

Στοιχειώδη Σωματίδια

Διάλεξη 13η
Πετρίδου Χαρά

Τμήμα G3: Χ. Πετρίδου

Αλληλεπιδράσεις & Πεδία
στη
Σωματιδιακή Φυσική

Τα Θεμελιώδη Μποζόνια των αλληλεπιδράσεων

Οι Θεμελιώδεις Αλληλεπιδράσεις

3

BOSONS

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

Unified Electroweak spin = 1

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

Strong (color) spin = 1

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

Τα Θεμελιώδη Μποζόνια των αλληλεπιδράσεων

Οι Θεμελιώδεις Αλληλεπιδράσεις

4

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

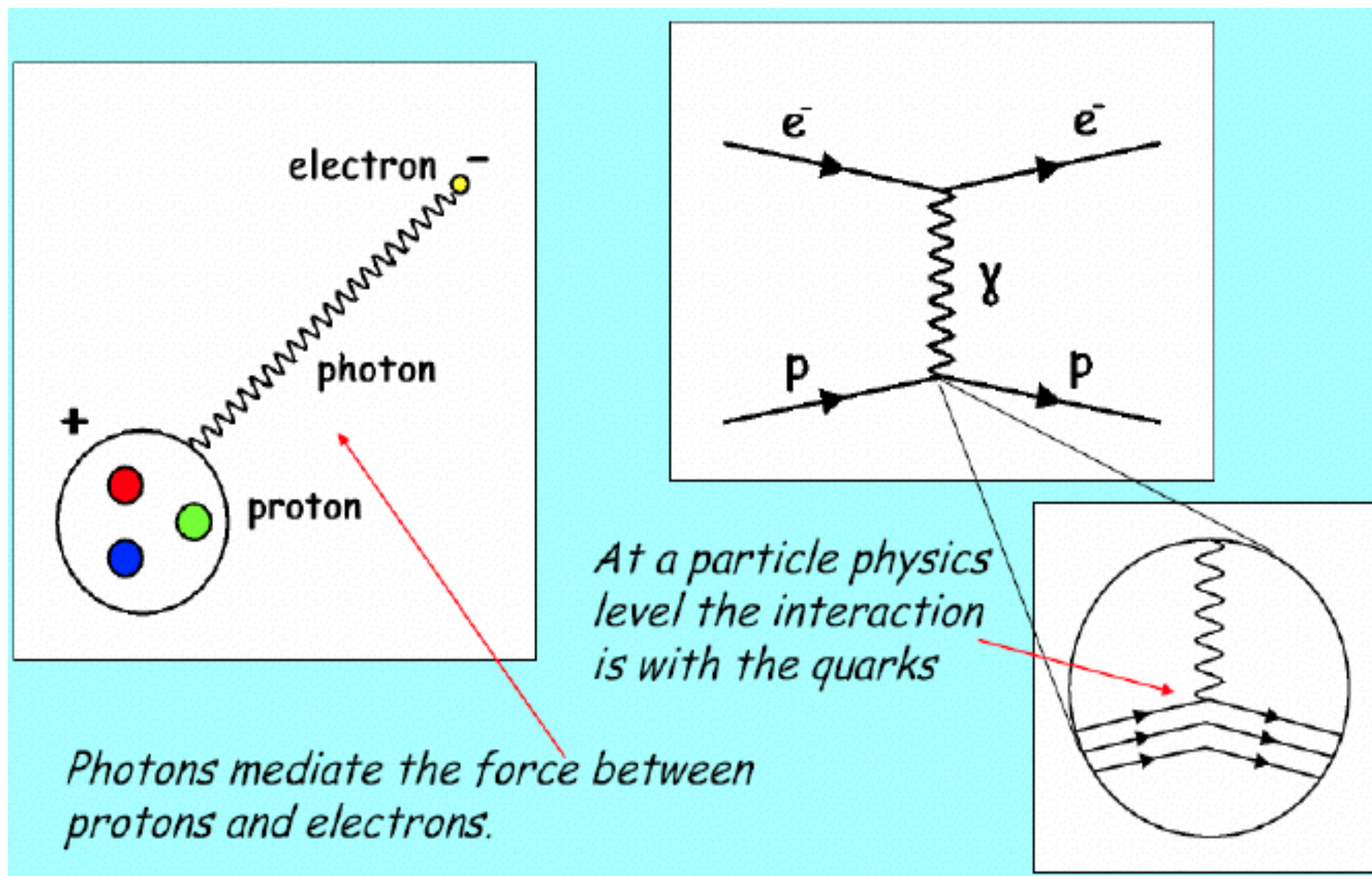
- **Δυνάμεις**

- 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 Λεπτόνια	✓	✓	✗
Ουδέτερα Λεπτόνια	✓	✗	✗

Ηλεκτρομαγνητικές Αλληλεπιδράσεις (I)

6



Η σταθερά σύζευξης α στις ηλεκτρομαγνητικές αλληλεπιδράσεις είναι:

- Μία αδιάστατη ποσότητα που μετράει την ένταση της σύζευξης

$$\alpha = \frac{V_c(r=r_c)}{m_e c^2} = \frac{\frac{e^2}{4\pi\hbar / m_e c}}{m_e c^2} = \frac{e^2}{4\pi\hbar c} \approx \frac{1}{137}$$

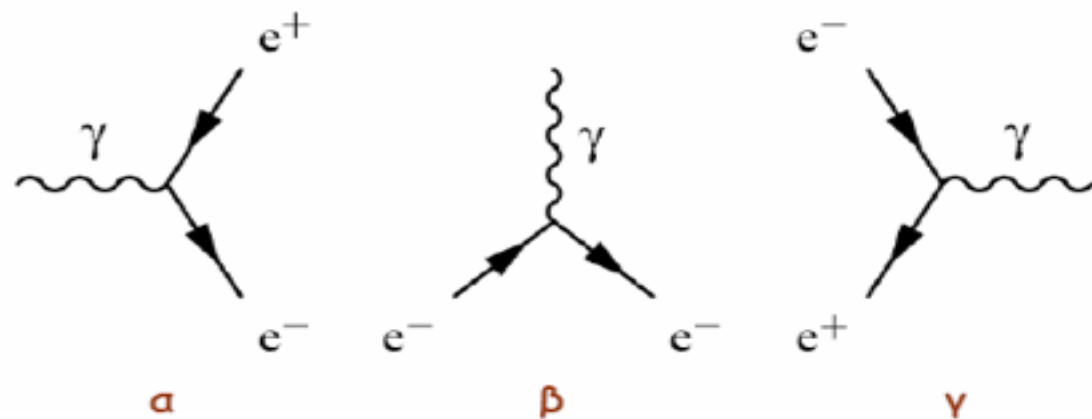
- Παριστάνει τον λόγο της ηλεκτροστατικής ενέργειας απώθησης δύο ηλεκτρονίων σε απόσταση ίση με το μήκος Compton του ηλεκτρονίου προς την ενέργεια που αντιστοιχεί στη μάζα ηρεμίας του ηλεκτρονίου
- Η ποσότητα $\alpha^{1/2} \sim e$ συνδέεται με την πιθανότητα εκπομπής ή απορρόφησης ενός φωτονίου

Ηλεκτρομαγνητικές Αλληλεπιδράσεις (III)

8

Το φωτόνιο συζεύγνυται μόνο με φορτισμένο σωματίδιο

Ηλεκτρομαγνητικές Αλληλεπιδράσεις



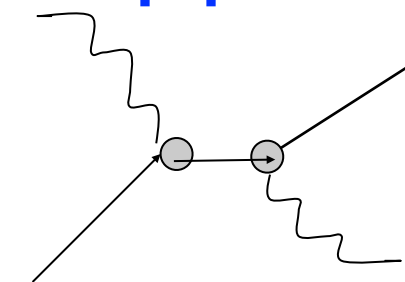
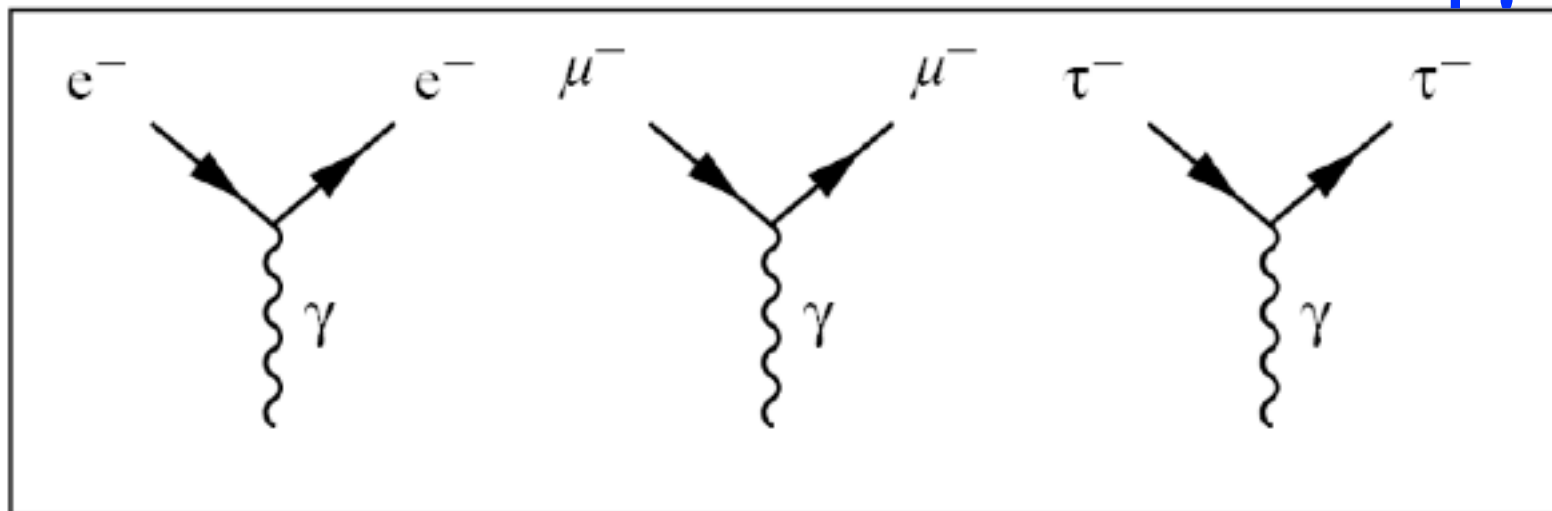
(α) Δίδυμη Γένεση
(β) Φωτοηλεκτρικό φαινόμενο
(γ) Εξαϋλωση ποζιτρονίου

- Η ισχύς της αλληλεπίδρασης μεταξύ φορτισμένων σωματίων και φωτονίων:

$$\alpha = e^2 / 4\pi\hbar c \sim 1/137 \quad (\text{η σταθερά της λεπτής υφής})$$

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

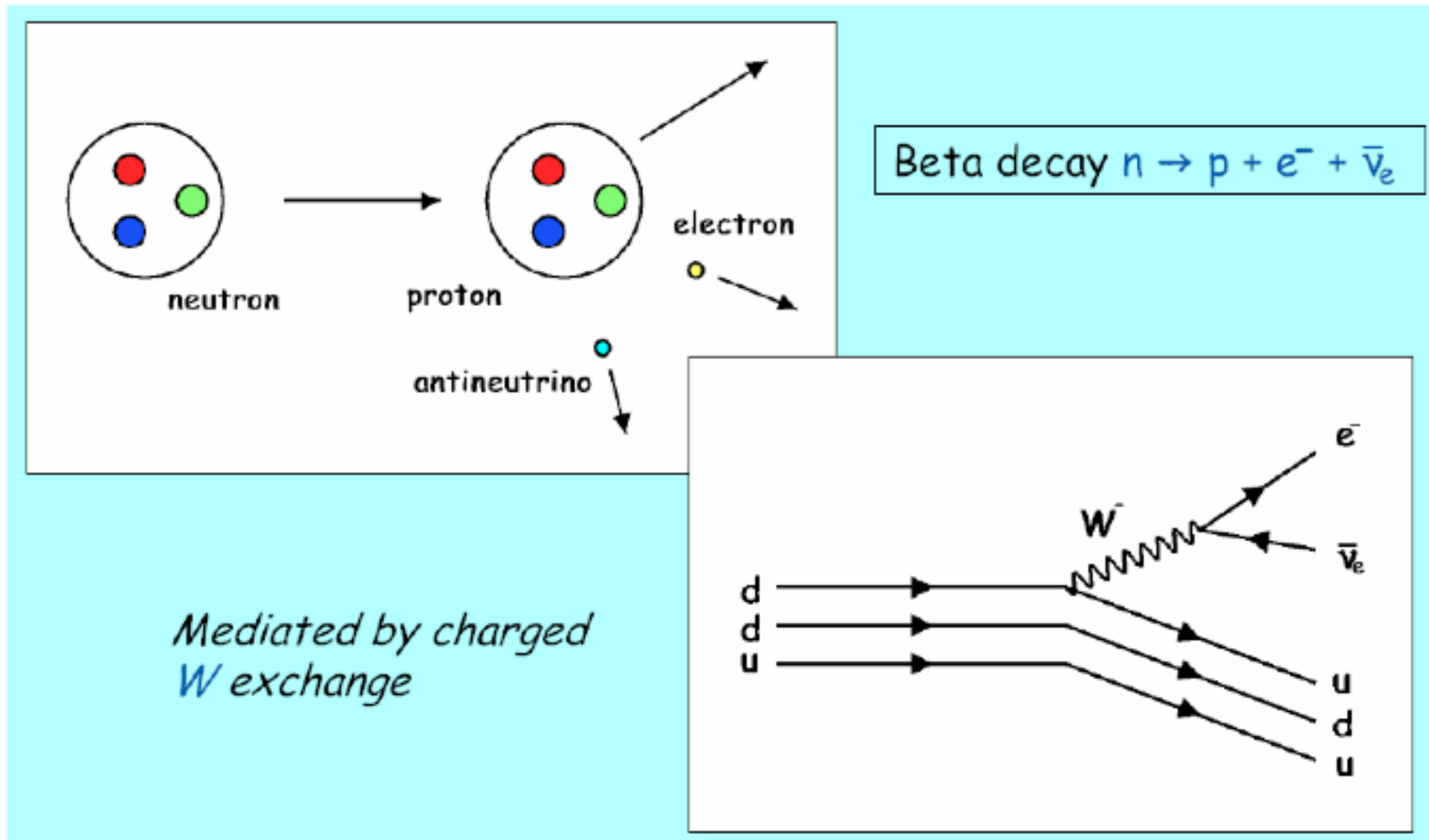
- **Σκέδαση Compton**: το πλάτος της αλληλεπίδρασης είναι $\sim \alpha \Rightarrow$ ενεργός διατομή: $\sim \alpha^2$ (2ης τάξης)



Σκέδαση Compton

Ασθενείς Αλληλεπιδράσεις (I)

9



Ασθενείς Αλληλεπιδράσεις (II)

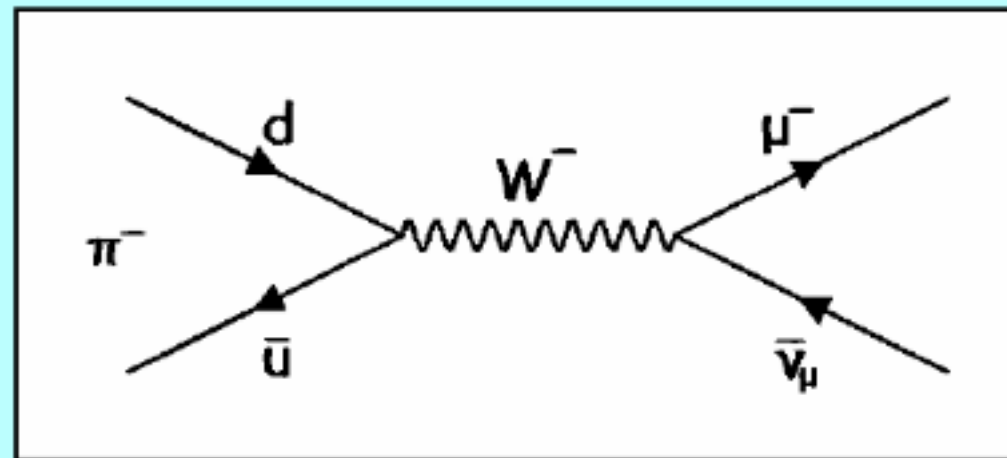
10

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)

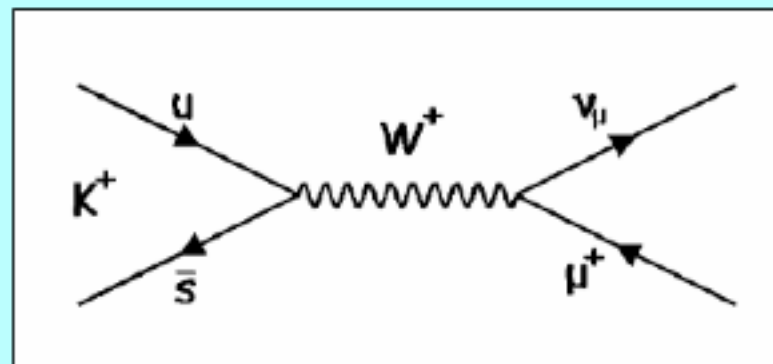


Οι Ασθενείς Αλληλεπιδράσεις αλλάζουν τις γεύσεις των κουάρκ και τον τύπο των λεπτονίων αλλά μέσα στην ίδια οικογένεια !

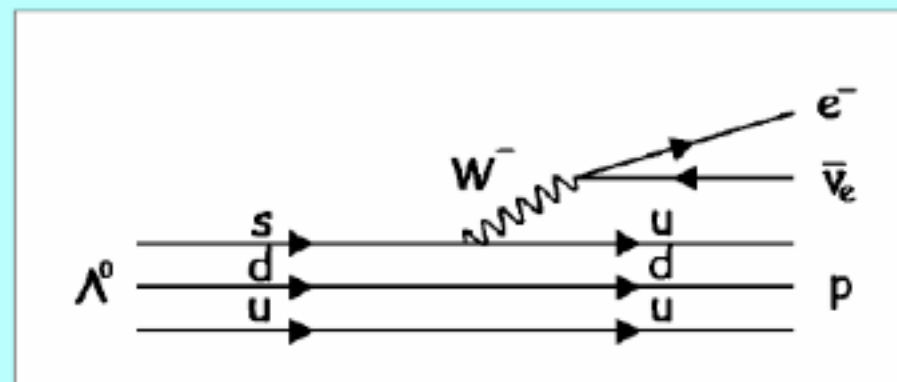
Παράδειγμα διάσπασης με αλλαγή της παραδοξότητας

$\Delta S = 1$ (Strangeness changes)

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



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

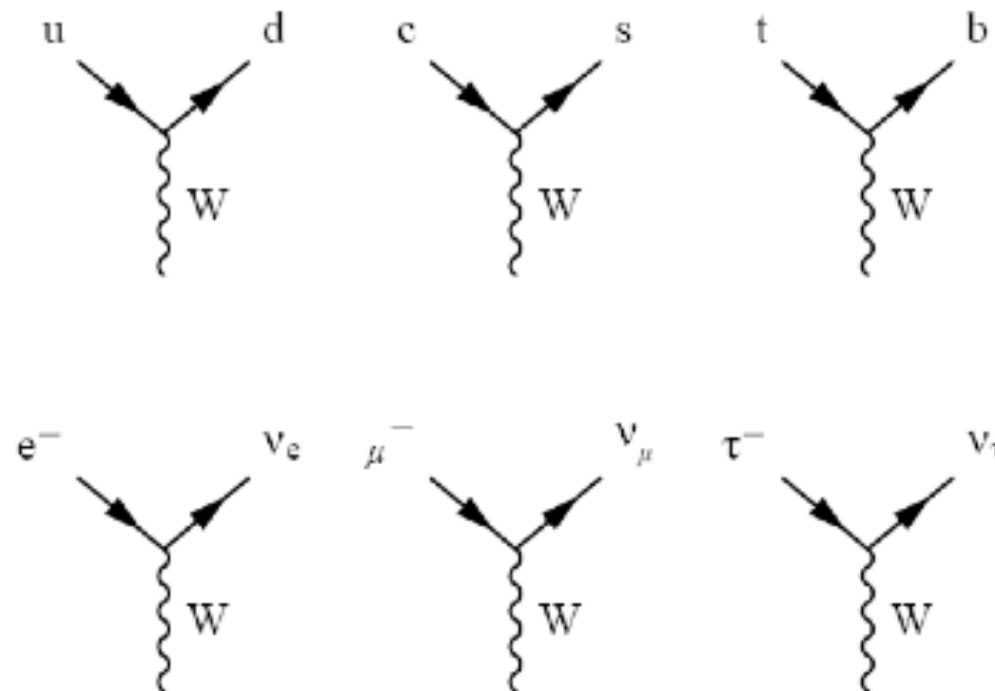


Ασθενείς Αλληλεπιδράσεις (IV)

12

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

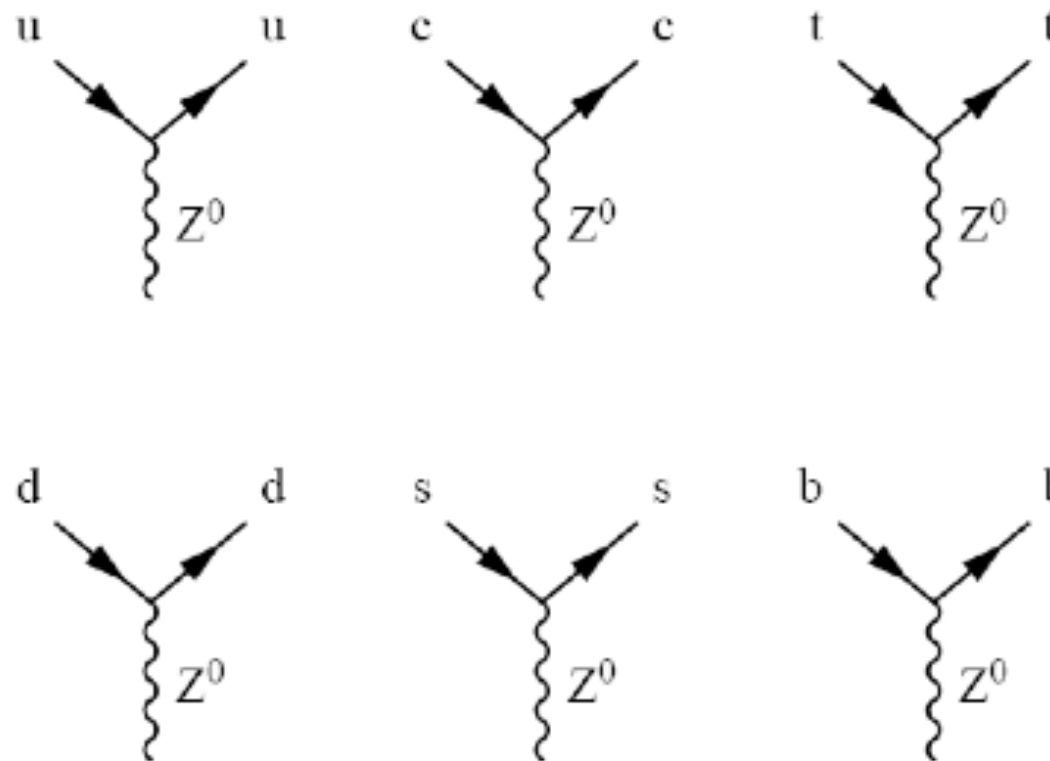


Ασθενείς Αλληλεπιδράσεις (V)

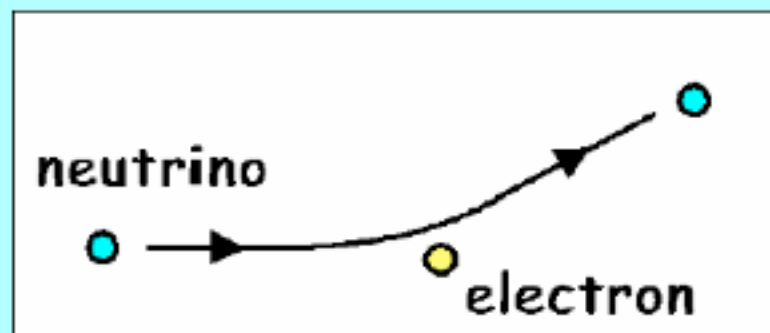
13

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

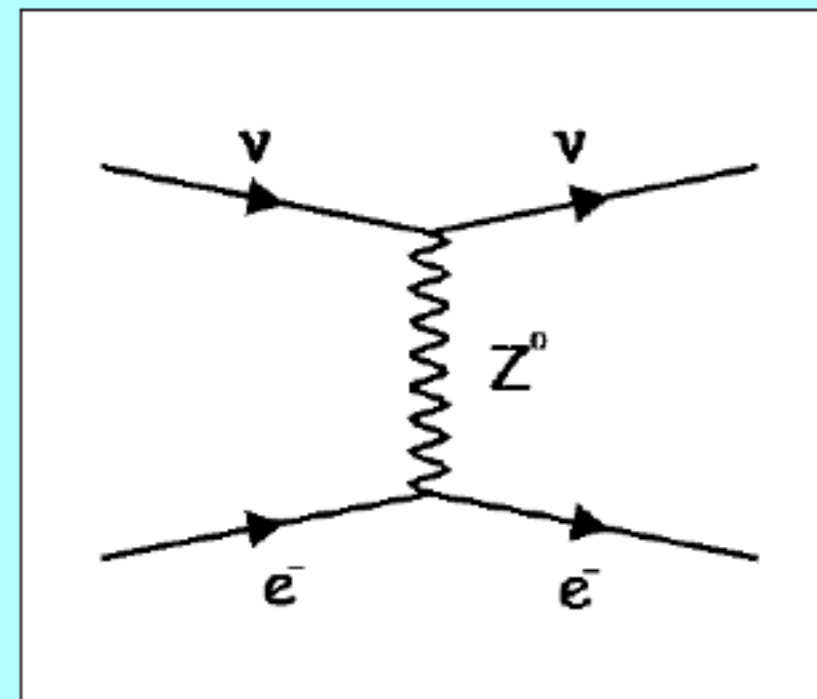


Παράδειγμα σκέδασης νετρίνο



*Mediated by neutral
 Z exchange*

Neutrino scattering
off an electron

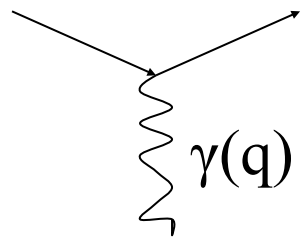


Ασθενείς Αλληλεπιδράσεις (VII)

15

Ηλεκτρομαγνητικές Δυνάμεις

- κόμβος (διάγραμμα Feynman)

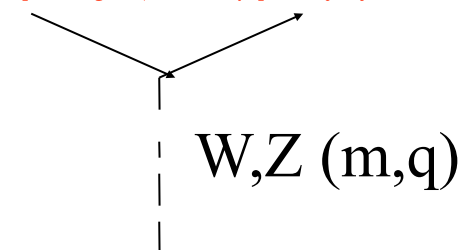


- Σταθερά Σύζευξης

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

Ασθενείς Δυνάμεις

- κόμβος (διάγραμμα Feynman)



- Σταθερά Σύζευξης

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

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

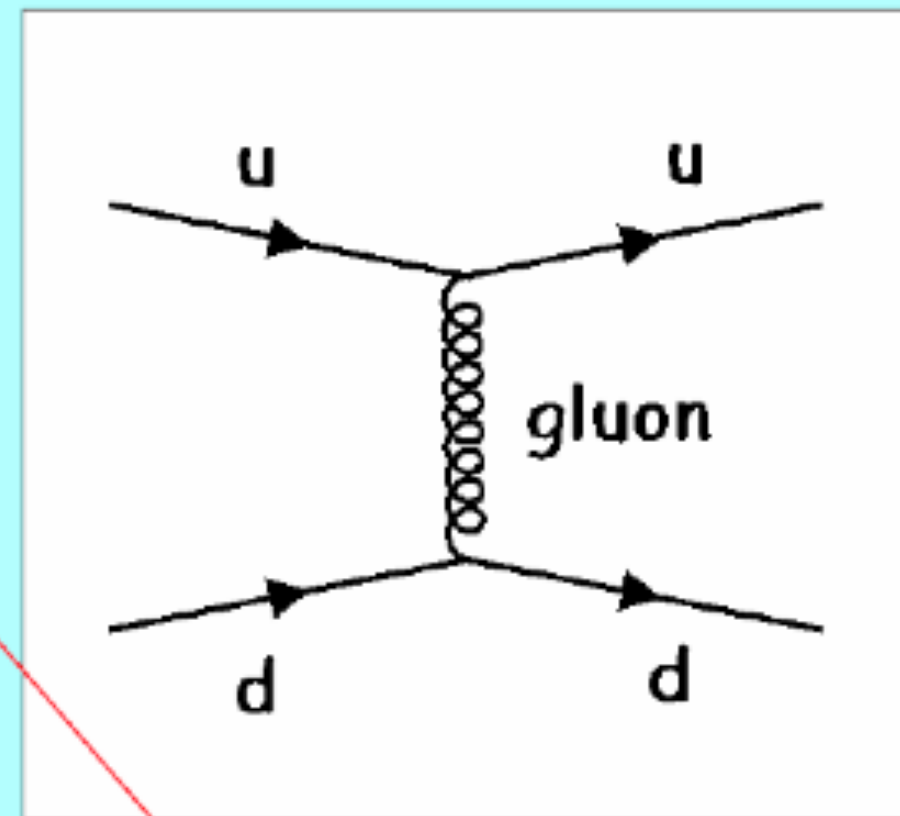
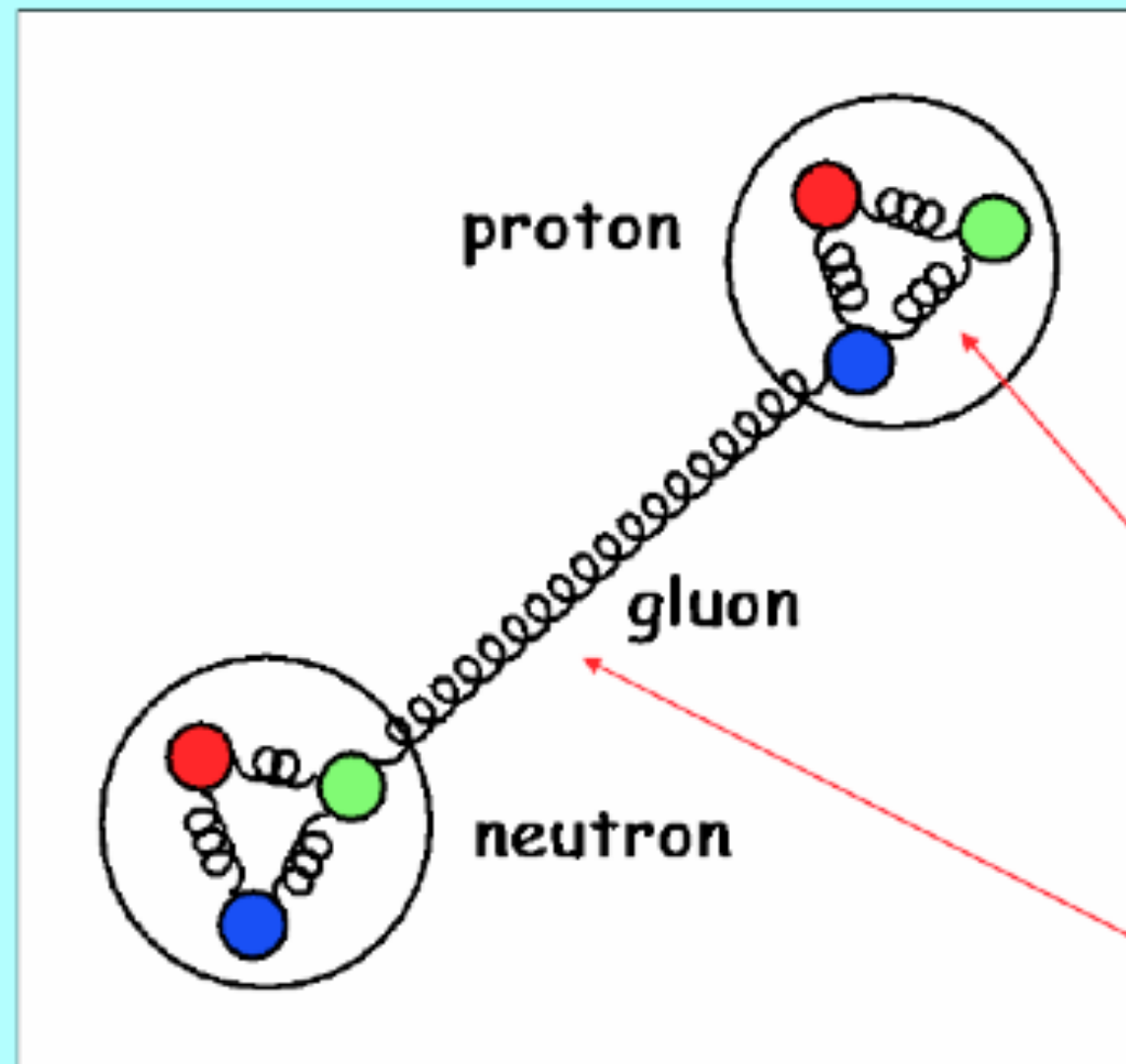
Για $q^2 \rightarrow 0$

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

$$g = e$$

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

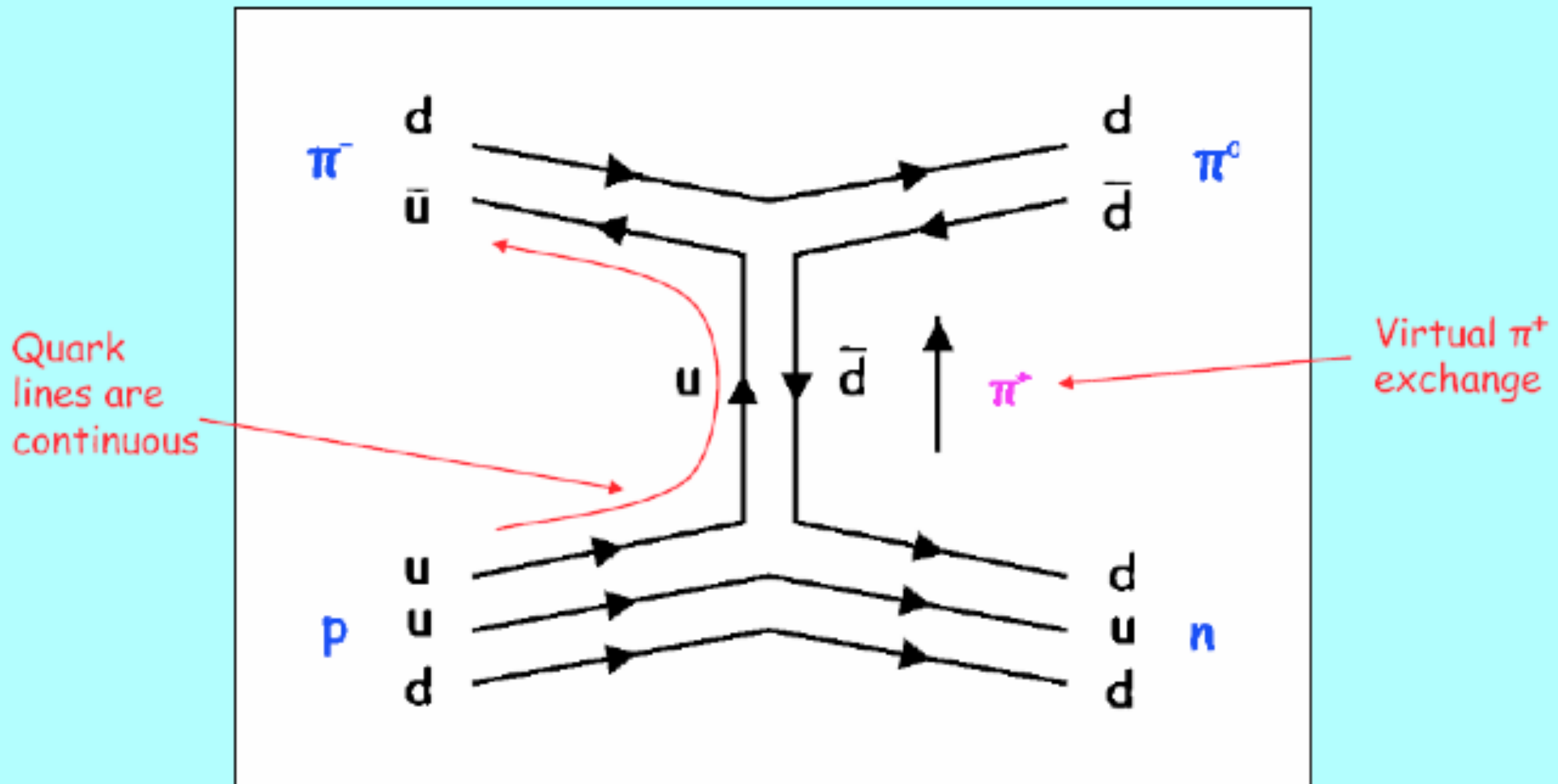
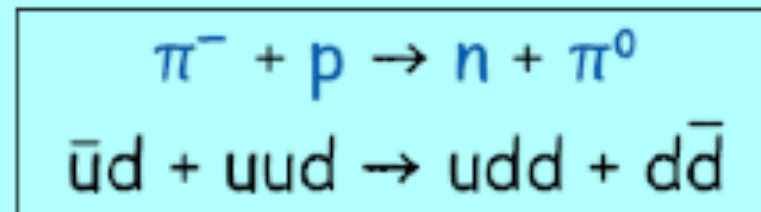




Gluons hold the proton and neutron together and are responsible for the Strong force between them.

Ισχυρές Αλληλεπιδράσεις (II)

17

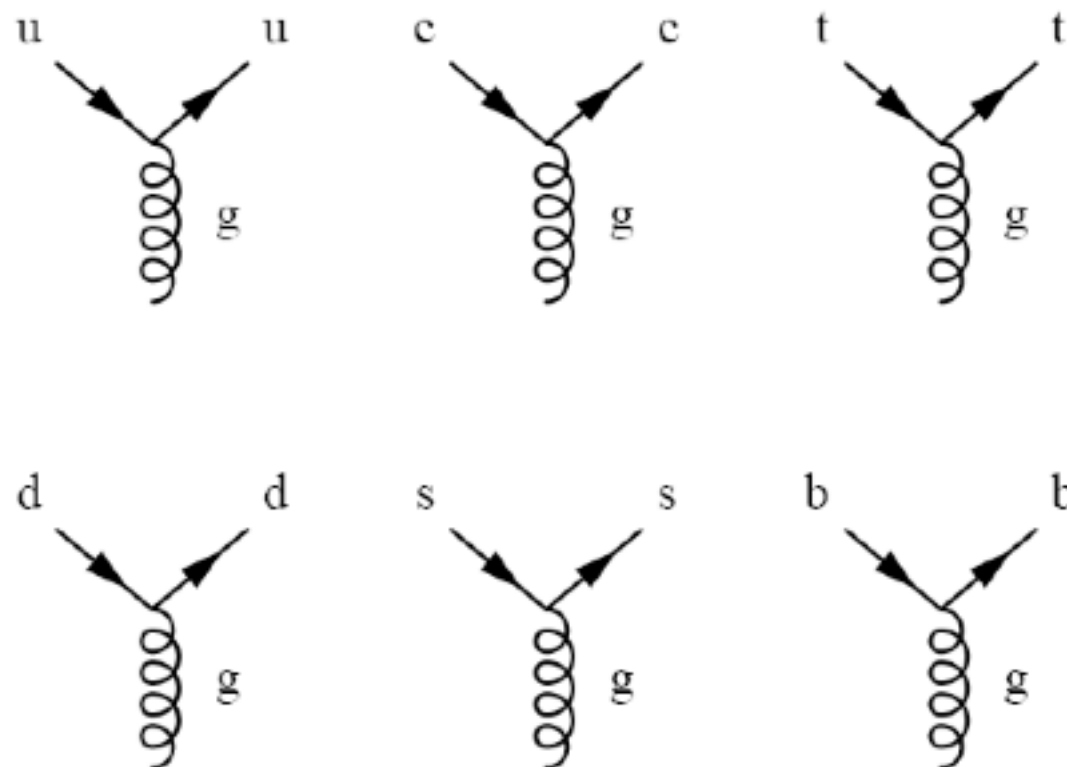


Ισχυρές Αλληλεπιδράσεις (III)

18

Οι Ισχυρές Αλληλεπιδράσεις ΔEN αλλάζουν τις γεύσεις των κουάρκ

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



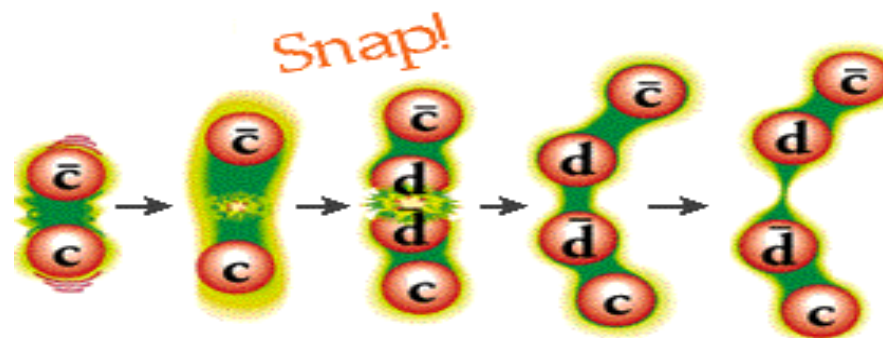
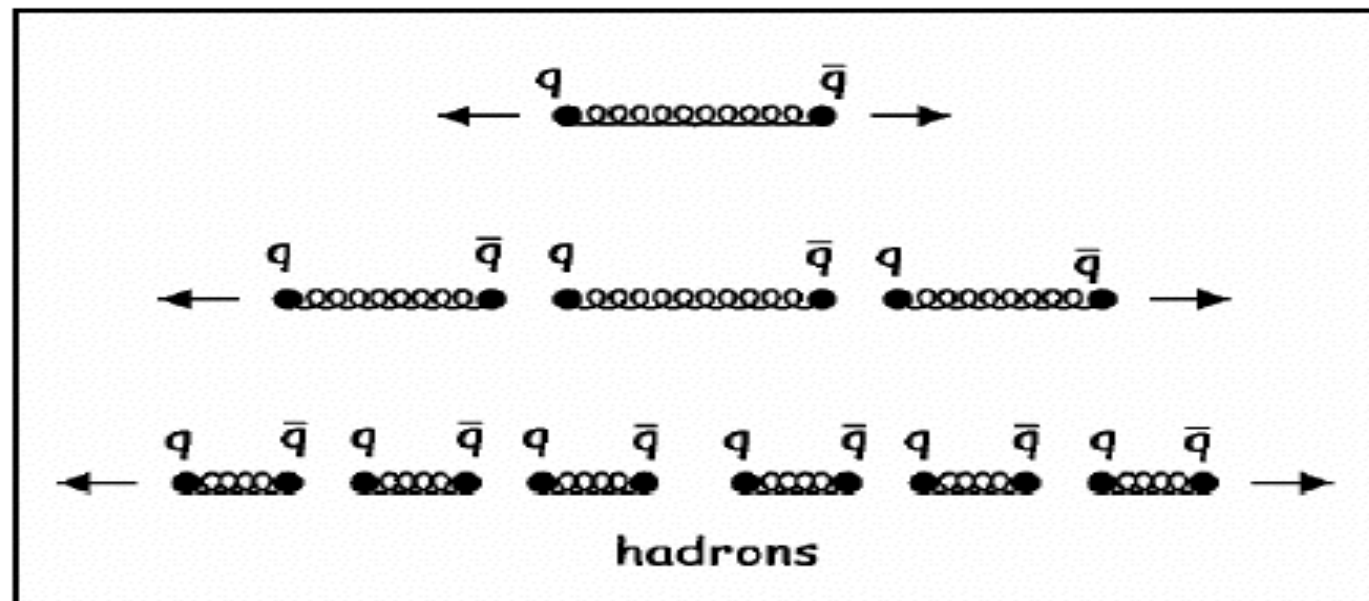
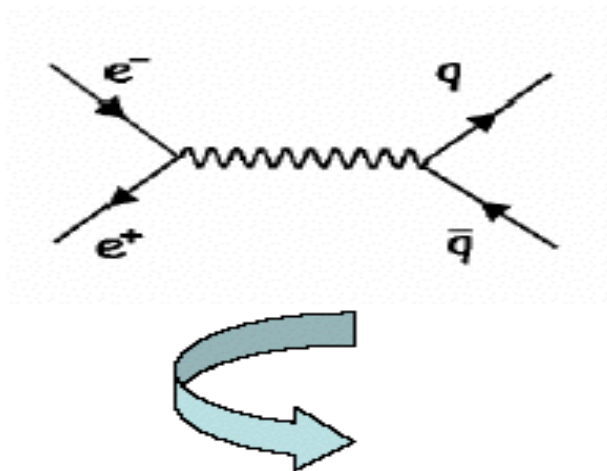
Ισχυρές Αλληλεπιδράσεις (IV)

19

Χαρακτηριστικό των ισχυρών αλληλεπιδράσεων είναι ο
“εγκλωβισμός” των κουάρκ

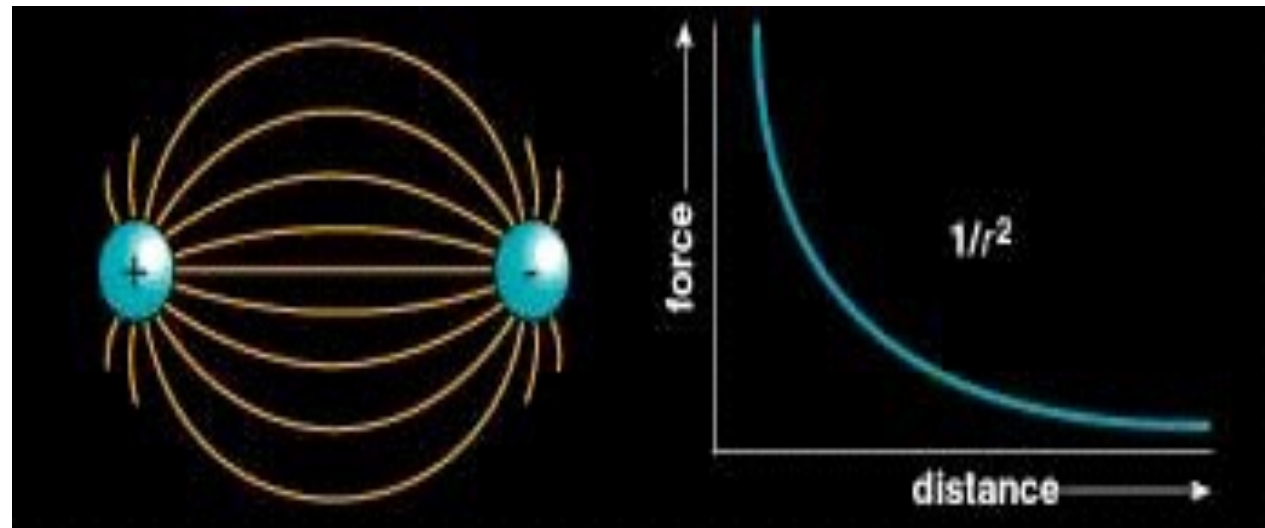
Όσο τα απομακρύνουμε η δυναμική τους ενέργεια αυξάνει τόσο ώστε
αντί να τα διαχωρίσουμε δημιουργούμε νέο ζεύγος quark-antiquark

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



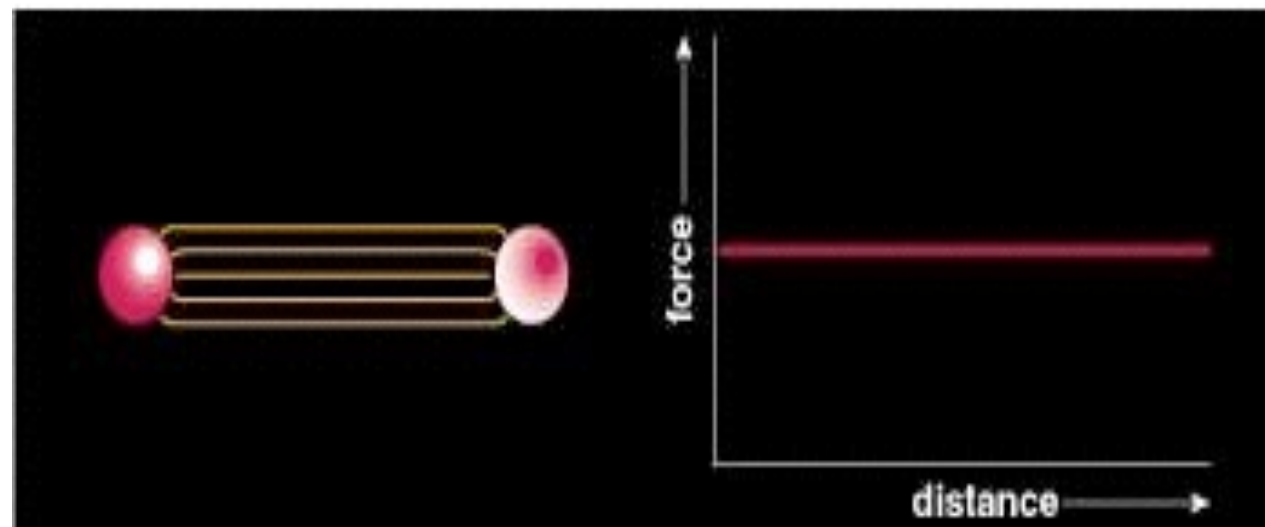
QED vs QCD

Dipole



- 1 electric charge
- γ carries no charge

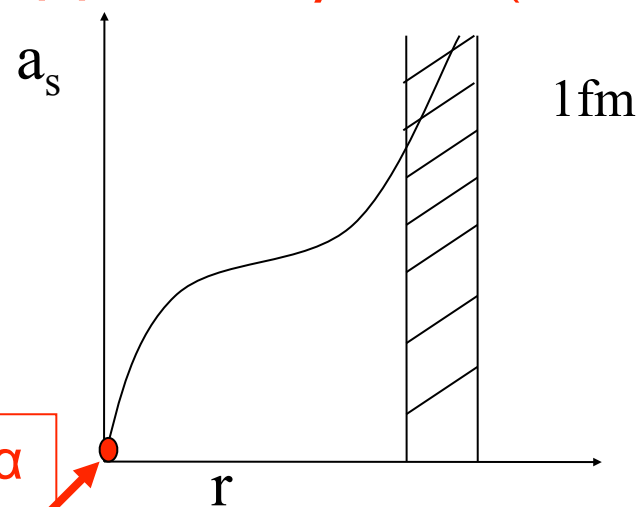
Flux Tube



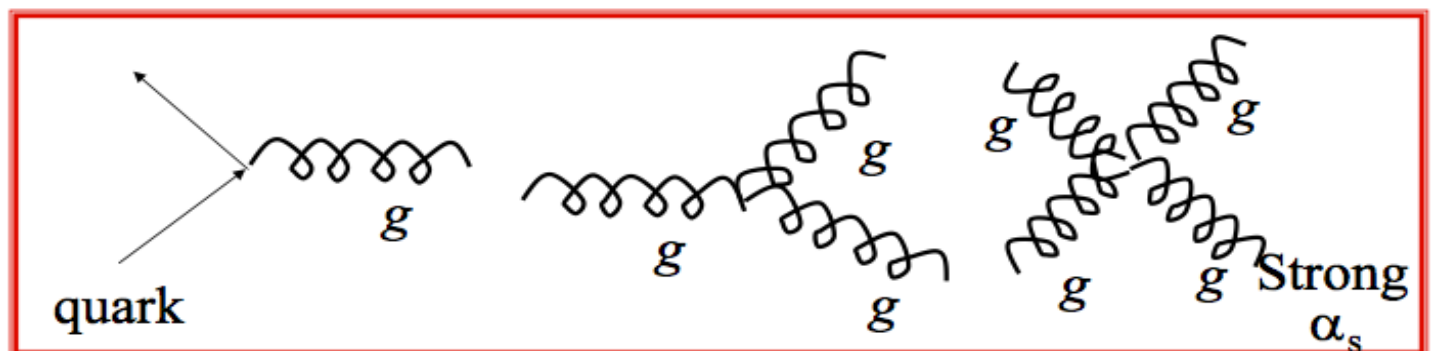
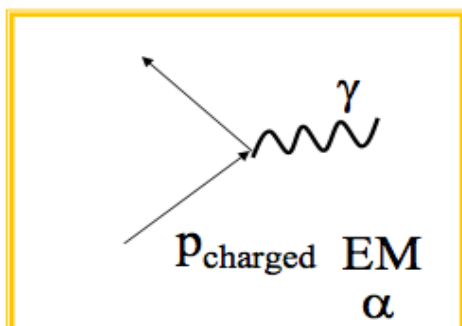
- 3 Color charges
- g carry charge

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)



Ασυμπτωτική ελευθερία



Ισχυρές Αλληλεπιδράσεις (VII)

22

- Η δύναμη μεταξύ δύο κουάρκ είναι ανεξάρτητη του χρώματος

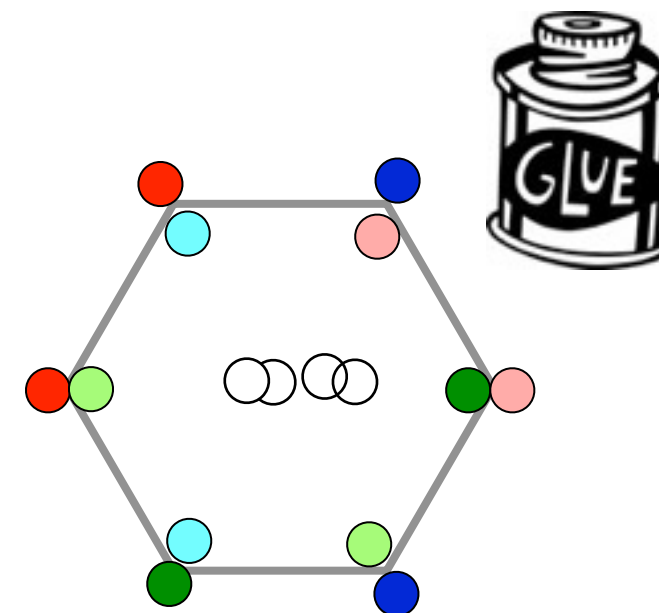
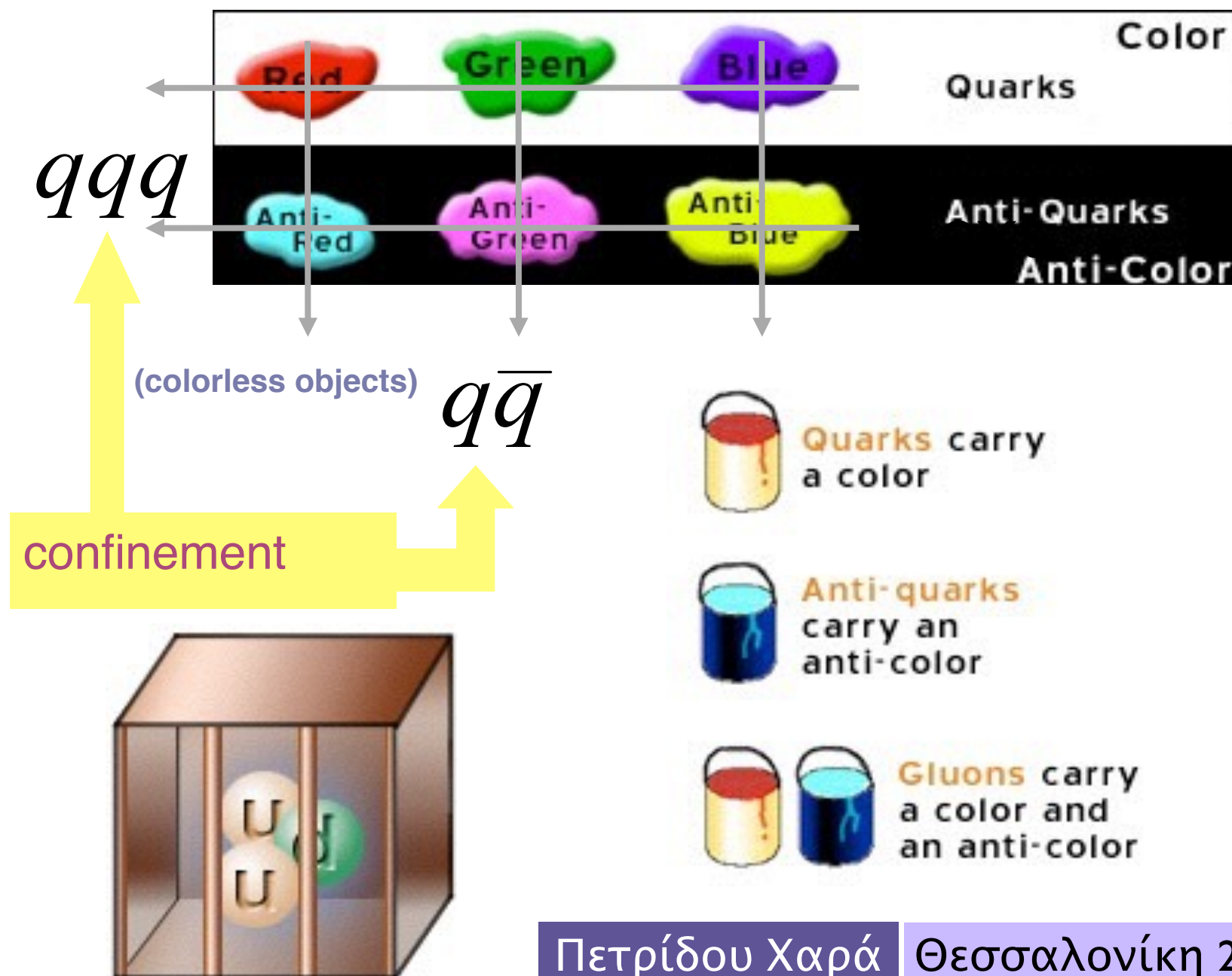
- Το δυναμικό μεταξύ των κουάρκ:

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

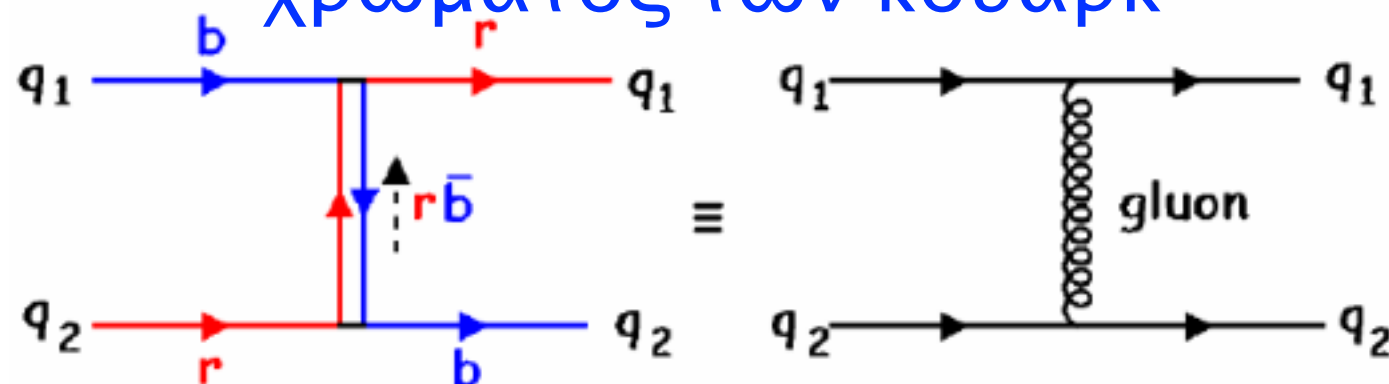


Οι διαδότες των Ισχυρών Αλληλεπιδράσεων

- 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**

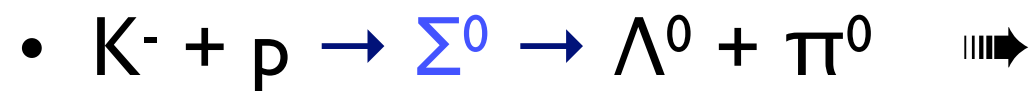
Η ανταλλαγή των γλουονίων
συνοδεύεται και από αλλαγή του
χρώματος των κουάρκ



Σταθερά Σύζευξης και Χρόνος ζωής σε μία Αλληλεπίδραση

25

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



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

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

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

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

26

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