

Εισαγωγή στη Φυσική Στοιχειωδών Σωματιδίων

Δήμος Σαμψωνίδης
(8-1-2020)

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

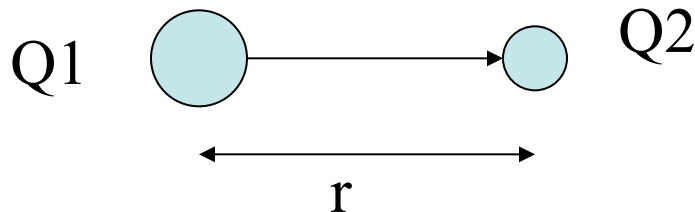
Name	Mass GeV/c ²	Electric charge
 photon	0	0
 W bosons	80.39	-1
 W bosons	80.39	+1
 Z boson	91.188	0

Strong (color) spin = 1

Name	Mass GeV/c ²	Electric charge
 gluon	0	0

Η εικόνα στην Κλασσική 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



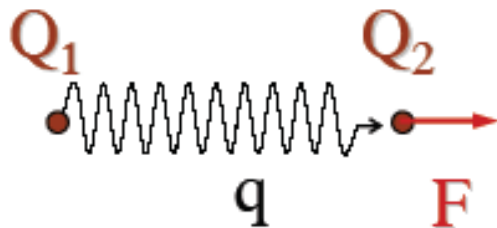
$$\vec{F}(r) = Q2 \cdot \vec{E}(r)$$

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

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

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 'δυνητικό' 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 επαναπορρόφησης 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

Περιγραφή σε βασικό επίπεδο - Διαγράμματα Feynman

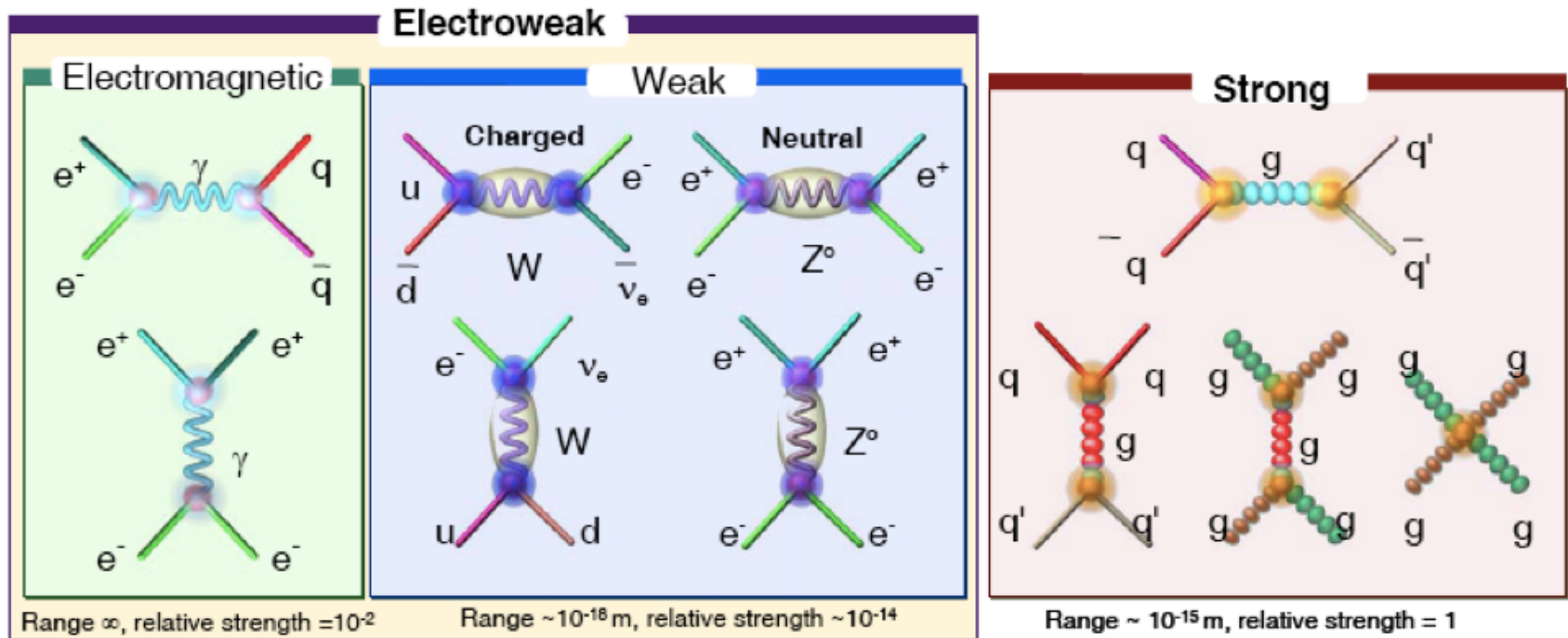
- Έχουμε μια πιο βασική ερμηνεία του τι συμβαίνει στις αντιδράσεις και διασπάσεις που βλέπουμε στη φύση
- Αλληλεπιδασίες μέσω μποζονίων διαδοτών των διαφόρων δυνάμεων
 - ΗΜ : γ
 - Ασθενείς : W^+ , W^- , Z^0
 - Ισχυρές: g

και

Αναπαράσταση με διαγράμματα Feynman

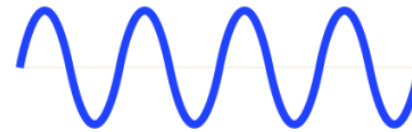
Διαγράμματα Feynman

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



Διαγράμματα Feynman

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

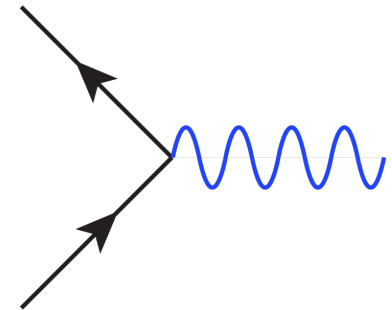


σε οποιαδήποτε διεύθυνση

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

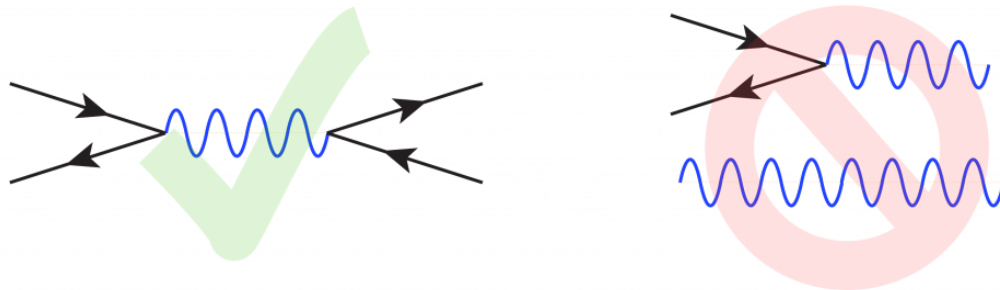
Ο προσανατολισμός των βελών είναι σημαντικό!

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



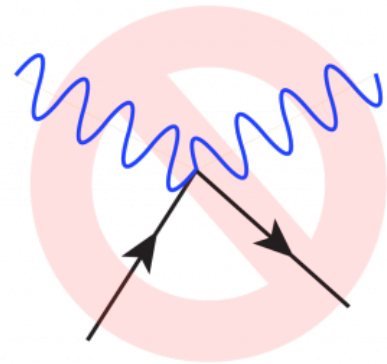
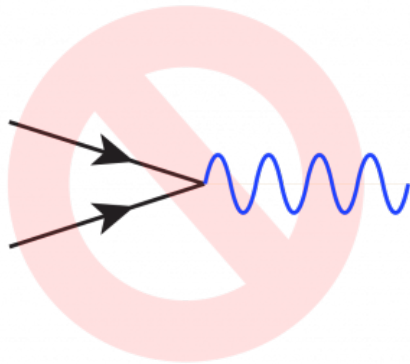
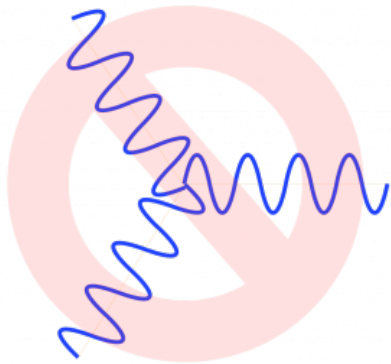
Διαγράμματα Feynman

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.



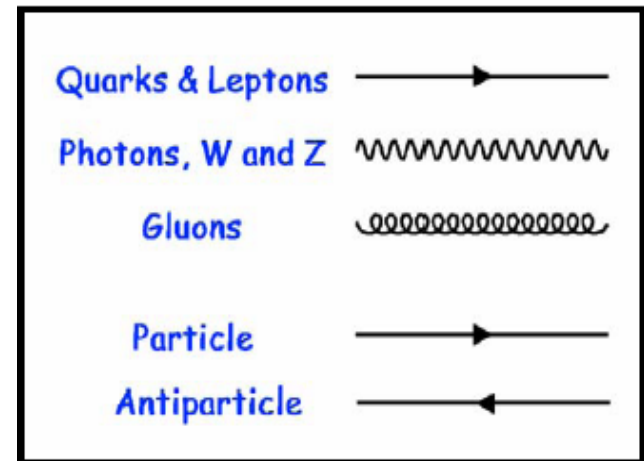
Αυτό που είναι σημαντικό είναι τα τελικά σημεία της κάθε γραμμής.
Αρα μπορούμε να απαλλαγούμε από περισσειες καμπύλες.
Θα πρέπει κάθε γραμμή να θεωρείται ως κορδόνι. Θα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν ευθεία. (Αλλά η κυματοειδής γραμμή παραμένει κινούμενη!)





Διαγράμματα Feynmann

- Διαγράμματα αναπαράστασης της αλληλεπίδρασης στοιχειωδών σωματιδίων
 - Ο χρόνος εξελίσσεται οριζόντια
 - Τα βέλη δείχνουν τη φορά κίνησης των σωματιδίων που πλησιάζουν ή απομακρύνονται απο τις κορυφές
 - εισερχόμενα σωματία (κινούνται κατά τη θετική φορά του χρόνου) ισοδυναμούν με εξερχόμενα αντισωματία (κινούνται κατά την αρνητική φορά του χρόνου)



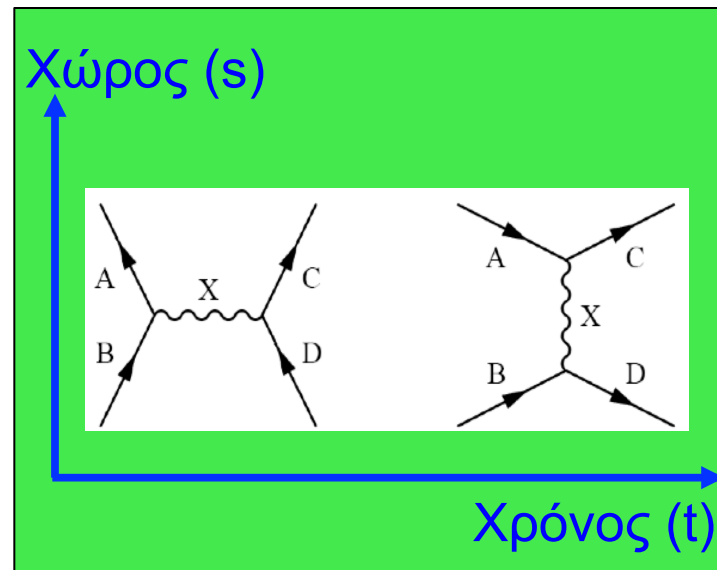
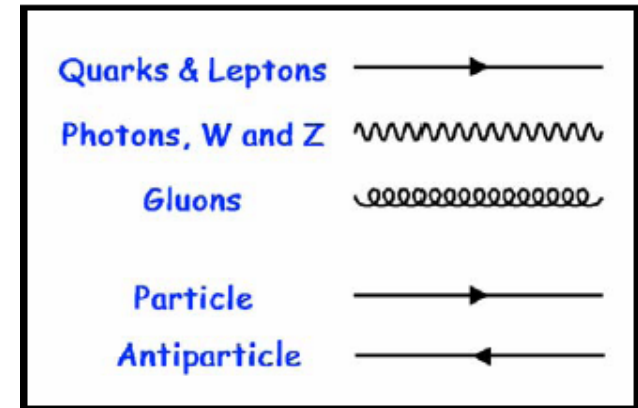
Διαγράμματα Feynman

Βασικοί κανόνες σε κάθε κόμβο:

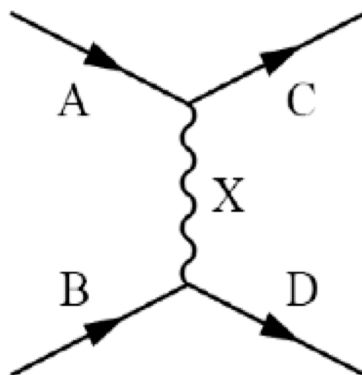
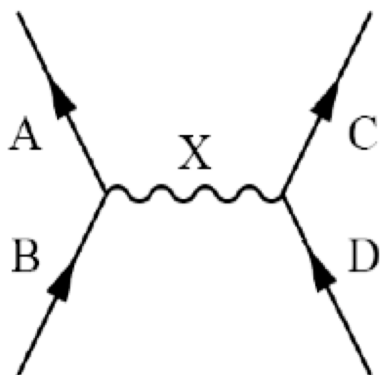
- E , p διατηρείται
- Q διατηρείται
- Σπιν διατηρείται
- Βαρυονικός Αριθμός
- Λεπτονικός Αριθμός

Συμβολισμοί πάνω στο διάγραμμα:

- Φερμιόνια: θετικός χρόνος $\longrightarrow$
- Αντι-φερμιόνια: αρνητικός χρόνος $\longleftarrow$
- π.χ., το αντι-A έρχεται από αντίθετη κατεύθυνση και εξαυλώνεται με το B. Όμως το αντι-A συμβολίζεται να κινείται προς το παρελθόν
- Μποζόνια $\left\{ \begin{array}{l} \text{~~~~~} \\ \text{~~~~~} \end{array} \right.$
- Το σημείο σύζευξης (κόμβος) δηλώνει την ισχύ της σύζευξης



Διαγράμματα Feynman



Τα βελάκια στα διαγράμματα Feynman είναι βαλμένα έτσι ώστε να διευκολύνουν τους υπολογισμούς της πιθανότητας να γίνει αυτό που δείχνει το διάγραμμα.

Τα βέλη δείχνουν ένα “ρεύμα φερμιονίων”, όπου οι κόμβοι ούτε γεννάνε ούτε απορροφούν το ρεύμα. Στους κόμβους υπάρχει συνέχεια στο ρεύμα.

Όταν ένα φερμιόνιο αναπαριστάται με βελάκι που πάει μπροστά στο χρόνο, είναι σωματίδιο. Ένα βελάκι που πάει προς τα πίσω, δηλώνει αντι-σωματίδιο.

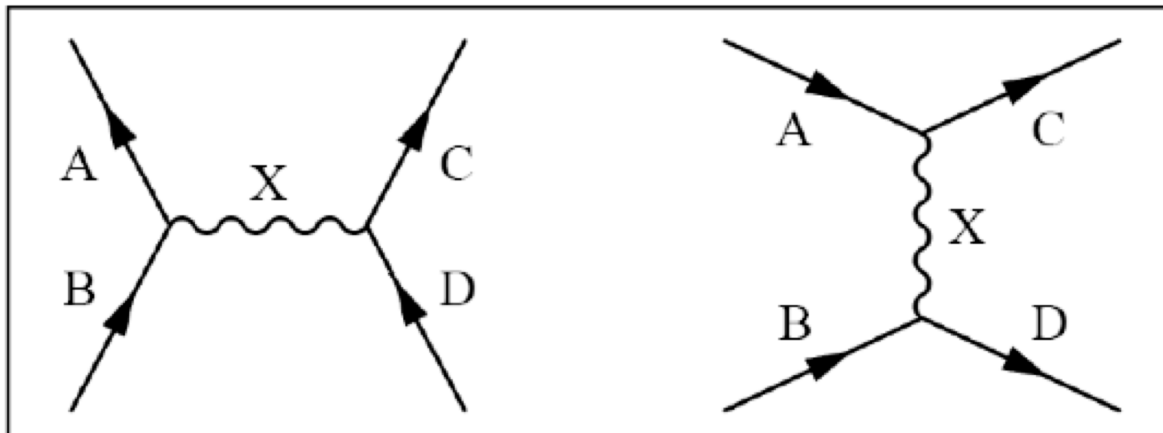
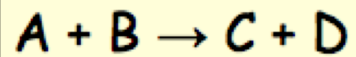
Σε κάθε περίπτωση, η διαδικασκία στο διάγραμμα περιγράφει μια “ιστορία” που εξελίσσεται από τα αριστερά προς τα δεξιά:

Αριστερά: το αντισωματίδιο A και το σωματίδιο B εξαϋλώνονται και δίνουν το σωματίδιο-διαδότη X, το οποίο εν συνεχεία διασπάται δημιουργώντας το σωματίδιο C και το αντισωματίδιο D.

Δεξιά: τα σωματίδια A και B αναταλλάσσουν ένα σωματίδιο-διαδότη X και το μεν A μετατρέπεται στο σωματίδιο C, το δε σωματίδιο B μετατρέπεται στο σωματίδιο D.

Διαγράμματα Feynmann

Παριστάνουν διεργασίες της μορφής



A, B, C, D

- Κουάρκ
- Λεπτόνια
- Αντικουάρκ
- Αντιλεπτόνια

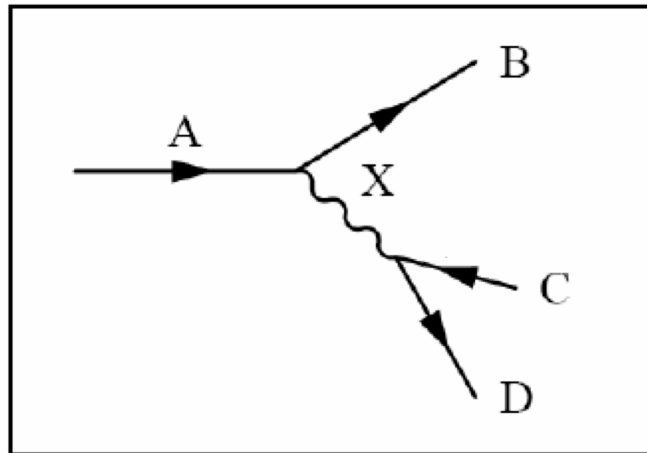
X

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

Διαγράμματα Feynmann

... ή της μορφής

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



A, B, C, D

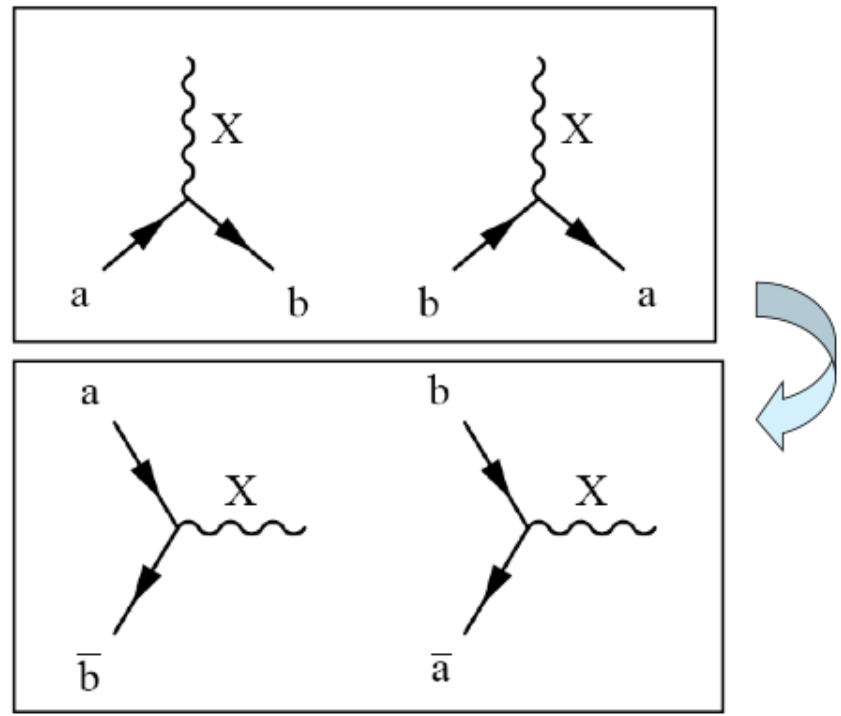
- Κουάρκ
- Λεπτόνια
- Αντικουάρκ
- Αντιλεπτόνια

X

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

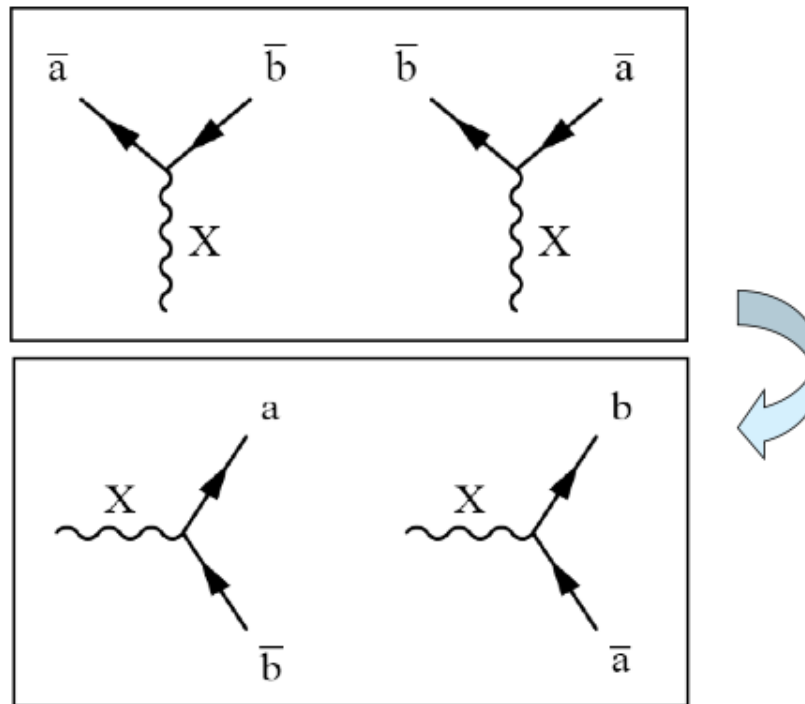
Διαγράμματα Feynmann

Γενικές ιδιότητες: Παραδείγματα περιστροφής διαγραμμάτων



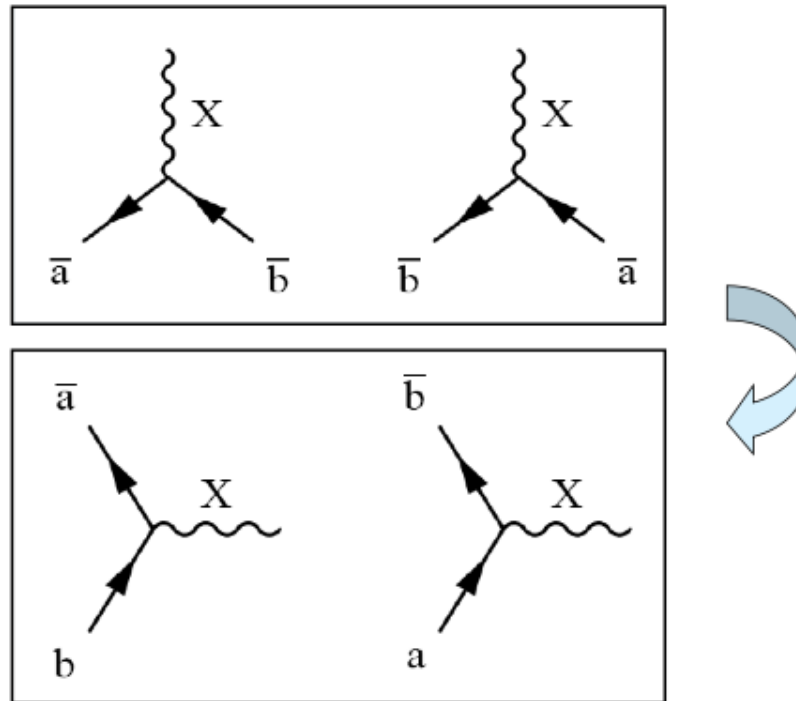
Διαγράμματα Feynmann

Γενικές ιδιότητες: Παραδείγματα περιστροφής διαγραμμάτων



Διαγράμματα Feynmann

Γενικές ιδιότητες: Παραδείγματα περιστροφής διαγραμμάτων



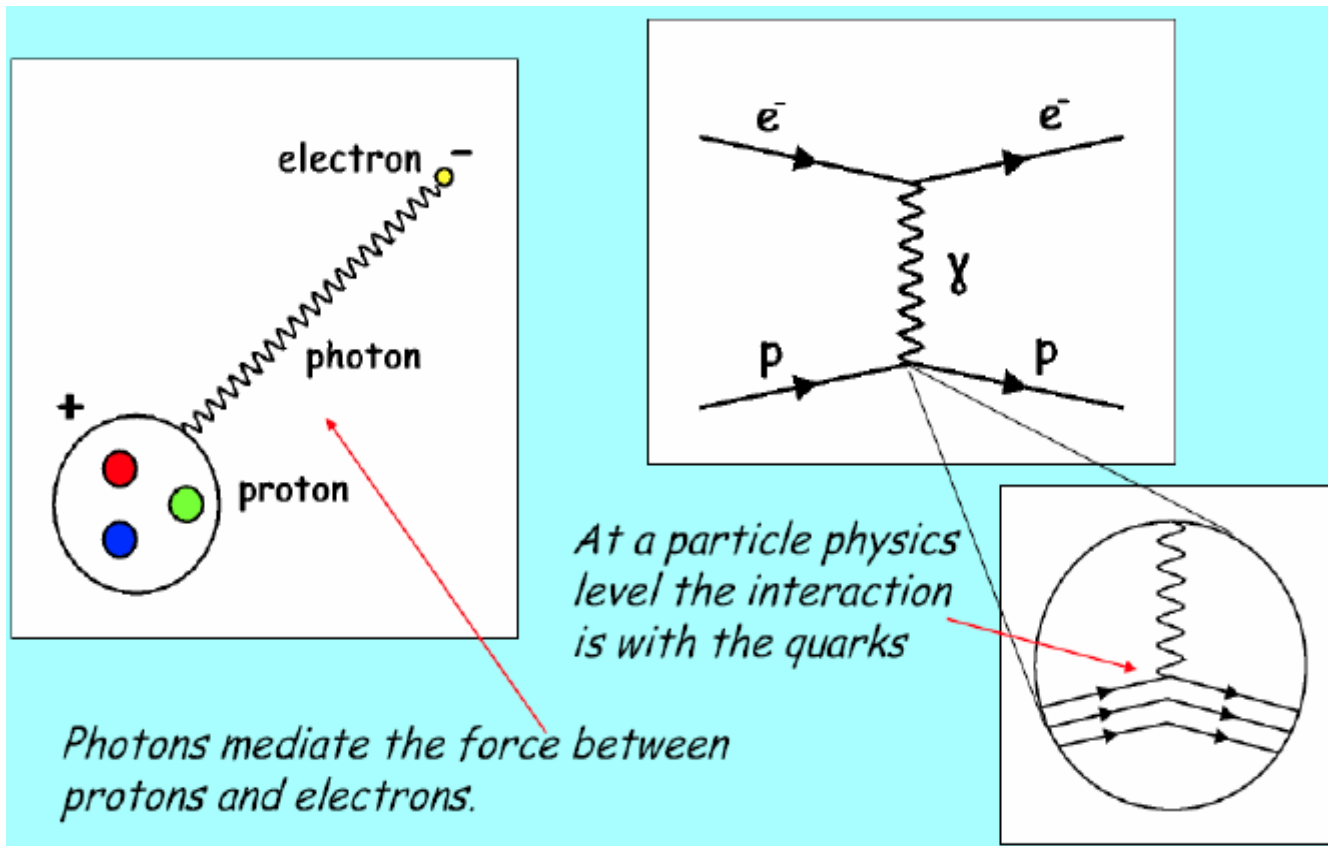
Διαγράμματα Feynmann

- **Δυνάμεις**

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

	ΑΣΘΕΝΕΙΣ	ΗΜΓ	ΙΣΧΥΡΕΣ
Quarks	✓	✓	✓
Φορτισμένα Λεπτόνια	✓	✓	✗
Ουδέτερα Λεπτόνια	✓	✗	✗

Ηλεκτρομαγνητικές Αλληλεπιδράσεις (I)



Ηλεκτρομαγνητικές Αλληλεπιδράσεις (II)

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)

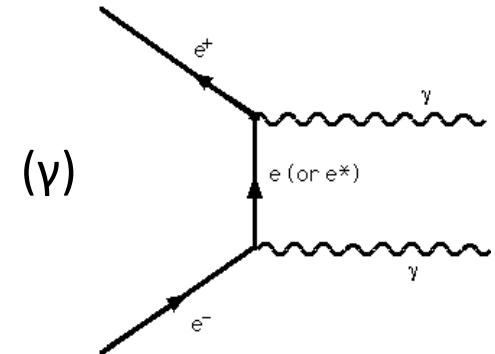
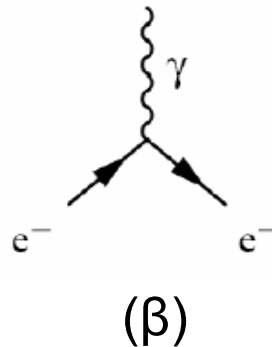
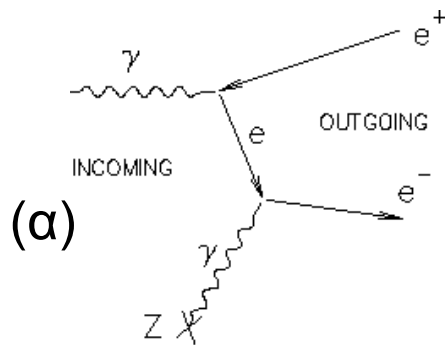
Το φωτόνιο συζεύγνυται μόνο με φορτισμένο σωματίδιο

- (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)

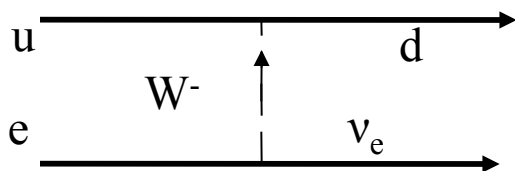


Οι διαδότες των ασθενών δυνάμεων

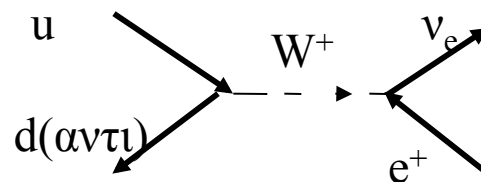
- Ανταλλαγή $W^\pm \Rightarrow$ μεταβολή του φορτίου των κουάρκ ή λεπτονίων που συμμετέχουν :

— $u \rightarrow d, e^- \rightarrow \nu_e$

[ανταλλαγή W^-, W^+ αντίστοιχα] $\rightarrow$ φορτισμένα ασθενή ρεύματα

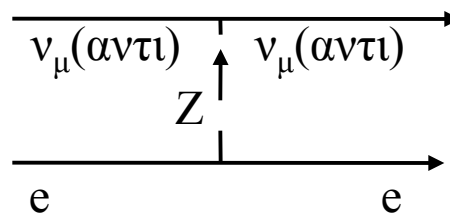


- σκέδαση $e p$ ($e p \rightarrow n \nu_e$)

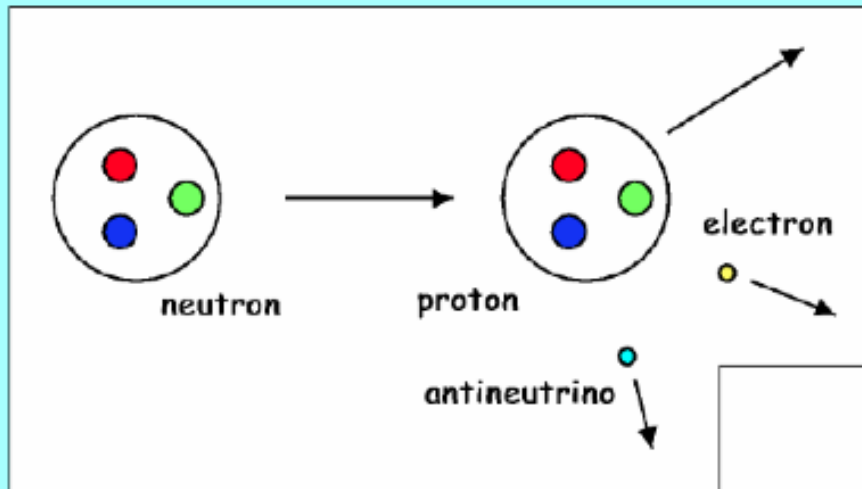


παραγωγή W^+ και διάσπαση σε $\nu_e e^+$

- Ανταλλαγή $Z^0 \rightarrow$ ουδέτερα ασθενή ρεύματα

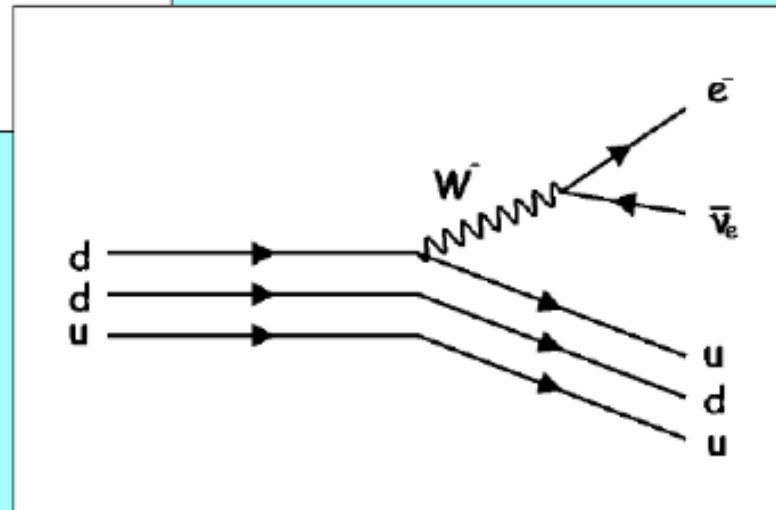


Ασθενείς Αλληλεπιδράσεις (I)



$$\text{Beta decay } n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$$

*Mediated by charged
 W exchange*



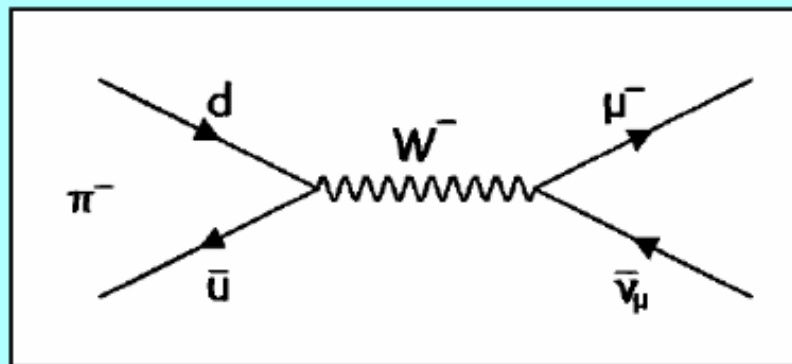
Ασθενείς Αλληλεπιδράσεις (II)

Οι Ασθενείς Αλληλεπιδράσεις αλλάζουν τις γεύσεις των κουάρκ και των λεπτονίων

Παράδειγμα διάσπασης μεσονίου σε λεπτόνια

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

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



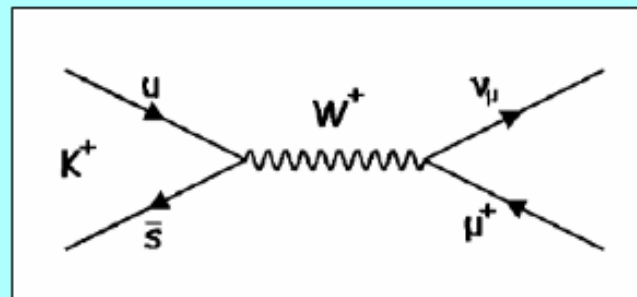
Ασθενείς Αλληλεπιδράσεις (III)

Οι Ασθενείς Αλληλεπιδράσεις αλλάζουν τις γεύσεις των κουάρκ και των λεπτονίων

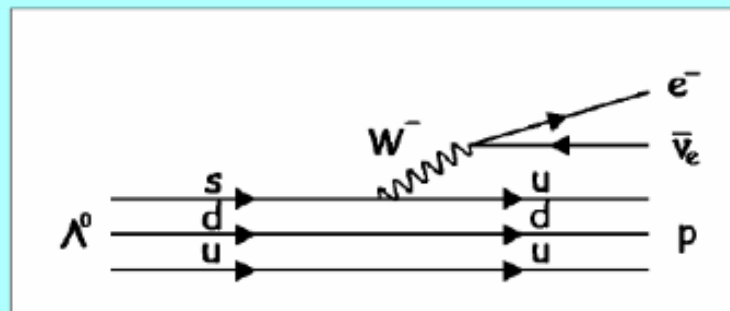
Παράδειγμα διάσπασης με αλλαγή της παραδοξότητας

$\Delta S = 1$ (Strangeness changes)

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



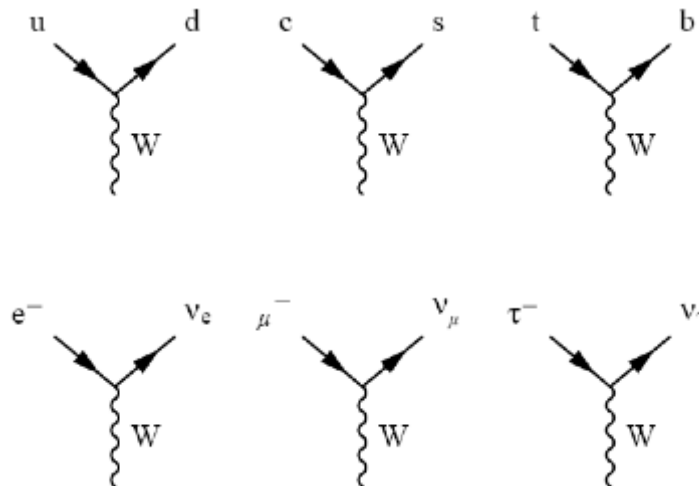
$$\Lambda^0 \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$$



Ασθενείς Αλληλεπιδράσεις (IV)

Οι Ασθενείς Αλληλεπιδράσεις αλλάζουν τις γεύσεις των κουάρκ και των λεπτονίων

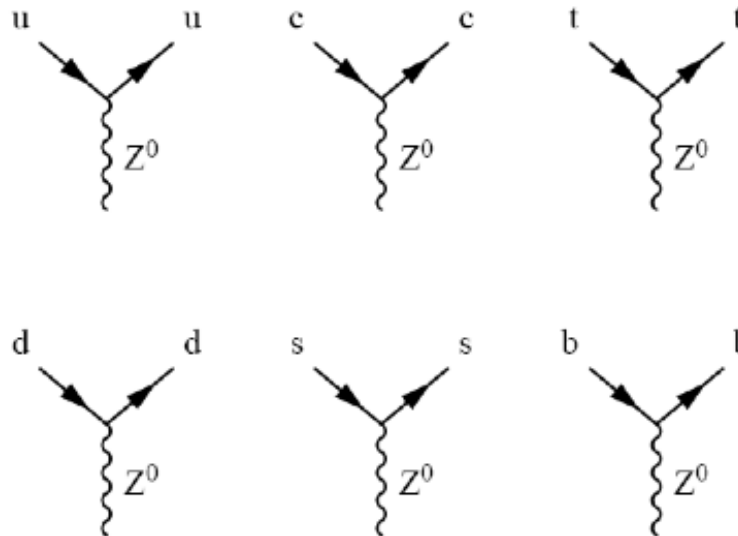
Όταν Ανταλλάσσονται οι διαδότες W , αλλάζει και το φορτίο



Ασθενείς Αλληλεπιδράσεις (V)

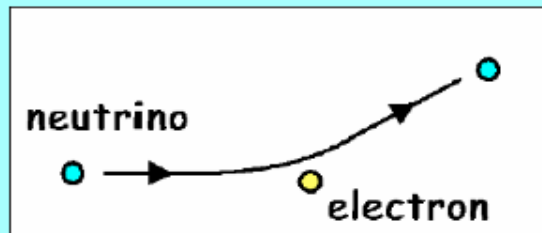
Οι Ασθενείς Αλληλεπιδράσεις αλλάζουν τις γεύσεις των κουάρκ και των λεπτονίων

Όταν Ανταλλάσσονται οι διαδότες Z , δεν αλλάζει το φορτίο



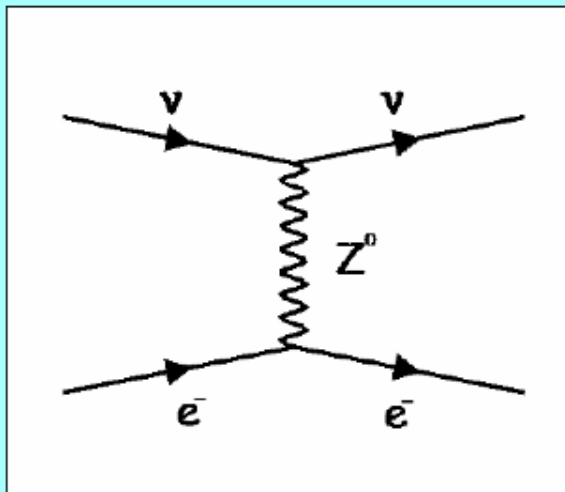
Ασθενείς Αλληλεπιδράσεις (VI)

Παράδειγμα σκέδασης νετρίνο



*Mediated by neutral
 Z exchange*

Neutrino scattering
off an electron



Άσκηση 6

Αυτές οι αντιδράσεις επιτρέπονται: α) Τι είδος είναι τα νετρίνα?
β) Ποιά η σύσταση κουάρκ των αδρονίων, γ) Κάνετε τα
διαγράμματα Feynman

$$\pi^+ \rightarrow \pi^0 e^+ \nu$$

$$\nu p \rightarrow n e^+$$

$$\mu^+ \rightarrow e^+ \nu \nu$$

$$\nu {}_{17}^{37}\text{Cl} \rightarrow {}_{18}^{37}\text{Ar} e^-$$

$$\mu^- \rightarrow e^- \nu \nu$$

$$\nu p \rightarrow \mu^- n$$

$$K^+ \rightarrow \pi^0 e^+ \nu$$

$$\nu n \rightarrow e^- p$$

$$\bar{K}^0 \rightarrow \pi^+ e^- \nu$$

$${}_1^3\text{H} \rightarrow {}_2^3\text{He} e^- \nu$$

$$\Sigma^- \rightarrow n \mu^- \nu$$

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu$$

$$\Sigma^+ \rightarrow \Lambda^0 e^+ \nu$$

$$\pi^- \rightarrow e^- \nu$$

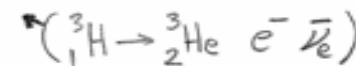
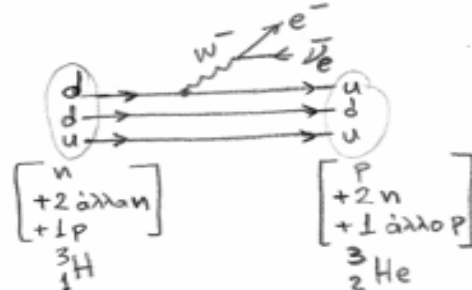
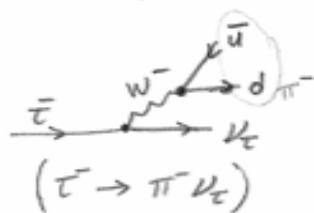
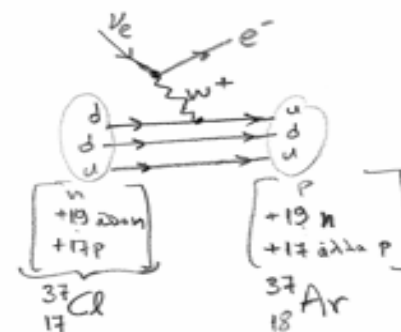
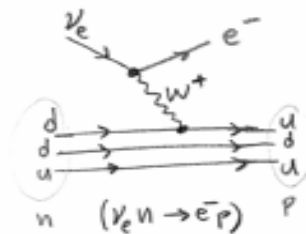
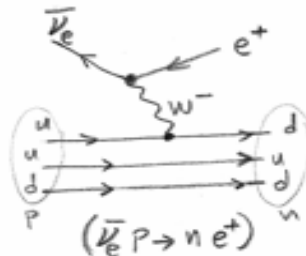
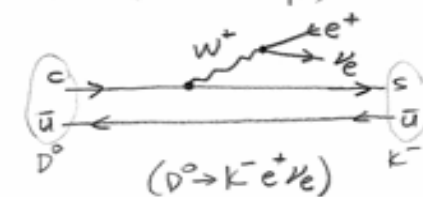
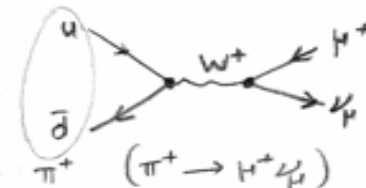
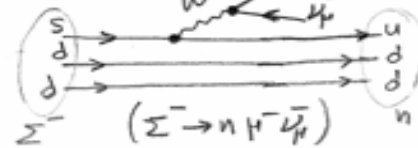
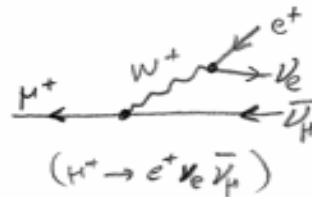
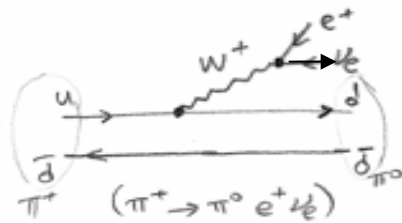
$$D^0 \rightarrow K^- e^+ \nu$$

$$\tau^- \rightarrow \pi^- \nu$$

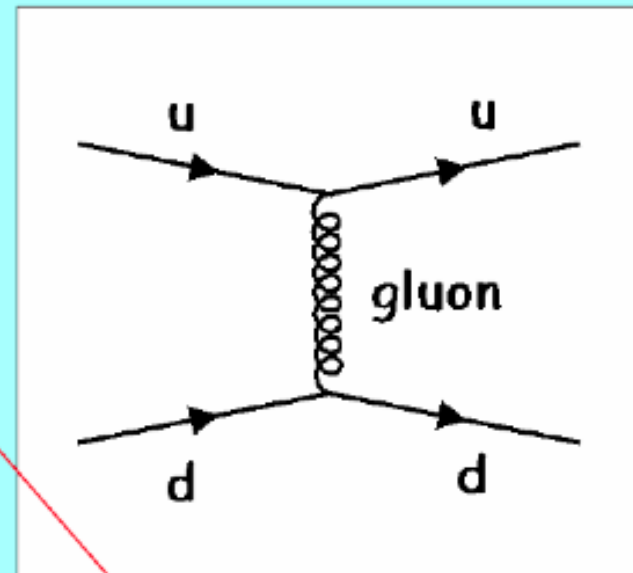
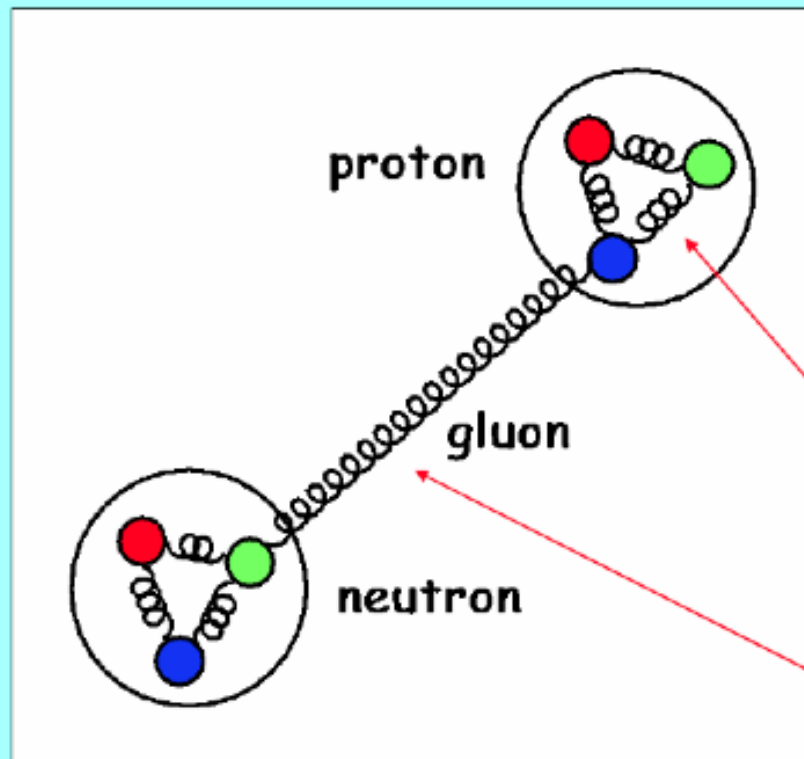
K^+ , K^0 :strange mesons ($s=1$), Σ^+ , Σ^- , Λ^0 :strange baryons, D^0 :charm meson ($c=1$),

Άσκηση 6 - Λύση

Αυτές οι αντιδράσεις επιτρέπονται: α) Τι είδος είναι τα νετρίνα?
β) Ποιά η σύσταση κουάρκ των αδρονίων, γ) Κάνετε τα διαγράμματα Feynman



Ισχυρές Αλληλεπιδράσεις (I)

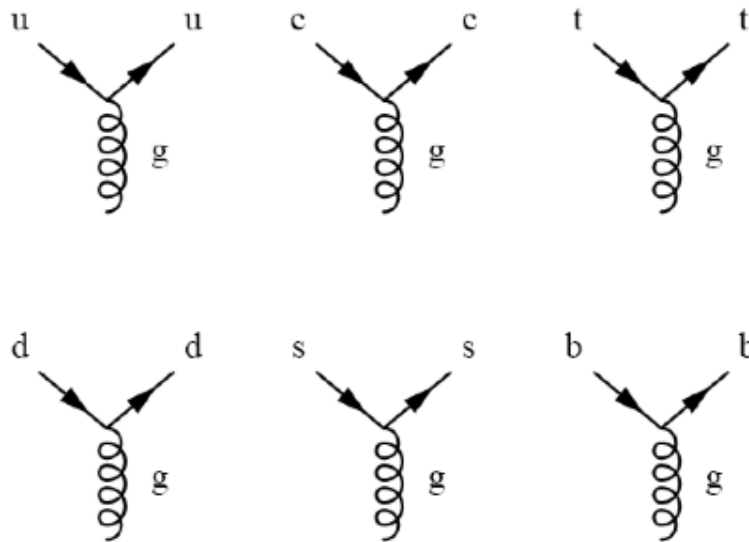


Gluons hold the proton and neutron together and are responsible for the Strong force between them.

Ισχυρές Αλληλεπιδράσεις (I)

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

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

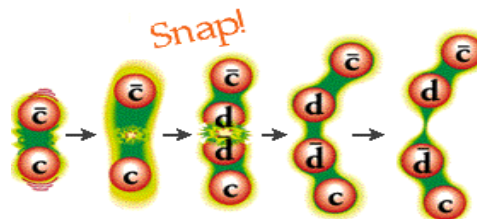
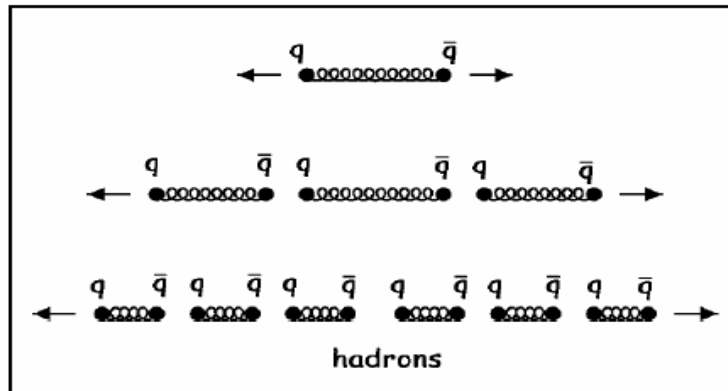
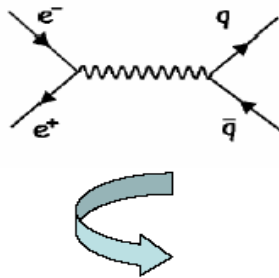


Ισχυρές Αλληλεπιδράσεις (II)

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

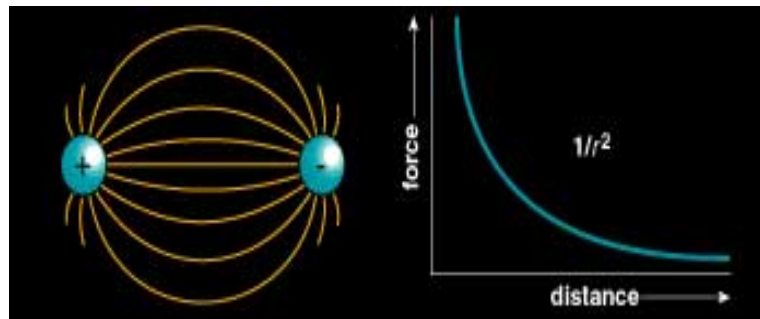
$$V_s = -\frac{4}{3} \frac{a_s}{r} + kr$$



Ισχυρές Αλληλεπιδράσεις (V)

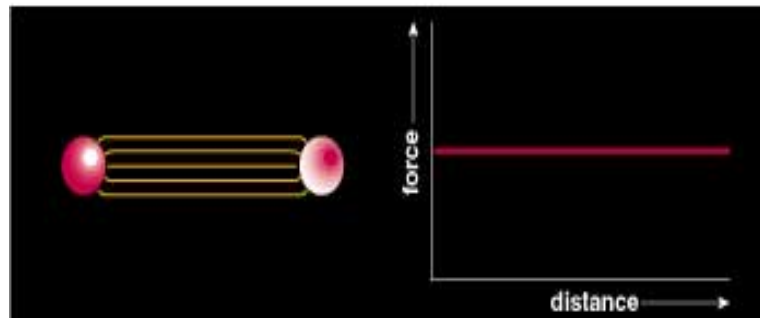
QED vs QCD

Dipole



- 1 electric charge
- γ carries no charge

Flux Tube



- 3 **C**olor charges
- g carry charge

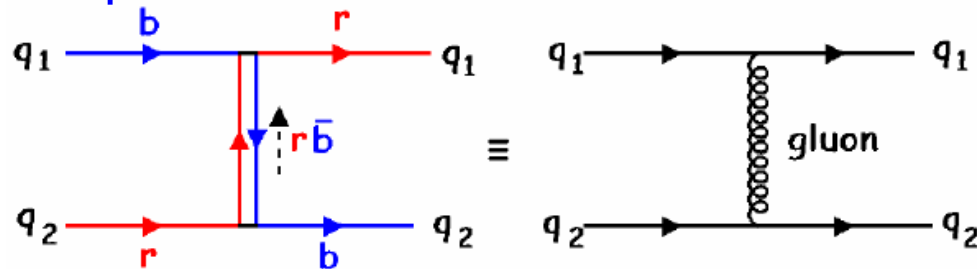
Ισχυρές Αλληλεπιδράσεις (IX)

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 $\neq 0$

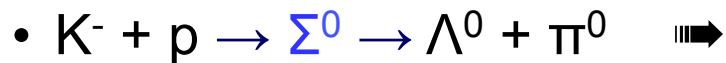
**Το χρώμα (φορτίο)
διατηρείται σε κάθε κόμβο**

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



Σταθερά Σύζευξης και Χρόνος ζωής σε μία Αλληλεπίδραση

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