

## Μποζόνιο Higgs : Το σωματίδιο του Θεού

ΠΗΓΗ: <http://www.physics4u.gr/articles/2008/Higgs.html>

Άρθρο, Φεβρουάριος 2008

Το μποζόνιο Higgs μας περιμένει να το ανακαλύψουμε στο νέο επιταχυντή LHC στο CERN μετά το καλοκαίρι του 2008. Αλλά τι είναι; Γιατί να υπάρχει; Ή μήπως δεν υπάρχει και η θεωρία μας πρέπει να τροποποιηθεί δραματικά;



Ξέρουμε πολλά τώρα, μετά από δεκαετίες πειραμάτων στους μεγάλους επιταχυντές. Στον επιταχυντή Tevatron στο Fermilab, στους LEP 1 και 2 στο CERN, στον KEK-B στην Ιαπωνία, στον PEP2 στο SLAC, στον HERA του DESY στο Αμβούργο, κλπ Αλλά όλοι θα υποκλιθούν σύντομα στο Μεγάλο Συγκρουστή Αδρονίων : το LHC στο CERN. Αυτή η μηχανή, κατά πάσα πιθανότητα, θα απαντήσει στην ερώτηση: ποιά είναι η προέλευση της διάσπασης της ηλεκτρασθενούς συμμετρίας; Δηλαδή γιατί οι φορείς της ασθενούς πυρηνικής δύναμης, τα μποζόνια W και Z, έχουν μάζα (και μάλιστα μεγάλη μάζα) και το φωτόνιο δεν έχει καθόλου μάζα;

Κι αν φανούμε τυχεροί μπορούμε να φτάσουμε σε μια απάντηση στο ζήτημα αυτό: γιατί τα θεμελιώδη σωματίδια έχουν μάζες και γιατί έχουν τόση μάζα; Αλλά κι αν ακόμα το μάθουμε τι θα σημαίνει για μας; Και τι θα ακολουθήσει;

Βάσει του Καθιερωμένου Μοντέλου της σωματιδιακής Φυσικής στις πρώτες στιγμές του Κόσμου τα γνωστά υποατομικά σωματίδια, όπως είναι τα ηλεκτρόνια ή τα κουάρκ απέκτησαν τη μάζα τους μέσω μιας διαδικασίας που λέγεται μηχανισμός Higgs. Μάλιστα μπορεί η διαδικασία αυτή να εξακολουθεί να δρα στο παρασκήνιο και το σχετιζόμενο με αυτή σωματίδιο, το μποζόνιο Higgs, θεωρείται ότι κρύβεται ως ιδιότητα του κενού. Με την προσθήκη μιας μεγάλης ποσότητας ενέργειας σε έναν πολύ μικρό χώρο, είναι δυνατός ο εξαναγκασμός σε "εμφάνιση" του σωματιδίου Higgs.

Με άλλα λόγια πιστεύουμε ότι ολόκληρο το σύμπαν διαπερνάται από ένα «πεδίο Higgs», το οποίο σχετίζεται με ένα τουλάχιστον σωματίδιο που δεν έχει ακόμη ανιχνευθεί, το μποζόνιο Higgs. Σε αυτό το πλαίσιο, όλα τα σωματίδια της ύλης που γνωρίζουμε αποκτούν μάζα μέσω της αλληλεπίδρασης τους με αυτό το πεδίο. Κι όσο περισσότερο αλληλεπιδρά ένα σωματίδιο με το πεδίο Higgs, τόσο μεγαλύτερη αντίσταση συναντά στην κίνηση του και κατά συνέπεια τόσο βαρύτερο είναι.

Μέχρι τώρα μόνο ο επιταχυντής σωματιδίων Tevatron στο εργαστήριο Fermilab είχε την ικανότητα της δημιουργίας μιας ενεργητικής δέσμης. Στο Tevatron συγκεκριμένα συγκρούονται πρωτόνια με αντι-πρωτόνια με ενέργεια 2000 φορές περίπου μεγαλύτερη από την ενέργεια ηρεμίας του πρωτονίου. Μετά το καλοκαίρι του 2008 όμως η μέγιστη ενέργεια αλληλεπίδρασης σωματιδίων αναμένεται να γίνει 15.000 φορές μεγαλύτερες από τη μάζα ηρεμίας του πρωτονίου, κι αυτό θα συμβεί στο Μεγάλο Επιταχυντή Αδρονίων (LHC) κοντά στη Γενεύη.

Λόγω της δομής των πρωτονίων και αντιπρωτονίων - αποτελούνται από τρία κουάρκ - ως βλήματα σε έναν επιταχυντή σωματιδίων, θα παραχθούν δεκάδες σωματίδια μαζί με αυτά που παρουσιάζουν ερευνητικό ενδιαφέρον (όπως είναι τα μποζόνια Higgs) σε κάθε σύγκρουση. Για την ανίχνευση των μποζονίων Higgs ξέρουμε ήδη από προηγούμενες θεωρίες ότι αποκλείονται να έχουν με άμεσο ή έμμεσο τρόπο μάζα μικρότερη των 114 GeV.

Το Καθιερωμένο Μοντέλο για τις ιδιότητες και αλληλεπιδράσεις των δομικών μονάδων του Κόσμου μας μπορεί να πρόσφερε απαντήσεις σε πληθώρα ερωτήματα και προβλήματα, αλλά δημιούργησε και σημαντικά προβλήματα όπως είναι το πρόβλημα της προέλευσης της μάζας.

Μέχρι της αρχές της δεκαετίας του 1930, τα γνωστά θεμελιώδη σωματίδια ήταν μόνο δύο: το ηλεκτρόνιο και το πρωτόνιο. Με την ανακάλυψη του νετρονίου, του ποζιτρονίου, του μιονίου, του πιονίου και των νετρίνων ξεκίνησε μια νέα εποχή της σωματιδιακής Φυσικής. Η τεχνολογική εξέλιξη των επιταχυντών ήταν αυτή που επέτρεψε την αύξηση της ενέργειας τους κατά 10 φορές ανά δεκαετία περίπου, και προσέφερε ένα ολόκληρο φάσμα από νέα σωματίδια με μια ευρεία περιοχή μαζών. Το γεγονός ότι τα σωματίδια που ανακαλύφθηκαν είχαν διαφορετικές μάζες το καθένα, ανάγκαζε τους φυσικούς να απαντήσουν επιτακτικά στο ερώτημα της προέλευσης της μάζας όλων αυτών των σωματιδίων. Αργότερα κατάλαβαν ότι πρέπει να υπάρχει κάποιος βασικός μηχανισμός που να καθορίζει τις μάζες των νέων σωματιδίων, αλλά δεν υπήρχε κάποιο ικανοποιητικό θεωρητικό υπόβαθρο ή μοντέλο που να προσεγγίζει έστω τον μηχανισμό αυτό.

Στη δεκαετία του '60 οι εξελίξεις στη θεωρητική και πειραματική φυσική επέτρεψαν την ανάπτυξη του Καθιερωμένου Μοντέλου για την εξήγηση όλων σχεδόν των πειραματικών δεδομένων, μέσω της περιγραφής τους με τα κβαντικά πεδία βαθμίδας. Η περιγραφή αυτή έδωσε εκπληκτικές συμφωνίες ανάμεσα στα πειραματικά δεδομένα και τις διάφορες θεωρίες.

Με τη βοήθεια της ηλεκτρασθενούς θεωρίας, που περιγράφει την ηλεκτρομαγνητική και την ασθενή πυρηνική αλληλεπίδραση με ενιαίο τρόπο, οι μάζες των σωματιδίων της ύλης καθώς και των σωματιδίων "φορέων" της αλληλεπίδρασης προέρχονται από την αλληλεπίδραση με το σωματίδιο Higgs,

χωρίς όμως να μπορεί να εξηγήσει κάτι παραπάνω για την προέλευση τους ή την ιεραρχική τους κατανομή βάσει μεγέθους. Ουσιαστικά δηλαδή οι μάζες των σωματιδίων της ύλης παρουσιάζονται στο Καθιερωμένου Μοντέλο ως ελεύθερες φαινομενικά παράμετροι. Από την άλλη πλευρά, στην κβαντική χρωμοδυναμική (που περιγράφει την ισχυρή πυρηνική αλληλεπίδραση) η προέλευση των μαζών των κουάρκ περιλαμβάνεται στην όλη περιγραφή, όχι όμως και η προέλευση των μαζών των λεπτονίων. Έτσι, στο Καθιερωμένο Μοντέλο οι μάζες των κουάρκ προέρχονται από τη θεώρηση της ισχυρής αλλά και της ηλεκτρασθενούς αλληλεπίδρασης, τοποθετώντας τα σε μια κατά κάποιον τρόπο "πλεονεκτική" θέση.

Ιστορικά οι κλίμακες μάζας και ενέργειας που παρατηρούνται διαδραμάτισαν κεντρικό ρόλο στην ανάπτυξη της Φυσικής των υποατομικών φαινομένων. Η κανονικότητα στο φάσμα μαζών αποτελεί ταυτόχρονα ένδειξη αλλά και δοκιμασία για την ανάπτυξη των σχετικών θεωριών. Ας αναλογιστεί κανείς ότι τα ενεργειακά επίπεδα του ατόμου του υδρογόνου οδήγησαν στην ανάπτυξη της κβαντομηχανικής, και το φάσμα μαζών των αδρονίων (σωματιδίων που "αισθάνονται" και την ισχυρή πυρηνική αλληλεπίδραση) στη συμμετρία SU(3), στο μοντέλο των κουάρκ, στην κβαντική χρωμοδυναμική και στη θεωρία των χορδών. Σε αντίθεση, το φάσμα μαζών των λεπτονίων δεν προσφέρει κάποια ένδειξη για τη δυναμική του πεδίου Higgs διότι δεν χαρακτηρίζεται από κανονικότητα.

Σήμερα πιστεύουμε ότι ο μηχανισμός βάσει του οποίου αποκτούν μάζα τα σωματίδια της ύλης προαπαιτεί την ύπαρξη ενός πεδίου - του πεδίου Higgs - το οποίο γίνεται αισθητό παντού ακόμα και στο κενό. Το πεδίο αυτό είναι υπεύθυνο για τη δημιουργία της μάζας των σωματιδίων μέσω της αλληλεπίδρασης του με αυτά. Η αλληλεπίδραση ενός σωματιδίου και του πεδίου Higgs προσφέρει ένα πλεόνασμα δυναμικής ενέργειας Higgs  $E$  στο σωματίδιο και αυτό αντιστοιχεί στη μάζα του σωματιδίου (με τη βοήθεια της εξίσωσης  $E = mc^2$ ).

Οι δε διαφορετικές μάζες των σωματιδίων εξηγούνται αν δεχθούμε ότι αυτά αλληλεπιδρούν με το πεδίο Higgs με διαφορετική ισχύ, το γιατί όμως οι αλληλεπιδράσεις διαφορετικών σωματιδίων με το πεδίο Higgs είναι διαφορετικές παραμένει άλυτο πρόβλημα μέχρι σήμερα.

Η ύπαρξη του πεδίου Higgs προϋποθέτει και την ύπαρξη του σωματιδίου Higgs - του φορέα του πεδίου αυτού. Η μελλοντική ανακάλυψη του σωματιδίου αυτού θα επαληθεύσει την ύπαρξη και του πεδίου Higgs και τη θεωρία των φυσικών για την προέλευση της μάζας. Είναι δε προφανές ότι ένα σωματίδιο με μεγάλη μάζα αλληλεπιδρά με το πεδίο Higgs - και κατ' επέκταση με το σωματίδιο Higgs - εντονότερα από ότι ένα σωματίδιο με μικρότερη μάζα. Η συμπεριφορά αυτή που αναμένεται να εξιχνιαστεί στο Μεγάλο Επιταχυντή Αδρονίων (LHC) θα παίξει σημαντικό ρόλο την ανίχνευση του σωματιδίου Higgs.

Αλλά και το σωματίδιο Higgs αποκτά τη μάζα του μέσω της διαδικασίας της αυτο-αλληλεπίδρασης του πεδίου Higgs. Η ένταση της αυτο-αλληλεπίδρασης όμως δεν είναι γνωστή και κατά συνέπεια δεν είναι γνωστή και η μάζα που αναμένεται να έχει το σωματίδιο Higgs. Η αδυναμία ακριβούς προσδιορισμού της μάζας του σωματιδίου Higgs σημαίνει ότι η προσπάθεια ανεύρεσης του πρέπει να επικεντρωθεί σε όλες τις κλίμακες μαζών που θα μπορούσε αυτό να έχει. Πειραματικά αυτό δημιουργεί πολλαπλά προβλήματα γιατί ανάλογα με την κλίμακα μάζας την οποία ερευνούν οι φυσικοί, πρέπει να χρησιμοποιήσουν και διαφορετικές τεχνικές. Ακόμη και αν βρεθεί το σωματίδιο Higgs σε μια συγκεκριμένη ενέργεια/μάζα, πρέπει να λάβουν χώρα πολλαπλές συμπληρωματικές μετρήσεις για να προσδιοριστούν οι ιδιότητες του καθώς και η ύπαρξη ή όχι κι άλλων σωματιδίων Higgs, όπως για παράδειγμα προβλέπονται από θεωρίες που προεκτείνουν το Καθιερωμένο Μοντέλο, όπως είναι η υπερ-συμμετρία.

Τέλος, σημαντικό γεγονός θα είναι και η μη ανίχνευση του σωματιδίου Higgs στα νέα πειράματα, γεγονός που δεν αποκλείεται. Αυτό θα αναγκάσει τους φυσικούς να αναπτύξουν μια νέα προσέγγιση για ένα μεγάλο μέρος των σημερινών θεωριών σχετικά με τη δομή της ύλης.

### **Ιστορικά πειράματα στο LEP και Tevatron για την ανίχνευση του σωματιδίου Higgs**

Για πολλά χρόνια στον επιταχυντή LEP του CERN, έγιναν πειράματα για την παρατήρηση των μποζονίων  $W$  και  $Z$  - των φορέων της ασθενούς αλληλεπίδρασης. Στον επιταχυντή αυτό συγκρούονται μια δέσμη ηλεκτρονίων με μια δέσμη ποζιτρονίων, οπότε μελετάται η παραγωγή σωματιδίων  $Z$  καθώς και η διάσπαση τους. Όταν παράγεται ένα μποζόνιο  $Z$ , μπορεί περιστασιακά να δώσει μποζόνιο Higgs και ένα "εικονικό"  $Z$  που σχεδόν αμέσως διασπάται. Για την περίπτωση του σωματιδίου Higgs, η μάζα του αναμενόταν να ήταν ίση ή μικρότερη της συνολικής ενέργειας σύγκρουσης σωματιδίων στον επιταχυντή. Η αντίδραση που έπαιξε πρωταρχικό ρόλο στις άκαρπες προσπάθειες για την ανακάλυψη του σωματιδίου Higgs είναι η ακτινοβολία ενός Higgs από ένα σωματίδιο  $Z$ , το οποίο μετέπειτα διασπάται σε δύο λεπτόνια. Το σωματίδιο Higgs που παράγεται με αυτό τον τρόπο θα διασπαστεί κυρίως σε ζεύγη από βαριά φερμιόνια - όπως  $b$  και αντι- $b$  κουάρκ -, λεπτόνιο ταυ και αντι-ταυ,  $c$  και αντι- $c$  κουάρκ, ενώ δεν αναμένεται να ανιχνευτούν διασπάσεις του σε ελαφρότερα σωματίδια όπως μιονίο και αντι-μιονίο, ηλεκτρόνιο και ποζιτρόνιο ή δύο φωτόνια. Στην πρώτη φάση πειραμάτων του LEP αποκλείστηκε η ύπαρξη του σωματιδίου Higgs με μάζα μέχρι τα 65 GeV. Με τη δεύτερη φάση λειτουργίας του πειράματος, αφού αναβαθμίστηκε ο επιταχυντής, αποκλείστηκε η ύπαρξη του σωματιδίου Higgs με μάζα μέχρι τα 114 GeV, αλλά ταυτόχρονα είχαμε και κάποιες ενδείξεις για την ύπαρξη του με μάζα 115 GeV. Τα πειράματα αυτά όμως ήσαν στο ενεργειακό όριο του επιταχυντή LEP και γι αυτό

ήταν επιβεβλημένη η παύση της λειτουργίας του, έτσι ώστε να προχωρήσει η κατασκευή του νέου επιταχυντή LHC και των ανιχνευτών που θα λειτουργήσουν σε αυτόν.

Με τον νέο επιταχυντή, οι ενεργειακές κλίμακες που αποτελούν αντικείμενο έρευνας για την ανακάλυψη του σωματιδίου Higgs είναι εφικτές. Το γεγονός αυτό, σε συνδυασμό με την ιδιαίτερα υψηλή φωτεινότητα των δεσμών του LHC (αριθμός σωματιδίων στις δέσμες), θα επιτρέψει τη σίγουρη απάντηση στο ερώτημα της ύπαρξης ή όχι του σωματιδίου Higgs και της ποσότητας της μάζας του.

Ο επιταχυντής Tevatron έχει διαδραματίσει μέχρι στιγμής σπουδαίο ρόλο στην σωματιδιακή φυσική, με την ανακάλυψη το 1995 του βαρύτερου κουάρκ που απαντάται στη φύση, του top κουάρκ. Το τελευταίο ήταν ένα σημαντικό κλειδί για το ξεκλείδωμα της υπόθεσης του μποζονίου Higgs, επειδή η μάζα του Higgs μπορεί να υπολογιστεί, κατά προσέγγιση, εάν ξέρουμε τη μάζα του top κουάρκ, του μποζονίου W, και πώς συμπεριφέρεται το μποζόνιο Z στην παραγωγή και τις διασπάσεις του. Από τα προηγούμενα μεγέθη υπολογίσαμε έτσι ότι το Higgs πρέπει να έχει μια μάζα που να είναι περίπου στα  $120 \text{ GeV}/c^2$

Στον επιταχυντή Tevatron συγκρούονταν πρωτόνια με αντι-πρωτόνια και ουσιαστικά η αλληλεπίδραση γίνεται μεταξύ των κουάρκ που τα αποτελούν. Από το 2001 μάλιστα έγιναν πολλά πειράματα για την ανακάλυψη του σωματιδίου Higgs χωρίς όμως αποτέλεσμα στην περιοχή των 180 GeV, ανεβάζοντας έτσι το ελάχιστο όριο των 114 GeV του επιταχυντή LEP.

Στις συγκρούσεις αυτές του Tevatron αναμέναμε να ήταν τρεις οι κύριοι μηχανισμοί που θα μπορούσαν να οδηγήσουν στην παραγωγή και ανίχνευση ενός σωματιδίου Higgs: Πρώτον, η σύντηξη δύο γκλουονίων, δεύτερον η παραγωγή και μετέπειτα διάσπαση ενός μποζονίου Z, και τέλος η άμεση παραγωγή ενός σωματιδίου Higgs το οποίο διασπάται σε δύο μποζόνια W.

Εάν η μάζα του σωματιδίου Higgs βρίσκεται μεταξύ των τιμών 115 και 130 GeV, ο καλύτερος τρόπος ανίχνευσης του είναι μέσω της παραγωγής ενός μποζονίου Z το οποίο ακτινοβολεί ένα σωματίδιο Higgs και διασπάται μετέπειτα. Το σωματίδιο Higgs διασπάται επίσης, κατά κανόνα σε ένα b και σε ένα αντι-b κουάρκ. Η διαδικασία αυτή είναι όμοια με τη διαδικασία ανίχνευσης που ακολουθήθηκε στον επιταχυντή LEP και ουσιαστικά αποτελεί τη συνέχεια της σε λίγο υψηλότερες ενέργειες. Εάν η μάζα του σωματιδίου Higgs είναι μεγαλύτερη των 130 GeV ο καλύτερος τρόπος ανίχνευσης είναι μέσω της διάσπασης του σωματιδίου Higgs σε ένα ζεύγος μποζονίων W. Η σύντηξη δύο γκλουονίων αναφέρεται κυρίως στην παραγωγή σωματιδίων Higgs με μεγαλύτερη μάζα καθώς και πολλαπλών σωματιδίων Higgs που προβλέπονται από θεωρίες που επεκτείνουν το καθιερωμένο μοντέλο.

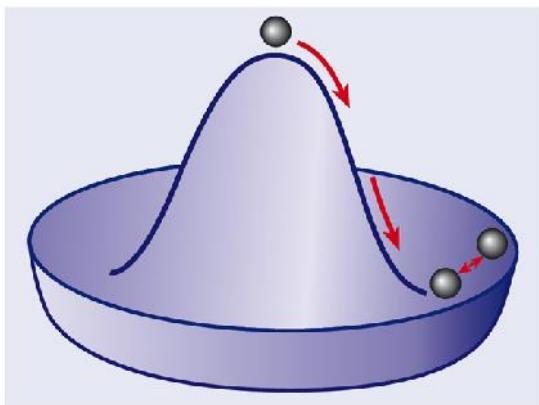
Η τελευταία περίπτωση (σύντηξη δύο γκλουονίων) θεωρείται ως η πιο κατάλληλη για το περιβάλλον του νέου επιταχυντή LHC. Οι δυσκολίες όμως ανίχνευσης είναι πολλές. Γιατί από τον συνολικό αριθμό των συγκρούσεων που θα παρατηρηθούν, λίγες χιλιάδες μόνο θα καταλήξουν στη δημιουργία του σωματιδίου Higgs και από αυτές ένα μικρό μόνο ποσοστό είναι δυνατόν να ανιχνευθεί. Γι αυτό το λόγο, επειδή είναι δύσκολη η παραγωγή ικανοποιητικών δεδομένων, τέτοια πειράματα λειτουργούν για πολλά χρόνια.

### Γιατί το σωματίδιο Higgs πρέπει να υπάρχει Από την ιστορία της Φυσικής

Μια από τις μεγαλύτερες ανακαλύψεις του 20ού αιώνα είναι ότι αναγνωρίσαμε πως σε κάθε συμμετρία στη φύση αντιστοιχεί μια κάποια φυσική ποσότητα που διατηρείται. Γι αυτή την εργασία της η Emmy Noether δυστυχώς δεν κέρδισε ποτέ βραβείο Νόμπελ. Οι συμμετρίες είναι όλες γύρω μας - μερικές είναι πολύ απλές, και μερικές όχι και τόσο απλές. Παραδείγματος χάριν, θεωρήστε τη χρονική συμμετρία. Οι νόμοι της φυσικής είναι οι ίδιοι τώρα όπως ήταν και πριν από λίγο, και θα είναι οι ίδιοι 100 χρόνια από τώρα. Ή πιο απλά: με τον χρόνο οι νόμοι παραμένουν ίδιοι. Αυτή η συμμετρία οδηγεί στην πραγματικότητα στη διατήρηση της ενέργειας. Επιπλέον, εάν κινείστε στο χώρο, οι νόμοι της φυσικής είναι οι ίδιοι. Αυτό οδηγεί στη διατήρηση της ορμής. Εάν ξαναγράψετε τους νόμους της φυσικής σε ένα πλαίσιο αναφοράς που περιστράφηκε 40 μοίρες ως προς αυτόν όπου τους γράφετε τώρα, αυτοί μένουν οι ίδιοι. Κι αυτό είναι η διατήρηση της στροφορμής.

Το 1960 δύο φυσικοί οι Steven Weinberg, και Abdus Salam ανακάλυψαν πως τα σωματίδια φορείς της ασθενούς δύναμης  $W^+$ ,  $W^-$  και  $Z$  μπορεί να έχουν μάζα χωρίς όμως να σπάει η βασική συμμετρία βαθμίδας της ασθενούς πυρηνικής δύναμης. Χωρίς να εισαχθεί μια μάζα στη θεωρία - στις εξισώσεις της - θα μπορούσε να δημιουργείται αυτόματα (αυθόρμητα) μάζα ως αποτέλεσμα κάποιων αλληλεπιδράσεων στο πεδίο των ασθενών δυνάμεων, δηλαδή μέσω της ρήξης της βασικής συμμετρίας.

Είναι γνωστό ότι επειδή το φωτόνιο (φορέας της ηλεκτρικής δύναμης) δεν έχει μάζα, θα έπρεπε και τα  $W^+$ ,  $W^-$  και  $Z$  (φορείς της ασθενούς αλληλεπίδρασης) να μην έχουν για να επιτευχθεί η ενοποίηση των ασθενών με τις ηλεκτρικές αλληλεπιδράσεις. Για να επιτευχθεί αυτό το αποτέλεσμα οι δύο φυσικοί εισήγαγαν ένα επιπλέον κβαντικό πεδίο προς τιμήν του Peter Higgs, που πρώτος έδωσε αυτή την ιδέα. Μέσω δε του Higgs πιστεύουμε ότι αποκτούν μάζα τα  $W^+$ ,  $W^-$  και  $Z$ . Τα κβάντα Higgs είναι ένα μποζόνια χωρίς spin και μάζα αμφισβητούμενη όπως είδαμε πιο πάνω. Αν ήταν 'ελαφρύ' θα το βλέπαμε στον επιταχυντή LEP, ενώ αν είναι 'βαρύ' θα το δούμε στον LHC.



Ένα μεξικάνικο καπέλο επεξηγεί το θεώρημα Goldstone. Αν και το καπέλο είναι αναλλοίωτο κάτω από περιστροφές γύρω από έναν κατακόρυφο άξονα, μια μικρή σφαίρα θα μπορεί να κάτσει μακριά από τον άξονα συμμετρίας, κάπου στο χείλη του καπέλου, αλλά μπορεί και να κινηθεί ελεύθερα χωρίς δύναμη επαναφοράς γύρω από το χείλη. Η σπασμένη κατά προσέγγιση συμμετρία απεικονίζεται με ελαφρώς γερμένο το καπέλο, αυτό παράγει μια μικρή δύναμη επαναφοράς, ανάλογη με τη μικρή μάζα του πιονίου.

Η ιστορία του μποζονίου Higgs άρχισε το 1961, όταν ο Yoichiro Nambu, φυσικός στο Πανεπιστήμιο του Σικάγου, έδειξε ότι μία διαδικασία που ονομάζεται "αυθόρμητο σπάσιμο συμμετρίας", είναι σε θέση να εξηγήσει από πού προέρχεται η μάζα. Για να καταλάβετε τι σημαίνει, φανταστείτε μια σφαίρα πάνω από ένα μεξικάνικο καπέλο (σχήμα). Αυτό το σχήμα είναι συμμετρικό, επειδή φαίνεται το ίδιο από όλες τις κατευθύνσεις. Εντούτοις, η σφαίρα δεν είναι σταθερή και η συμμετρία αυθόρμητα σπάει όταν πέφτει στο χείλος, στο άκρο του καπέλου. Αυτό μπορεί να φαίνεται απλό, αλλά το πεδίο Higgs πραγματικά είναι σαν ένα μεξικάνικο καπέλο.

Ένα έτος αργότερα ο Jeffrey Goldstone, του πανεπιστημίου του Καίμπριτζ, και δύο μελλοντικοί νομπελίστες, οι Abdus Salam και Steven Weinberg, έδειξαν ότι υπήρξε μια ρωγμή σε αυτήν την προσέγγιση. Η πρώτη συμβολή του Higgs στο πρόβλημα αυτό - που έγινε πριν 40 χρόνια - ήταν να δείξει ότι ο Goldstone και οι συνάδελφοί του είχαν κάνει επίσης ένα λάθος. Αυτή η σημαντική ανακάλυψη δημοσιεύθηκε στο *Physics Letters*.

Ο Higgs πήγε έπειτα για να δείξει ότι το αυθόρμητο σπάσιμο της συμμετρίας θα μπορούσε να εξηγήσει με ποιό τρόπο σωματίδια που ήταν ήδη γνωστά τότε μπορούσαν να αποκτήσουν τη μάζα τους. Επιπλέον, η θεωρία του Higgs πρόβλεψε την ύπαρξη αυτού που το περιγράφει ως το "εναπομείναντα σωματίδιο". Αυτό το νέο σωματίδιο ήταν το μποζόνιο Higgs.

Ο Higgs έστειλε αυτό το δεύτερο αποτέλεσμα στο *ίδιο περιοδικό, Physics Letters*, αλλά του είπαν ότι δεν ήταν κατάλληλο για σύντομη δημοσίευση και αναγκάστηκε να το στείλει σε ένα άλλο περιοδικό. Εντούτοις, άκουσε αργότερα μέσω ενός συναδέλφου ότι η εργασία του είχε απορριφθεί επειδή οι συντάκτες του περιοδικού θεώρησαν ότι "δεν ήταν σχετική προφανώς με τη φυσική". Αρχικά ο Higgs αγανάκτησε, αλλά αργότερα συνειδητοποίησε ότι το πρώτο σχέδιο της εργασίας του "ήταν ελλιπές". Της πρόσθεσε δύο παραγράφους και την έστειλε σε ένα αμερικανικό περιοδικό, το *Physical Review Letters*, όπου έγινε αποδεκτή.

Πάντως η επιστημονική κοινότητα της σωματιδιακής φυσικής χρειάστηκε πολύ

χρόνο για να αναγνωρίσει τη σημασία αυτής της εργασίας που είχε κάνει ο φυσικός του Εδιμβούργου. Ο Higgs θυμάται τις συζητήσεις πάνω στην εργασία του στα δύσπιστα ακροατήρια στο Χάρβαρντ και στο Princeton. "Με αντιμετώπιζαν σαν τρελάρα", θυμάμαι. "Στο τέλος της ημέρας δέχονταν ότι δεν ήμουν, αλλά δεν συνειδητοποίησαν τι χρήσιμο θα μπορούσαν να κάνουν με την εργασία".

Τελικά, οι Weinberg και Salam - οι οποίοι είχαν δείξει ότι είχε κάνει λάθος ο Higgs - χρησιμοποίησαν το μηχανισμό Higgs για να κάνουν μία από τις μεγαλύτερες σημαντικές ανακαλύψεις στην ιστορία της φυσικής, όταν συνδύασαν τις ασθενείς και τις ηλεκτρομαγνητικές δυνάμεις σε μια ενιαία δύναμη την ηλεκτρασθενή. Οι Weinberg, Salam και ένας αμερικανός φυσικός, ο Sheldon Glashow, μοιράστηκαν το βραβείο Νόμπελ του 1979 για τη φυσική για αυτήν την εργασία, και το μποζόνιο Higgs έγινε κομμάτι της φυσικής σωματιδίων.

Αν και ο Higgs είναι λίγο γνωστός έξω από την κοινότητα της φυσικής, το όνομά του έγινε γνωστό στα βρετανικά ΜΜΕ το 2002 όταν δημοσιεύτηκε στο *Scotsman* μια διαφωνία του Higgs με τον Stephen Hawking. Σύμφωνα με τον Higgs, αυτός είχε κάνει μερικές παρατηρήσεις για έλλειψη επικοινωνίας μεταξύ του Hawking, που είναι πρώτιστα κοσμολόγος, και της κοινότητας των σωματιδιακών φυσικών. Τα δύο άτομα έχουν επιλύσει από τότε τις διαφορές τους, αν και ο Hawking ακόμα θεωρεί ότι το μποζόνιο Higgs δεν θα βρεθεί ποτέ.

Ο Higgs και χιλιάδες άλλοι φυσικοί φυσικά είναι βέβαιοι ότι θα παρουσιαστεί μια μέρα στον Μεγάλο Επιταχυντή Αδρονίων (LHC) του CERN. Εάν αυτό συμβεί τότε ο Higgs - και ενδεχομένως οι Englert και Brout - θα ετοιμάσουν τις βαλίτσες τους για την τελετή των βραβείων Νόμπελ στη Στοκχόλμη. Και εάν το μποζόνιο Higgs δεν μπορεί να βρεθεί στο LHC, οι φυσικοί θα έχουν ακόμα ένα τεράστιο πρόβλημα να λύσουν.

---

Τα πιο κάτω σκίτσα προέρχονται από εκλαϊκευτική ιστοσελίδα του CERN για να βοηθήσουν στην κατανόηση του μηχανισμού Higgs, πώς δηλαδή τα σωματίδια απέκτησαν μάζα. (Από μια ιδέα του David Miller του Πανεπιστημιακού Κολεγίου του Λονδίνου)



## 1. Ο μηχανισμός Higgs



Για να κατανοήσουμε τον μηχανισμό Higgs, ας φανταστούμε μια συγκέντρωση φυσικών οι οποίοι βρίσκονται ομοιόμορφα κατανεμημένοι μέσα σε μια αίθουσα, και συζητούν με τους διπλανούς τους.

...Μια σημαντική φυσικός μπαίνει και διασχίζει την αίθουσα. Όλοι οι φυσικοί απ' όπου περνάει, έλκονται προς αυτήν και συνωθούνται γύρω της. Καθώς διασχίζει



την αίθουσα, έλκει τα πρόσωπα που βρίσκονται κοντά της, ενώ αυτά που προσπέρασε, επιστρέφουν στις κανονικές αποστάσεις μεταξύ τους... Επειδή πάντα υπάρχει ένας σωρός ανθρώπων γύρω της, αυτή αποκτά μεγαλύτερη μάζα απ' ότι θα είχε αν ήταν μόνη της. Αυτό υπονοεί ότι έχει τώρα περισσότερη ορμή για την ίδια

ταχύτητα κίνησης. Δηλαδή, όταν κινείται είναι δυσκολότερο να σταματήσει, ενώ όταν σταματήσει, είναι δυσκολότερο να ξεκινήσει ξανά, διότι ο σωρός γύρω της πρέπει να κινηθεί και αυτός.

Στις τρεις διαστάσεις και με τις περιπλοκές που φέρνει η σχετικότητα, αυτός περίπου είναι ο μηχανισμός του Higgs. Ένα πεδίο, το πεδίο Higgs, θεωρείται ως υπόβαθρο σε όλο το χώρο. Απ' οπουδήποτε περνάει ένα σωματίδιο, το τελευταίο παραμορφώνει τοπικά το πεδίο Higgs. Η παραμόρφωση αυτή που έχει ως αντίστοιχο τη συγκέντρωση των ανθρώπων γύρω από την σπουδαία φυσικό που εισέρχεται στην αίθουσα, γεννάει τη μάζα του σωματιδίου.

Η ιδέα προέρχεται από τη φυσική της στερεάς κατάστασης. Αντί για ένα πεδίο που γεμίζει όλο το χώρο, σ' ένα στερεό σώμα, υπάρχει το πλέγμα των θετικών ιόντων του κρυστάλλου. Όταν ένα ηλεκτρόνιο κινείται μέσα στο πλέγμα των ιόντων, τα ιόντα έλκονται από αυτό, κάνοντας έτσι τη φαινομενική μάζα του ηλεκτρονίου να είναι ακόμη και 40 φορές μεγαλύτερη από του ελευθέρου ηλεκτρονίου.

Το πεδίο Higgs στο κενό, αποτελεί ένα τέτοιο είδος υποθετικού πλέγματος, που γεμίζει όλο το Σύμπαν. Χωρίς αυτό δεν θα μπορούσαμε να εξηγήσουμε γιατί τα σωματίδια Z και W που είναι οι φορείς των ασθενών αλληλεπιδράσεων, έχουν τόσο μεγάλη μάζα, ενώ το φωτόνιο που είναι ο φορέας της ηλεκτρομαγνητικής αλληλεπίδρασης, δεν έχει καθόλου μάζα.

## 2. Το μποζόνιο Higgs

... Ας θεωρήσουμε τώρα μια φήμη που διασπείρεται μέσα στην αίθουσα με τους φυσικούς. Όσοι βρίσκονται κοντά στην πόρτα, ακούνε πρώτοι τη φήμη και μαζεύονται για να συζητήσουν τις λεπτομέρειες. Μετά στρέφονται και πλησιάζουν τους επόμενους γείτονές τους που θέλουν να μάθουν και αυτοί τι έγινε. ...



... Ένα κύμα από συνάθροιση προσώπων διαδίδεται μέσα στην αίθουσα. Μπορεί να απλωθεί σε όλες τις γωνιές, ή μπορεί να σχηματιστεί μια δέσμη από συμπύκνωση προσώπων που θα διαδοθεί προς μία μόνο διεύθυνση μέσα στην αίθουσα, και θα μεταφέρει τη φήμη. Παράγονται δηλαδή πάλι συμπυκνώσεις, αλλά αυτή τη φορά μεταξύ των ιδίων των επιστημόνων, χωρίς να χρειάζεται και άλλο πρόσωπο.



Αφού η πληροφορία μεταφέρεται από συσσωματώματα ανθρώπων, και αφού τα συσσωματώματα ήταν εκείνα που έδωσαν περισσότερη μάζα στο πρόσωπο που μπήκε στην αίθουσα, τα συσσωματώματα αυτά από μόνα τους έχουν μάζα και χωρίς την ύπαρξη του σημαντικού προσώπου.



Το μποζόνιο Higgs προβλέπεται ότι είναι ακριβώς ένα τέτοιο συσσωμάτωμα μέσα στο πεδίο Higgs.

Στο σημείο αυτό θα βρούμε ξανά αναλογίες από τη φυσική του στερεού σώματος. Ένα κρυσταλλικό πλέγμα μπορεί να μεταφέρει

κύματα πυκνότητας χωρίς να χρειάζεται κάποιο ηλεκτρόνιο να κινείται και να έλκει τα ιόντα. Τα κύματα αυτά μπορούν να συμπεριφέρονται σα να ήταν σωμάτια. Οι φυσικοί τα λένε φωνόνια, και είναι επίσης μποζόνια.

Θα πεισθούμε πραγματικά ότι το πεδίο υπάρχει, και ότι ο μηχανισμός που δίνει μάζα στα σωματίδια είναι πραγματικός, όταν βρούμε το ίδιο το σωματίδιο Higgs.

Θα μπορούσε να υπάρχει ένα πεδίο Higgs και ένας μηχανισμός Higgs σε όλο το Σύμπαν μας, χωρίς να υπάρχει ένα μποζόνιο Higgs; Η επόμενη γενιά των επιταχυντών και κυρίως ο πολυαναμενόμενος επιταχυντής LHC στη Γενεύη θα ξεκαθαρίσει το ζήτημα.

"Πιστεύω ότι θα το βρούμε στον επιταχυντή LHC. Αν δεν το βρούμε, θα προβληματιστώ πάρα πολύ. Δεν μπορώ να σκεφτώ άλλη εξήγηση για τη μάζα που διαθέτουν τα υποατομικά σωματίδια", δήλωσε ο ίδιος ο Higgs σε συνέντευξη Τύπου στη Γενεύη.

Όταν διατύπωσε τη θεωρία του στο Πανεπιστήμιο του Εδιμβούργου, το 1964, πολλοί συνάδελφοί του τον αποκάλεσαν «ανόητο». Σαραντα χρόνια μετά, κανείς δεν έχει να προτείνει τίποτα καλύτερο και όλοι περιμένουν με αγωνία την έμπρακτη δικαίωσή του.

"Είμαι 90% βέβαιος πως ο επιταχυντής του CERN θα εντοπίσει τελικά το μποζόνιο, ακόμη κι αν χρειαστούν μήνες αναλύσεων", είπε ο Higgs και πρόσθεσε: "Αν δεν το βρούμε έως το Μάιο του 2009, που κλείνω τα 80, θα πω στον γιατρό μου να με κρατήσει ζωντανό λίγο παραπάνω".

Ο Higgs δεν απέκλεισε το ενδεχόμενο οι Αμερικανοί ερευνητές να έχουν ήδη παραγάγει το «σωματίδιο του Θεού», στον επίσης πανίσχυρο επιταχυντή Τέβατρον, στο εργαστήριο Fermilab του Σικάγου.

"Είναι πιθανό οι ΗΠΑ να έχουν κερδίσει την κούρσα και να μην το ξέρουν. Αν αποδείξουν ότι το βρήκαν προτού ξεκινήσει τη λειτουργία του ο δικός μας επιταχυντής, τότε η πρωτιά θα τους ανήκει.

Στην πράξη Ευρώπη και Αμερική δίνουν αγώνα ταχύτητας ποιος θα εντοπίσει πρώτος το σωματίδιο του Θεού», σημείωσε ο Βρετανός φυσικός.

**Πηγές: CERN, PhysicsWorld, Περισκόπιο της Επιστήμης, Higgs 101 στο Cosmic Variance, παλιότερα άρθρα στο physics4u**

**ΠΗΓΗ: <http://www.physics4u.gr/articles/2008/Higgs.html>**