

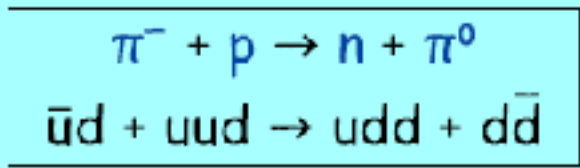
ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΠΥΡΗΝΙΚΗ ΦΥΣΙΚΗ & ΤΑ ΣΤΟΙΧΕΙΩΔΗ ΣΩΜΑΤΙΑ

Κ. Βελλίδης & Θ. Μερτζιμέκης
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ, 2022

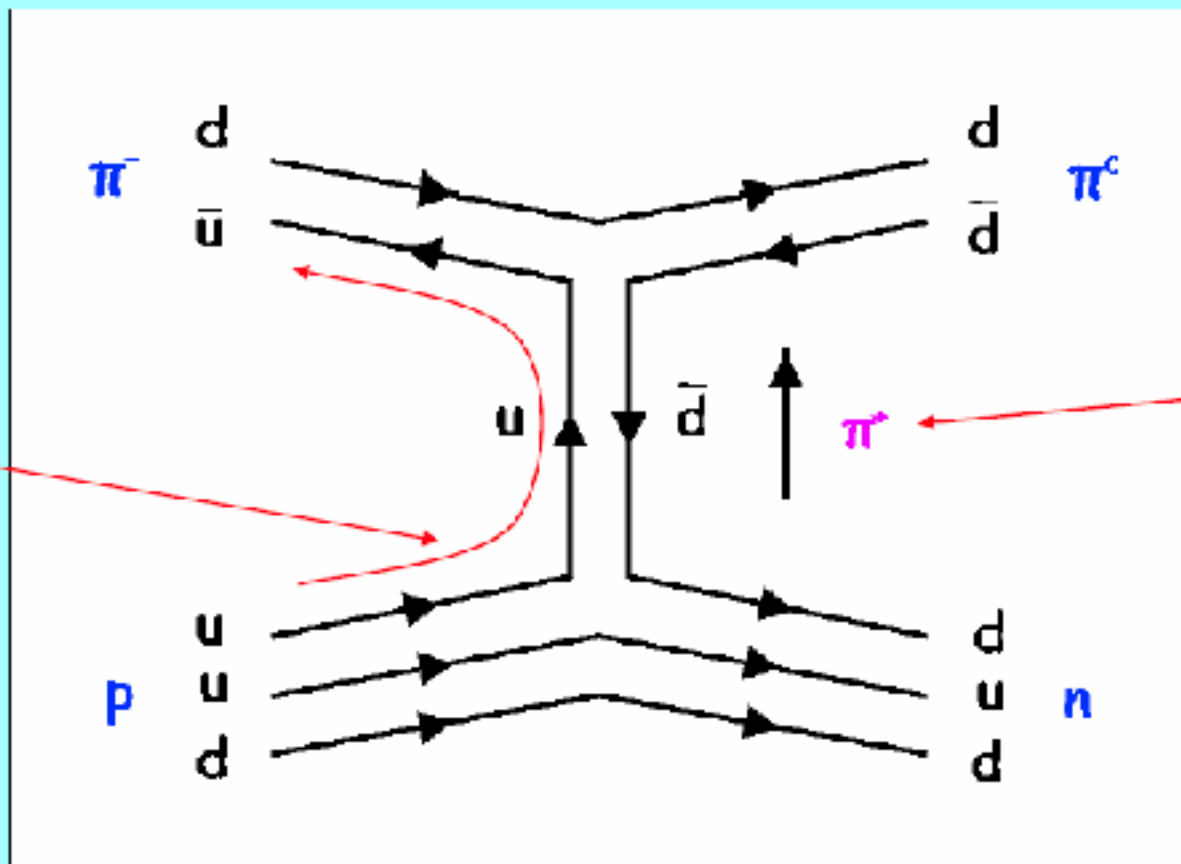
- Ισχυρές Αλληλεπιδράσεις
- Γλουόνια και Χρώμα
- Κβαντική Χρωμοδυναμική

Διαγράμματα Φeynman

Ισχυρές Αλληλεπιδράσεις



Quark lines are continuous



Virtual π^+ exchange

Διαγράμματα Feynman

Ισχυρές Αλληλεπιδράσεις

Για τις ισχυρές αλληλεπιδράσεις ισχύει:

$$\frac{a_s}{a} \approx 100 \Rightarrow a_s = \frac{g_s^2}{4\pi} \approx 1$$

Η μορφή του δυναμικού μεταξύ δύο κουάρκ που χρησιμοποιείται συνηθέστερα είναι:

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

- Πειραματική μαρτυρία και για τους δύο όρους.
- Εγκλωβισμός των κουάρκ σε μεγάλα r !

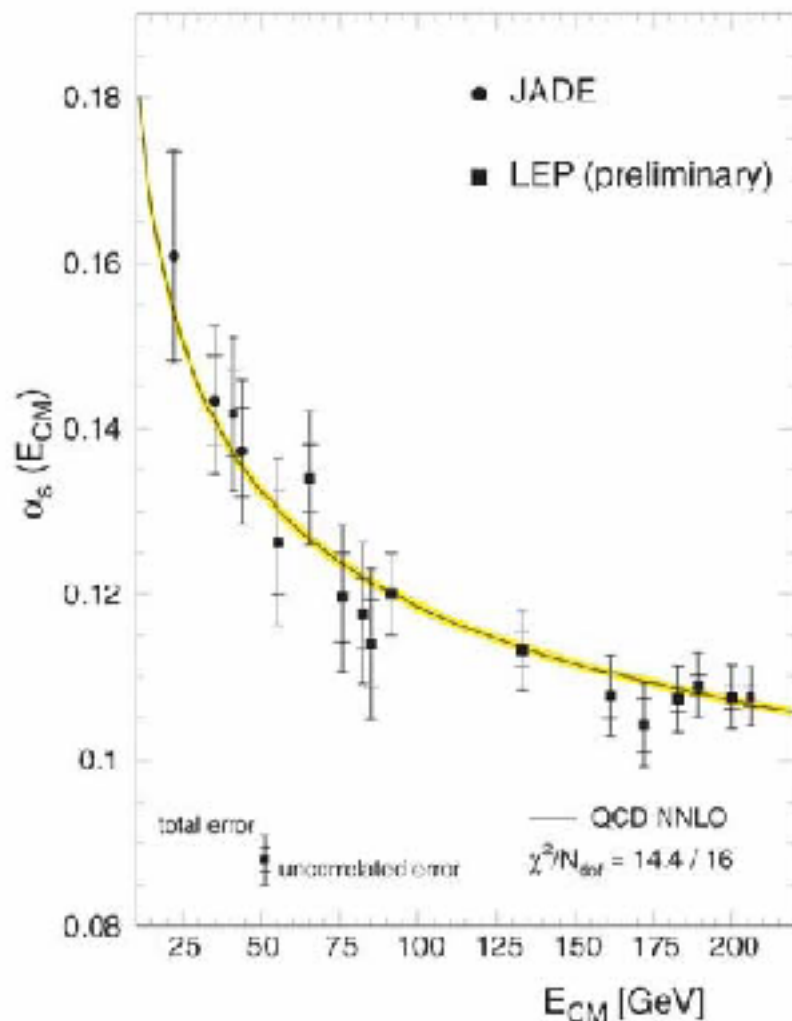
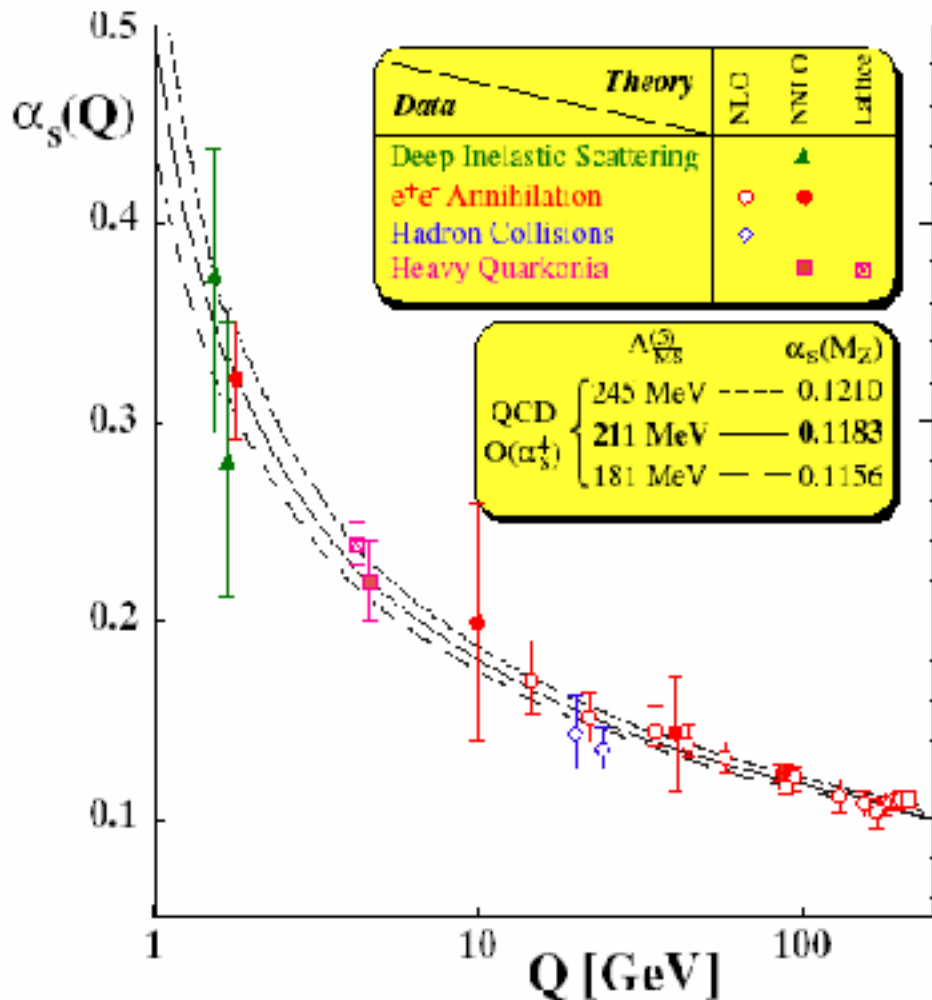
Φαινόμενο Δέσμευσης ή Εγκλωβισμού

- Τα κουάρκς δεν παρατηρούνται ελεύθερα
- Ούτε τα γλουόνια
- Τους αποδίδουμε φορτία ισχυρής αλληλεπίδρασης που τα λέμε «χρώματα»
- Κανένα σωματίο με «χρώμα» δεν ανιχνεύεται → «εγκλωβισμός»

Αναλογία με ηλεκτρικά ουδέτερα σωματία

Ασυμπτωτική Ελευθερία

[Frank Wilczek](#), [David Gross](#), & [David Politzer](#) 2004 Nobel Prize



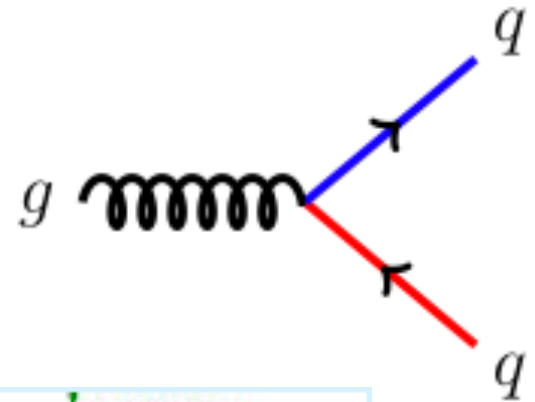
Η ισχυρή αλληλεπίδραση εξασθενεί, σε μεγάλες ορμές.

ΚΧΔ: Κουάρκς & Γλουόνια

Στην φύση παρατηρούνται μόνο άχρωμες «οντότητες».

Ισχυρά αλληλεπιδρούν σωμάτια που είναι χρωματισμένα δηλ. έχουν «χρώμα»:

- Μεσόνια ($q\bar{q}$)
- Βαρυόνια (qqq)



Τα κουάρκς που συμμετέχουν στην κορυφή ισχυρής αλληλεπίδρασης μπορούν να έχουν οποιαδήποτε γεύση, αλλά και τα δύο πρέπει να έχουν την ίδια: Η ΚΧΔ είναι αδιάφορη στην γεύση. (Συγκρίνετε με την ασθενή αλληλεπίδραση!)

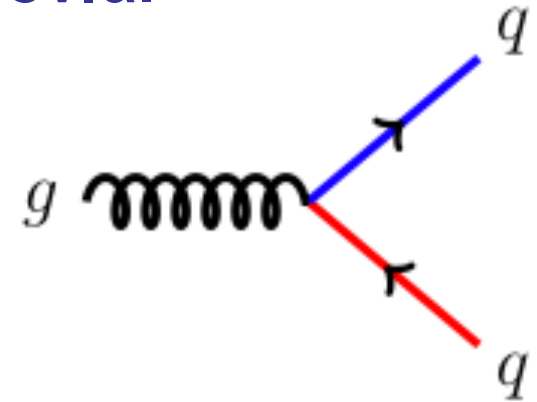
Αλλάζουν Χρώμα – δεν αλλάζουν γεύση!

Κβαντική Χρωμοδυναμική (ΚΧΔ): Κουάρκς & Γλουόνια

Η ισχυρή αλληλεπίδραση διαδίδεται με **γλουόνια**.

Ισχυρά αλληλεπιδρούν σωμάτια που είναι χρωματισμένα δηλ. έχουν «**χρώμα**»:

- Τα κουάρκς
- Τα γλουόνια

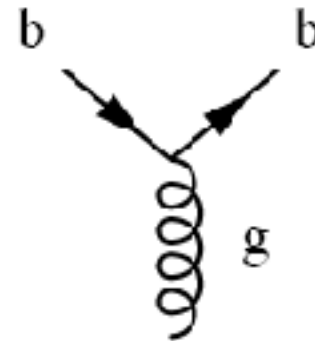
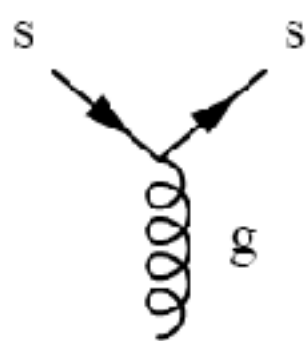
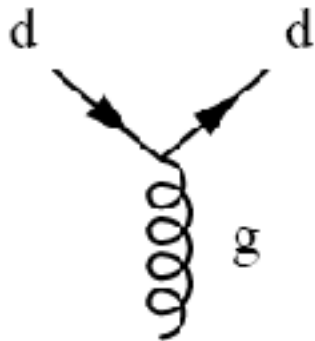
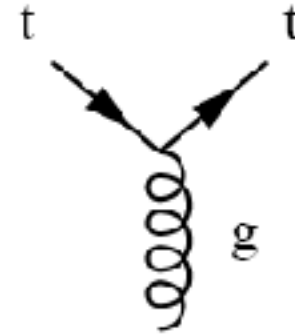
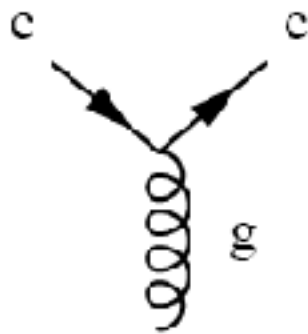
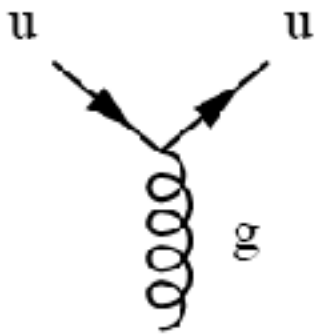


Τα κουάρκς που συμμετέχουν στην κορυφή ισχυρής αλληλεπίδρασης μπορούν να έχουν οποιαδήποτε γεύση, αλλά και τα δύο πρέπει να έχουν την ίδια: Η ΚΧΔ είναι αδιάφορη στην γεύση. (Συγκρίνετε με την ασθενή αλληλεπίδραση!)

Αλλάζουν Χρώμα – δεν αλλάζουν γεύση!

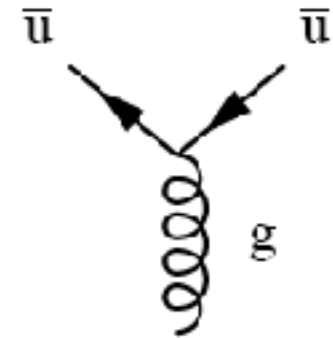
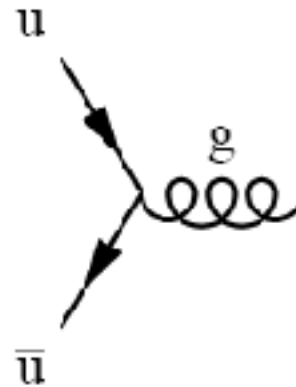
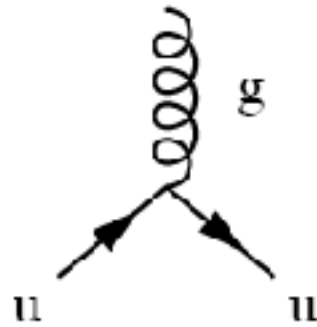
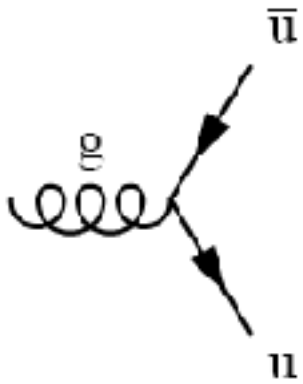
Διαγράμματα Φeynman

Ισχυρές Αλληλεπιδράσεις



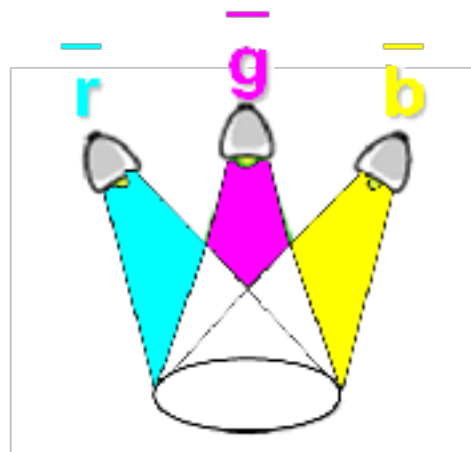
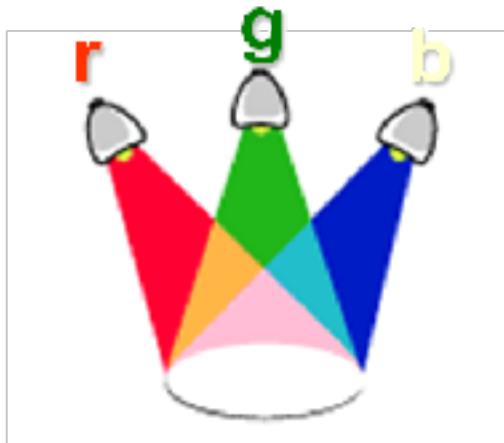
Διαγράμματα Φeynman

Ισχυρές Αλληλεπιδράσεις



Περί Χρωμάτων

- ▶ “Χρώμα”: ιδιότητα, X , που περιγράφεται ως γραμμικός συνδυασμός τριών βασικών καταστάσεων
 - κόκκινο r (red) — πράσινο g (green) — γαλάζιο b (blue)
- ▶ Σε κάθε βασικό χρώμα αντιστοιχεί το συμπληρωματικό του χρώμα με την εξής ιδιότητα:
 - βασικό + συμπληρωματικό = λευκό (ουδέτερο)
 - ♦ κόκκινο — κυανό
 - ♦ πράσινο — πορφυρό
 - ♦ γαλάζιο — κίτρινο








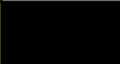


Περί Χρωμάτων

- ▶ Υπάρχουν κατ' αναλογία τρία είδη φορτίου στα κουάρκ
 - κόκκινο r (red) — πράσινο g (green) — γαλάζιο b (blue)
- ▶ Κάθε κουάρκ έχει υποχρεωτικά ένα από αυτά τα τρία αυτά φορτία (χρώματα)
- ▶ Σε κάθε φορτίο αντιστοιχεί ένα αντιφορτίο (συμπληρωματικό χρώμα)
- ▶ Συνύπαρξη και των τριών χρωμάτων (ή και των τριών αντιχρωμάτων) δίνει λευκό:
 - $r + g + b = \text{λευκό}$ ($\bar{r} + \bar{g} + \bar{b} = \text{λευκό}$)
- ▶ Στα βαρυόνια τα τρία κουάρκ έχουν διαφορετικό χρώμα
- ▶ Στα μεσόνια το αντικουάρκ έχει το συμπληρωματικό χρώμα του κουάρκ που το συνοδεύει
- ▶ Όλα τα αδρόνια είναι άχρωμα!

Ισχυρές Αλληλεπιδράσεις

- Ο κβαντικός αριθμός του χρώματος

		red	green	blue	
Red		1	0	0	
Green		0	1	0	
Blue		0	0	1	
Cyan		0	1	1	= anti-red \bar{r}
Magenta		1	0	1	= anti-green \bar{g}
Yellow		1	1	0	= anti-blue \bar{b}
White		1	1	1	
Black		0	0	0	

Ο κβαντικός αριθμός του χρώματος

• Βαρυόνια: $r + g + b = 111 = \text{λευκό}$

• Μεσόνια: $r + \bar{r} = 111 = \text{λευκό}$ (ή $g + \bar{g}, b + \bar{b}$)

• Παραδείγματα:

– Πρωτόνιο, Νετρόνιο

$$p = (u_r \ u_g \ d_b) \quad n = (u_r \ d_g \ d_b)$$

– Μεσόνιο π^+ :

$$\pi^+ = (u_r \ \bar{d}_r)$$

– Ωμέγα:

$$\Omega^- = (s_r \ s_g \ s_b)$$

Ο κβαντικός αριθμός του χρώματος

- Τα βαρυόνια αποτελούνται από τρία κουάρκ, είναι μια χρωματικά μοναχική κατάσταση (color singlet state), άχρωμη, η οποία περιγράφεται από την έκφραση:

$$\frac{1}{\sqrt{6}} (r_1 g_2 b_3 - r_1 b_2 g_3 + b_1 r_2 g_3 - b_1 g_2 r_3 + g_1 b_2 r_3 - g_1 r_2 b_3)$$

– Αντισυμμετρική ως προς την εναλλαγή δύο οποιωνδήποτε κουάρκ!

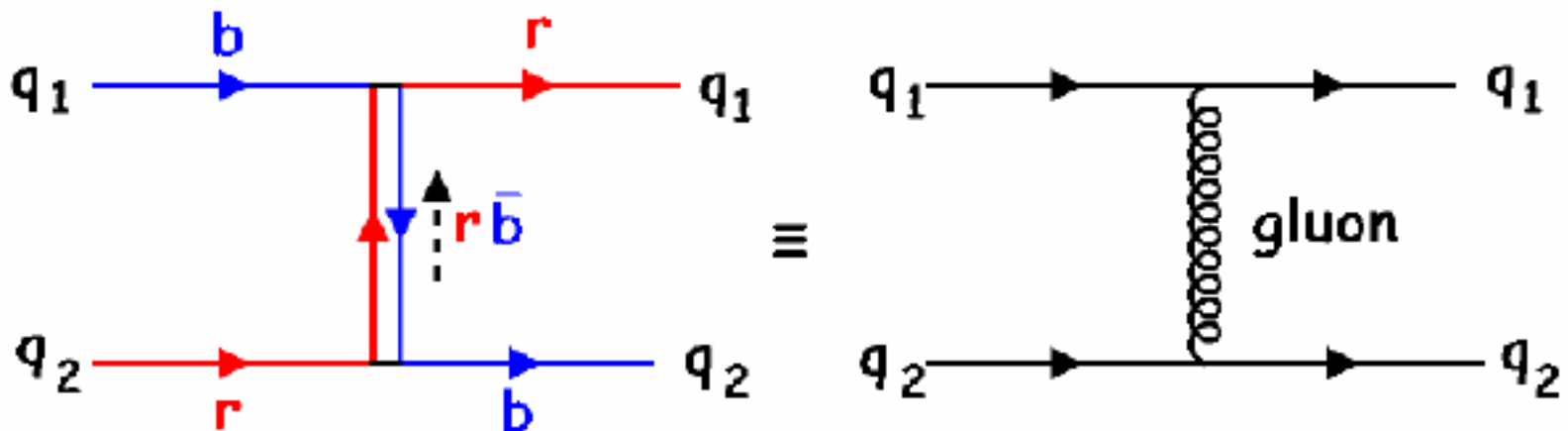
- Για τα μεσόνια η χρωματικά μοναχική κατάσταση είναι:

$$\frac{1}{\sqrt{3}} (r_1 \bar{r}_2 + g_1 \bar{g}_2 + b_1 \bar{b}_2)$$

– Συμμετρική ως προς την εναλλαγή δύο οποιωνδήποτε κουάρκ!

Ο κβαντικός αριθμός του χρώματος

- Στην ισχυρή αλληλεπίδραση πηγή των ισχυρών πεδίων είναι το φορτίο του χρώματος. Έτσι η ανταλλαγή γλουονίων μεταξύ δύο κουάρκ μπορεί να συνοδεύεται και από αλλαγή χρώματος



Το χρώμα των γλουονίων

- Υπάρχουν 9 συνολικά συνδυασμοί χρωμάτων για τα γλουόνια:

$$(r, g, b) \otimes (\bar{r}, \bar{g}, \bar{b})$$

$$(r, \bar{g}), (r, \bar{b}), (g, \bar{r}),$$

$$(g, \bar{b}), (b, \bar{r}), (b, \bar{g})$$

$$(r, \bar{r}), (g, \bar{g}), (b, \bar{b})$$

- Αλλαγή χρώματος στα κουάρκ:

- Από αυτούς, υπάρχουν τρεις γραμμικοί συνδυασμοί που είναι μεν «ουδέτεροι» αλλά μόνο δύο μπορούν να μεταφέρουν χρώμα

$$\frac{1}{\sqrt{2}}(r\bar{r} - g\bar{g})$$

$$\frac{1}{\sqrt{6}}(r\bar{r} + g\bar{g} - 2b\bar{b})$$

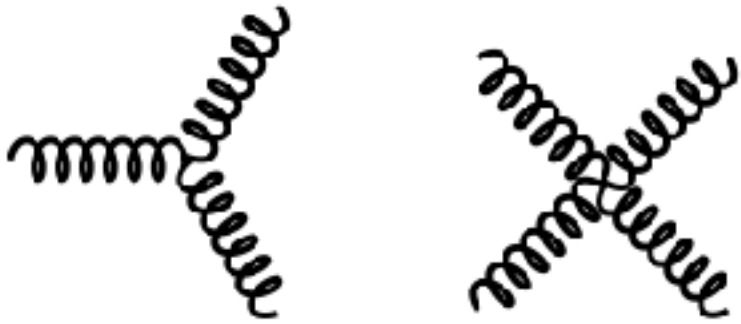
$$\frac{1}{\sqrt{3}}(r\bar{r} + g\bar{g} + b\bar{b})$$

Έχουν χρώμα, αλλά δεν αλλάζουν το χρώμα των quarks

Δεν έχει χρώμα, άρα δεν ανταλλάσσεται !

ΑΡΑ:
υπάρχουν
8 είδη
γλουονίων

Αλληλεπίδραση Γλουονίου-Γλουονίου



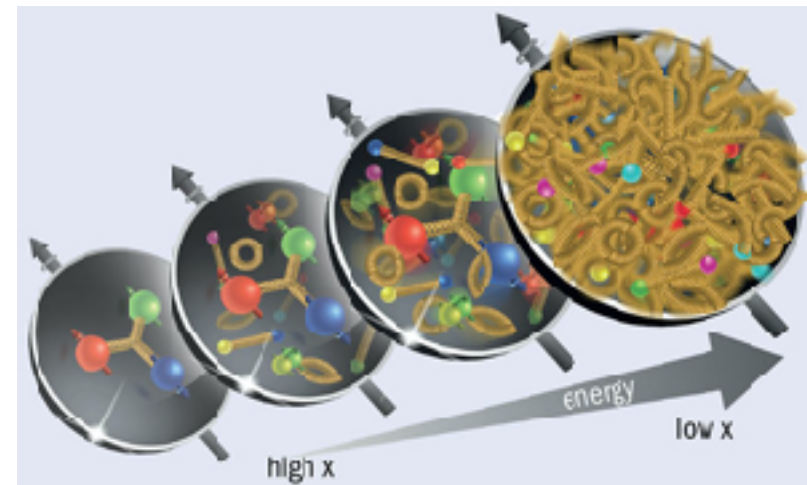
Τα γλουόνια έχουν Χρώμα! Άρα αλληλεπιδρούν!

Αυτό το χαρακτηριστικό οδηγεί στο φαινόμενο της Δέσμμευσης!

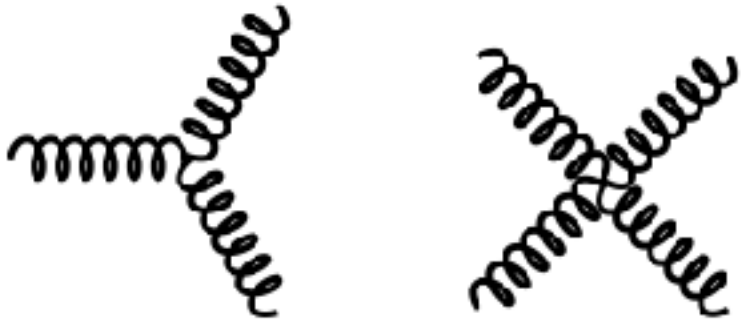
Δεν υπάρχουν πιο περίπλοκες κορυφές (λ.χ. με 5 γλουόνια)

Μπορούμε όμως να φτιάξουμε εξαιρετικά περίπλοκα «κουβάρια» γλουονίων

Το πρωτόνιο, όταν παρατηρείται στην κλίμακα χαμηλών ενεργειών, είναι ένα μεγάλο «κουβάρι» γλουονίων γύρω από 3 βασικά κουάρκ και ένα πλήθος εικονικών ζευγών κουάρκ-αντικουάρκ που αλληλεπιδρά με το γλουονικό πεδίο: → 98% της μάζας του είναι ενέργεια από γλουόνια και εικονικά μεσόνια!



Αλληλεπίδραση Γλουονίου-Γλουονίου



Τα γλουόνια έχουν Χρώμα! Άρα αλληλεπιδρούν!

Αυτό το χαρακτηριστικό οδηγεί στο φαινόμενο της Δέσμμευσης!

Δεν υπάρχουν πιο περίπλοκες κορυφές (λ.χ. με 5 γλουόνια)

Μπορούμε όμως να φτιάξουμε εξαιρετικά περίπλοκα «κουβάρια» γλουονίων

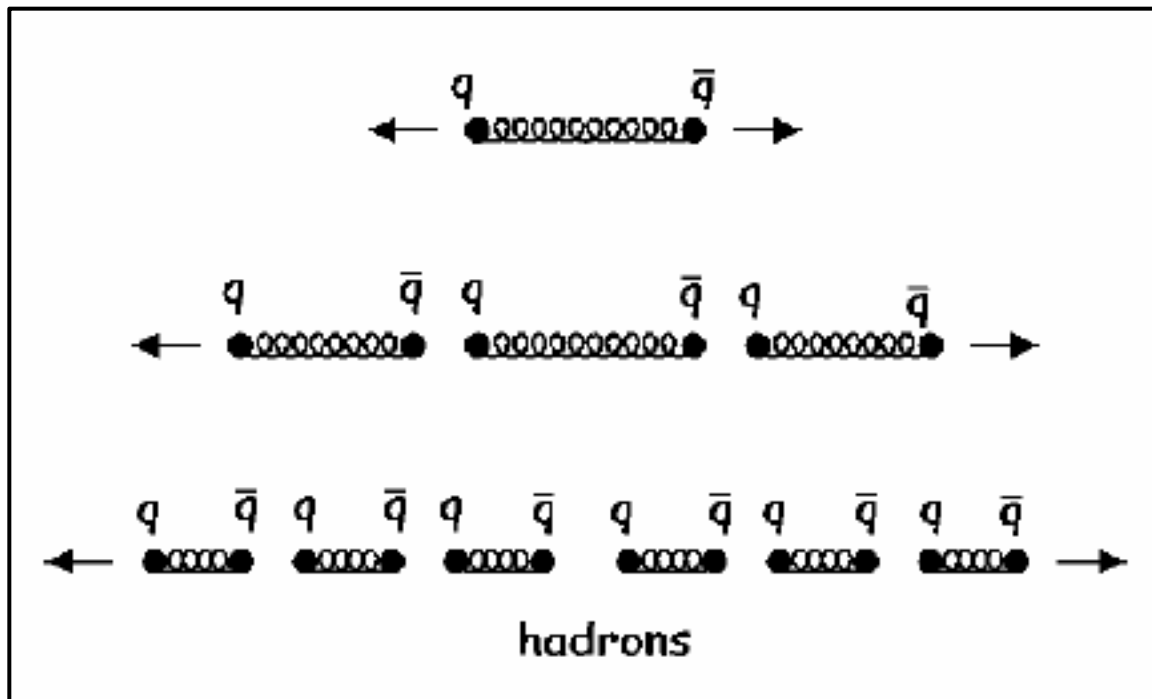
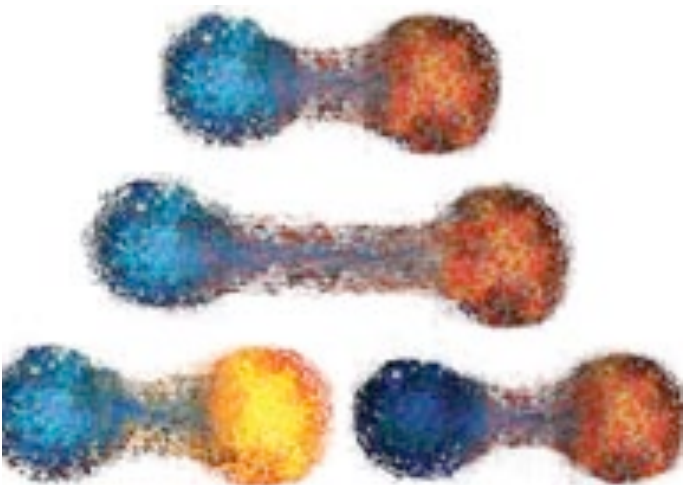
Αν η ισχυρή αλληλεπίδραση είναι τόσο ισχυρή, και τα γλουόνια αλληλεπιδρούν, τότε θα μπορούσαμε να είχαμε δέσμιες καταστάσεις με μόνο γλουόνια?

ΝΑΙ! “Glueballs”

Διαγράμματα Feynman

Ισχυρές Αλληλεπιδράσεις

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



Ο κβαντικός αριθμός του χρώματος

- Η ύπαρξη του χρώματος – πως τεκμαίρεται?
- Υπάρχουν φαινόμενα στη φύση τα οποία όχι μόνο υποστηρίζουν την ύπαρξη φορτίου χρώματος αλλά περιορίζουν και τον αριθμό των χρωμάτων σε τρία:
 - Η δομή της αδρονικής κατάστασης Δ^{++} και της Ω^-
 - Ο χρόνος ζωής του ουδέτερου πιονίου π^0
 - Ο ρυθμός παραγωγής αδρονίων κατά την εξαΰλωση του ζεύγους e^+e^-

Ύπαρξη χρώματος: αδρονική δομή Δ^{++}

- Η κυματοσυνάρτηση που περιγράφει το Δ^{++} (uuu) είναι της μορφής:

$$\Psi = \Psi_{\alpha}(\text{χώρος}) \cdot \Psi_{\beta}(\text{spin}) \cdot \Psi_{\gamma}(\text{γεύση})$$

- Ψ_{α} = συμμετρική (πειραματικά δεδομένα, $l=0$)
 - Ψ_{β} = συμμετρική (3 ομοπαράλληλα spin)
 - Ψ_{γ} = συμμετρική ως προς την αντιμετάθεση δύο οποιωνδήποτε κουάρκ
- Ή, πιά απλά, έχουμε τρία φερμιόνια τα οποία βρίσκονται στην ίδια κατάσταση (απαγορεύεται από την αρχή του Pauli)
 - Άρα πρέπει να υπάρχει κάποια ειδοποιός ιδιότητα. Εισάγουμε το «χρώμα» – και τρία βασικά χρώματα
 - Η συνολική Ψ (που είναι αντισυμμετρική) είναι:
$$\Psi = \Psi_{\alpha}(\text{χώρος}) \cdot \Psi_{\beta}(\text{spin}) \cdot \Psi_{\gamma}(\text{γεύση}) \cdot \Psi_{\delta}(\text{χρώμα})$$

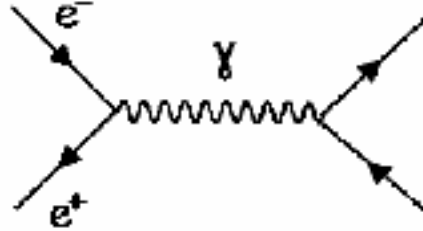
Ύπαρξη χρώματος: χρόνος ζωής π^0

- Το μεσόνιο π^0 διασπάται σε 2γ ($\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma$)
 - Πειραματικός χρόνος ζωής $8,5 \times 10^{-17} \text{ s}$
 - Θεωρητικοί υπολογισμοί με το πρότυπο των κουάρκ (χωρίς χρώμα) $\sim 10^{-15} \text{ s}$
 - Με την εισαγωγή του φορτίου χρώματος, οι υπολογισμοί έδειξαν ότι όσα περισσότερα χρώματα υπάρχουν, τόσο γρηγορότερα διασπάται (τετραγωνική εξάρτηση).
 - Άρα αν υπάρχουν τρία χρώματα, τότε ο χρόνος ελαττώνεται κατά παράγοντα $3^2 = 9$
- ⇒ Με την εισαγωγή του φορτίου του χρώματος η θεωρητική πρόβλεψη συμφωνεί με την πειραματική τιμή

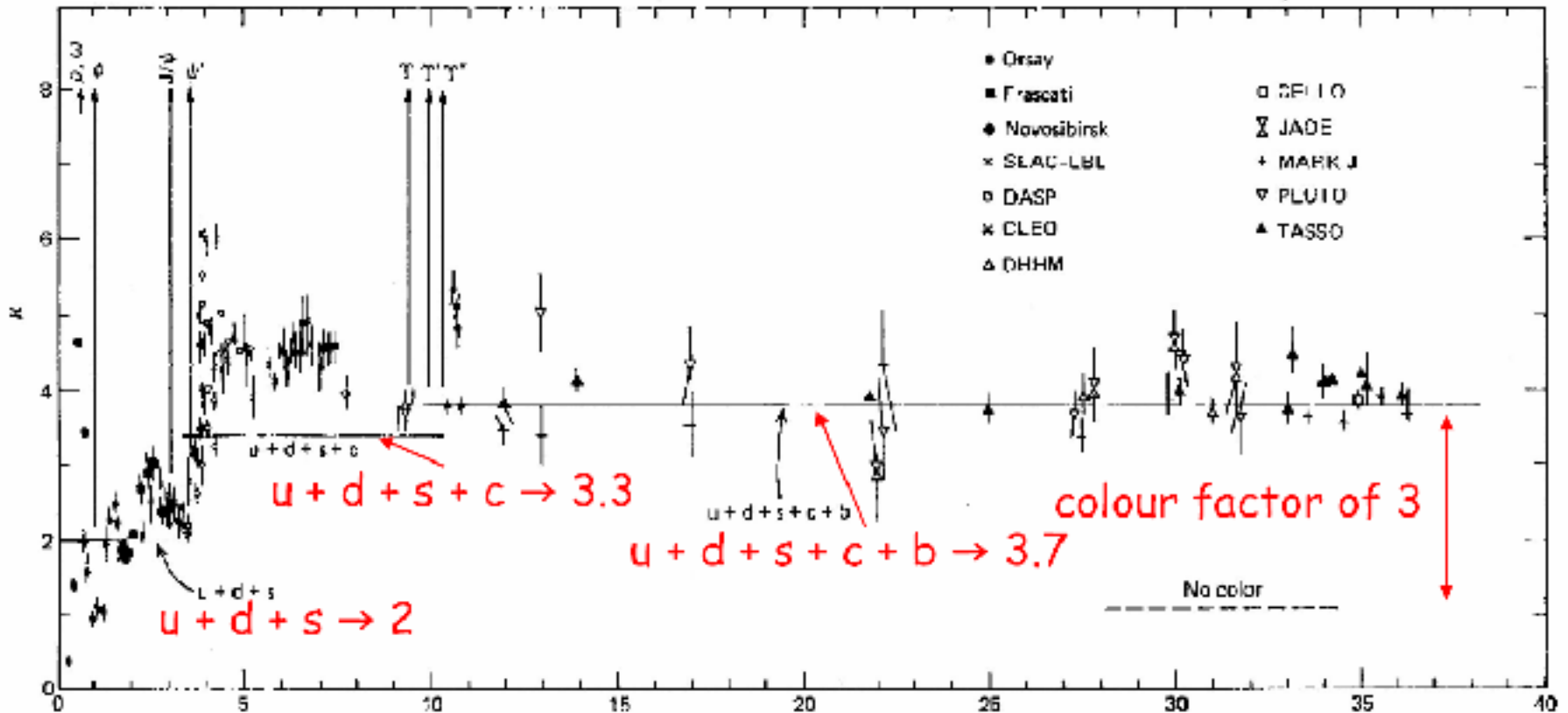
Υπαρξη χρώματος: εξαύλωση e^+e^-

- $e^+ + e^- \rightarrow \text{hadrons}$
- $e^+ + e^- \rightarrow \mu^+ + \mu^-$

- Ο ρυθμός παραγωγής αδρονίων κατά την εξαύλωση του ζεύγους $e^+ e^-$



$$R = \frac{\sigma(\text{hadrons})}{\sigma(\mu^+\mu^-)} = N_c \frac{\sum Q_q^2}{12}$$



Υπαρξη χρώματος: εξαΰλωση e^+e^-

Ρυθμός παραγωγής αδρονίων στην εξαΰλωση του ζεύγους $e^+ e^-$

- $E_{\text{cm}} \sim 2 \text{ GeV}$ (u,d,s)
– $R = 3 \cdot (4/9 + 1/9 + 1/9) = 2$
- $E_{\text{cm}} \sim 5 \text{ GeV}$ (u,d,s,c)
– $R = 3 \cdot (4/9 + 1/9 + 1/9 + 4/9) = 3 \frac{1}{3}$
- $E_{\text{cm}} \sim 11 \text{ GeV}$ (u,d,s,c,b)
– $R = 3 \cdot (4/9 + 1/9 + 1/9 + 4/9 + 1/9) = 3 \frac{2}{3}$