

ΑΝΑΖΗΤΩΝΤΑΣ «ΤΟ ΣΩΜΑΤΙΔΙΟ ΤΟΥ ΘΕΟΥ»

Στη δίψα του ο άνθρωπος να καταλάβει τον εαυτό του και τον κόσμο θέτει υπαρξιακά ερωτήματα και αναζητά και επιστημονικές απαντήσεις: στη μελέτη του αχανούς Σύμπαντος και στα βάθη του Μικρόκοσμου. Τις τελευταίες δεκαετίες οι απίστευτα ραγδαίες επιστημονικές πρόοδοι σύνδεσαν τη γνώση μας στις δύο αυτές κατευθύνσεις: το απέραντα (;) μεγάλο και το απεριόριστα (;) μικρό. Έτσι, πιστεύουμε ότι η δημιουργία του υλικού Σύμπαντος με τη Μεγάλη Έκρηξη πέρασε αρχικά από την εμφάνιση των στοιχειωδών σωματιδίων. Αυτά, με τις αλληλεπιδράσεις τους, καθώς το Σύμπαν διαστελλόταν από τις απειροελάχιστες αρχικές διαστάσεις του και εψύχετο, συγκρότησαν σταδιακά τις διάφορες δομές της ύλης: τα νουκλεόνια, τα πολύ απλά άτομα, τα αέρια συμπυκνώματα ύλης, που εξελίχθηκαν σε αστέρες, γαλαξίες, σμήνη γαλαξιών... Πολύ σύντομα, φαίνεται, ότι θα είμαστε σε θέση να σχηματίσουμε στο εργαστήριο ενεργειακές συνθήκες που υπήρξαν περίπου ένα εκατομμυριοστό του δευτερολέπτου, μετά την αρχική Γένεση και να απαντήσουμε σε πολύ σημαντικά ερωτήματα σχετικά με τις θεμελιώδεις δυνάμεις στη φύση, τα θεμελιώδη σωματίδια και τις ιδιότητες του Σύμπαντος.

Οι γνώσεις μας για τη θεμελιώδη δομή της ύλης και τις θεμελιώδεις αλληλεπιδράσεις

Σύμφωνα με το **Καθιερωμένο Πρότυπο (Κ.Π.) της Σωματιδιακής Φυσικής**, σήμερα πιστεύουμε ότι κάθε μορφή ύλης που υπάρχει ή δημιουργείται στο φυσικό Σύμπαν συγκροτείται τελικά από (ή είναι) τα λεγόμενα **στοιχειώδη ή θεμελιώδη σωματίδια-ύλης**, δηλαδή σωματίδια που θεωρούνται ότι δεν αποτελούνται από άλλα πιό στοιχειώδη. Αυτά είναι τα έξι **κουάρκ** και τα έξι **λεπτόνια**, των οποίων η ύπαρξη έχει πειραματικά επιβεβαιωθεί άμεσα ή έμμεσα (π.χ. λεπτόνιο είναι το πολύ γνωστό μας απειροελάχιστο ηλεκτρόνιο) και έχουν διαστάσεις μικρότερες των 10^{-18} μέτρα*. Στα σωματίδια αυτά αντιστοιχούν άλλα τόσα, επίσης θεμελιώδη, που έχουν κάποιες «αντίθετες» ιδιότητες (π.χ. αντίθετο ηλεκτρικό φορτίο) και ονομάζονται **αντισωματίδια**. Έτσι το γνωστό μας πρωτόνιο, ο πυρήνας δηλαδή του απλούστερου ατόμου στη φύση, του υδρογόνου, δεν είναι θεμελιώδες σωματίδιο, αλλά αποτελείται και αυτό από δύο κουάρκ με «γεύση» u και ένα άλλο κουάρκ με «γεύση» d, είναι δηλαδή αδρό («χοντρό») και γι' αυτό λέγεται και **αδρόνιο**, με διαστάσεις περίπου 10^{-15} μέτρα.

Τα θεμελιώδη αυτά σωματίδια αλληλεπιδρούν μεταξύ τους με μία ή περισσότερες από τις τέσσερες **θεμελιώδεις δυνάμεις**: τη βαρυτική, την ηλεκτρομαγνητική, την ασθενή και την ισχυρή αλληλεπίδραση. Οι δυνάμεις αυτές, σύμφωνα με τη σύγχρονη αντίληψη, εξασκούνται μεταξύ των θεμελιωδών σωματιδίων με την ανταλλαγή μεταξύ τους άλλων **σωματιδίων-φορέων** της αντίστοιχης αλληλεπίδρασης, τα οποία ανταλλάσσονται, όπως δυό παιδιά ανταλλάσσουν μια μπάλα στο βόλλεϋ. Τα σωματίδια-φορείς των παραπάνω θεμελιωδών αλληλεπιδράσεων (ή δυνάμεων) ονομάζονται, αντίστοιχα, βαρυτόνιο (άμαζο, δεν έχει ακόμα ανακαλυφθεί πειραματικά), φωτόνιο (άμαζο), W και Z για την τρίτη δύναμη (σωματίδια με τεράστια μάζα, όση 80 και 91 πρωτονίων, αντίστοιχα !), και γλοϊόνιο ή γκλουόνιο (άμαζο) για την τέταρτη αλληλεπίδραση.

Στην ενεργειακή κλίμακα της καθημερινότητάς μας, οι θεμελιώδεις δυνάμεις έχουν πολύ διαφορετικές ιδιότητες και ρόλους. Η **βαρυτική** δύναμη μας συγκρατεί πάνω στη Γή και κινεί τη Γή γύρω από τον Ήλιο με όλες τις συνέπειες από αυτή την κίνηση και δράση και οφείλεται στη **μάζα** που έχουν τα διάδορα σώματα. Η **ηλεκτρομαγνητική** δομεί από αρνητικά φορτισμένα ηλεκτρόνια και θετικούς πυρήνες την αναρίθμητη ποικιλία των ατόμων, ιόντων, μορίων και των χημικών ενώσεών τους. Η **ισχυρή πυρηνική** δύναμη συγκρατεί τα συστατικά (πρωτόνια και νετρόνια) των ατομικών πυρήνων, ενώ η **ασθενής πυρηνική** δύναμη προκαλεί διάσπαση μερικών πυρήνων, παίζοντας π.χ. κρίσιμο ρόλο στη διαδικασία παραγωγής της ηλιακής ενέργειας και στη μακροζωία του Ήλιου. Η βαρυτική και ηλεκτρομαγνητική έχουν θεωρητικά άπειρη εμβέλεια, ενώ οι πυρηνικές (ισχυρή και ασθενής) ενεργούν μόνο μέχρι μια απόσταση συγκρίσιμη με τις διαστάσεις ενός πυρήνα. Αλλά και όσον αφορά την ισχύ των θεμελιωδών δυνάμεων, αν αντιστοιχήσουμε τη μονάδα στην ισχυρή πυρηνική, η ηλεκτρομαγνητική είναι συγκριτικά 100 φορές περίπου ασθενέστερη σε αντίστοιχες αποστάσεις, η ασθενής πυρηνική περίπου 100000 φορές ασθενέστερη από την ισχυρή και η βαρυτική μόνο το 10^{-39} της ισχυρής!

Εξάλλου, και οι μάζες των θεμελιωδών σωματιδίων-ύλης εμφανίζουν μεγάλη κλιμάκωση: από τα σχεδόν άμαζα νετρίνα (ηλεκτρικά ουδέτερα λεπτόνια) και το ηλεκτρόνιο (με περίπου 2000 φορές λιγότερη μάζα από το πρωτόνιο) μέχρι το αλλόκοτα βαρύ κορυφαίο κουάρκ t (τοπ), που είναι 175 φορές βαρύτερο από το πρωτόνιο! Τα θεμελιώδη αυτά σωματίδια έχουν και διαφορετικές αλληλεπιδράσεις. Τα αφόρτιστα λεπτόνια (νετρίνα) έχουν μόνο ασθενείς πυρηνικές δυνάμεις, ενώ τα φορτισμένα λεπτόνια έχουν (ακέραιο ηλεκτρικό φορτίο) και ηλεκτρομαγνητικές αλληλεπιδράσεις. Τα κουάρκ, τέλος, (έχουν κλασματικό ηλεκτρικό φορτίο !) εξασκούν επιπλέον αυτών και ισχυρές πυρηνικές.

Ήδη, ζαλιστήκαμε από την ποικιλία και διαφορετικότητα των θεμελιωδών δυνάμεων, των θεμελιωδών σωματιδίων-ύλης και των σωματιδίων-φορέων των δυνάμεων. Και, φυσικά, γεννώνται πολλά ερωτήματα:

- Γιατί αυτή η τεράστια διαφορά ιδιοτήτων των θεμελιωδών δυνάμεων;
- Γιατί τα θεμελιώδη σωματίδια έχουν τις μάζες και τις διαφορές μαζών που έχουν;
- Ακόμη πιο επιτακτικά: γιατί τα σωματίδια-ύλης αλλά και τα σωματίδια-φορείς της ασθενούς αλληλεπίδρασης, W και Z , έχουν μάζα και δεν είναι άμαζα όπως οι άλλοι φορείς δυνάμεων, τα φωτόνια και τα γλοιόνια;
- Μήπως σε πολύ ψηλότερες ενέργειες, σαν αυτές που είχαν τα σωματίδια στις αρχικές στιγμές της δημιουργίας του Σύμπαντος, οι θεμελιώδεις αλληλεπιδράσεις (και οι φορείς τους) συνέκλιναν σε μια και μοναδική;
- Μήπως η βαρύτητα φαίνεται τόσο αδύνατη στο τρισδιάστατο χώρο μας διότι πολλές από τις δυναμικές γραμμές της «εισδύουν» σε μία ή περισσότερες άλλες, ανεξιχνίαστες ακόμα μικροδιαστάσεις;
- Μήπως υπάρχει λεπτότερη και απλούστερη δομή των σωματιδίων αυτών που τώρα όλοι οι επιστήμονες τα δέχονται ως θεμελιώδη; Μήπως βαθύτερα υπάρχουν πολύ λιγότερα πραγματικά θεμελιώδη σωματίδια και άλλη, πιο θεμελιώδης αλληλεπίδραση;
- Μήπως...;
-
-

Η υπόθεση του πεδίου και του σωματιδίου Higgs

Παράλληλα με τις πειραματικές ή θεωρητικές ανακαλύψεις ή ερμηνείες των νέων σωματιδίων, προχώρησε ιστορικά, ιδιαίτερα από τη δεκαετία του 50 και εξής, σε αμοιβαία αλληλεπίδραση με το πείραμα και ο θεωρητικός στοχασμός με τη μαθηματική καταγραφή του με τα οποία διαμορφώθηκε η θεωρία του Καθιερωμένου Προτύπου (Κ.Π.), ενός δηλαδή μαθηματικού μοντέλου που ταξινομεί τα θεμελιώδη σωματίδια και περιγράφει με εξαιρετική επιτυχία τις θεμελιώδεις αλληλεπιδράσεις τους και τα παρατηρούμενα φαινόμενα. Έτσι, π.χ. τα θεμελιώδη σωματίδια-ύλης οργανώθηκαν σε τρεις οικογένειες (ένα βαθύτερο «περιοδικό σύστημα» θεμελιώδους δομής της ύλης). Προβλέφθηκε θεωρητικά και επιβεβαιώθηκε πειραματικά ότι, στην ενεργειακή κλίμακα της τάξης των αρκετών εκατοντάδων GeV ($1 \text{ GeV} = 1 \text{ γίγα ηλεκτρονιοβόλτ} = 10^9 \text{ ηλεκτρονιοβόλτ}^{**}$), η ασθενής πυρηνική δύναμη συγκλίνει («ενοποιείται») με την ηλεκτρομαγνητική σε μία δύναμη, την **ηλεκτρασθενή**, δηλαδή, σε μαθηματική γλώσσα, ότι υπάρχει **συμμετρία** των δύο αυτών θεμελιωδών δυνάμεων.

Τότε, γιατί η συμμετρία αυτή «σπάει» στην ενεργειακή κλίμακα της καθημερινότητάς μας και οι δύο αυτές δυνάμεις διαφοροποιούνται τόσο δραματικά; Αυτό το «**σπάσιμο**» της **συμμετρίας** αλλά ταυτόχρονα και η ερμηνεία **απόκτησης μάζας** από τα θεμελιώδη σωματίδια έχει προταθεί (αλλά δεν έχει αποδειχθεί ακόμα) ότι επιτυγχάνεται με τον λεγόμενο **μηχανισμό Higgs**, από το όνομα του Άγγλου θεωρητικού φυσικού Peter Higgs (Χιγγς). Αυτός και οι ερευνητές Robert Brout και Francois Englert, που ελαφρά προηγήθηκαν από τον Higgs, εισήγαγαν και αξιοποίησαν στην περιοχή των θεμελιωδών αλληλεπιδράσεων, την αξιωματικά προταθείσα ιδέα του Yoichihiro Nambu, (εμπνευσμένη από τη θεωρία της υπεραγωγιμότητας), ότι μια «σπασμένη» συμμετρία γεννάει μάζα.

Η επιτυχία του Κ.Π. είναι ουσιαστικά επιτυχία της λεγόμενης **Κβαντικής Θεωρίας Πεδίου** (ΚΘΠ), δηλαδή του συνδυασμού της Κβαντικής Μηχανικής και της Ειδικής Θεωρίας της Σχετικότητας, που είναι οι δύο πολύ καλά θεμελιωμένες θεωρίες της Σύγχρονης Φυσικής. Πεδία είναι οντότητες που γεμίζουν το χώρο. Τα σωματίδια-ύλης καθώς και τα σωματίδια-δυνάμεις, σύμφωνα με την ΚΘΠ, θεωρούνται ως άμαζα κβάντα των διεγέρσεων των αντίστοιχων πεδίων τους. Αλληλεπίδραση των σωματιδίων μεταξύ τους σημαίνει αλληλεπίδραση των αντίστοιχων πεδίων τους. Εκτός όμως των πεδίων αυτών, το χώρο γεμίζει και το πεδίο Higgs. Η αλληλεπίδραση των πεδίων της ηλεκτρομαγνητικής δύναμης και της ασθενούς πυρηνικής δύναμης με το πεδίο Higgs προκαλούν το παραπάνω «σπάσιμο» της συμμετρίας και αφήνουν τον φορέα της ηλεκτρομαγνητικής δύναμης, το φωτόνιο, χωρίς μάζα, ενώ προσδίνει μάζα στους φορείς της ασθενούς αλληλεπίδρασης, W και Z.

Εκτός αυτού όμως, η αλληλεπίδραση ενός πεδίου σωματιδίου (ύλης ή δυνάμεις) με το πεδίο Higgs προσδίδει μάζα και στο σωματίδιο που είναι το κβάντο αυτού του πεδίου, αρχικά άμαζο. Το **σωματίδιο Higgs** είναι το κβάντο του πεδίου Higgs που ανταλλάσσεται μεταξύ του πεδίου ενός (άμαζου) σωματιδίου και του πεδίου Higgs. Μηχανιστικά, μπορεί να φανταστεί κανείς το πεδίο Higgs σαν μια θάλασσα μελάσσας στο οποίο κινούνται τα διάφορα άμαζα σωματίδια. Ανάλογα με το βαθμό σύζευξης του πεδίου Higgs με το πεδίο κάποιου σωματιδίου (δηλαδή με το πόσο ισχυρή είναι η μεταξύ τους αλληλεπίδραση), το σωματίδιο κινείται ευκολότερα ή δυσκολότερα σε αυτή τη «κολλώδη θάλασσα», αποκτώντας μικρή ή μεγάλη, αντίστοιχα, μάζα.

Λόγω αυτής της ιδιότητάς του να προσδίδει υπόσταση μάζας στα διάφορα θεμελιώδη σωματίδια, το σωματίδιο Higgs προσωνομάστηκε και **god particle**, δηλαδή σωματίδιο-θεός ή κατά μια άλλη απόδοση «σωματίδιο του Θεού» ή «θείκό σωματίδιο».

Το σωματίδιο Higgs είναι το τελευταίο «συστατικό» που χρειάζεται για να ολοκληρωθεί το Κ.Π., γι' αυτό και υπάρχει τεράστιο ενδιαφέρον για την πειραματική επιβεβαίωσή του και επομένως και του μηχανισμού Higgs. Χωρίς το χιγγς το Κ.Π. «δεν δουλεύει»!

Σύμφωνα με το Κ.Π. (χρησιμοποιώντας τις μάζες των θεμελιωδών σωματιδίων W, Z και t) η ενεργειακά ισοδύναμη μάζα m_H του χιγγς πρέπει να είναι μικρότερη από 1000 GeV (1000 GeV = 1 TeV), μια περιοχή που υπερκαλύπτεται από την ενεργειακή περιοχή που θα επιτευχθεί με τον νέο επιταχυντή LHC, και επομένως αναμένεται να ανακαλυφθεί (αν υπάρχει) από τους πολυσύνθετους ανιχνευτές που έχουν εγκατασταθεί σε διάφορα «σημεία» όπου θα συγκρούονται οι δέσμες πρωτονίων του LHC.

Αναζήτηση και «νέας Φυσικής»

Παρά τις θεαματικά ακριβείς επαληθεύσεις των θεωρητικών προβλέψεων του Κ.Π., εντούτοις συν τω χρόνω έχει διαμορφωθεί η αντίληψη ότι το Κ.Π. δεν μπορεί να αποτελεί την τελική θεωρία. Από μια τέτοια θεωρία θα περίμενε κανείς π.χ. ότι οι μάζες των θεμελιωδών σωματιδίων προκύπτουν από κάποια βασική αρχή και όχι, όπως συμβαίνει, να αποτελούν, μαζί με άλλα δεδομένα, 18 παραμέτρους που προσδιορίζονται πειραματικά και μπαίνουν «με το χέρι» στη θεωρία, αντί να προβλέπονται από αυτή.

Ο σπουδαιότερος από τους άλλους λόγους που προβάλλονται για τη μερικότητα του Κ.Π. είναι το ίδιο το πεδίο Higgs (!), επειδή αυτό αλληλεπιδρά και με τον εαυτό του. Δηλαδή, όχι μόνο τα γνωστά μας σωματίδια, αλλά και το σωματίδιο Higgs αλληλεπιδρά με το πεδίο Higgs. Η Κβαντική Θεωρία Πεδίου προβλέπει διορθώσεις στη μάζα m_H του σωματιδίου Higgs, που την εκτινάσσουν στην περιοχή της λεγόμενης μάζας Planck, δηλ. στα 10^{19} GeV, που είναι τρομακτικά διαφορετική από τα 114 – 182 GeV, που προβλέπει ο συνδυασμός σημαντικών πειραματικών δεδομένων. Αυτή η δραματική απόκλιση αποτελεί μια έκφανση αυτού που αποκαλείται «το πρόβλημα της ιεραρχίας» (των μαζών και των ενεργειακών κλιμάκων). Αυτό σημαίνει είτε ότι το χιγγς δεν υπάρχει και ότι υπάρχει κάτι άλλο στην ενεργειακή κλίμακα των TeV που θα ανακαλύψει ο νέος επιταχυντής LHC, είτε ότι υπάρχουν άλλα άγνωστα φαινόμενα που χαμηλώνουν πολύ τη μάζα m_H . Δύο είναι τα επικρατέστερα θεωρητικά σχήματα «**πέρα από το Κ.Π.**» ή «**νέας Φυσικής**», όπως συλλογικά ονομάζονται, που έχουν προταθεί για να λύσουν το «πρόβλημα της ιεραρχίας»:

α) Η **υπόθεση της υπερ-συμμετρίας** εντάσσει όλα τα σωματίδια (ύλης και δυνάμεων) σε μια ανώτερη μαθηματική συμμετρία, με συνέπεια την πρόβλεψη πλειάδας νέων πολύ βαρύνων σωματιδίων, που αποτελούν υπερσυμμετρικούς συντρόφους των γνωστών μας σωματιδίων. Οι αλληλεπιδράσεις με αυτά τα υπερ-σωματίδια απαλείφουν ακριβώς τις αλληλεπιδράσεις με τη συνήθη ύλη (που εκσφενδόνιζαν στα ύψη την m_H). Επιπλέον, το ελαφροτερο από αυτά τα υπερ-σωματίδια (LSP), **το νιουτραλίνο**, αν υπάρχει, θα μπορούσε να συνιστά τη μυστηριώδη λεγόμενη «**αόρατη ή σκοτεινή ύλη**». Αυτή έχει πρόσφατα επιβεβαιωθεί ότι αποτελεί το 23% της ισοδύναμης ενέργειας του Σύμπαντος και αλληλεπιδρά μόνο με τη βαρύτητα (π.χ. δεν εκπέμπει ηλεκτρομαγνητικά κύματα-φως), ενώ η γνωστή μας «ορατή» ύλη αποτελεί μόνο το 4% ! Η υπόθεση της

υπερσυμμετρίας προβλέπει επίσης την ύπαρξη περισσότερων από ένα χιγγς και είτε θα ανακαλυφθεί με τα πειράματα του LHC, είτε θα απορριφθεί πλήρως από αυτά.

β) **Η υπόθεση των επιπλέον χωρικών διαστάσεων.** Μια άλλη επαναστατική ιδέα προτείνει την ύπαρξη μιάς ή περισσότερων άλλων πολύ μικρών χωρικών διαστάσεων στις οποίες «εισδύει» μεγάλο μέρος της βαρυτικής αλληλεπίδρασης, με αποτέλεσμα στο γνωστό τρισδιάστατο χώρο μας αυτή να δρα πολύ ασθενέστερα. Αυτές οι επιπλέον διαστάσεις είναι τόσο «κουλουριασμένες» (με διάμετρο μικρότερο από 100 εκατομμυριοστά του μέτρου), ώστε δεν έχει γίνει δυνατόν να διαπιστωθούν μέχρι σήμερα. (Μπορούμε να φανταστούμε την εξής αναλογία: αν παρατηρήσουμε ένα μακρύ και λεπτό τεντωμένο καλώδιο σε μεγάλη απόσταση, χάνουμε την αίσθηση του πάχους και νομίζουμε ότι έχει μόνο μία διάσταση, αυτή του μήκους.) Αν λοιπόν, η βαρύτητα είναι πολύ ισχυρότερη, αυτό συνεπάγεται θεωρητικά πολύ μικρότερη μάζα Planck, και συνεπώς πολύ μικρότερη μάζα για το σωματίδιο χιγγς, οπότε λύνεται «το πρόβλημα της ιεραρχίας». Οι συγκρούσεις των πρωτονίων του LHC θα μπορούσαν να διεγείρουν το βαρυτικό πεδίο των επιπλέον διαστάσεων δημιουργώντας νέα σωματίδια, παρατηρήσιμα από τους ανιχνευτές που είναι εγκατεστημένοι στη σήραγγα του LHC.



Φωτογραφία της περιοχής κάτω από την οποία υπάρχει η σήραγγα του LHC. Στο βάθος διακρίνονται η λίμνη της Γενεύης και τμήμα των Άλπεων

Ο Μεγάλος Επιταχυντής Αδρονίων, LHC

Τις ιδιότητες των θεμελιωδών σωματιδίων και των αλληλεπιδράσεών τους συνήθως μελετάμε με **πειράματα σκέδασης**. Σε αυτά χρησιμοποιούνται **δέσμες σωματιδίων** (π.χ. ηλεκτρονίων ή πρωτονίων) μεγάλης ενέργειας τα οποία χτυπούν κάποιο στόχο, που είτε είναι σταθερός, ή είναι τα σωματίδια μιάς άλλης, αντίθετα κινούμενης δέσμης, με τα οποία μπορεί να αλληλεπιδράσουν. Τα συγκρουόμενα

σωματίδια πρέπει να έχουν σχετικά **πολύ μεγάλη ενέργεια**, προκειμένου να διειδύσουν βαθειά, ώστε να αλληλεπιδράσουν μεταξύ τους τα συστατικά τους (δηλαδή τα θεμελιώδη σωματίδια) από τα οποία μπορεί να αποτελούνται. Κατά τις αλληλεπιδράσεις αυτές, τα συγκρουόμενα σωματίδια συχνά μετασχηματίζονται και η ενέργειά τους διατίθεται για την παραγωγή πολλών άλλων κινούμενων γνωστών ή αγνώστων ή αναζητούμενων σωματιδίων (μετατροπή ενέργειας E σε μάζα m , σύμφωνα με την περίφημη σχέση ισοδυναμίας μάζας – ενέργειας του Einstein, $E = mc^2$, όπου c είναι η ταχύτητα του φωτός).

Τη μεγάλη ενέργειά τους τα φορτισμένα σωματίδια μιάς δέσμης την αποκτούν με πολύπλοκες και πανάκριβες ηλεκτρομαγνητικές διατάξεις που ονομάζονται **επιταχυντές σωματιδίων** και υπάρχουν σε ελάχιστα Εργαστήρια στον κόσμο, ένα από τα οποία είναι και το Ευρωπαϊκό Εργαστήριο Σωματιδιακής Φυσικής, CERN. Πραγματοποιούνται, όμως, και σπουδαία πειράματα όπου τα σωματίδια-βλήματα (π.χ. νετρίνα) μας έρχονται κατευθείαν από τον «ουρανό» ως κοσμική ακτινοβολία. Τα σωματίδια που παράγονται στα πειράματα σκέδασης που αναφέρθηκαν παραπάνω, «παρατηρούνται» με σύνθετες διατάξεις που ονομάζονται **ανιχνευτές** και εγκαθίστανται γύρω από το «σημείο» σύγκρουσης της δέσμης με το στόχο, ή των δύο συγκρουόμενων δεσμών.

Ο νέος επιταχυντής πρωτονίων ή ατομικών πυρήνων **Large Hadron Collider** (LHC, Μεγάλος Επιταχυντής Συγκρουομένων δεσμών Αδρονίων) «συναρμολογήθηκε» στο ίδιο υπόγειο κυκλικό τούνελ μήκους 27 χιλιομέτρων, όπου είχε λειτουργήσει τη δεκαετία (και πλέον) του 90 ο άλλος μεγάλος επιταχυντής LEP (Large Electron Positron) συγκρουομένων δεσμών ηλεκτρονίων και αντιηλεκτρονίων. Σε αυτό το τούνελ παρατάχθηκαν με εξαιρετική ευθυγράμμιση συνολικά περισσότεροι από 2000 πολύ ισχυροί υπεραγωγάσιμοι μαγνήτες και πάμπολλοι άλλοι. Αυτοί θα κάμπτουν ή θα εστιάζουν δύο αντίθετα κινούμενες σειρές εξαιρετικά πυκνών «πακέτων» πρωτονίων (σε ξεχωριστούς αερόκενους σωλήνες), κρατώντας τα επί ώρες σε λεπτές κυκλικές τροχιές, καθώς αυτά θα κινούνται σχεδόν με το 99,9999% της ταχύτητα του φωτός. Τα πρωτόνια των «πακέτων» θα έχουν σταδιακά προηγουμένως επιταχυνθεί και σε μιά σειρά άλλων (παλαιότερων) επιταχυντών. Αφού τελικά αποκτήσουν ενέργεια 7 TeV το καθένα ($1 \text{ TeV} = 10^{12} \text{ eV}$, δηλαδή ένα τρισεκατομμύριο ηλεκτρονιοβόλτ**), τα πρωτόνια θα οδηγούνται επανειλημμένα σε σύγκρουση στη θέση των μεγάλων ανιχνευτικών πειραματικών διατάξεων.



Δύο στάδια από τη συναρμολόγηση του επιταχυντή LHC

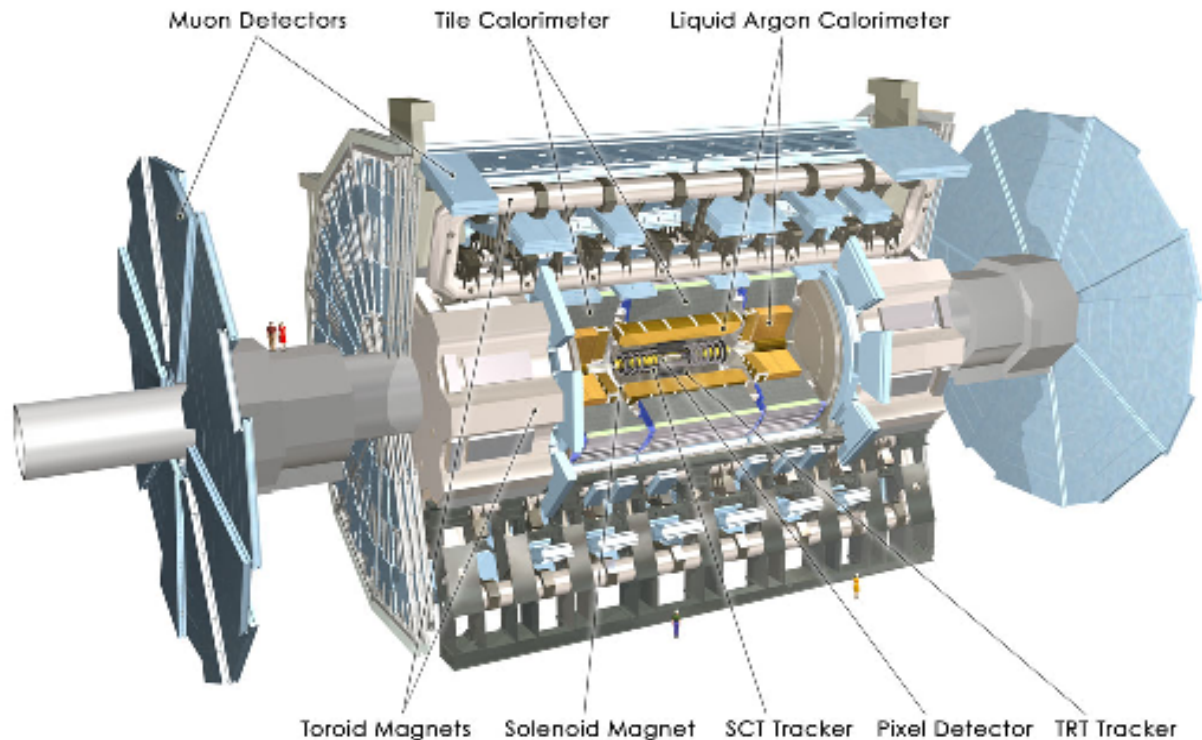
Προγραμματίζεται ο LHC να είναι καθόλα έτοιμος το φθινόπωρο του 2008, για να δοκιμαστεί η εισαγωγή και κυκλοφορία δεσμών πρωτονίων με χαμηλότερη ενέργεια (0,450 TeV, όπως βγαίνουν από άλλο επιταχυντή που προηγείται) και πολύ χαμηλότερη πυκνότητα από την επιδιωκόμενη***. Στη συνέχεια με σταδιακές αυξήσεις της ενέργειας των πρωτονίων από τον LHC (και της πυκνότητάς τους στα πακέτα και του αριθμού των πακέτων) η πολυ-επιταχυντική διάταξη προγραμματίζεται να δώσει την άνοιξη του 2009 την επιδιωκόμενη συνολική ενέργεια των $7 + 7 = 14$ TeV για κάθε ζεύγος συγκρουομένων πρωτονίων. Ο LHC θεωρείται το μεγαλύτερο τεχνολογικό επίτευγμα της εποχής μας. Στις φωτογραφίες φαίνεται ένα μικρό τμήμα του κατά τη συναρμολόγησή του.

Τα πειράματα στον επιταχυντή LHC του CERN και οι στόχοι τους

Το **ATLAS** είναι ένα πολυετές πείραμα με την ομώνυμη πολυσύνθετη ανιχνευτική διάταξη ATLAS (ακρωνύμιο της φράσης A Toroidal Lhc ApparatuS = Μία τοροειδής διάταξη στο LHC) η οποία συναρμολογήθηκε 100 μέτρα κάτω από την επιφάνεια της Γης στο CERN. Στη θέση αυτή του ανιχνευτή θα συγκρούονται επανειλημμένα οι δύο αντίθετα κινούμενες δέσμες πρωτονίων του επιταχυντή LHC. Τα διάφορα τμήματα του ανιχνευτή θα ανιχνεύουν πολλά από τα σωματίδια που παράγονται κατά τις αλληλεπιδράσεις των συγκρουομένων πρωτονίων, και από τις μετρήσεις τους θα είναι δυνατόν να συναχθούν η διεύθυνση κίνησής τους αμέσως μετά την παραγωγή τους, η ενέργειά τους (ή η ορμή τους) και πιθανόν η ταυτότητά τους. Ένα ανάλογο «παντός σκοπού» πείραμα και ανιχνευτής που ετοιμάστηκε παράλληλα, σε άλλο σημείο σύγκρουσης των δεσμών πρωτονίων, είναι το **CMS** (Central Muon Solenoid), με παρόμοιους επιστημονικούς στόχους. Η παράλληλη λειτουργία τουλάχιστον δύο πειραμάτων είναι απαραίτητη για την επιβεβαίωση (ή μή) των αναμενομένων (ή μή) σπουδαίων νέων φαινομένων και ανακαλύψεων. Επίσης, ετοιμάστηκαν δύο ακόμη πολυσύνθετοι ανιχνευτές μεγάλης κλίμακας αλλά ειδικότερων επιδιώξεων, το **ALICE** και το **LHCb**, σε άλλα σημεία σύγκρουσης, και το μικρής κλίμακας **TOTEM** στη γειτονιά του CMS.

Το πείραμα ATLAS είναι αποτέλεσμα εξαιρετικά οργανωμένης, διανεμημένης και συντονισμένης Διεθνούς Συνεργασίας επιστημόνων και μηχανικών, που ξεκίνησε το 1992 και τώρα αριθμεί περί τους 1850 από 175 Πανεπιστημιακά Ιδρύματα σε 34 χώρες, μεταξύ των οποίων το Εθνικό-Καποδιστριακό της Αθήνας, το Αριστοτέλειο της Θεσσαλονίκης και το Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο. Ανάλογο διεθνές πλήθος ερευνητών και μηχανικών με συμμετοχή και από άλλα Ελληνικά Πανεπιστήμια και τον «Δημόκριτο» ετοιμάζουν πυρετωδώς και τα άλλα μεγάλα πειράματα που αναφέρθηκαν.

Παρακάτω παρατίθεται ενδεικτικά ένα σχήμα για έναν από τους ανιχνευτές



Το σχήμα δείχνει τμήμα του συναρμολογημένου ανιχνευτή ATLAS. Στον άξονα αριστερά και κάτω μπροστά, ίσως διακρίνονται δύο ανθρώπινες φιγούρες.

A) Εσωτερικός ανιχνευτής (με διάφορες συνιστώσες SCT Tracker, Pixel Detector, TRT Tracker) με τα σήματα από τον οποίο θα μπορούν να ανακατασκευάζονται οι τροχιές των φορτισμένων σωματιδίων, που θα παράγονται κατά τις αλληλεπιδράσεις των συγκρουομένων πρωτονίων.

B) Τα καλορίμετρα (Calorimeters): Το ηλεκτρομαγνητικό (Liquid Argon) και το αδρονικό (Tile) για την ανίχνευση και μέτρηση, αντίστοιχα, της ενέργειας και διεύθυνσης των ενεργητικών φωτονίων και ηλεκτρονίων, ή των αδρονίων (πρωτονίων, νετρονίων, πιονίων, κλπ).

Γ) Οι ανιχνευτές μιονίων (Muon Detectors: «κουτάκια» στο «βαρέλι» ή τομείς στις κυκλικές βάσεις.) Τα μόνια μιάζουν με τα ηλεκτρόνια αλλά είναι 200 φορές βαρύτερα. Τα ενεργητικά μόνια διαπερνούν όλους τους περιεχόμενους ανιχνευτές και αφήνουν ομάδα σημάτων στις στρώσεις των ανιχνευτικών σωλήνων που συγκροτούν τους ανιχνευτές μιονίων.

Δ) Το σύστημα των μαγνητών καμπυλώνει τις τροχιές των φορτισμένων σωματιδίων για τη μέτρηση της ορμής τους. Αποτελείται από τρία συστήματα υπεραγωγίων μαγνητών: 1) τον κεντρικό σωληνοειδή μαγνήτη (Solenoid Magnet), 2) τα οκτώ γιγάντια ορθογώνια-τοροειδή πηνία (διακρίνεται ένα ψηλά, σχεδόν κατακόρυφο) και 3) τους τοροειδείς μαγνήτες στις βάσεις (Toroid Magnets).

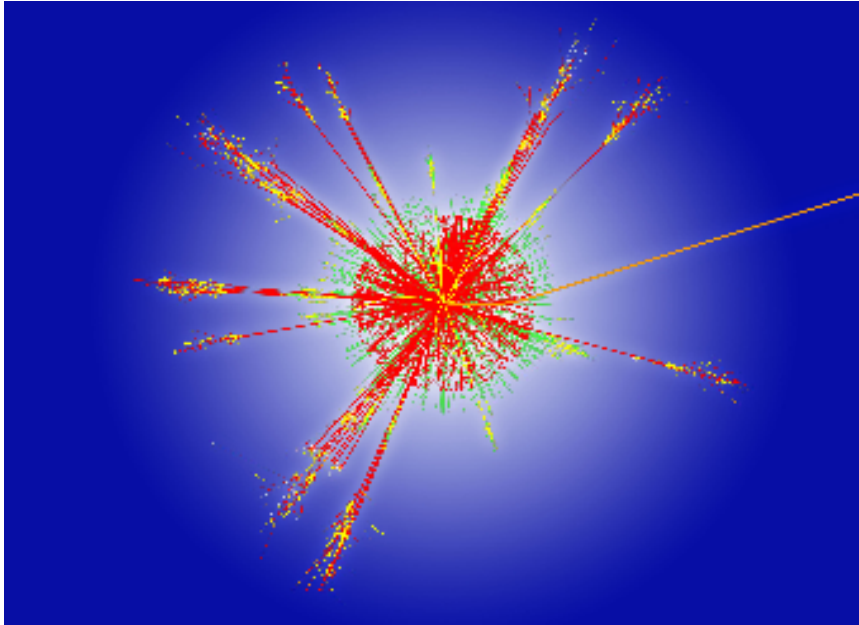
E) Συστήματα «σκανδαλισμού», λήψης ηλεκτρονικών δεδομένων και ταχείας ανάλυσης

Μερικοί από τους στόχους των πειραμάτων με τον LHC

- Επιβεβαίωση ή ακριβέστερες μετρήσεις ιδιοτήτων γνωστών αντικειμένων για μεγάλης ακριβείας έλεγχο του Καθιερωμένου Προτύπου (δηλ. του βασικού πλαισίου γνώσης) της Σωματιδιακής Φυσικής.
- Η ανακάλυψη του πολυσυζητημένου σωματιδίου higgs (χιγγς), που υποτίθεται ότι προσδίδει μάζα σε όλα τα θεμελιώδη σωματίδια, όταν τα πεδία τους αλληλεπιδρούν με το πεδίο του σωματιδίου χιγγς. Σε αυτό αποδίδεται και η μεγάλη διαφορετικότητα των ηλεκτρομαγνητικών αλληλεπιδράσεων από τις ασθενείς, που παρατηρείται στη φύση στη «χαμηλή» ενεργειακή κλίμακα της καθημερινότητας (δηλαδή, το σπάσιμο της μεταξύ τους συμμετρίας, όπως λέγεται. Η σχέση και η σύγκλιση (ενοποίηση) μεταξύ αυτών των δύο δυνάμεων έχει εντυπωσιακά επιβεβαιωθεί σε ενέργειες πολύ ψηλότερες από τις συνηθισμένες). Ο ανιχνευτής ATLAS είναι ευαίσθητος σε όλη την περιοχή ενδεχομένων μαζών και τρόπων διάσπασης του χιγγς (αν υπάρχει).
- Αναζήτηση άλλων σωματιδίων που προβλέπονται από διάφορες θεωρίες, όπως η υπερσυμμετρία, ή βαρύτερες εκδόσεις των θεμελιωδών μποζονίων-φορέων της ασθενούς αλληλεπίδρασης, W και Z.
- Ακριβείς μετρήσεις των θεμελιωδών σωματιδίων W και του σχετικά (και παράξενα) εξαιρετικά βαρπού έκτου κουάρκ t (τοπ), που ανακαλύφθηκαν το 1983 και 1995, αντίστοιχα.
- Ακριβείς μετρήσεις της παραβίασης της συνδυασμένης συμμετρίας φορτίου-ομοτιμίας, CP, που ευθύνεται για την παρατηρούμενη ποσοτική ασυμμετρία ύλης και αντιύλης στο Σύμπαν
- Ενδεχόμενη ανακάλυψη περισσότερων χωρικών (μικρών) διαστάσεων, πέραν των γνωστών τριών διαστάσεων του χώρου στον οποίο κινούμαστε καθημερινά.
- Αναζήτηση χαρακτηριστικών σημάτων, αν τα κουάρκ και τα λεπτόνια, όπως το ηλεκτρόνιο, δεν είναι πραγματικά θεμελιώδη σωματίδια, αλλά αποτελούνται από άλλα θεμελιωδέστερα σωματίδια.
- Διάφορες άλλες σημαντικές αναζητήσεις.

Ανάλυση για την επίτευξη των παραπάνω στόχων

Με τις κυκλοφορούσες επανειλημμένα συγκρουόμενες δέσμες πρωτονίων θα παράγονται 4×10^7 (δηλ. 40 000 000) γεγονότα-αντιδράσεις ανά δευτερόλεπτο. Το σύστημα «σκανδαλισμού» θα ενεργοποιεί τη λήψη δεδομένων του ανιχνευτή (δηλ. την «ανάγνωση» των σημάτων που θα έχουν παραχθεί στους επιμέρους ανιχνευτές από τη διέλευση των διαφόρων σωματιδίων) για επιλεγμένα γεγονότα. Υπάρχουν τρία επίπεδα επιλογής και ταχείας ανάλυσης, ξεκινώντας από 10^5 (δηλ. 100 000) γεγονότα/δευτερόλεπτο (και αποθηκεύοντας για ακριβέστερη ανάλυση μόνο μερικές εκατοντάδες ανά δευτερόλεπτο από αυτά). Χρειάζεται για το τελευταίο στάδιο αποθηκευτικός χώρος 15×10^{15} byte/έτος (15 εκατομμύρια CD/έτος !). Σημαντικό ρόλο στην περαιτέρω διανομή και ανάλυση των δεδομένων για την ανάδειξη των ποθητών (ή μή) σημάτων θα παίξει το Grid Computing (διεθνές σύστημα συνεργασίας μοιράσματος αποθηκευτικού χώρου και υπολογιστικής ισχύος).



Το σχήμα δείχνει τις τροχιές ενός προσομοιωμένου γεγονότος

Μέσα από αυτόν τον «αχυρώνα» αποθηκευμένων δεδομένων πρέπει να ψάξει εξαντλητικά κανείς για να βρεί μια «χρυσή βελόνα», π.χ. γεγονότα με την «υπογραφή» του σωματιδίου χιγγς, απορρίπτοντας με αποτελεσματικές τομές-κριτήρια τα γεγονότα υποβάθρου που προέρχονται από γνωστές διαδικασίες του Καθιερωμένου Προτύπου. Τα κριτήρια αυτά έχουν μελετηθεί και μελετώνται με τη βοήθεια προσομοιώσεων Monte Carlo των διαφόρων φυσικών διαδικασιών που περιμένουμε, είτε επειδή γνωρίζουμε ότι συμβαίνουν, ή υποθέτουμε ότι θα πρέπει ή μπορεί να συμβαίνουν σε αυτή τη ανεξερεύνητη περιοχή ενέργειας. Οι προσομοιώσεις αυτές περιλαμβάνουν και τη λεπτομερή απόκριση των διαφόρων τμημάτων του ανιχνευτή στα σωματίδια που παράγονται από τις συγκρούσεις δύο πρωτονίων, που μπορεί να είναι και 1000 ! Τα προσομοιωμένα δεδομένα του ανιχνευτή εισάγονται μετά στα ίδια προγράμματα ανακατασκευής των τροχιών των σωματιδίων που θα χρησιμοποιηθούν και για τα πραγματικά δεδομένα, και παράγονται περιληπτικές δομές πληροφορίας για κάθε γεγονός. Στη βάση δεδομένων π.χ του ανιχνευτή ATLAS υπάρχουν προσομοιώσεις που αντιστοιχούν σε 600 διαφορετικά σενάρια.

Στη συνέχεια επινοούνται διάφορες κατανομές φυσικών ποσοτήτων και εφαρμόζονται στατιστικές μέθοδοι για την ελαχιστοποίηση του υποβάθρου («θορύβου»), την ανάδειξη και την εκτίμηση της γνησιότητας ή μή του «ποθητού ευρήματος» (δηλαδή ότι δεν είναι μια τυχαία διακύμανση το απομονωθέν «σήμα», αλλά το πραγματικό «ον» που συμπεριελήφθη αρχικά στην προσομοίωση, έστω και αριθμητικά μειωμένο λόγω της διαδικασίας επιλογής!).

Η διαδικασία αυτή ανακατασκευής των τροχιών, αναγωγής των δεδομένων και εφαρμογής των (γνωστών πλέον) κριτηρίων και κατανομών επιλογής θα εφαρμοστεί ακριβώς και στα πραγματικά δεδομένα που θα πάρει ο ανιχνευτής. Είναι πολύ πιθανόν, όμως, να ανακαλυφθεί «νέα φυσική», όπως λέγεται, δηλαδή που να μην εξηγείται απο το Καθιερωμένο Πρότυπο, αλλά να μην είμαστε βέβαιοι τί είναι αυτό το καινούργιο «ον» !

Για ποιό σκοπό όλη αυτή η ηράκλεια προσπάθεια;

Οι περισσότεροι φυσικοί πιστεύουν ότι κάτω από την πολυπλοκότητα του θέματός τους βρίσκεται μια κοινή και ισχυρή ενότητα και ότι μπορεί να επιτευχθεί πρόοδος επισημαίνοντας τα μαθηματικά με τα οποία μπορούμε να κάνουμε μοντέλα για να περιγράψουμε την ποικιλία και πολυπλοκότητα του Σύμπαντος που προκύπτει από αυτή την υποκείμενη απλότητα. Όλα δείχνουν, παρά τις θεωρητικές δυσκολίες κατανόησης και περιγραφής, ότι υπάρχει ενότητα μάλλον και όχι αυθαιρεσία και τυφλή τυχαιότητα. Γιατί άραγε κατανοούμε όλο και βαθύτερα, όλο και πληρέστερα; Είναι τυχαία η δυνατότητά μας αυτή;

Άραγε ο άνθρωπος θα απορροφηθεί και πάλι μόνο από τα νέα επιτεύγματά του, τις εφαρμογές τους και τα νέα ερωτήματα που θα προκύψουν; Ή, παράλληλα, θα μπορέσει να διακρίνει τον Θεό, Δημιουργό του Κόσμου, μέσα και στις εξαιρετικές δυνατότητες με τις οποίες έχει προικιστεί από Αυτόν, μέχρι και να κατανοεί το Σύμπαν ολόένα περισσότερο στις λεπτομέρειές του; Θα αισθανθεί ευγνωμοσύνη, θαυμασμό, ταπείνωση και εμπιστοσύνη στην Πρόνοιά Του και θα αναζητήσει το πρόσωπό Του;

Ηλίας Κ. Κατσούφης

Αναπλ. Καθηγητής, Τομέας Φυσικής, Ε.Μ.Π.
Περιοδικό «Ανάπλασις», Ιούλιος-Αύγουστος 2008

* 10^N συμβολίζει το 1 ακολουθούμενο από N μηδενικά. Έτσι, 10^3 σημαίνει 1000.

10^{-3} συμβολίζει το 1/1000, δηλαδή το 1 διαιρεμένο με τον αριθμό 10^3 .

Τα φωτόνια είναι «πακετάκια» ενέργειας της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, όπως είναι π.χ. το ορατό φως. Τα φωτόνια, που ερεθίζουν τον αμφιβληστροειδή των ματιών μας και βλέπουμε, έχουν ενέργεια περίπου μόνο **ένα ηλεκτρονιοβόλτ.

***Τη στιγμή εκτύπωσης του τεύχους αυτού, το πρώτο αυτό στάδιο λειτουργίας έχει επιτευχθεί (10 Σεπτεμβρίου) και πανηγυρίστηκε διεθνώς, επισκιάζοντας προσωρινά πολλά σοβαρά προβλήματα της ανθρωπότητας.

Αναφορές: Από τις αναρίθμητες πηγές και αναφορές, αναφέρονται ελάχιστες:

Διαδίκτυο: www.cern.ch, www.fnal.gov

Cern Courier, όλα τα τεύχη του περιοδικού

Physics World, τεύχος October 2006, ειδικό αφιέρωμα

Φυσικός Κόσμος: διάφορα σχετικά πρόσφατα τεύχη του περιοδικού της Ένωσης
Ελλήνων Φυσικών

Περιοδικό «Τόλμη», Δεκέμβριος 2006

Paul Davies: “The Mind of God”, Penguin Books 1993

J. Polkinghorne: “Belief in God in an Age of Science”, Yale University Press, 1998