

# 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

### BOSONS

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

#### Unified Electroweak spin = 1

| Name               | Mass<br>GeV/c <sup>2</sup> | Electric<br>charge |
|--------------------|----------------------------|--------------------|
| $\gamma$<br>photon | 0                          | 0                  |
| $W^-$              | 80.4                       | -1                 |
| $W^+$              | 80.4                       | +1                 |
| $Z^0$              | 91.187                     | 0                  |

#### Strong (color) spin = 1

| Name              | Mass<br>GeV/c <sup>2</sup> | Electric<br>charge |
|-------------------|----------------------------|--------------------|
| <b>g</b><br>gluon | 0                          | 0                  |

# Τα Θεμελιώδη Μποζόνια των αλληλεπιδράσεων

## Οι Θεμελιώδεις Αλληλεπιδράσεις

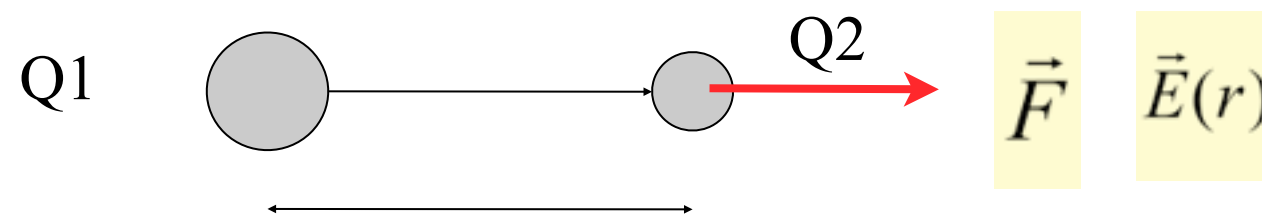
4

### 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.

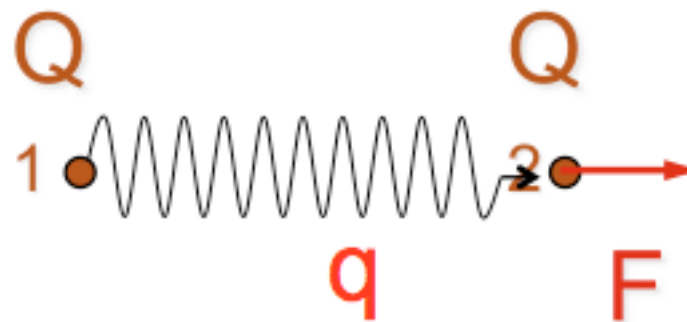
| Property                                                                                                     | Gravitational Interaction      | Weak Interaction<br>(Electroweak) | Electromagnetic Interaction | Strong Interaction |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|--------------------|
| Acts on:                                                                                                     | Mass – Energy                  | Flavor                            | Electric Charge             | Color Charge       |
| Particles experiencing:                                                                                      | All                            | Quarks, Leptons                   | Electrically Charged        | Quarks, Gluons     |
| Particles mediating:                                                                                         | Graviton<br>(not yet observed) | $W^+$ $W^-$ $Z^0$                 | $\gamma$                    | 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 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  $\Rightarrow$  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  $\Delta E$  διατηρείται

Η Αρχή της Απροσδιοριστίας του Heisenberg επιτρέπει :

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

⇒ Παραβίαση της ενέργειας κατά  $\Delta E$  μπορεί να συμβεί **ΜΟΝΟ** σε χρόνο μικρότερο από  $\Delta t$  :

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

- 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 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  $\mathbf{m}=\mathbf{0} \Rightarrow$  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  $\mathbf{m}$

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

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

**U( r): το δυναμικό Yukawa**

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

Πετρίδου Χάρα

Θεσσαλονίκη 10 Ιαν. 2014

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

$U(r)$ : 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  $m$

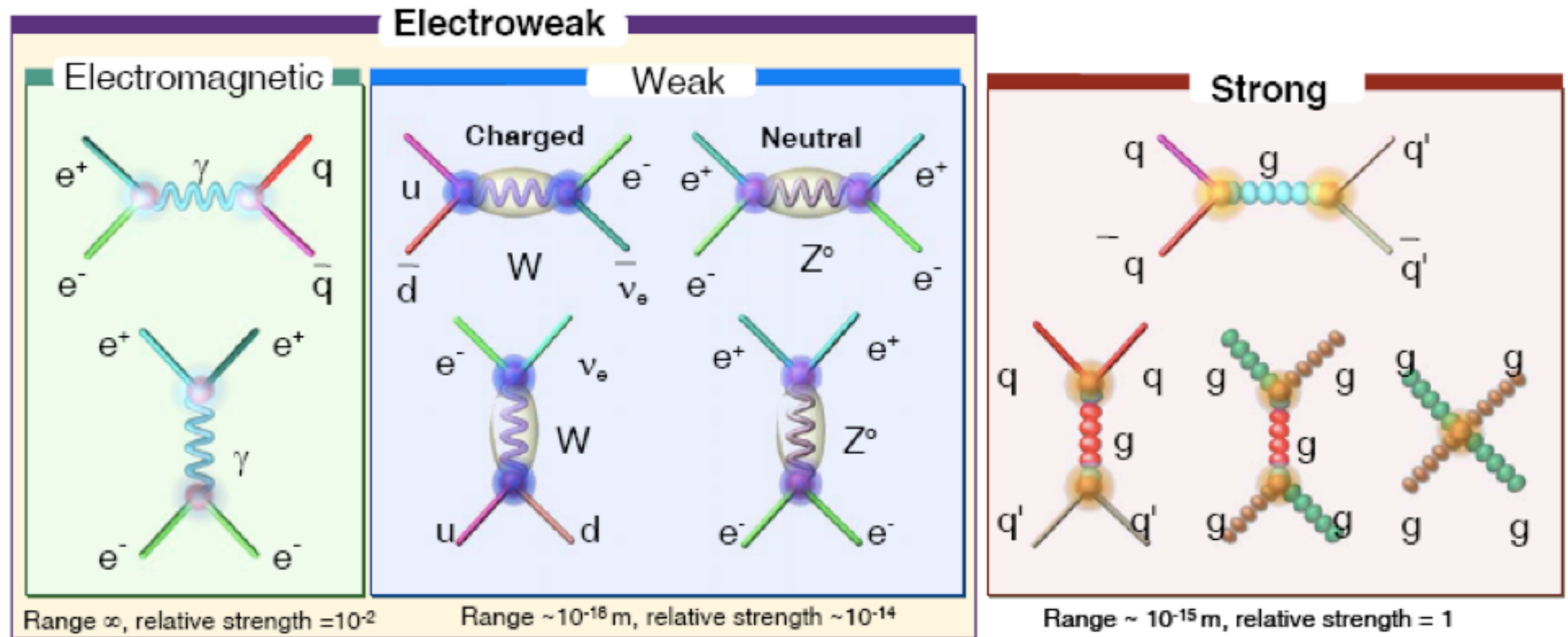
$$U(r) = \frac{g}{4\pi r} e^{-r/R}, \quad R = \frac{\hbar}{mc}$$

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

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

# Αλληλεπιδράσεις- Σύζευξη Σωματιδίων

15



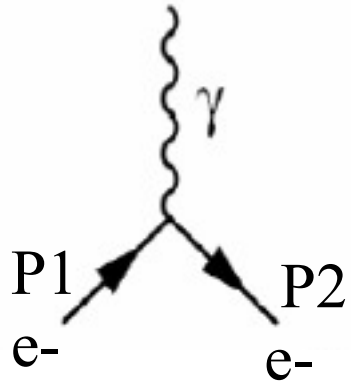
Στη Θεωρία Yukawa -σε λιγότερο “θεμελιακό επίπεδο” οι πυρηνικές δυνάμεις ανάμεσα σε πρωτόνια και νετρόνια μεταδίδονται μέσω των φορτισμένων ή ουδέτερων μποζονίων -των πιονίων (μεσόνια)

Πετρίδου Χαρά

Θεσσαλονίκη 10 Ιαν. 2014

# 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

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

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

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

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

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

# Μποζόνια-οι φορείς των δυνάμεων

17

- Αν ο διαδότης είναι φωτόνιο το πλάτος σκέδασης:

είναι ανάλογο του φορτίου  $e^2$

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

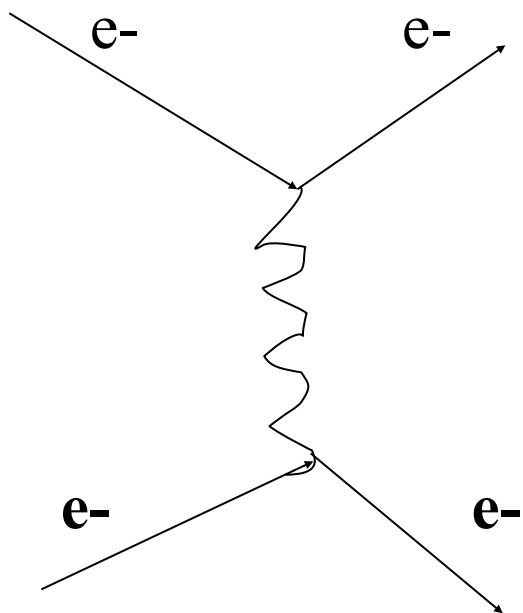
$$\propto e^2 \rightarrow a = e^2 / 4\pi\hbar c = 1/137 \dots$$
$$\propto 1/q^2$$

=> η ενεργός διατομή

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

=>

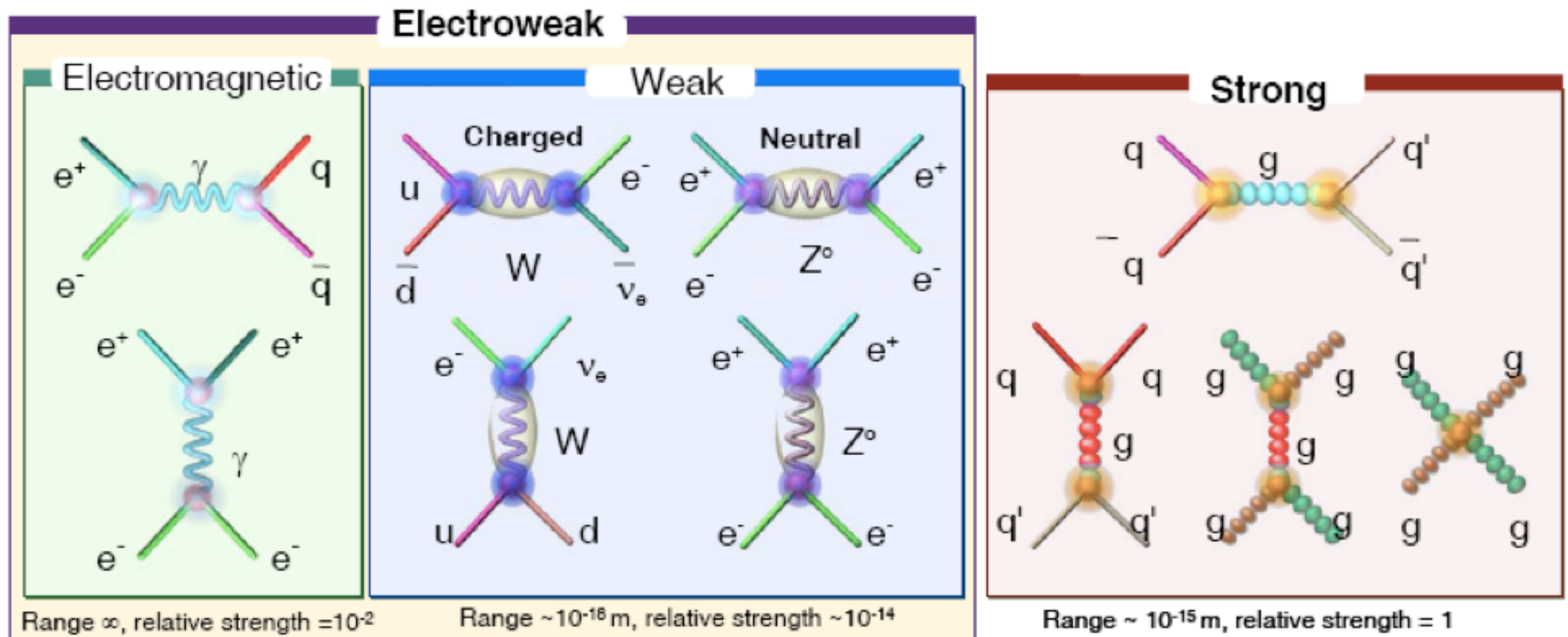
$$\propto e^4 \rightarrow a^2$$
$$\propto 1/q^4$$



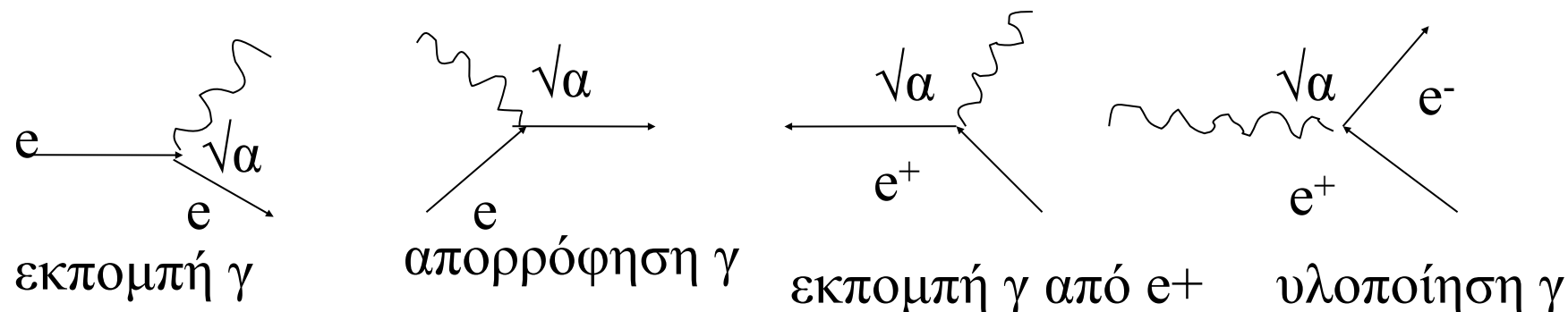
# Διαγράμματα Feynmann

18

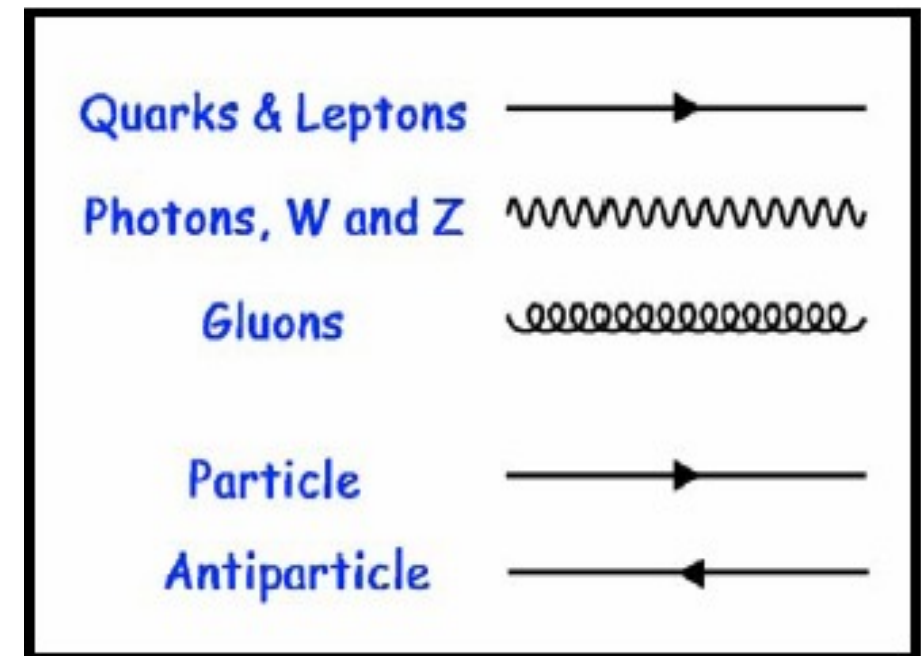
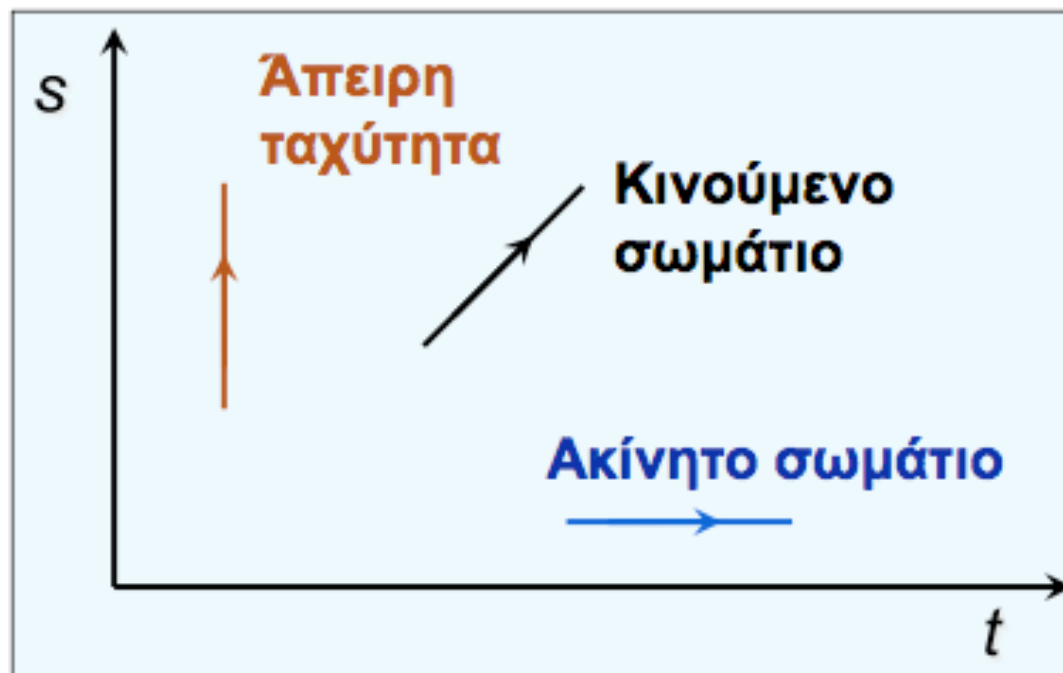
- Διαγράμματα Feynman είναι διαγράμματα για την αναπαράσταση της αλληλεπίδρασης και της κίνησης των στοιχειωδών σωματιδίων στο χωρόχρονο



- 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)

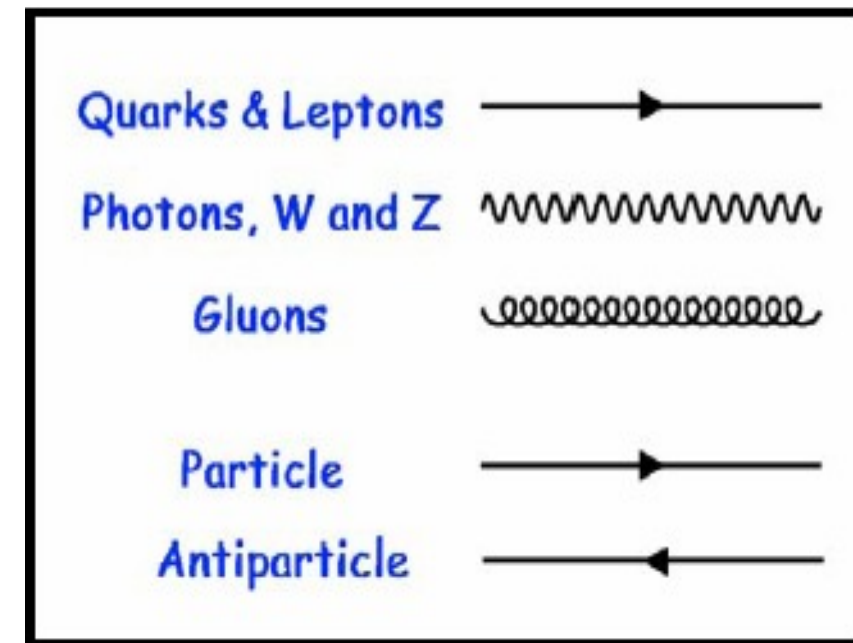


# Διαγράμματα Feynmann

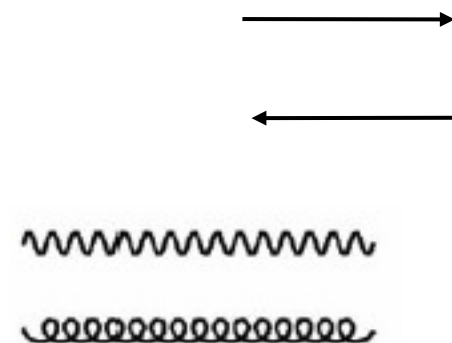
21

## Βασικοί κανόνες σε κάθε κόμβο:

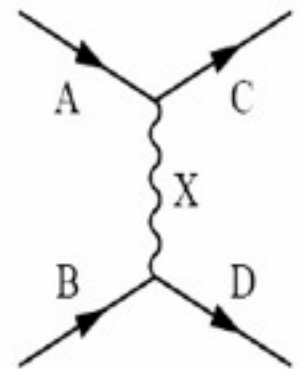
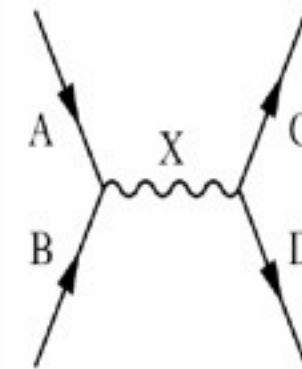
- $E$ ,  $p$  διατηρείται
- $Q$  διατηρείται
- Σπιν διατηρείται
- Βαρυονικός Αριθμός
- Λεπτονικός Αριθμός



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

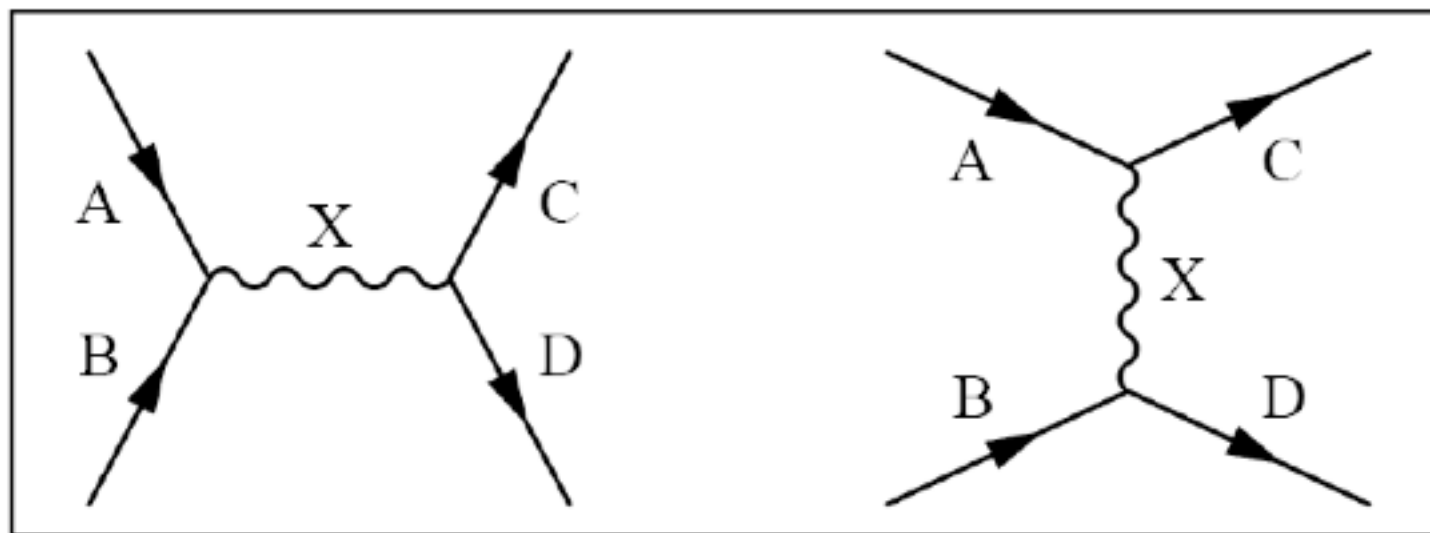


- Το σημείο σύζευξης (κόμβος) δηλώνει την ισχύ της σύζευξης



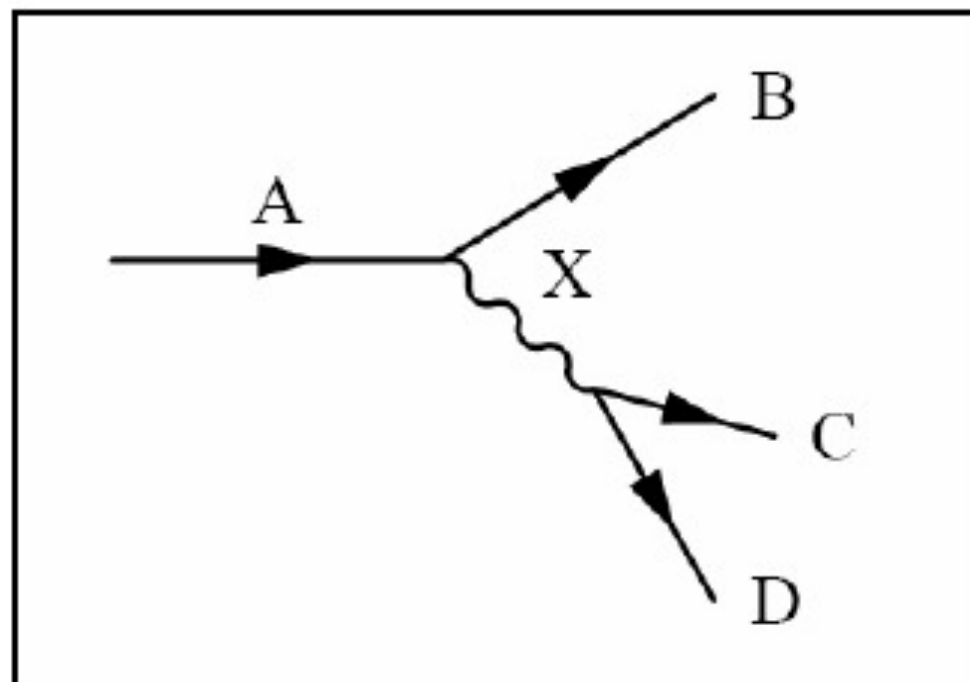
## Παριστούν διεργασίες της μορφής

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



... ή της μορφής

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



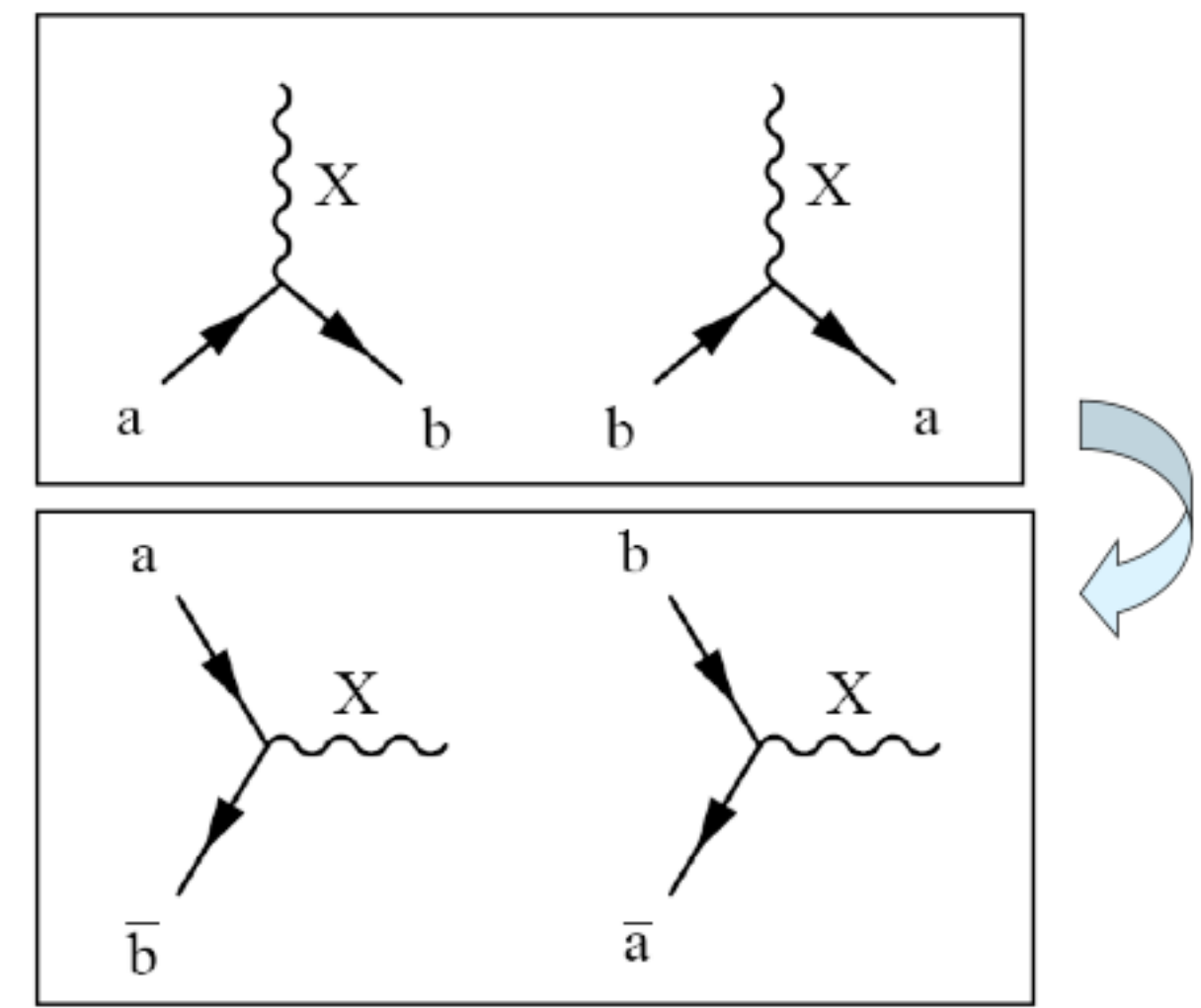
A, B, C, D

- Κουάρκ
- Λεπτόνια
- Αντικουάρκ
- Αντιλεπτόνια

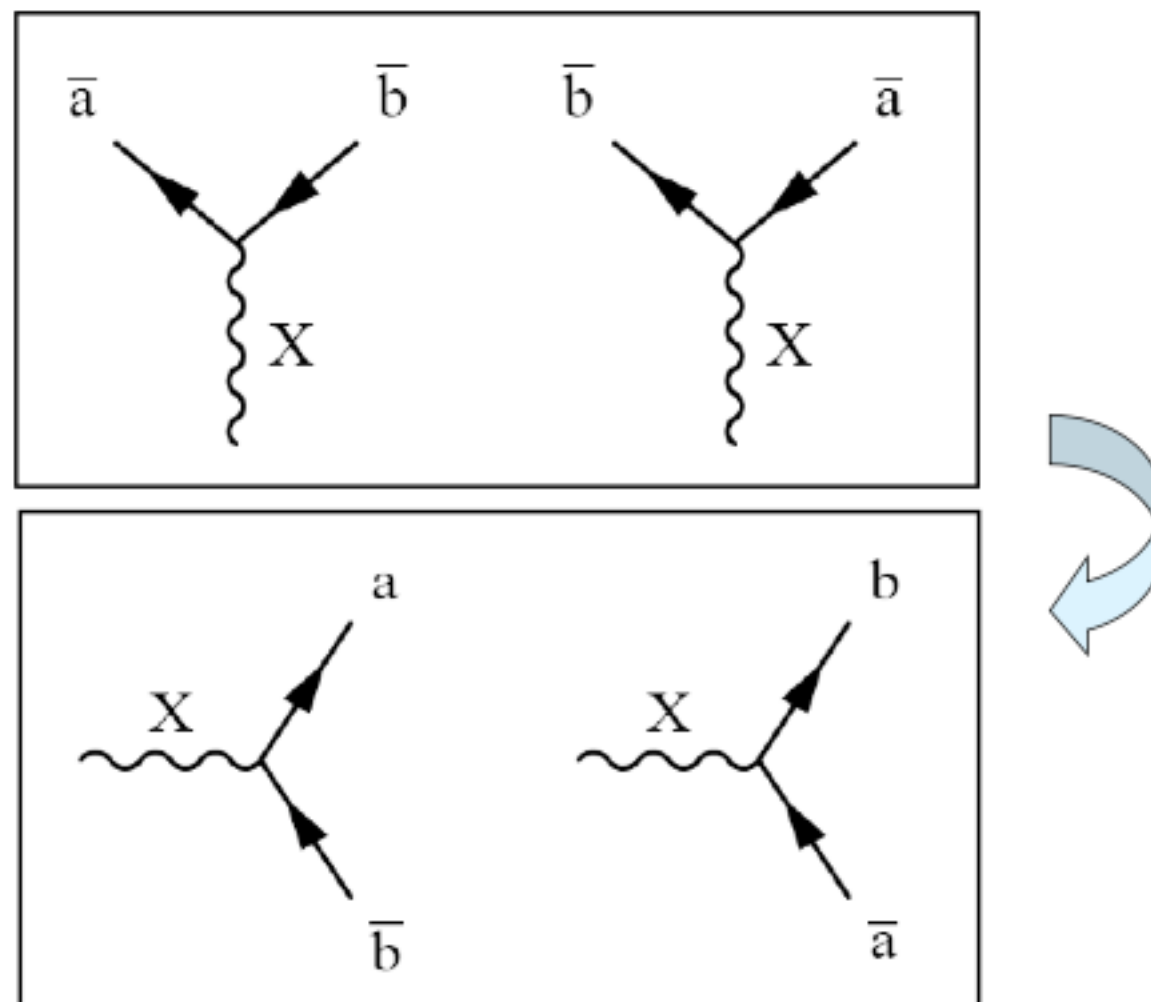
X

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

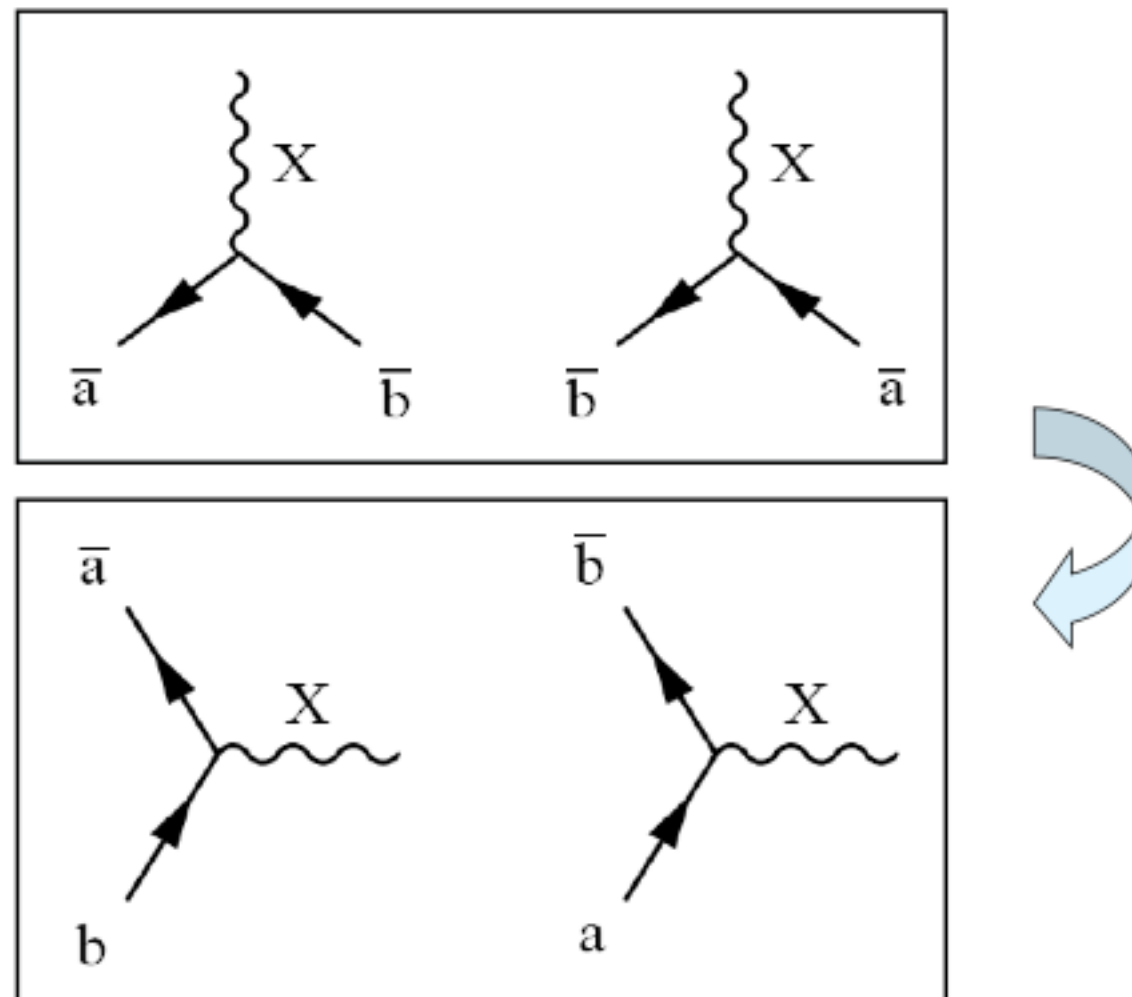
## Γενικές ιδιότητες: Παραδείγματα περιστροφής διαγραμμάτων



Γενικές ιδιότητες: Παραδείγματα περιστροφής διαγραμμάτων



Γενικές ιδιότητες: Παραδείγματα περιστροφής διαγραμμάτων



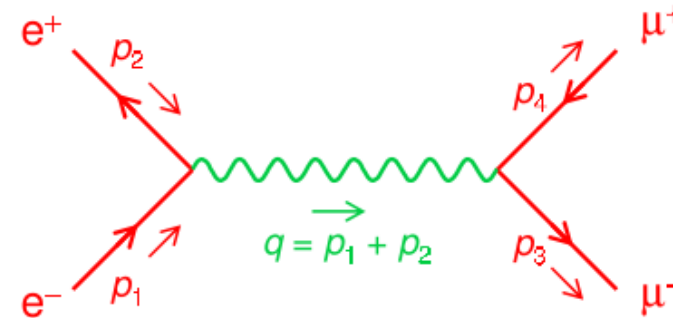
# Διαγράμματα Feynmann

27

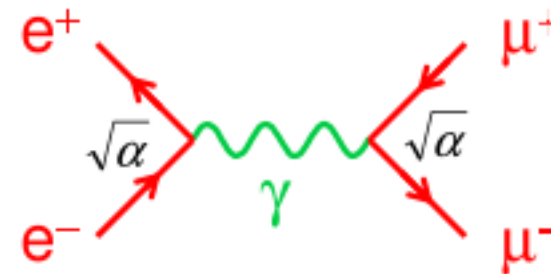
- Παραδείγματα απεικόνισης μιας αλληλεπίδρασης με Διαγράμματα Feynman

Σκέδαση

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

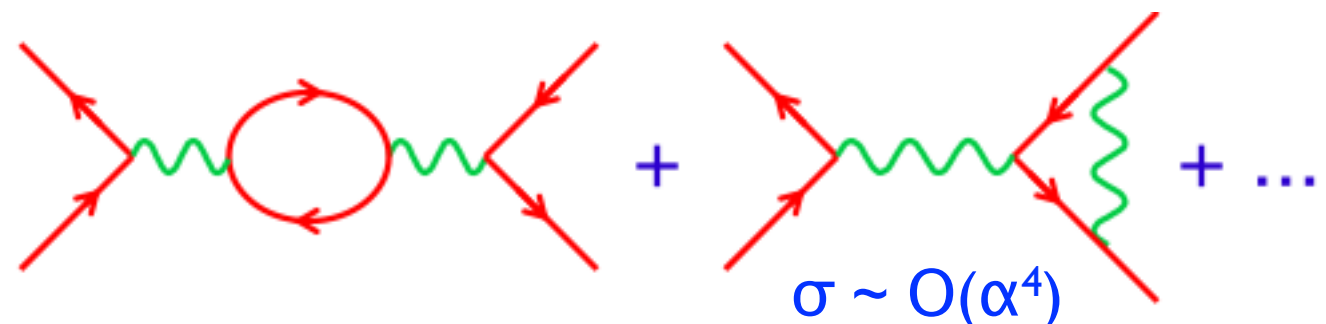


Διαγράμματα  
“χαμηλότερης τάξης”  
(πλάτος  $f \sim \alpha$ , ενεργός διατομή  $\sigma \sim \alpha^2$ )



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

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



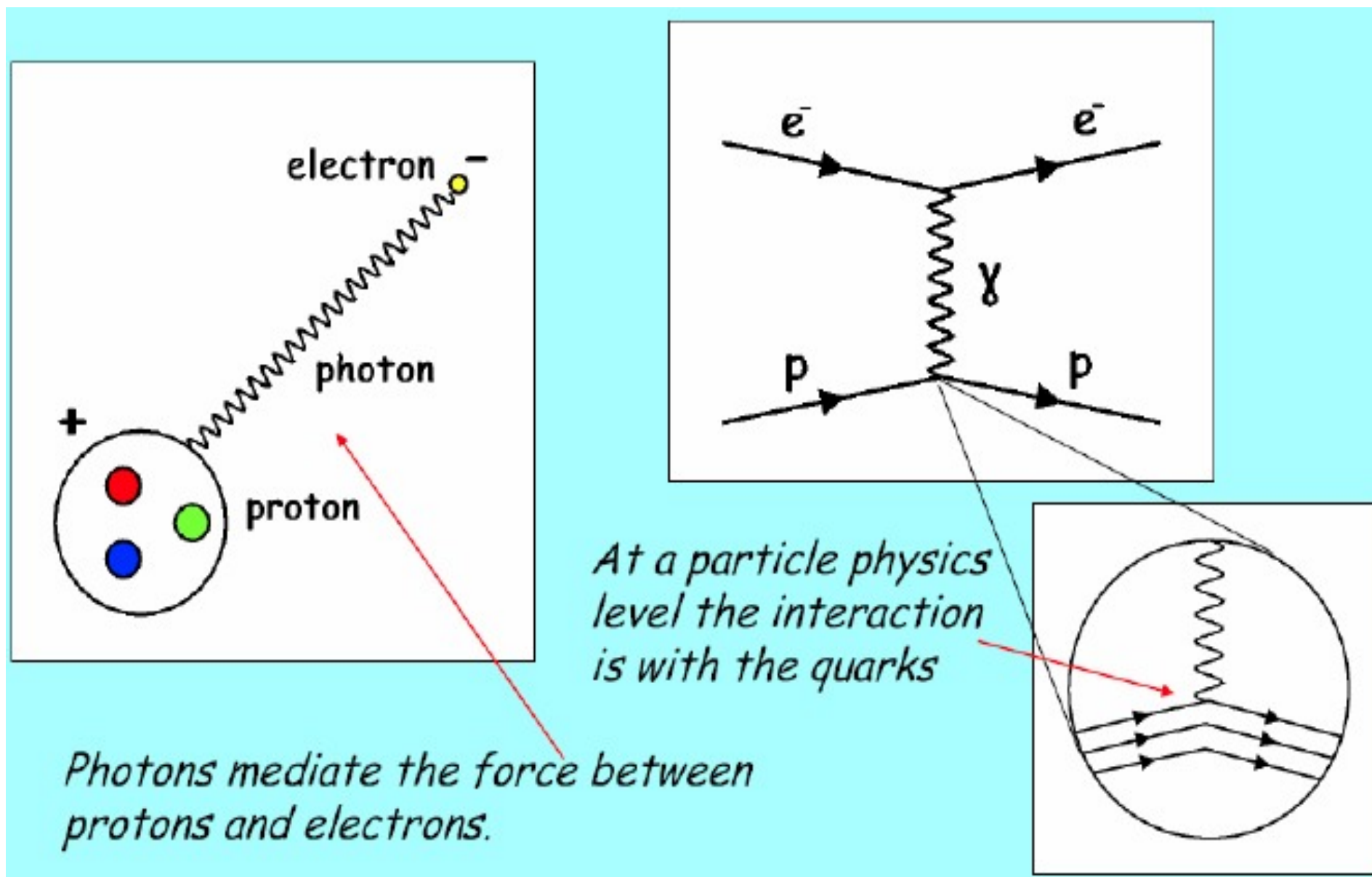
- **Δυνάμεις**

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

|                        | ΑΣΘΕΝΕΙΣ | ΗΜΓ | ΙΣΧΥΡΕΣ |
|------------------------|----------|-----|---------|
| Quarks                 | ✓        | ✓   | ✓       |
| Φορτισμένα<br>Λεπτόνια | ✓        | ✓   | ✗       |
| Ουδέτερα<br>Λεπτόνια   | ✓        | ✗   | ✗       |

# Ηλεκτρομαγνητικές Αλληλεπιδράσεις (I)

29



Η σταθερά σύζευξης  $\alpha$  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

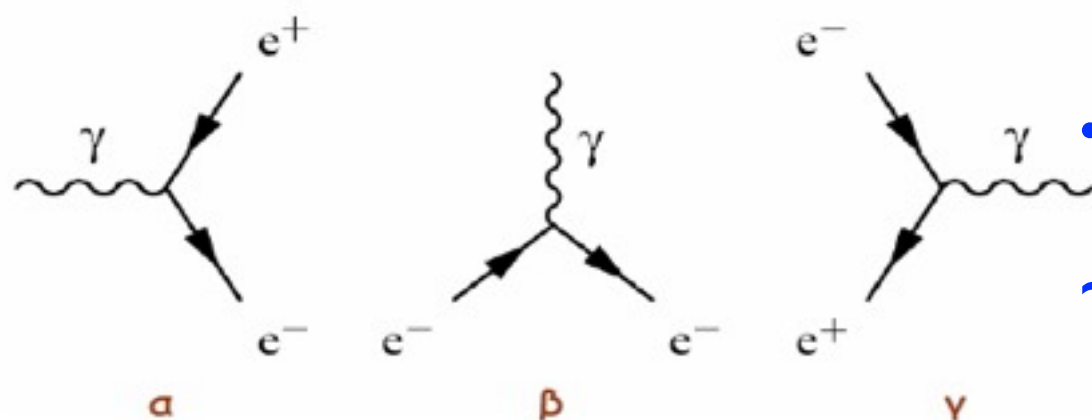
Το φωτόνιο συζεύγνυται μόνο με φορτισμένο σωματίδιο

## Ηλεκτρομαγνητικές Αλληλεπιδράσεις

- Η ισχύς της αλληλεπίδρασης μεταξύ φορτισμένων σωματίων και φωτονίων:

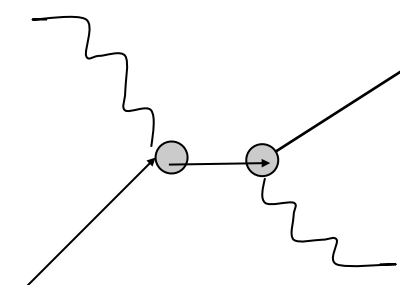
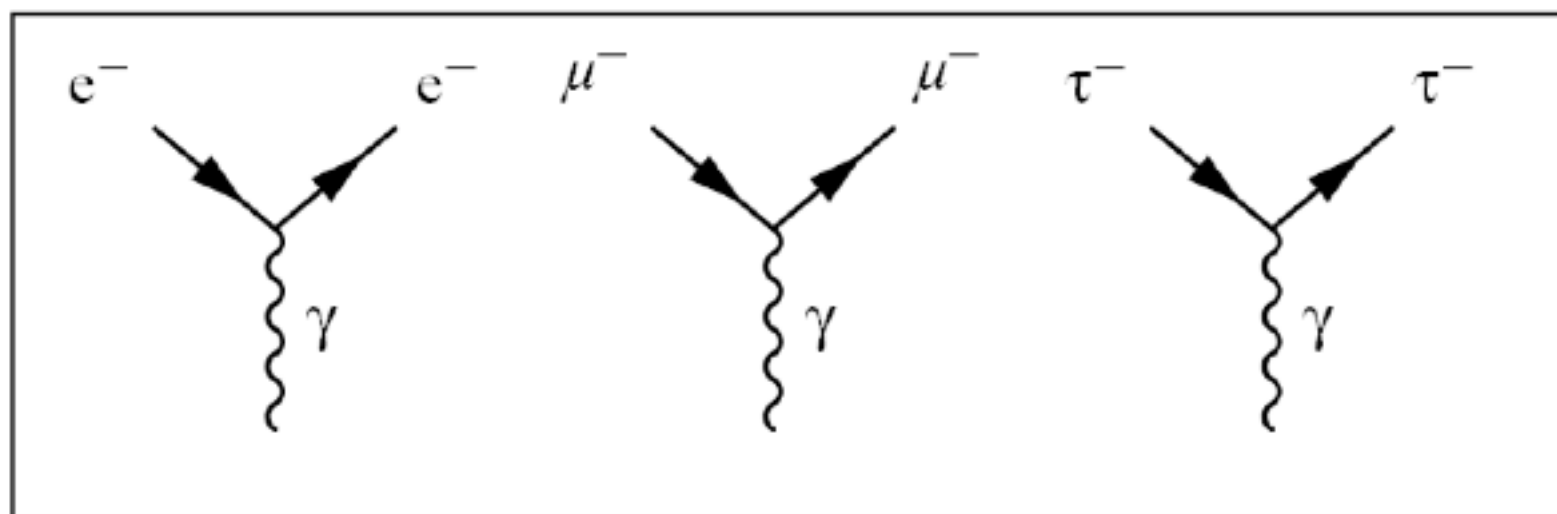
$$\alpha = e^2/\hbar c \sim 1/137 \text{ (η σταθερά της λεπτής υφής)}$$

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



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

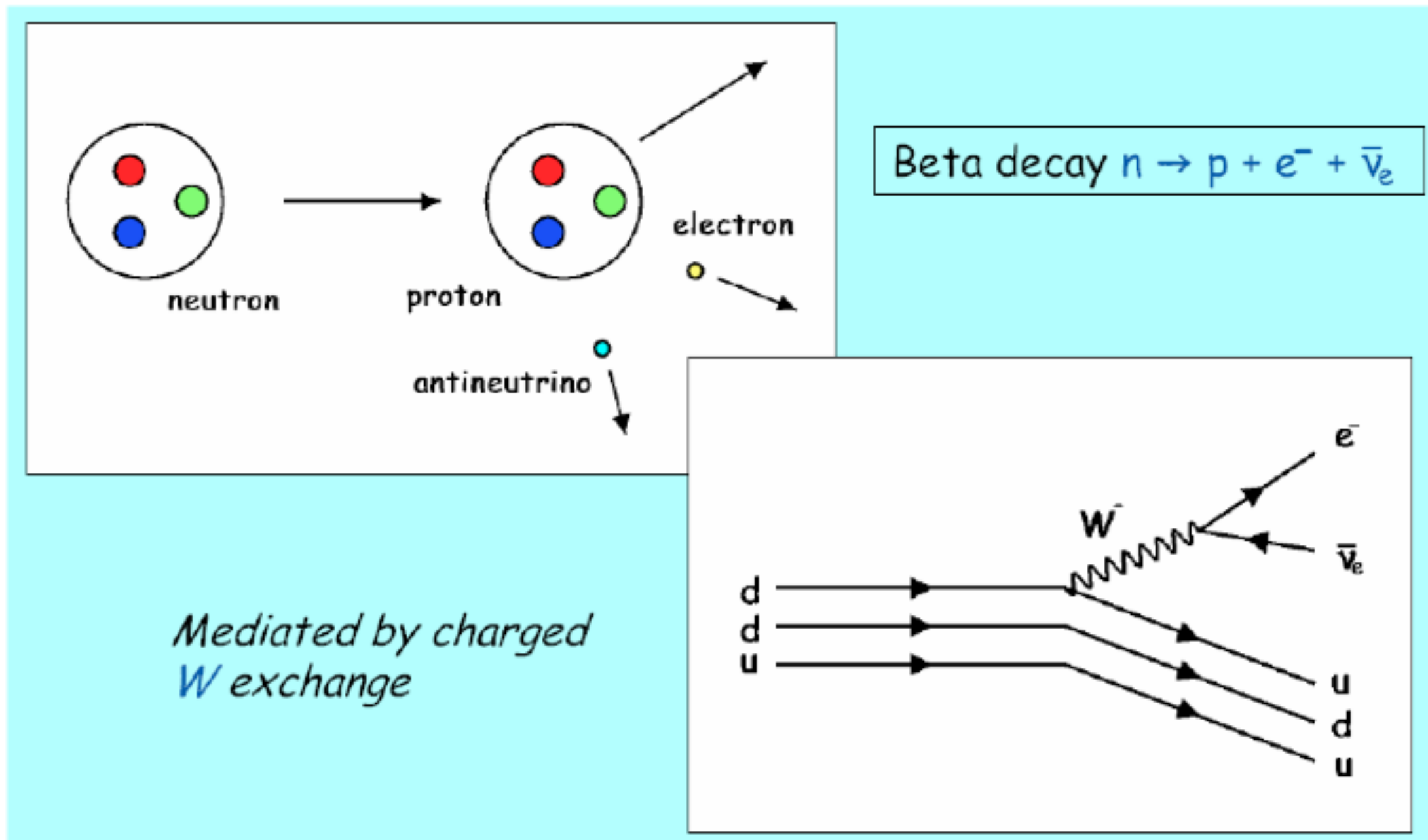
- **Σκέδαση Compton**: το πλάτος της αλληλεπίδρασης είναι  $\sim \alpha \Rightarrow$  ενεργός διατομή:  $\sim \alpha^2$  (2ης τάξης)



Σκέδαση Compton

# Ασθενείς Αλληλεπιδράσεις (I)

32



# Ασθενείς Αλληλεπιδράσεις (II)

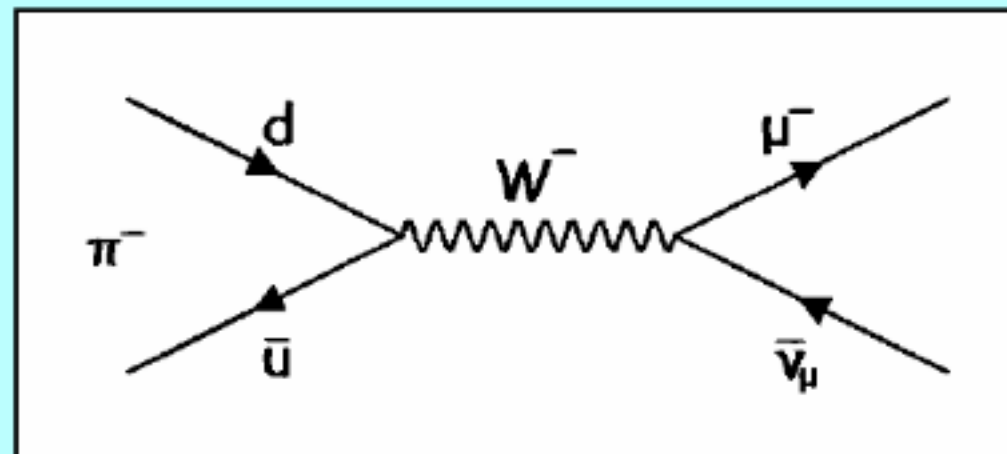
33

Οι Ασθενείς Αλληλεπιδράσεις αλλάζουν τις γεύσεις των κουάρκ και τον τύπο των λεπτονίων αλλά μέσα στην ίδια οικογένεια !

Παράδειγμα διάσπασης μεσονίου σε λεπτόνια

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

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



# Ασθενείς Αλληλεπιδράσεις (III)

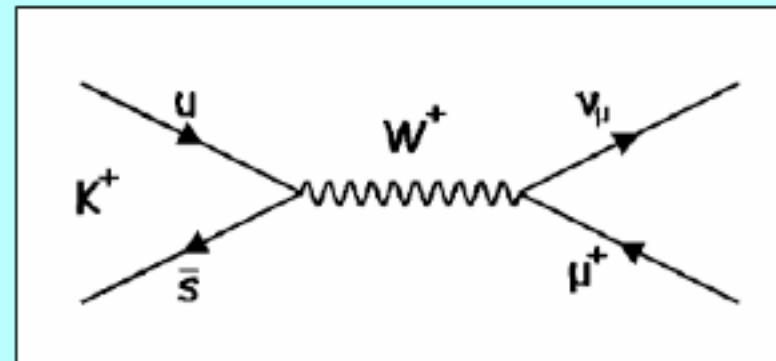
34

Οι Ασθενείς Αλληλεπιδράσεις αλλάζουν τις γεύσεις των κουάρκ και τον τύπο των λεπτονίων αλλά μέσα στην ίδια οικογένεια !

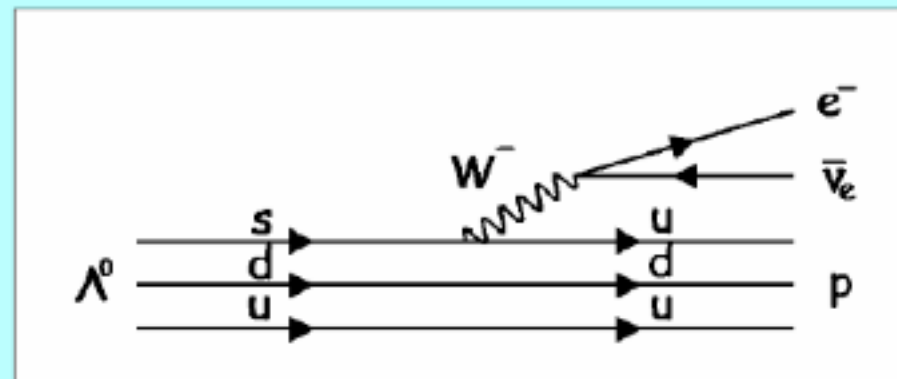
Παράδειγμα διάσπασης με αλλαγή της παραδοξότητας

$\Delta S = 1$  (Strangeness changes)

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



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

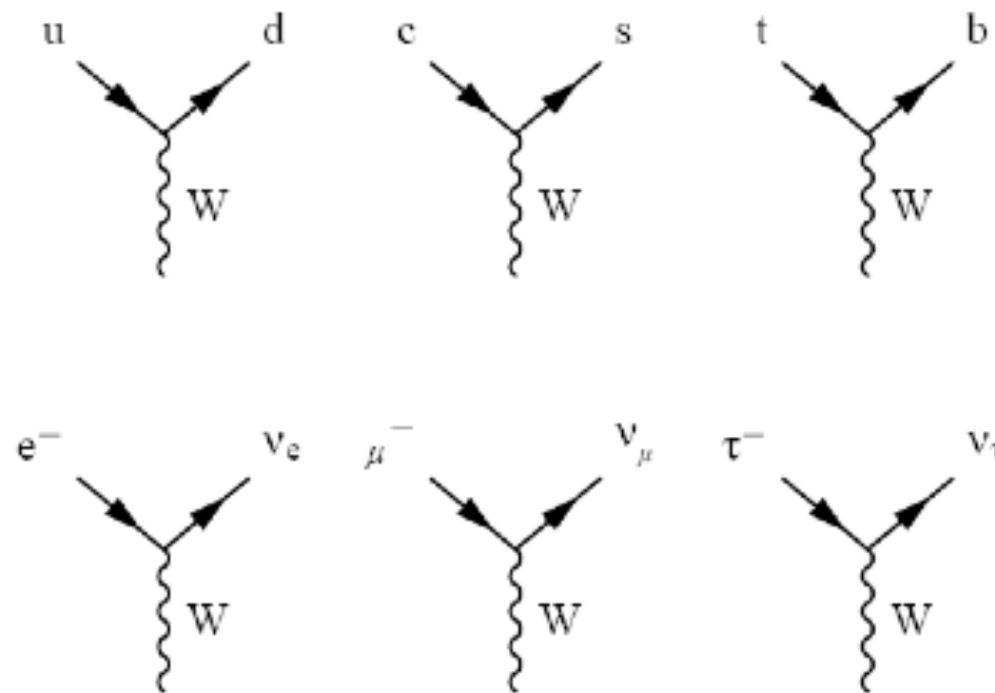


# Ασθενείς Αλληλεπιδράσεις (IV)

35

Οι Ασθενείς Αλληλεπιδράσεις αλλάζουν τις γεύσεις των κουάρκ και τον τύπο των λεπτονίων αλλά μέσα στην ίδια οικογένεια !

Όταν Ανταλλάσσονται οι διαδότες  $W$  , αλλάζει και το φορτίο

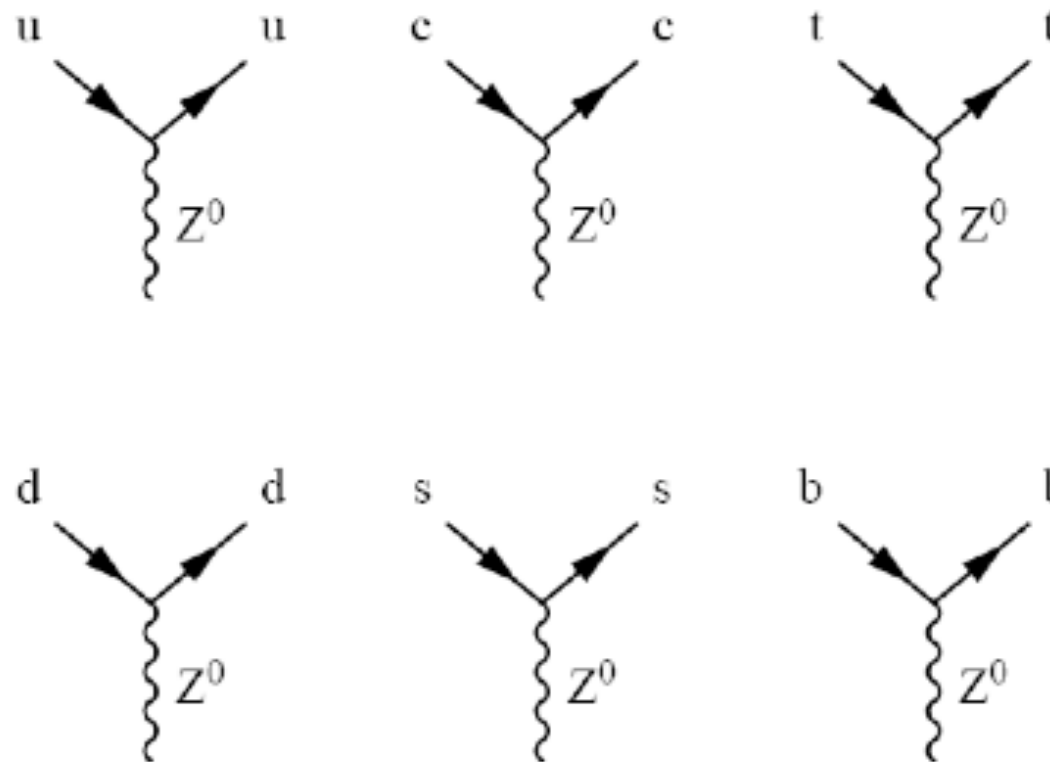


# Ασθενείς Αλληλεπιδράσεις (V)

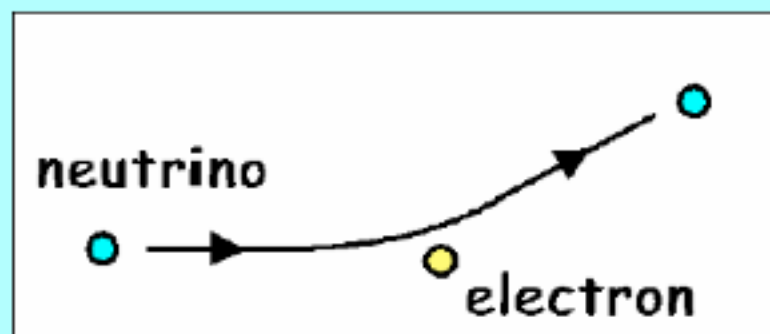
36

Οι Ασθενείς Αλληλεπιδράσεις αλλάζουν τις γεύσεις των κουάρκ και τον τύπο των λεπτονίων αλλά μέσα στην ίδια οικογένεια !

Όταν Ανταλλάσσονται οι διαδότες Z, δεν αλλάζει το φορτίο

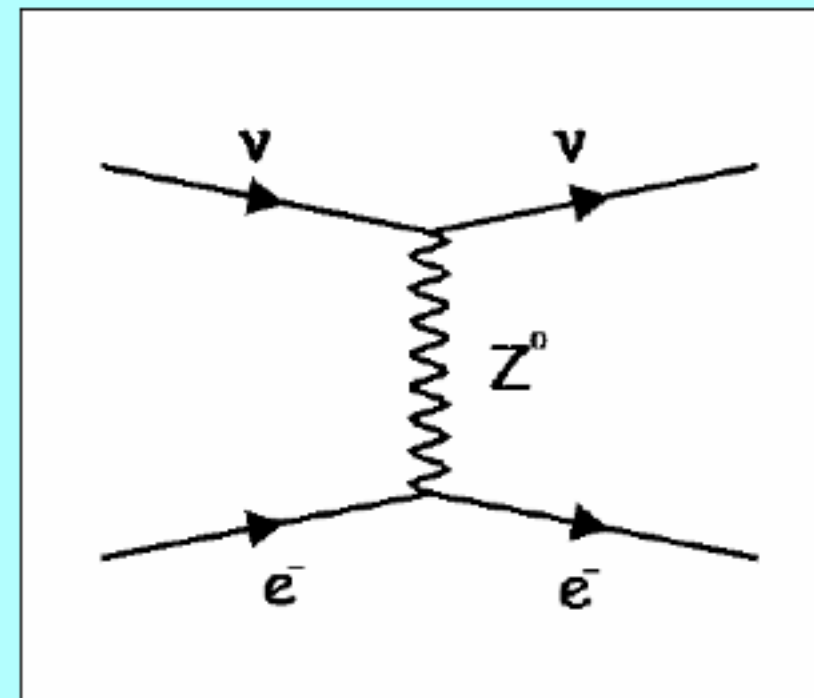


## Παράδειγμα σκέδασης νετρίνο



*Mediated by neutral  
 $Z$  exchange*

Neutrino scattering  
off an electron

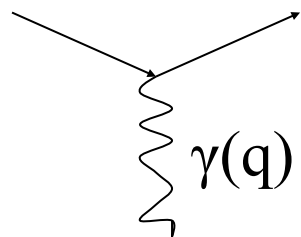


# Ασθενείς Αλληλεπιδράσεις (VII)

38

Ηλεκτρομαγνητικές Δυνάμεις

- κόμβος (διάγραμμα Feynman)

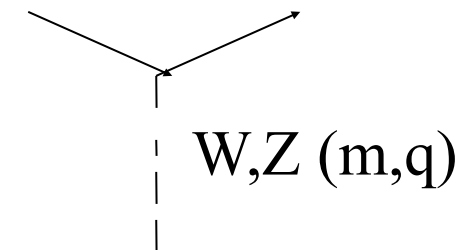


- Σταθερά Σύζευξης

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

Ασθενείς Δυνάμεις

- κόμβος (διάγραμμα Feynman)



- Σταθερά Σύζευξης

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

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

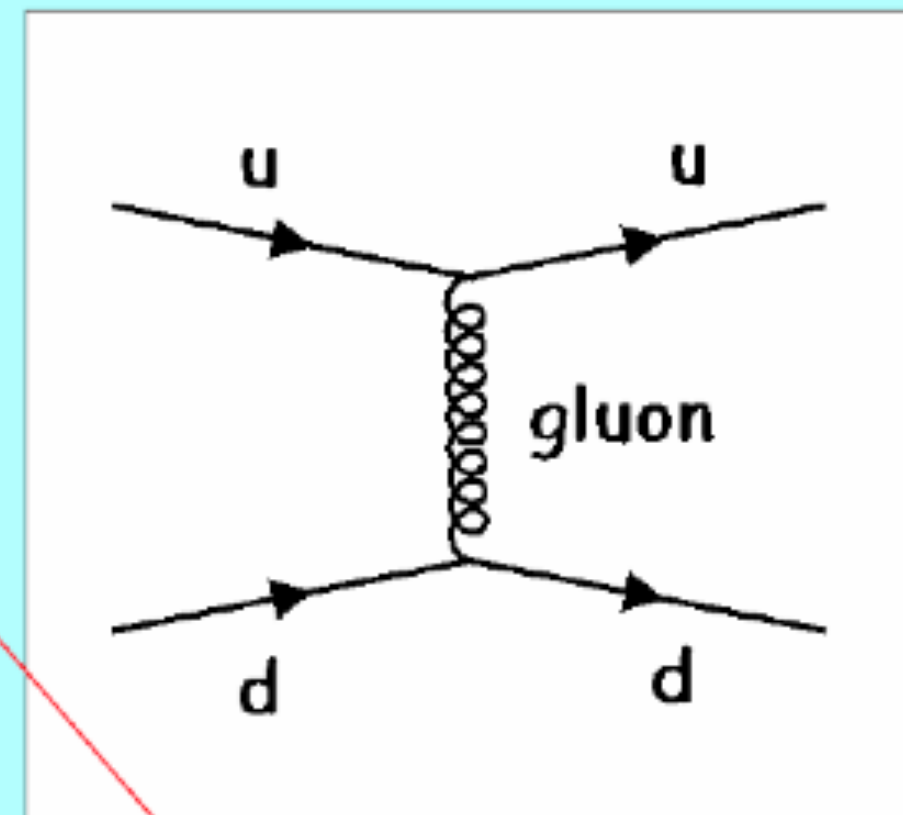
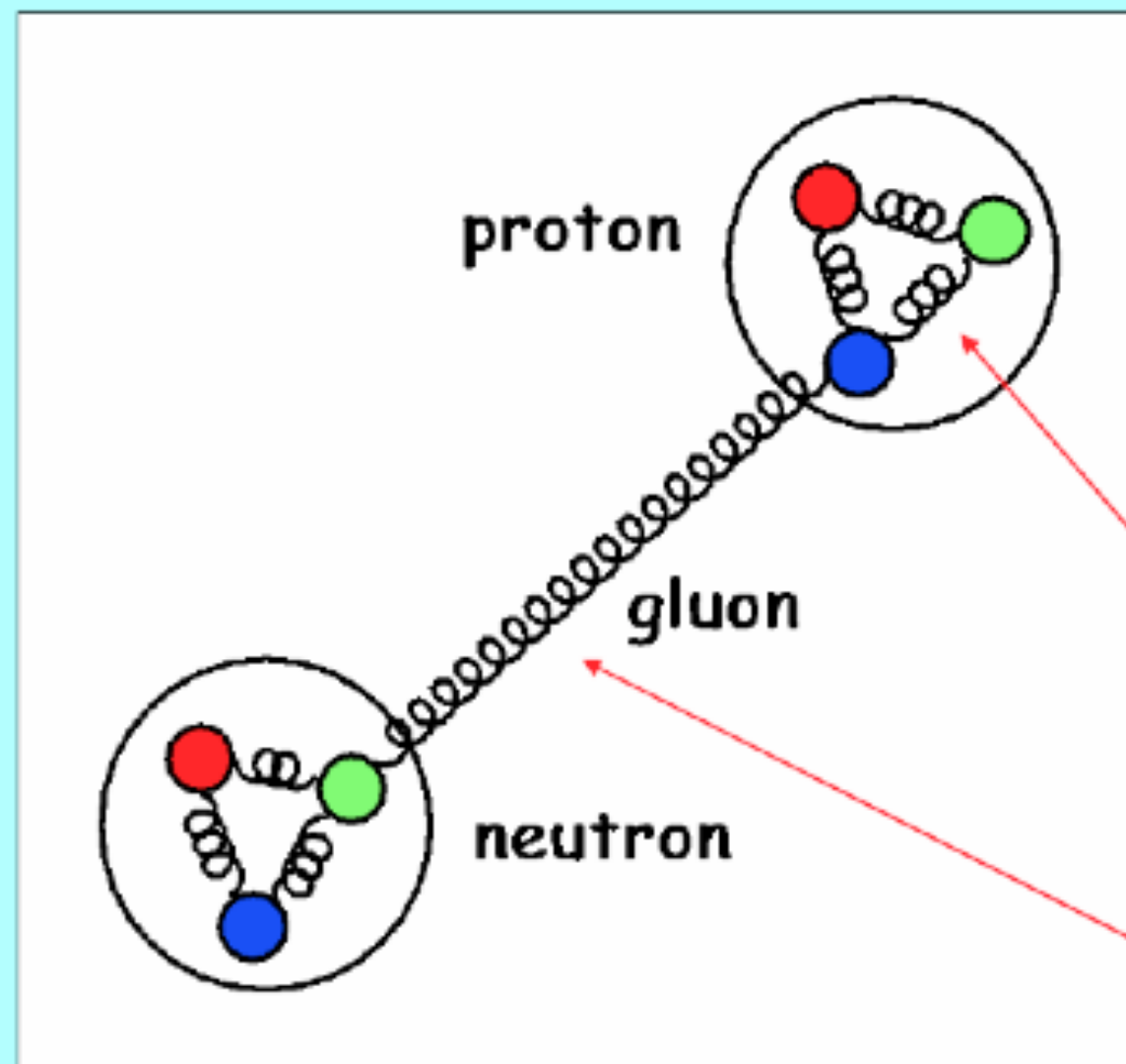
Για  $q^2 \rightarrow 0$

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

$$g = e$$

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

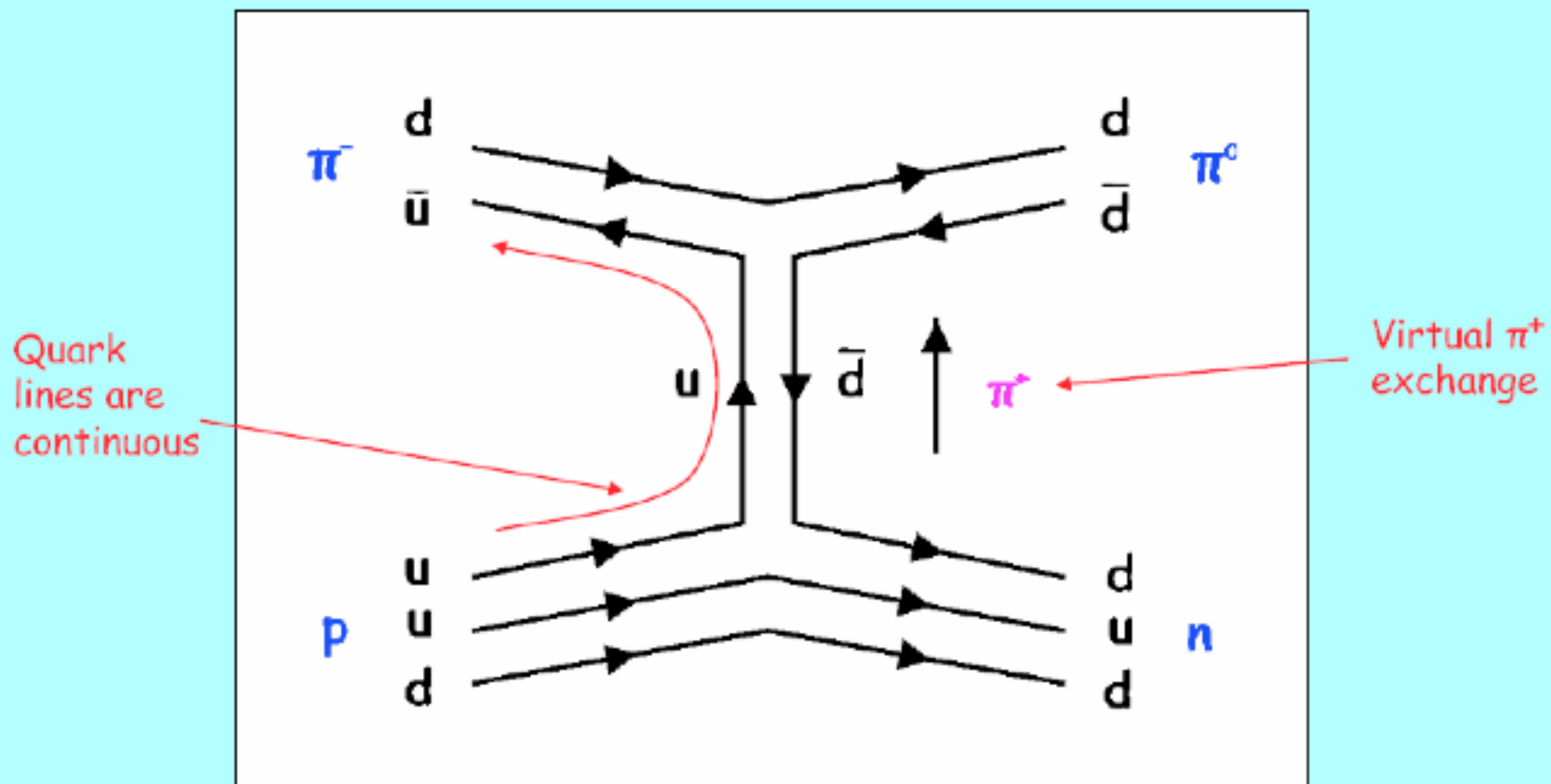
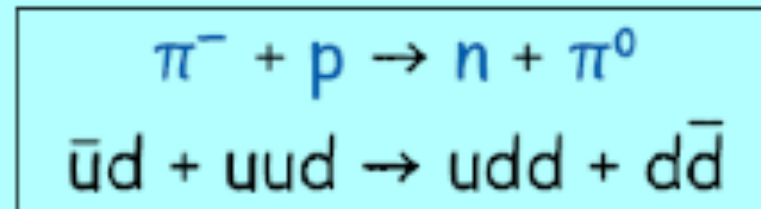




*Gluons hold the proton and neutron together and are responsible for the Strong force between them.*

# Ισχυρές Αλληλεπιδράσεις (II)

40

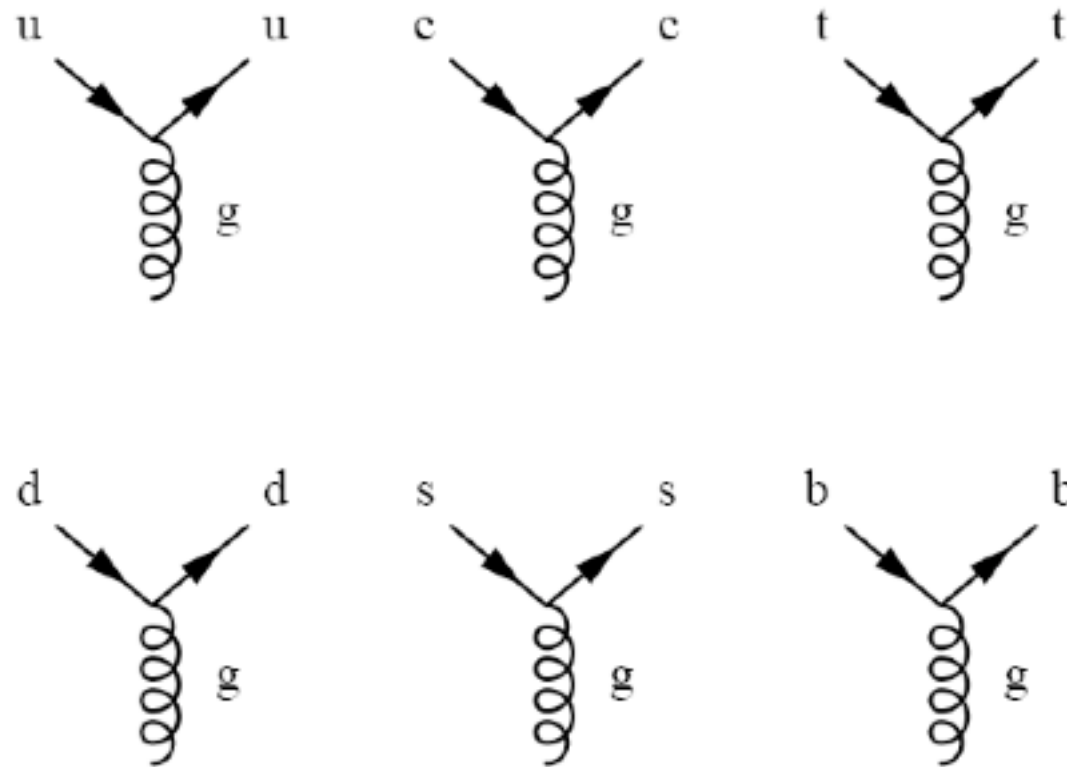


# Ισχυρές Αλληλεπιδράσεις (III)

41

Οι Ισχυρές Αλληλεπιδράσεις  **$\Delta EN$**  αλλάζουν τις γεύσεις των κουάρκ

Ανταλλάσσονται γλουόνια (gluons);  **$\Delta EN$**  αλλάζει και το ηλεκτρικό φορτίο



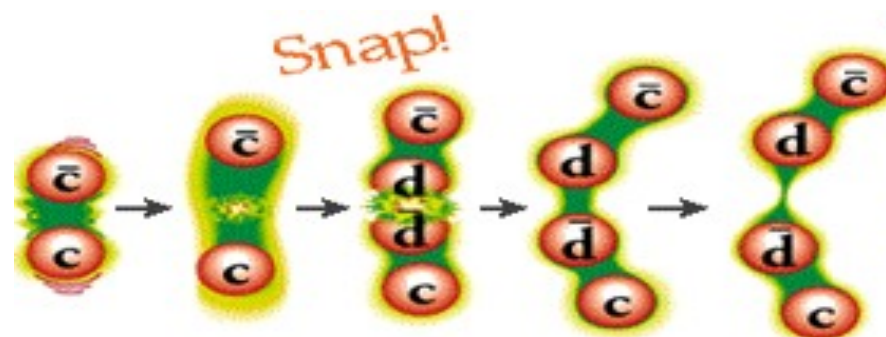
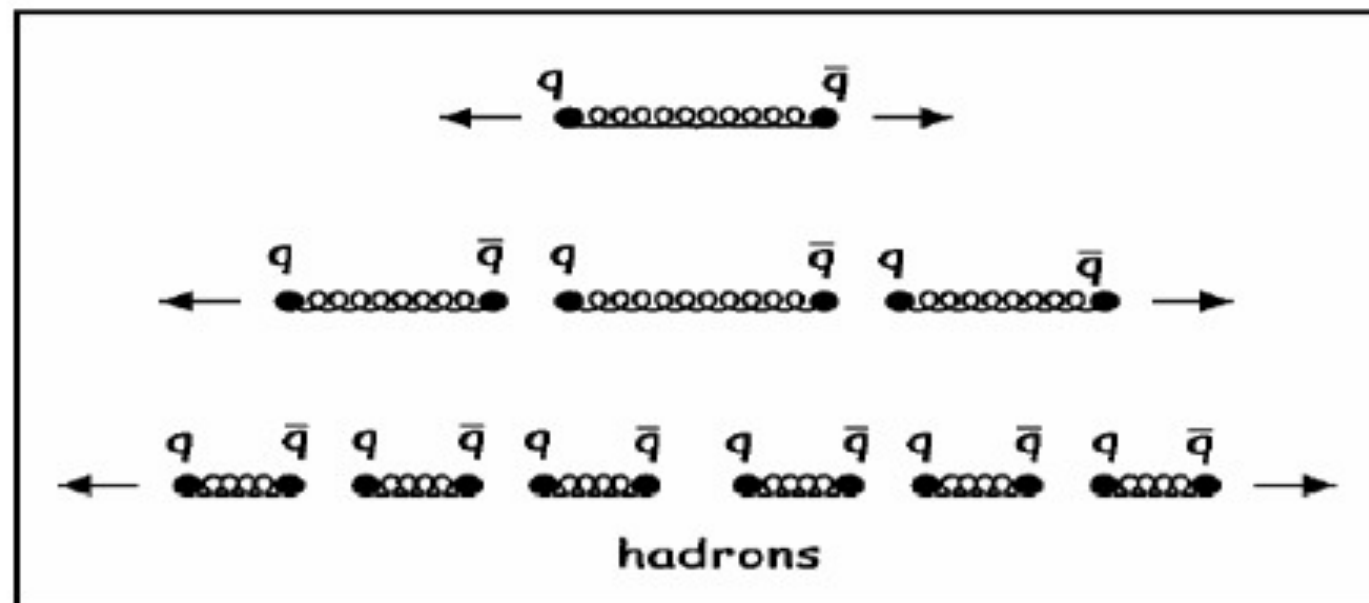
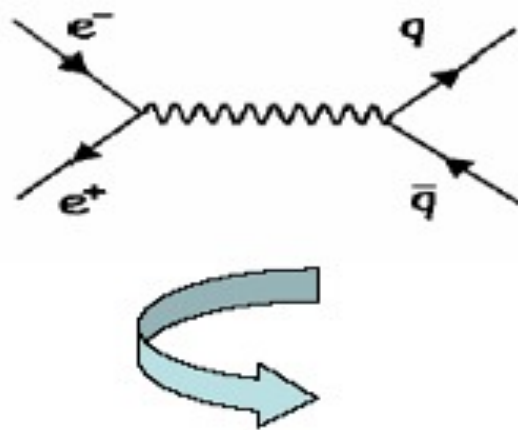
# Ισχυρές Αλληλεπιδράσεις (IV)

42

Χαρακτηριστικό των ισχυρών αλληλεπιδράσεων είναι ο  
“εγκλωβισμός” των κουάρκ

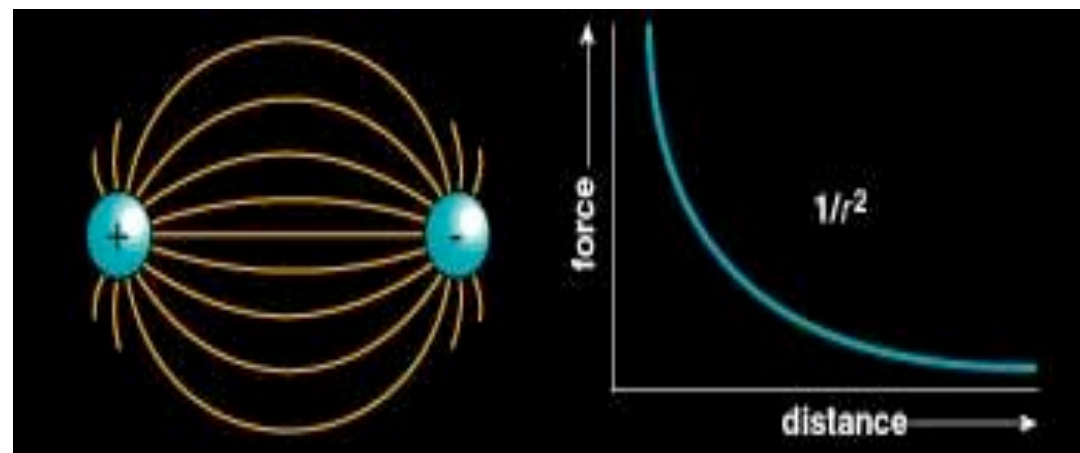
Όσο τα απομακρύνουμε η δυναμική τους ενέργεια αυξάνει τόσο ώστε  
αντί να τα διαχωρίσουμε δημιουργούμε νέο ζεύγος quark-antiquark

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



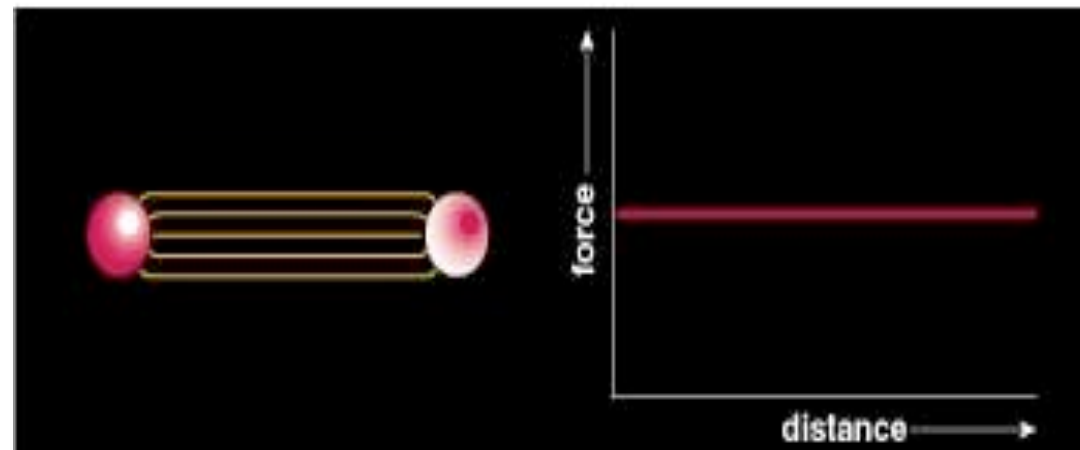
## QED vs QCD

Dipole



- 1 electric charge
- $\gamma$  carries no charge

Flux Tube

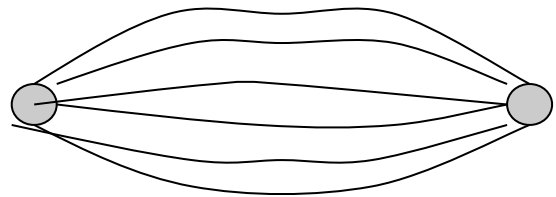


- 3 Color charges
- $g$  carry charge

# Ισχυρές Αλληλεπιδράσεις (VI)

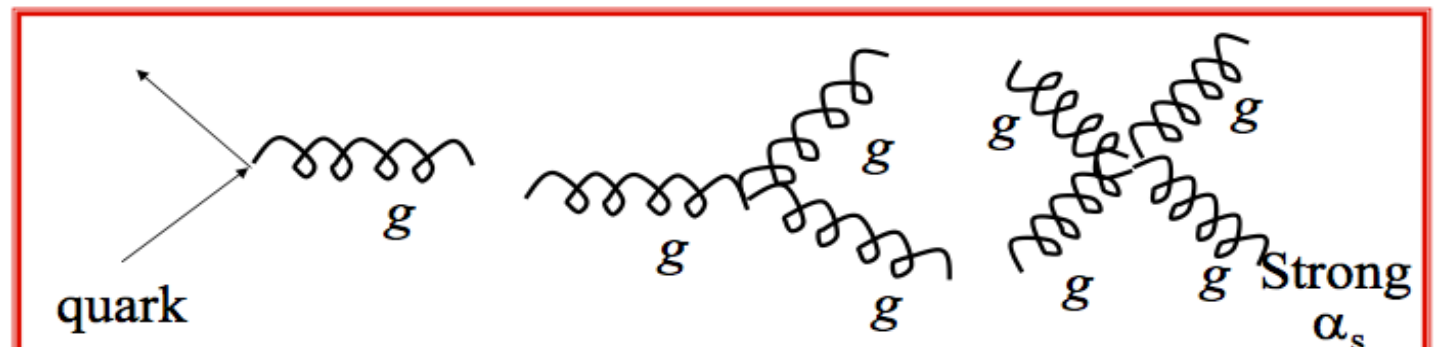
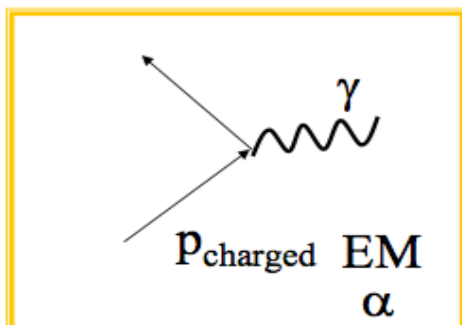
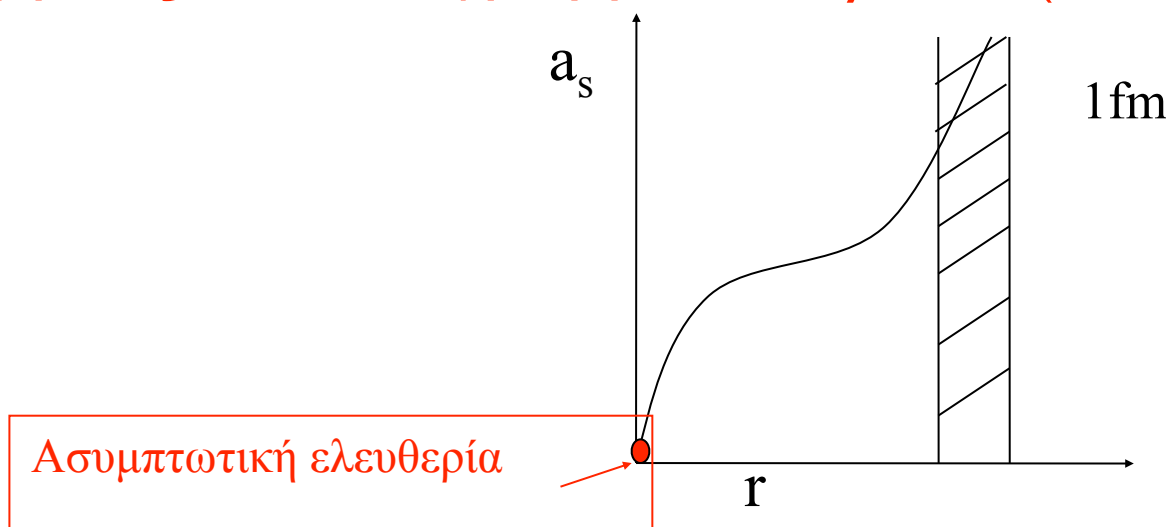
44

## Οι διαδότες των Ισχυρών Αλληλεπιδράσεων



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

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



Πετρίδου Χαρά

Θεσσαλονίκη 10 Ιαν. 2014

# Ισχυρές Αλληλεπιδράσεις (VII)

45

- Η δύναμη μεταξύ δύο κουάρκ είναι ανεξάρτητη του χρώματος

- Το δυναμικό μεταξύ των κουάρκ:

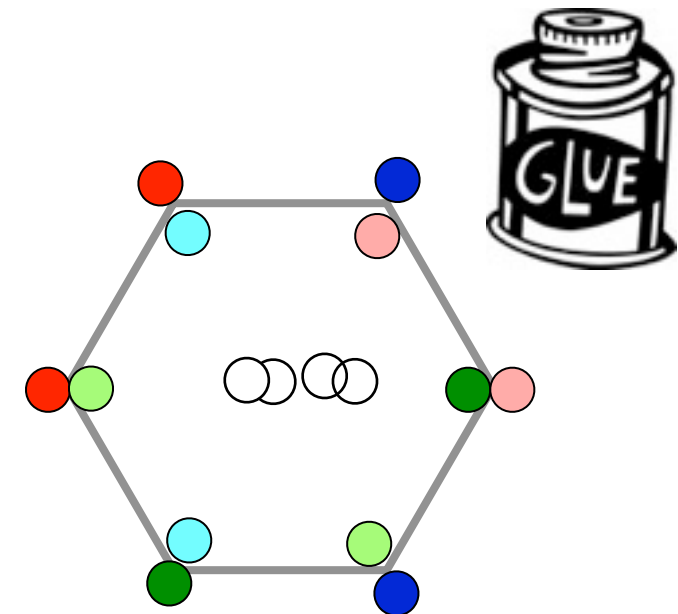
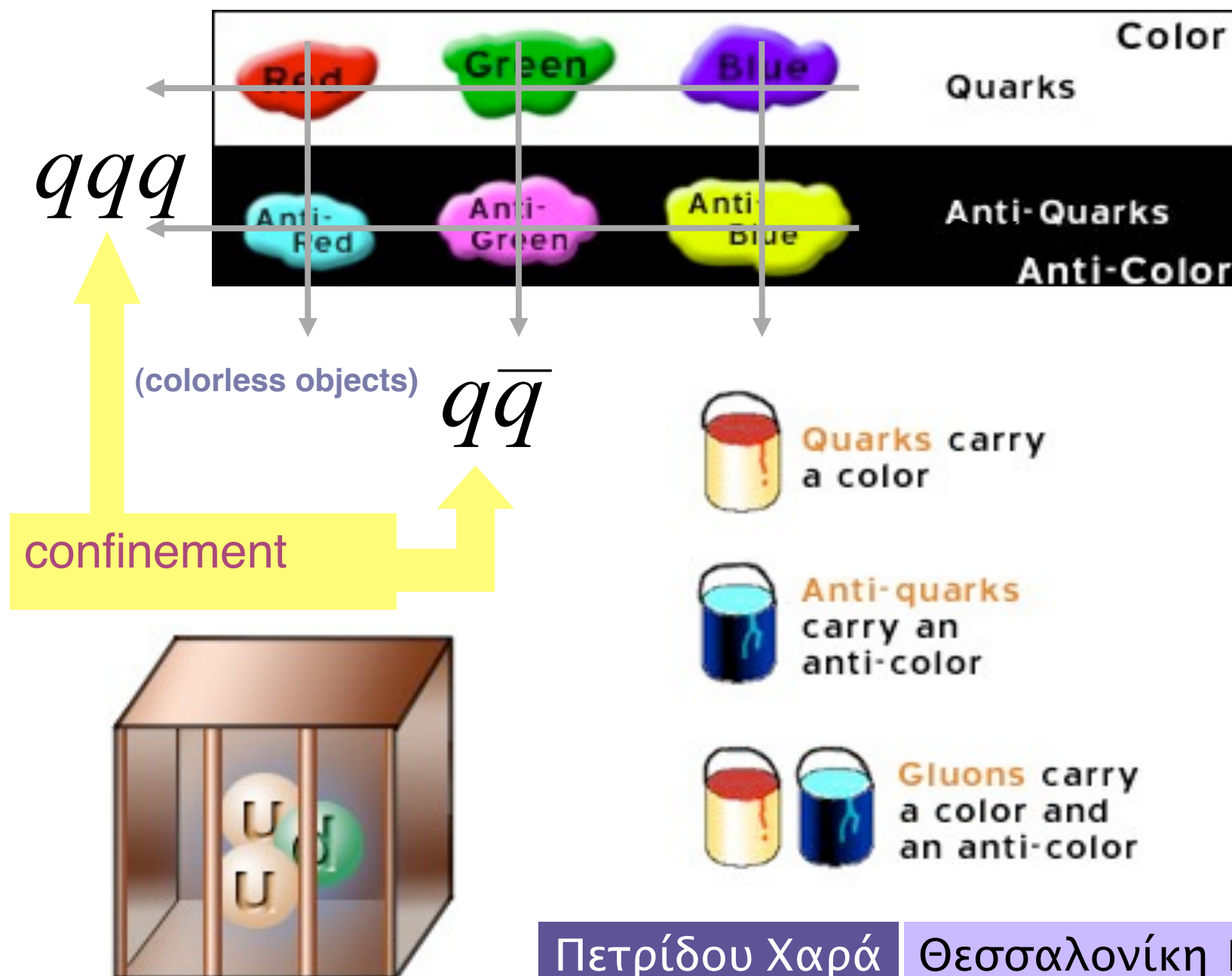
$$V_{\text{strong}}(r) = -\frac{4}{3} \left( \frac{a_s}{r} \right) + kr$$

<= 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



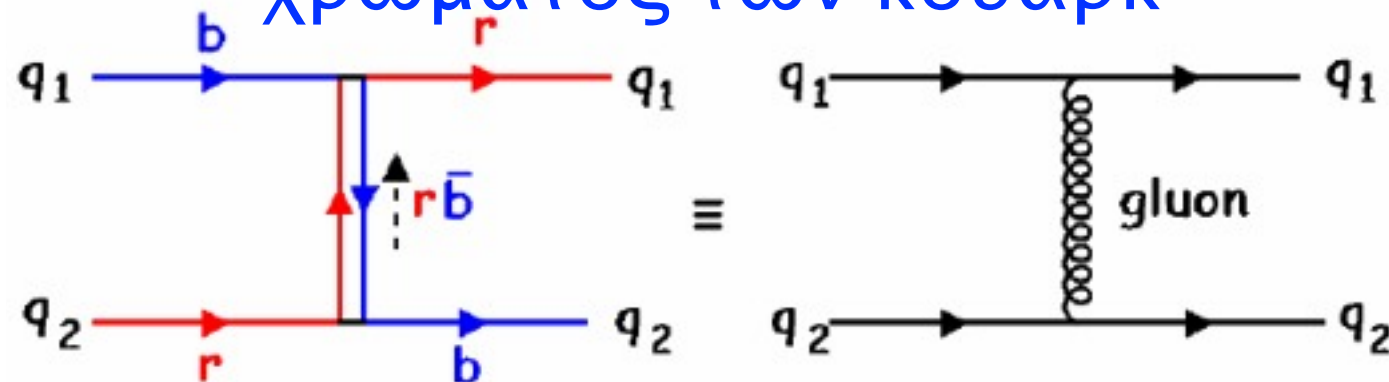
8 Gluons, each with a color and an anti-color charge.

## 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**

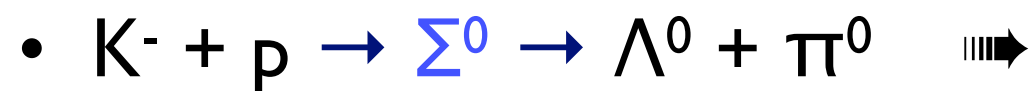
Η ανταλλαγή των γλουονίων μπορεί να συνοδεύεται και από αλλαγή του χρώματος των κουάρκ



# Σταθερά Σύζευξης και Χρόνος ζωής σε μία Αλληλεπίδραση

48

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



$$\tau = \hbar/\Gamma \rightarrow 10^{-23} \text{ sec (Ισχυρή Αλληλεπίδραση)} \quad \Gamma_s \propto \alpha_s^2$$

$$\Sigma^0 \rightarrow \Lambda^0 + \gamma \quad \rightarrow \quad \tau = 10^{-19} \text{ sec} : \Gamma_{em} \propto \alpha^2$$

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

$g_s$  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

49

|                              | Ισχυρή                 | Ασθενής                        | Ηλεκτρο-<br>μαγνητική  | Βαρυτική                           |
|------------------------------|------------------------|--------------------------------|------------------------|------------------------------------|
| Σταθερά<br>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<br>διατομή    | 10 mb                  | 10 pb                          | $10^{-2} \text{ mb}$   |                                    |
| Τυπικός χρόνος<br>ζωής (sec) | $10^{-23} \text{ sec}$ | $10^{-8} \text{ sec}$          | $10^{-20} \text{ sec}$ |                                    |