



Το Μποζόνιο Higgs

29/05/13

Σκοποί:

- I. Να απαντήσει στο ερώτημα του τι είναι ακριβώς το σωματίδιο Higgs.
- II. Να εισάγει τους διάφορους τρόπους παραγωγής και μετάπτωσης του Higgs.
- III. Να δώσει μία σύντομη περίληψη για το τι ξέρουμε σήμερα για το Higgs
- IV. Να δώσει απλά επιχειρήματα για την τιμή του σπίν του σωματιδίου Higgs.

Το σωματίδιο Higgs σύμφωνα με το Καθιερωμένο Πρότυπο

Οι κβαντικές θεωρίες του Ηλεκτρομαγνητισμού, των ισχυρών και ασθενών αλληλεπιδράσεων είναι θεωρίας βαθμίδας (Gauge Theories). Οι θεωρίες αυτές υπακούν σε συγκεκριμένες εσωτερικές συμμετρίες οι οποίες είναι συμμετρίες της κυματοσυνάρτησης. Παραδείγματος χάριν η κυματοσυνάρτηση ενός θετικού πιονίου μέσα σε ηλεκτρομαγνητικό πεδίο έχει την εξής συμμετρία βαθμίδας.

$$\Psi(x, t) \rightarrow \Psi'(x, t) = e^{i\alpha(x, t)} \Psi(x, t) \quad (1)$$

Δηλαδή είναι δυνατόν να πολλαπλασιάσουμε την κυματοσυνάρτηση με μία αυθαίρετη φάση η οποία εξαρτάται από το χώρο και το χρόνο χωρίς να επηρεαστούν τα αποτελέσματα της θεωρίας. Τα φυσικά αποτελέσματα, δηλαδή οι πιθανότητες που υπολογίζουμε, δεν αλλάζουν διότι σύμφωνα με τους μετασχηματισμούς της (1) έχουμε ότι

$$|\Psi(x, t)|^2 \rightarrow |\Psi'(x, t)|^2 = |\Psi(x, t)|^2$$

Συνεπώς οι πιθανότητες παραμένουν αναλλοίωτες. Οι συμμετρίες βαθμίδας παίζουν βασικό ρόλο στη φυσική διότι μας δίνουν το σωστό τρόπο σύζευξης των αλληλεπιδράσεων με τα αντίστοιχα φορτία και εντάσεις.

Η συμμετρίας βαθμίδας απαιτούν η μάζα του μεταδότη/φορέα να είναι μηδέν και για αυτό ο φορέας της ηλεκτρομαγνητικής αλληλεπίδρασης, το φωτόνιο έχει μάζα μηδέν. Οι φορείς όμως της ασθενούς αλληλεπίδρασης τα μποζόνια W^\pm , Z^0 έπρεπε να έχουν σχετικά μεγάλες μάζες διότι η ασθενής αλληλεπίδραση έχει μικρή εμβέλεια. Εκτός αυτού ήταν γνωστό θεωρητικά ότι η ενεργός διατομή των αντιδράσεων οι οποίες λαμβάνουν χώρα μέσω της ασθενούς αλληλεπίδρασης αυξάνει με το τετράγωνο της ενέργειας του κέντρου μάζας σε βαθμό που οι ασθενείς αλληλεπιδράσεις σε υψηλές ενέργειες τείνουν να γίνουν τόσο ισχυρές ώστε ακόμα και οι πιθανότητες που λογαριάζουμε να γίνονται μεγαλύτερες από τη μονάδα (Violation of Unitarity). Η λύση το προβλήματος αυτού απαιτεί



ότι η ασθενής αλληλεπίδραση διαδίδεται με μποζόνια τα οποία έχουν μάζα περίπου 100 GeV. Πράγματι το 1983 τα μποζόνια W^\pm , Z^0 ανακαλύφθηκαν πρώτα από το πείραμα UA1 του Carlo Rubbia στο CERN και αμέσως μετά τα αποτελέσματα επιβεβαιώθηκαν από το πείραμα UA2 στο CERN. Τα μποζόνια W^\pm , Z^0 έχουν μάζες περίπου 80 και 91 GeV.

Έπρεπε λοιπόν να βρεθεί στη θεωρία μία μέθοδος έτσι ώστε τα μποζόνια W^\pm , Z^0 να έχουν μάζα χωρίς να παραβιαστεί η συμμετρία βαθμίδας. Την μέθοδο αυτή η οποία αναφέρεται ως **μηχανισμός -Higgs** την ανακάλυψαν οι Higgs, Englert, Brout, Hagen, Guranlik και Kibble¹ και απαιτεί την ύπαρξη ενός σωματιδίου το οποίο σήμερα ονομάζεται Higgs. **Το Higgs είναι μποζόνιο με σπίν μηδέν και έχει μάζα η οποία όμως δεν προβλέπεται από καθιερωμένο πρότυπο**. Βασική ιδιότητα του σωματιδίου Higgs είναι ότι **αλληλεπιδρά με όλα τα σωματίδια που έχουν μάζα και η σταθερά σύζευξης του με τα διάφορα σωματίδια είναι ανάλογη της μάζας του κάθε σωματιδίου**. Έτσι μ' αυτό τον τρόπο το σωματίδιο Higgs 'δίνει μάζα' σε όλα τα σωματίδια που έχουν μάζα. **Το σωματίδιο Higgs δεν έχει φορτίο ή χρώμα**.

Παραγωγή του σωματιδίου Higgs στο Καθιερωμένο Πρότυπο

Όπως είπαμε το Higgs αλληλεπιδρά μόνο με σωματίδια που έχουν μάζα. Έτσι η διαδικασία παραγωγής του περιλαμβάνει πάντα σωματίδια που έχουν μάζα. Οι τρόποι παραγωγής του Higgs καθώς και η ενεργές διατομές ως συνάρτηση της μάζας του Higgs φαίνονται στο σχήμα 1.

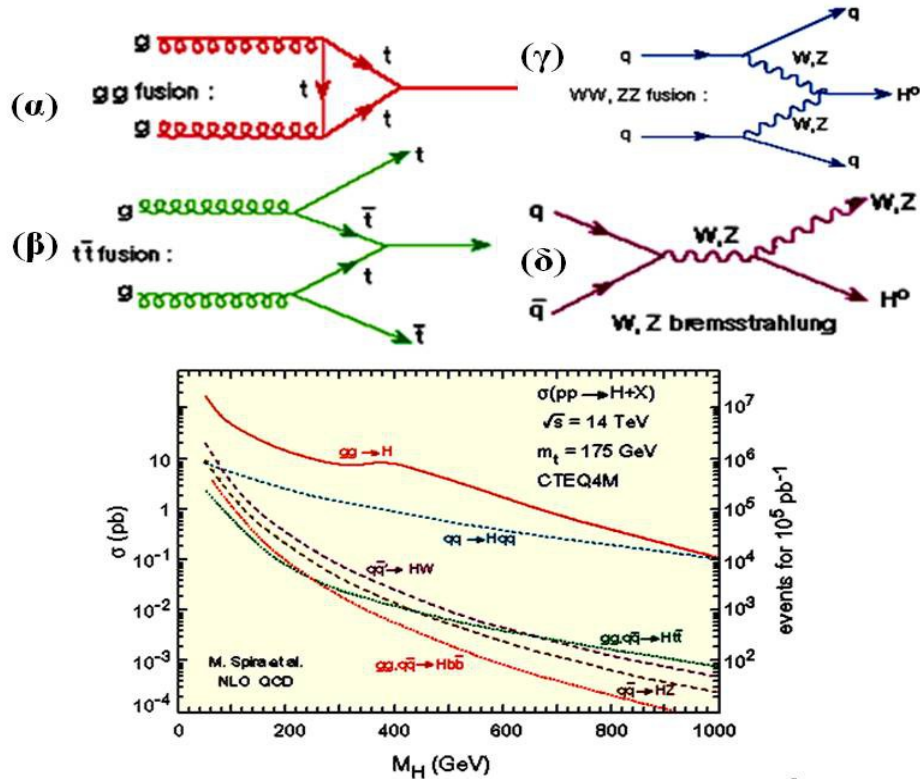
Όπως βλέπουμε στο Σχήμα 1 η αντίδραση με την μεγαλύτερη ενεργό διατομή και συνεπώς με την μεγαλύτερη πιθανότητα είναι αυτή της σύντηξης γκλουονίων (α). Επειδή τα γκλουόνια έχουν χρώμα ενώ το Higgs δεν έχει χρώμα η αντίδραση γίνεται με ενδιάμεσο στάδιο όπου τα δύο γκλουόνια δίνουν ένα ζεύγος από κουάρκ και αντι-κουάρκ τα οποία έχουν χρώμα. Το Higgs αλληλεπιδρά με σωματίδια που έχουν μάζα και όλα τα κουάρκ έχουν μάζα. Το top κουάρκ είναι το βαρύτερο έτσι η πιθανότητα το ενδιάμεσο σωματίδιο να είναι top κουάρκ είναι μεγάλη (ακολουθεί σε πιθανότητα το bottom κουάρκ).

Για τους ίδιους λόγους γίνεται η αντίδραση (β) αλλά έχει μικρότερη ενεργό διατομή και πιθανότητα να συμβεί λόγω του ότι απαιτείται η παραγωγή και δύο top κουάρκ τα οποία έχουν μάζα 176 GeV.

Η αντίδραση (γ) γίνεται διότι το Higgs αλληλεπιδρά με τα διανυσματικά μποζόνια W^\pm , Z^0 τα οποία έχουν μάζα.

Το ίδιο ισχύει και για την αντίδραση (δ). Τα διανυσματικά μποζόνια επειδή έχουν μάζα μπορούν να έχουν σύζευξη με το Higgs και συνεπώς μπορούν να εκπέμψουν το Higgs με μία διαδικασία η οποία μοιάζει με την εκπομπή φωτονίων από ηλεκτρόνια και για αυτό λέγεται Higgs-strahlung.

1 P. W. Higgs, Phys. Rev. Lett. 12, 132, (1964), P. W. Higgs, Phys. Rev. Lett. 13, 508, (1964), F. Englert, R. Brout, Phys. Rev. Lett. 13, 321, (1964), G. S. Guralnik, C. R. Hagen, T. W. B. Kibble, Phys. Rev. Lett. 13, 585, (1964).



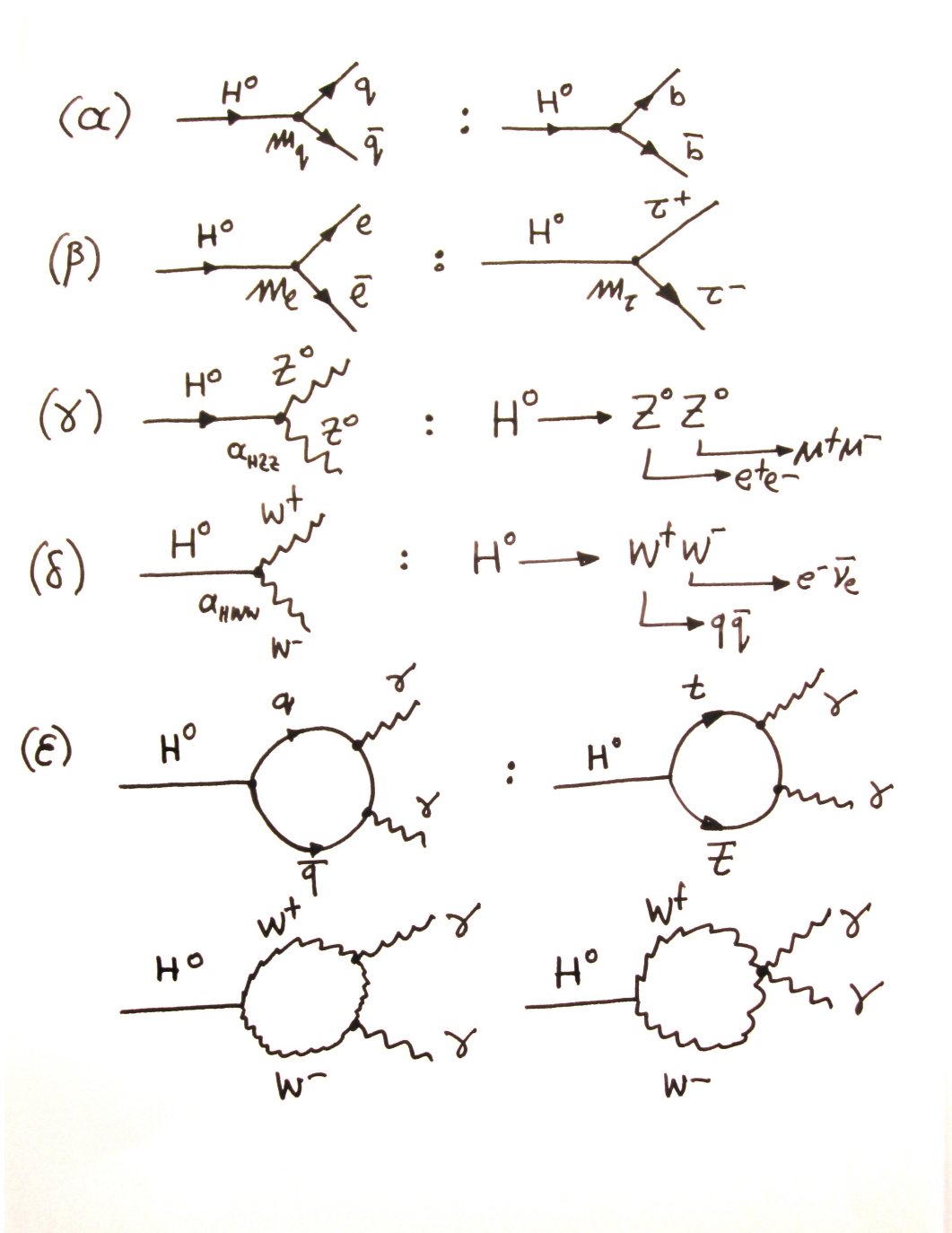
Σχήμα 1: Οι διάφοροι τρόποι παραγωγής σωματιδίου Higgs σε συγκρούσεις πρωτονίων με πρωτόνια. (α) Σύντηξη γκλουονίων (gluon fusion), (β) Παραγωγή με δύο τόπ κουάρκ (top quark associated production), (γ) Σύντηξη μποζονίων (vector boson fusion) (δ) Ακτινοβολία Higgs (Higgsstrahlung). Τα αρχικά γκλουόνια ή κουάρκ είναι συστατικά των αρχικών πρωτονίων. Στο κάτω διάγραμμα φαίνεται η ενεργός διατομή παραγωγής του Higgs μέσω των (α,β,γ,δ) ως συνάρτηση της μάζας του Higgs.



Οι μεταπτώσεις του σωματιδίου Higgs στο Καθιερωμένο Πρότυπο

Το Σχήμα 2 δείχνει τα διάφορα διαγράμματα Feynman δια μέσου των οποίων το Higgs μεταπίπτει σε άλλα ελαφρότερα σωματίδια. **Είναι σημαντικό να κατανοηθεί ότι το Higgs είναι ουδέτερο, δεν έχει χρώμα και αλληλεπιδρά μόνο με σωματίδια που έχουν μάζα.** Θα συζητήσουμε εδώ περιληπτικά τις διάφορες μεταπτώσεις του Higgs.

1. Τα διαγράμματα (α) και (β) δείχνουν το Higgs να μεταπίπτει σε ζεύγη κουάρκ/αντι-κουάρκ και λεπτονίου/αντι-λεπτονίου. Όλα τα λεπτόνια και τα κουάρκ έχουν μάζα και συνεπώς αυτή η μετάπτωση είναι επιτρεπτή με εξαίρεση σε top κουάρκ τα οποία έχουν μάζα 173.5 GeV και δύο από αυτά είναι κατά πολύ βαρύτερα το Higgs. Η πιθανότητα να συμβεί με ελαφρά λεπτόνια είναι μικρή λόγω της μικρής τους μάζας. Συνεπώς η κύρια συνεισφορά έρχεται από b-κουάρκ το οποίο έχει μάζα=4.65 GeV, τ-λεπτόνιο το οποίο έχει μάζα 1.78 GeV, και c-κουάρκ με μάζα 1.28 GeV.
2. Τα διαγράμματα (γ) και (δ) δείχνουν το Higgs να μεταπίπτει 4 λεπτόνια με ενδιάμεσα σωματίδια τα διανυσματικά μποζόνια W^\pm , Z^0 . Τα W^\pm , Z^0 έχουν μάζα και συνεπώς το Higgs μπορεί να αλληλεπιδράσει με αυτά.
3. Τα διαγράμματα (ε) δείχνουν την μετάπτωση το Higgs σε δύο φωτόνια. Τα φωτόνια όπως και το Higgs είναι ουδέτερα και δεν μπορούν να αλληλεπιδράσουν με το Higgs. Συνεπώς χρειάζονται ενδιάμεσα σωματίδια τα οποία έχουν μάζα για να αλληλεπιδράσουν με το Higgs και φορτίο για να αλληλεπιδράσουν με τα φωτόνια. Τα σωματίδια αυτά είναι τα κουάρκ και τα W^\pm . Η μετάπτωση αυτή είναι πολύ σημαντική διότι η ενεργός διατομή για παραγωγή και μετάπτωση του Higgs σε δύο φωτόνια εξαρτάται προφανώς και από τυχόν βαρύτερα φορτισμένα σωματίδια τα οποία δεν έχουν ανακαλυφτεί μέχρι σήμερα. Αν δηλαδή μετρήσουμε την ενεργό διατομή και την βρούμε μεγαλύτερη από ότι προβλέπεται από το Καθιερωμένο Πρότυπο αυτό θα σημαίνει ότι υπάρχουν νέα βαρύτερα σωματίδια τα οποία δεν έχουμε παρατηρήσει μέχρι σήμερα. Το ερώτημα αυτό είναι ένα από τα πιο ενδιαφέροντα ερωτήματα του 2012-13 και θα έχουμε την απάντηση όταν ο επιταχυντής LHC αρχίσει να λειτουργεί ξανά το 2015-16.

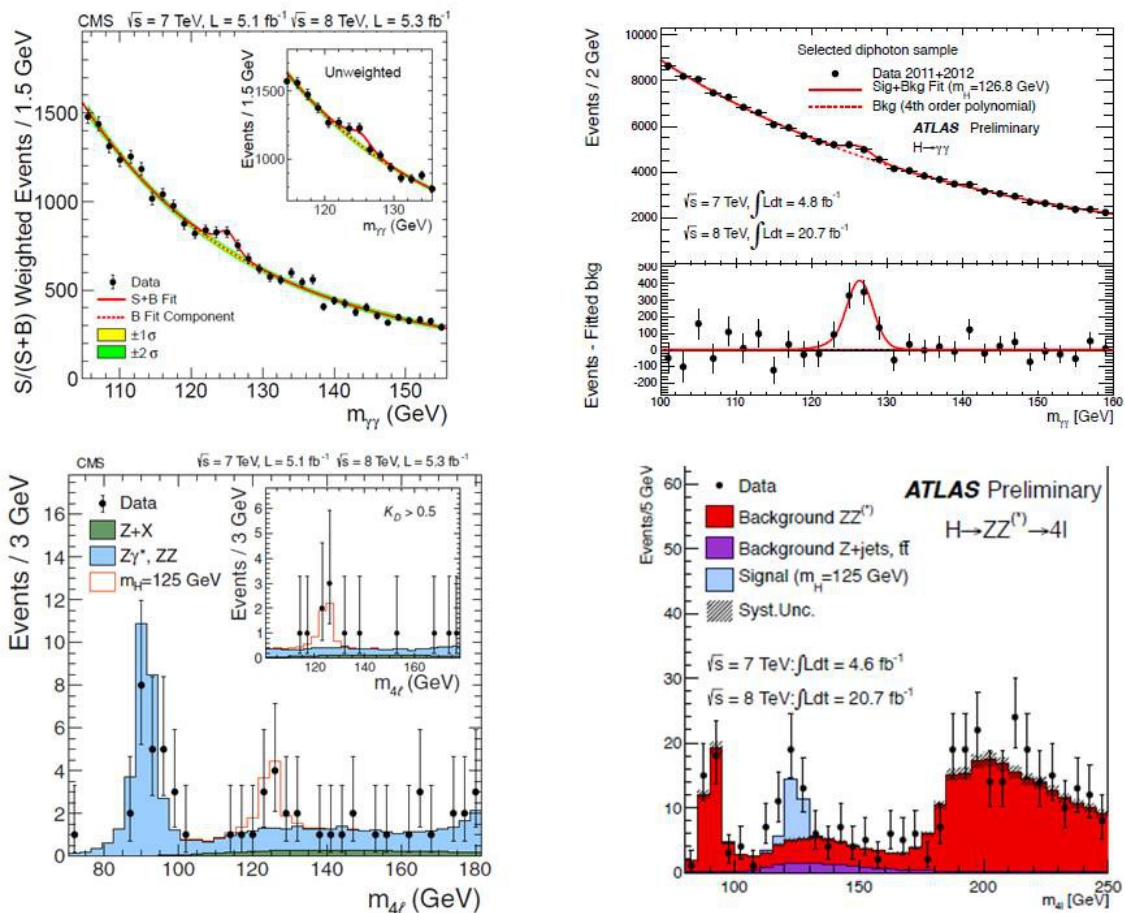


Σχήμα 2: Οι μεταπτώσεις του Higgs σε (α) Κουάρκς (β) Λεπτόνια (γ,δ) διανυσματικά μποζόνια (ε) φωτόνια.



Η ανακάλυψη του σωματιδίου Higgs το 2012-2013

Στην σύγχρονη φυσική υψηλών ενεργειών η αναζήτηση καινούριων σωματιδίων γίνεται μέσω της αναζήτησης γεγονότων στα οποία παρατηρείται μία συγκεκριμένη μετάπτωση την οποία υποθέτουμε ότι έχει το αναζητούμενο σωματίδιο. Η συγκεκριμένη μετάπτωση ονομάζεται 'υπογραφή' (signature) του σωματιδίου. Δυστυχώς τις περισσότερες φορές δύο η περισσότερα διαφορετικά σωματίδια έχουν την ίδια υπογραφή και μόνο ένα από αυτά είναι το καινούριο σωματίδιο ενώ τα υπόλοιπα είναι ήδη γνωστά και συνεπώς δεν μας ενδιαφέρουν. Τα γεγονότα τα οποία προέρχονται από τα γνωστά σωματίδια ονομάζονται 'υπόβαθρο' (background) και τα γεγονότα τα οποία προέρχονται από τα καινούρια σωματίδια ονομάζονται σήμα (signal). **Προφανώς για την ανακάλυψη ενός σωματιδίου πρέπει κανείς να διαχωρίσει το σήμα από το υπόβαθρο.**



Σχήμα 3: Τα δεδομένα των πειραμάτων ATLAS και CMS για μεταπτώσεις σε δύο φωτόνια (πάνω) και σε 4 λεπτόνια (κάτω).



Στο Σχήμα 3 βλέπουμε τα αποτελέσματα των πειραμάτων ATLAS και CMS (CERN) που δημοσιεύθηκαν το 2012 και 2013. Στον άξονα των x είναι η μάζα του σωματιδίου όπως υπολογίζεται από τις ενέργειες και τις ορμές των σωματιδίων στα οποία μεταπίπτει και στον άξονα των y είναι ο αριθμός των γεγονότων.

Τα δύο σχήματα στο επάνω μέρος του Σχήματος 3 δείχνουν γεγονότα που έχουν 2 φωτόνια. Όπως είδαμε το Higgs μεταπίπτει σε δύο φωτόνια (σήμα). Δυστυχώς όμως και τα ουδέτερα πιόνια μεταπίπτουν σε δύο φωτόνια ($\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ υπόβαθρο) επίσης και η ενεργός διατομή παραγωγής τους είναι πολλές τάξεις μεγέθους μεγαλύτερη από αυτή της παραγωγής του Higgs. Όπως βλέπουμε στο Σχήμα 3, παρόλο που το υπόβαθρο έχει πολύ περισσότερα γεγονότα από το σήμα, για μάζα γύρω στα 125 GeV παρατηρούμε, περισσότερα γεγονότα από το υπόβαθρο (πράσινη καμπύλη). Τα επί πλέον γεγονότα είναι αυτά που προέρχονται από καινούριο σωματίδιο το οποίο κατά πάσα πιθανότητα είναι το μποζόνιο Higgs.

Τα δύο σχήματα στο κάτω μέρος του Σχήματος 3 δείχνουν γεγονότα τα οποία έχουν 4 λεπτόνια (θετικά και αρνητικά μίονια ή ηλεκτρόνια και ποσιτρόνια). Εδώ το σήμα είναι ένα σωματίδιο Higgs το οποίο μεταπίπτει σε δύο Z^0 μποζόνια τα οποία με τη σειρά τους μεταπίπτουν σε ζεύγος λεπτονίου-αντι-λεπτονίου. Το υπόβαθρο από μεταπτώσεις Z^0 μποζονίων φαίνεται καθαρά ειδικά για μάζα 91 GeV που είναι η μάζα του Z^0 . Πάλι στην περιοχή των 125 GeV παρατηρούνται επί πλέον γεγονότα τα οποία προέρχονται από ένα νέο σωματίδιο το οποίο μεταπίπτει σε 2 ζεύγη λεπτονίου-αντι-λεπτονίου.

Συνεπώς έχουμε ανακαλύψει ένα νέο σωματίδιο το οποίο μεταπίπτει όπως το Higgs σε δύο φωτόνια ή σε δύο Z^0 μποζόνια τα οποία με τη σειρά τους μεταπίπτουν σε 2 ζεύγη λεπτονίου-αντι-λεπτονίου.

Βεβαίως μέχρι να παρατηρηθούν όλες οι προβλεπόμενες από το Καθιερωμένο Πρότυπο μεταπτώσεις του Higgs δεν θα είμαστε σίγουροι ότι το καινούριο σωματίδιο είναι το Higgs.

Τι γνωρίζουμε για στο σπίν του σωματιδίου Higgs

Το καινούριο σωματίδιο, όπως είδαμε μεταπίπτει σε δύο φωτόνια τα οποία όπως ξέρουμε έχουν σπιν 1. Ο κανόνας άθροισης δύο στροφομών I_1 και I_2 στην κβαντική Μηχανική μας λέει ότι η ολική στροφομή δίνεται από $|I_1 - I_2| \leq L_{ολικη} \leq I_1 + I_2$. Συνεπώς οι πιθανές τιμές για το σπίν του υποτιθέμενου σωματιδίου Higgs είναι 0, 1 και 2. Η τιμή 1 αποκλείεται διότι η αρχή του Pauli απαιτεί η κυματοσυνάρτηση των δύο φωτονίων $\Psi_{\gamma\gamma}$ να είναι συμμετρική ως προς την ανταλλαγή των φωτονίων. Αν όμως το σπίν του Higgs είναι ίσο με 1 η κυματοσυνάρτηση είναι ανάλογη το $\cos\theta$ όπου θ είναι η γωνία των δύο φωτονίων με τον άξονα της δέσμης. Η ανταλλαγή των φωτονίων όμως είναι ισοδύναμη με $\cos\theta \rightarrow \cos(\pi - \theta) = -\cos\theta$ δηλαδή η κυματοσυνάρτηση πρέπει να είναι αντισυμμετρική. Αυτό αντιφάσκει με την αρχή του Pauli. **Άρα σύμφωνα με αυτά που γνωρίζουμε σήμερα το καινούριο σωματίδιο έχει σπιν μηδέν ή δυο. Το Καθιερωμένο πρότυπο προβλέπει ότι το Higgs έχει σπιν μηδέν.**