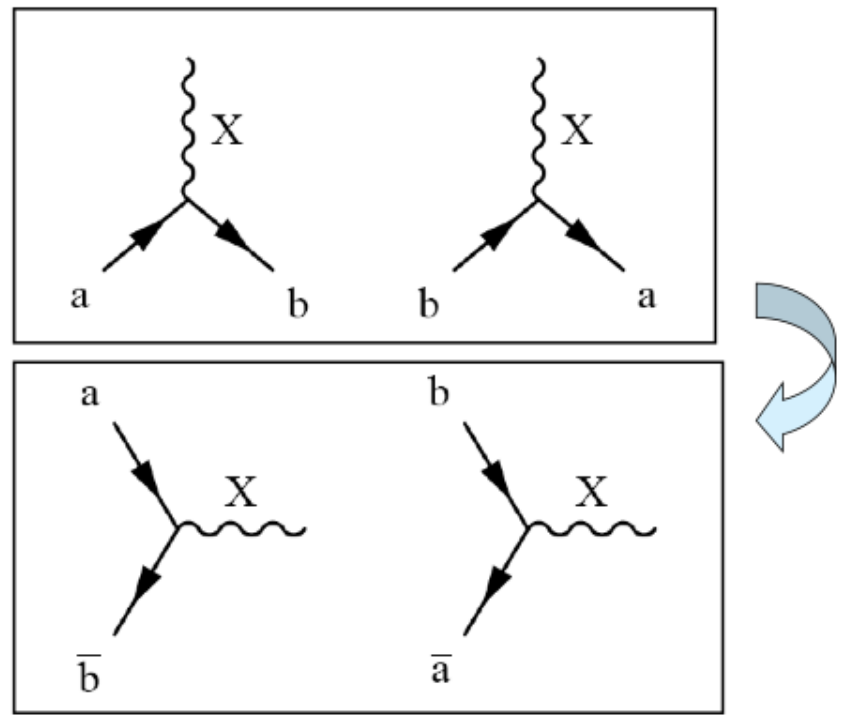
- Κουάρκ
- Λεπτόνια
- Αντικουάρκ
- Αντιλεπτόνια

X

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

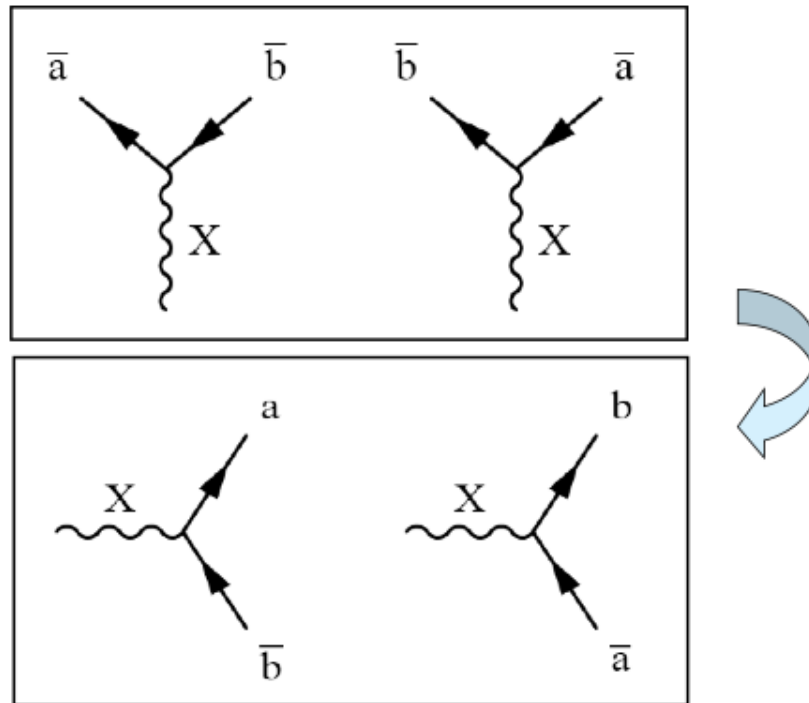
Διαγράμματα Feynmann

Γενικές ιδιότητες: Παραδείγματα περιστροφής διαγραμμάτων



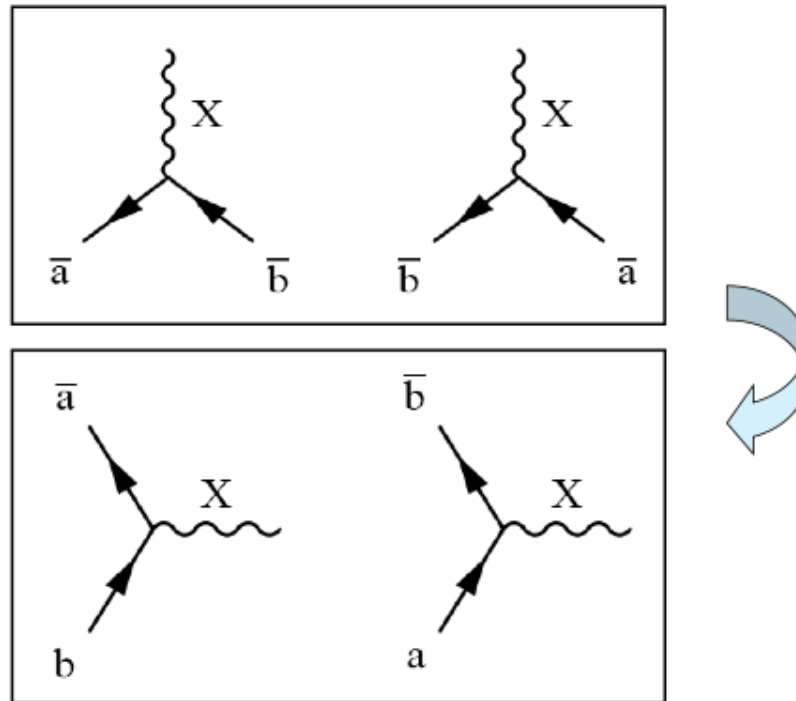
Διαγράμματα Feynmann

Γενικές ιδιότητες: Παραδείγματα περιστροφής διαγραμμάτων



Διαγράμματα Feynmann

Γενικές ιδιότητες: Παραδείγματα περιστροφής διαγραμμάτων

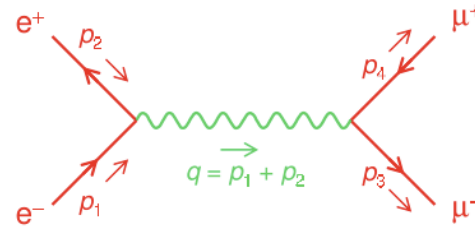


Διαγράμματα Feynmann

- Παραδείγματα απεικόνισης μιας αλληλεπίδρασης με Διαγράμματα Feynman

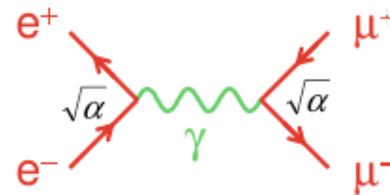
Σκέδαση

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



Διαγράμματα “**χαμηλότερης τάξης**”

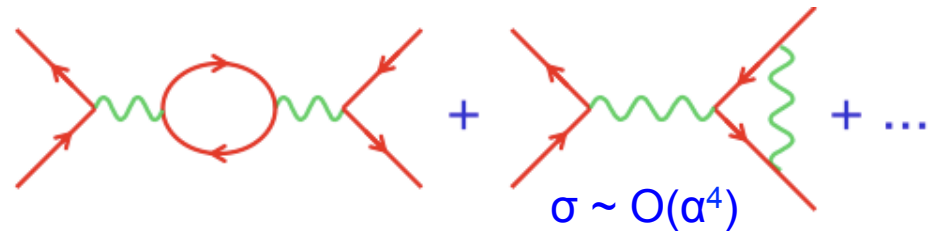
(πλάτος $f \sim \alpha$, ενεργός διατομή $\sigma \sim \alpha^2$)



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

Διαγράμματα “**υψηλότερης τάξης**”

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



$$\sigma \sim O(\alpha^4)$$

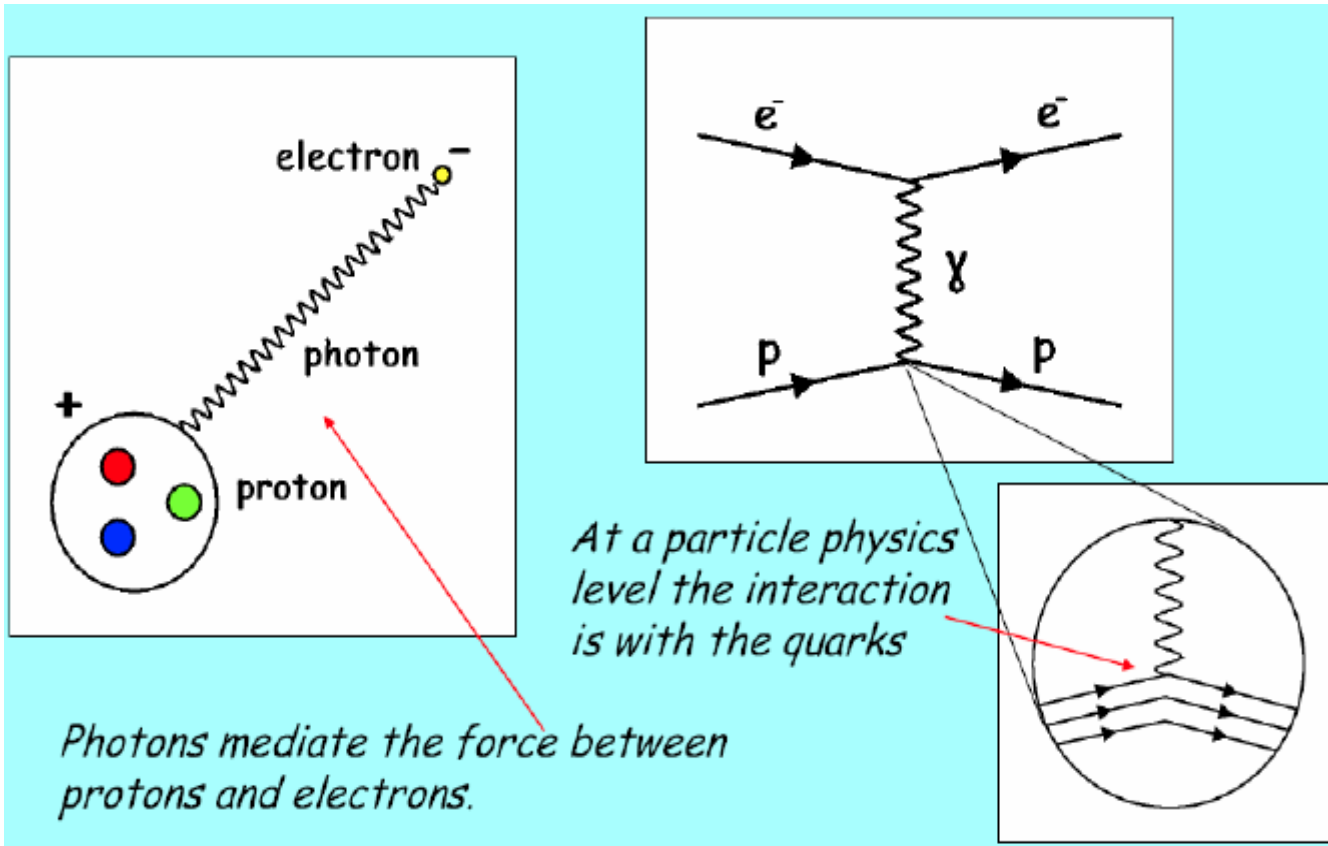
Διαγράμματα Feynmann

- **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

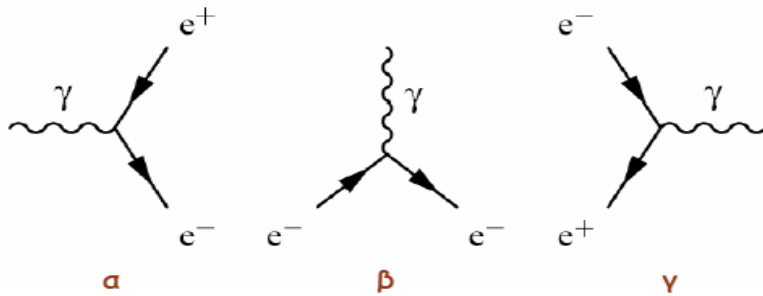
$$\alpha = \frac{V_c(r = r_c)}{m_e c^2} = \frac{e^2}{\hbar / m_e c} = \frac{e^2}{\hbar c} \approx \frac{1}{137}$$

- 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



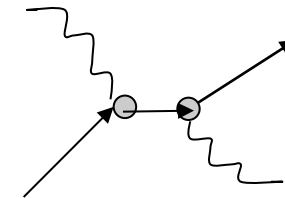
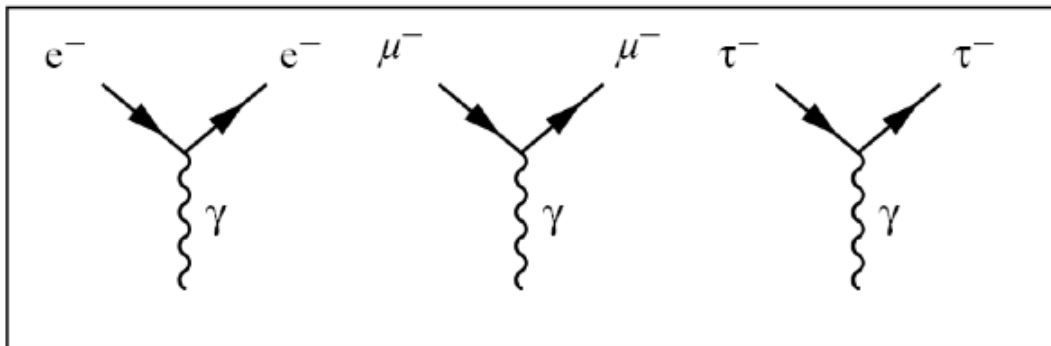
(α) Δίδυμη Γένεση
(β) Φωτοηλεκτρικό φαινόμενο
(γ) Εξαϋλωση ποζιτρονίου

- Η ισχύς της αλληλεπίδρασης μεταξύ φορτισμένων σωματίων και φωτονίων:

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

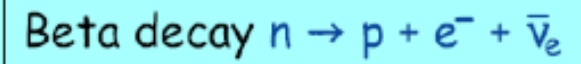
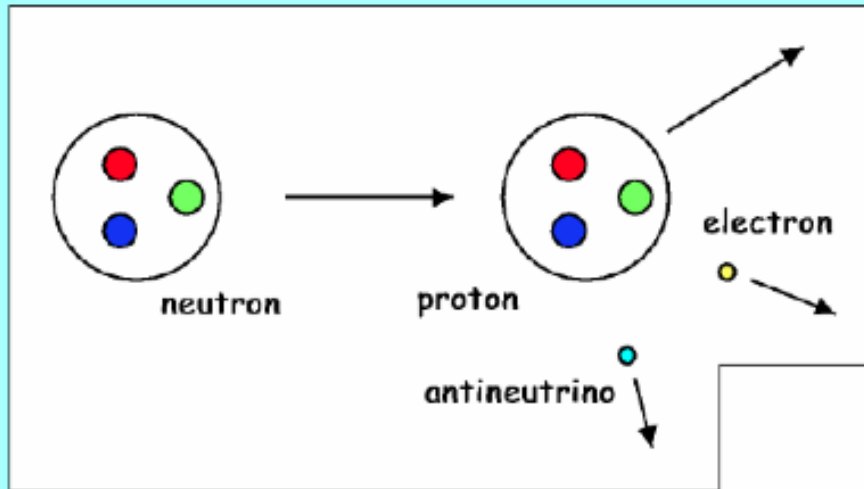
- **Φωτοηλεκτρικό φαινόμενο** : το πλάτος της αλληλεπίδρασης είναι $\sim \sqrt{\alpha} \Rightarrow$ ενεργός διατομή: $\sim \alpha$ (1ης τάξης)

- **Σκέδαση Compton**: το πλάτος της αλληλεπίδρασης είναι $\sim \alpha \Rightarrow$ ενεργός διατομή: $\sim \alpha^2$ (2ης τάξης)

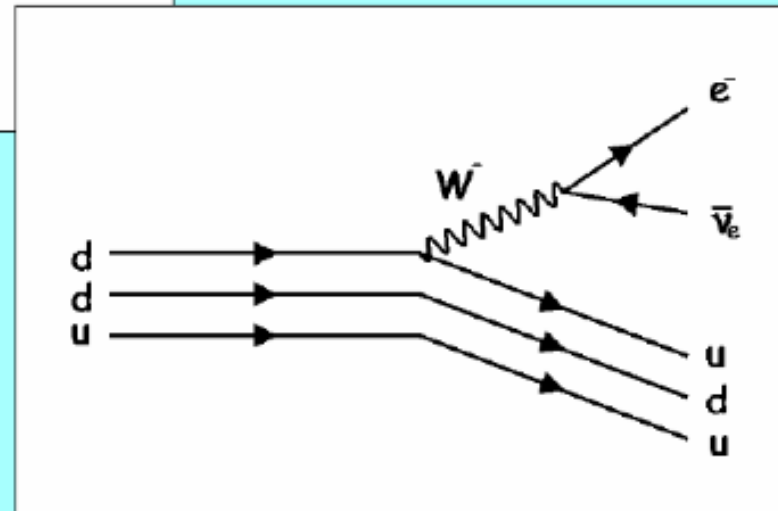


Σκέδαση Compton

Ασθενείς Αλληλεπιδράσεις (I)



*Mediated by charged
 W exchange*



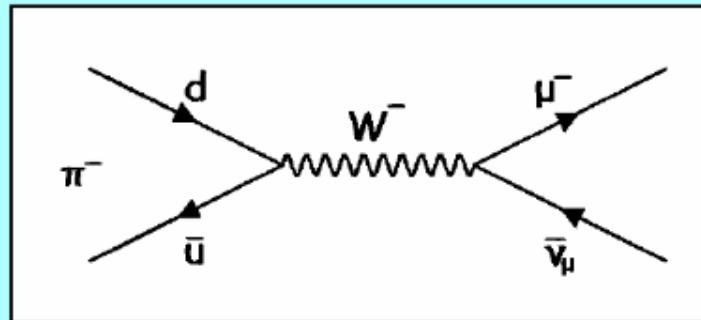
Ασθενείς Αλληλεπιδράσεις (II)

Οι Ασθενείς Αλληλεπιδράσεις αλλάζουν τις γεύσεις των κουάρκ και των λεπτονίων

Παράδειγμα διάσπασης μεσονίου σε λεπτόνια

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

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



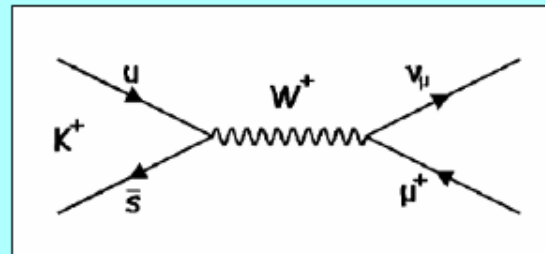
Ασθενείς Αλληλεπιδράσεις (III)

Οι Ασθενείς Αλληλεπιδράσεις αλλάζουν τις γεύσεις των κουάρκ και των λεπτονίων

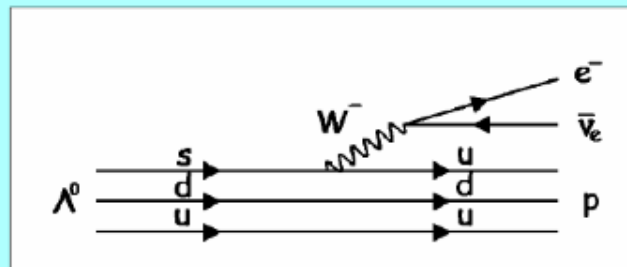
Παράδειγμα διάσπασης με αλλαγή της παραδοξότητας

$\Delta S = 1$ (Strangeness changes)

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



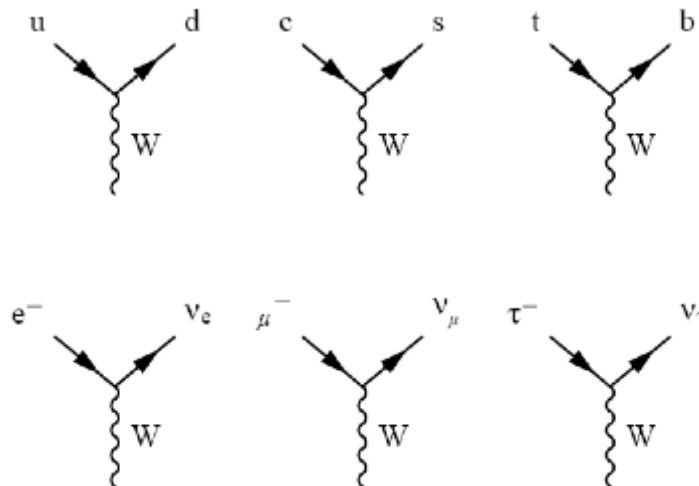
$$\Lambda^0 \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$$



Ασθενείς Αλληλεπιδράσεις (IV)

Οι Ασθενείς Αλληλεπιδράσεις αλλάζουν τις γεύσεις των κουάρκ και των λεπτονίων

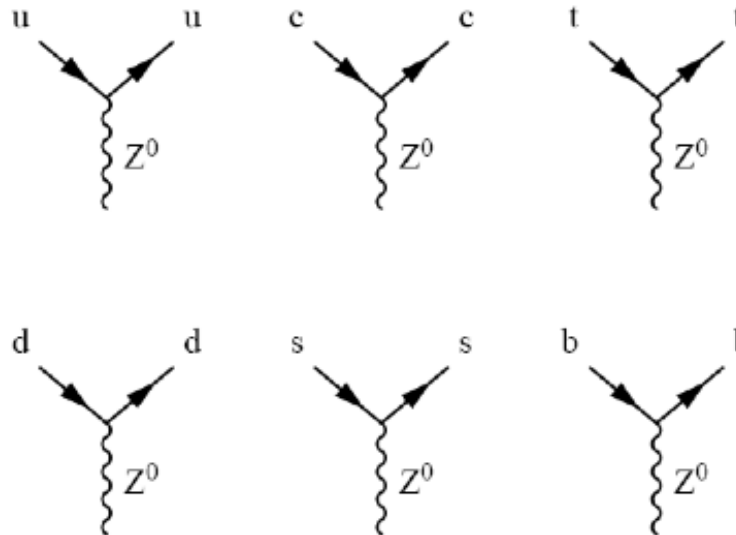
Όταν Ανταλλάσσονται οι διαδότες W , αλλάζει και το φορτίο



Ασθενείς Αλληλεπιδράσεις (V)

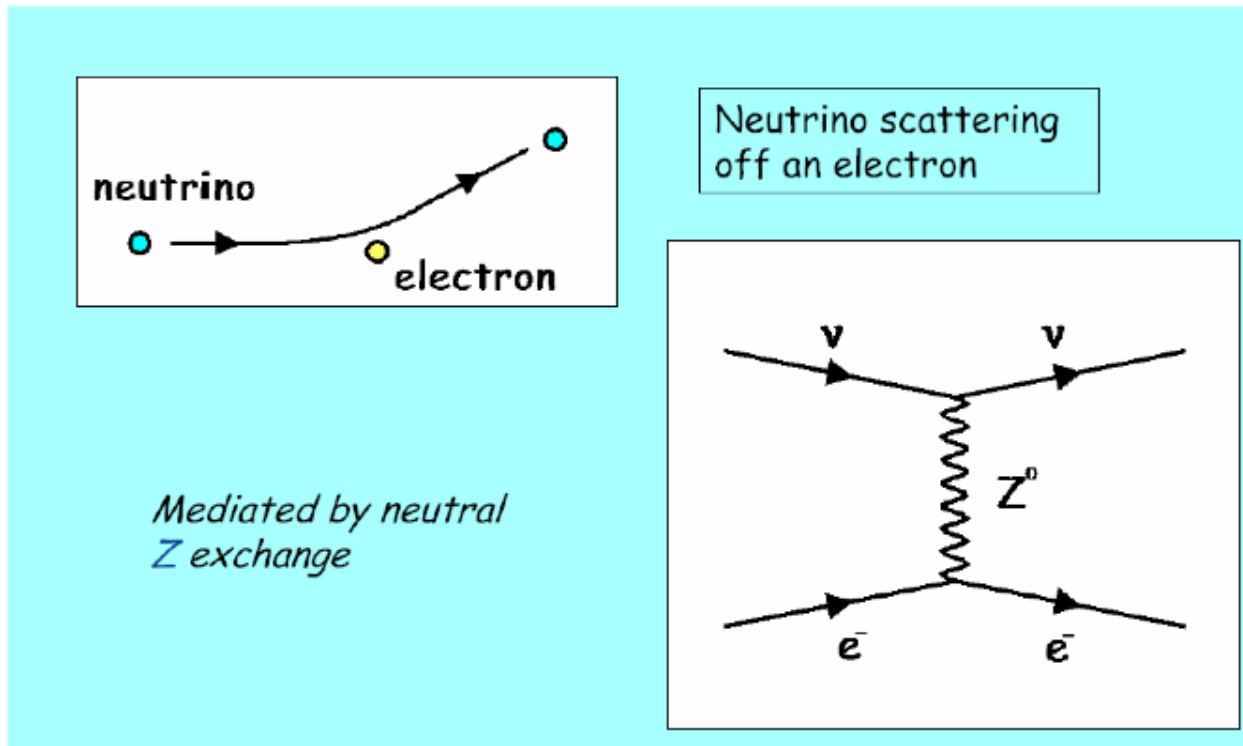
Οι Ασθενείς Αλληλεπιδράσεις αλλάζουν τις γεύσεις των κουάρκ και των λεπτονίων

Όταν Ανταλλάσσονται οι διαδότες Z, δεν αλλάζει το φορτίο



Ασθενείς Αλληλεπιδράσεις (VI)

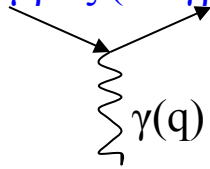
Παράδειγμα σκέδασης νετρίνο



Ασθενείς Αλληλεπιδράσεις (VII)

Ηλεκτρομαγνητικές Δυνάμεις

- κόμβος (διάγραμμα Feynman)

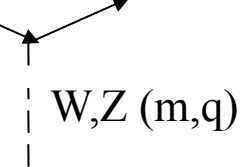


- Σταθερά Σύζευξης

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

Ασθενείς Δυνάμεις

- κόμβος (διάγραμμα Feynman)



- Σταθερά Σύζευξης

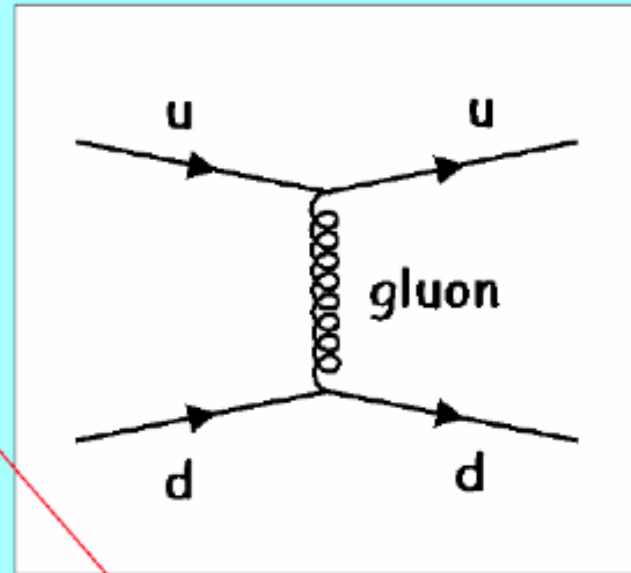
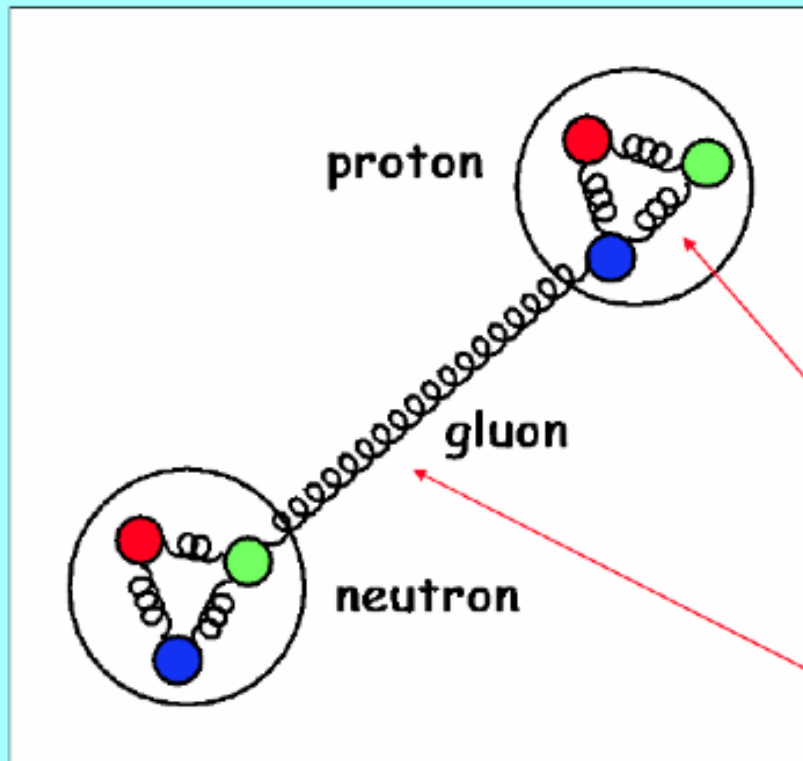
$$a_w = g^2 / 4\pi\hbar c, \quad f(q) \propto \frac{g^2}{q^2 + m^2}$$

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

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

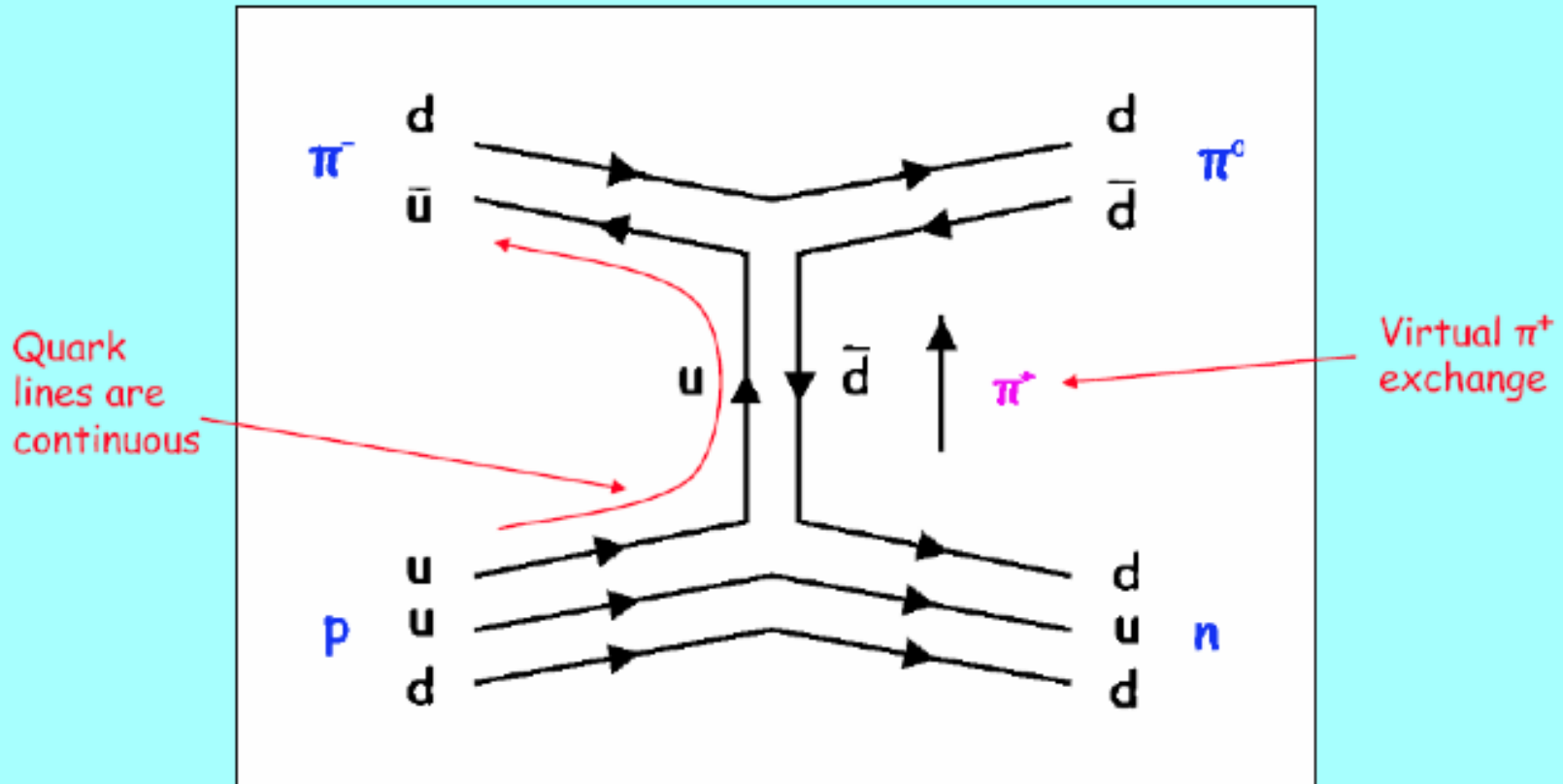
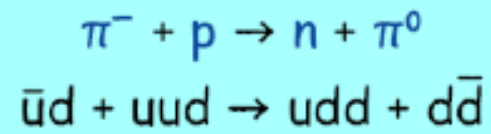


Ισχυρές Αλληλεπιδράσεις (I)



Gluons hold the proton and neutron together and are responsible for the Strong force between them.

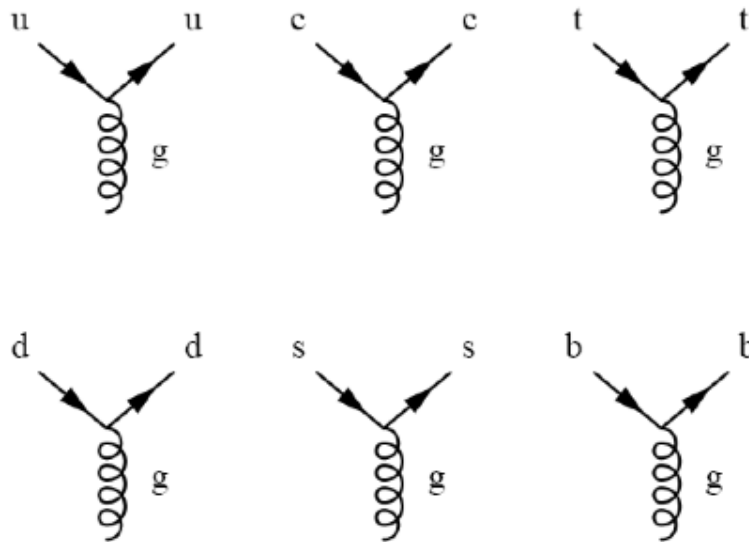
Ισχυρές Αλληλεπιδράσεις (II)



Ισχυρές Αλληλεπιδράσεις (III)

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

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

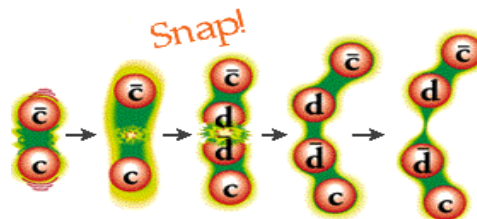
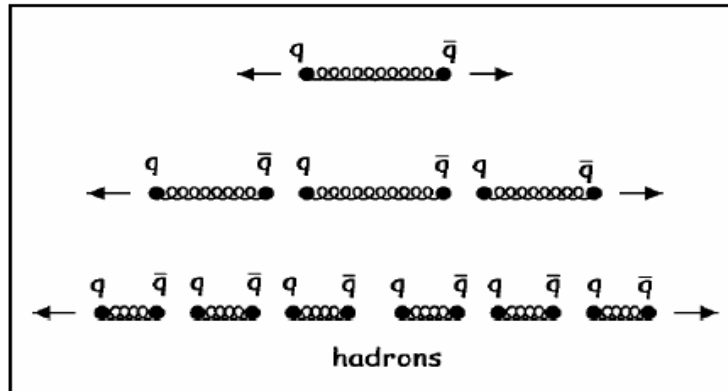
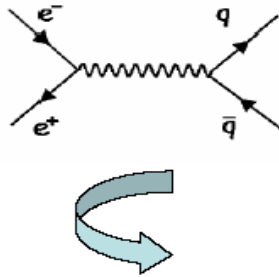


Ισχυρές Αλληλεπιδράσεις (IV)

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

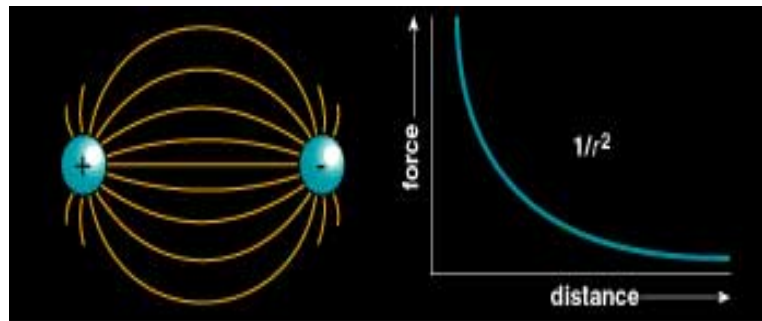
$$V_s = -\frac{4}{3} \frac{a_s}{r} + kr$$



Ισχυρές Αλληλεπιδράσεις (V)

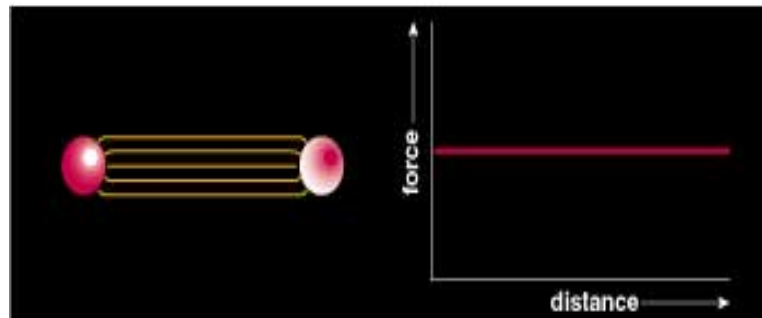
QED vs QCD

Dipole



- 1 electric charge
- γ carries no charge

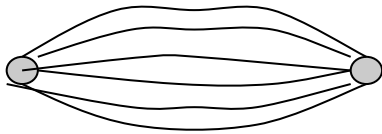
Flux Tube



- 3 Color charges
- g carry charge

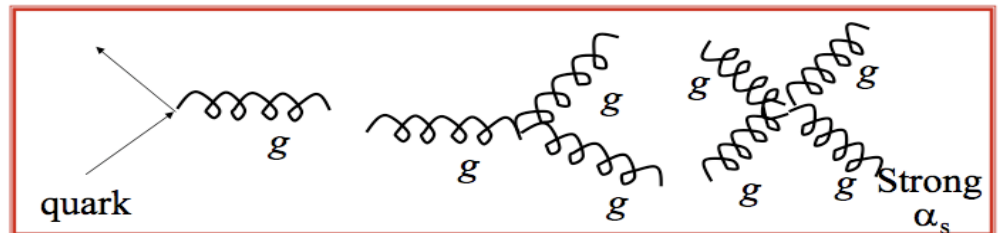
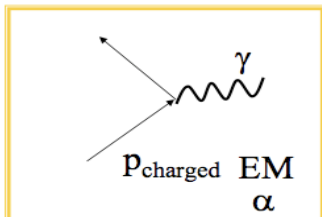
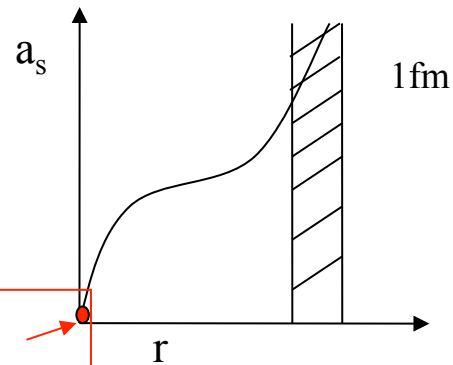
Ισχυρές Αλληλεπιδράσεις (VI)

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:

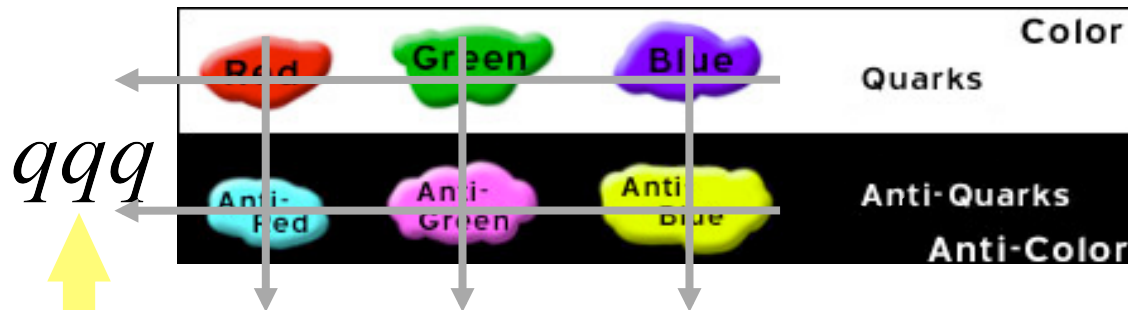
$$V_{\text{strong}}(r) = -\frac{4}{3} \left(\frac{a_s}{r} \right) + kr \quad \leq \text{δεν μπορούμε να ελευθερώσουμε τα κουάρκ! Όσο τα απομακρύνουμε το δυναμικό αυξάνει...}$$

Δυναμικό Coulomb

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

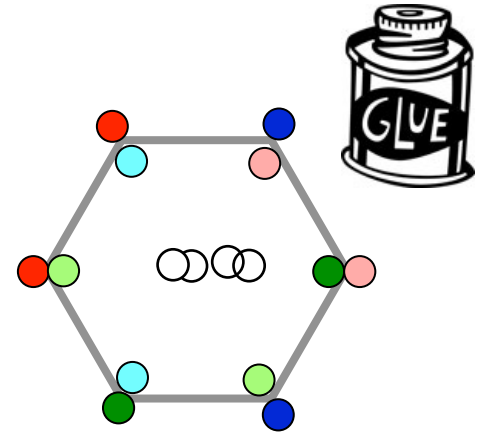
Ισχυρές Αλληλεπιδράσεις (VIII)

Η ιδιότητα του Χρώματος

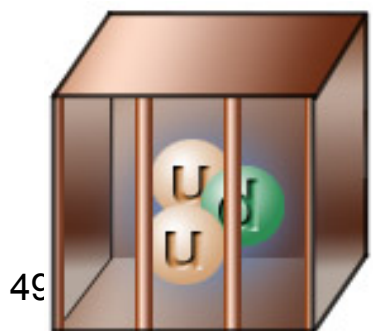


confinement

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

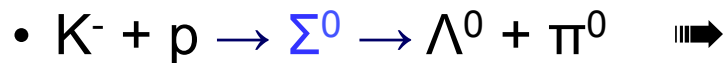


8 Gluons, each with a color and an anti-color charge.



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))

Βασικά Χαρακτηριστικά των Δυνάμεων

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

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