

Στοιχειώδη Σωματίδια

Διάλεξη 11η
Πετρίδου Χαρά

Τμήμα G3: Κ. Κορδάς & Χ. Πετρίδου

Αλληλεπιδράσεις & Πεδία στη Σωματιδιακή Φυσική

Τα Θεμελιώδη Μποζόνια των αλληλεπιδράσεων

Οι Θεμελιώδεις Αλληλεπιδράσεις

3

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

Τα Θεμελιώδη Μποζόνια των αλληλεπιδράσεων

Οι Θεμελιώδεις Αλληλεπιδράσεις

4

BOSONS

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

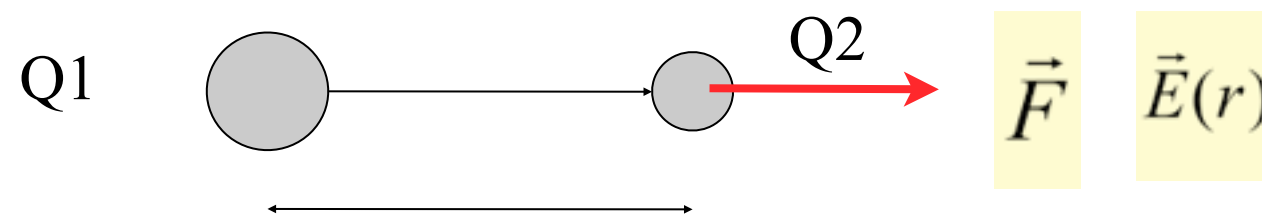
Unified Electroweak spin = 1

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

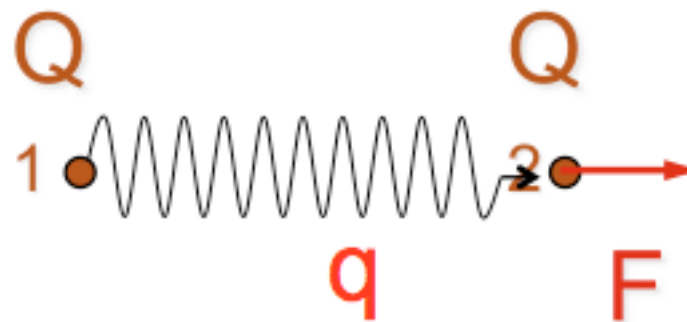
Name	Mass GeV/c ²	Electric charge
g gluon	0	0

- 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 αλληλεπίδραση μεταξύ δύο σωμάτων σε απόσταση εκφράζεται-περιγράφεται με 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**



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

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”** (virtual)

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

Η Αρχή της Απροσδιοριστίας του Heisenberg επιτρέπει :

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

⇒ Παραβίαση της ενέργειας κατά ΔE μπορεί να συμβεί **ΜΟΝΟ** σε χρόνο μικρότερο από Δt :

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

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

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

ή αν το **m** ΔΕΝ αντιστοιχεί στη μάζα ηρεμίας του σωματιδίου

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

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

- 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’επέκταση η περιγραφή και των άλλων αλληλεπιδράσεων στον μικρόκοσμο βασίστηκε στην ανταλλαγή δυναμικών 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

Ανταλλαγή Μποζονίων-Θεωρία Yukawa

12

- Απο την εξίσωση ελεύθερου σωματίου προκύπτει η κυματική 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)

$$\nabla^2 U(r) = m^2 U(r)$$
$$U(r) = \frac{g}{4\pi r} e^{-r/R}$$

$U(r)$: 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

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

Η λύση της εξίσωσης για το δυναμικό σωματίου μάζας m

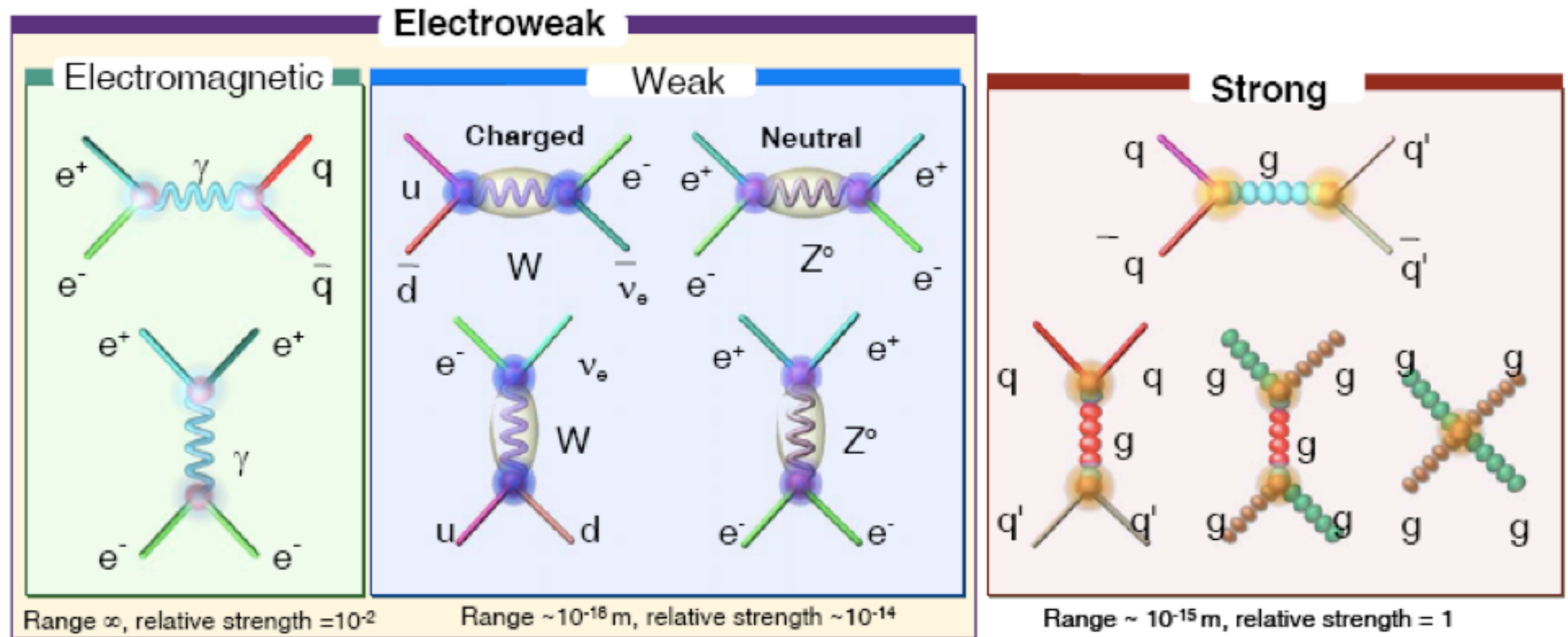
$$U(r) = \frac{g}{4\pi r} e^{-r/R}, \quad R = \frac{\hbar}{mc}$$

- 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

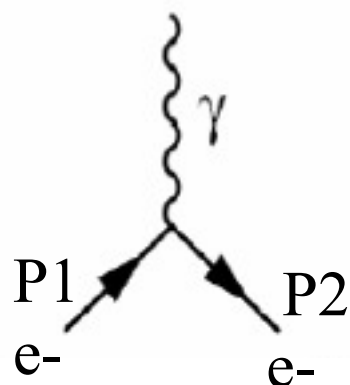
15



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:

- $q = P1 - P2$

- $\nu = E1 - E2$

- 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

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

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

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

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

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

$$\propto 1/q^2$$

- Αν ο διαδότης είναι φωτόνιο το πλάτος σκέδασης:

είναι ανάλογο του φορτίου

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

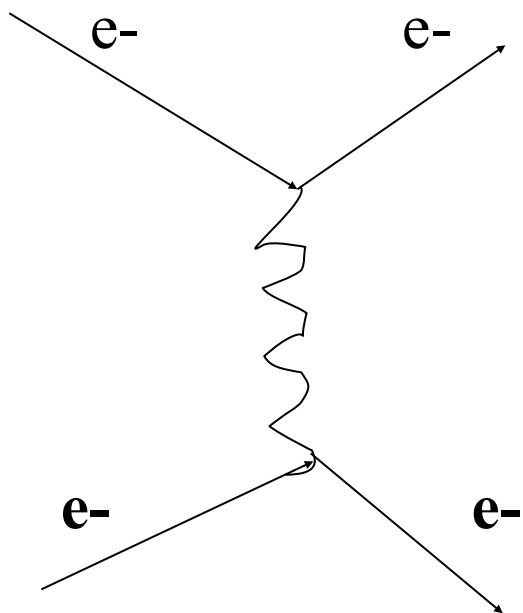
$$\propto e^2 \rightarrow a = e^2 / 4\pi\hbar c = 1/137 \dots$$
$$\propto 1/q^2$$

=> η ενεργός διατομή

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

=>

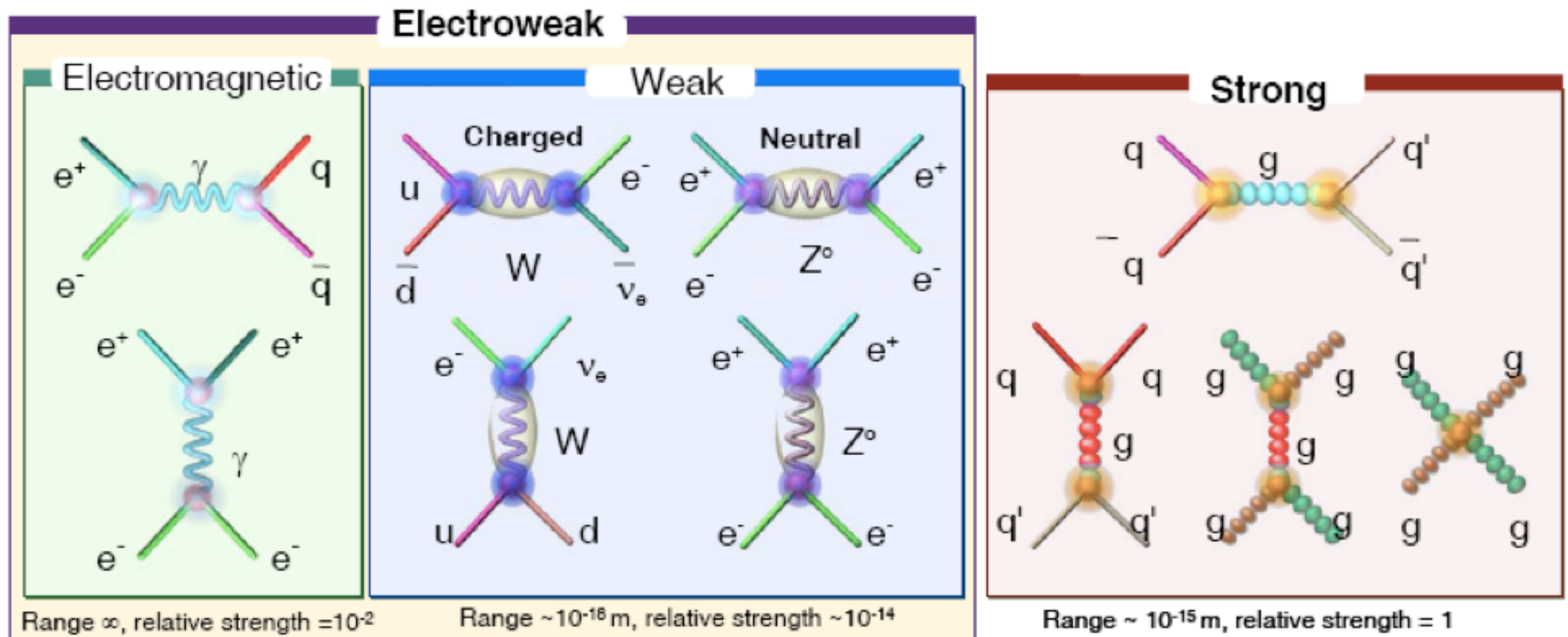
$$\propto e^4 \rightarrow a^2$$
$$\propto 1/q^4$$



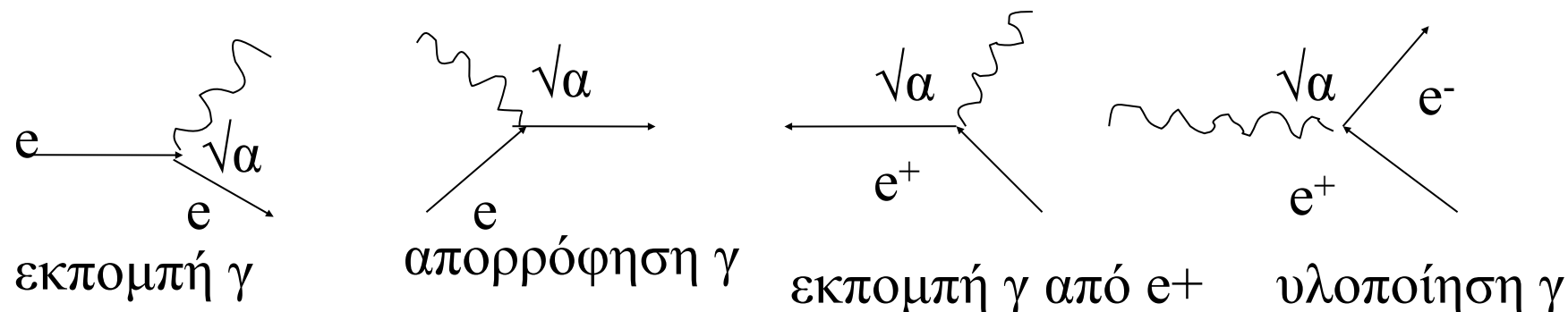
Διαγράμματα Feynmann

18

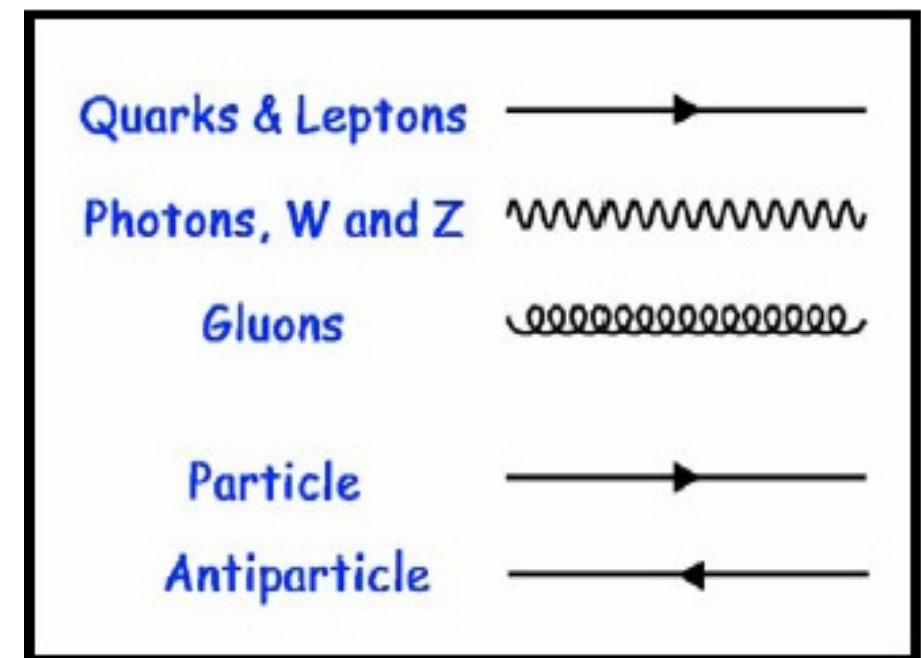
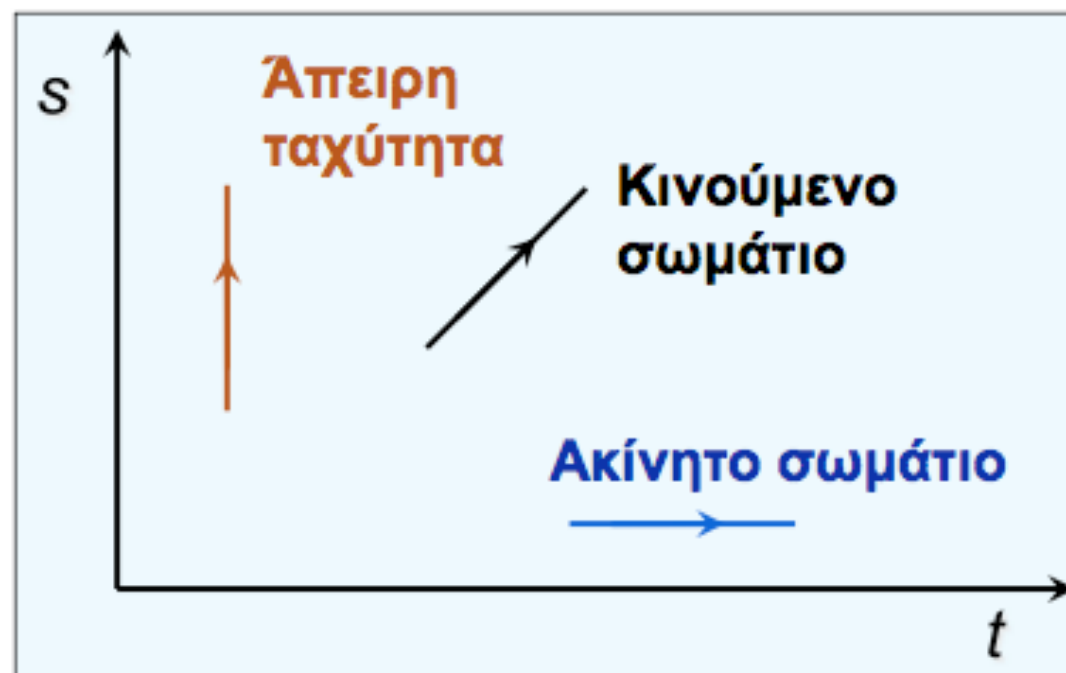
- Διαγράμματα Feynman είναι διαγράμματα για την αναπαράσταση της αλληλεπίδρασης και της κίνησης των στοιχειωδών σωματιδίων στο χωρόχρονο



- 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)



- 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

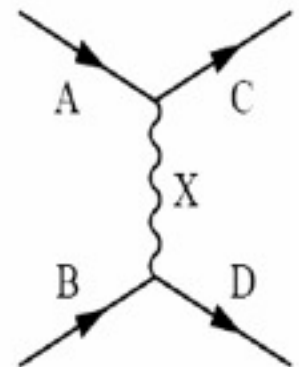
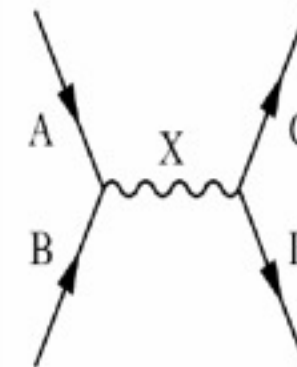
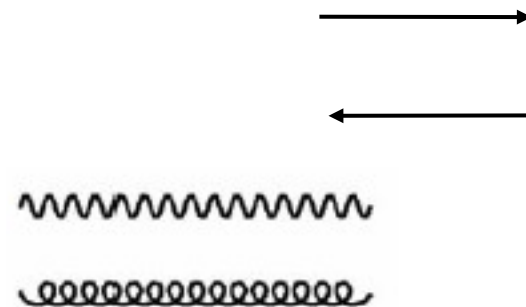
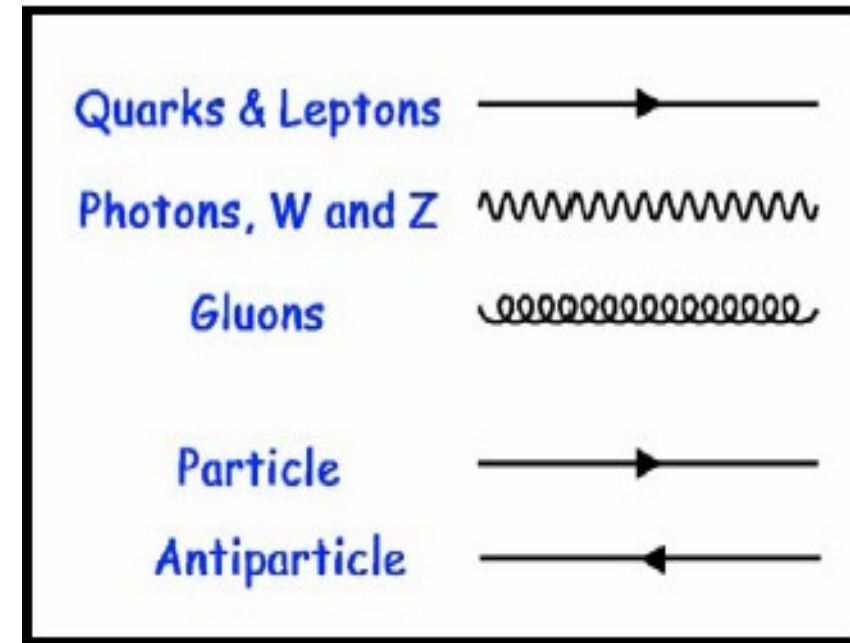
21

Βασικοί κανόνες σε κάθε κόμβο:

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

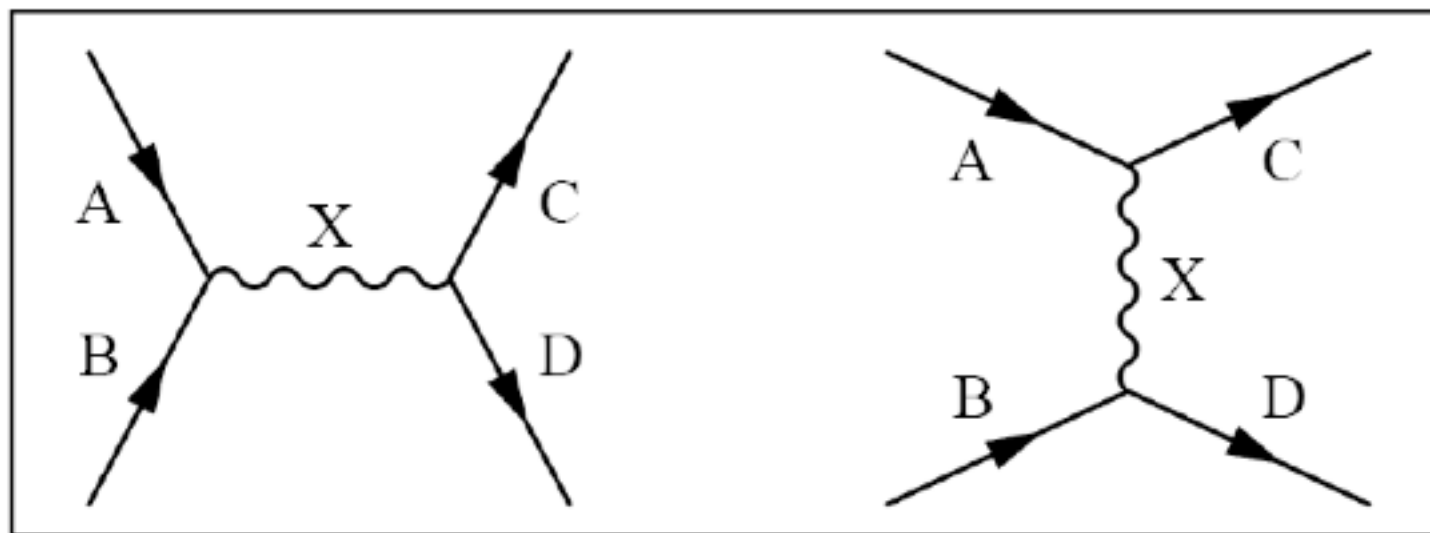
- φερμιόνια (θετικό t)
- anti- φερμιόνια (αρνητικό t)
- Μποζόνια

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



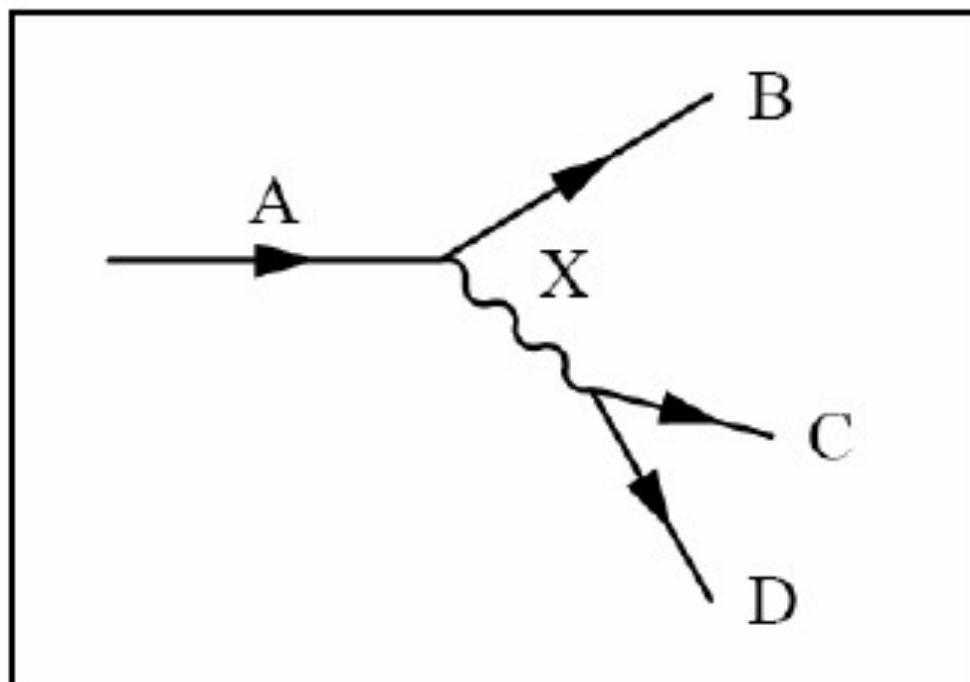
Παριστούν διεργασίες της μορφής

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



... ή της μορφής

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



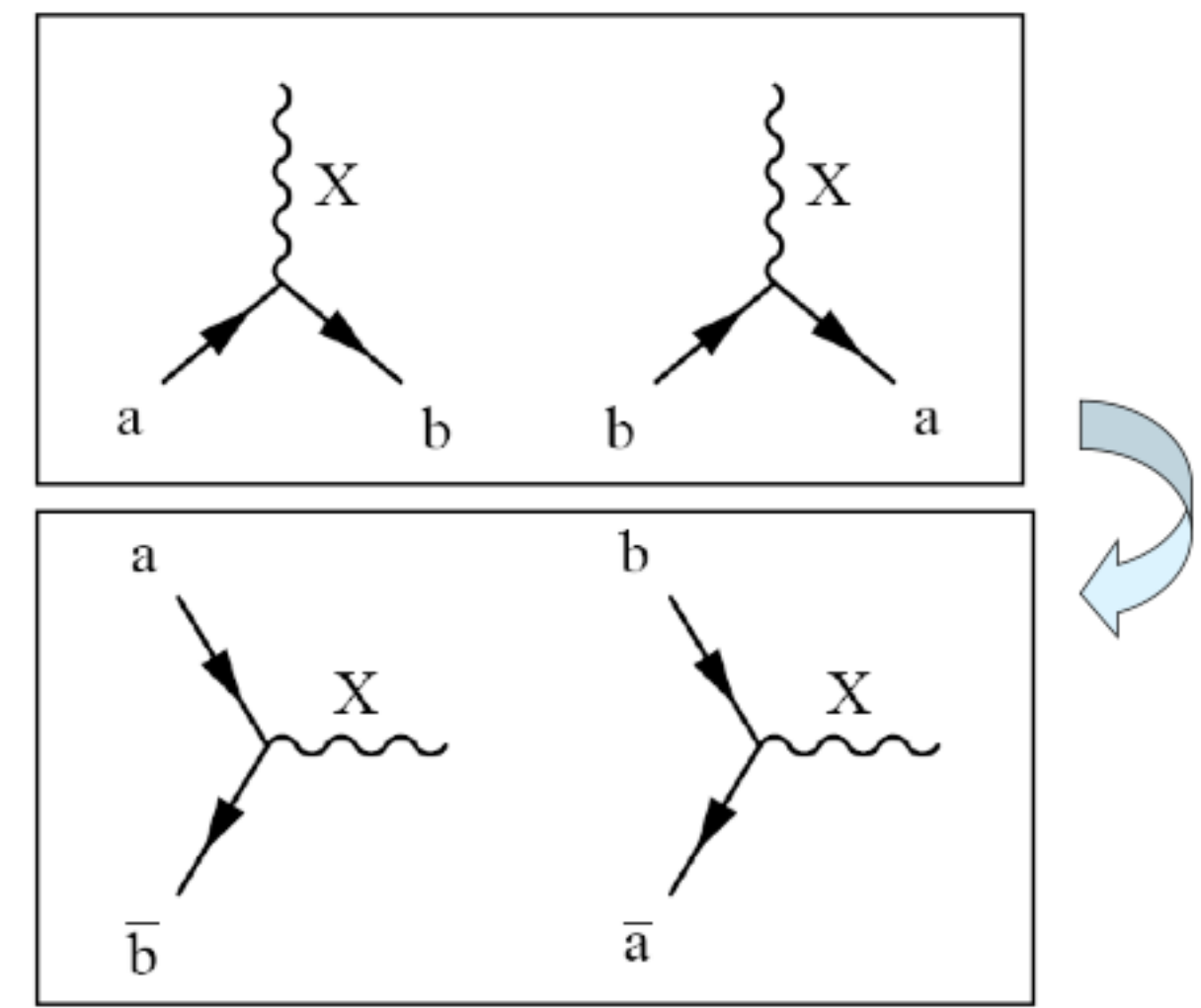
A, B, C, D

- Κουάρκ
- Λεπτόνια
- Αντικουάρκ
- Αντιλεπτόνια

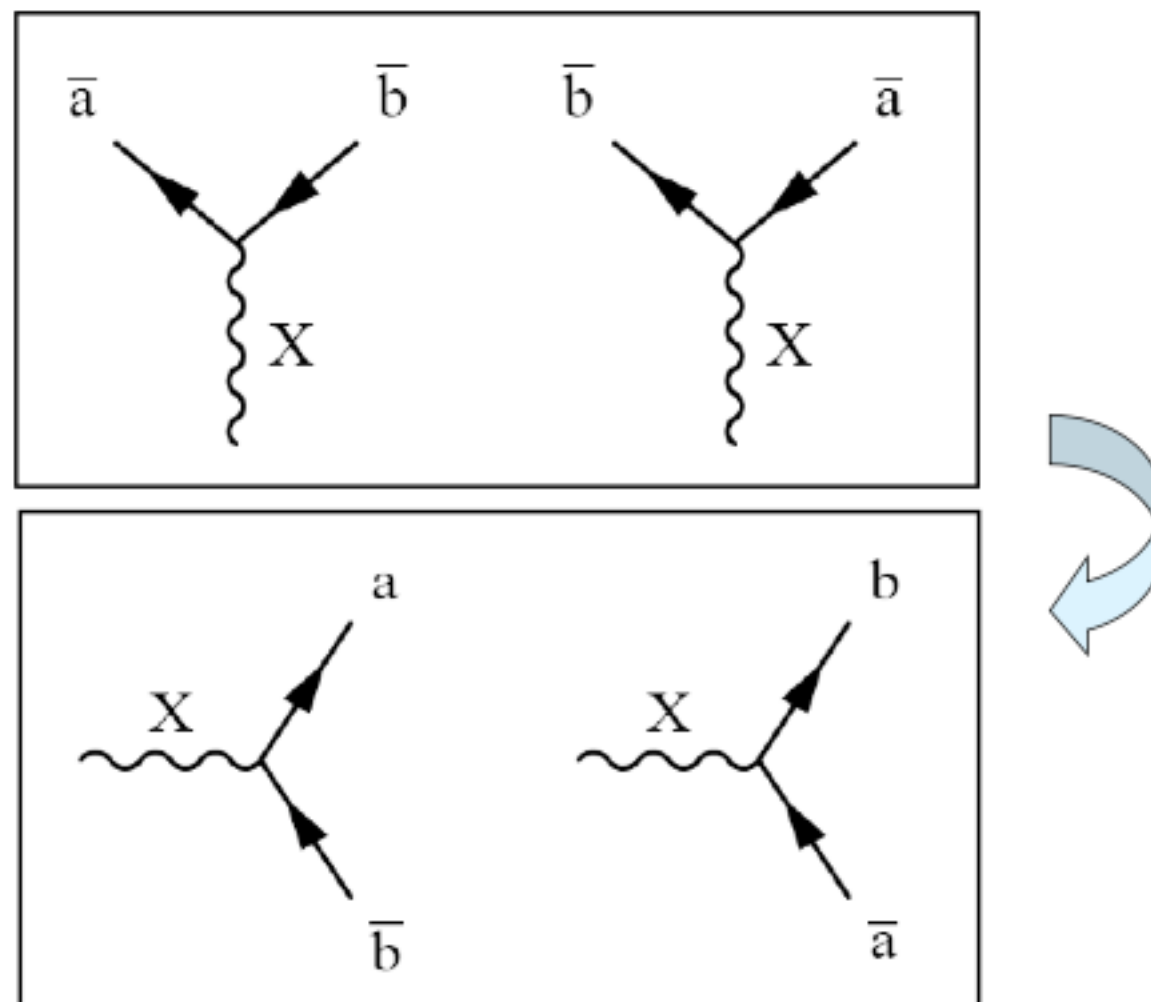
X

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

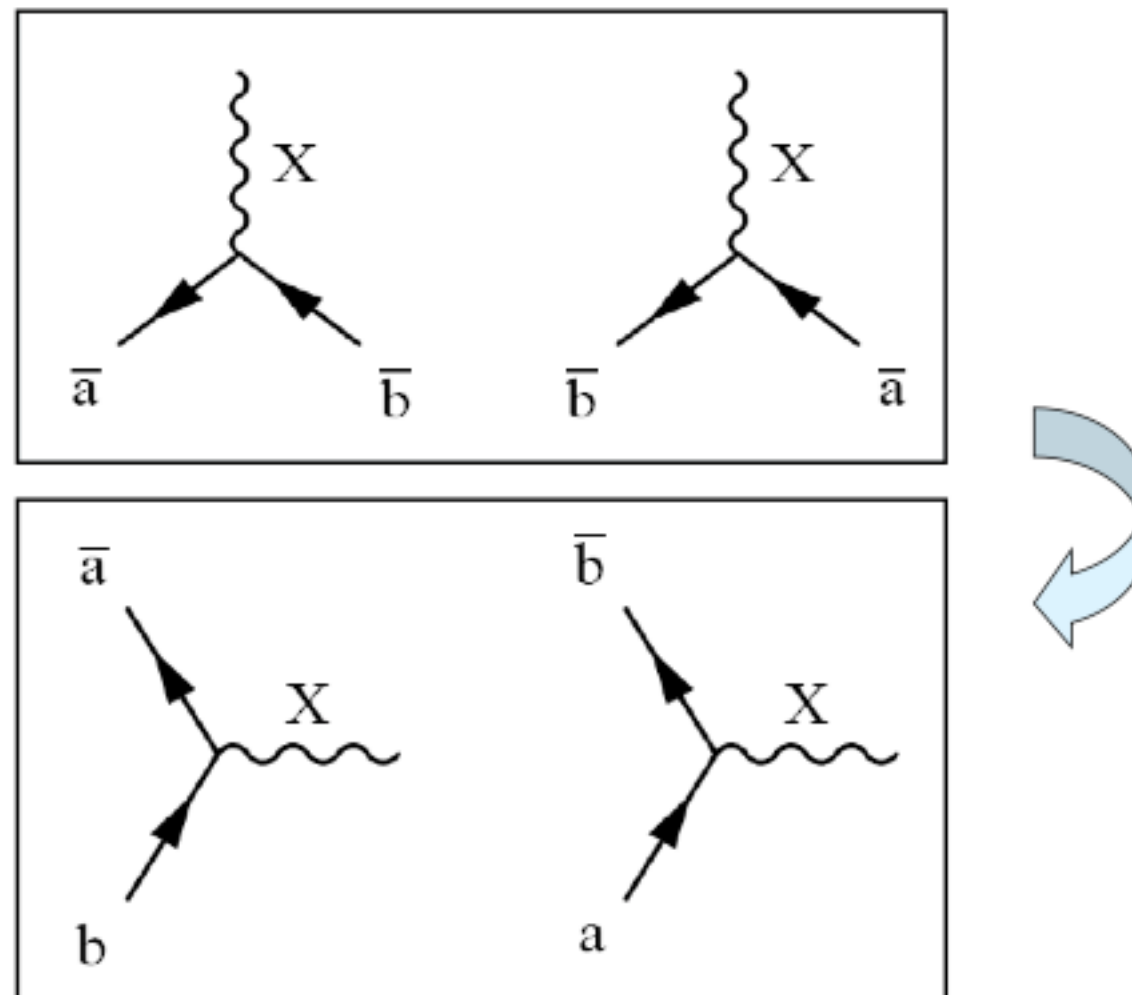
Γενικές ιδιότητες: Παραδείγματα περιστροφής διαγραμμάτων



Γενικές ιδιότητες: Παραδείγματα περιστροφής διαγραμμάτων



Γενικές ιδιότητες: Παραδείγματα περιστροφής διαγραμμάτων



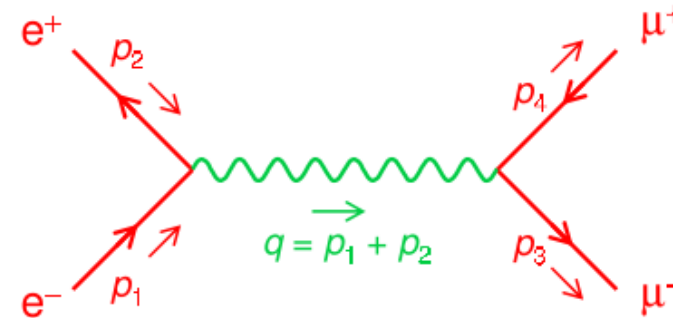
Διαγράμματα Feynmann

27

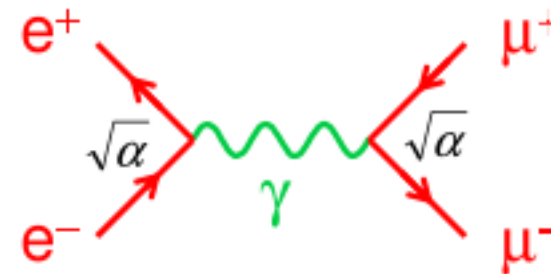
- Παραδείγματα απεικόνισης μιας αλληλεπίδρασης με Διαγράμματα Feynman

Σκέδαση

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

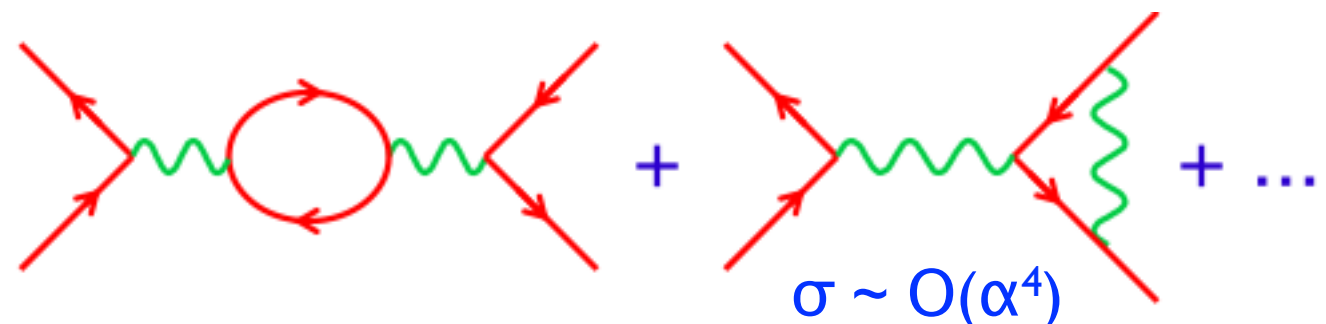


Διαγράμματα
“χαμηλότερης τάξης”
(πλάτος $f \sim \alpha$, ενεργός διατομή $\sigma \sim \alpha^2$)



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

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



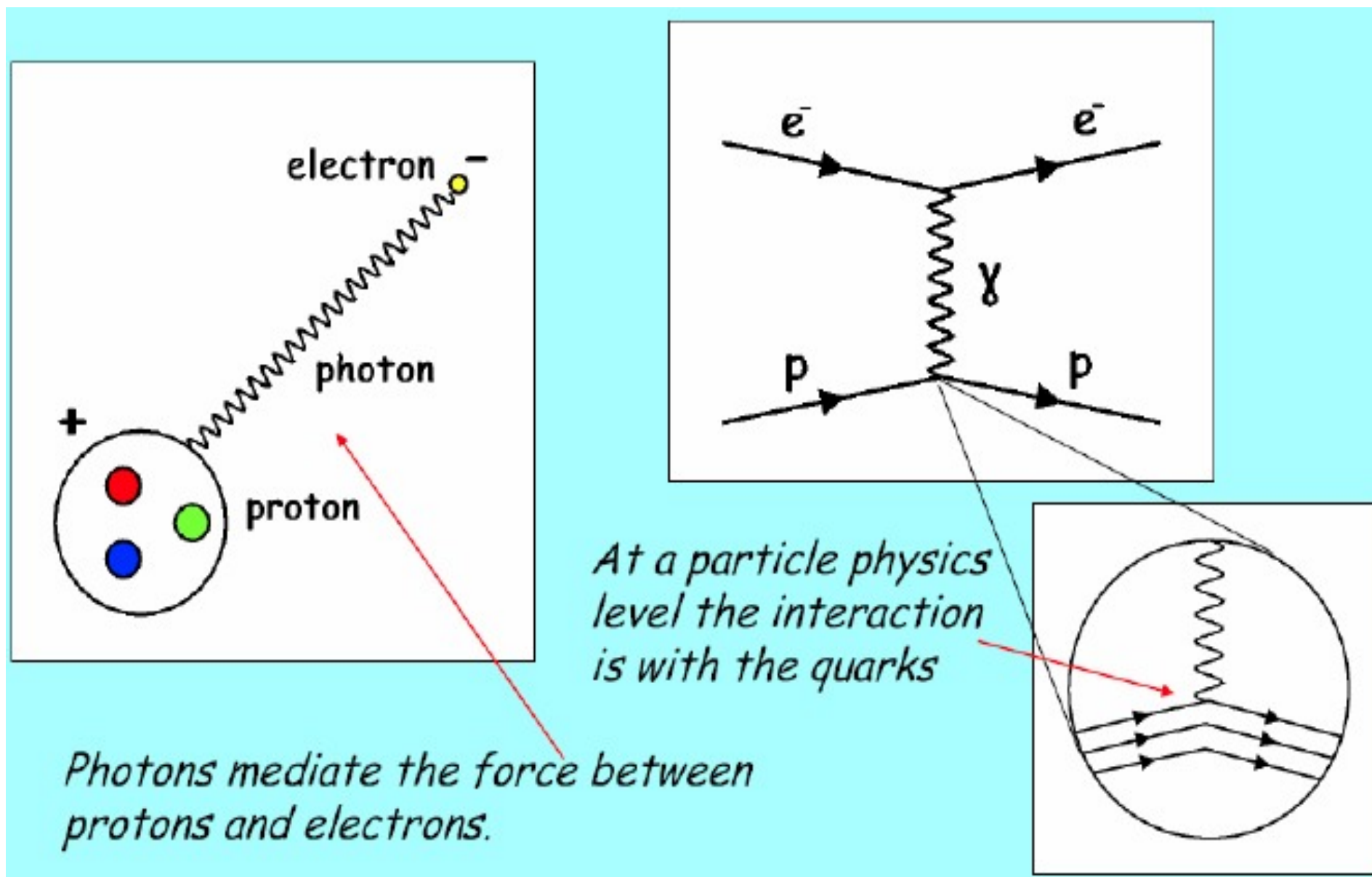
- **Δυνάμεις**

- 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)

29



Η σταθερά σύζευξης α στις ηλεκτρομαγνητικές αλληλεπιδράσεις είναι:

- Μία αδιάστατη ποσότητα που μετράει την ένταση της σύζευξης

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

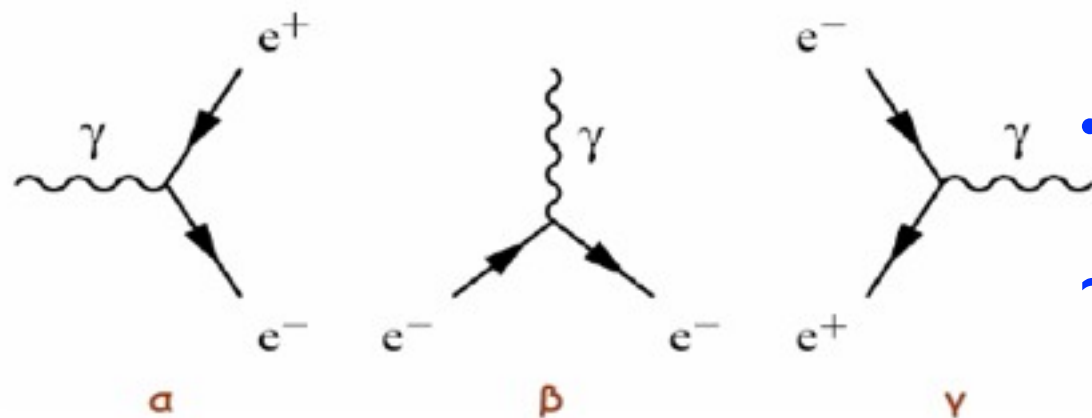
- Παριστάνει τον λόγο της ηλεκτροστατικής ενέργειας απώθησης δύο ηλεκτρονίων σε απόσταση ίση με το μήκος Compton του ηλεκτρονίου προς την ενέργεια που αντιστοιχεί στη μάζα ηρεμίας του ηλεκτρονίου
- Η ποσότητα $\alpha^{1/2} \sim e$ συνδέεται με την πιθανότητα εκπομπής ή απορρόφησης ενός φωτονίου

Ηλεκτρομαγνητικές Αλληλεπιδράσεις (III)

31

Το φωτόνιο συζεύγνυται μόνο με φορτισμένο σωματίδιο

Ηλεκτρομαγνητικές Αλληλεπιδράσεις



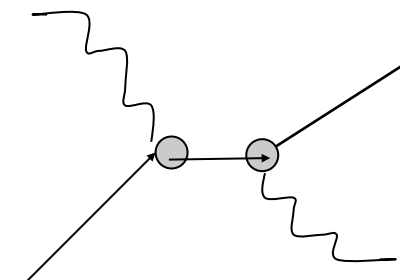
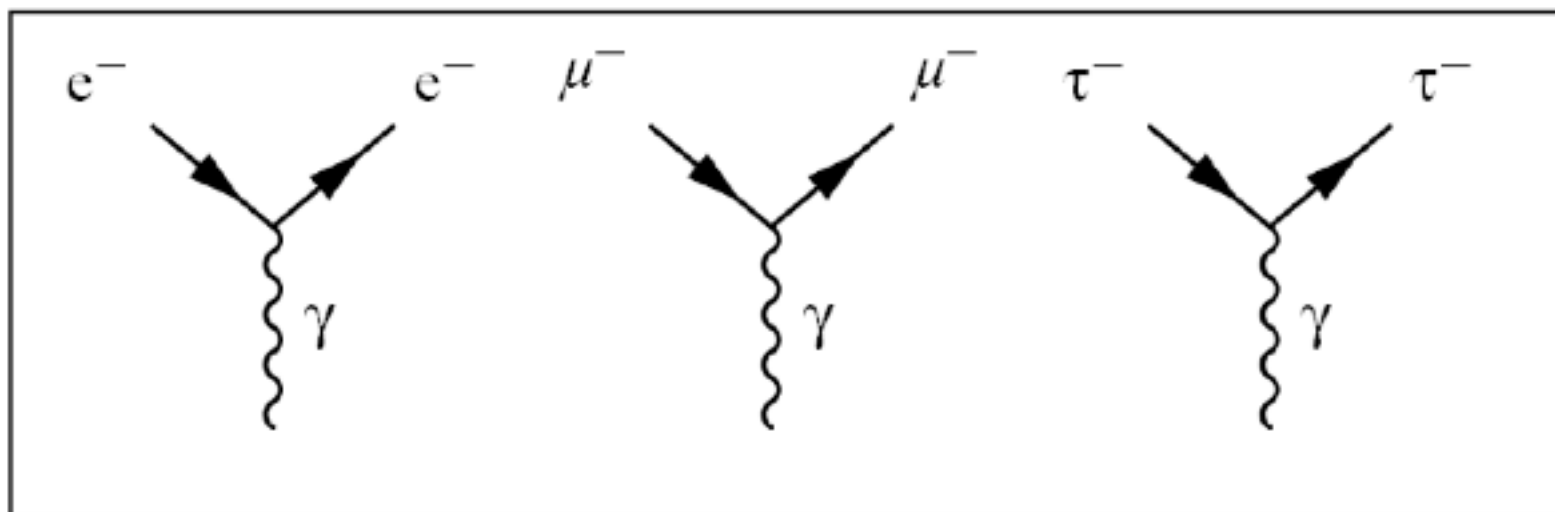
(α) Δίδυμη Γένεση
(β) Φωτοηλεκτρικό φαινόμενο
(γ) Εξαϋλωση ποζιτρονίου

- Η ισχύς της αλληλεπίδρασης μεταξύ φορτισμένων σωματίων και φωτονίων:

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

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

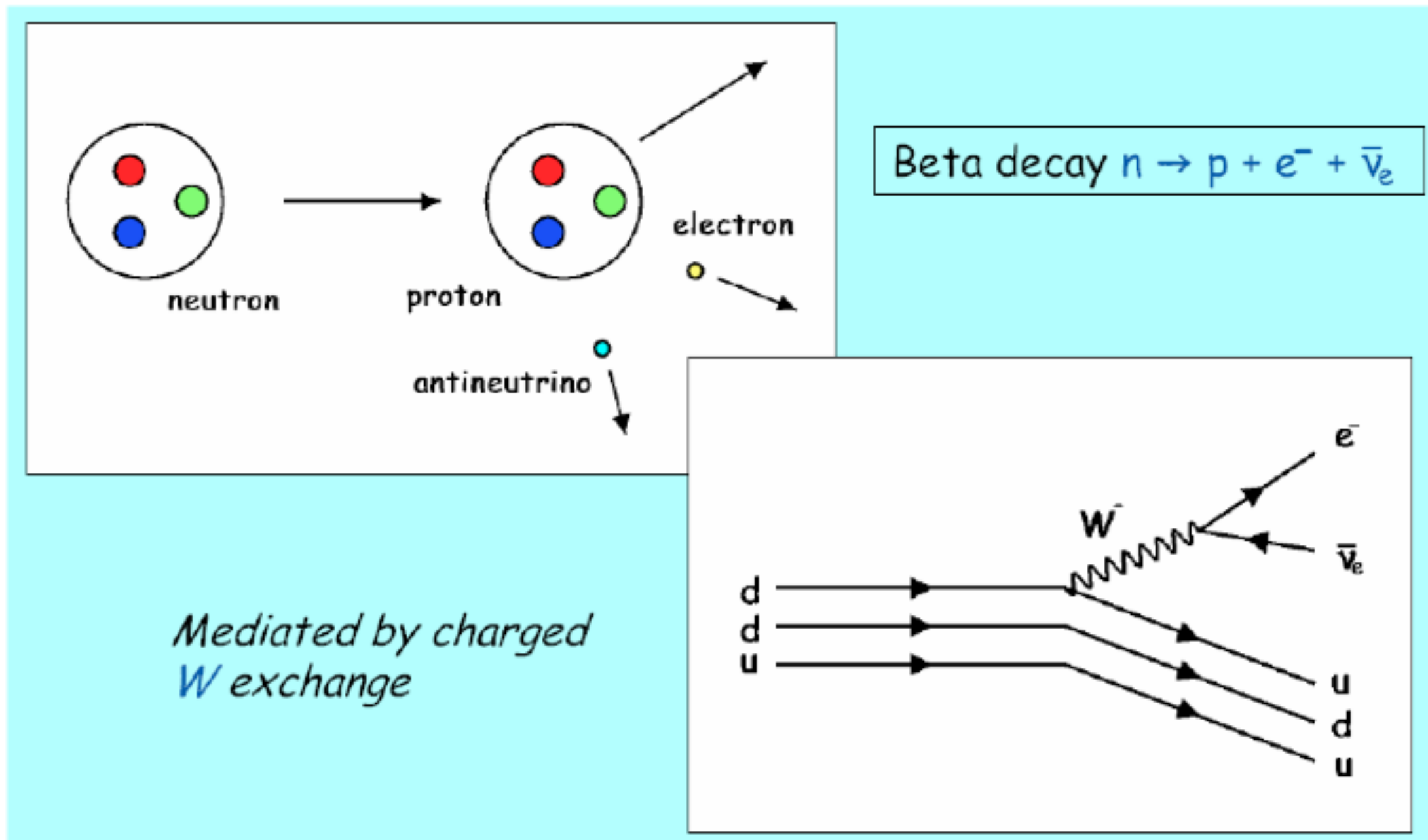
- **Σκέδαση Compton**: το πλάτος της αλληλεπίδρασης είναι $\sim \alpha \Rightarrow$ ενεργός διατομή: $\sim \alpha^2$ (2ης τάξης)



Σκέδαση Compton

Ασθενείς Αλληλεπιδράσεις (I)

32



Ασθενείς Αλληλεπιδράσεις (II)

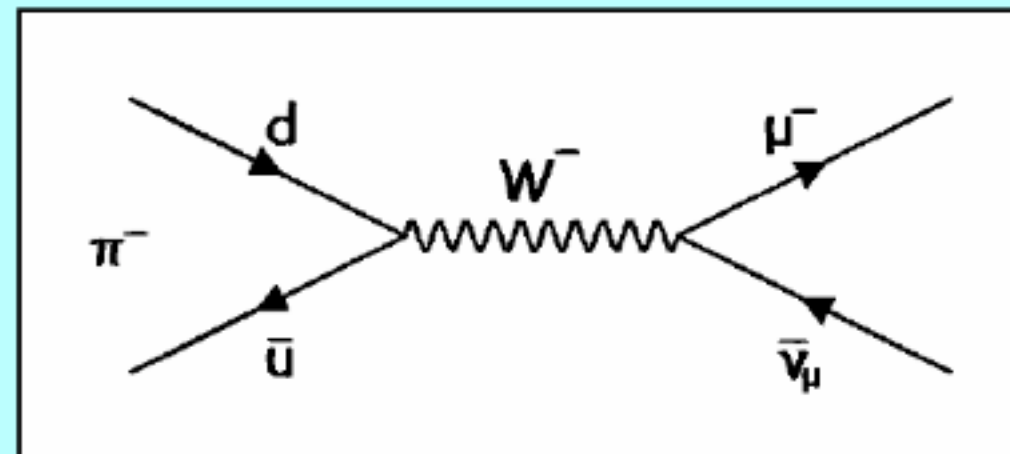
33

Οι Ασθενείς Αλληλεπιδράσεις αλλάζουν τις γεύσεις των κουάρκ και των λεπτονίων

Παράδειγμα διάσπασης μεσονίου σε λεπτόνια

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

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

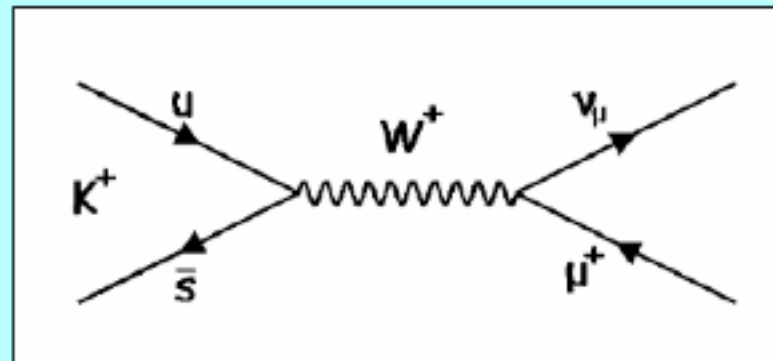


Οι Ασθενείς Αλληλεπιδράσεις αλλάζουν τις γεύσεις των κουάρκ και των λεπτονίων

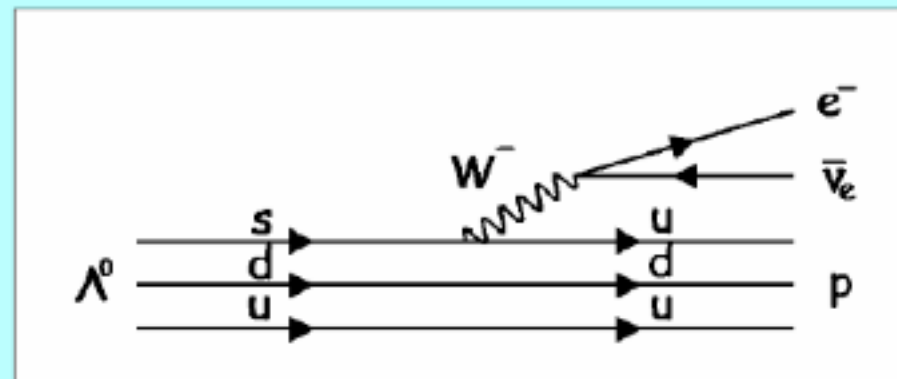
Παράδειγμα διάσπασης με αλλαγή της παραδοξότητας

$\Delta S = 1$ (Strangeness changes)

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

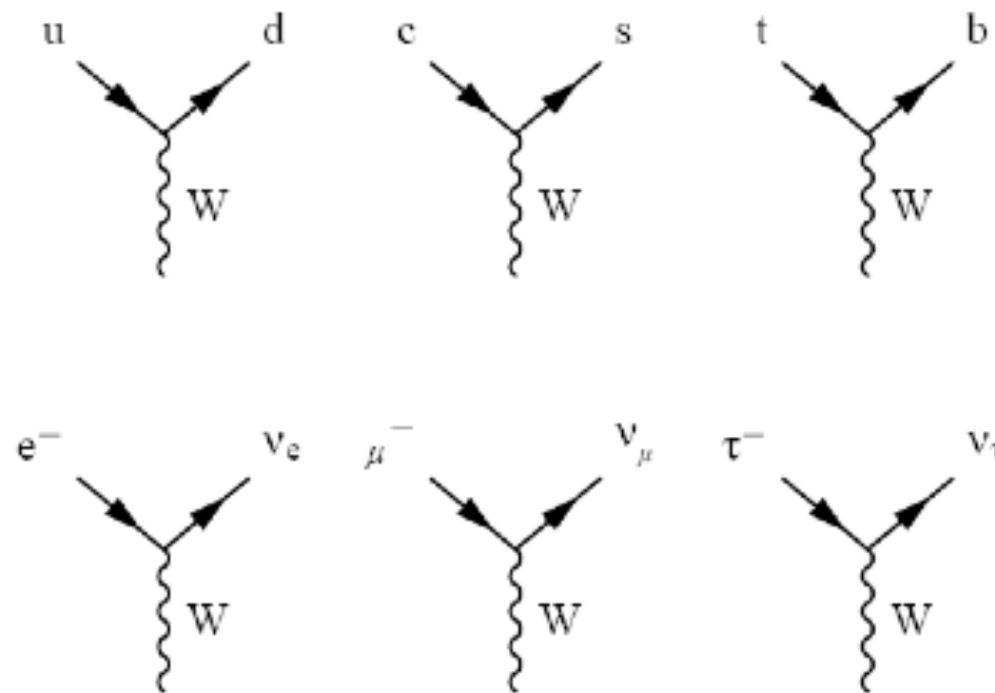


$$\Lambda^0 \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$$



Οι Ασθενείς Αλληλεπιδράσεις αλλάζουν τις γεύσεις των κουάρκ και των λεπτονίων

Όταν Ανταλλάσσονται οι διαδότες W , αλλάζει και το φορτίο

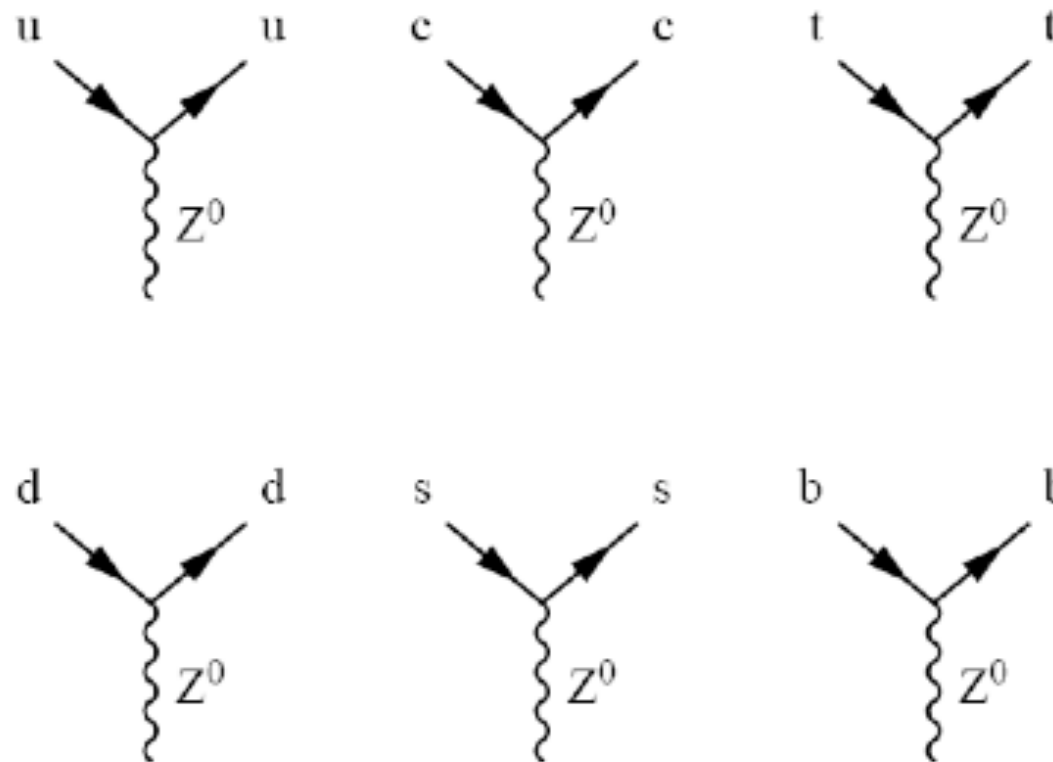


Ασθενείς Αλληλεπιδράσεις (V)

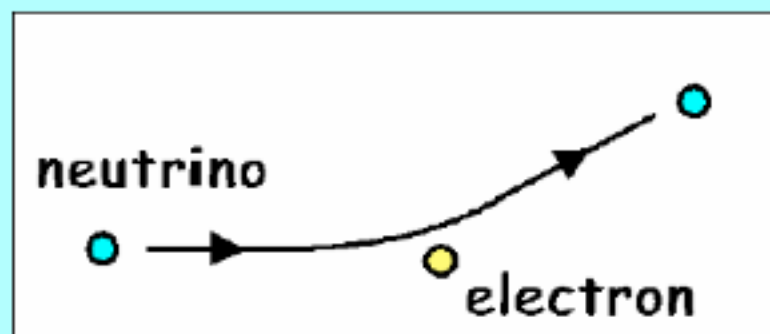
36

Οι Ασθενείς Αλληλεπιδράσεις αλλάζουν τις γεύσεις των κουάρκ και των λεπτονίων

Όταν Ανταλλάσσονται οι διαδότες Z , δεν αλλάζει το φορτίο

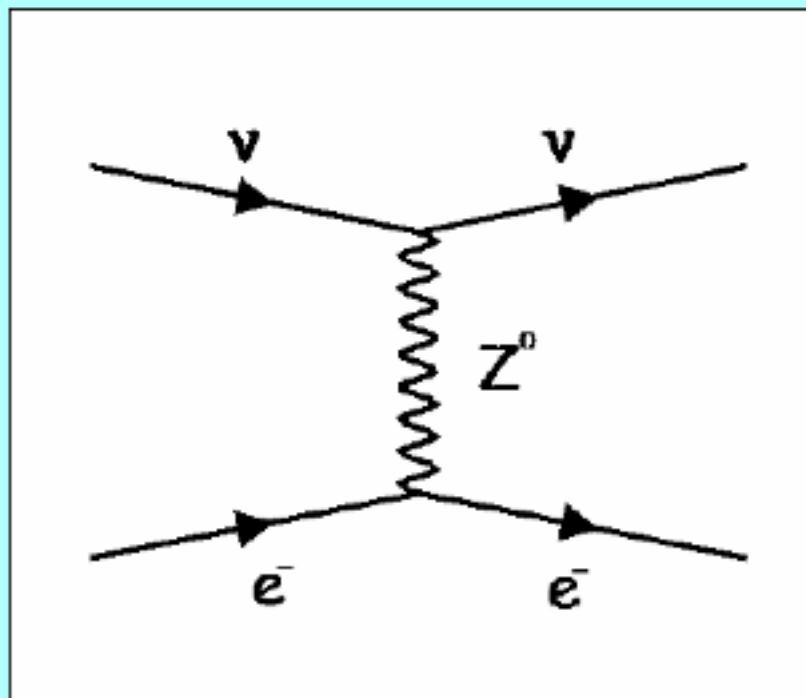


Παράδειγμα σκέδασης νετρίνο



*Mediated by neutral
 Z exchange*

Neutrino scattering
off an electron

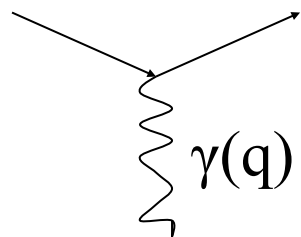


Ασθενείς Αλληλεπιδράσεις (VII)

38

Ηλεκτρομαγνητικές Δυνάμεις

- κόμβος (διάγραμμα Feynman)

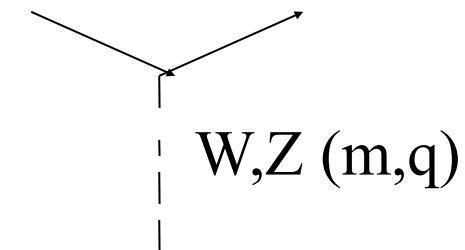


- Σταθερά Σύζευξης

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

Ασθενείς Δυνάμεις

- κόμβος (διάγραμμα Feynman)



- Σταθερά Σύζευξης

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

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

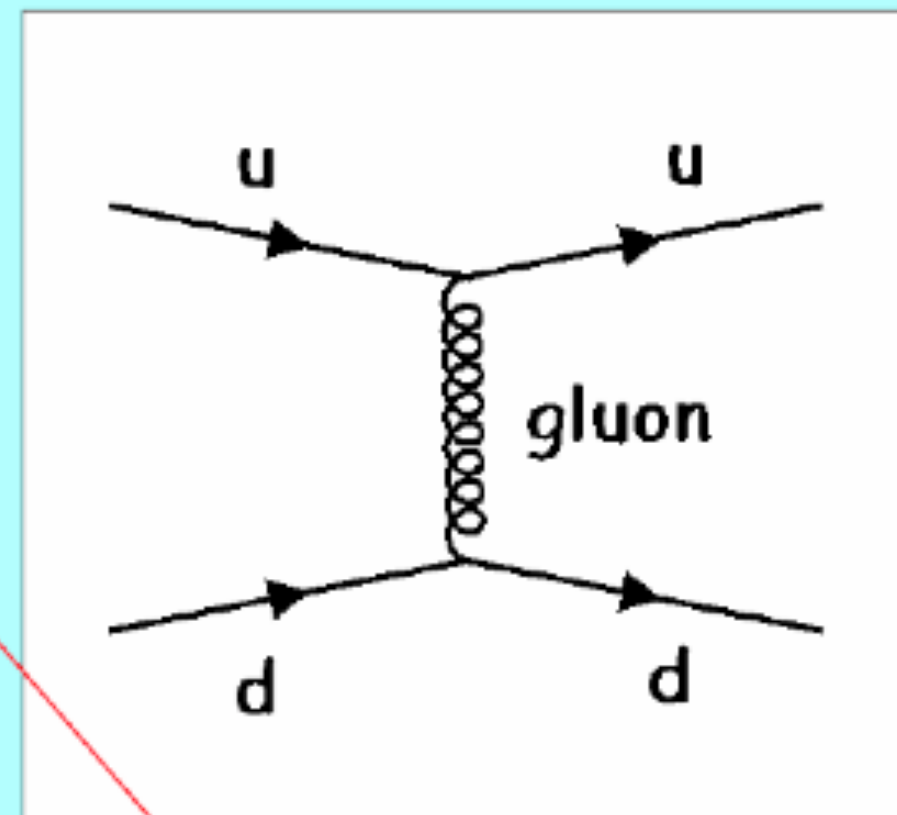
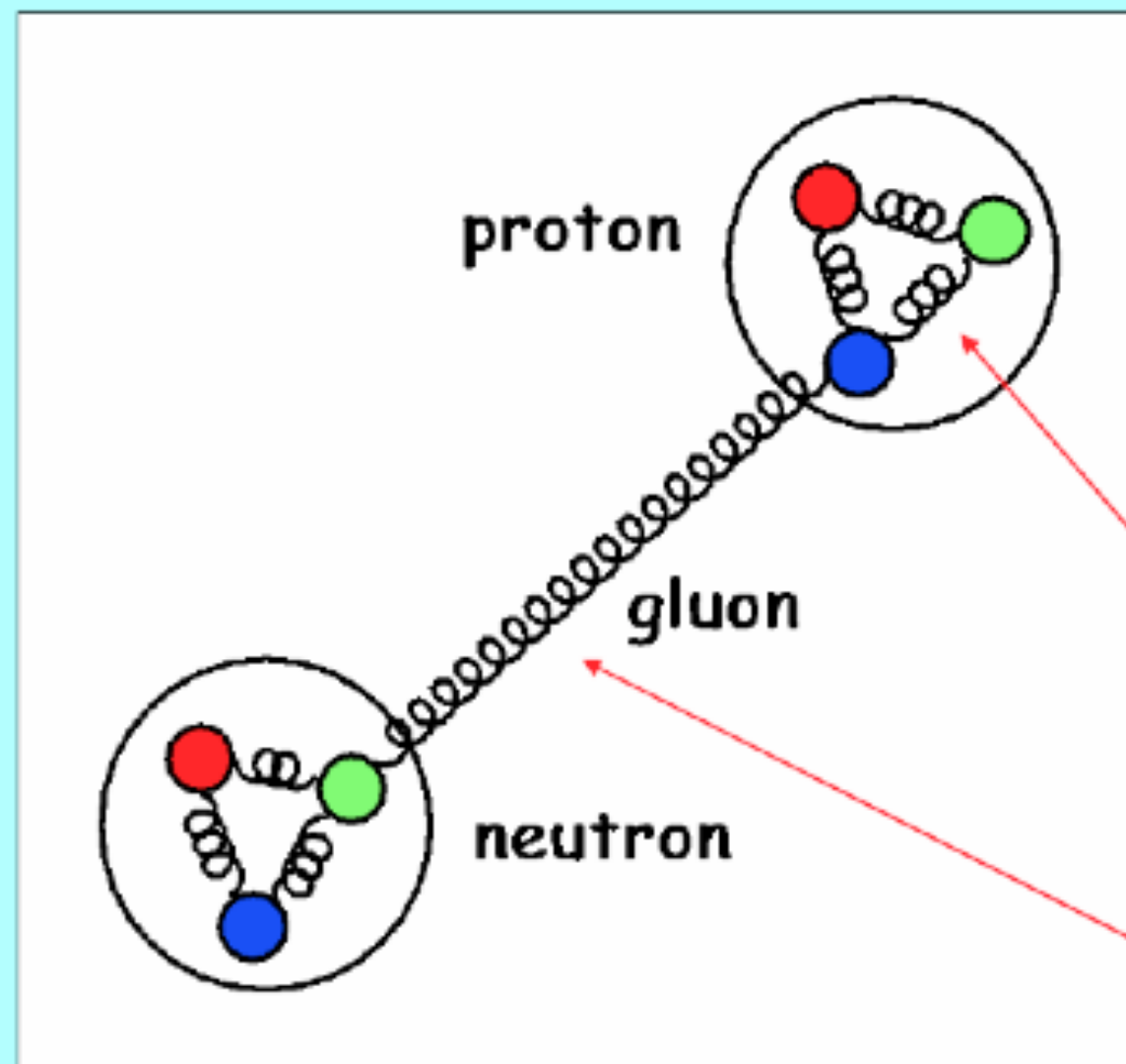
Για $q^2 \rightarrow 0$

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

$$g = e$$

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

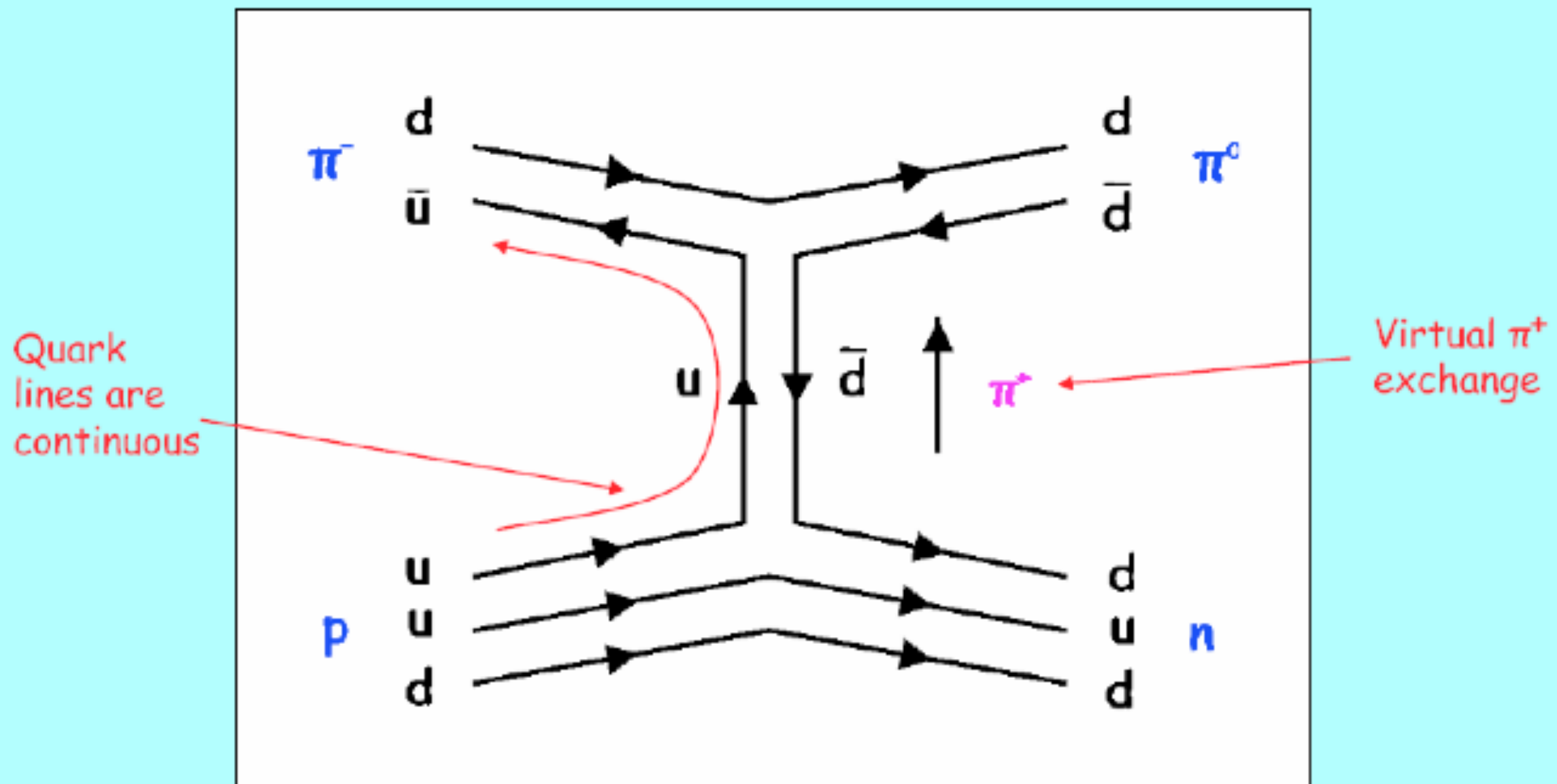
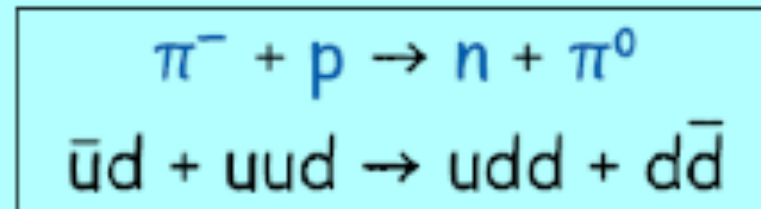




Gluons hold the proton and neutron together and are responsible for the Strong force between them.

Ισχυρές Αλληλεπιδράσεις (II)

40

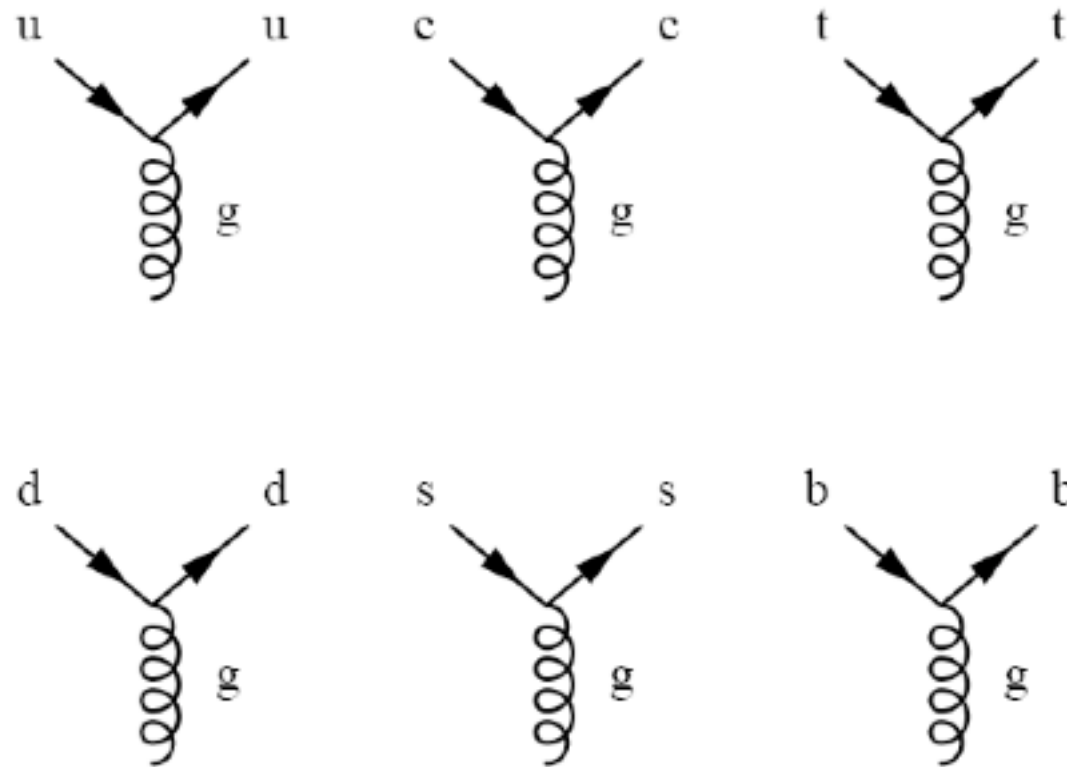


Ισχυρές Αλληλεπιδράσεις (III)

41

Οι Ισχυρές Αλληλεπιδράσεις ΔEN αλλάζουν τις γεύσεις των κουάρκ

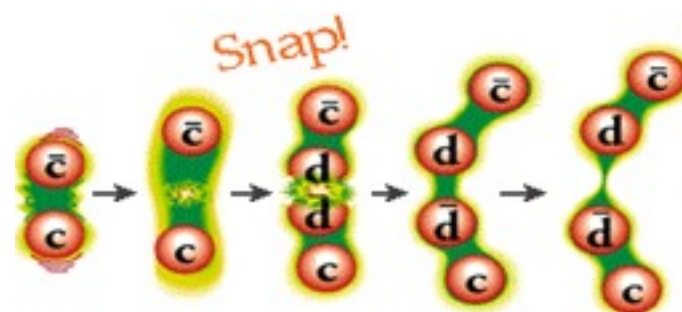
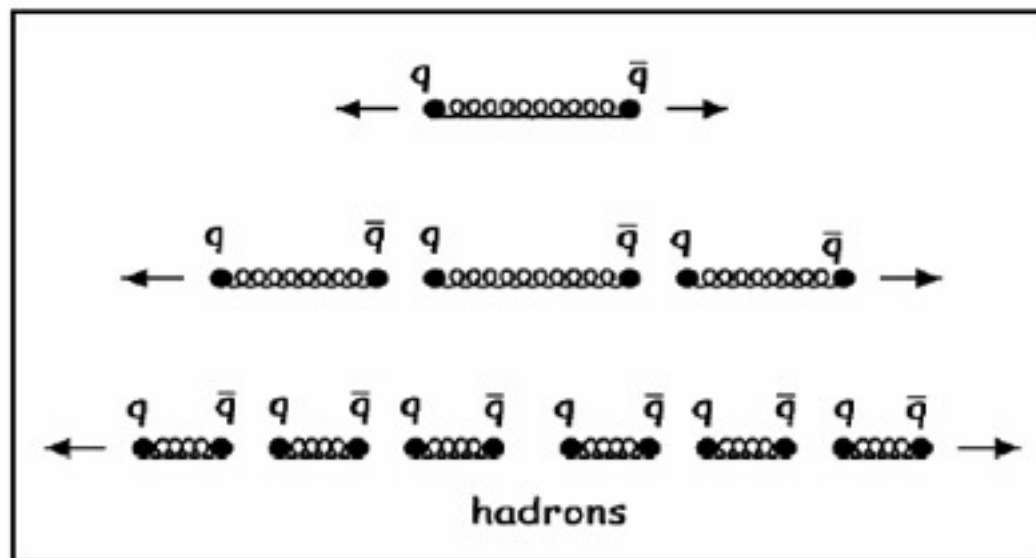
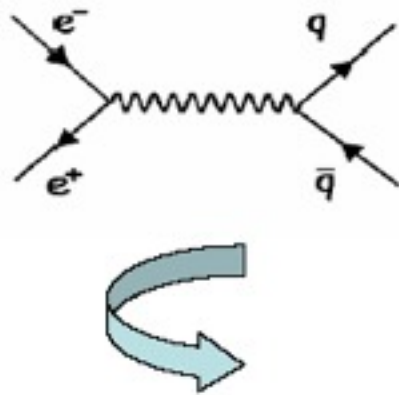
Ανταλλάσσονται γλουόνια (gluons); ΔEN αλλάζει και το ηλεκτρικό φορτίο



Χαρακτηριστικό των ισχυρών αλληλεπιδράσεων είναι ο
“εγκλωβισμός” των κουάρκ

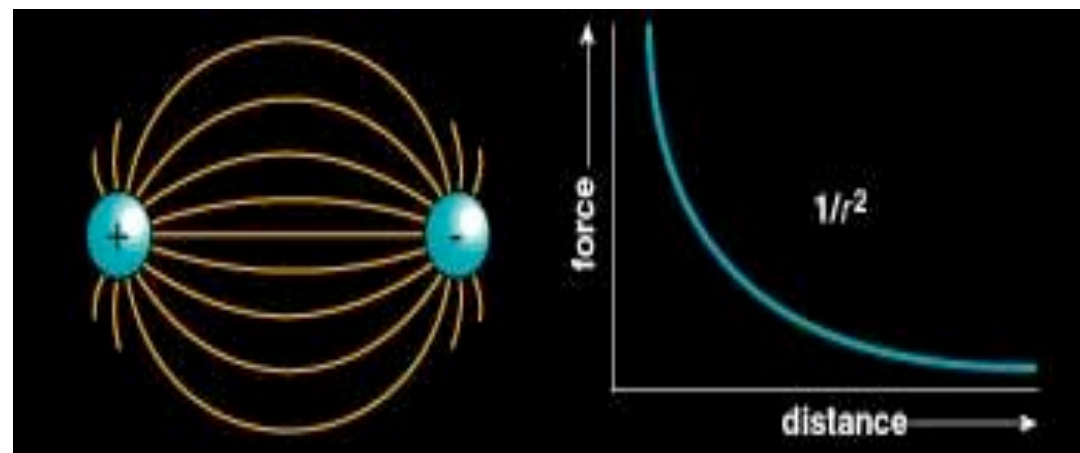
Όσο τα απομακρύνουμε η δυναμική τους ενέργεια αυξάνει τόσο ώστε
αντί να τα διαχωρίσουμε δημιουργούμε νέο ζεύγος quark-antiquark

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



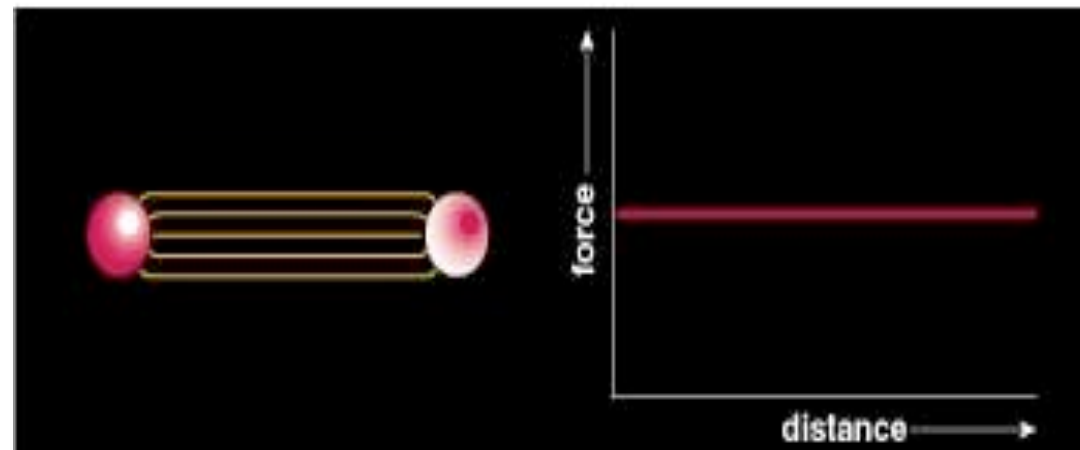
QED vs QCD

Dipole



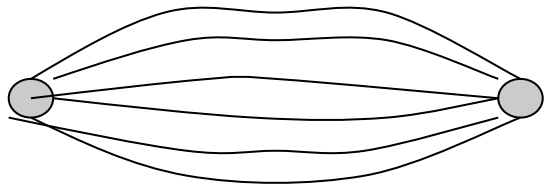
- 1 electric charge
- γ carries no charge

Flux Tube



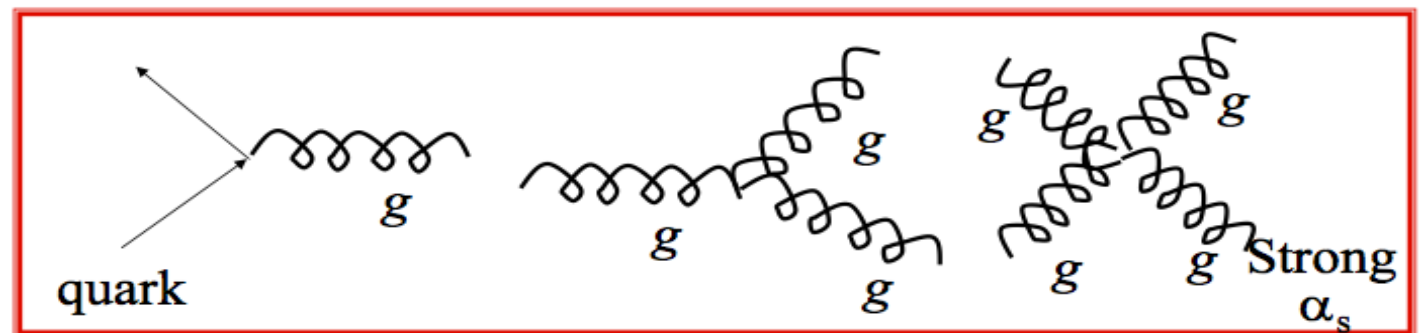
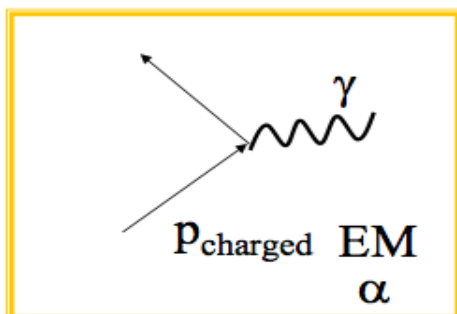
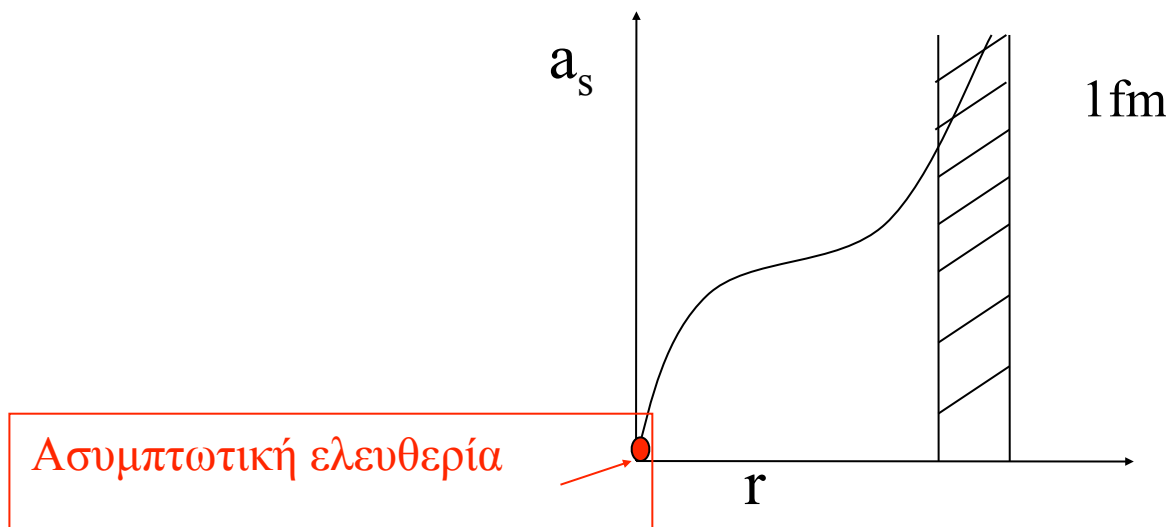
- 3 Color charges
- g carry charge

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)

45

- Η δύναμη μεταξύ δύο κουάρκ είναι ανεξάρτητη του χρώματος

- Το δυναμικό μεταξύ των κουάρκ:

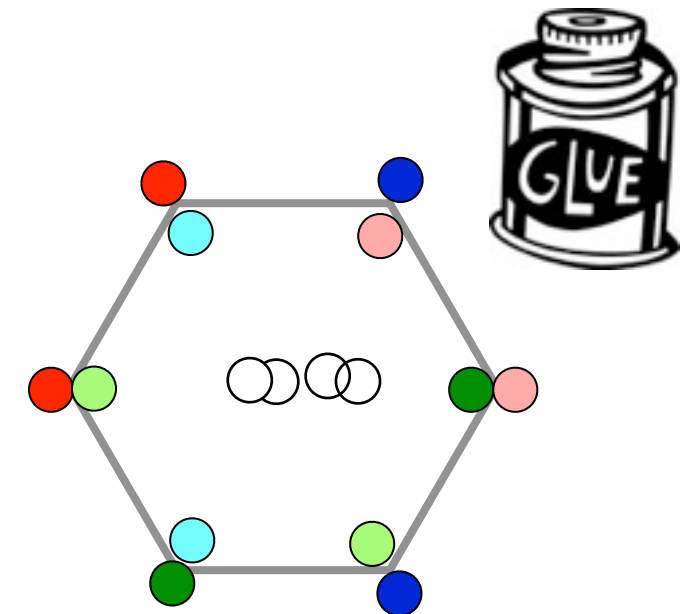
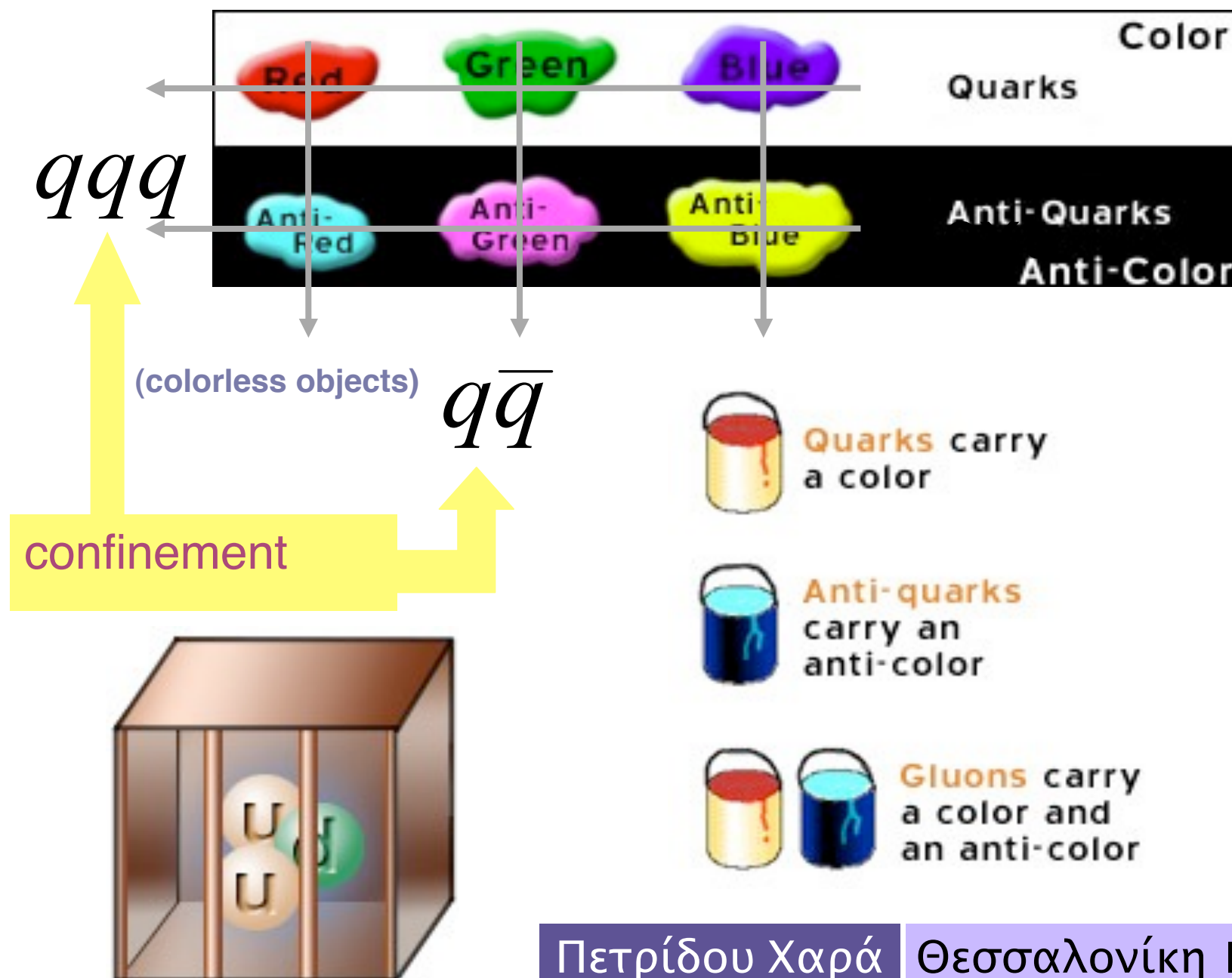
$$V_{\text{strong}}(r) = -\frac{4}{3} \left(\frac{a_s}{r} \right) + kr$$

<= 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

Η ιδιότητα του Χρώματος



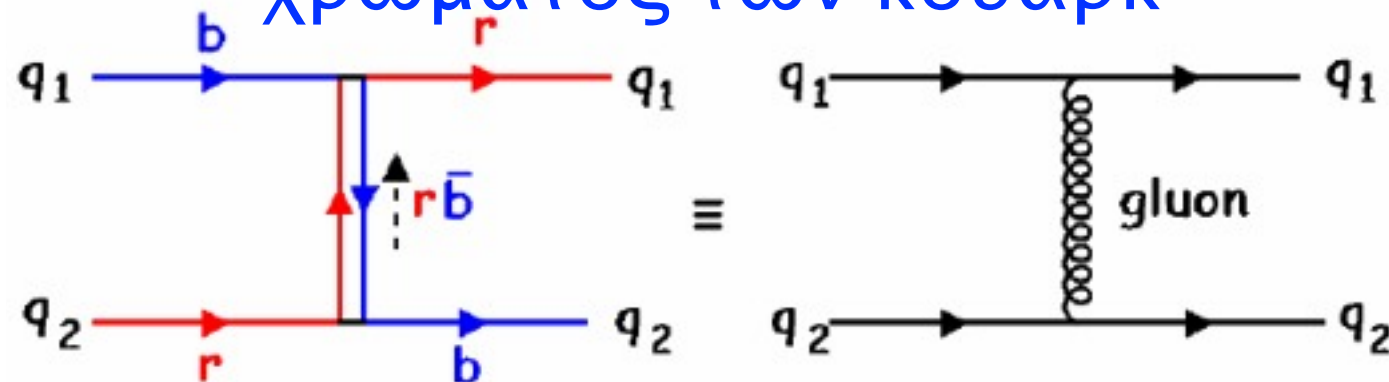
8 Gluons, each with a color and an anti-color charge.

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 γλουονίων μπορεί να συνοδεύεται και από αλλαγή του χρώματος των κουάρκ



Βασικά Χαρακτηριστικά των Δυνάμεων

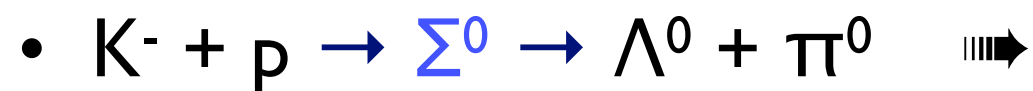
48

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

Σταθερά Σύζευξης και Χρόνος ζωής σε μία Αλληλεπίδραση

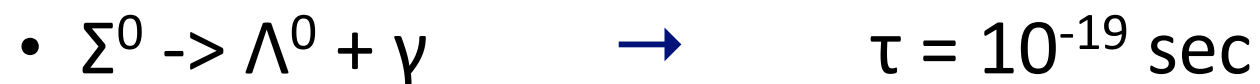
49

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



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

(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))