

Διαγράμματα Feynman

Ασθενείς Αλληλεπιδράσεις

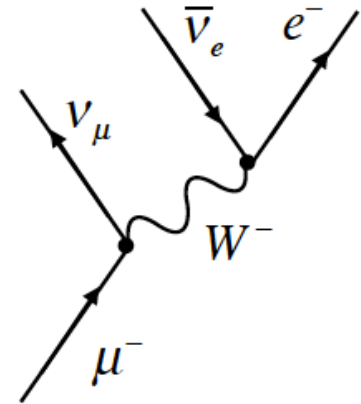
Διάγραμμα Feynman – Ασθενείς αλληλεπιδράσεις

- Τα δυο μποζόνια W^\pm και Z^0 , φορείς των ασθενών αλληλεπιδράσεων σχεδιάζονται με κυματοειδή μορφή όπως ακριβώς και τα φωτόνια
- Τα μποζόνια συνδέουν συμπαγείς γραμμές ή γραμμή που αναπαριστούν σωματίδια ή αντισωματίδια, όπως συμβαίνει και με τα φωτόνια.
- Τα W^\pm από τη στιγμή που έχουν φορτίο είτε $+$ ή $-$ θα πρέπει να συνδέονται σε συμπαγείς γραμμές σωματιδίων με φορτία που διαφέρουν κατά μια μονάδα φορτίου
 - Επομένως οι δυνατότητες που προσφέρονται είναι το W να συνδεθεί με τα ακόλουθα ζεύγη σωματιδίων:

$e - \nu_e$	$u - d$	$c - d$	$t - d$
$\mu - \nu_\mu$	$u - s$	$c - s$	$t - s$
$\tau - \nu_\tau$	$u - b$	$c - b$	$t - b$
 - Τα W^\pm μεταφέρουν το φορτισμένο ρεύμα (**charged current**) της ασθενούς αλληλεπίδρασης
- Το Z^0 που είναι ουδέτερο συμπεριφέρεται ανάλογα με το φωτόνιο
 - Το Z^0 δεν συνδέει ωστόσο ποτέ quarks διαφορετικής γεύσης
 - Το Z^0 μεταφέρει το ουδέτερο ρεύμα (**neutral current**) της ασθενούς αλληλεπίδρασης

Διάγραμμα της διάσπασης του μιονίου

- ❑ Η διεργασία είναι $\mu^- \rightarrow e^- \bar{\nu}_e \nu_\mu$
 - ❑ Το μιονίο εκπέμπει ένα W^- και μετατρέπεται σε ένα νετρίνο μιονίου
 - ❑ Το W^- διασπάται σε ένα ηλεκτρόνιο e^- και ένα αντι-νετρίνο ηλεκτρονίου
 - ❑ Το W^- διασπάται σε ένα ηλεκτρόνιο e^- και ένα αντι-νετρίνο ηλεκτρονίου
- Το φορτίο διατηρείται σε κάθε κορυφή του διαγράμματος
- Η γέυση του σωματιδίου αλλάζει σε κάθε κορυφή όταν ακολουθούμε τα διανύσματα



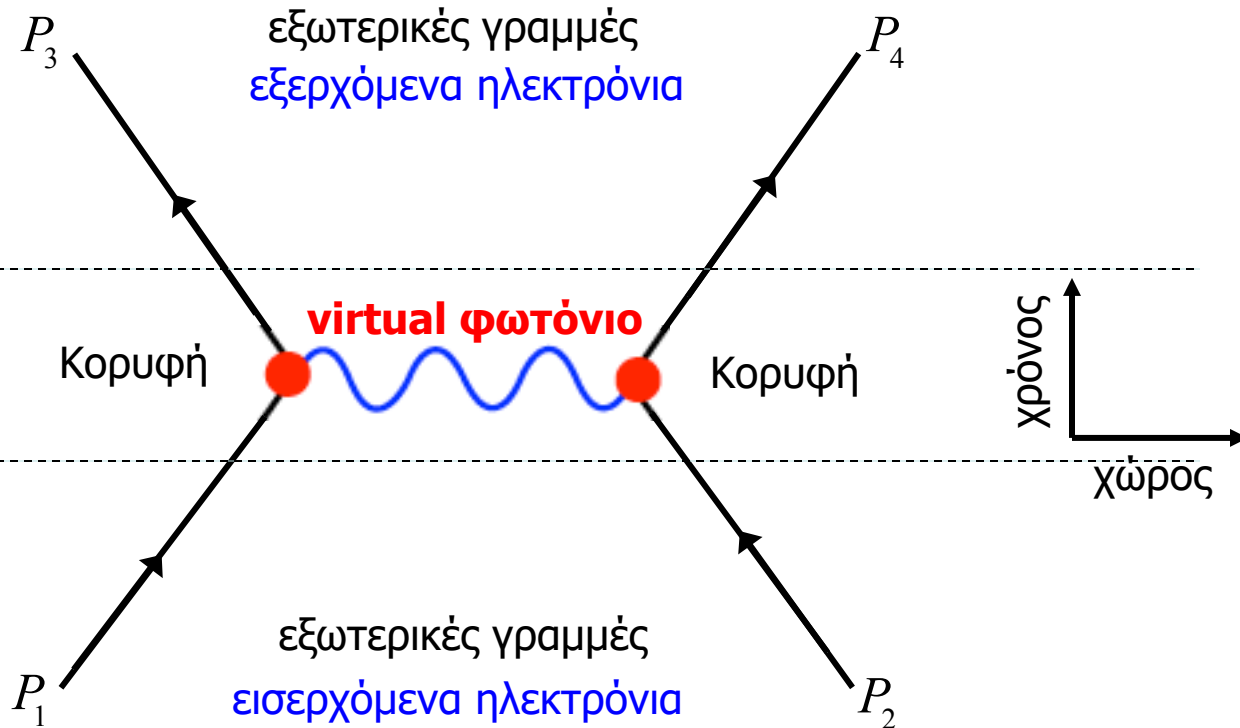
Διάγραμμα Feynman για σκέδαση e^-e^-

□ Συστατικά του διαγράμματος

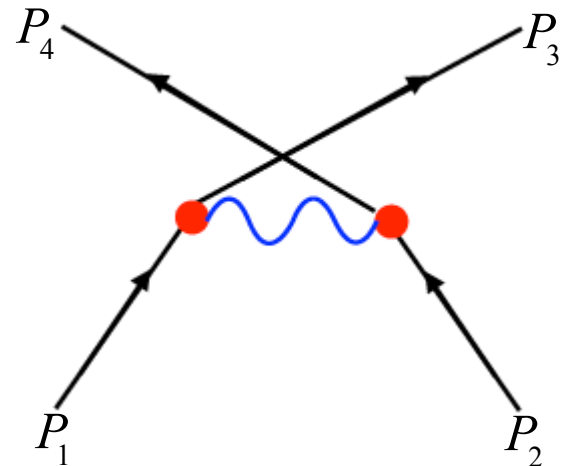
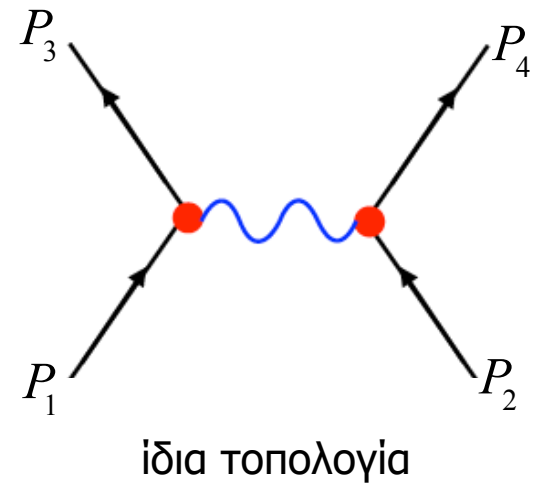
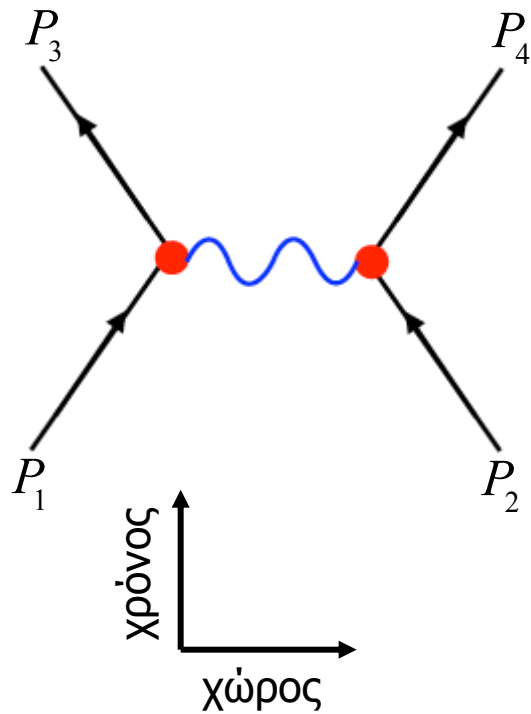
Μέλλον

Σκέδαση

Παρελθόν



Δυο διαφορετικές τοπολογίες

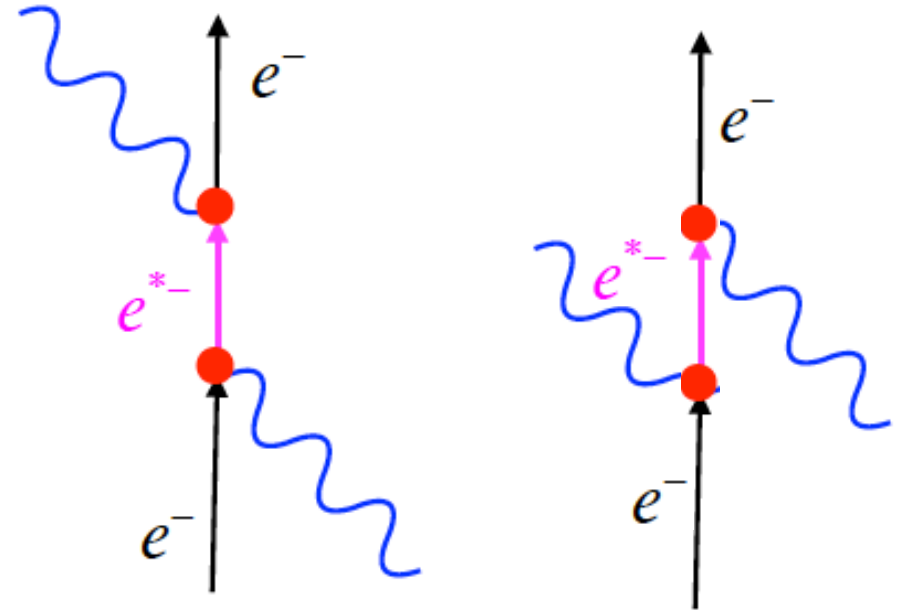


Εξωτερικά φωτόνια

Εξερχόμενα φωτόνια και ηλεκτρόνια

virtual ηλεκτρόνια

Εισερχόμενα ηλεκτρόνια και φωτόνια



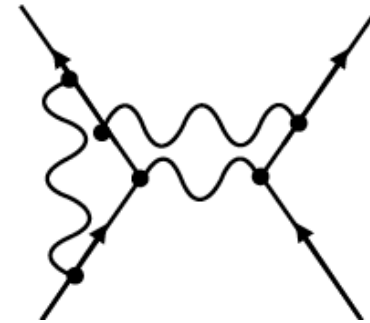
Υπάρχει ακόμα ένα διάγραμμα με τα φωτόνια ανταλλαγμένα στις κορυφές

Διαγράμματα υψηλότερης τάξης

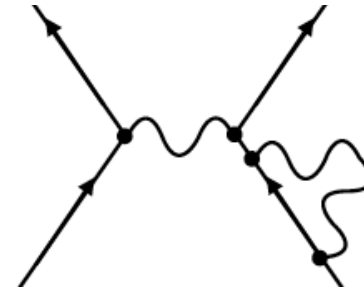
Θα μπορούσαμε να έχουμε περισσότερες εσωτερικές γραμμές φωτονίων.

Στα διαγράμματα δίπλα έχουμε δυο παραδείγματα:

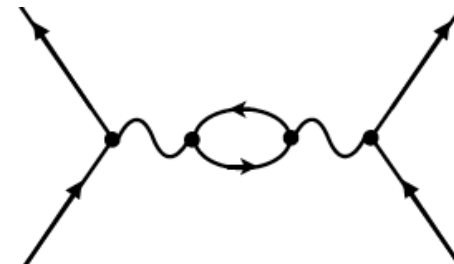
- Θα μπορούσαμε να προσθέσουμε ένα φωτόνιο μεταξύ οποιωνδήποτε συμπαγών γραμμών



Θα μπορούσαμε να έχουμε ένα φωτόνιο το οποίο αλληλεπιδρά με την ίδια γραμμή (ίδιο σωματίδιο)



Θα μπορούσαμε να βάλουμε ένα βρόγχο λεπτονίων (ηλεκτρονίου, μιονίου ή ταυ) σε οποιαδήποτε γραμμή φωτονίου



Διαγράμματα υψηλότερης τάξης

Κάθε διάγραμμα αντιστοιχεί σε ένα κβαντομηχανικό πλάτος.

Το πλάτος αυτό περιέχει **σταθερές σύζευξης** από τις κορυφές που υπάρχουν φωτόνια και παράγοντες **διαμεσολαβητών** (**propagators**) **σωματιδίων** που αντιπροσωπεύουν οι εσωτερικές **δυναμικές γραμμές** (**virtual particles**)

Για φωτόνια που αλληλεπιδρούν με σωματίδια φορτίου 1, η σταθερά σύζευξης είναι $\sqrt{4\pi a_{em}} = 0.3024$ όπου $a_{em} = 1/137.036$ η σταθερά λεπτής υφής

Προσθέτοντας ένα φωτόνιο (μία κορυφή) ή ένα βρόγχο (δύο κορυφές)

το πλάτος ελαττώνεται κατά ένα παράγοντα περίπου $\sqrt{4\pi a_{em}}$ ή $\left(\sqrt{4\pi a_{em}}\right)^2$

αντίστοιχα ή διαφορετικό το τετράγωνο του πλάτους ή η πιθανότητα κατά ένα παράγοντα του τετραγώνου 0.3024 ή $(0.3024)^2 \approx 0.01$ αντίστοιχα

Επομένως το διάγραμμα με τις λιγότερες κορυφές χαμηλότερης τάξης κυριαρχεί

Διαγράμματα υψηλότερης τάξης

Όταν υπάρχει ένας βρόγχος που μπορεί να είναι ένα μείγμα φωτονίων και σωματιδίων, η ορμή των σωματιδίων μέσα στον βρόγχο δεν προσδιορίζεται από τα αρχικά και τελικά σωματίδια.

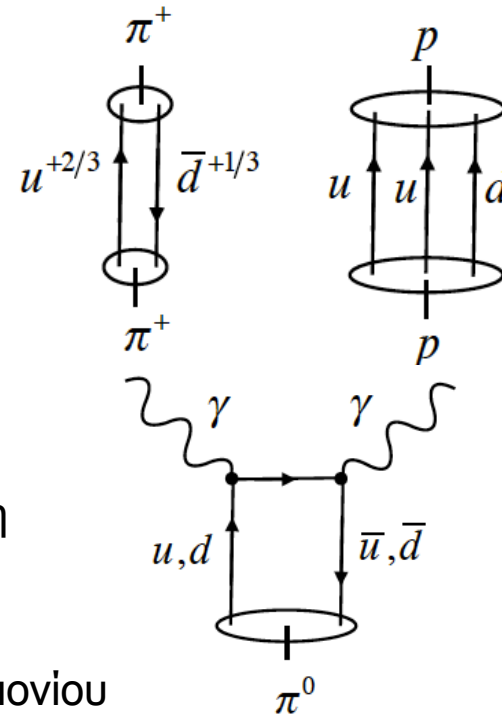
Στην περίπτωση αυτή θα πρέπει να ολοκληρώσουμε ως προς όλες τις δυνατές τιμές ορμής έως το άπειρο. Οι παράγοντες που οφείλονται στα διαμεσολαβητικά σωματίδια γίνονται πολύ μικροί όταν οι εσωτερικές ορμές γίνονται πολύ μεγάλες, αλλά συχνά αυτό δεν αποτρέπει το ολοκλήρωμα να γίνει άπειρο

Αλλά τότε, τα διαγράμματα υψηλότερης τάξης κυριαρχούν και δίνουν άπειρο.

Μετά από δεκαετίες δουλειάς των θεωρητικών το πρόβλημα αυτό έγινε κατανοητό και επινοήθηκε ο τρόπος με τον οποίο λύνεται το πρόβλημα μέσω της μηχανισμού της επανακανονικοποίησης (**renormalization**)

Αδρόνια και Feynman διαγράμματα

Εσωτερικά ένα αδρόνιο είναι μια συλλογή από quarks και antiquarks



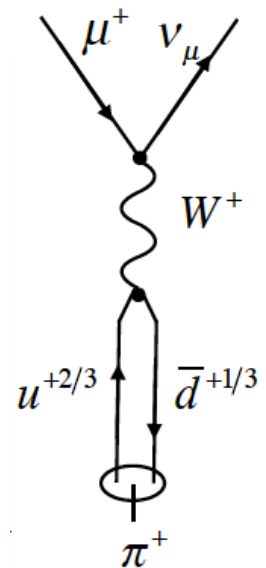
Όπως έχουμε γράψει ήδη παλαιότερα, η διάσπαση του ουδέτερου πιονίου, π^0 , μπορεί να γραφεί:

Η διεργασία για την διάσπαση του φορτισμένου πιονίου είναι: $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$

Τα quarks εξαϋλώνονται δίνοντας ένα W^+ το οποίο κατόπιν διασπάται δίνοντας $\mu^+ \nu_\mu$

Η διάσπαση $\pi^+ \rightarrow e^+ \nu_e$ όπως έχουμε ήδη συζητήσει ενώ κινηματικά θα έπρεπε να ήταν προτιμητέα ωστόσο είναι ιδιαίτερα σπάνια.

Ο λόγος οφείλεται στην εξάρτηση των ασθενών αλληλεπιδράσεων από το σπίν και ελικότητα καθώς και την εξίσωση Dirac όπως θα δούμε σύντομα .

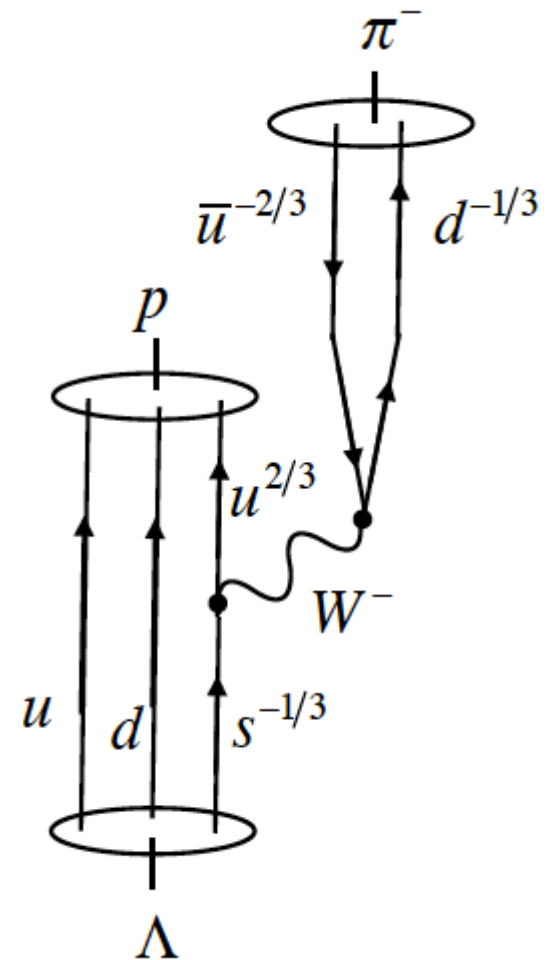


Διάσπαση του Λ βαρυονίου

Η διεργασία της διάσπασης είναι: $\Lambda^0 \rightarrow \pi^- p$

Το Λ είναι δέσμια κατάσταση uds . Το s -quark διασπάται σε ένα u -quark και ένα W^-

Το W^- διασπάται σε ένα ζεύγος $d\bar{u}$ που δημιουργεί την δέσμια κατάσταση ενός π^-

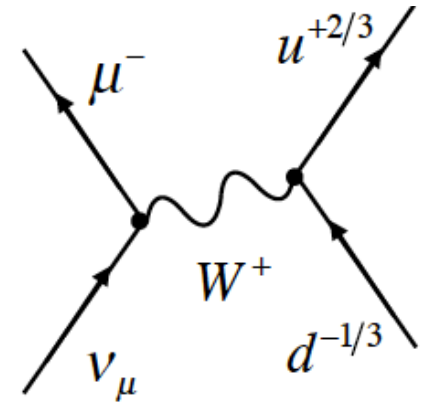


Αλληλεπιδράσεις νεutrino μέσω φορτισμένων ρευμάτων

Όπως έχουμε προαναφέρει, μπορούμε να κατασκευάσουμε δέσμες νεutrino χρησιμοποιώντας έναν επιταχυντή πρωτονίων. Όταν υψηλής ενέργειας πρωτόνια πέσουν σε στόχο δημιουργούν πιόνια και καόνια υψηλής ενέργειας τα οποία διασπώνται σε υψηλής ενέργειας μ και νεutrino

Μπορούμε να σταματήσουμε όλα τα μίονια ή τα μη διασπασμένα καόνια ή πιόνια χρησιμοποιώντας αρκετή θωράκιση από σίδηρο ή μαγνήτες που οδηγούν τα φορτισμένα σωματίδια σε άλλη κατεύθυνση

Ένα μικρό ποσοστό των νεutrino που έχει η δέσμη, θα αλληλεπιδράσει με τα quarks στο υλικό του στόχου παράγοντας ένα εύκολα ανιχνεύσιμο μίονιο και μια καταιγίδα από αδρόνια που προκλήθηκε από το σκεδαζόμενο quark το οποίο ωστόσο είναι διαφορετικό από το αρχικό αφού έχει αλλάξει φορτίο



Ουδέτερα ρεύματα ασθενών αλληλεπιδράσεων

Το Z μποζόνιο είναι το ουδέτερο σωματίδιο φορέας των ασθενών αλληλεπιδράσεων και η μάζα του είναι $91.2 \text{ GeV}/c^2$ ενώ αυτή του W $80.4 \text{ GeV}/c^2$. Μεταφέρει το **ουδέτερο ρεύμα** των ασθενών αλληλεπιδράσεων

Ο γενικός όρος για τον τύπο του quark ή λεπτονίου είναι η **γεύση**. Λέμε ότι το W μποζόνιο ή τα φορτισμένα ρεύματα των ασθενών αλληλεπιδράσεων αλλάζουν την γεύση **flavor changing current**.

Το Z δεν αλλάζει το φορτίο των quarks και λεπτονίων.

Επίσης δεν αλλάζει την γεύση ακόμα και για το ίδιο φορτίο. Δηλαδή δεν θα αλλάξει το s-quark σε d-quark παρόλο που το φορτίο παραμένει ίδιο.

Δεν υπάρχουν ουδέτερα ρεύματα αλλαγής γεύσης – **flavor changing neutral currents FCNC**

Ένα φωτόνιο δεν αλλάζει επίσης την γεύση και το φορτίο των quarks και λεπτονίων. Επομένως μπορούμε να βάλουμε το Z^0 σε οποιοδήποτε Feynman διάγραμμα υπήρχε φωτόνιο

Διασπάσεις φωτόνιο που παράγουν πραγματικά φωτόνια, παράγουν επίσης και Z-μποζόνια

Επειδή η μάζα των Z-μποζονίων είναι πολύ μεγάλη, ο παράγοντας του propagator στο διάγραμμα που υπάρχει το Z κάνει την συνεισφορά του ένα πολύ μικρό ποσοστό του αντίστοιχου διαγράμματος με το φωτόνιο

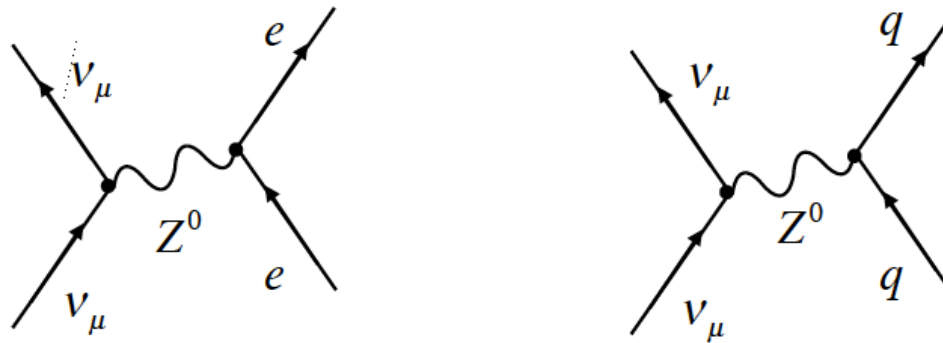
Για το λόγο αυτό δεν υπήρχε καμία ένδειξη για την ύπαρξη ασθενών ουδέτερων ρευμάτων μέχρι τα μέσα της δεκαετίας του 70.

Ουδέτερα ρεύματα ασθενών αλληλεπιδράσεων

Το νεutrino συζεύγνυται τόσο με το W όσο και με το Z μποζόνιο.

Για την περίπτωση όμως του Z μποζονίου το τελικό στάδιο έχει ένα «αόρατο» νεutrino αντί για το παρατηρούμενο λεπτόνιο (μυόνιο ή ηλεκτρόνιο ή ταυ)

Οι αλληλεπιδράσεις μέσω ουδέτερων ρευμάτων παρατηρήθηκαν στα μέσα της δεκαετίας του 1970 σε πειράματα υψηλής ενέργειας νεutrino-μιονίων που σκεδάζονταν σε ηλεκτρόνια και quarks χωρίς την εμφάνιση ενός μιονίου στα τελικά προϊόντα



Τα φωτόνια αλληλεπιδρούν με το φορτίο αλλά δεν κουβαλούν φορτίο

Τα W και Z μποζόνια αλληλεπιδρούν με το ασθενές ισοσπιν

Κάθε quark και λεπτόνιο έχει ποσότητα $1/2$ ασθενούς ισοσπιν. Το up quark έχει 3^η συνιστώσα του ασθενούς isospin $+1/2$ ενώ το d-quark έχει $-1/2$. Τα νεutrino έχουν $+1/2$ και τα αρνητικά φορτισμένα λεπτόνια έχουν $-1/2$. Τα πρόσημα αντιστρέφονται για τα antiquarks και αντιλεπτόνια

Τα W και Z κουβαλούν επίσης ασθενές isospin με τιμή 1

Το W^+ έχει 3^η συνιστώσα isospin $+1$, ενώ το W^- έχει -1 . Η 3^η συνιστώσα isospin του Z είναι 0.

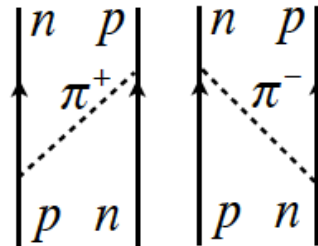
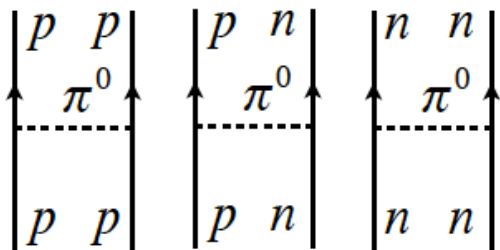
«Πυρηνικά» διαγράμματα Feynman

Οι δυνάμεις που κρατούν τα πρωτόνια και νετρόνια μαζί μέσα στον πυρήνα μπορούν να θεωρηθεί ότι προέρχονται από ανταλλαγή πιονίων

Το γεγονός ότι οι ισχυρές αλληλεπιδράσεις έχουν μικρή εμβέλεια, χρησιμοποιήθηκε από τον Yukawa όπως έχουμε δει για προβλέψει την ύπαρξη, την μάζα και ιδιότητες του πιονίου

Τα πιόνια εμφανίζονται όπως ξέρουμε σε φορτισμένη και ουδέτερη μορφή. Όταν ένα πρωτόνιο εκπέμπει ή απορροφά ένα π^0 παραμένει πρωτόνιο. Όταν εκπέμπει ένα π^+ τότε μετατρέπεται σε νετρόνιο. Ένα πρωτόνιο δεν μπορεί να εκπέμψει π^- αλλά μπορεί να απορροφήσει ένα και να μετατραπεί σε νετρόνιο. Τα νετρίνια ακολουθούν την προφανή γενίκευση όπως και τα αντιπρωτόνια και αντινετρόνια

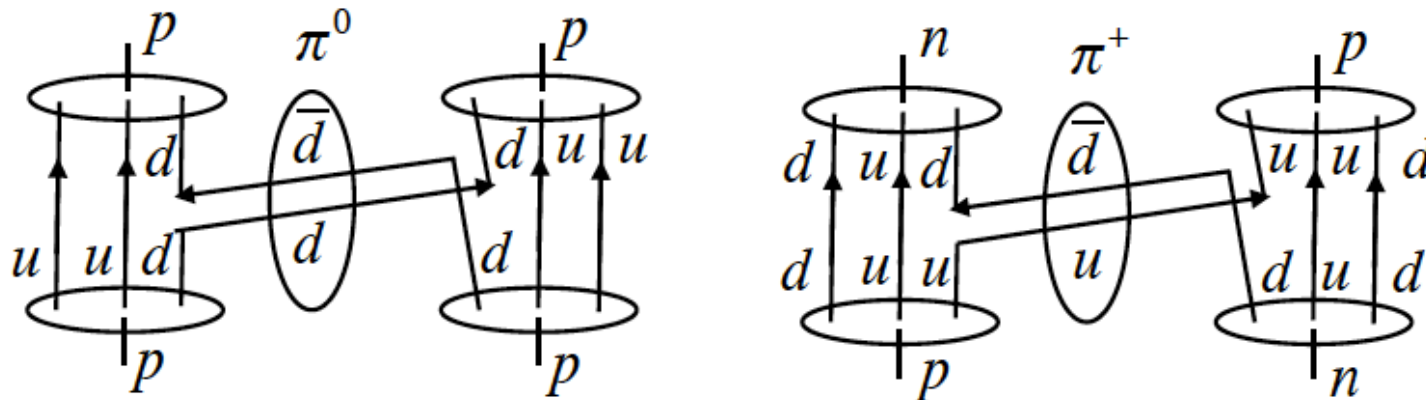
Μερικές φορές πρωτόνια και νετρόνια σχεδιάζονται με συμπαγείς γραμμές διανυσμάτων όπως τα quarks και τα λεπτόνια. Στην περίπτωση αυτή τα πιόνια σχεδιάζονται με διακεκομμένες γραμμές και χωρίς τα βέλη.



Αυτά τα δυο είναι ίδια

«Πυρηνικά» διαγράμματα Feynman

Μπορούμε να σχεδιάσουμε αδρόνια σε επίπεδο quark



Ενώ η διεργασία: $\Delta^{++} \rightarrow \pi^+ p$

