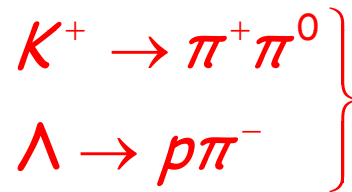


## Ασθενείς Αλληλεπιδράσεις

- έχουμε ήδη δει διάφορες αντιδράσεις που γίνονται μέσω των ασθενών αλληλεπιδράσεων
- π.χ.
  - ασθενείς διασπάσεις αδρονίων



αδρονικές



ημι-λεπτονική



λεπτονική

- ασθενείς διασπάσεις λεπτονίων



λεπτονική



ημι-λεπτονική

## Ασθενείς Αλληλεπιδράσεις

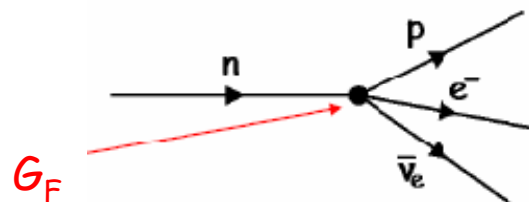
	μέσος χρόνος ζωής	σχόλιο
$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$	$\sim 10^3 \text{ s}$	Μεγάλος χρόνος ζωής λόγω της μικρής διαφοράς μάζας
$\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+$		Τα νετρίνα έχουν μόνο ασθενείς αλληλεπιδράσεις
$\Lambda^0 \rightarrow p + \pi^-$	$\sim 10^{-10} \text{ s}$	$\Delta S=1$ οι ισχυρές αλληλεπιδράσεις απαγορεύονται
$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$	$\sim 10^{-8} \text{ s}$	Μόνο τα λεπτόνια είναι ελαφρύτερα από το $\pi$

- Όλα τα κουάρκ και όλα τα λεπτόνια έχουν ασθενείς αλληλεπιδράσεις
- Τα νετρίνα έχουν ΜΟΝΟ ασθενείς αλληλεπιδράσεις
- Τυπικοί χρόνοι ζωής:
 

Ισχυρές $\sim 10^{-23} \text{ s}$	$H/M \sim 10^{-16} \text{ s}$
Ασθενείς $\sim 10^{-8} - 10^{-10} \text{ s}$	

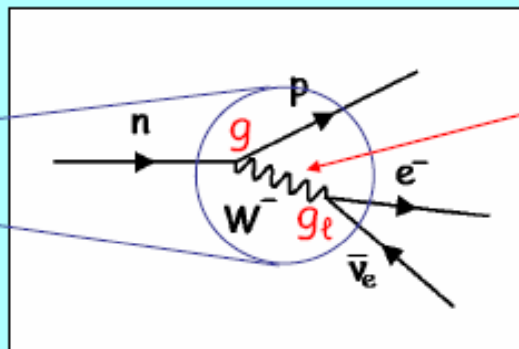
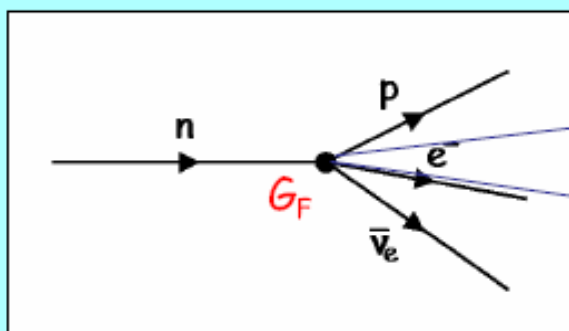
## Η Θεωρία του Fermi

- Η θεωρία των ασθενών αλληλεπιδράσεων που αναπτύχθηκε από τον Fermi το 1930 ήταν μια σημειακή αλληλεπίδραση



Η σταθερά του Fermi που δίνει την ισχύ ζεύξης στην αλληλεπίδραση

σύγχρονη αντίληψη



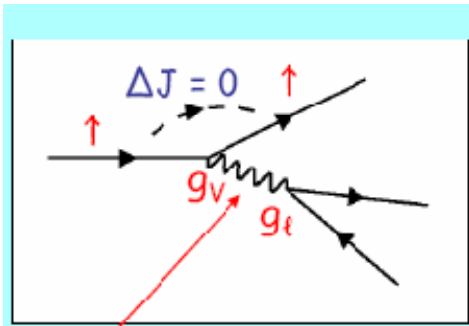
$$G_F \propto \frac{g^2}{m_W^2 - q^2}$$

για μικρές τιμές του  $q^2$

$$G_F \propto \frac{g^2}{m_W^2}$$

## Ανταλλαγή W

- Μπορούμε να μην έχουμε μεταφορά spin από την αρχική στην τελική κατάσταση

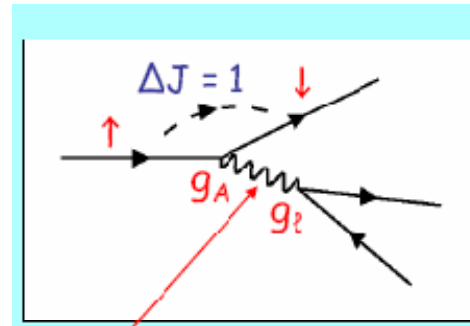


Το W έχει ορμή αλλά δεν έχει στροφορμή V = "διάνυσμα"

$$G_F \rightarrow gg_\ell \left( \frac{1}{m_w} \right)^2$$

$g_V \text{ ή } g_A$

- Μπορούμε να έχουμε μεταφορά spin από την αρχική στην τελική κατάσταση



Το W έχει ορμή αλλά και στροφορμή A = "αξονικό διάνυσμα"

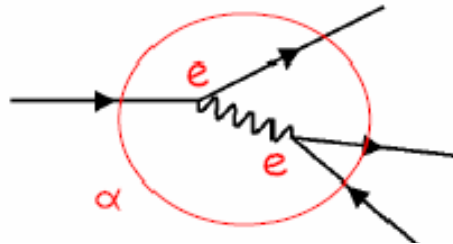
πειραματικά:

$$g_A = -g_V \rightarrow \text{αλληλεπίδραση "V-A"}$$

## ενεργός διατομή

- ενεργός διατομή ή ρυθμός διάσπασης  $\sim$  (πλάτος)<sup>2</sup>      $\Psi\Psi^*$  ή  $|\Psi|^2$

H/M

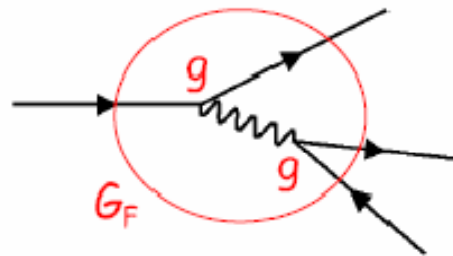


$$a \sim e^2$$

πλάτος  $\sim a \sim e^2$

ρυθμός διάσπασης  $\sim a^2 \sim e^4$

Ασθενείς



$$G_F \sim g^2$$

πλάτος  $\sim G_F \sim g^2$

ρυθμός διάσπασης  $\sim G_F^2 \sim g^4$

Στις ασθενείς το  $g$  είναι ισοδύναμο με το  $e$  στις H/M

## "Ασθενείς" αλληλεπιδράσεις :

- Γνωρίζουμε ότι η μάζα του  $W$  είναι  $80,4 \text{ GeV}$ . Από τον ακριβή υπολογισμό έχουμε:

$$G_F = \frac{\sqrt{2}}{8} \frac{g^2}{m_W^2}$$

- οπότε  $g=0,65$
- αν θεωρήσουμε ότι στις ασθενείς αλληλεπιδράσεις το  $g$  παίζει το ρόλο του  $e$  των  $H/M$  μπορούμε να ορίσουμε:

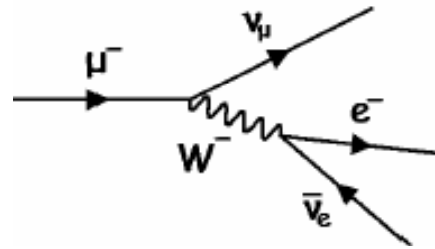
$$a_w = \frac{g^2}{4\pi} \approx \frac{1}{29}$$

- παρατηρούμε ότι η ισχύς των ασθενών αλληλεπιδράσεων είναι **5 φορές** της αντίστοιχης ισχύος των  $H/M$
- Οι ασθενείς αλληλεπιδράσεις δεν είναι **ασθενείς** λόγω του  $g$  αλλά λόγω της **μεγάλης μάζας του  $W$ !**

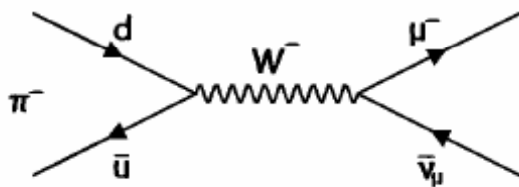
## Τύποι ασθενών αλληλεπιδράσεων

- Οι ασθενείς αλληλεπιδράσεις κατηγοριοποιούνται ανάλογα με τη ζεύξη του  $W$  στα δύο άκρα
- **Λεπτονικές** : Το  $W$  έχει ζεύξη και στις δύο κορυφές με λεπτόνια

$$\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$$

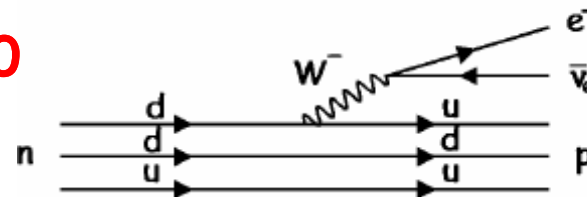


- **Ημιλεπτονικές** : Το  $W$  έχει ζεύξη στη μία κορυφή με λεπτόνια και στην άλλη με κουαρκ



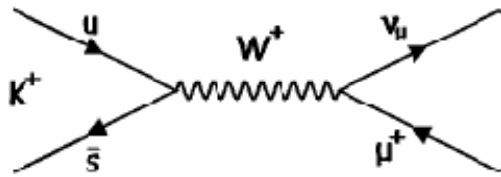
$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$$

$$\Delta S=0$$

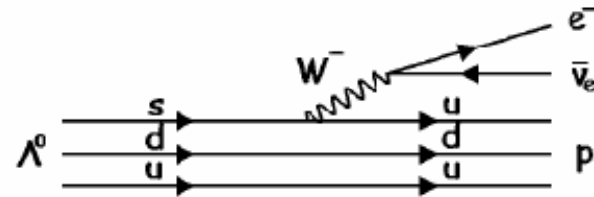


$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$$

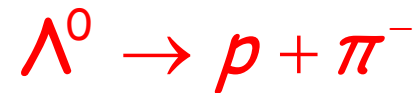
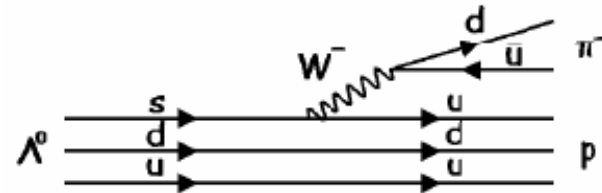
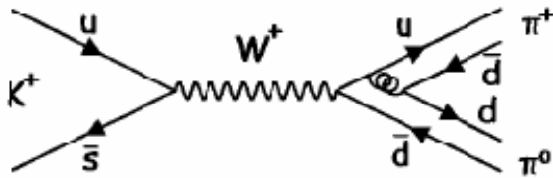
## Τύποι ασθενών αλληλεπιδράσεων



$$\Delta S=1$$



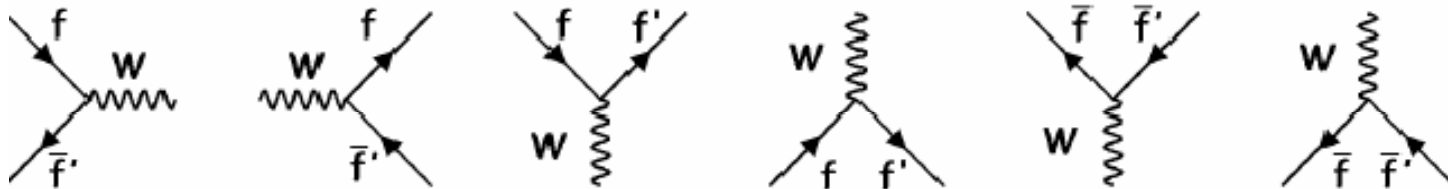
- Αδρονικές : Το W έχει ζεύξη και στις δύο κορυφές με κουαρκ





## Τύποι ασθενών αλληλεπιδράσεων

Οι ασθενείς αλληλεπιδράσεις είναι συνδυασμοί όπως



όπου:

$$f = e, \mu, \tau, u, d, s, c, b, t$$

$$f' = \nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau, d, u, u, s, c, b$$

Το  $W^\pm$  μπορεί να αλλάξει τη γεύση του φερμιονίου  
πχ  $u \rightarrow d, s \rightarrow u$  κλπ

## Θεωρία Cabibbo

- Πειραματικά είχε βρεθεί ότι ο χρόνος ζωής για  $\Delta S=1$  είναι  $\sim 20$  φορές μεγαλύτερος από το χρόνο ζωής για  $\Delta S=0$ .
- Αυτό σημαίνει ότι οι αντιδράσεις  $\Delta S=1$  έχουν ρυθμό  $\sim 20$  φορές μικρότερο
- Το 1963 ο Cabibbo πρότεινε ότι τα  $d$  και  $s$  κουαρκ που λαμβάνουν μέρος στις ασθενείς αλληλεπιδράσεις αναμειγνύονται και μάλιστα έχουν μια "στροφή" κατά μια γωνία ανάμειξης

$$\theta_c = \text{γωνία Cabibbo}$$

πχ

το κουαρκ που αλληλεπιδρά με το  $u$  μέσω ασθενών αλληλεπιδράσεων δεν είναι μόνο το  $s$  ή μόνο το  $d$  αλλά ένας γραμμικός συνδυασμός των δύο

$$d_c = d \cos \theta_c + s \sin \theta_c$$

## Ασθενή "ζεύγη"

- Για τις ασθενείς αλληλεπιδράσεις έχουμε τα ασθενή "ζεύγη":

$$\begin{pmatrix} e \\ \nu_e \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \mu \\ \nu_\mu \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} u \\ d_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u \\ d \cos \theta_c + s \sin \theta_c \end{pmatrix}$$

- Για τις ημιλεπτονικές  $\Delta S = 0$  διασπάσεις η σταθερά σύζευξης (έχουμε μόνο  $u$  και  $d$  κουαρκ)

$$G_F \cos \theta_c$$

- Για τις ημιλεπτονικές  $\Delta S = 1$  διασπάσεις η σταθερά σύζευξης (έχουμε μόνο  $u$  και  $s$  κουαρκ)

$$G_F \sin \theta_c$$

## γωνία Cabibbo

- Συγκρίνοντας τους ρυθμούς για διάφορες  $\Delta S=0$  και  $\Delta S=1$  διαδικασίες έχουμε

διάσπαση	αλλαγή γεύσης κουαρκ	ρυθμός
$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$	$d \rightarrow u$	$G_F^2 \cos^2 \theta_c$
$\pi^+ \rightarrow \pi^0 + e^+ + \nu_e$	$u \rightarrow d$	$G_F^2 \cos^2 \theta_c$
$K^- \rightarrow \pi^0 + e^- + \bar{\nu}_e$	$s \rightarrow u$	$G_F^2 \sin^2 \theta_c$
$\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$	-	$G_F^2$

- Αν συγκρίνουμε τους ρυθμούς βρίσκουμε  $\theta_c \sim 0,23 \text{ rad } (\sim 13^\circ)$

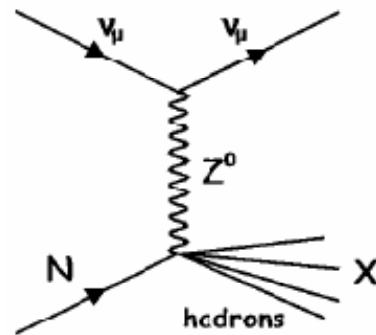
$$\cos^2 0,23 = 0,95, \quad \sin^2 0,23 = 0,05 \rightarrow 0,95/0,05 = 19$$

**$\rightarrow$ παράγοντας  $\sim 20$**

## Ασθενή ουδέτερα ρεύματα

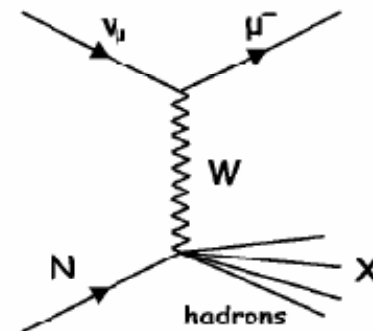
- στην δεκαετία του '60 αρχίσαμε να έχουμε τις πρώτες δέσμες (αντι-) νετρίνων από διασπάσεις  $\pi$  και  $K$ .
- Το 1973 στο CERN για πρώτη φορά παρατηρήθηκαν τα πρώτα γεγονότα που είχαν ασθενή ουδέτερα ρεύματα

$$\nu_{\mu} + N \rightarrow \nu_{\mu} + X$$



ασθενές ουδέτερο  
ρεύμα  $Z^0$

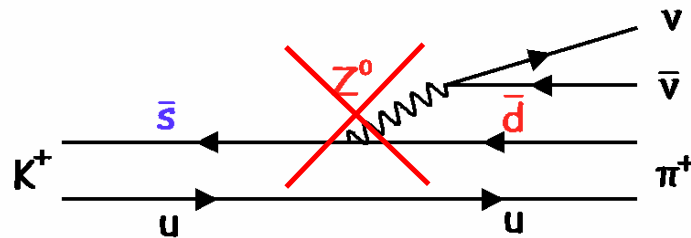
$$\nu_{\mu} + N \rightarrow \mu^{-} + X$$



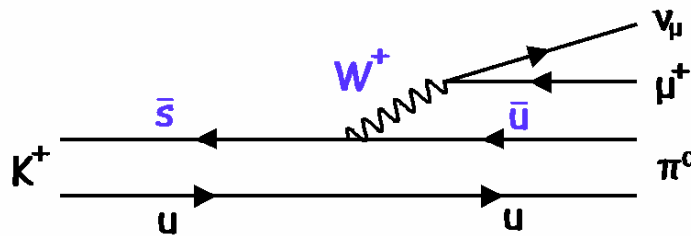
ασθενές φορτισμένο  
ρεύμα  $W^{\pm}$

## Ασθενή ουδέτερα ρεύματα

- Όλες οι ασθενείς αλληλεπιδράσεις με ουδέτερα ρεύματα που έχουν παρατηρηθεί είναι  $\Delta S=0$ . Δεν αλλάζουν καθόλου την γεύση.
- Για την μέτρηση:



$$\frac{K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}}{K^+ \rightarrow \pi^0 \mu^+ \nu_\mu} = \text{---} < 10^{-5}$$

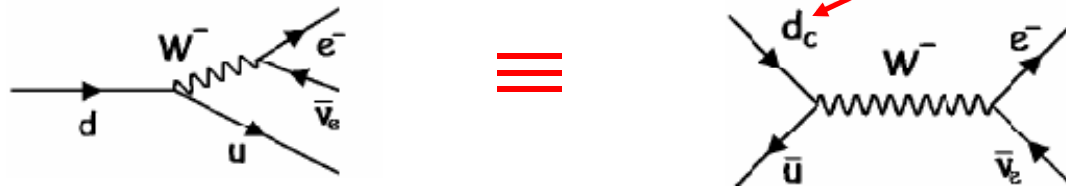


## Ασθενή Ρεύματα

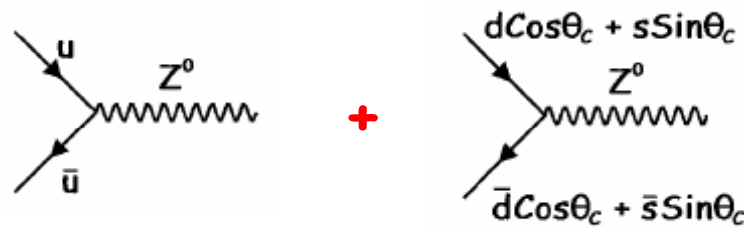
- στην αντίδραση  $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$  το φορτισμένο ρεύμα είναι

$$J^- = \bar{u}d \cos \theta_c$$

$$d \cos \theta_c + s \sin \theta_c$$



- Για το ουδέτερο ρεύμα έχουμε 2 συνεισφορές:



$$J^0 = \underbrace{u\bar{u} + d\bar{d} \cos^2 \theta_c + s\bar{s} \sin^2 \theta_c}_{\Delta S=0} + \underbrace{(s\bar{d} + \bar{s}d) \sin \theta_c \cos \theta_c}_{\Delta S=1 \quad \boxed{?}}$$

## Ο Μηχανισμός GIM

- Το 1970 οι Glashow, Iliopoulos & Maiani (GIM) προτείνανε την ύπαρξη ενός νέου κουαρκ - το  $c$  - φτιάχνοντας έτσι ένα καινούριο ασθενές ζεύγος

$$\begin{pmatrix} e \\ \nu_e \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \mu \\ \nu_\mu \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} u \\ d_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u \\ d \cos \theta_c + s \sin \theta_c \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} c \\ s_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c \\ s \cos \theta_c - d \sin \theta_c \end{pmatrix}$$

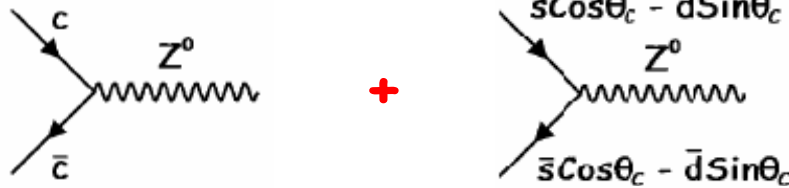
- Το  $c$  κουαρκ έχει διαφορετική ζεύξη με τα  $d$  και  $s$  απ' ότι το  $u$  αλλά εξαρτάται πάντα από την γωνία  $\theta_c$



## Ο Μηχανισμός GIM

$$J^0 = \underbrace{u\bar{u} + d\bar{d} \cos^2 \theta_c + s\bar{s} \sin^2 \theta_c}_{\Delta S=0} + \cancel{\underbrace{(s\bar{d} + \bar{s}d) \sin \theta_c \cos \theta_c}_{\Delta S=1}}$$

+ επιπλέον



$$+ \underbrace{c\bar{c} + s\bar{s} \cos^2 \theta_c + d\bar{d} \sin^2 \theta_c}_{\Delta S=0} - \cancel{\underbrace{(s\bar{d} + \bar{s}d) \sin \theta_c \cos \theta_c}_{\Delta S=1}}$$

$$J^0 = u\bar{u} + d\bar{d} + s\bar{s} + c\bar{c}$$

ΣΥΜΜΕΤΡΙΑ !

## Ο Μηχανισμός GIM

- Είδαμε ότι το  $c$  κουαρκ ανακαλύφθηκε το 1974

$$\rightarrow \Psi = c\bar{c}, \quad D^+ = cd^{\bar{}} \quad \dots$$

- Έχοντας ορίσει:

$$\begin{pmatrix} c \\ s_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c \\ s \cos \theta_c - d \sin \theta_c \end{pmatrix}$$

- Από τον μηχανισμό GIM και τη θεωρία Cabibbo προβλέπουμε για τους ρυθμούς διασπάσεων

$$c \rightarrow s \quad \sim \cos^2 \theta_c$$

$$c \rightarrow d \quad \sim \sin^2 \theta_c$$

- Άρα τα μεσόνια με  $c$  κουαρκ παράγουν κυρίως καόνια όταν διασπώνται

## Ο πίνακας CKM

- Θεωρώντας μόνο τα κουαρκ  $u, d, s, c$  το ασθενές φορτισμένο ρεύμα δίνεται από τη σχέση

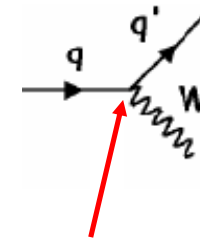
$$J^- = (\bar{u}, \bar{c}) \begin{pmatrix} \cos\theta_c & \sin\theta_c \\ -\sin\theta_c & \cos\theta_c \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d \\ s \end{pmatrix}$$

πίνακας  
περιστροφής  
συντεταγμένων

$$\begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} \\ V_{cd} & V_{cs} \end{pmatrix}$$

- Έχοντας τα  $u, d, s, c, b$  και  $t$  κουαρκ γίνεται

$$J^- = (\bar{u}, \bar{c}, \bar{t}) \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d \\ s \\ b \end{pmatrix}$$



το  $V_{qq'}$  στο πλάτος

## Πίνακας Cabibbo - Kobayashi - Maskawa (CKM)

Γ. Τσιπολίτης

## Ο πίνακας CKM

- Οι τιμές του πίνακα CKM είναι:

$$\begin{pmatrix} 0,97 & 0,22 & 0,004 \\ -0,22 & 0,97 & 0,04 \\ 0,004 & -0,04 & 0,99 \end{pmatrix}$$

- Ο πίνακας είναι "σχεδόν" διαγώνιος

$$\rightarrow J^- \approx \bar{u}d + \bar{c}s + \bar{t}b$$

- Άρα η προτιμώμενες διασπάσεις είναι

$$t \rightarrow b \rightarrow c \rightarrow s \rightarrow u$$

## Ομοτιμία - Parity

- Ας θεωρήσουμε ένα διάνυσμα  $\mathbf{v}$ . Από τον ορισμό της parity έχουμε

$$P(\mathbf{v}) = -\mathbf{v}$$

- Ας δημιουργήσουμε ένα βαθμωτό μέγεθος από το  $\mathbf{v}$ :  $s = \mathbf{v} \cdot \mathbf{v}$

$$P(s) = P(\mathbf{v} \cdot \mathbf{v}) = (-\mathbf{v}) \cdot (-\mathbf{v}) = \mathbf{v} \cdot \mathbf{v} = +s$$

- Ας πάρουμε τώρα το εξωτερικό γινόμενο δύο διανυσμάτων:  $\mathbf{a} = \mathbf{v} \times \mathbf{w}$

$$P(\mathbf{a}) = P(\mathbf{v} \times \mathbf{w}) = (-\mathbf{v}) \times (-\mathbf{w}) = \mathbf{v} \times \mathbf{w} = +\mathbf{a}$$

- Μπορούμε να πάρουμε ένα βαθμωτό μέγεθος από τα  $\mathbf{a}$  και  $\mathbf{v}$ :  $p = \mathbf{a} \cdot \mathbf{v}$

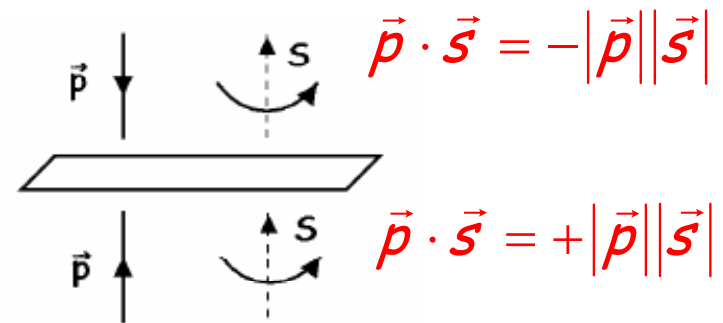
$$P(p) = P(\mathbf{a} \cdot \mathbf{v}) = (+\mathbf{a}) \cdot (-\mathbf{v}) = -\mathbf{a} \cdot \mathbf{v} = -p$$

βαθμωτό (scalar)	$P(s) = +s$
ψευδοβαθμωτό (pseudoscalar)	$P(p) = -p$
διανυσματικό (vector)	$P(\mathbf{v}) = -\mathbf{v}$
ψευδοδιανυσματικό (pseudovector, axial vector)	$P(\mathbf{a}) = +\mathbf{a}$

## Παραβίαση της Parity στις Ασθενείς Αλληλεπιδράσεις

- Είδαμε ότι οι ασθενείς αλληλεπιδράσεις περιγράφονται από ένα διανυσματικό μέρος  $V$  (vector) και ένα αξονικό διανυσματικό μέρος  $A$  (axial vector)

οποιαδήποτε διαδικασία εξαρτάται από  
(vector)  $\times$  (axial vector)  
θα πρέπει να παραβιάζει την parity



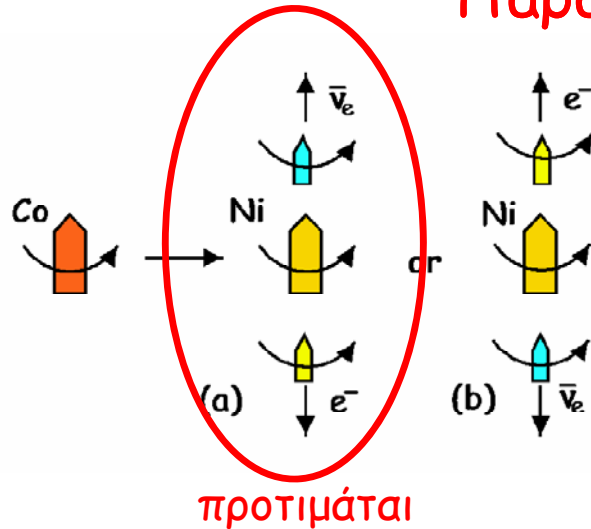
Το στοιχείο πίνακα (Matrix element) στη θεωρία του Fermi είναι:

$$\mathcal{M}_F \rightarrow \mathcal{M}_V - \mathcal{M}_A$$

$$|\mathcal{M}_F|^2 = |\mathcal{M}_V|^2 + |\mathcal{M}_A|^2 - 2\mathcal{M}_V \cdot \mathcal{M}_A$$

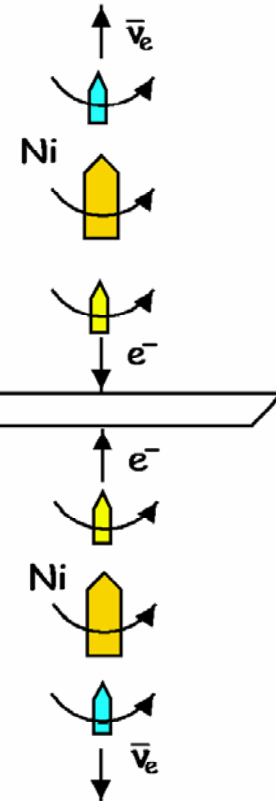
Παραβίαση Parity

# Παραβίαση της Parity



spin και ορμή  
αντιπαράλληλα  
αντίθετη  
κατεύθυνση από το  
spin του πυρήνα

ο καθρέφτης αλλάζει την  
κατεύθυνση κίνησης αλλά όχι το  
spin



spin και ορμή  
παράλληλα  
κατεύθυνση ίδια με  
το spin του πυρήνα

Η μετρούμενη κατανομή είναι:

$$I(e^-) \propto 1 - \frac{\vec{\sigma} \cdot \vec{p}}{E}$$

όπου  $\vec{\sigma}$  το κανονικοποιημένο spin του πυρήνα.

Αυτή η ποσότητα παραβιάζει την Parity

$$P(1 - \frac{\vec{\sigma} \cdot \vec{p}}{E}) = 1 + \frac{\vec{\sigma} \cdot \vec{p}}{E} \neq 1 - \frac{\vec{\sigma} \cdot \vec{p}}{E}$$

Γ. Τσιπολίτης

## Παραβίαση της Parity

- Από την αρχή διατήρησης της στροφορμής έπεται ότι το spin του ηλεκτρονίου πρέπει να είναι παράλληλο με το spin του πυρήνα οπότε στην έκφραση

$$I(e^-) \propto 1 - \frac{\vec{\sigma} \cdot \vec{p}}{E}$$

το  $\vec{\sigma}$  εκφράζει και την κατεύθυνση του spin του ηλεκτρονίου οπότε μπορούμε να γράψουμε την έκφραση με τη μορφή

$$I(e^-) \propto 1 - \beta \cos \theta$$

Μετρώντας τα ηλεκτρόνια που πάνε προς τα πάνω (spin παράλληλο) και τα ηλεκτρόνια που πάνε προς τα κάτω (spin αντιπαράλληλο) βρίσκουμε την πόλωση (polarization) των ηλεκτρονίων

$$P = \frac{I^{\text{πάνω}} - I^{\text{κάτω}}}{I^{\text{πάνω}} + I^{\text{κάτω}}} = -\beta$$



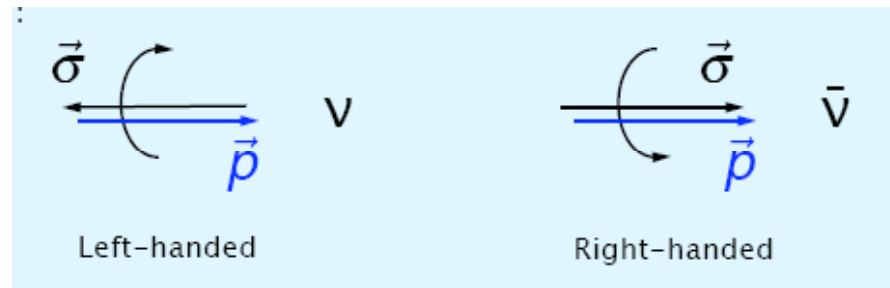
## Παραβίαση της Parity

- Άρα βλέπουμε, πειραματικά, ότι τα ηλεκτρόνια που παράγονται από  $\beta$ -διάσπαση είναι πολωμένα και μάλιστα η πόλωση είναι  $-\beta$ . Αυτό σημαίνει ότι **οι ασθενείς αλληλεπιδράσεις έχουν εξάρτηση από το spin.**

Για το αντινεutrino επειδή η μάζα του είναι μηδέν σημαίνει ότι το  $\beta=1$  άρα είναι 100% πολωμένα.

Αν κάνουμε το ίδιο πείραμα με παραγωγή ποζιτρονίων θα βρούμε ότι η πόλωση των ποζιτρονίων είναι  $+\beta$  και η πόλωση των νεutrino είναι  $-1$ .

- Το νεutrino πρέπει να έχει το spin του αντιπαράλληλο με την ορμή του ενώ το αντινεutrino πρέπει να έχει το spin του παράλληλο.



- Οι ασθενείς αλληλεπιδράσεις αλληλεπιδρούν μόνο με "left-handed" σωματίδια και "right-handed" αντισωματίδια.

## Παραβίαση της Parity

- Αν θυμηθούμε τον ορισμό της helicity οι ασθενείς αλληλεπιδράσεις αλληλεπιδρούν μόνο με σωματίδια με  $h=-1$ .
- Για σωματίδια με μηδενική μάζα, όπως είναι τα νετρίνα, σημαίνει ότι είναι ΠΑΝΤΟΤΕ "left-handed",  $h=-1$ .
- Για σωματίδια που έχουν μάζα, όσο γρήγορα και αν κινούνται μπορούμε να βρούμε ένα σύστημα που κινείται γρηγορότερα από το σωματίδιο. Σ' αυτό το σύστημα το spin δεν αλλάζει, αλλάζει όμως η φορά της κίνησης. Έτσι για τα ηλεκτρόνια, οι ασθενείς δυνάμεις αλληλεπιδρούν μόνο με "left-handed" ηλεκτρόνια. Αυτό δεν σημαίνει ότι "right-handed" ηλεκτρόνια δεν παράγονται σε ασθενείς αλληλεπιδράσεις μιας και πάντα μπορούμε να βρούμε ένα σύστημα που αλλάζει τα "left-handed" ηλεκτρόνια σε "right-handed".
- Γι' αυτό το λόγο βρίσκουμε το  $-\beta$  στην πόλωση των ηλεκτρονίων.

## Διάσπαση του πιονίου

- Ας εφαρμόσουμε αυτές τις ιδέες στην διάσπαση του πιονίου. Εφόσον έχουμε την παρουσία νετρίνου σημαίνει ότι η διάσπαση γίνεται μέσω ασθενών αλληλεπιδράσεων.



phase space  $\propto$

$$p^2 \frac{dp}{dE} = \frac{(m_\pi^2 + m^2)(m_\pi^2 - m^2)^2}{4m_\pi^4}$$

- Από το phase space περιμένουμε:  $\Gamma(\pi \rightarrow e\nu) \approx 3,45 \Gamma(\pi \rightarrow \mu\nu)$
- Μετρήθηκε:  $\Gamma(\pi \rightarrow e\nu) = 1,23 \times 10^{-4} \Gamma(\pi \rightarrow \mu\nu)$
- Στο σύστημα του πιονίου έχουμε:

λάθος helicity!  $\xleftarrow{\mu^-} \pi^- \xrightarrow{\bar{\nu}_\mu}$  πάντα δεξιόστροφο

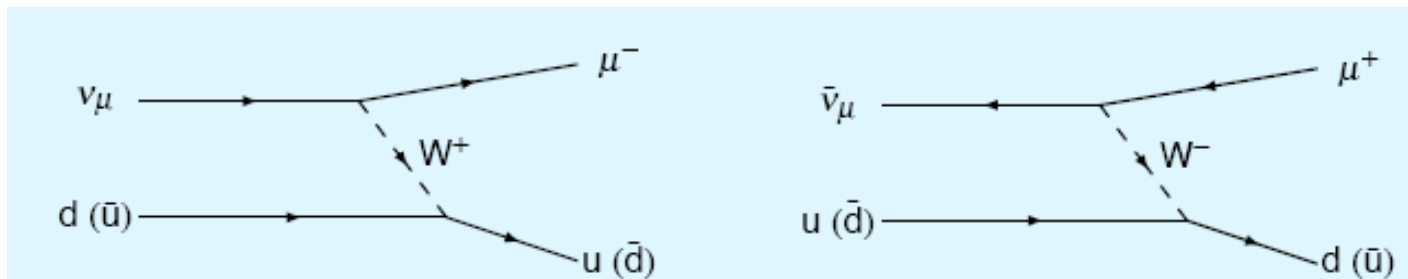
Η πιθανότητα να βρούμε το μίονιο με λάθος helicity είναι  $1 - \beta_\mu = 0,727$

Η πιθανότητα να βρούμε το ηλεκτρόνιο με λάθος helicity είναι  $1 - \beta_e = 2,58 \cdot 10^{-5}$

$$\frac{\Gamma(\pi \rightarrow e\nu)}{\Gamma(\pi \rightarrow \mu\nu)} = \frac{2,58 \cdot 10^{-5}}{0,727} \cdot 3,45 = 1,22 \cdot 10^{-4} !!!$$

## Βαθιά ανελαστική σκέδαση νετρίνο

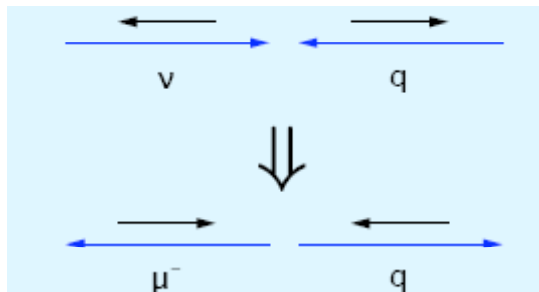
- Είδαμε ότι οι ασθενείς αλληλεπιδράσεις αντιδρούν μόνο με "left-handed" σωματίδια ("right-handed" αντισωματίδια). Αυτή η ιδιότητα θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για να μελετήσουμε τις διαφορές μεταξύ κουαρκ και αντικουαρκ μέσα στο νουκλεόνιο. Ας ξαναδούμε την αλληλεπίδραση φορτισμένου ρεύματος. Λόγω της διατήρησης του λεπτονικού αριθμού μπορούμε να έχουμε τις εξής αντιδράσεις:



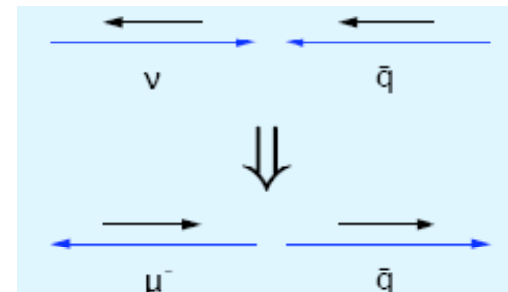
- Άρα τα νετρίνο αλληλεπιδρούν με αρνητικά φορτισμένα κουαρκ και αντικουαρκ.
- Τα κουαρκ πρέπει να είναι "left-handed" και τα αντικουαρκ "right-handed".
- Σαν αποτέλεσμα αυτού θα έχουμε διαφορετικές γωνιακές κατανομές για αλληλεπιδράσεις με κουάρκ απ' ότι με αντικουαρκ.

## σκέδαση νετρίνο

- Για παράδειγμα ας δούμε τη σκέδαση νετρίνο σε παρα πολύ μεγάλη ενέργεια ώστε όλα τα σωματίδια να έχουν  $\beta \sim 1$  που σημαίνει ότι όλα τα σωματίδια είναι πολωμένα. Σ' αυτές τις συνθήκες ας δούμε τι γίνεται στην περίπτωση που παρατηρούμε οπισθοσκέδαση ( $\theta = 180^\circ$ ).



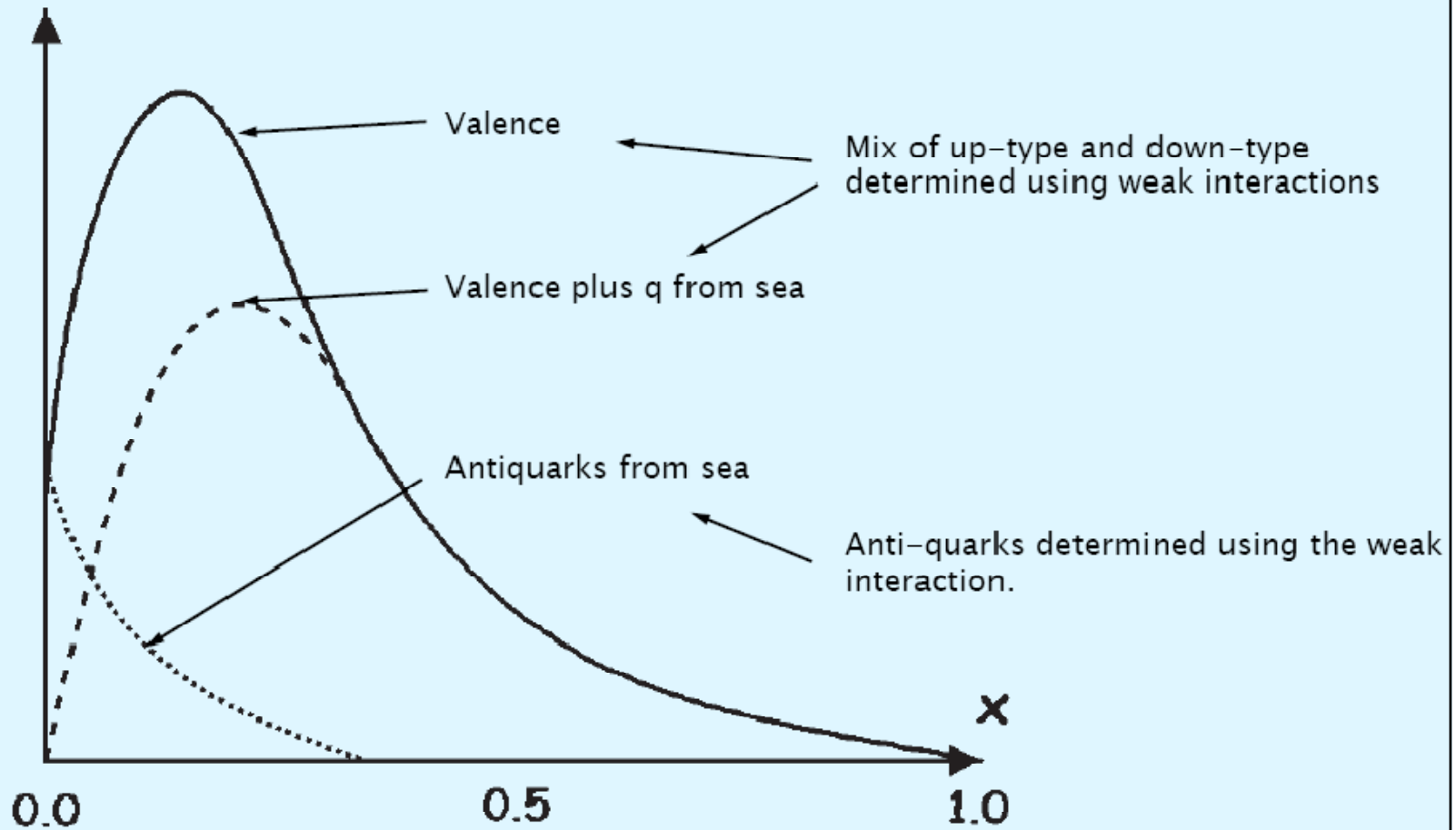
Η στροφορμή διατηρείται (όπως και σε όλες τις άλλες γωνίες σκέδασης) άρα η **γωνιακή κατανομή** είναι **ισοτροπική**



Η στροφορμή  $\Delta EN$  διατηρείται άρα δεν μπορούμε να έχουμε οπισθοσκέδαση. Η **γωνιακή κατανομή** είναι  $(1 + \cos\theta)^2$

Μ' αυτό τον τρόπο μπορούμε να ξεχωρίσουμε τα κουαρκ από τα αντικουαρκ και μάλιστα αν χρησιμοποιήσουμε και δέσμες από αντινετρίνο μπορούμε να ξεχωρίσουμε τα  $u$  από τα  $d$ .

## Μια πρώτη ματιά στη δομή του πρωτονίου



Γ. Τσιπολίτης