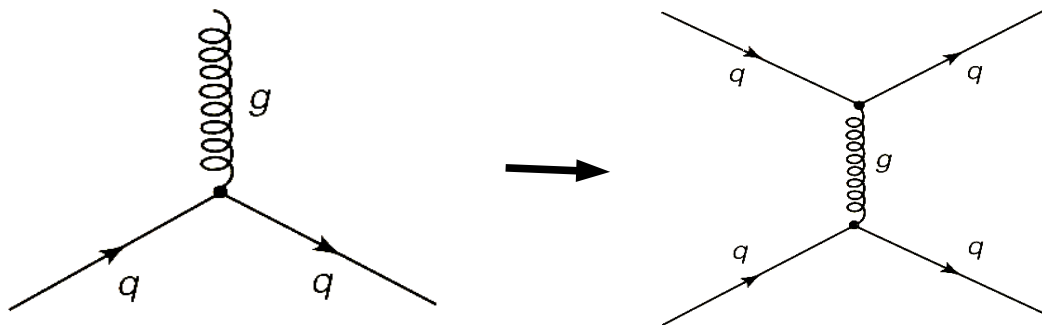


Διάλεξη 20: Διαγράμματα Feynman

Ισχυρές αλληλεπιδράσεις

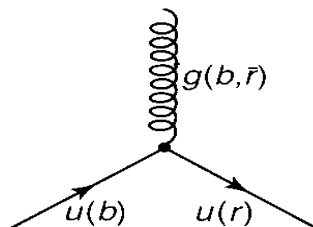
Όπως στην περίπτωση των η/μ αλληλεπιδράσεων έτσι και στην περίπτωση των ισχυρών αλληλεπιδράσεων υπάρχει η αντίστοιχη αναπαράσταση μέσω των διαγραμμάτων Feynman. Ο χρόνος σε όλες τις περιπτώσεις τρέχει από αριστερά προς τα δεξιά ενώ ισχύουν όλες οι γενικές αρχές που διατυπώθηκαν προηγουμένως για τις Η/Μ αλληλεπιδράσεις εκτός των εξαιρέσεων και διαφοροποιήσεων που θα αναφερθούν στην συνέχεια.

Στην περίπτωση των **ισχυρών αλληλεπιδράσεων ο φορέας αλληλεπίδρασης είναι το γλουόνιο ενώ ρόλο αντίστοιχο με αυτό του φορτίου έχει το χρώμα.**



Σχήμα 1: Ο βασικός κόμβος της ισχυρής αλληλεπίδρασης σύμφωνα με την αναπαράσταση Feynman.

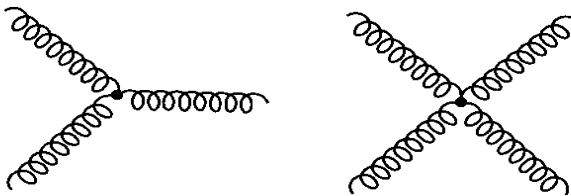
Έτσι όπως και στην περίπτωση της κβαντικής ηλεκτροδυναμικής με βάση το βασικό κόμβο μπορούμε να παραστήσουμε την ισχυρή αλληλεπίδραση μεταξύ δύο κουάρκ μέσω ενός γλουονίου όπως στο πιο πάνω σχήμα. Να σημειωθεί η διαφορά στην αναπαράσταση του φωτονίου από αυτή του γλουονίου (μοιάζει με ελατήριο). Το γεγονός όμως ότι έχουμε τρία χρώματα προκαλεί επιπλέον διαφοροποιήσεις μεταξύ της κβαντικής ηλεκτροδυναμικής και της χρωμοδυναμικής. **Σε αντίθεση με τα φωτόνια τα γλουόνια μεταφέρουν χρώμα και μέσω της αλληλεπίδρασης τα κουάρκ μεταβάλλουν το χρώμα τους – το οποίο όμως διατηρείται σε κάθε κόμβο και επομένως διατηρείται και στην συνολική διαδικασία.** Οι μεσάζοντες της ισχυρής αλληλεπίδρασης – τα γλουόνια – περιέχουν χρώμα και μάλιστα ο βασικός κόμβος μιας αλληλεπίδρασης θα μπορούσε να παρασταθεί ως εξής:



Σχήμα 2: Ο βασικός κόμβος της ισχυρής αλληλεπίδρασης. Τα γλουόνια μεταφέρουν χρώμα. Σε κάθε κόμβο το χρώμα διατηρείται.

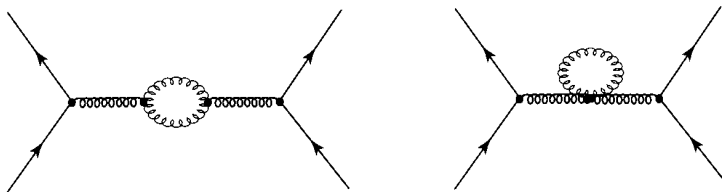
Στο σχήμα 2 το γλουόνιο με χρώμα μπλέ και αντι-κόκκινο συντελεί στην διατήρηση του χρώματος σε αυτόν τον κόμβο όπου αρχικά το κουάρκ u είχε χρώμα μπλε και μετά την αλληλεπίδραση έχει χρώμα κόκκινο.

Το γεγονός ότι τα γλουόνια έχουν χρώμα πέραν των αναμενόμενων κόμβων κουάρκ-γλουονίου **υπάρχουν και δύο επιπλέον είδη κόμβων αυτών με 3 ή 4 γλουόνια** όπως παρακάτω.



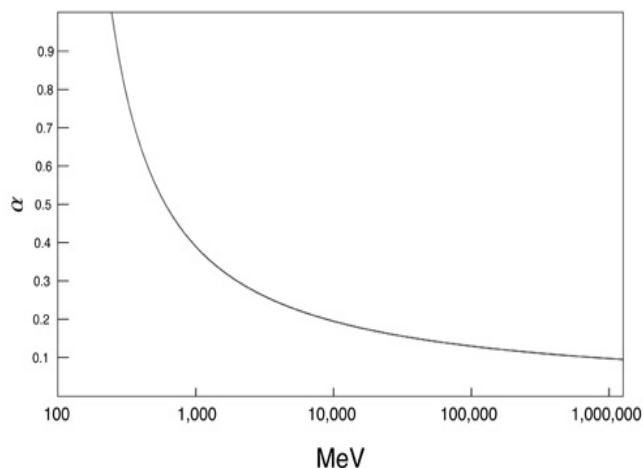
Σχήμα 3: Κόμβοι 3 και 4 γλουονίων

Για το ίδιο λόγο η κβαντική χρωμοδυναμική καθίσταται αρκετά πιο πολύπλοκη αλλά και πιο ενδιαφέρουσα. Έτσι για παράδειγμα επιτρέπεται ο σχηματισμός συσσωμάτων γλουονίων (glueballs). Επιπλέον μηχανισμοί αλληλεπίδρασης όπου και τα δύο είδη κόμβων συμμετέχουν είναι πλέον επιτρεπτοί.



Σχήμα 4: Παραδείγματα γραφικής αναπαράστασης της αλληλεπίδρασης 2 κουάρκ όπου ο μηχανισμός περιλαμβάνει κόμβους τριών γλουονίων.

Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με την μεγαλύτερη της μονάδος σταθερά ζεύξης της ισχυρής αλληλεπίδρασης αρχικά δημιούργησαν ένα φαινομενικά ανυπέβλητο πρόβλημα. "Όσο περισσότερους κόμβους έχει μια αλληλεπίδραση τόσο ισχυρότερη συνεισφορά έχει". Αυτό προφανώς είναι λάθος και τελικά αποδείχτηκε ότι η σταθερά ζεύξης της ισχυρής αλληλεπίδρασης δεν είναι καθόλου σταθερά. Στην πραγματικότητα μεταβάλλεται σημαντικά με την απόσταση. Το γεγονός αυτό περιγράφεται με τον όρο "**ασυμπτωτική ελευθερία**" της ισχυρής αλληλεπίδρασης.



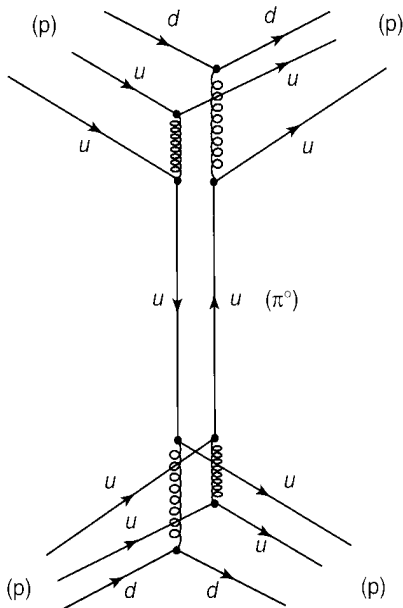
Σχήμα 5: Η μεταβολή της σταθεράς της ισχυρής αλληλεπίδρασης ως συνάρτηση της ενέργειας. Για μεγάλες ενέργειες – δηλαδή μικρές αποστάσεις – η σταθερά γίνεται μικρότερη. Αντίθετα για μεγάλες αποστάσεις – δηλαδή μικρές σχετικές ενέργειες των κουάρκς - η σταθερά μεγαλώνει.

Η σταθερά ζεύξης λοιπόν αλλάζει με την απόσταση και πιο συγκεκριμένα όσο μικρότερη είναι η απόσταση τόσο μικρότερη γίνεται και η σταθερά ζεύξης. Έτσι για μεγάλες ενέργειες (όπου έχουμε μικρές αποστάσεις) η σταθερά ζεύξης μειώνεται. Αυτό βρίσκεται σε συμφωνία με πειραματικά δεδομένα όπου δείχνουν τα κουάρκ να μοιάζουν να κινούνται σχεδόν ελεύθερα εντός όμως των δέσμιων καταστάσεων των πρωτονίων ή πιονίων. Τα ίδια τα κουάρκ όμως, είναι αδύνατο να τα απομονώσουμε, δηλαδή να τα φέρουμε σε μεγάλες αποστάσεις (μικρές σχετική ενέργεια) δεδομένου ότι τότε η σταθερά της ισχυρής αλληλεπίδρασης γίνεται ολοένα και μεγαλύτερη.

Η σταθερά ζεύξης αλλάζει λοιπόν με την απόσταση και πιο συγκεκριμένα όσο μικρότερη είναι η απόσταση τόσο μικρότερη γίνεται και η σταθερά ζεύξης. Έτσι για μεγάλες ενέργειες (όπου έχουμε μικρές αποστάσεις) η σταθερά ζεύξης μειώνεται. Αυτό βρίσκεται σε συμφωνία με πειραματικά δεδομένα όπου δείχνουν τα κουάρκ να μοιάζουν να κινούνται σχεδόν ελεύθερα εντός όμως των δέσμιων καταστάσεων των πρωτονίων ή πιονίων. Τα ίδια τα κουάρκ όμως, είναι αδύνατο να τα απομονώσουμε, δηλαδή να τα φέρουμε σε μεγάλες αποστάσεις (μικρές σχετική ενέργεια) δεδομένου ότι τότε η σταθερά της ισχυρής αλληλεπίδρασης γίνεται ολοένα και μεγαλύτερη.

Η μελέτη της χρωμοδυναμικής λοιπόν καθίσταται αρκετά πιο περίπλοκη σε σχέση με αυτή της ηλεκτροδυναμικής από το γεγονός και μόνο ότι ο φορέας αλληλεπίδρασης φέρει χρώμα ενώ όλα τα φυσικά σωματίδια βαρυόνια και μεσόνια αποτελούν καταστάσεις άχρωμες.

Σε αυτό το σημείο **θα πρέπει να σημειωθεί ότι η παρατήρηση της ισχυρής αλληλεπίδρασης μέσω της αλληλεπίδρασης των νουκλεονίων στον τομέα της πυρηνικής φυσικής αποτελεί μία πιο σύνθετη αναζήτηση.** Όπως ειπώθηκε και προηγουμένως είναι σαν να προσπαθεί κανείς να κατανοήσει τις η/μ δυνάμεις μέσω της Van der Waals αλληλεπίδρασης των μορίων. Αυτό μπορεί να γίνει καλύτερα κατανοητό από την ακριβέστερη περιγραφή της αλληλεπίδραση πρωτονίου – πρωτονίου (ένα παράδειγμα ενός από τους πολλούς μηχανισμούς δίνεται στο σχήμα 6).



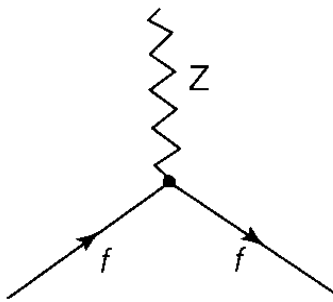
Σχήμα 6: Ένας από τους πιθανούς μηχανισμούς που συνεισφέρουν στην ισχυρή αλληλεπίδραση μεταξύ δύο πρωτονίων. Ενδιαφέρον έχει η αναγνώριση του πιονίου. Επομένως λοιπόν ο μηχανισμός της ισχυρής αλληλεπίδρασης είναι πολύ πιο πολύπλοκος από αυτόν που αρχικά είχε υποθέσει ο Yukawa.

Ασθενείς αλληλεπιδράσεις

Σε αντίθεση με τις ισχυρές και τις H/M αλληλεπιδράσεις για τις ασθενείς αλληλεπιδράσεις δεν υπάρχει κάποιο συγκεκριμένο "φορτίο" όπως είναι το ηλεκτρικό φορτίο για τις H/M αλληλεπιδράσεις και όπως είναι το χρώμα για τις ισχυρές αλληλεπιδράσεις.

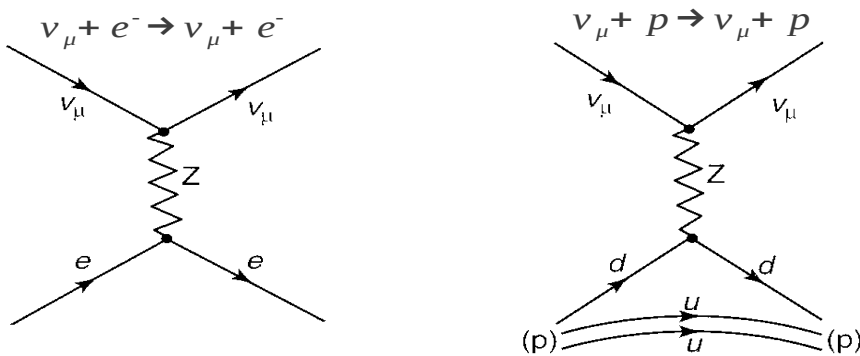
Πέρα από αυτό υπάρχουν σημαντικές διαφορές μεταξύ των ασθενών αλληλεπιδράσεων και των αλληλεπιδράσεων που είδαμε μέχρι τώρα.

- 1) **Η ασθενής αλληλεπίδραση είναι η μόνη η οποία αλλάζει το είδος του σωματιδίου.** Θα έχει ήδη παρατηρηθεί ότι στις ισχυρές και H/M αλληλεπιδράσεις το είδος του φορτισμένου σωματιδίου δεν αλλάζει αλλά ούτε η γεύση του για την περίπτωση των κουάρκ και της ισχυρής αλληλεπίδρασης. **Στις ασθενείς αλληλεπιδράσεις θα δούμε ότι μέσω του φορτισμένου φορέα W^\pm μπορεί να αλλάξει τόσο το φορτίο όσο και η ταυτότητα του σωματιδίου.**
- 2) **Είναι η μόνη αλληλεπίδραση που παραβιάζει την πάριτη -την κατοπτρική συμμετρία (βλέπε πείραμα Wu).**
- 3) Για την ασθενή αλληλεπίδραση μπορεί να γίνει ένας σημαντικός διαχωρισμός σε δύο είδη ασθενών αλληλεπιδράσεων: σε αυτές όπου ο φορέας είναι το ουδέτερο μποζόνιο Z και σε αυτές που ο φορέας είναι τα μποζόνια W^\pm .
- 4) Ένα επιπλέον ιδιαίτερο χαρακτηριστικό των ασθενών αλληλεπιδράσεων είναι ότι **οι φορείς αλληλεπίδρασης διαθέτουν μεγάλη μάζα.**



Σχήμα 7: Ο βασικός κόμβος της ασθενούς αλληλεπίδρασης.

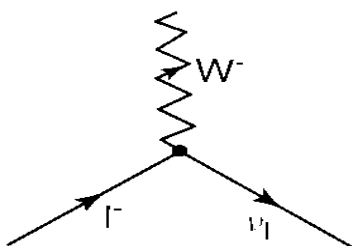
Στο σχήμα 7 το σωματίδιο f μπορεί να είναι οποιοδήποτε λεπτόνιο ή κουάρκ. Όπως στα πιο κάτω παραδείγματα:



Σχήμα 8: Παραδείγματα αναπαράστασης της ασθενούς αλληλεπίδρασης μέσω του μποζονίου Z για ένα ηλεκτρόνιο και για ένα πρωτόνιο.

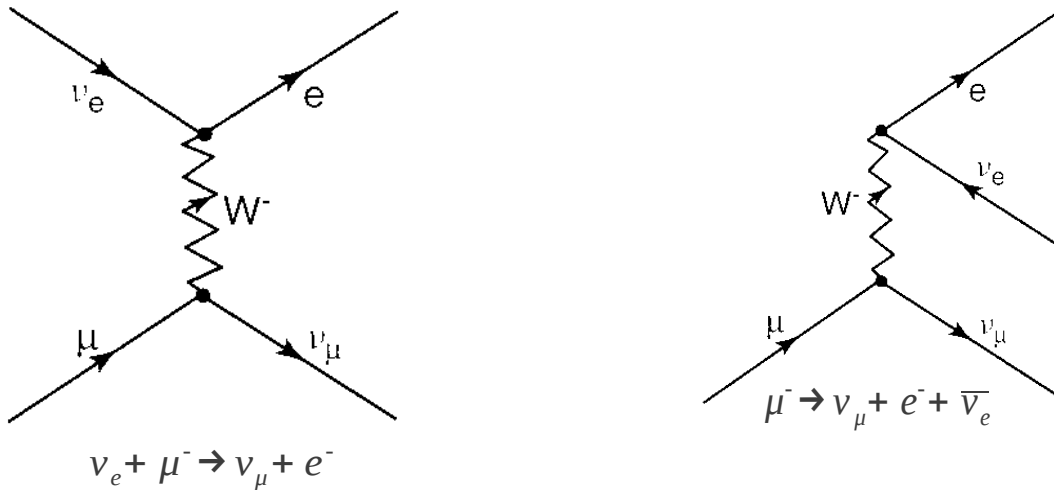
Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να αναφερθεί ότι οποιαδήποτε διαδικασία με φορέα ένα φωτόνιο μπορεί να πραγματοποιηθεί με φορέα ένα μποζόνιο βαθμίδος Z -δηλαδή μέσω των ασθενών αλληλεπιδράσεων. Αυτό φυσικά έχει πράγματι διαπιστωθεί πειραματικά και οδηγεί σε μια απειροελάχιστη διόρθωση του νόμου του Coulomb.

Ενδιαφέρον επίσης έχει να δούμε τις ασθενείς αλληλεπιδράσεις με ανταλλαγή ενός φορτισμένου μποζονίου βαθμίδος W^\pm . Αυτές διαχωρίζονται σε εκείνες όπου συμμετέχουν στον κόμβο λεπτόνια και σε εκείνες που στον κόμβο συμμετέχουν κουάρκ



Σχήμα 9: Κόμβος ασθενούς αλληλεπίδρασης με ανταλλαγή ενός μποζονίου W^- .

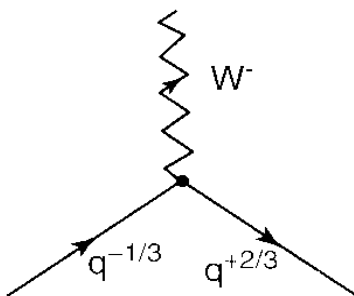
Πιο πάνω βλέπουμε τον βασικό κόμβο ασθενούς αλληλεπίδρασης με φορτίο όπου το l μπορεί να είναι οπουδήποτε λεπτόνιο e, μ, τ με το αντίστοιχο νεutrίνο. **Εδώ θα πρέπει να σημειωθεί ότι κάθε λεπτονικός κόμβος συνδέει λεπτόνια της ίδιας γενιάς.** Δύο χαρακτηριστικά παραδείγματα είναι:



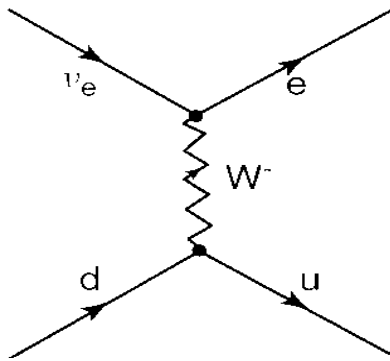
Σχήμα 9: Δύο παραδείγματα αναπαράστασης της ασθενούς αλληλεπίδρασης μέσω διαγραμμάτων Feynman όπου συμμετέχει ένα μποζονίου W^- .

Όπου βλέπουμε πάλι την εφαρμογή της συμμετρίας διασταύρωσης στα διαγράμματα Feynman.

Ο κόμβος ασθενούς αλληλεπίδρασης με φορτίο για τα κουάρκ έχει την μορφή αυτή:

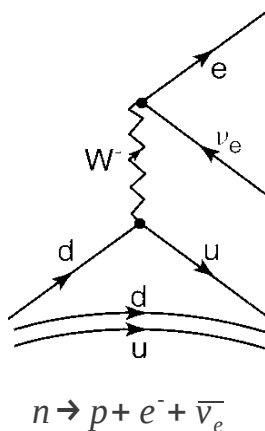


Σχήμα 10: Κόμβος ασθενούς αλληλεπίδρασης με ανταλλαγή ενός μποζονίου W^- όπου συμμετέχει ένα κουάρκ.



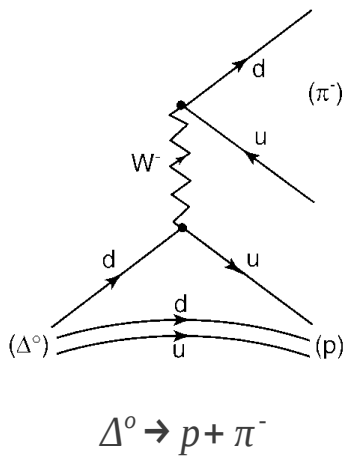
Σχήμα 11: Παράδειγμα ασθενούς αλληλεπίδρασης ενός κουάρκ και ενός νετρίνου μέσω του μποζονίου W^- .

Ένα παράδειγμα αναπαράστασης της ασθενούς αλληλεπίδρασης ενός κουάρκ και ενός νετρίνου μέσω του μποζονίου W^- δίνεται στο σχήμα 11, όπου ένα d κουάρκ αντιδρά με ένα νεutrino προς σχηματισμό ενός ηλεκτρονίου και ενός κουάρκ u . Φυσικά κάτι τέτοιο δεν μπορεί να παρατηρηθεί λόγω του γεγονότος ότι ελεύθερα κουάρκ στην φύση δεν υπάρχουν.



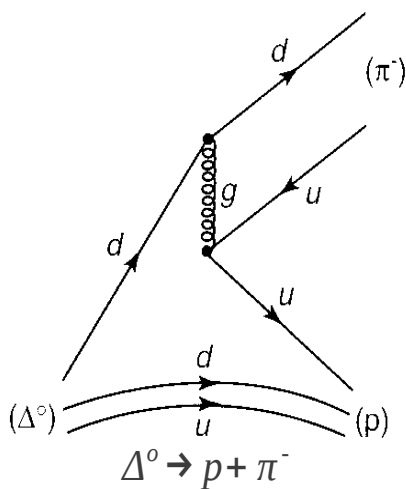
Σχήμα 12: Ο ίδιος μηχανισμός αλληλεπίδρασης με αυτόν του σχήματος 11 όπως εφαρμόζεται στην αποδιέγερση του νετρονίου.

Μπορεί όμως να παρατηρηθεί η ίδια φυσική διαδικασία στην αποδιέγερση β^- του νετρονίου (σχήμα 12). Στο ίδιο σχήμα το μποζόνιο W^- αποδίδει δύο λεπτόνια. Είναι εξίσου δυνατόν να αποδώσει δύο κουάρκ όπως στην πιο περίπτωση της αποδιέγερσης του σωματίου Δ^0 :



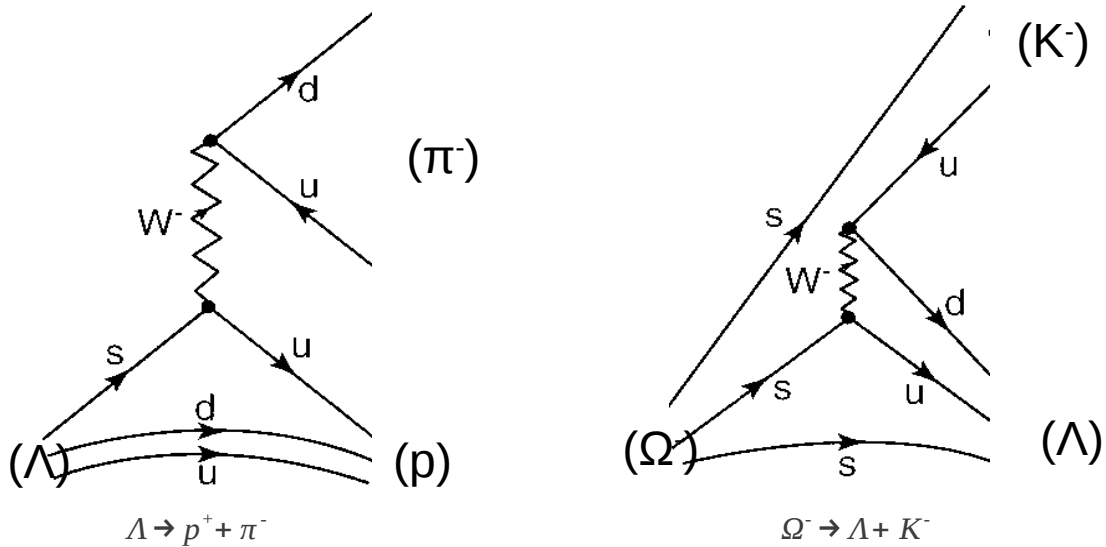
Σχήμα 13: Η αποδιέγερση του σωματιδίου Δ^0 μέσω της ασθενούς αλληλεπίδρασης. Εδώ το μποζόνιο W^- αποδίδει δύο κουάρκ ενώ στο σχήμα 12 το ίδιο μποζόνιο αποδίδει δύο λεπτίνα.

Μάλιστα η πιο πάνω διαδικασία μπορεί να πραγματοποιηθεί και μέσω της ισχυρής αλληλεπίδρασης σύμφωνα με το σχήμα 14. Τελικά, αυτός είναι και ο κυρίαρχος μηχανισμός αποδιέγερσης του σωματιδίου Δ^0 .



Σχήμα 14: Η αποδιέγερση του σωματιδίου Δ^0 μέσω της ισχυρής αλληλεπίδρασης. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι τα προϊόντα της αποδιέγερσης του σωματιδίου Δ^0 είναι τα ίδια με αυτά του σχήματος 13. Αυτό είναι ένα τυπικό παράδειγμα όπου δύο μηχανισμοί αποδιέγερσης συνυπάρχουν και δρουν ανταγωνιστικά. Φυσικά, η ισχυρή αλληλεπίδραση είναι και ο κυρίαρχος μηχανισμός της αποδιέγερσης του σωματιδίου Δ^0 .

Μία τελευταία αλλά μείζονος σημασίας παρατήρηση σχετικά με τις ασθενείς αλληλεπιδράσεις αφορά στη μη διατήρηση της παραδοξότητας από τις ασθενείς αλληλεπιδράσεις. **Ο κόμβος λοιπόν των κουάρκ δεν διατηρεί απαραίτητα την ίδια γενιά κουάρκ.** Αν συνέβαινε κάτι τέτοιο δεν θα μπορούσαν να υπάρχουν αλληλεπιδράσεις που δεν διατηρούν την παραδοξότητα. **Επομένως θα πρέπει να θυμόμαστε ότι οι ασθενείς αλληλεπιδράσεις δεν διατηρούν την παραδοξότητα και επομένως οι κόμβοι των κουάρκ με μποζόνια βαθμίδος W δεν διατηρούν απαραίτητα την ίδια γενιά.** Τέτοια παραδείγματα είναι:

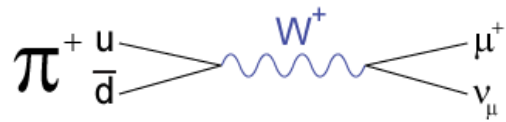


Σχήμα 15: Παραδείγματα αποδιεγέρσεων ασθενούς αλληλεπίδρασης όπου παραβιάζεται η παραδοξότητα.

Παράδειγμα

Αποδώσετε το απλούστερο διάγραμμα Feynman για τις εξής αποδιεγέρσεις:

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$$



$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu$$

