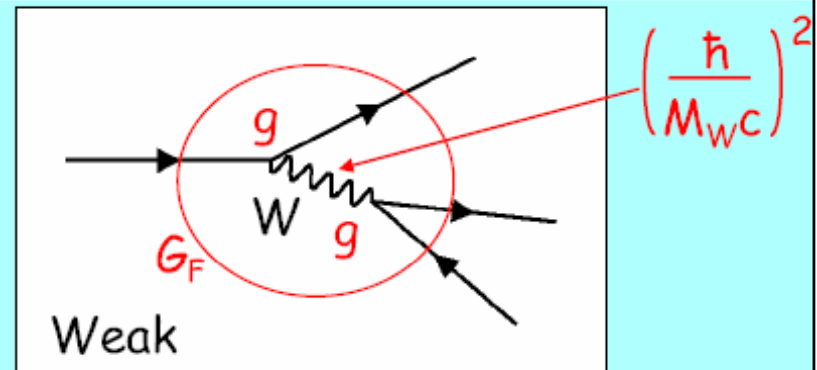
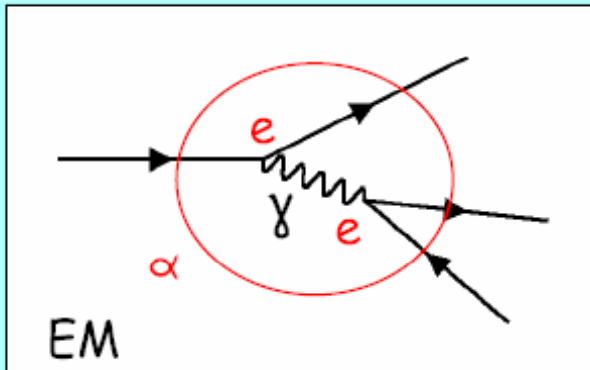
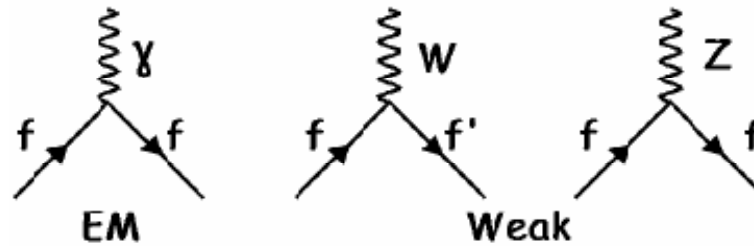


## Η Ηλεκτρασθενής Ενοποίηση

- Ο Maxwell ενοποίησε τις Ηλεκτρικές με τις Μαγνητικές δυνάμεις στον γνωστό μας Ηλεκτρομαγνητισμό.
- Οι Glashow, Weinberg και Salam απέδειξαν ότι οι Ηλεκτρομαγνητικές αλληλεπιδράσεις και οι Ασθενείς αλληλεπιδράσεις αποτελούν διαφορετικές όψεις των Ηλεκτρασθενών Αλληλεπιδράσεων.



Γ. Τσιπολίτης

## Ηλεκτρασθενείς Αλληλεπιδράσεις

- Όπως είδαμε οι ασθενείς αλληλεπιδράσεις μέσω φορτισμένου ρεύματος αντιδρούν μόνο με αριστερόστροφα σωματίδια (δεξιόστροφα αντισωματίδια) και μάλιστα η σταθερά ζεύξης είναι η ίδια

	διάσπαση	BR
	$e^+ \nu_e$	$\frac{1}{9}$
	$\mu^+ \nu_\mu$	$\frac{1}{9}$
$W^+ \rightarrow$	$\tau^+ \nu_\tau$	$\frac{1}{9}$
	$u \bar{d}' = u (\bar{d} \cos \theta_c + \bar{s}' \sin \theta_c)$	$\frac{3}{9}$
	$c \bar{s}' = c (\bar{s} \cos \theta_c - \bar{d}' \sin \theta_c)$	$\frac{3}{9}$
	σύνολο	$\frac{9}{9}$

- Για το  $Z^0$  με ανάλογο τρόπο θα έπρεπε να είχαμε

δηλαδή

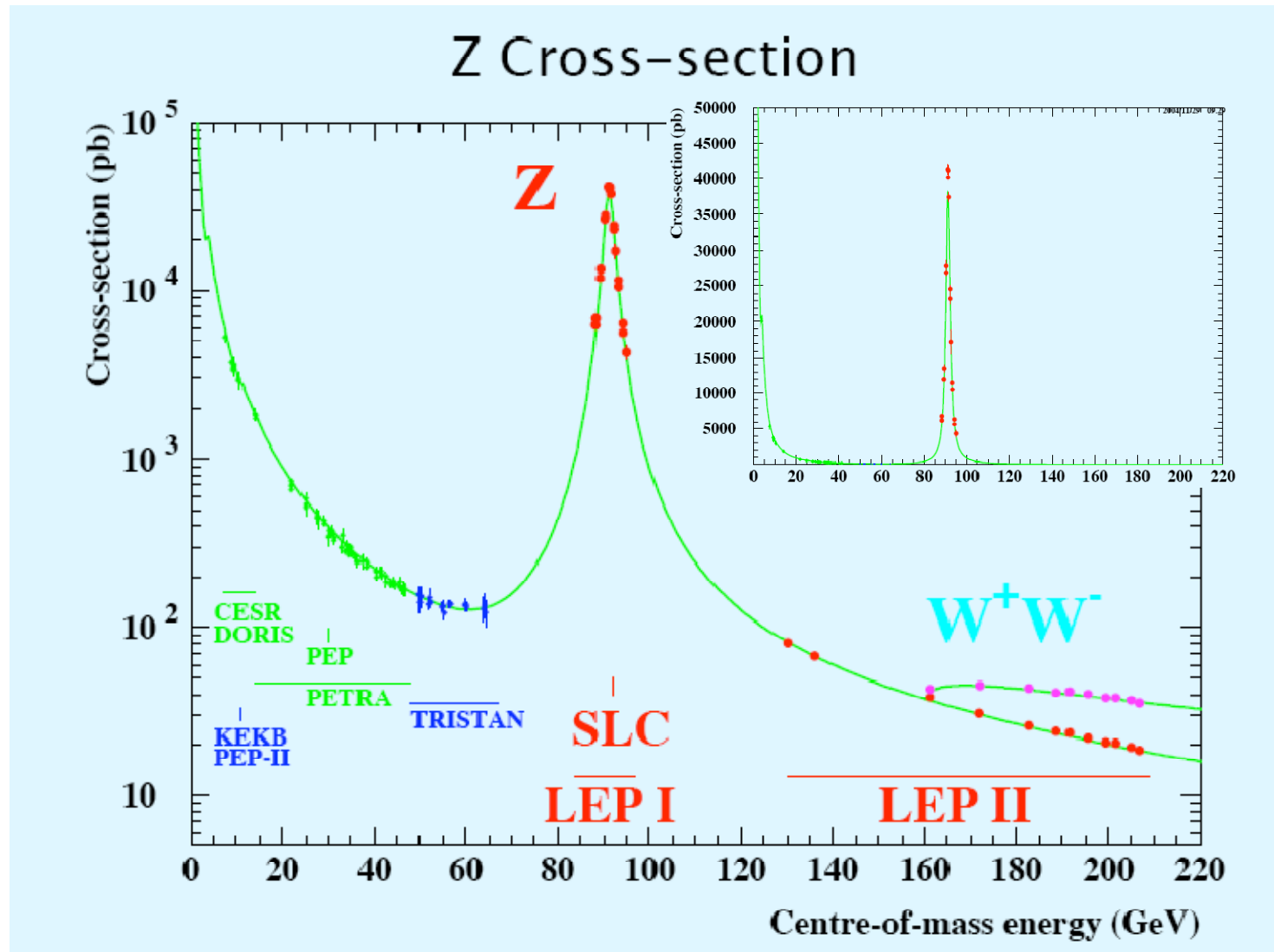
$$BR(Z^0 \rightarrow e^+ e^-) = BR(Z^0 \rightarrow \nu_\mu \bar{\nu}_\mu) = 4,8\%$$

$$\begin{array}{l}
 Z^0 \rightarrow \left. \begin{array}{ccc} e^+ e^- & \mu^+ \mu^- & \tau^+ \tau^- \\ \nu_e \bar{\nu}_e & \nu_\mu \bar{\nu}_\mu & \nu_\tau \bar{\nu}_\tau \end{array} \right\} 6 \\
 \left. \begin{array}{ccc} u \bar{u} & c \bar{c} & \\ d \bar{d} & s \bar{s} & b \bar{b} \end{array} \right\} 5 \times 3 = 15 \\
 \hline
 21
 \end{array}$$

## Μετρήσεις BR

- Για το  $W$  η μέτρηση των BR είναι απλό. Στις χαμηλές ενέργειες οι μετρήσεις διαφόρων μέσων χρόνων ζωής μας δίνουν πληροφορίες για τα BR. Στις υψηλές ενέργειες τα  $W$  παράγονται σε ζεύγη μέσω  $q\bar{q}$  αλληλεπιδράσεων (σε επιταχυντές  $p\bar{p}$ ) ή σε συγκρούσεις  $e^+e^-$ . Κατά την παραγωγή ζεύγους  $W$  μπορούμε ταυτοποιώντας το ένα  $W$  να κοιτάξουμε τις διασπάσεις του άλλου και να μετρήσουμε τα BR
- Για το  $Z^0$  είναι πιο δύσκολο μιας και στις χαμηλές ενέργειες τα ασθενή ουδέτερα ρεύματα "σκιάζονται" από τις ισχυρότερες  $H/M$  αλληλεπιδράσεις. Στις υψηλές ενέργειες συνήθως παράγεται ένα  $Z^0$  είτε σε  $q\bar{q}$  ή  $e^+e^-$  αλληλεπιδράσεις.
- Μπορούμε όμως να χρησιμοποιήσουμε τις μετρήσεις της ενεργού διατομής για να βρούμε τα BR

# Μέτρηση Ενεργού διατομής στο $Z^0$



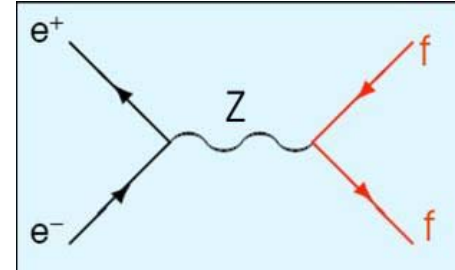
Γ. Τσιπολίτης

## σ και BR

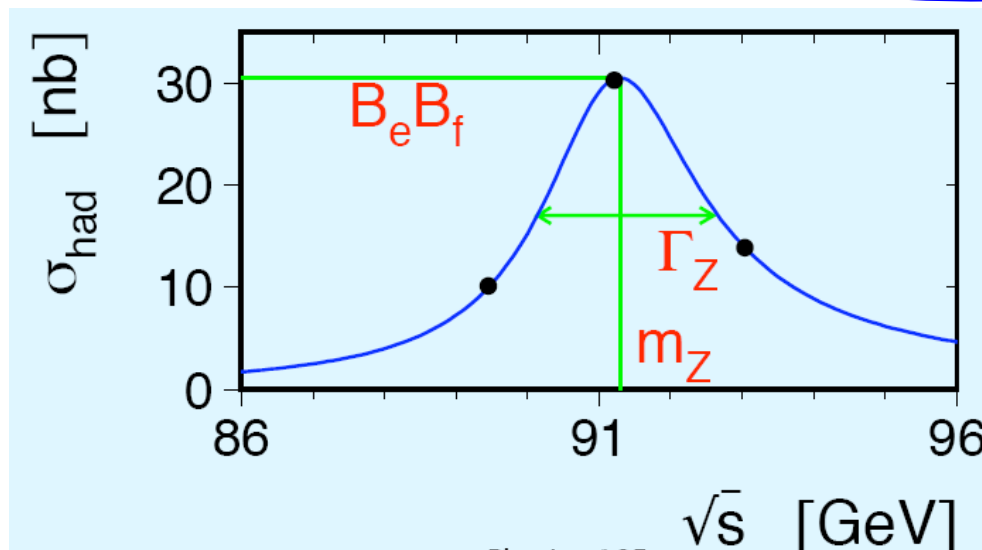
- Μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τις μετρήσεις της ενεργού διατομής για να καθορίσουμε τα BR. Η ενεργός διατομή παραγωγής του  $Z^0$  (lowest order!) δίνεται από μια σχέση που έχει τη μορφή της Breit-Wigner:

$$\sigma_{e^+e^- \rightarrow ff^-} = 12\pi (\hbar c)^2 \frac{\Gamma_{e^+e^-} \Gamma_{ff^-}}{(s - m_Z^2 c^4)^2 + m_Z^2 c^4 \Gamma_Z^2}$$

$$\sqrt{s} = m_Z$$



$$\sigma_{e^+e^- \rightarrow ff^-} = \frac{12\pi (\hbar c)^2 \Gamma_{e^+e^-} \Gamma_{ff^-}}{m_Z^2 c^4 \Gamma_Z^2} = \frac{12\pi (\hbar c)^2}{m_Z^2 c^4} BR(Z \rightarrow e^+e^-) BR(Z \rightarrow ff^-)$$



Γ. Τσιπολίτης

## Μετρήσεις των BR στο $Z^0$

- Από τις μετρήσεις των διαφόρων ενεργών διατομών μπορούμε να υπολογίσουμε το συνολικό πλάτος καθώς και τα α επιμέρους πλάτη και BR. Για την περίπτωση  $Z \rightarrow \nu\bar{\nu}$  αν και δεν μπορούμε να την μετρήσουμε απευθείας μπορούμε να πάρουμε πληροφορίες από:

$$\Gamma_{\nu\bar{\nu}} = \Gamma_Z - \Gamma_{q\bar{q}} - \Gamma_{ee} - \Gamma_{\mu\mu} - \Gamma_{\tau\tau}$$

- αποτελέσματα:

$$BR(Z \rightarrow e^+e^-) = 3,3632 \pm 0,0042\%$$

$$BR(Z \rightarrow \mu^+\mu^-) = 3,3662 \pm 0,0066\%$$

$$BR(Z \rightarrow \tau^+\tau^-) = 3,3696 \pm 0,0083\%$$

$$BR(Z \rightarrow q\bar{q}) = 69,967 \pm 0,093\%$$

$$BR(Z \rightarrow \nu\bar{\nu}) = 19,934 \pm 0,098\% \approx 2 \cdot BR(Z \rightarrow l^+l^-)!!!$$

- Δεν έχουμε την ίδια ζεύξη για όλες τις αντιδράσεις του ουδέτερου ρεύματος στις ασθενείς δυνάμεις. Το  $Z$  πιο πολύπλοκο από το  $W$ .
- Λύση  $\rightarrow$  Ηλεκτρασθενής (EW) ενοποίηση

## Ασθενές Ισοσπιν

- Για να καταλάβουμε καλύτερα την ΕW ενοποίηση (Nobel Prize Glashow, Weinberg & Salam), πρέπει να εισαγάγουμε το ασθενές ισοσπιν ( $T$ ).
- Τα αριστερόστροφα λεπτόνια και κουαρκ σχηματίζουν ζεύγη του ασθενούς ισοσπιν και μπορούν να μετασχηματιστούν μεταξύ τους εκπέμποντας ένα  $W$ .
- Τα δεξιόστροφα φερμιόνια δεν λαμβάνουν μέρος στις ασθενείς αλληλεπιδράσεις άρα είναι ισοσπιν "singlets", με  $T = 0$ .

Family			$T$	$T_3$	$Q$
$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e \end{pmatrix}_L$	$\begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu \end{pmatrix}_L$	$\begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau \end{pmatrix}_L$	$1/2$	$+1/2$ $-1/2$	$0$ $-1$
$\nu_{eR}$	$\nu_{\mu R}$	$\nu_{\tau R}$	$0$	$0$	$0$
$e_R$	$\mu_R$	$\tau_R$	$0$	$0$	$-1$
$\begin{pmatrix} u \\ d' \end{pmatrix}_L$	$\begin{pmatrix} c \\ s' \end{pmatrix}_L$	$\begin{pmatrix} t \\ b' \end{pmatrix}_L$	$1/2$	$+1/2$ $-1/2$	$+2/3$ $-1/3$
$u_R$	$c_R$	$t_R$	$0$	$0$	$+2/3$
$d_R$	$s_R$	$b_R$	$0$	$0$	$-1/3$

$f \rightarrow \bar{f}$
$Q \rightarrow -Q$
$T_3 \rightarrow -T_3$
$Y \rightarrow -Y$
$L \rightarrow R$
$R \rightarrow L$

- Επίσης εισάγουμε το υπερφορτίο  $Y=2(Q-T_3)$

Γ. Τσιπολίτης

## Ασθενές Isospin

- Στις ασθενείς αλληλεπιδράσεις το  $T_3$  διατηρείται.
- Άρα πρέπει  $T_3(W^-) = -1; T_3(W^+) = +1 \Rightarrow T(W) \geq 1$
- Θεωρώντας ότι  $T(W) = 1$ , τότε χρειαζόμαστε μια τρίτη κατάσταση με  $T_3 = 0$
- Άρα χρειαζόμαστε το  $W^0$ , με  $Q = 0, T = 1, T_3 = 0$
- Εφόσον το  $W^0$  και τα  $W^\pm$  αποτελούν "triplet" πρέπει όλα να έχουν τις ίδιες ζεύξεις, "g", με τα  $W^\pm$ .
- Το  $W^0$  δεν μπορεί να είναι το  $Z$ , επειδή οι ζεύξεις του  $Z$  δεν είναι ίδιες
- Ας υποθέσουμε ότι έχουμε και ένα νέο σωματίδιο, το  $B^0$ , που αλληλεπιδρά με το υπερφορτίο ( $Y$ ), με σταθερά ζεύξης  $g'/2$ .
- Οι ουδέτερες καταστάσεις  $B^0$  και  $W^0$  αναμειγνύονται

$$\begin{aligned} & \cos\theta_W |B^0\rangle + \sin\theta_W |W^0\rangle \\ & -\sin\theta_W |B^0\rangle + \cos\theta_W |W^0\rangle \end{aligned}$$



## Το φωτόνιο

- Θέλουμε το φωτόνιο να έχει ζεύξη της μορφής  $Qe$ .

$$|\gamma\rangle = \cos\theta_W |B^0\rangle + \sin\theta_W |W^0\rangle$$

- Το  $B^0$  αλληλεπιδρά με το  $Y=2(Q-T_3)$  με ισχύ  $g'/2$ , και το  $W^0$  με το  $T_3$  με ισχύ  $g$ . Άρα έχουμε

$$\begin{aligned} Qe &= \frac{g'}{2} 2(Q - T_3) \cos\theta_W + g T_3 \sin\theta_W \\ &= g'(Q - T_3) \cos\theta_W + g T_3 \sin\theta_W \end{aligned}$$

$$g' \cos\theta_W = g \sin\theta_W = e$$

$$\Rightarrow \frac{g'}{g} = \tan\theta_W$$

Για το  $Z$  έχουμε

$$\begin{aligned} g_Z &= -\frac{g'}{2} 2(Q - T_3) \sin\theta_W + g T_3 \cos\theta_W \\ &= -g(Q - T_3) \tan\theta_W \sin\theta_W + g T_3 \cos\theta_W \\ &= \frac{g}{\cos\theta_W} (T_3 - Q \sin^2\theta_W) \end{aligned}$$

$\theta_W$  παράμετρος του μοντέλου  
→ πρέπει να μετρηθεί από το πείραμα

$$\sin\theta_W = 0,23153 \pm 0,00016$$

## Το μποζόνιο $Z^0$

$$\Gamma_{ff} \propto g_Z^2 = \frac{g^2}{\cos^2 \theta_W} (T_3 - Q \sin^2 \theta_W)^2$$

- Ας σημειωθεί ότι για τα νετρίνα μόνο τα αριστερόστροφα συμμετέχουν μιας και τα δεξιόστροφα έχουν  $T_3 = 0$ , και  $Q = 0$ , άρα δεν αλληλεπιδρούν.

$$\begin{aligned} g_Z^2 &= \frac{g^2}{\cos^2 \theta_W} (T_3 - Q \sin^2 \theta_W)^2 \\ &= \frac{g^2}{\cos^2 \theta_W} \left(\frac{1}{2}\right)^2 = \frac{1}{4} \frac{g^2}{\cos^2 \theta_W} \end{aligned}$$

- Άρα

$$\Gamma_{\nu\bar{\nu}} \propto \frac{1}{4} \frac{g^2}{\cos^2 \theta_W}$$

## Το μποζόνιο $Z^0$

- Στην περίπτωση των ηλεκτρονίων πρέπει να λάβουμε υπ' όψη και τα αριστερόστροφα και τα δεξιόστροφα μιας και το  $Z$  αλληλεπιδρά με το  $Q$  οπότε δεν παίζει ρόλο η ελικότητα

$$\Gamma_{e^-e^+} = \Gamma_{e_L^-e_R^+} + \Gamma_{e_R^-e_L^+}$$

$$e_L^- \rightarrow \frac{g^2}{\cos^2 \theta_W} (T_3 - Q \sin^2 \theta_W)^2$$

$$\approx \frac{g^2}{\cos^2 \theta_W} \left( -\frac{1}{2} + \frac{1}{4} \right)^2 = \frac{1}{16} \frac{g^2}{\cos^2 \theta_W}$$

$$e_R^- \rightarrow \frac{g^2}{\cos^2 \theta_W} (T_3 - Q \sin^2 \theta_W)^2$$

$$\approx \frac{g^2}{\cos^2 \theta_W} \left( \frac{1}{4} \right)^2 = \frac{1}{16} \frac{g^2}{\cos^2 \theta_W}$$

$$\Gamma_{e^-e^+} \propto \frac{1}{8} \frac{g^2}{\cos^2 \theta_W} \approx \frac{1}{2} \Gamma_{\nu\nu^-}$$

## Μερικά Πλάτη του $Z^0$

- Ο πλήρης υπολογισμός μας δίνει:

$$\begin{array}{l} \Gamma_{\nu\nu} = 167 \text{ MeV} \\ \Gamma_{\ell\ell} = 84 \text{ MeV} \\ \Gamma_{\text{had}} = 1742 \text{ MeV} \end{array} \left. \vphantom{\begin{array}{l} \Gamma_{\nu\nu} \\ \Gamma_{\ell\ell} \\ \Gamma_{\text{had}} \end{array}} \right\} \begin{array}{l} \text{ανα οικογένεια λεπτονίου} \\ \\ (\text{uu+dd+cc+ss+bb}) \otimes \text{QCD διορθώσεις} \end{array}$$

$\rightarrow \Gamma_Z = 2495 \text{ MeV}$

- Πειραματικές μετρήσεις

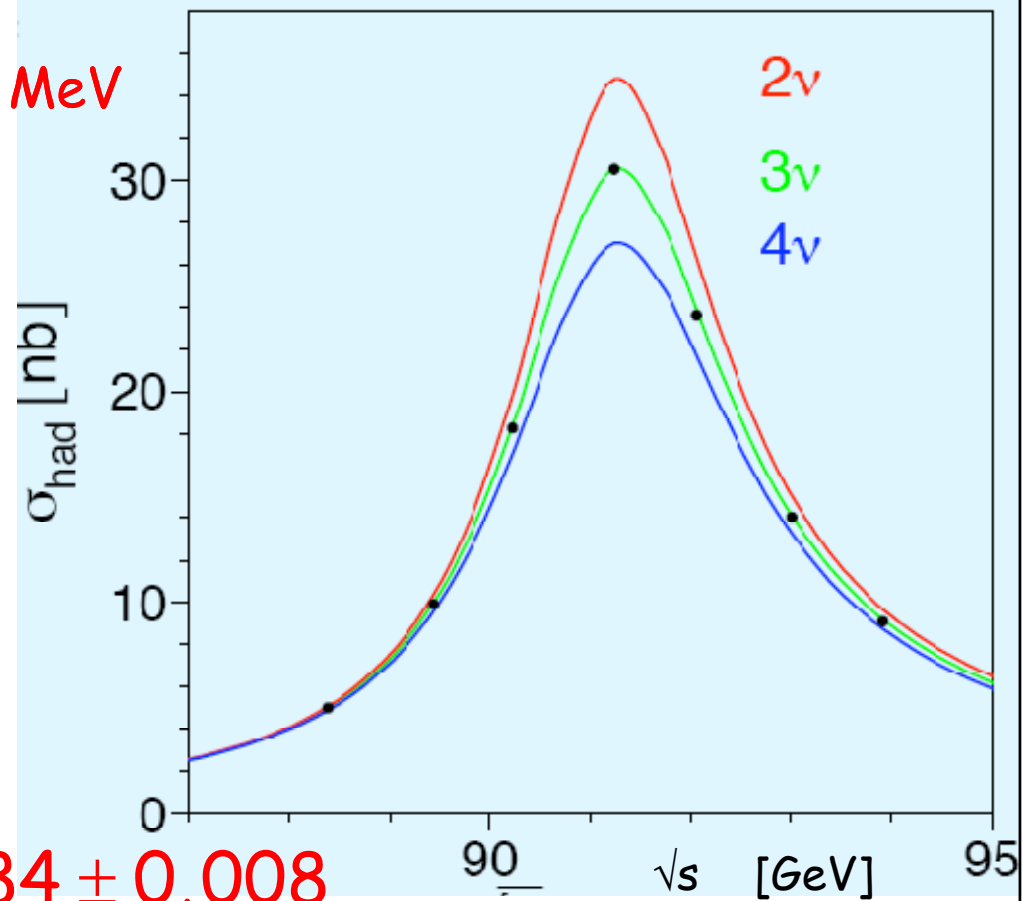
$$\begin{array}{l} \Gamma_{\ell\ell} = 84,0 \pm 0,9 \text{ MeV} \\ \Gamma_{\text{had}} = 1744,4 \pm 2,0 \text{ MeV} \\ \Gamma_Z = 2495,2 \pm 2,3 \text{ MeV} \end{array}$$

Εντυπωσιακή συμφωνία !!!

## Αριθμός οικογενειών νετρίνων

$$\Gamma_{invisible} = \Gamma_Z - \Gamma_{had} - 3\Gamma_{e^-e^+}$$

- $\Gamma_{invisible} = 499,0 \pm 1,5 \text{ MeV}$



$$N_\nu = \frac{\Gamma_{invisible}}{\Gamma_{\nu\bar{\nu}}^{theor.}} = 2,984 \pm 0,008$$

Γ. Τσιπολίτης

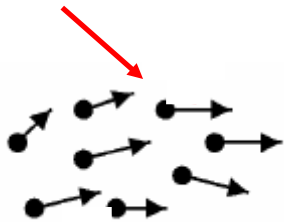
## Ο Μηχανισμός Higgs

- Στη βασική θεωρία της ηλεκτρασθενούς ενοποίησης έχουμε 4 "μποζόνια βαθμίδας" (gauge bosons) - τα 3  $W$  (triplet) και το  $B$  (singlet). Εξ αιτίας του λεγόμενου "αμετάβλητο βαθμίδας" (gauge invariance) τα 4 μποζόνια βαθμίδας έχουν μηδενική μάζα. Γνωρίζουμε όμως ότι τα  $Z$  και  $W$  έχουν μάζα.
- Η βασική ιδέα είναι ότι όλα τα σωματίδια έχουν μηδενική μάζα σε μεγάλες ενέργειες. Αποκτούν μάζα μέσω του "αυθόρμητου σπάσιμου της συμμετρίας" (spontaneous symmetry breaking). Αυτό τον μηχανισμό τον ονομάζουμε μηχανισμό Higgs.
- Τα 4 μποζόνια ακολουθούνται από 4 πεδία "Higgs". Καθώς το σύστημα (σύμπαν!) κρυώνει, η συμμετρία σπάει αυθόρμητα και τα  $W_3$  και  $B$  αναμειγνύονται και δημιουργούν τα  $\gamma$  και  $Z$  τα  $W_1$  και  $W_2$  μετατρέπονται στα  $W^+$  και  $W^-$ . Τα  $W^+$ ,  $W^-$  και  $Z$  αποκτούν μάζα απορροφώντας 3 από τα 4 πεδία Higgs. Το φωτόνιο παραμένει με μηδενική μάζα. Ένα πεδίο Higgs παραμένει και αποτελεί το σωματίδιο higgs.

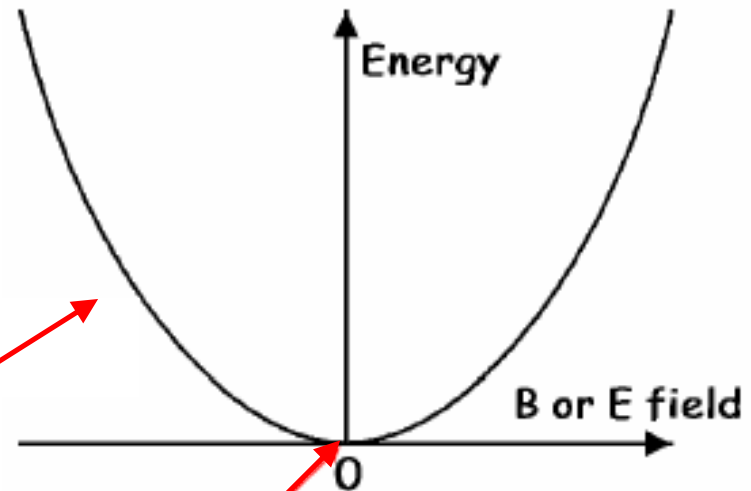
## Το πεδίο higgs

- Το πεδίο higgs έχει την ασυνήθιστη ιδιότητα ότι η κατάσταση για την οποία το πεδίο higgs μηδενίζεται δεν είναι η κατάσταση με την ελάχιστη ενέργεια.
- Στον ηλεκτρομαγνητισμό σε κάθε σημείο του χώρου αντιστοιχεί μια τιμή (και κατεύθυνση) των πεδίων  $B$  και  $E$ .

Διανυσματική Θεωρία - spin 1  $\gamma$



Σε κάθε σημείο του  
χώρου έχουμε  
αποθηκευμένη ενέργεια  
 $\propto E^2$  ή  $B^2$



Δεν έχουμε ούτε πεδίο ούτε ενέργεια

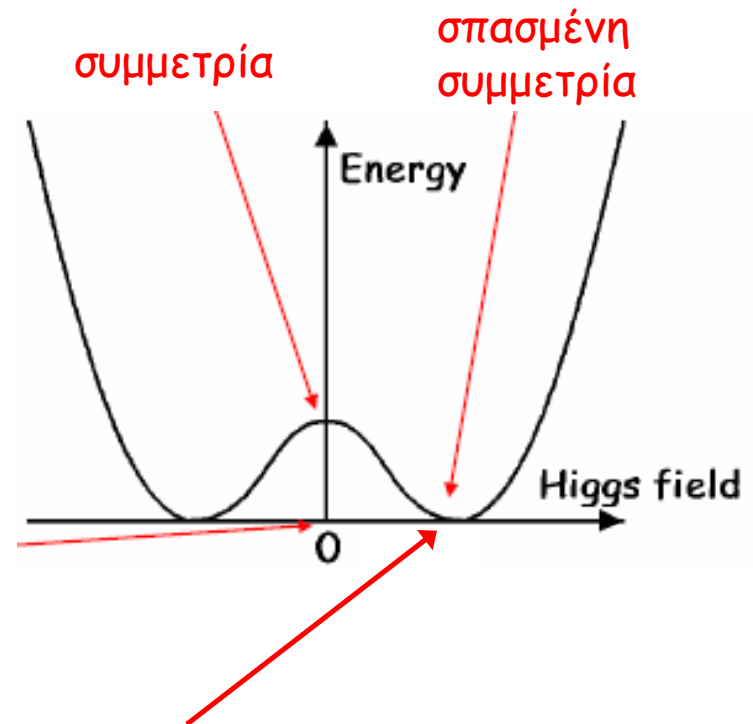
## Το πεδίο higgs

- Για το πεδίο higgs δεν υπάρχει κατεύθυνση βαθμωτό πεδίο με spin 0



Η ενέργεια σχετίζεται με το πεδίο ως εξής

Η ενέργεια είναι  $>0$  όταν το πεδίο  $=0$



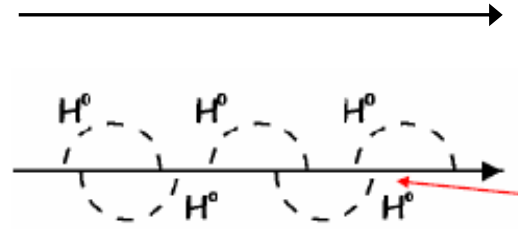
Για ενέργεια = 0 το πεδίο higgs δεν μηδενίζεται → **σωματίδια higgs**



## Το σωματίδιο higgs

- Το σωματίδιο higgs,  $H^0$ , είναι ουδέτερο με spin=0. Έχει μάζα αλλά κανένα άλλο κβαντικό αριθμό και έχει ζεύξη  $\propto$  μάζα.
- Αυτό που αποκαλούμε κενό χώρο (vacuum) θα μπορούσε να είναι γεμάτος με δυνητικά σωματίδια higgs. Όταν ένα σωματίδιο κινείται μέσα στον κενό χώρο αλληλεπιδρά με τα σωματίδια higgs.

• Το σωματίδιο περιβάλλεται από ένα "νέφος" σωματιδίων higgs και έτσι το σωματίδιο που αρχικά δεν είχε μάζα εμφανίζεται τώρα με μάζα. όπως όταν κινούμαστε μέσα σε ένα παχύρρευστο υγρό που μας επιβραδύνει σαν να είχαμε μεγαλύτερη μάζα.



Σωματίδιο χωρίς μάζα που κινείται στο χώρο

Αντιδρά με τα δυνητικά σωματίδια higgs

Χρειαζόμαστε αρκετά μεγάλη ενέργεια για να παράγουμε πραγματικά σωματίδια higgs  
→ ATLAS (LHC)

## Το σωματίδιο higgs???

- Υπήρχαν κάποιες πιθανές ενδείξεις για την παρατήρηση του higgs στο LEP. Κυρίως το πείραμα ALEPH είδε μια μικρή υπεροχή στην παραγωγή γεγονότων της μορφής

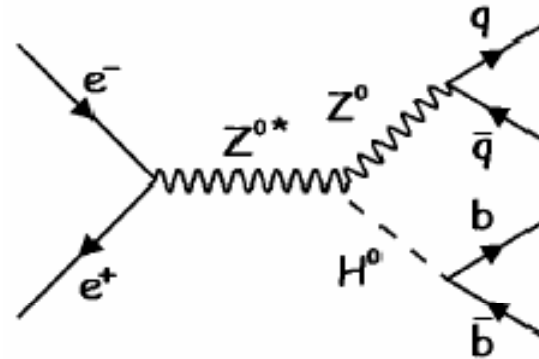
$$e^+ + e^- \rightarrow q + \bar{q} + b + \bar{b}$$

$q = u, d, s, c$  ή  $b$

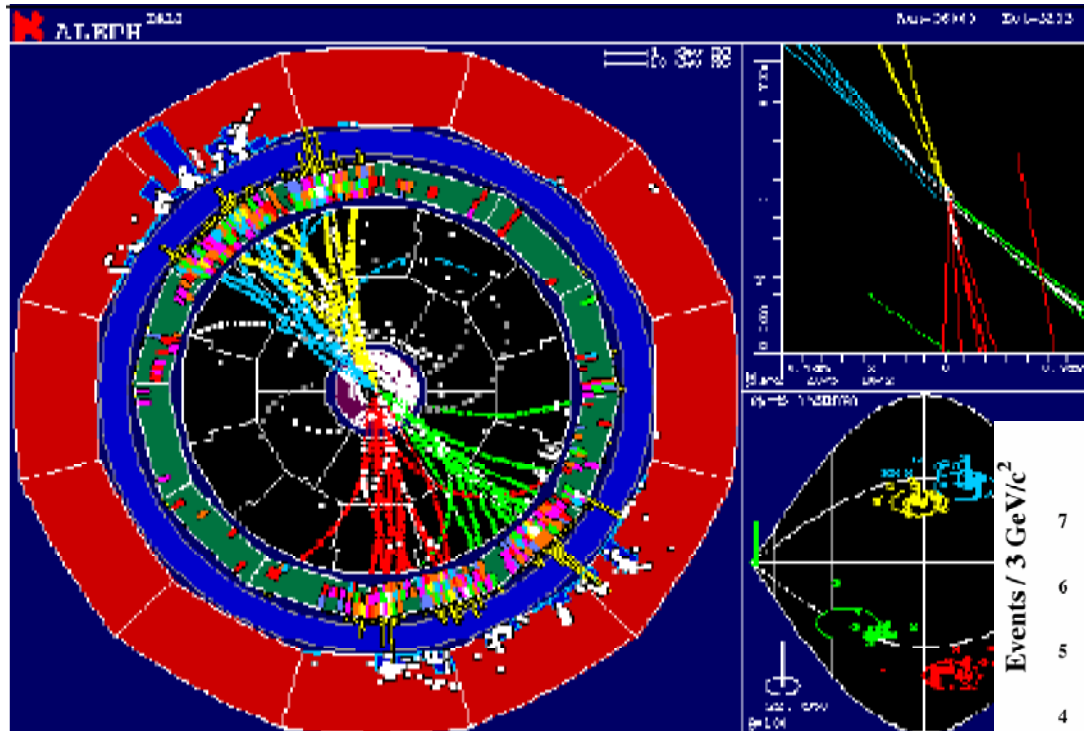
- Θα μπορούσε να είναι γεγονότα

$$e^+ + e^- \rightarrow Z^0 + H^0$$

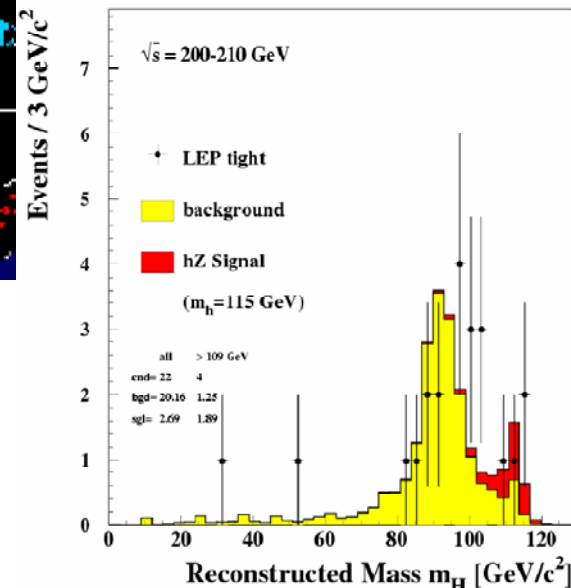
με  $Z^0 \rightarrow q + \bar{q}$  και  $H^0 \rightarrow b + \bar{b}$



# Το σωματίδιο higgs ???



$m_H > 114,3 \text{ GeV}$



Γ. Τσιπολίτης

# Περίληψη Καθιερωμένου Προτύπου

## • Σωματίδια

- Spin  $\frac{1}{2}$  φερμιόνια αντιφερμιόνια
  - (α) 3 οικογένειες **κουάρκ** (u, d) (c, s) (t, b)
  - (β) 3 οικογένειες **λεπτονίων** ( $e^-$ ,  $\nu_e$ ) ( $\mu^-$ ,  $\nu_\mu$ ) ( $\tau^-$ ,  $\nu_\tau$ )
- + αντισωματίδια τους
- Spin 1 gauge bosons
  - (α) 1 ηλεκτρασθενές μποζόνιο  $\gamma$  με μηδενική μάζα
  - (β) 3 ηλεκτρασθενή μποζόνια  $W^+$ ,  $W^-$ ,  $Z^0$
  - (γ) 8 γκλουόνια  $g$  με μηδενική μάζα
- Spin 0 μποζόνια higgs  $H^0$

## • Αλληλεπιδράσεις

- Η ηλεκτρομαγνητική αλληλεπίδραση με σταθερά ζεύξης  $e$
- Η ασθενής αλληλεπίδραση με σταθερά ζεύξης  $G_F$
- Η ισχυρή αλληλεπίδραση με σταθερά ζεύξης  $\alpha_s$

Ηλεκτρασθενής  
ενοποίηση με  
σταθερές  $g$  και  $g'$

## Αναπάντητα ερωτήματα

- Το Καθιερωμένο Πρότυπο κάνει αρκετές προβλέψεις - οι περισσότερες από τις οποίες έχουν ελεγχθεί με πολύ μεγάλη ακρίβεια π.χ. όπως οι διασπάσεις του  $Z^0$  σε κουάρκ ή λεπτόνια
- Όμως το Καθιερωμένο Πρότυπο **δεν** μπορεί να προβλέψει:
  - Τις **τιμές** των σταθερών ζεύξης  $e, g, g', a_s$
  - Τις **μάζες** των κουαρκ και των λεπτονίων
- Άλλες ερωτήσεις:
  - Γιατί έχουμε μόνο **3 οικογένειες** και όχι μόνο 1;
  - υπάρχει σχέση ανάμεσα στις **ισχυρές** και τις **ηλεκτρασθενείς** αλληλεπιδράσεις;
  - υπάρχει κάποια σχέση μεταξύ των **κουαρκ** και των **λεπτονίων**;
  - Γιατί το **ηλεκτρόνιο** και το **πρωτόνιο** έχουν **ακριβώς ίσα και αντίθετα φορτία** ενώ οι ιδιότητες τους είναι τόσο διαφορετικές;
  - Ποια είναι η **αιτία** της παραβίασης της **CP**;
  - Τι γίνεται με τη **βαρύτητα**;