

Παρατήρηση νέου σωματιδίου με μάζα 125 GeV
Πείραμα CMS, CERN
4 Ιουλίου 2012

Σύνοψη

Σε ένα κοινό σεμινάριο σήμερα μεταξύ του CERN και του συνεδρίου "ICHEP 2012" [1] στη Μελβούρνη, οι ερευνητές του πειράματος Compact Muon Solenoid (CMS) στο Μεγάλο Επιταχυντή Αδρονίων (LHC) παρουσίασαν προκαταρκτικά αποτελέσματα στην αναζήτηση του μποζονίου Higgs όπως προβλέπεται από το Καθιερωμένο Πρότυπο της φυσικής στοιχειωδών σωματιδίων, χρησιμοποιώντας δεδομένα που καταγράφηκαν μέχρι τον Ιούνιο του 2012.

Το CMS παρατηρεί ένα πλεόνασμα γεγονότων σε μάζα περίπου 125 GeV [2] με μια στατιστική σημαντικότητα ίση με πέντε τυπικές αποκλίσεις (5σ) [3] πάνω από τις προσδοκίες υποβάθρου. Η πιθανότητα στατιστικής διακύμανσης των γνωστών διεργασιών υποβάθρου σε αυτό το επίπεδο γεγονότων ή και μεγαλύτερη είναι περίπου μία στα τρία εκατομμύρια.

Τα αποδεικτικά στοιχεία είναι ισχυρότερα σε δύο τελικές καταστάσεις οι οποίες χαρακτηρίζονται από τη δυνατότητα της ακριβέστερης μέτρησης της μάζας: πρώτον η τελική κατάσταση με ζεύγη φωτονίων, και δεύτερον η τελική κατάσταση με δύο ζεύγη φορτισμένων λεπτονίων (ηλεκτρονίων ή μιονίων). Αποδίδουμε αυτό το πλεόνασμα στην παραγωγή ενός σωματιδίου που παρατηρείται για πρώτη φορά με μάζα περίπου 125 GeV.

Τα δεδομένα του CMS επίσης αποκλείουν την ύπαρξη του μποζονίου Higgs σύμφωνα με το Καθιερωμένο Πρότυπο στα εύρη πιθανών τιμών της μάζας 110 – 122.5 GeV και 127-600 GeV για 95% όριο εμπιστοσύνης [Παρ: CL]- οι χαμηλότερες μάζες είχαν ήδη αποκλεισθεί από τον επιταχυντή LEP του CERN στο ίδιο όριο εμπιστοσύνης.

Συμπεριλαμβανομένων των στατιστικών και συστηματικών αβεβαιοτήτων, τα αποτελέσματα στα διάφορα κανάλια αναζήτησης είναι συμβατά με τις προσδοκίες για το μποζόνιο Higgs σύμφωνα με το Καθιερωμένο Πρότυπο. Ωστόσο, απαιτούνται περισσότερα δεδομένα για να εξακριβωθεί κατά πόσον αυτό το νέο σωματίδιο έχει όλες τις ιδιότητες του μποζονίου Higgs, ή αν κάποιες δεν ταιριάζουν, πράγμα που θα σήμαινε την ανακάλυψη νέας φυσικής πέρα από το Καθιερωμένο Πρότυπο.

Το LHC συνεχίζει να παράγει νέα δεδομένα με εντυπωσιακούς ρυθμούς. Μέχρι το τέλος του 2012, το πείραμα CMS ελπίζει να έχει υπερτριπλασιάσει το σύνολο των δεδομένων του. Τα δεδομένα αυτά θα επιτρέψουν το CMS την περαιτέρω μελέτη και διευκρίνιση της φύσης αυτού του πρωτοεμφανιζόμενου σωματιδίου. Θα επιτρέψουν επίσης το CMS να επεκτείνει την εμβέλεια μιας πληθώρας άλλων ερευνών για την ανακάλυψη νέας φυσικής.

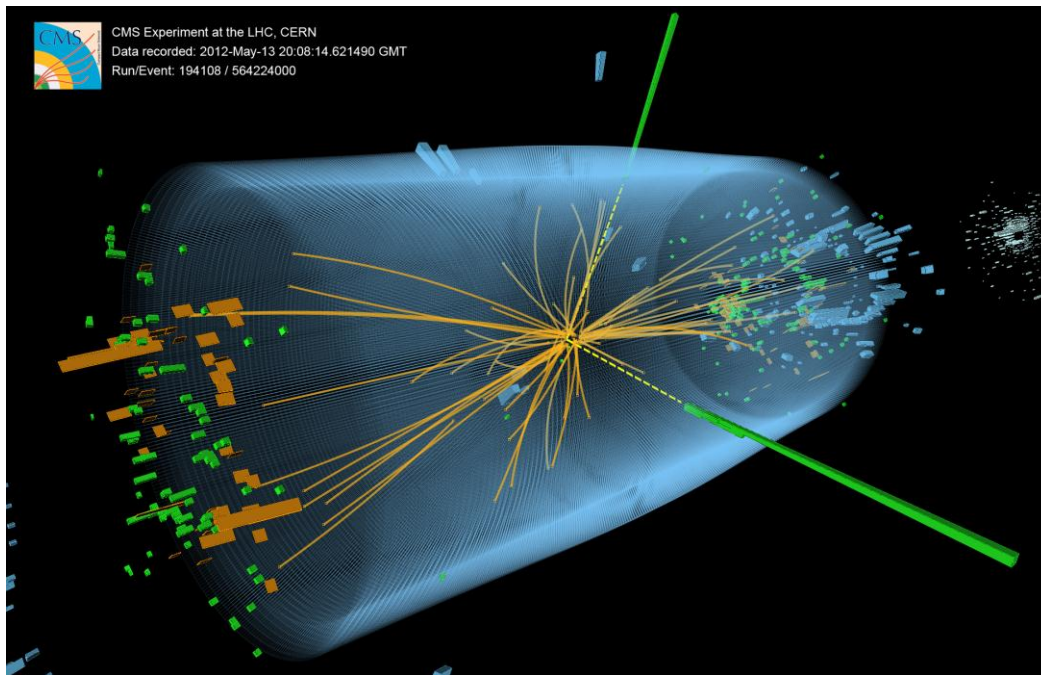
Η στρατηγική της αναζήτησης του μποζονίου Higgs από το πείραμα CMS

Η πειραματική ομάδα του CMS ανέλυσε το σύνολο των δεδομένων από τις συγκρούσεις πρωτονίων-πρωτονίων που συλλέχθηκαν το 2011 και το 2012. Αυτά τα δεδομένα αντιστοιχούν σε 5.1 fb^{-1}

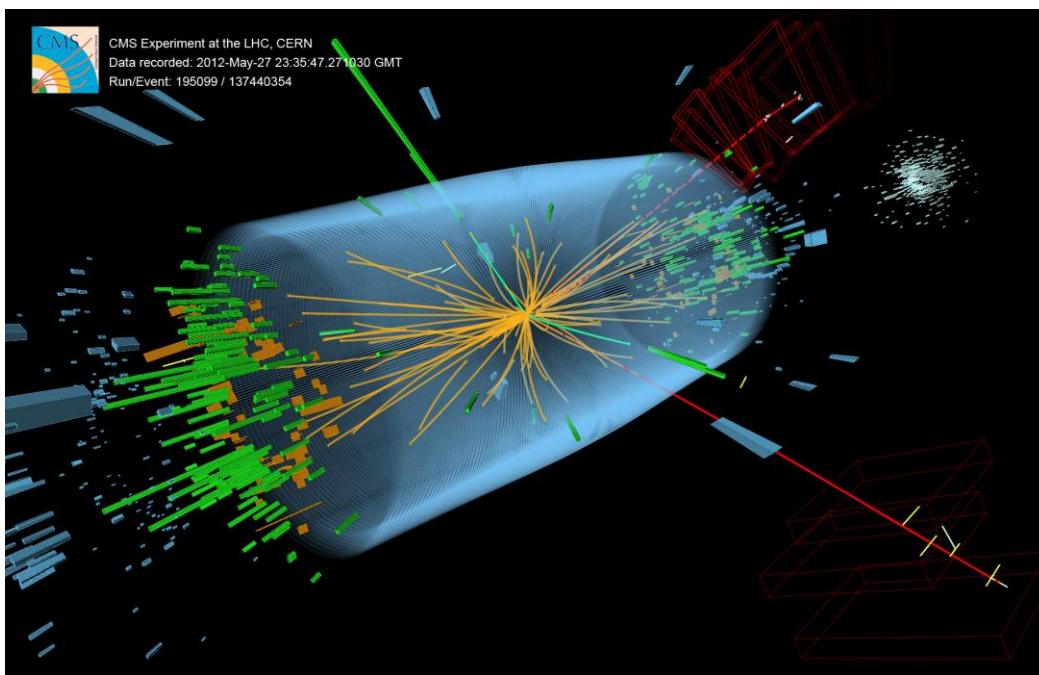
ολοκληρωμένης φωτεινότητας σε ενέργεια του κέντρου μάζας 7 TeV για το 2011 και 5.3 fb^{-1} στα 8 TeV για το 2012.

Το Καθιερωμένο Πρότυπο προβλέπει ότι το μποζόνιο Higgs διαρκεί μόνο για ένα πολύ μικρό χρονικό διάστημα πριν «διασπαστεί» σε άλλα γνωστά σωματίδια. Το CMS μελέτησε πέντε κύρια κανάλια διάσπασης. Τρία κανάλια αντιστοιχούν σε ζεύγη μποζονίων ($\gamma\gamma$, ZZ ή WW) και δύο κανάλια σε ζεύγη φερμιονίων (bb ή $\tau\tau$), όπου το « γ » συμβολίζει ένα φωτόνιο, « Z » και « W » συμβολίζουν τους φορείς της ασθενούς αλληλεπίδρασης, το « b » υποδηλώνει το «κάτω» κουάρκ, και το « τ » συμβολίζει ένα από τα λεπτόνια. Τα κανάλια $\gamma\gamma$, ZZ και WW είναι εξίσου ευαίσθητα στην αναζήτηση του μποζονίου Higgs με μάζα περίπου 125 GeV, είναι δε περισσότερο ευαίσθητα από τα κανάλια bb και $\tau\tau$.

Τα κανάλια $\gamma\gamma$ και ZZ είναι ιδιαίτερα σημαντικά επειδή επιτρέπουν και τα δύο την ακριβή μέτρηση της μάζας του νέου σωματιδίου. Στο κανάλι $\gamma\gamma$ η μάζα προσδιορίζεται από τις ενέργειες και τις κατευθύνσεις των δύο φωτονίων υψηλής ενέργειας που μετρώνται από το ηλεκτρομαγνητικό θερμιδόμετρο κρυστάλλου του CMS (ECAL, Σχήμα 1). Στο ZZ κανάλι η μάζα προσδιορίζεται από τις διασπάσεις των δύο Z σε δύο ζεύγη ηλεκτρονίων, ή δύο ζεύγη μιονίων, ή ένα ζεύγος ηλεκτρονίων και ένα ζεύγος μιονίων (Σχήμα 2). Αυτά μετρώνται στο ECAL, στον εσωτερικό ανιχνευτή των τροχιών πυριτίου και τους ανιχνευτές μιονίων.



Σχήμα 1: Ένα καταγεγραμμένο γεγονός από το πείραμα CMS το 2012 σε σύγκρουση πρωτονίων-πρωτονίων σε ενέργεια του κέντρου μάζας 8 TeV. Το γεγονός παρουσιάζει χαρακτηριστικά που προβλέπονται από τη διάσπαση ενός Higgs μποζονίου σύμφωνα με το Καθιερωμένο Πρότυπο σε ένα ζεύγος φωτονίων (αναπαριστώνται με τις κίτρινες γραμμές και τους πράσινους πύργους). Το γεγονός θα μπορούσε επίσης να οφείλεται σε γνωστές διαδικασίες υποβάθρου.



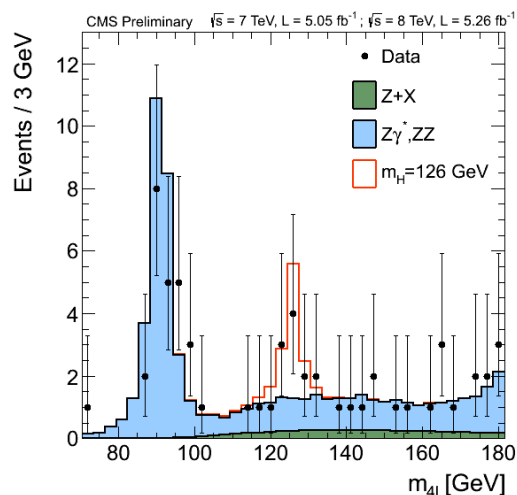
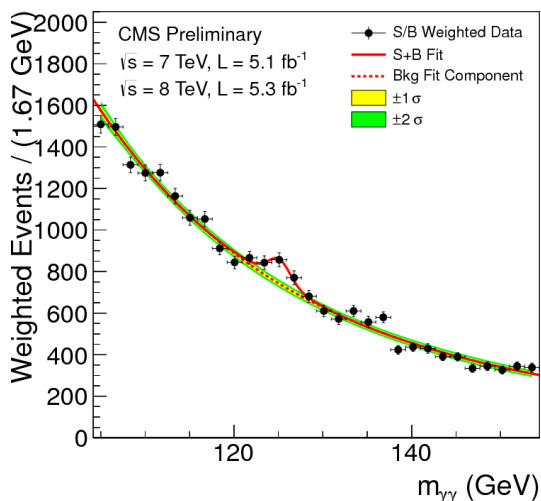
Σχήμα 2. Ένα καταγεγραμμένο γεγονός από το πείραμα CMS το 2012 σε σύγκρουση πρωτονίων-πρωτονίων σε ενέργεια του κέντρου μάζας 8 TeV. Το γεγονός παρουσιάζει χαρακτηριστικά που προβλέπονται από τη διάσπαση ενός Higgs μποζονίου σύμφωνα με το Καθιερωμένο Πρότυπο σε ένα ζεύγος Z μποζονίων, ένα εκ των οποίων διασπάται στη συνέχεια σε ένα ζεύγος ηλεκτρονίων (πράσινες γραμμές και πράσινοι πύργοι) και το άλλο Z διασπάται σε ένα ζεύγος μιονίων (κόκκινες γραμμές). Το γεγονός θα μπορούσε επίσης να οφείλεται σε γνωστές διαδικασίες υποβάθρου.

Το κανάλι διάσπασης WW είναι περισσότερο περίπλοκο. Κάθε W αναγνωρίζεται μέσω της διάσπασής του σε ένα ηλεκτρόνιο και ένα νεutrίνο ή ένα μιονίο και ένα νεutrίνο. Το νεutrίνο διασχίζουν τους ανιχνευτές του πειράματος CMS χωρίς να αφήσουν κανένα ίχνος, συνεπώς το μποζόνιο Higgs κατά το Καθιερωμένο Πρότυπο θα εμφανιζόταν σε αυτό το κανάλι ως ένα ευρύ πλεόνασμα γεγονότων στην κατανομή της μάζας, και όχι ως στενή «βουνοκορφή». Το κανάλι bb έχει μεγάλο υπόβαθρο από γνωστές διαδικασίες του Καθιερωμένου Προτύπου, συνεπώς η ανάλυση των δεδομένων αναζητάει γεγονότα στα οποία το μποζόνιο Higgs παράγεται ταυτόχρονα με ένα W ή Z μποζόνιο, τα οποία διασπώνται στη συνέχεια είτε σε ηλεκτρόνιο(α) είτε σε μιονίο(α). Το κανάλι tt μετριέται παρατηρώντας διασπάσεις τ λεπτονίων σε ηλεκτρόνια, μιονία και αδρόνια.

Σύνοψη Αποτελεσμάτων του πειράματος CMS

Εάν το μποζόνιο Higgs όπως προβλέπεται από το Καθιερωμένο Πρότυπο δεν υπάρχει, τα δεδομένα του CMS μας δίνουν αρκετή ευαισθησία ώστε να μπορέσουμε να αποκλείσουμε την ύπαρξή του σε εύρος μάζων 110-600 GeV με όριο εμπιστοσύνης 95%. Όντως, τα δεδομένα του πειράματος CMS αποκλείουν την ύπαρξη του μποζονίου Higgs κατά το Καθιερωμένο Πρότυπο σε δύο ευρείες περιοχές μάζας 110-122.5 GeV και 127-600 GeV με όριο εμπιστοσύνης 95%. Το εύρος 122.5 - 127 GeV δεν μπορεί να αποκλειστεί, διότι παρατηρούμε πλεόνασμα γεγονότων σε τρία από τα πέντε κανάλια που αναλύθηκαν:

- **$\gamma\gamma$ κανάλι:** η κατανομή της μάζας $\gamma\gamma$ δίνεται στο Σχήμα 3. Υπάρχει πλεόνασμα γεγονότων πάνω από το υπόβαθρο, με στατιστική σημαντικότητα 4.1 τυπικών αποκλίσεων (4.1σ) σε μάζα περίπου 125 GeV. Η παρατήρηση της τελικής κατάστασης των δύο φωτονίων σημαίνει ότι το νέο σωματίδιο είναι μποζόνιο, όχι φερμιόνιο, και δε μπορεί να έχει ιδιοστροφορμή (σπιν) 1,
- **ZZ κανάλι:** Το σχήμα 4 δείχνει την κατανομή της μάζας για τα τέσσερα λεπτόνια (δύο ζεύγη ηλεκτρονίων, ή δύο ζεύγη μιονίων, ή ένα ζεύγος ηλεκτρονίων και ένα ζεύγος μιονίων). Λαμβάνοντας υπόψη τα χαρακτηριστικά της γωνίας διάσπασης, παρατηρούμε πλεόνασμα ύψους 3.2 τυπικών αποκλίσεων πάνω από το υπόβαθρο σε μάζα περίπου 125 GeV,
- **WW κανάλι:** παρατηρούμε ευρύ πλεόνασμα ύψους 1.5 τυπικής απόκλισης στην κατανομή της μάζας,
- **bb και $\tau\tau$ κανάλια:** δεν παρατηρείται πλεόνασμα.



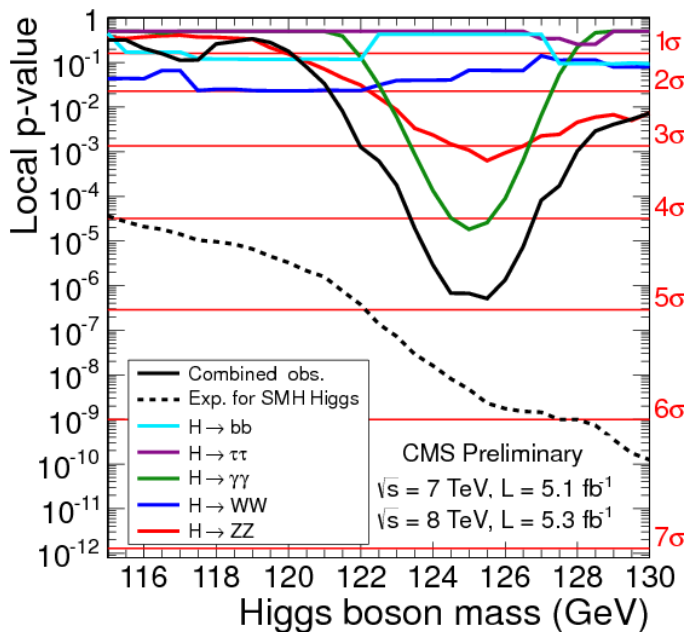
Σχήμα 3 3. Κατανομή αναλλοίωτης μάζας του συστήματος των δύο φωτονίων ($\gamma\gamma$) των δεδομένων CMS από το 2011 και 2012

(μαύρα σημεία με γραμμές αβεβαιότητας). Τα δεδομένα έχουν σταθμιστεί με το λόγο σήματος προς υπόβαθρο για κάθε υποκατηγορία γεγονότων. Η συμπαγής κόκκινη γραμμή δείχνει το αποτέλεσμα προσαρμογής για το άθροισμα σήματος και υποβάθρου. Η διακεκομμένη κόκκινη γραμμή δείχνει μόνο το υπόβαθρο.

Σχήμα 4. Κατανομή της ανακατασκευασμένης μάζας των τεσσάρων λεπτόνιων για το άθροισμα των καναλιών διάσπασης $4e$, 4μ , και $2e2\mu$. Τα σημεία αντιπροσωπεύουν τα δεδομένα, τα σκιασμένα ιστογράμματα τις προβλέψεις του υποβάθρου και το μη-σκιασμένο ιστογράμματα το προσδοκώμενο σήμα. Οι κατανομές παρουσιάζονται ως στοιβαζόμενα ιστογράμματα. Οι μετρήσεις παρουσιάζονται για το άθροισμα των δεδομένων που συλλέχθηκαν σε ενέργειες του κέντρου μάζας στα 7 TeV και 8 TeV.

Η στατιστική σημαντικότητα του σήματος, από τη συνδυασμένη προσαρμογή στα αποτελέσματα και των 5 καναλιών (Σχήμα 5) είναι 4.9 τυπικές αποκλίσεις (4.9σ) πάνω από το υπόβαθρο. Η συνδυασμένη προσαρμογή

μόνο για τα δύο πιο ευαίσθητα και υψηλής ευκρίνειας κανάλια ($\gamma\gamma$ και ZZ) δίνει στατιστική σημαντικότητα 5 τυπικών αποκλίσεων (5σ). Η πιθανότητα ότι μια διακύμανση του υπόβαθρου από μόνο του θα έδινε τέτοιο αποτέλεσμα είναι περίπου μία στα τρία εκατομμύρια.



Σχήμα 5. Η παρατηρηθείσα πιθανότητα (τοπική p -τιμή) για την υπόθεση εργασίας ότι το υπόβαθρο από μόνο του θα μπορούσε να δώσει το ίδιο ή και μεγαλύτερο πλεόνασμα γεγονότων, όπως αυτό που βρέθηκε στα δεδομένα του CMS, ως συνάρτηση της μάζας του Higgs μποζονίου στο Καθιερωμένο Πρότυπο για τα πέντε κανάλια υπο εξέταση. Η συμπαγής μαύρη γραμμή δείχνει τη συνδυασμένη τοπική p -τιμή για όλα τα κανάλια.

Η μάζα του νέου σωματιδίου προσδιορίζεται στα $125,3 \pm 0,6$ GeV, ανεξάρτητα από υποθέσεις για τις αναμενόμενες σχετικές αποδόσεις των καναλιών διάσπασης. Η μέτρηση του ρυθμού παραγωγής (σ_{DAT}) αυτού του νέου σωματιδίου είναι συμβατή με τον προβλεπόμενο ρυθμό (σ_{SM}) για το μποζόνιο Higgs όπως προβλέπεται από το Καθιερωμένο Πρότυπο: $\sigma_{\text{DAT}} / \sigma_{\text{SM}} = 0,80 \pm 0,22$.

Μεγάλη προσοχή έχει επίσης δοθεί για την κατανόηση πολυάριθμων λεπτομερειών στην επίδοση του ανιχνευτή, στην επιλογή των γεγονότων, στον προσδιορισμό του υπόβαθρου και σε άλλες πιθανές πηγές συστηματικών και στατιστικών αβεβαιότητων. Η ανάλυση του 2011 [6] έδειξε ένα πλεόνασμα γεγονότων περίπου στα 125 GeV. Για να αποφύγουμε πιθανή μεροληψία στον καταρτισμό των κριτηρίων επιλογής για τα δεδομένα του 2012 που θα μπορούσε να αυξήσει τεχνητά αυτό το πλεόνασμα, η ανάλυση των δεδομένων του 2012 έγινε «στα τυφλά» [7], που σημαίνει ότι η περιοχή ενδιαφέροντος δεν εξετάστηκε παρά μόνο αφού όλα τα κριτήρια της ανάλυσης είχαν ελεγχθεί και εγκριθεί.

Για τη διασταύρωση των αποτελεσμάτων, οι αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν από τουλάχιστον δύο ανεξάρτητες ομάδες. Ένας αριθμός από άλλα στοιχεία που ενίσχουν την εμπιστοσύνη στα αποτελέσματα:

- Το πλεόνασμα γεγονότων παρατηρείται περίπου στα 125 GeV, τόσο στα δεδομένα του 2011 (7 TeV) όσο και του 2012 (8 TeV),

- Το πλεόνασμα γεγονότων παρατηρείται στην ίδια μάζα και για τα δύο κανάλια υψηλής ευκρίνειας ($\gamma\gamma$ και ZZ)
- Το πλεόνασμα που παρατηρείται στο WW κανάλι είναι συμβατό με εκείνο που θα προέκυπτε από ένα σωματίδιο στα 125 GeV
- Το πλεόνασμα παρατηρείται σε ένα εύρος τελικών καταστάσεων που περιλαμβάνουν φωτόνια, ηλεκτρόνια, μίονια και αδρόνια.

Τα προκαταρκτικά αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν σήμερα θα υποβληθούν σε περαιτέρω επεξεργασία, με σκοπό την υποβολή τους προς δημοσίευση στο τέλος του καλοκαιριού.

Μελλοντικά σχέδια

Το νέο σωματίδιο μάζας περίπου 125 GeV που παρατηρήθηκε στο CMS είναι συμβατό, με την δεδομένη στατιστική ακρίβεια, με το μποζόνιο Higgs του Καθιερωμένου Προτύπου. Ωστόσο, απαιτούνται περισσότερα δεδομένα για να μετρήσουμε τις ιδιότητές του, όπως τους ρυθμούς διάσπασης στα διάφορα κανάλια ($\gamma\gamma$, ZZ , WW , bb και $\tau\tau$) και άλλες κβαντικές ιδιότητές του, όπως την ιδιοστροφορμή (σπιν) και την ομοτιμία, που απαιτούνται για να εξακριβώσουμε εάν πρόκειται πράγματι για το μποζόνιο Higgs του Καθιερωμένου Προτύπου ή το αποτέλεσμα νέας φυσικής πέρα από το Καθιερωμένο Πρότυπο.

Το LHC συνεχίζει τις εξαιρετικές επιδόσεις του. Μέχρι το τέλος του 2012, το πείραμα CMS αναμένεται να υπερτριπλασιάσει το συνολικό όγκο δεδομένων του, και συνεπώς να εξετάσει περαιτέρω τη φύση αυτού του νέου σωματιδίου. Αν το σωματίδιο αυτό είναι όντως το μποζόνιο Higgs κατά το Καθιερωμένο Πρότυπο, οι ιδιότητές του και οι συνέπειες για το Καθιερωμένο Πρότυπο θα μελετηθούν διεξοδικώς. Αν δεν είναι το μποζόνιο Higgs κατά το Καθιερωμένο Πρότυπο, το CMS θα διερευνήσει τη φύση της νέας φυσικής που συνεπάγεται, η οποία ενδεχομένως περιλαμβάνει επιπλέον σωματίδια που μπορούν να παρατηρηθούν στο LHC. Σε κάθε περίπτωση, οι έρευνες θα συνεχιστούν και για άλλα καινούργια σωματίδια ή δυνάμεις που μπορεί να παρατηρηθούν στο LHC στο μέλλον σε υψηλότερες ενέργειες δέσμης και εντάσεις.

Το πείραμα CMS

Το CMS είναι ένα από τα δύο πειράματα «γενικού σκοπού» στο LHC που χτίστηκαν με απώτερο σκοπό την αναζήτηση νέας φυσικής. Έχει σχεδιαστεί έτσι ούτως ώστε να μπορεί να ανιχνεύσει μια πληθώρα σωματιδίων και φυσικών φαινομένων που παράγονται στις υψηλής ενέργειας συγκρούσεις πρωτονίων με πρωτόνια και με βαρέα ιόντα του LHC και να θα βοηθήσει να απαντηθούν ερωτήσεις όπως: «Από τι είναι πραγματικά φτιαγμένο το Σύμπαν και ποιές είναι οι δυνάμεις που δρουν μέσα του;» και «Πώς αποκτούν τα σωματίδια μάζα;». Θα μετρήσει επίσης με πρωτοφανή ακρίβεια τις ιδιότητες των γνωστών σωματιδίων και θα αναζητήσει τελείως απρόβλεπτα, καινούργια φαινόμενα. Αυτή η έρευνα δεν αυξάνει μόνο την κατανόησή μας για τον τρόπο λειτουργίας του Σύμπαντος, αλλά μπορεί κάποια στιγμή να παράξει νέες τεχνολογίες που θα αλλάξουν τον κόσμο στον οποίο ζούμε, όπως έχει γίνει συχνά στο παρελθόν.

Η σύλληψη και ο σχεδιασμός του πειράματος CMS ξεκίνησε το 1992. Χρειάστηκαν 16 χρόνια για το χτίσιμο του γιγαντιαίου ανιχνευτή (15 μέτρα διάμετρος, 21 μέτρα μήκος με βάρος 14000 τόνων) από μία από τις μεγαλύτερες διεθνείς επιστημονικές συνεργασίες που έγιναν ποτέ: 3275 φυσικοί (συμπεριλαμβανομένων

1535 φοιτητών), καθώς και 790 μηχανικοί και τεχνικοί, από 179 πανεπιστήμια και ερευνητικά εργαστήρια σε 41 χώρες σε όλο τον κόσμο.

Για περισσότερες πληροφορίες : <http://cern.ch/cms> or contact: cms.outreach@cern.ch

[1] ICHEP2012 είναι η 36η Διεθνής Διάσκεψη Φυσικής Υψηλών Ενεργειών, στην Μελβούρνη, Αυστραλία, από 4 έως 11 Ιουλίου του 2012. Τα αποτελέσματα παρουσιάστηκαν συγχρόνως: στο CERN κατ'ιδίαν και με βίντεο σύνδεση στο ICHEP.

[2] Το ηλεκτρονιοβόλτ είναι μονάδα ενέργειας. Είναι συνηθισμένο στη σωματιδιακή φυσική, όπου συχνά η μάζα και η ενέργεια εναλλάσσονται, να χρησιμοποιείται η μονάδα eV/c^2 όπου c η ταχύτητα του φωτός στο κενό (από $E = mc^2$). Ακόμα πιο συνηθισμένο είναι να χρησιμοποιείται ένα σύστημα φυσικών μονάδων όπου c ορίζεται ίση με 1 (επομένως $E=m$) και απλά να χρησιμοποιείται η μονάδα eV ως μονάδα μάζας.

[3] Η τυπική απόκλιση περιγράφει το εύρος μιας σειράς μετρήσεων γύρω από τη μέση τιμή. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να υπολογιστεί το επίπεδο της απόκλισης ενός συνόλου δεδομένων από μια συγκεκριμένη υπόθεση. Οι φυσικοί εκφράζουν τυπικές αποκλίσεις σε μονάδες που ονομάζονται «σίγμα» (σ). Όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των σ , τόσο ασυμβίβαστα τα δεδομένα με την υπόθεση. Συνήθως μια ανακάλυψη χαρακτηρίζεται από μεγάλο αριθμό σίγμα (μεγαλύτερο από 5).

[4] Βαθμός εμπιστοσύνης είναι ένα στατιστικό μέτρο του πλήθους των περιπτώσεων από 100 στις οποίες μπορούμε να αναμένουμε τα αποτελέσματα μιας δοκιμασίας να παίρνουν τιμές σε μια συγκεκριμένη περιοχή. Για παράδειγμα, όριο εμπιστοσύνης 95% σημαίνει ότι το αποτέλεσμα μιας δοκιμασίας πιθανότατα θα επαληθεύσει το αναμενόμενο αποτέλεσμα στο 95% των περιπτώσεων.

[5] <http://news.stanford.edu/news/2004/july21/femtobarn-721.html>

[6] <http://cms.web.cern.ch/news/cms-search-standard-model-higgs-boson-lhc-data-2010-and-2011>

[7] <http://cms.web.cern.ch/news/blinding-and-unblinding-analyses>