

ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΠΥΡΗΝΙΚΗ ΦΥΣΙΚΗ & ΤΑ ΣΤΟΙΧΕΙΩΔΗ ΣΩΜΑΤΙΑ

Κ. Βελλίδης & Θ. Μερτζιμέκης
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ, 2022

- Κλασική-Κβαντική Εικόνα Πεδίου
- Εικονικά Σωματίδια
- Διαγράμματα Feynman
- Ηλεκτρομαγνητικές και Ασθενείς Αλληλεπιδράσεις
- Αλληλεπιδράσεις ως Διαταραχές Ελεύθερων Σωματίων

Κλασική & κβαντική εικόνα πεδίου

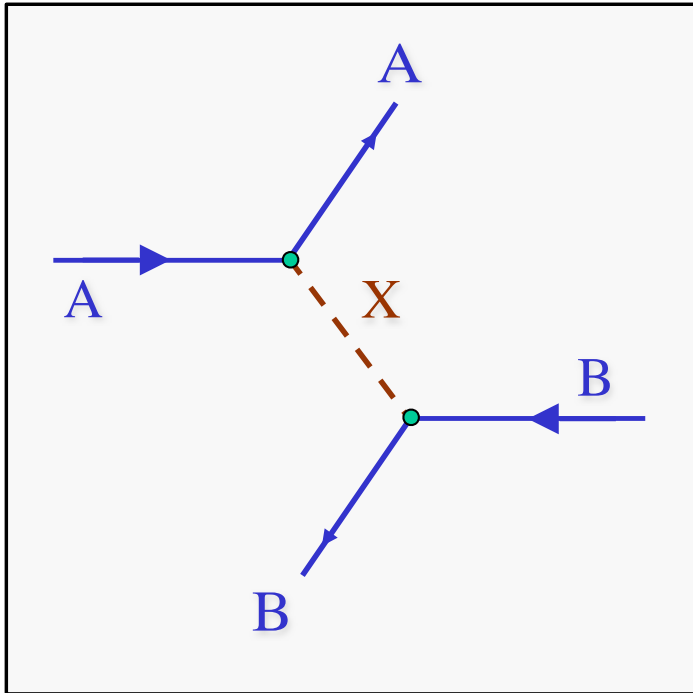
Κλασική εικόνα αλληλεπίδρασης: Το δυναμικό ή το πεδίο ενός σώματος που επιδρά στο άλλο σώμα.

Κβαντική 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

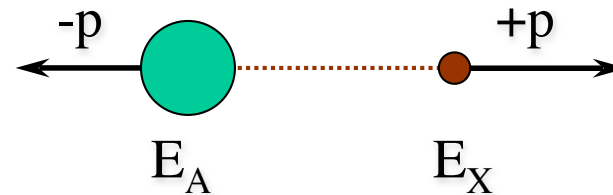
$$\Delta E \cdot \Delta t \gg \hbar$$

Κλασική & κβαντική εικόνα πεδίου



Αλληλεπίδραση σωματιδίων A και B μέσω της ανταλλαγής του σωματιδίου X με μάζα M_X

Στο σύστημα αναφοράς του σωματιδίου A, η εκπομπή του **διαδότη** X προσδίδει ανάκρουση στο A με ίσες κατά μέτρο ορμές.



Η ενεργειακή διαφορά υπολογίζεται:

$$\Delta E = E_A + E_X - M_A c^2$$



$$\Delta E = \sqrt{p^2 c^2 + M_A^2 c^4} + \sqrt{p^2 c^2 + M_X^2 c^4} - M_A c^2$$

απ' όπου συνάγεται:

$$\text{για } p \rightarrow \infty \Rightarrow \Delta E = 2pc$$

$$\& \text{ για } p \rightarrow 0 \Rightarrow \Delta E = M_X c^2$$

Κλασική & κβαντική εικόνα πεδίου

Η ενεργειακή αυτή παραβίαση ΔE πρέπει υποχρεωτικά να διαρκεί για μέγιστο χρόνο $\Delta \tau$ που να καλύπτεται από την αρχή της απροσδιοριστίας του Heisenberg:

$$\Delta \tau = \frac{\hbar}{\Delta E}$$

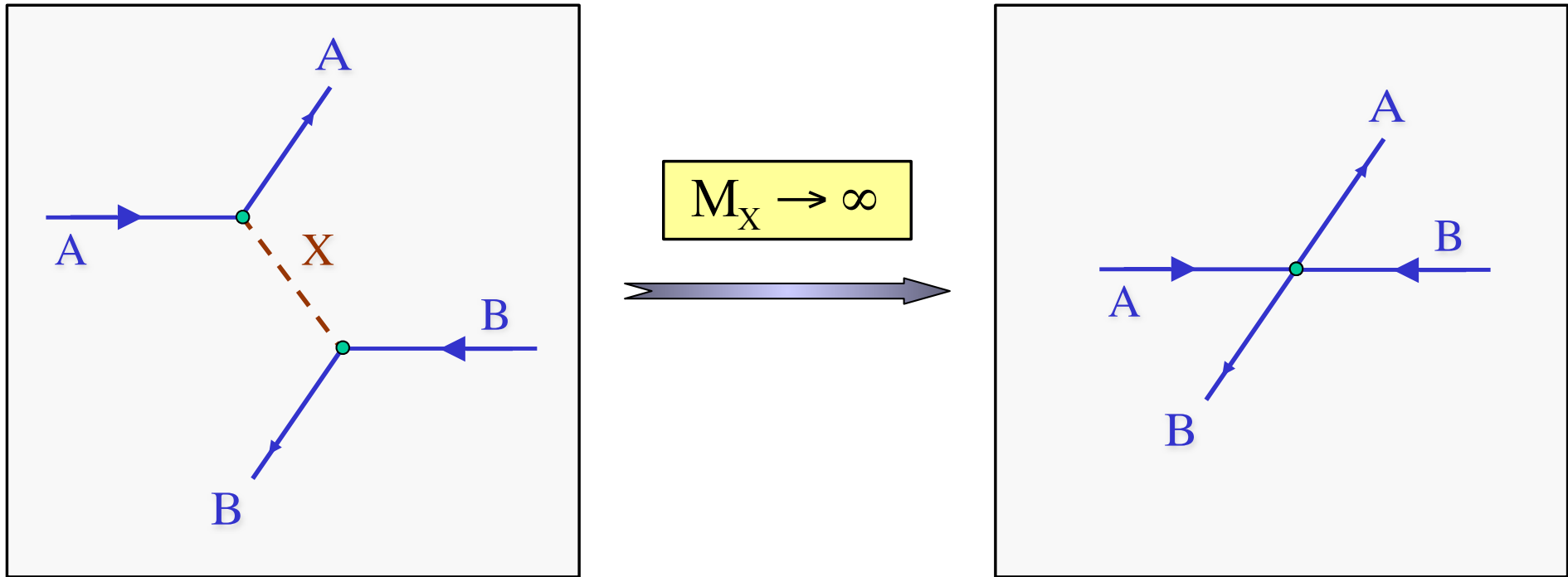
Η μέγιστη εμβέλεια που μπορεί να έχει το σωματίδιο X είναι κατά συνέπεια:

$$R = c \cdot \Delta \tau = c \cdot \frac{\hbar}{\Delta E} = c \cdot \frac{\hbar}{M_X c^2} \quad \Rightarrow \quad R = \frac{\hbar}{M_X c}$$

Η εμβέλεια του πεδίου είναι αντιστρόφως ανάλογη της μάζας του διαδότη.

Στην περίπτωση της ηλεκτρομαγνητικής αλληλεπίδρασης, όπου ο διαδότης είναι το φωτόνιο με μηδενική μάζα ηρεμίας, είναι προφανές πως η εμβέλεια του πεδίου γίνεται άπειρη.

Κλασική & κβαντική εικόνα πεδίου

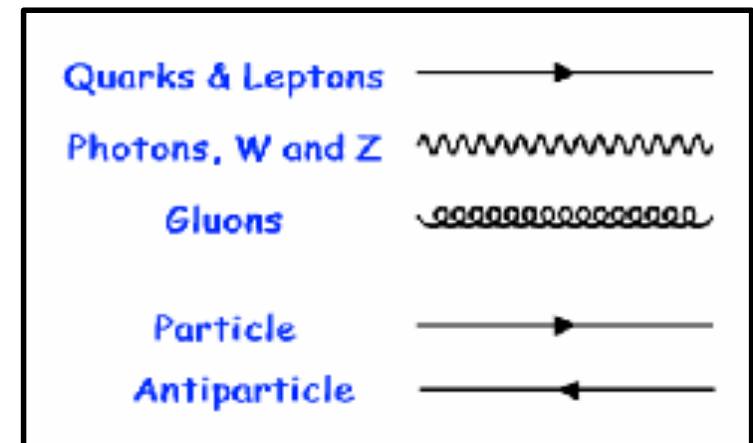
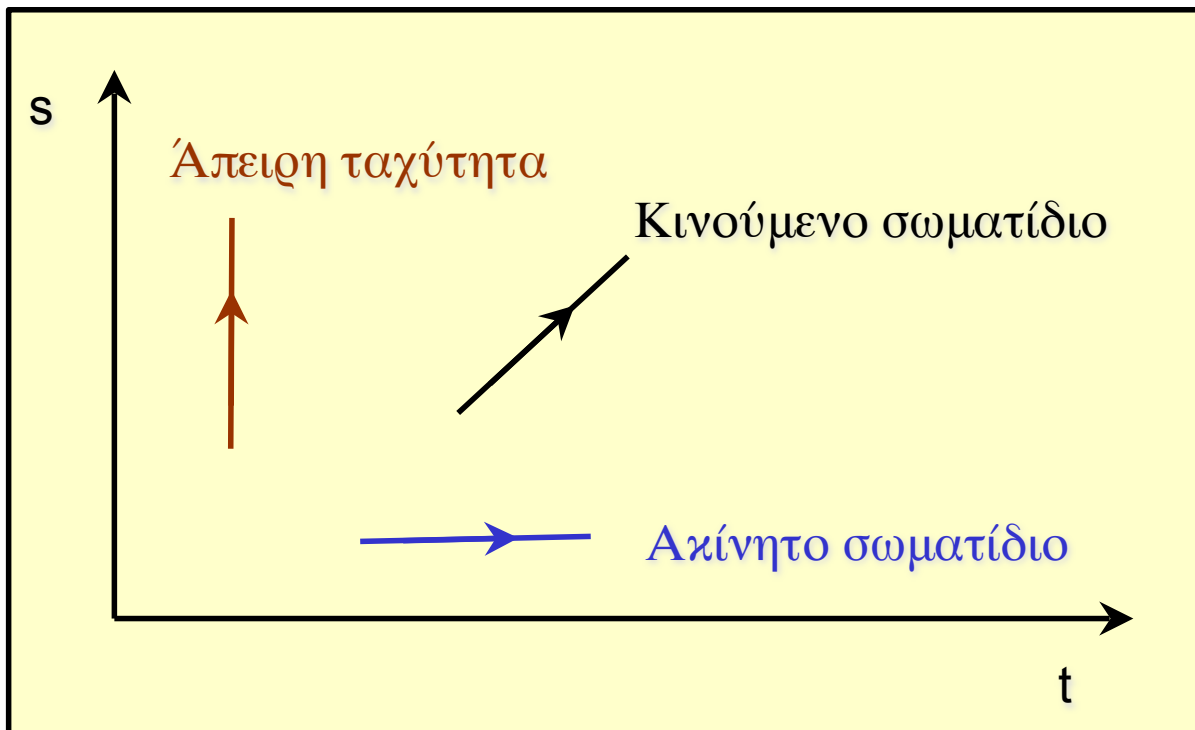


Στην περίπτωση όπου η **μάζα** του διαδότη γίνεται πρακτικά **άπειρη**, τότε η **εμβέλεια** του πεδίου **μηδενίζεται** και η αλληλεπίδραση συρρικνώνεται σε ένα μόνο σημείο του χώρου (αλληλεπίδραση “επαφής”).

Διαγράμματα Feynman

Διαγράμματα αναπαράστασης της διαδικασίας αλληλεπίδρασης.

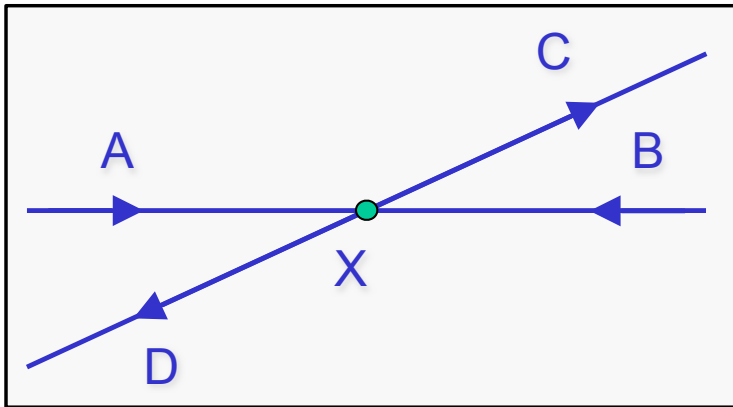
- Ο χρόνος εξελίσσεται οριζόντια, ο χώρος κατακόρυφα.
- Τα βέλη δείχνουν τη φορά κίνησης των σωματίων που πλησιάζουν ή απομακρύνονται από τις κορυφές.
- Εισερχόμενα σωματάρια ισοδυναμούν με εξερχόμενα αντισωματάρια.



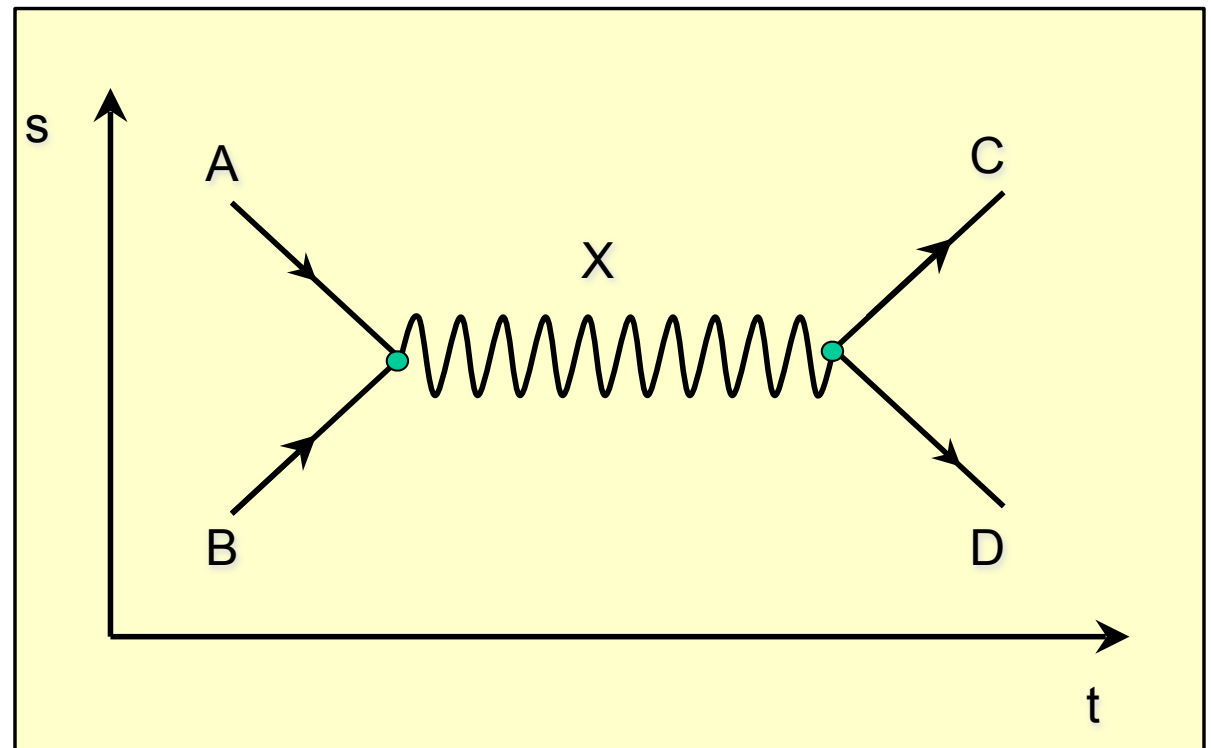
Διαγράμματα Feynman

Διαγράμματα Εξαύλωσης (Annihilation) ή Σχηματισμού (Formation)

Τα σωματίδια A και B συγκρούονται σχηματίζοντας το ενδιάμεσο σωματίδιο X, το οποίο στη συνέχεια διασπάται στα C και D.



Η αλληλεπίδραση όπως φαίνεται στο σύστημα του εργαστηρίου.

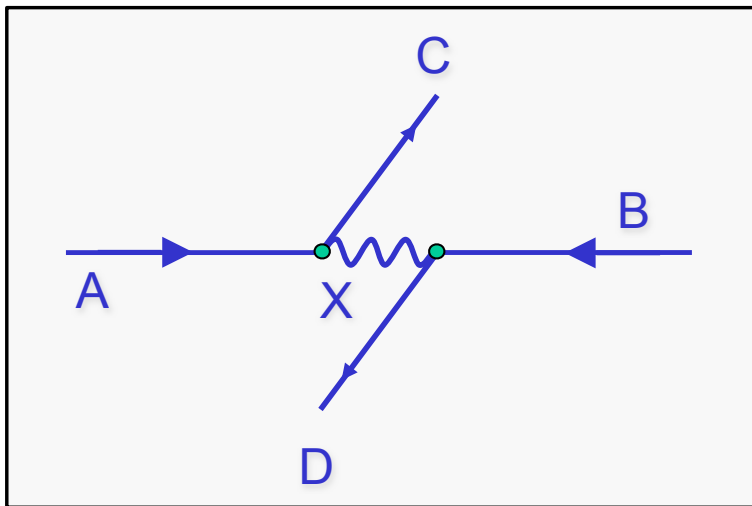


Σχηματική αναπαράσταση της αλληλεπίδρασης με διάγραμμα Feynman. Σε κάθε κορυφή τουλάχιστον το ηλεκτρικό φορτίο διατηρείται.

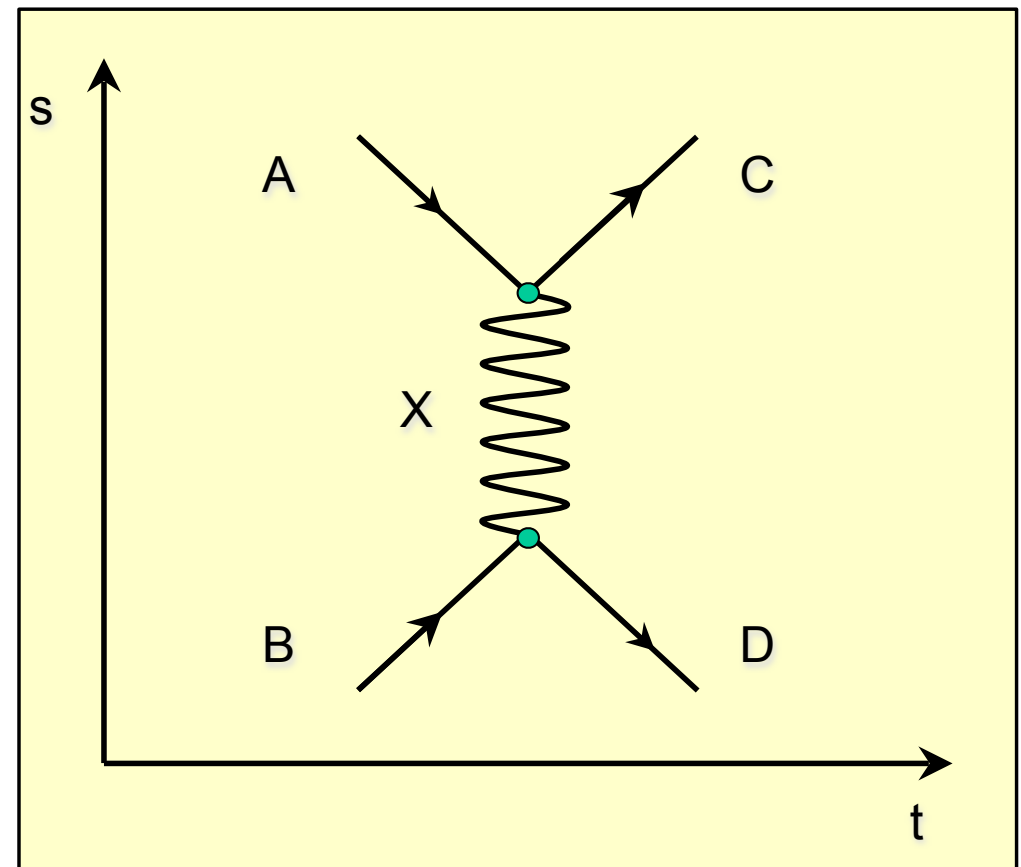
Διαγράμματα Feynman

Διαγράμματα Ανταλλαγής (Exchange Diagrams)

Το σωματίδιο A σκεδάζεται από το σωματίδιο B ανταλλάσσοντας το ενδιάμεσο σωματίδιο X. Τα αρχικά σωματίδια μετασχηματίζονται αντίστοιχα στα C και D.



Η αλληλεπίδραση όπως φαίνεται στο σύστημα του εργαστηρίου.

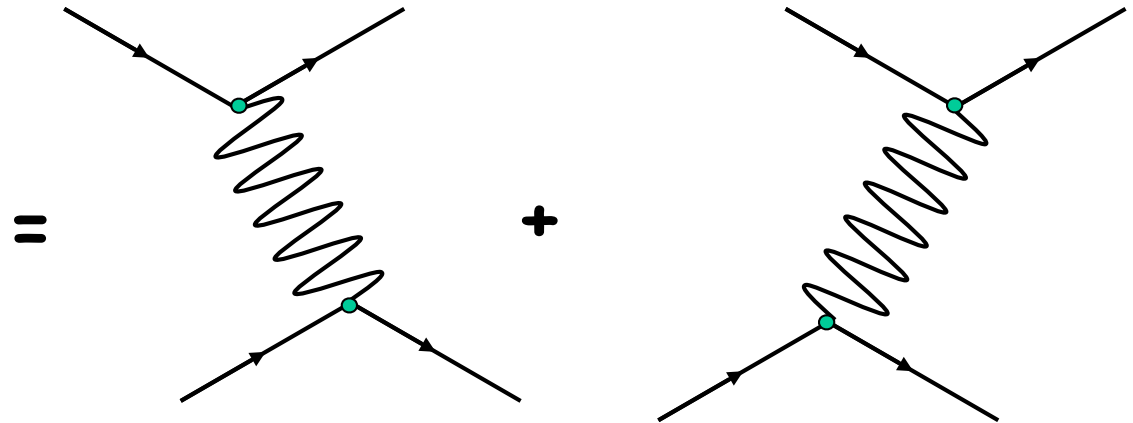
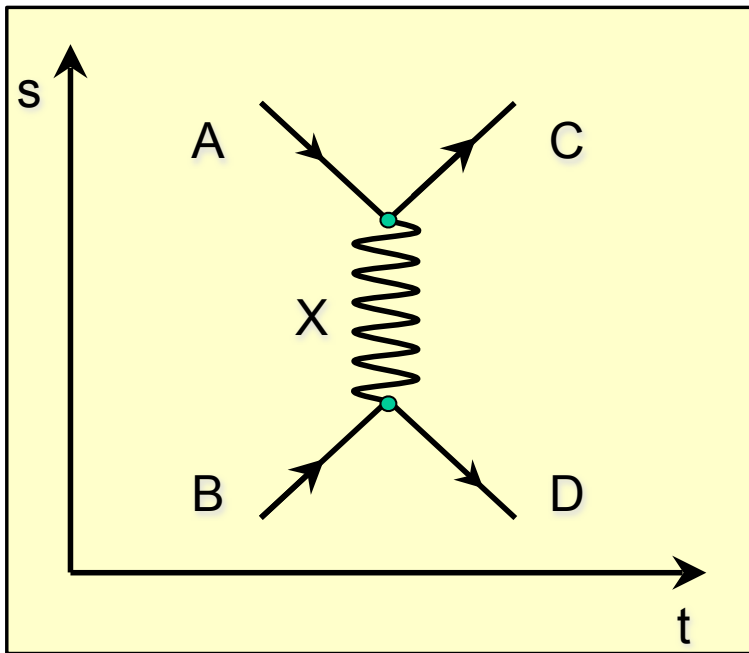


Αναπαράσταση με διάγραμμα Feynman.

Διαγράμματα Feynman

Διαγράμματα Ανταλλαγής (Exchange Diagrams)

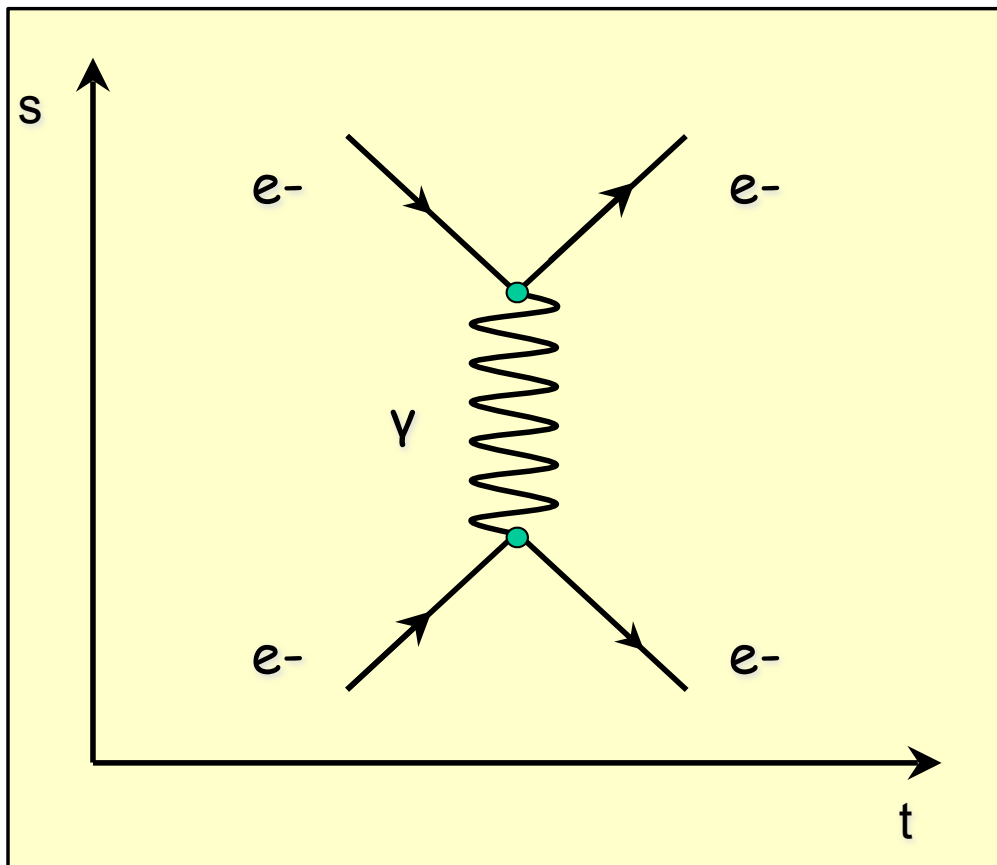
Δεν γνωρίζουμε αν το X εκπέμφθηκε από το A και απορροφήθηκε από το B ή αντίστροφα.



Διαγράμματα Feynman

Εικονικά Σωματάρια Ανταλλαγής (Virtual Particles)

Σε όλες τις προηγούμενες περιπτώσεις το σωματάρια X χαρακτηρίζεται σαν **εικονικό**. Για το χρόνο που υπάρχει υπακούει στην αρχή της αβεβαιότητας $\Delta E \cdot \Delta t \sim \hbar$ αλλά η μάζα του **διαφέρει** από τη μάζα ηρεμίας!



Παράδειγμα 1

Στην σκέδαση δύο ηλεκτρονίων (ηλεκτρομαγνητική αλληλεπίδραση) το ενδιάμεσο φωτόνιο ($X=\gamma$) έχει:

Ενέργεια: $E = 0$

Ορμή: $p = 2p_e$

και από τη σχέση $E^2 = p^2 c^2 + m^2 c^4$

Μάζα: $m = 2ip_e/c$

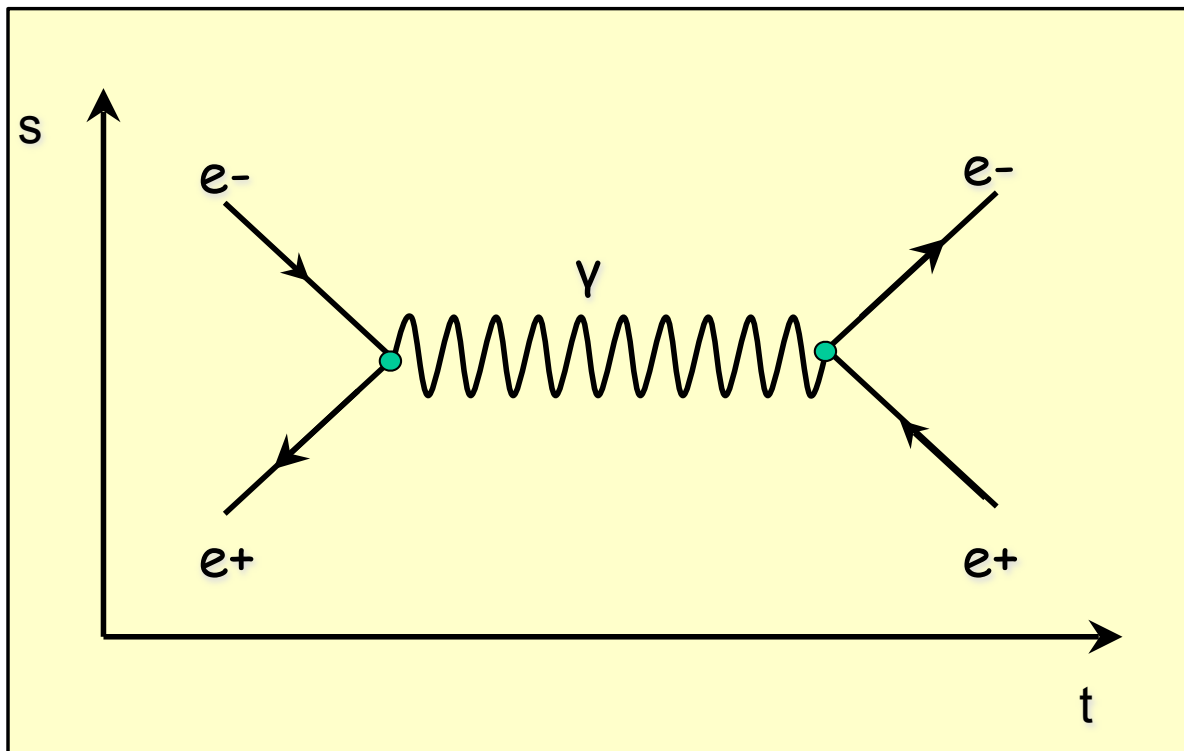
Φανταστική μάζα!

Διαγράμματα Feynman

Εικονικά Σωματίια Ανταλλαγής (Virtual Particles)

Παράδειγμα 2

Εξαύλωση ηλεκτρονίου-ποζιτρονίου (ηλεκτρομαγνητική αλληλεπίδραση)



Για το φωτόνιο ισχύει:

Ενέργεια: $E = 2E_e$

Ορμή: $p = 0$

και από τη σχέση

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

Μάζα: $m = 2E_e / c^2$

Άρα το φωτόνιο είναι
εικονικό!

Διαγράμματα Feynman

Εικονικά Σωματίδια Ανταλλαγής (Virtual Particles)

Το φωτόνιο του προηγούμενου παραδείγματος με $E=2E_e$ και $p=0$ συμπεριφέρεται τελείως αφύσικα παραβιάζοντας την βασική σχέση μεταξύ ενέργειας και ορμής

$$E = p c$$

Για την άρση της δυσκολίας αυτής στηριζόμαστε στην αρχή της αβεβαιότητας. Μπορούμε να δεχτούμε ότι το εικονικό αυτό φωτόνιο υφίσταται διακύμανση στην ενέργεια

$$\Delta E = 2E_e$$

(όσο είναι δηλαδή η πλεονάζουσα ενέργεια). Άρα το εικονικό φωτόνιο μπορεί να υπάρχει για χρονικό διάστημα:

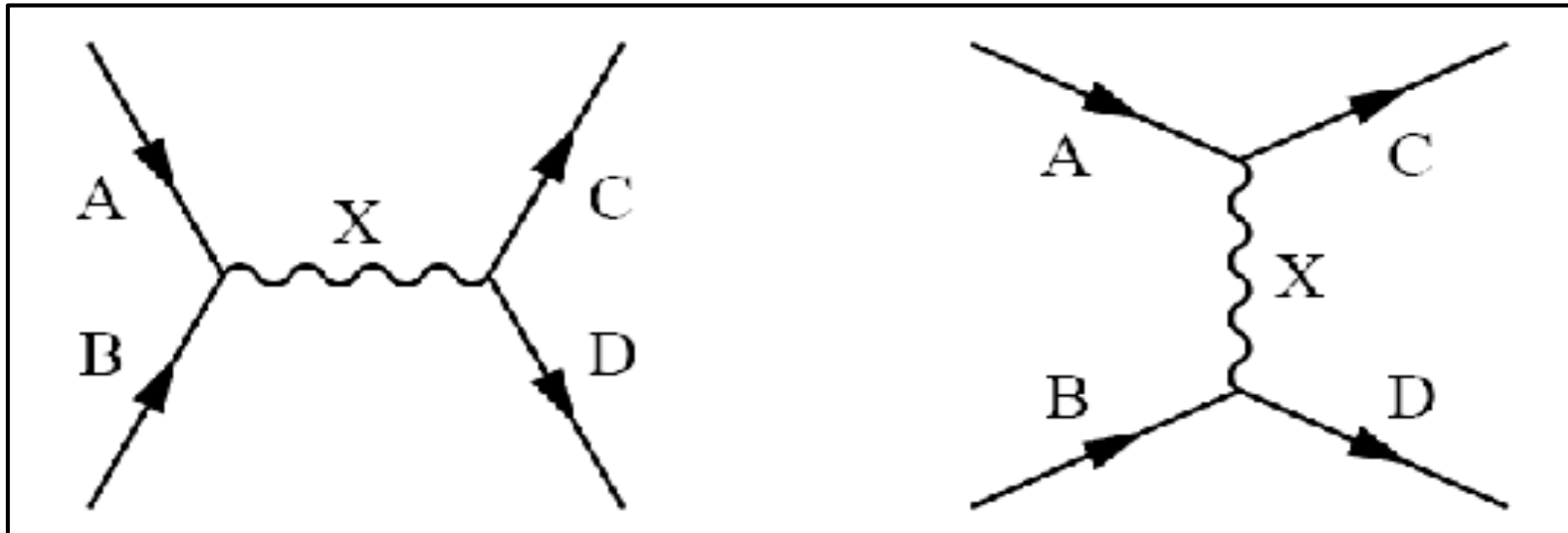
$$\Delta t \approx \hbar / 2E_e$$

Διαγράμματα Feynman

Γενικές Ιδιότητες

Ως επί το πλείστον τα διαγράμματα Feynman παριστούν διεργασίες της μορφής:

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

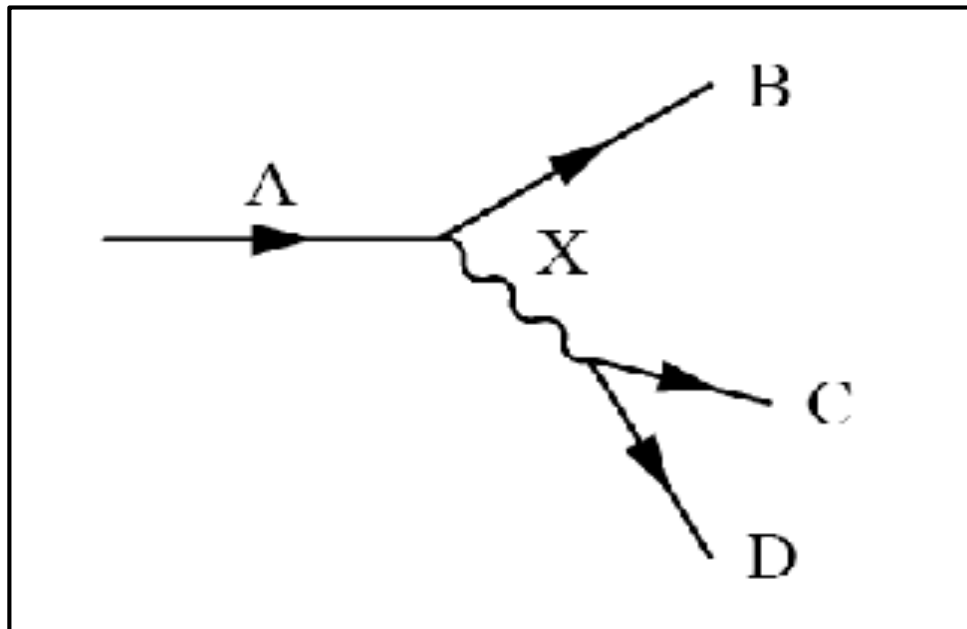


Διαγράμματα Feynman

Γενικές Ιδιότητες

ή της μορφής:

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



A, B, C, D

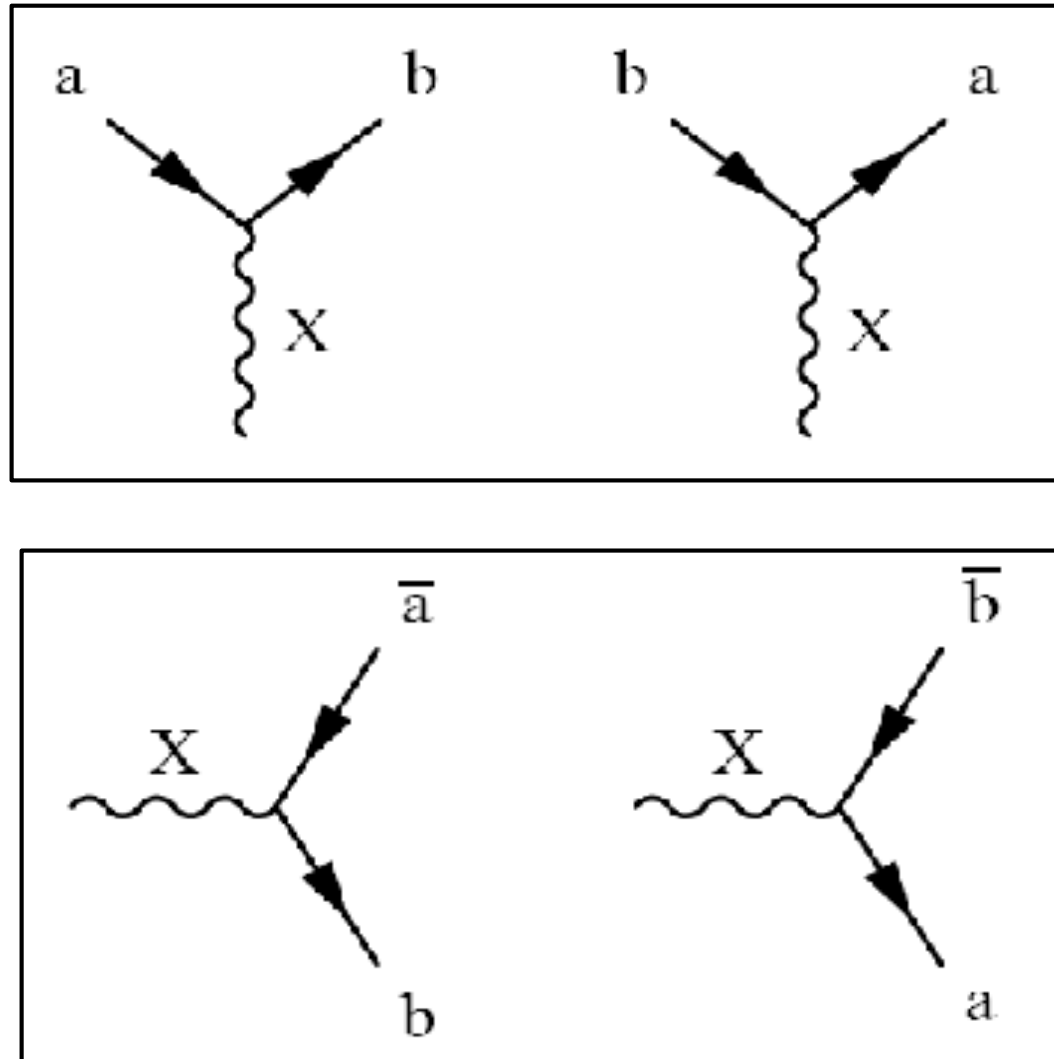
- Κουάρκ
- Λεπτόνια
- Αντικουάρκ
- Αντιλεπτόνια

X

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

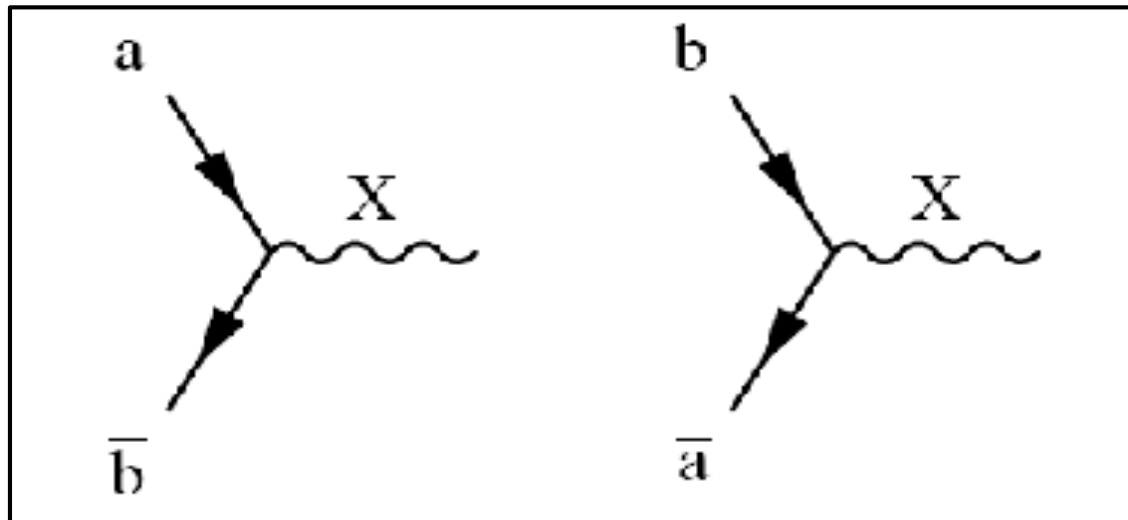
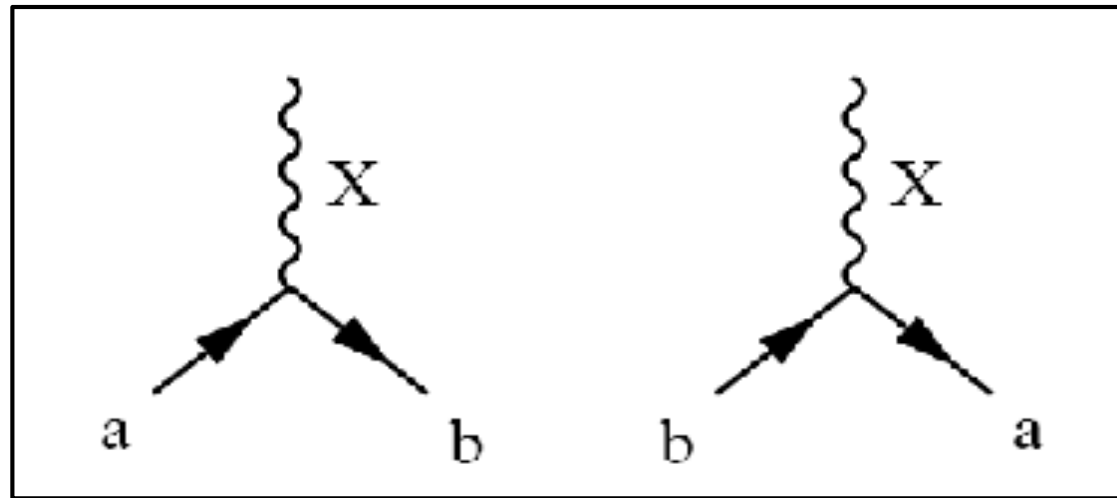
Διαγράμματα Feynman

Γενικές Ιδιότητες: Περιστροφή διαγραμμάτων



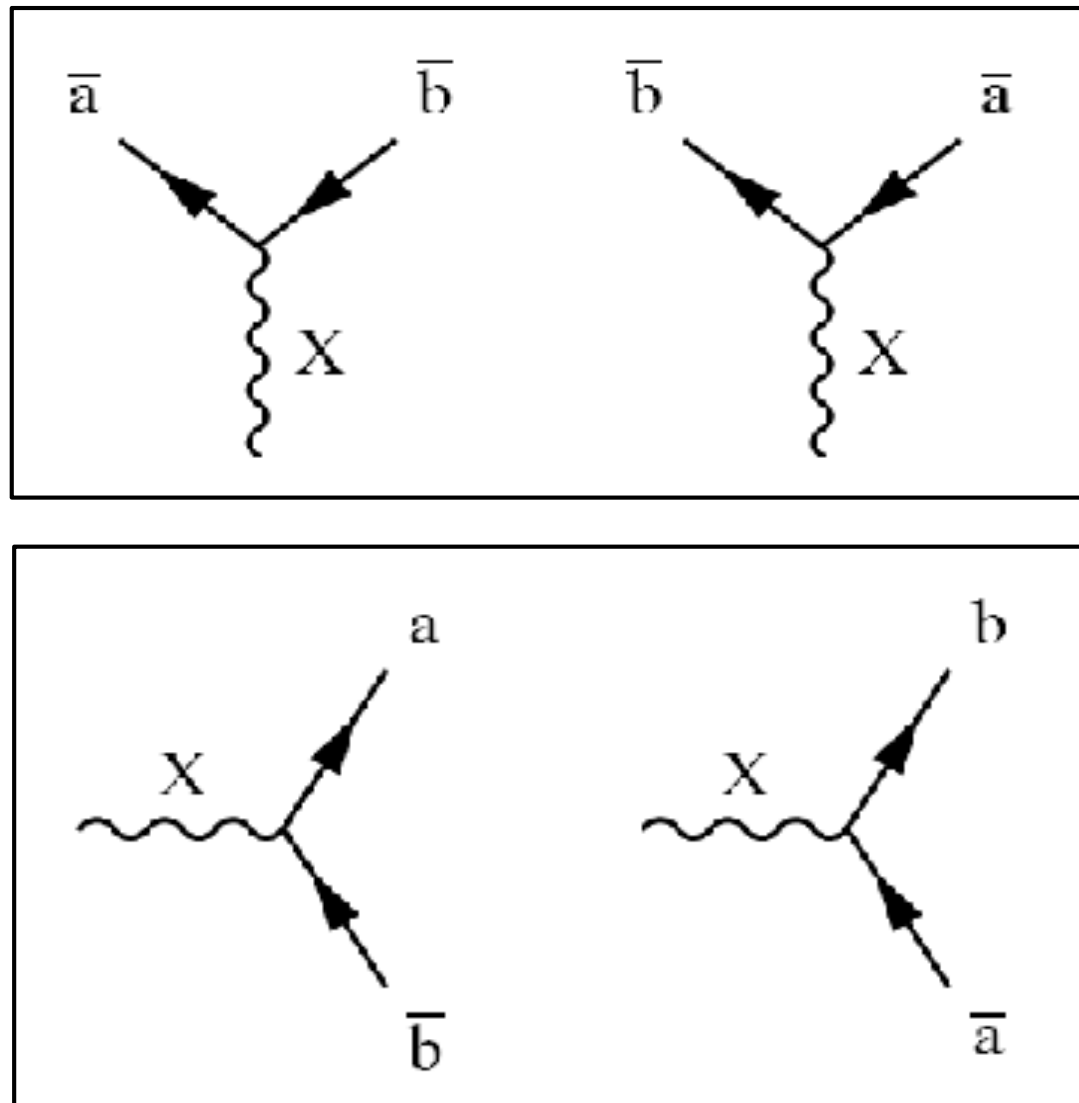
Διαγράμματα Feynman

Γενικές Ιδιότητες: Περιστροφή διαγραμμάτων



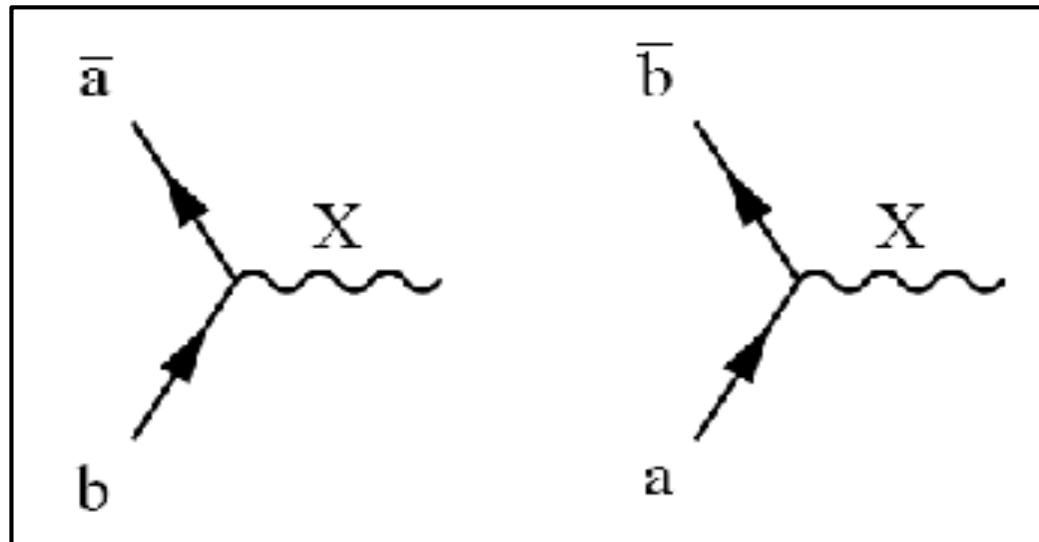
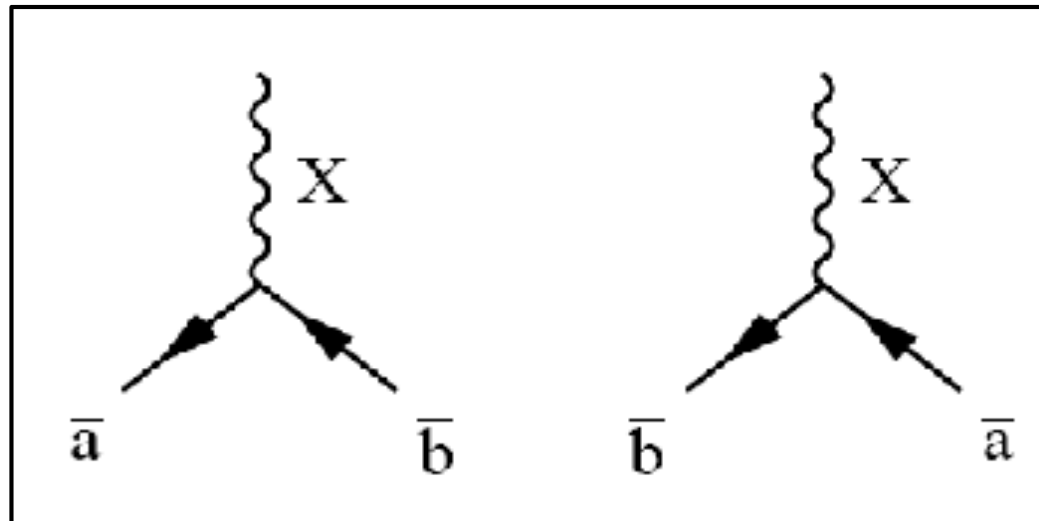
Διαγράμματα Feynman

Γενικές Ιδιότητες: Περιστροφή διαγραμμάτων



Διαγράμματα Feynman

Γενικές Ιδιότητες: Περιστροφή διαγραμμάτων



Διαγράμματα Feynman

Γενικές Ιδιότητες

Σε κάθε κορυφή διαγραμμάτων Feynman διατηρούνται:

- Το Φορτίο
- Ο Βαρυονικός Αριθμός
- Ο Λεπτονικός Αριθμός

Η γεύση του quark διατηρείται στις παρακάτω αλληλεπιδράσεις:

- Ισχυρές ($X = \text{gluon}$)
- Ηλεκτρομαγνητικές ($X = \text{φωτόνιο } \gamma$)
- Ασθενείς μόνο όταν $X = Z^0$ και **όχι** στην περίπτωση $X = W^+$ ή $X = W^-$

Διαγράμματα Feynman

Δυνάμεις

Ασθενείς δυνάμεις: Σε όλα τα Quarks και Λεπτόνια

Ηλεκτρομαγνητικές: Σε κάθε φορτισμένο σωματίδιο

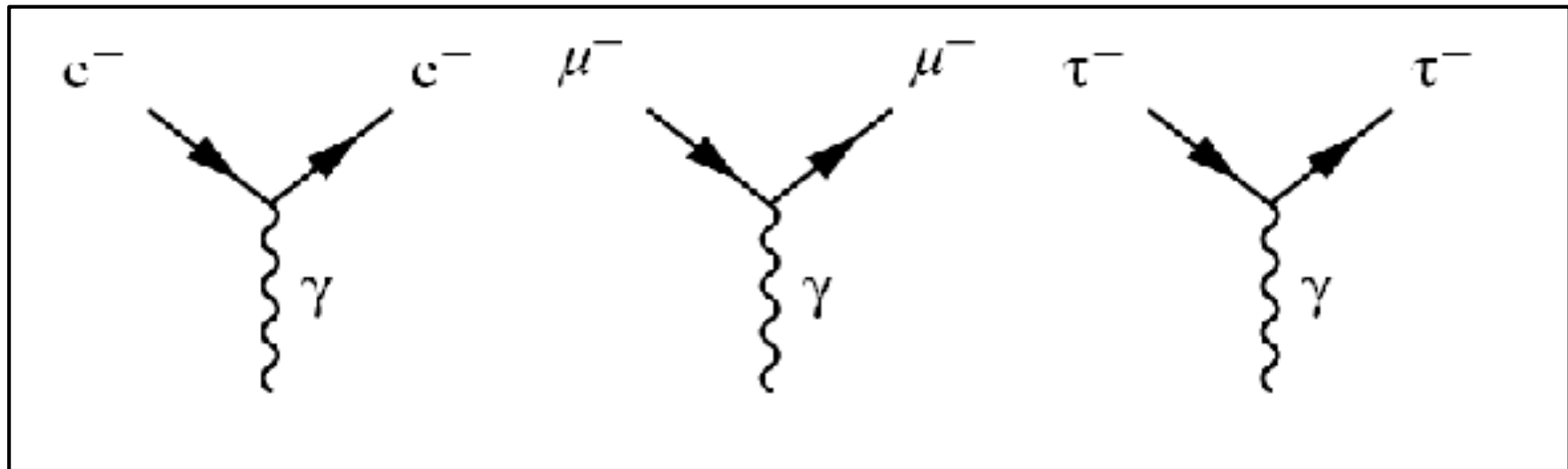
Ισχυρές: Μόνο μεταξύ των Quarks

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

Διαγράμματα Feynman

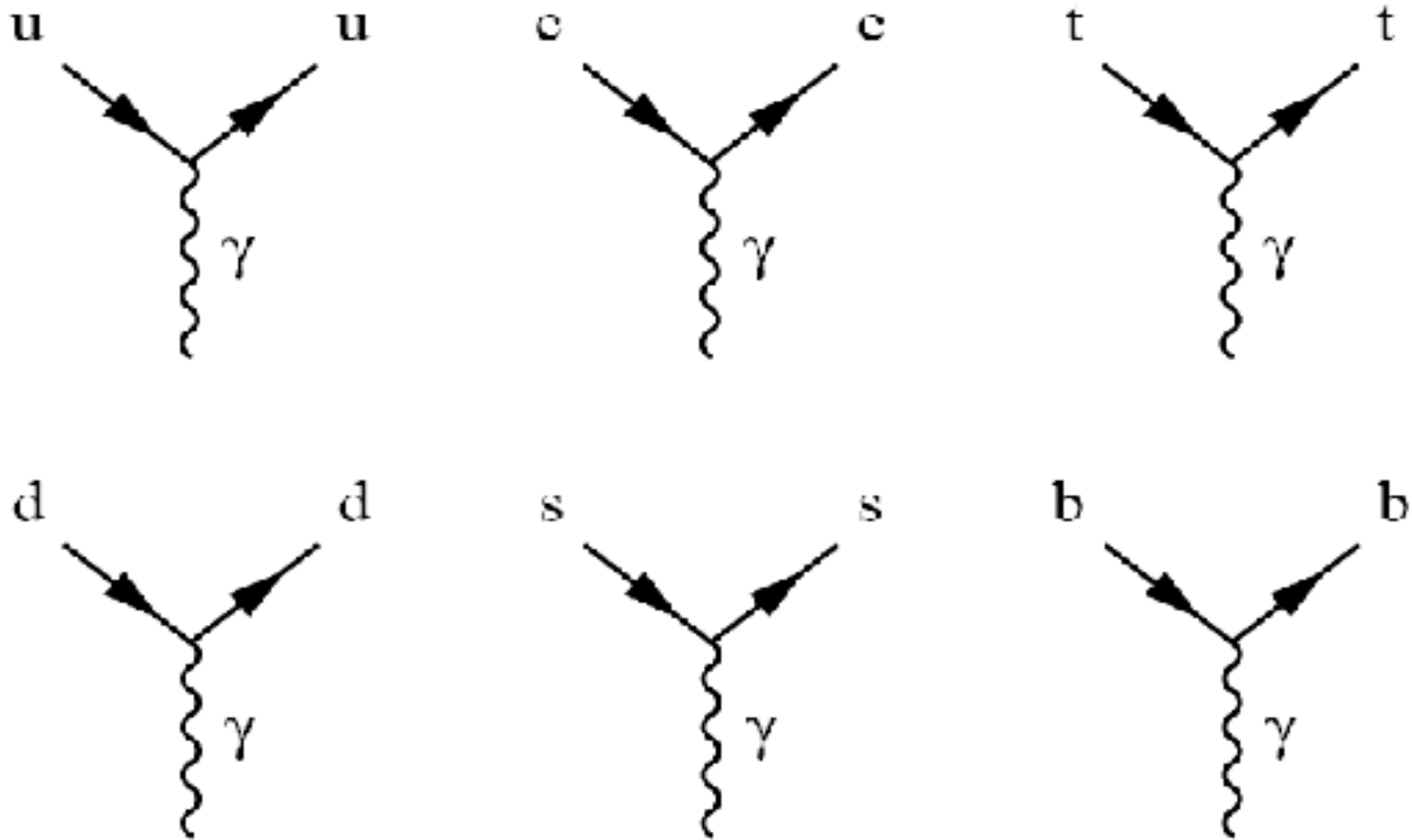
Ηλεκτρομαγνητικές Αλληλεπιδράσεις

$X = \text{φωτόνιο } (\gamma) \text{ με σύζευξη μόνο σε φορτισμένο σωματίο}$



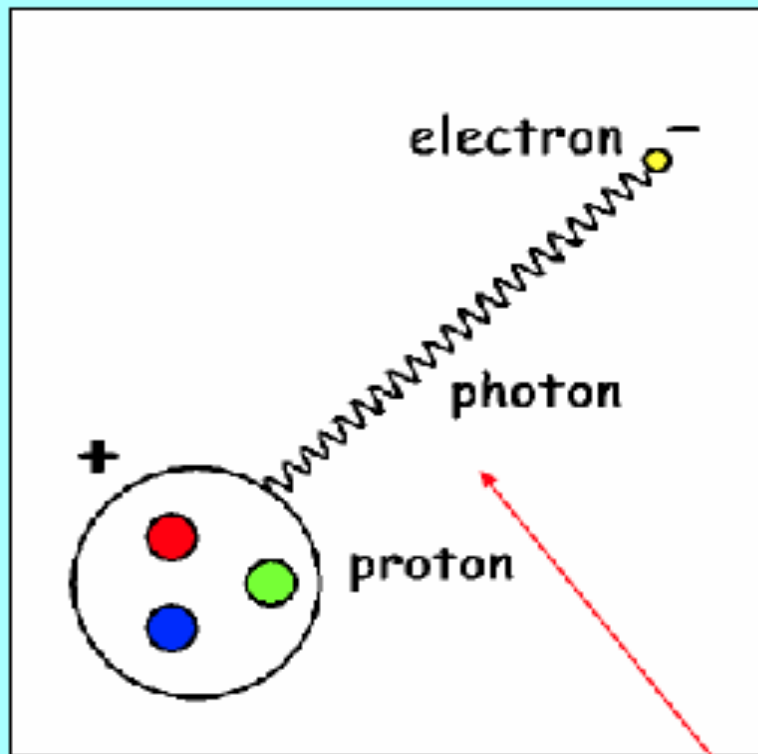
Διαγράμματα Feynman

Ηλεκτρομαγνητικές Αλληλεπιδράσεις

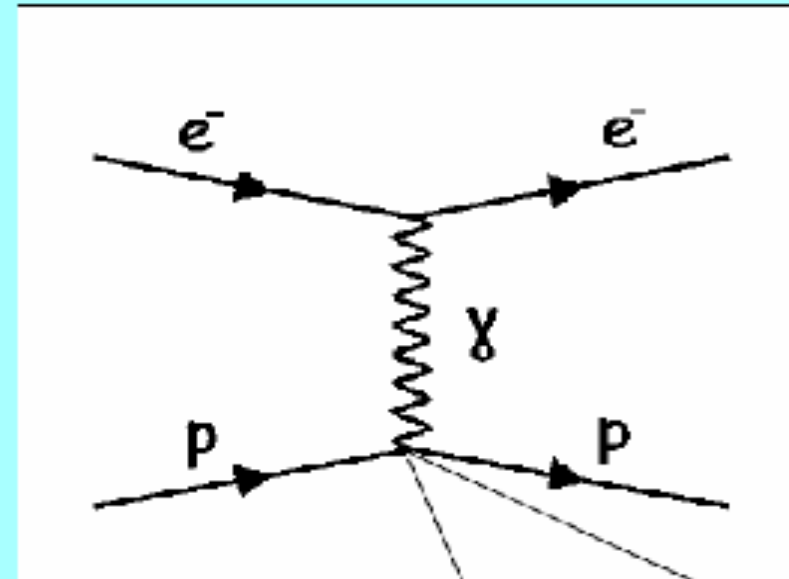


Διαγράμματα Feynman

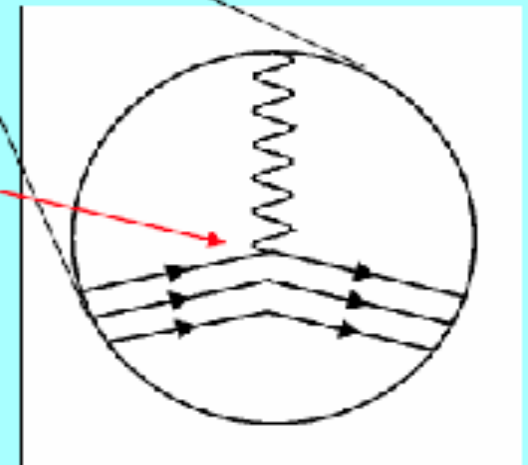
Ηλεκτρομαγνητικές Αλληλεπιδράσεις



Photons mediate the force between protons and electrons.

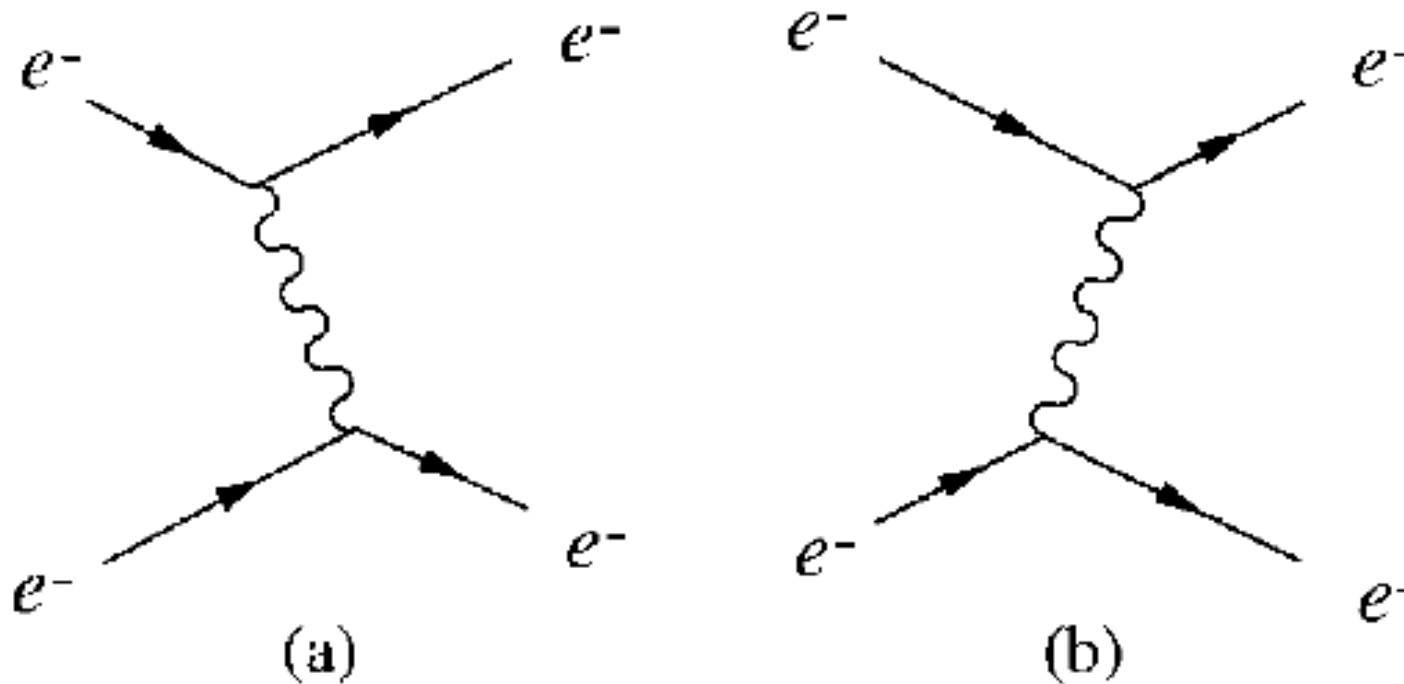


At a particle physics level the interaction is with the quarks



Διαγράμματα Feynman

Ηλεκτρομαγνητικές Αλληλεπιδράσεις

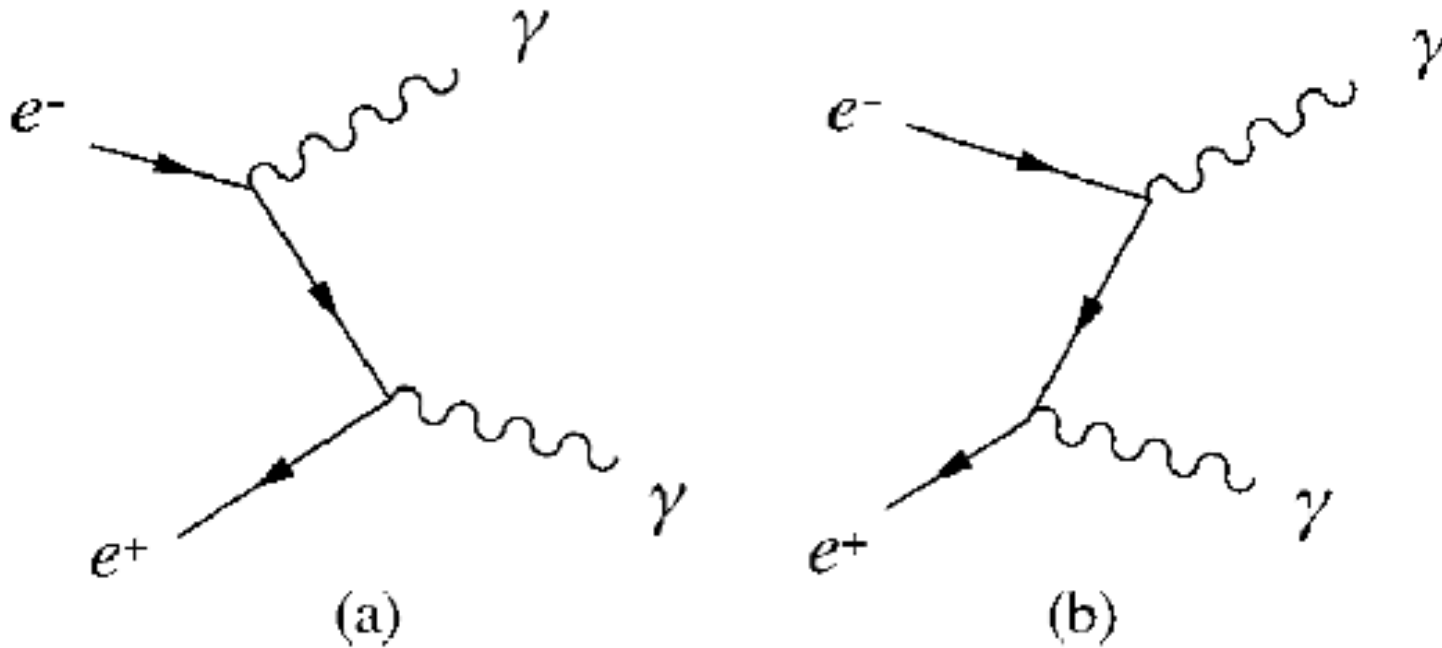


$$e^- + e^- \rightarrow e^- + e^-$$

Σκέδαση ηλεκτρονίου-ηλεκτρονίου με απλή ανταλλαγή φωτονίου.

Διαγράμματα Feynman

Ηλεκτρομαγνητικές Αλληλεπιδράσεις

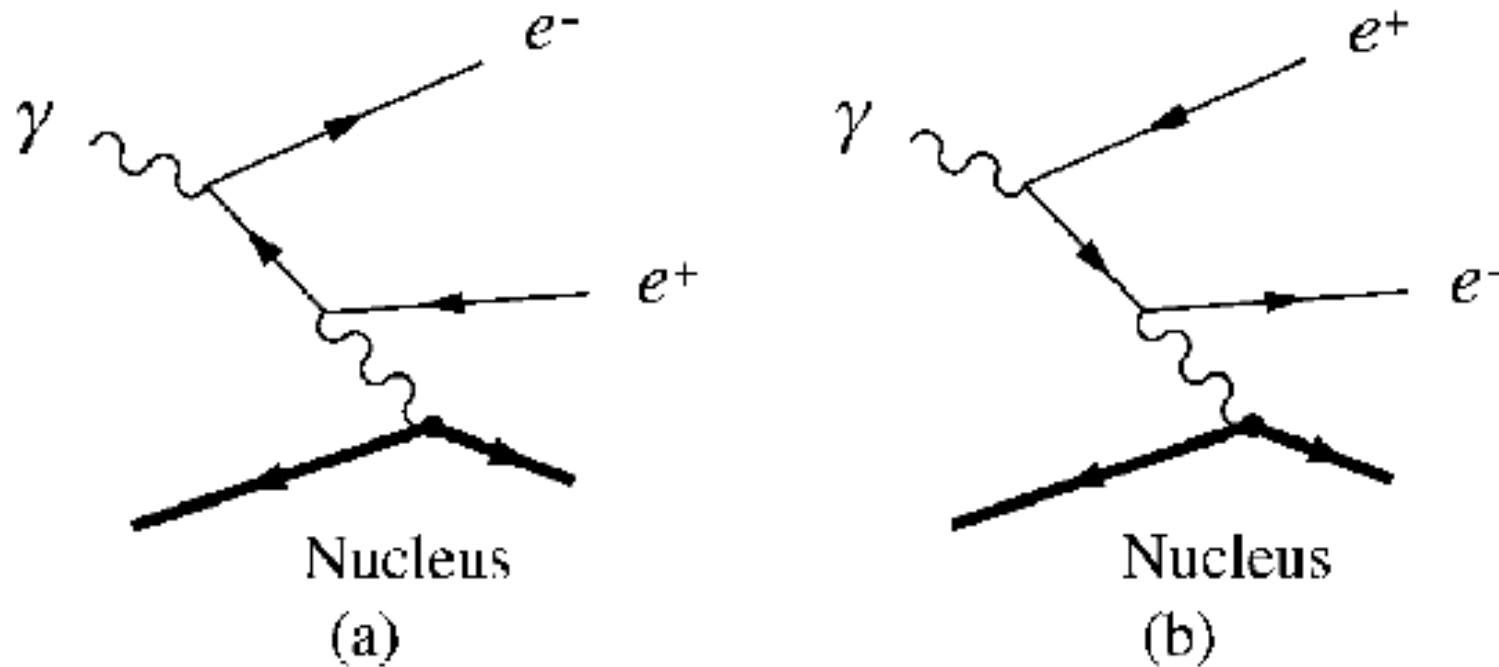


$$e^- + e^+ \rightarrow \gamma + \gamma$$

Εξαύλωση ηλεκτρονίου-ποζιτρονίου σε δύο φωτόνια.

Διαγράμματα Feynman

Ηλεκτρομαγνητικές Αλληλεπιδράσεις



$$\gamma + \text{Nucleus}(Z, A) \rightarrow e^- + e^+$$

Δίδυμη γένεση.

Διαγράμματα Feynman

Ασθενείς Αλληλεπιδράσεις

Στην ηλεκτρασθενή θεωρία των Glashow, Salam και Weinberg (1968) προτάθηκε η ισότητα της σταθεράς σύζευξης g των $W^\pm$ και Z^0 με τα λεπτόνια και τα κουάρκ, με την αντίστοιχη σταθερά των φωτονίων:

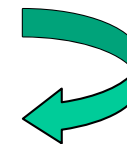
$$g = e$$

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

Για $q^2 \rightarrow 0$

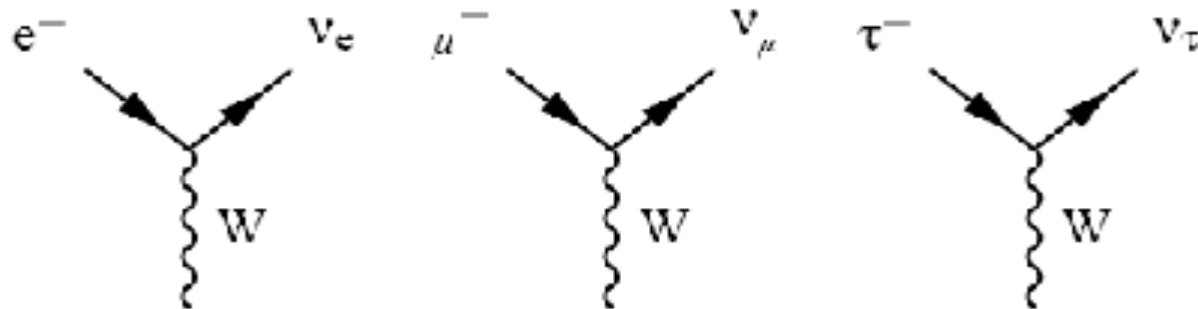
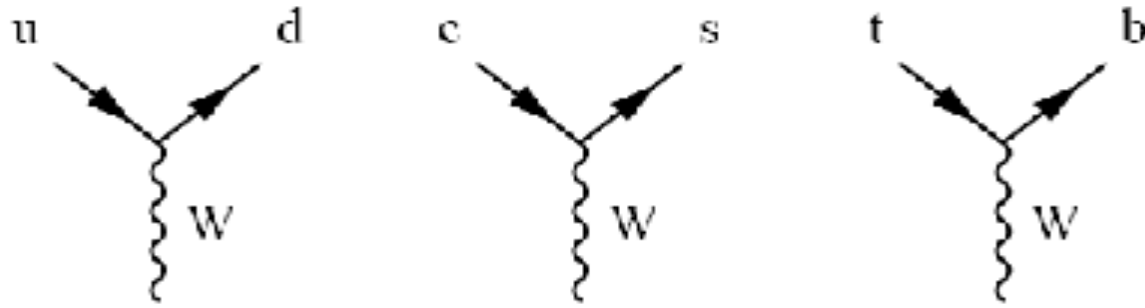
$$f(q^2 \rightarrow 0) = \frac{g^2}{M_{W,Z}^2} = G \approx 10^{-5} \text{ GeV}^{-2}$$

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



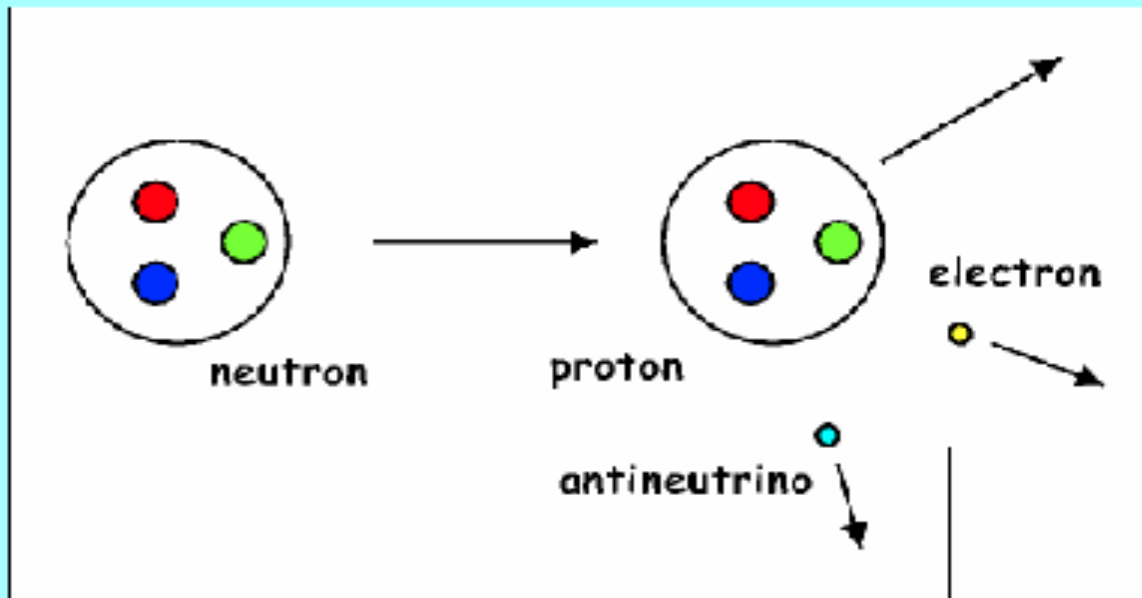
Διαγράμματα Feynman

Ασθενείς Αλληλεπιδράσεις



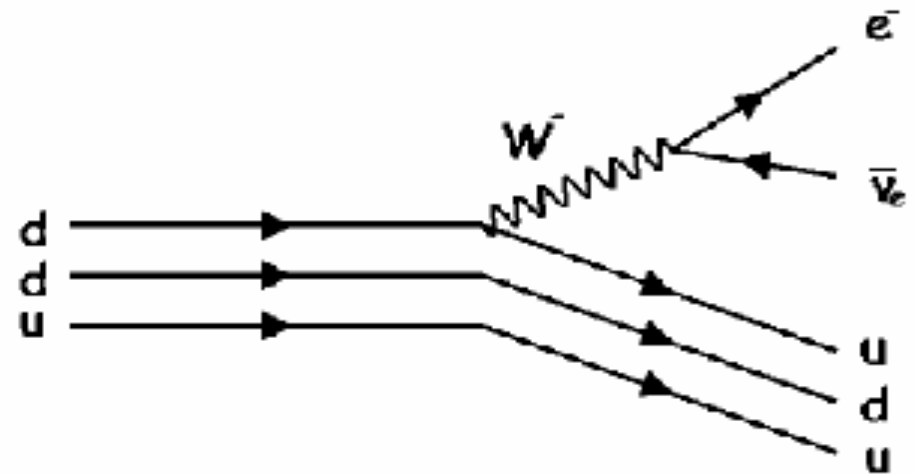
Διαγράμματα Feynman

Ασθενείς Αλληλεπιδράσεις



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

*Mediated by charged
 W exchange*

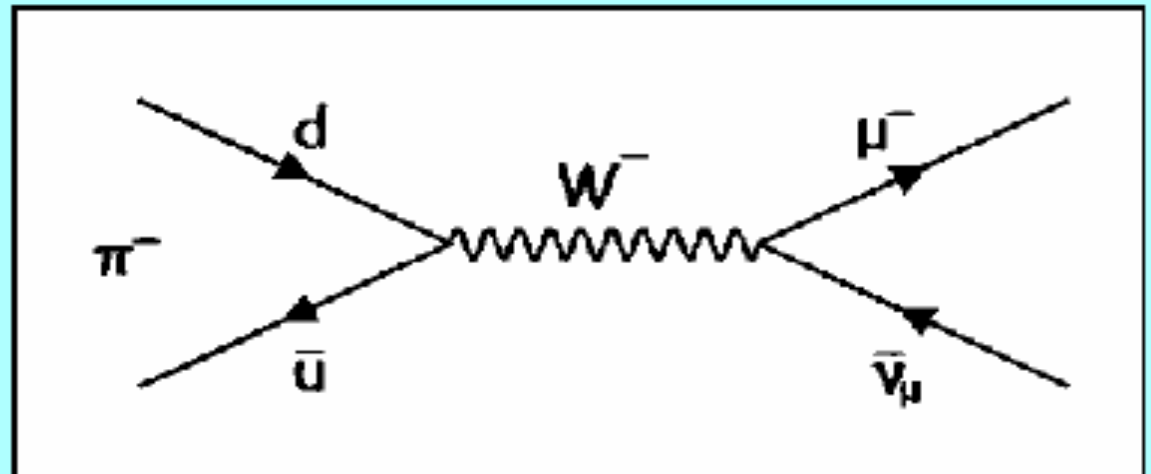


Διαγράμματα Feynman

Ασθενείς Αλληλεπιδράσεις

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

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

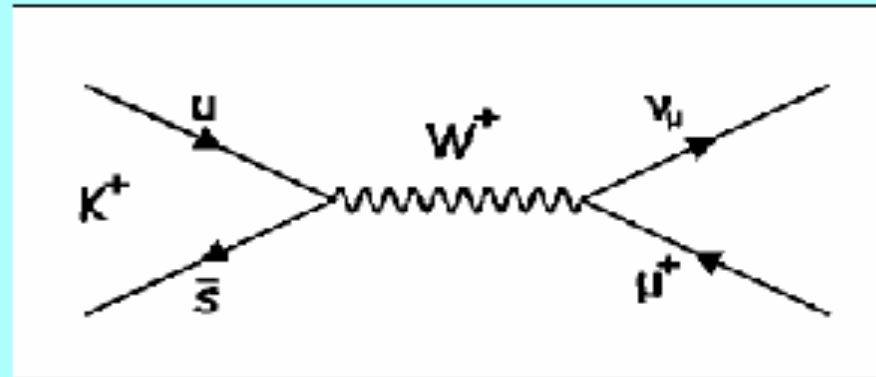


Διαγράμματα Feynman

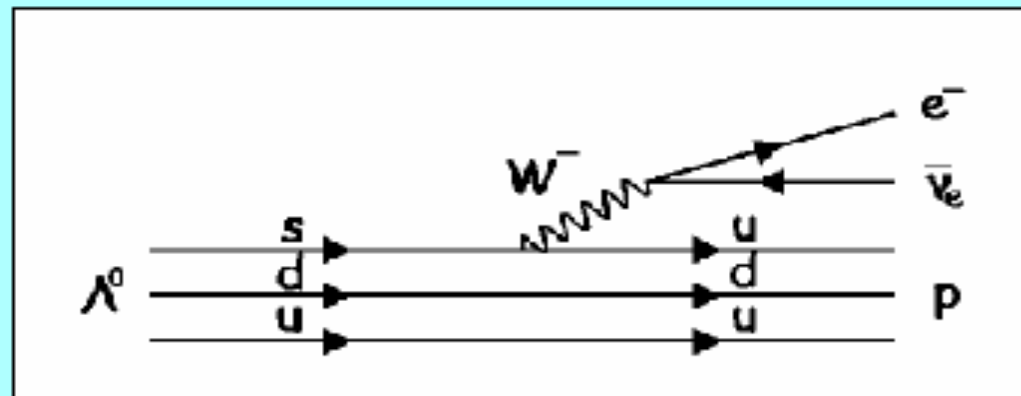
Ασθενείς Αλληλεπιδράσεις

$\Delta S = 1$ (Strangeness changes)

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

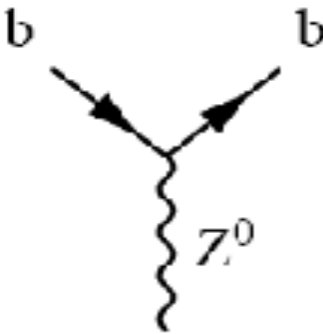
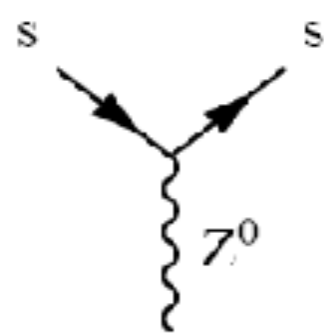
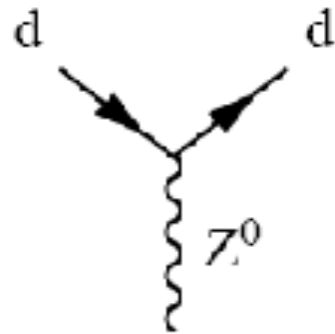
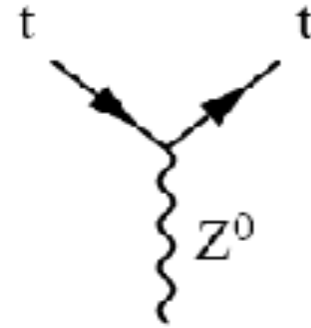
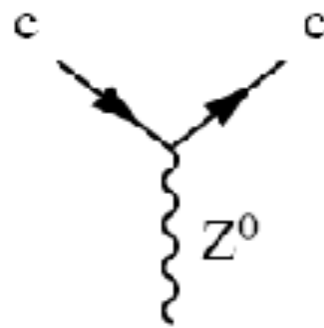
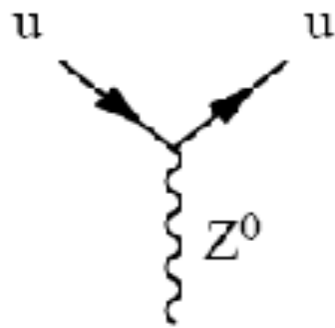


$$\Lambda^0 \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$$



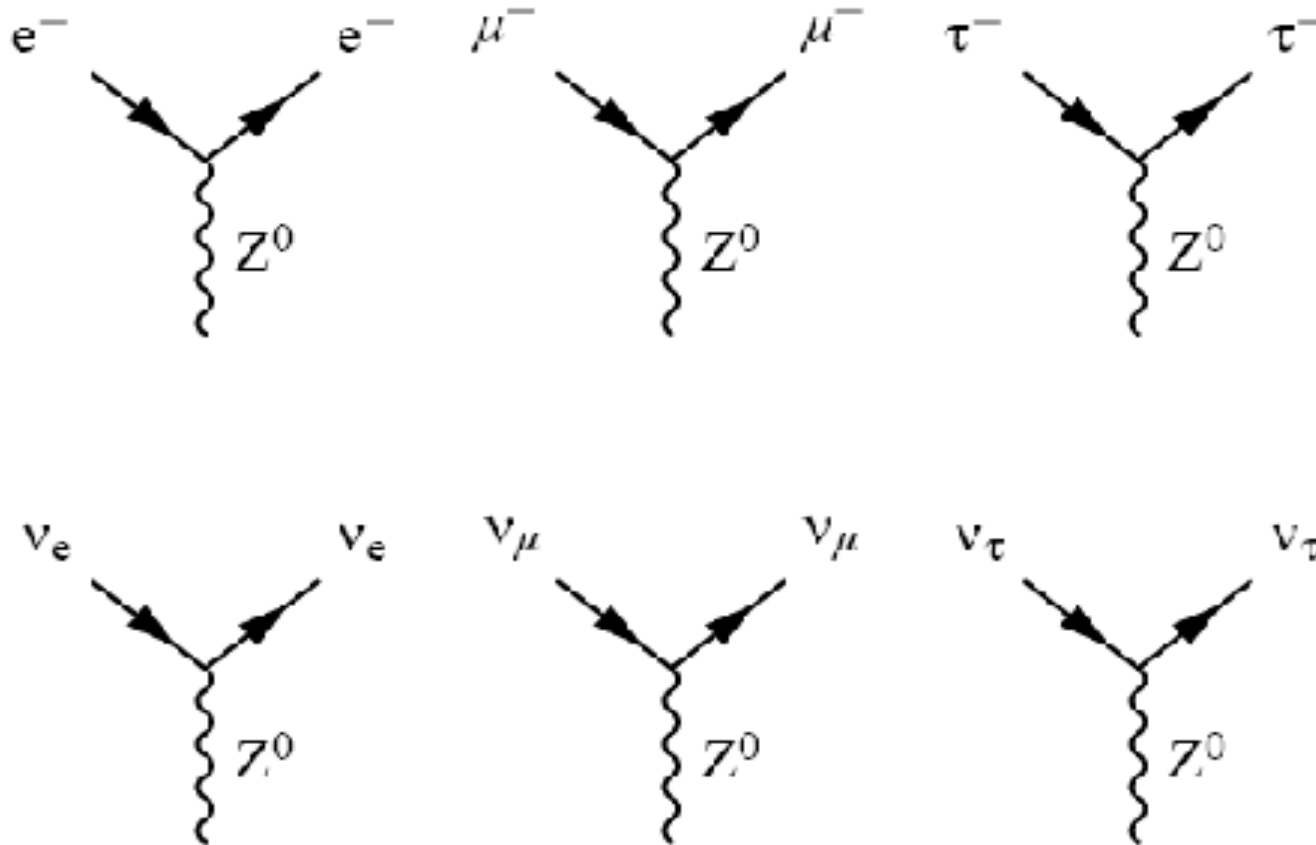
Διαγράμματα Feynman

Ασθενείς Αλληλεπιδράσεις



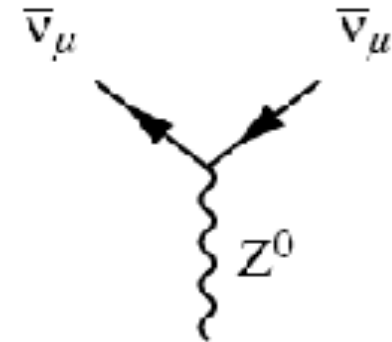
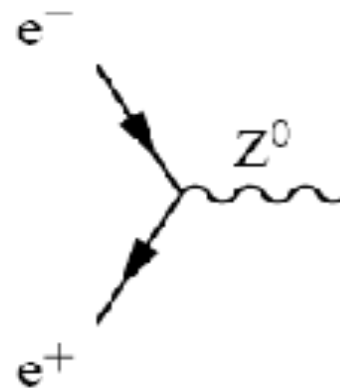
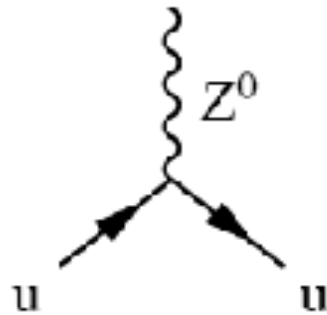
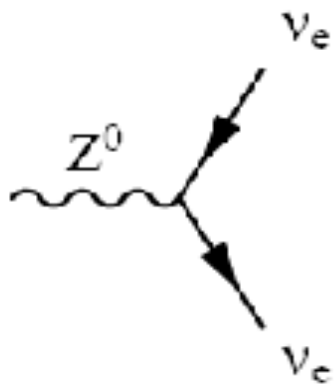
Διαγράμματα Feynman

Ασθενείς Αλληλεπιδράσεις



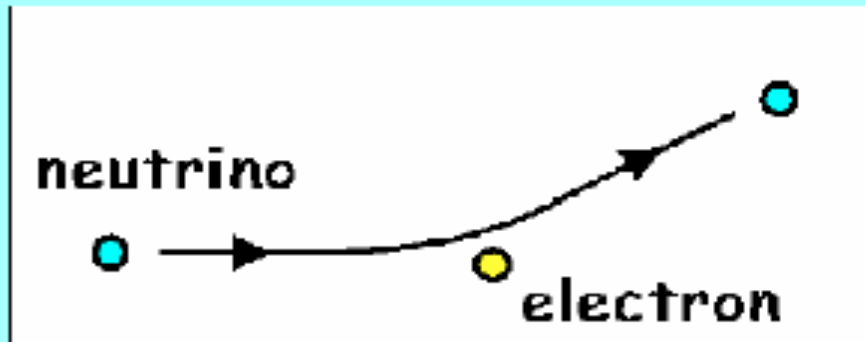
Διαγράμματα Feynman

Ασθενείς Αλληλεπιδράσεις



Διαγράμματα Feynman

Ασθενείς Αλληλεπιδράσεις



*Mediated by neutral
 Z exchange*

Neutrino scattering
off an electron

