

Οι κρυμμένες συμμετρίες της Φύσης κι ο κύριος Χιγκς! | In Memoriam...

 klik.gr/2024/04/16/oi-krymmenes-symmetries-tis-fysis-ki-o-kyrios-chigks-in-memoriam/

Κώστας Παπαχρήστου

April 16, 2024



Πίσω από τις αλληλεπιδράσεις που παρατηρούνται στη Φύση κρύβονται υπέροχες μαθηματικές συμμετρίες. Και απαιτείται μία γενναία δόση ενέργειας – και η ιδιοφυΐα του κυρίου Χιγκς, που «έφυγε» πρόσφατα – για να γίνουν «ορατές»!

Ένα από τα θέματα που κυριάρχησαν στην επιστημονική επικαιρότητα πριν μερικά χρόνια ήταν τα πειράματα που έλαβαν χώρα στο ερευνητικό κέντρο του *CERN* στη Γενεύη. Σκοπός τους, ανάμεσα στα άλλα, ήταν η πειραματική επιβεβαίωση της ύπαρξης ενός μυστηριώδους σωματίου που, σε επίπεδο θεωρίας τουλάχιστον, αποτελεί θεμελιώδες συστατικό του μοντέλου που πιστεύουμε πως περιγράφει τα δομικά στοιχεία της ύλης και τις μεταξύ τους αλληλεπιδράσεις. Το **μποζόνιο Higgs** (το κβάντο του **πεδίου Higgs**) αποτέλεσε το μεγάλο στοίχημα των ερευνών, και η τελική επαλήθευση της ύπαρξής του το 2013 υπήρξε ένας από τους μεγαλύτερους θριάμβους της φυσικής επιστήμης τις πρώτες δεκαετίες αυτού του αιώνα.

Τι το σημαντικό, όμως, υποκρύπτει η εύρεση αυτού του «σωματίου-φαντομά», ώστε να δικαιολογεί μία δαπάνη αρκετών δισεκατομμυρίων δολαρίων που απαιτήθηκαν για το «κυνήγι» του, και μάλιστα σε εποχές παγκόσμιας οικονομικής κρίσης; Τίποτα περισσότερο ή τίποτα λιγότερο, ίσως, από έναν βαθύ αναστεναγμό ανακούφισης των Φυσικών. Εκείνων, τουλάχιστον, που δεν περίμεναν εναγωνίως την κατάρρευση του καθιερωμένου θεωρητικού μοντέλου στη Φυσική υψηλών ενεργειών, ώστε να τους δοθεί η ιστορική ευκαιρία να χτίσουν τη θεωρία από την αρχή!

Το κείμενο που ακολουθεί αφιερώνεται στη μνήμη του σπουδαίου – αλλά και σεμνού – επιστήμονα **Peter Higgs** (1929 – 2024) που «έφυγε» πρόσφατα. Είναι μία απόπειρα να εξηγήσουμε, με όσο πιο απλά λόγια γίνεται, τους λόγους για τους οποίους το σωματίο του Higgs είναι τόσο σημαντικό συστατικό των σύγχρονων φυσικών θεωριών που προσπαθούν να «ξεκλειδώσουν» τα μυστικά του κόσμου που μας περιβάλλει. Και, επειδή η ύλη που παρατηρούμε αποτελείται, σε θεμελιώδες επίπεδο, από **στοιχειώδη σωματίια** (όπως, π.χ., το γνώριμο σε όλους ηλεκτρόνιο, καθώς και άλλα που «κατοικούν» στον πυρήνα του ατόμου), ξεκινούμε την αφήγησή μας εξετάζοντας τους τρόπους που τα σωματίια αυτά αλληλεπιδρούν.

Η κρυμμένη απλότητα της Φύσης

Με βάση τη φαινομενολογία που μας προσφέρει ο κόσμος των χαμηλών ενεργειών στον οποίο ζούμε, μπορούμε να διακρίνουμε τέσσερα είδη **δυνάμεων** (ή **αλληλεπιδράσεων**) μεταξύ των στοιχειωδών σωματίων της ύλης:

(1) Τις **δυνάμεις βαρύτητας** (στις οποίες οφείλεται το βάρος των σωμάτων, αλλά και η καθορισμένη κίνηση της Γης γύρω από τον Ήλιο).

(2) Τις **ηλεκτρομαγνητικές δυνάμεις** (τέτοια είναι, π.χ., η τριβή ανάμεσα στις δύο παλάμες μας όταν σύρουμε τη μία πάνω στην άλλη).

(3) Τις **ισχυρές δυνάμεις** (χάρη στις οποίες διατηρεί την συνεκτικότητά του ο πυρήνας ενός ατόμου).

(4) Τις **ασθενείς δυνάμεις** (ευθύνονται για μία σειρά διεργασιών που λαμβάνουν χώρα στον ατομικό πυρήνα).

Υπάρχουν ενδείξεις, όμως, ότι η Φύση είναι στην πραγματικότητα πολύ πιο απλή απ' όσο φαίνεται! Για παράδειγμα, πριν από την συστηματική θεωρητική διατύπωση των νόμων του ηλεκτρομαγνητισμού από τον **James Clerk Maxwell** (1831-1879), ο ηλεκτρισμός και ο μαγνητισμός αντιμετωπιζόνταν σαν δύο ξεχωριστά και ανεξάρτητα φυσικά φαινόμενα. Αυτό ενισχύθηκε και από την προφανή διαφορετικότητα ανάμεσα στις ιδιότητες των ηλεκτρικών και των μαγνητικών δυνάμεων.

Με τις περίπλοκες μαθηματικές εξισώσεις του, ο Maxwell περιέγραψε το ηλεκτρικό και το μαγνητικό πεδίο σαν «δύο όψεις του ίδιου νομίσματος», αφού το ένα μπορεί να «μεταμορφώνεται» (να μετασχηματίζεται) στο άλλο, ανάλογα με τον τρόπο που τα παρατηρούμε (αυτή ήταν και η αφετηρία της σκέψης του **Einstein** όταν πρότεινε την *Ειδική Θεωρία της Σχετικότητας*). Έτσι, αντί για δύο ξεχωριστά πεδία, ηλεκτρικό και μαγνητικό, μιλάμε για ένα ενιαίο **ηλεκτρομαγνητικό πεδίο**.

Είναι ενδιαφέρον εδώ να παρατηρήσουμε πως, σε ό,τι αφορά τη σχετική ισχύ τους, η ηλεκτρική και η μαγνητική δύναμη αρχίζουν να γίνονται ισοδύναμες μεταξύ τους στο όριο των υψηλών ταχυτήτων (άρα υψηλών ενεργειών) των ηλεκτρικών φορτίων που

αλληλεπιδρούν. Αυτή είναι μία πρώτη ένδειξη πως **η απλότητα της Φύσης αποκαλύπτεται υπό την προϋπόθεση ότι για την πειραματική παρατήρησή της διατίθεται η κατάλληλη ενέργεια!**

Ένα από τα μεγαλύτερα επιτεύγματα της φυσικής επιστήμης κατά τον εικοστό αιώνα ήταν η ανακάλυψη ότι, με παρόμοιο τρόπο, η ηλεκτρομαγνητική και η ασθενής αλληλεπίδραση επίσης αποτελούν δύο όψεις (δύο εκφάνσεις) μίας ενιαίας δύναμης, της **ηλεκτρασθενούς**. Ανοιχτή παραμένει η φιλοδοξία της εύρεσης μιας ακόμα μεγαλύτερης ενοποίησης που να περιλαμβάνει στο σχήμα και την **ισχυρή** αλληλεπίδραση (η βαρύτητα είναι μια άλλη, «πονεμένη» ιστορία, αφού, σε αντίθεση με τις υπόλοιπες δυνάμεις, δεν δείχνει να υποτάσσεται εύκολα στους κανόνες της Κβαντικής Φυσικής...).

Το πρόβλημα είναι πως, όπως αναφέραμε πιο πάνω, όσο πιο απλή εμφανίζεται η Φύση μέσα από αυτά τα διαδοχικά στάδια ενοποίησης, τόσο πιο ακριβό «εισιτήριο» καλείται να πληρώσει ο θεατής που θα γίνει μάρτυρας αυτής της απλότητας. Και, το εισιτήριο αυτό λέγεται **ενέργεια!** Δηλαδή, η υποτιθέμενη απλότητα της Φύσης μπορεί να αποκαλυφθεί μόνο μέσα από πειράματα πολύ υψηλών ενεργειών. Και, όσο μεγαλύτερος είναι ο βαθμός απλότητας που θέλουμε να αναδείξουμε, τόσο περισσότερη ενέργεια απαιτείται. Αυτό εξηγεί, άλλωστε, γιατί δαπανώνται τεράστια ποσά για την κατασκευή όλο και μεγαλύτερων επιταχυντών στοιχειωδών σωματίων, όπως ο **Large Hadron Collider** (LHC) στο CERN στη Γενεύη.

Η άλλη πλευρά του λόφου

Ένα απλό παράδειγμα ίσως μας βοηθήσει να κατανοήσουμε καλύτερα αυτά που αναφέρθηκαν πιο πάνω. Φανταστείτε ότι κατοικείτε στους πρόποδες ενός λόφου που βρίσκεται στο μέσο μιας πόλης, της οποίας τα σπίτια είναι όμοια μεταξύ τους και ομοιόμορφα κατανομημένα γύρω από τον λόφο. Από το σημείο που βρίσκεστε μπορείτε να βλέπετε μόνο ένα μέρος της πόλης, αφού ο λόφος σάς κρύβει την άλλη πλευρά της. Έτσι, για εσάς υπάρχει η «δική σας» γειτονιά και η «άλλη», στην αντίθετη πλευρά του λόφου. Η αντίληψή σας για την πόλη, απ' το σημείο που βρίσκεστε, είναι αποσπασματική και **ασύμμετρη**.

Τώρα, υποθέστε ότι βρίσκετε το κουράγιο (δηλαδή, την απαιτούμενη ενέργεια) να ανεβείτε στην κορυφή του λόφου. Από εκεί πια μπορείτε να βλέπετε ολόγυρα κάθε γειτονιά της πόλης. Η θέα τώρα είναι καθολική και απόλυτα **συμμετρική** (όπως κι αν περιστρέψετε το σώμα σας, πάντα θα αντικρίζετε κάποια περιοχή της πόλης και, σύμφωνα με την υπόθεση που κάναμε, όλες οι περιοχές είναι όμοιες μεταξύ τους). Αυτό που πρέπει να συγκρατήσουμε είναι ότι, **η πορεία από την πολυπλοκότητα της ασυμμετρίας προς την απλότητα της συμμετρίας απαιτεί δαπάνη ενέργειας!**

Η συμμετρία πίσω από τη δύναμη

Με τα σημερινά δεδομένα, τα στοιχειώδη σωματίια και οι μεταξύ τους αλληλεπιδράσεις (δυνάμεις) περιγράφονται από το λεγόμενο **Καθιερωμένο Πρότυπο** (*Standard Model*), το οποίο αποτελεί σύνθεση όλων των πειραματικά επιβεβαιωμένων θεωριών για τη δομή

της ύλης σε θεμελιώδες επίπεδο. Όμως μέχρι πριν μερικά χρόνια υπήρχε ένα βασικό ζήτημα που έμενε να επιβεβαιωθεί πειραματικά: ο μηχανισμός με τον οποίο πιστεύεται ότι τα σωματίια (και, μακροσκοπικά, η ύλη) αποκτούν **μάζα** – ή, αν προτιμάτε, **αδράνεια**.

Μα, θα ρωτήσετε, γιατί να μη δεχθούμε απλά ότι η μάζα είναι μια ιδιότητα που το κάθε σωματίιο φέρει εξ αρχής από τη στιγμή της δημιουργίας του, κάτι σαν «πρόικα» από την ίδια τη Φύση; Για να κατανοήσουμε το πρόβλημα, θα πρέπει να ξαναγυρίσουμε στην έννοια της συμμετρίας...

Στον μικρόκοσμο, η συμμετρία είναι κάτι παραπάνω από θέμα απλής αισθητικής: είναι αυτή που καθορίζει το είδος των αλληλεπιδράσεων μεταξύ των σωματίων. Δηλαδή, **πίσω από κάθε μορφή αλληλεπίδρασης κρύβεται και μία αντίστοιχη μορφή συμμετρίας**. Για παράδειγμα, η ηλεκτρομαγνητική αλληλεπίδραση μεταξύ ηλεκτρικά φορτισμένων σωματιδίων σχετίζεται με την συμμετρικότητα (αμεταβλητότητα στη μορφή) των θεμελιωδών εξισώσεων του ηλεκτρομαγνητισμού, κάτω από συγκεκριμένους αφηρημένους μαθηματικούς μετασχηματισμούς των συναρτήσεων που περιγράφουν το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο και τα σωματίια που αλληλεπιδρούν μέσω αυτού.

Το ίδιο το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο, κατά την κβαντική θεωρία, αντιπροσωπεύεται από τα δικά του «σωμάτια», τα **φωτόνια**. Μπορούμε να σκεφτούμε τα σωματίια αυτά σαν μικρές σφαίρες που εκτοξεύει το ένα φορτίο στο άλλο, κάνοντάς το να αισθανθεί την παρουσία του. Τα φωτόνια είναι τα **κβάντα** (οι πλέον στοιχειώδεις ποσότητες) του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου που «κοινωνούν» την ηλεκτρομαγνητική αλληλεπίδραση ανάμεσα σε ηλεκτρικά φορτισμένα σωματίια.

Στη γλώσσα της συμμετρίας, το φωτόνιο παίζει τον ρόλο του «ταχυδρόμου» που ενημερώνει κάθε παρατηρητή από τον οποίο διέρχεται, για τις λεπτομέρειες των μαθηματικών μετασχηματισμών συμμετρίας που υπέστησαν οι συναρτήσεις που αντιπροσωπεύουν τα σωματίια σε γειτονικά σημεία του χώρου (ή, σωστότερα, του χωροχρόνου).

Πρέπει, όμως, να λάβουμε υπόψη έναν σημαντικό περιορισμό: Οι θεωρίες που συσχετίζουν τις αλληλεπιδράσεις των σωματίων με υποκείμενες συμμετρίες θέτουν ως προϋπόθεση τα κβάντα του πεδίου που ευθύνεται για την αλληλεπίδραση να έχουν **μηδενική μάζα**! Αυτό ισχύει πράγματι για τα φωτόνια (φορείς της ηλεκτρομαγνητικής αλληλεπίδρασης), όχι όμως και για τα κβάντα του πεδίου που σχετίζεται με την ασθενή αλληλεπίδραση. Έτσι, η αλληλεπίδραση αυτή θα κινδύνευε να μείνει έξω από το παιχνίδι της συμμετρίας, και η θεωρητική εξήγηση της ενοποίησης της ασθενούς δύναμης με την ηλεκτρομαγνητική (ηλεκτρασθενής δύναμη) θα οδηγείτο σε αδιέξοδο, αν δεν έσωζε την παρτίδα ένα μυστηριώδες πεδίο...

Ο ξενέρωτος καθηγητής και η δημοφιλής συνοδός του!

Τη λύση στο αδιέξοδο της μάζας δίνει το **πεδίο Higgs**. Το πεδίο αυτό μας επιτρέπει να θεωρούμε τα κβάντα όλων των αλληλεπιδράσεων σαν σωματίια που αυτά καθαυτά δεν έχουν μάζα, **φαίνεται** όμως σ' εμάς ότι έχουν εξαιτίας της αλληλεπίδρασής τους με το

πεδίο Higgs, ή, αν προτιμάτε, με το κβάντο του πεδίου αυτού, το περίφημο **μποζόνιο Higgs**. Γενικά μιλώντας, σύμφωνα με την θεωρία του **Peter Higgs** (καθώς και άλλων ερευνητών που εργάστηκαν ανεξάρτητα πάνω στο ίδιο πρόβλημα), η μάζα όλων των στοιχειωδών σωματίων είναι μία **επίκτητη** (φαινομενική) ιδιότητα που προκύπτει λόγω της αλληλεπίδρασής τους με το πανταχού παρόν πεδίο Higgs.

Θα μπορούσαμε, δηλαδή, να πούμε πως, αν το πεδίο αυτό «έσβηνε» ξαφνικά (όπως υποθέτουμε ότι ίσχυε για κάποια απειροελάχιστη χρονική περίοδο μετά το Big Bang, λόγω των ακραίων θερμοκρασιών), όλα τα σωματίδια θα εμφανίζονταν χωρίς μάζα (δεν θα είχαν αδράνεια, δηλαδή δεν θα πρόβαλλαν αντίσταση στη μεταβολή της κινητικής τους κατάστασης). Αυτό, σύμφωνα με τη Θεωρία της Σχετικότητας, θα σήμαινε ότι κάθε σωματίο θα ταξίδευε με την ταχύτητα του φωτός. Γνωρίζουμε, βέβαια, ότι κάτι τέτοιο δεν ισχύει στ' αλήθεια (με εξαίρεση το φωτόνιο).

Ένα παράδειγμα και πάλι θα βοηθήσει. Φανταστείτε μια χοροεσπερίδα που διοργανώνουν οι φοιτητές ενός Πανεπιστημίου. Στη μεγάλη σάλα βρίσκεται ένα μεγάλο πλήθος φοιτητών που είναι ομοιόμορφα κατανεμημένοι σε όλη την έκταση του χώρου. Ας πούμε ότι το πλήθος αυτό των φοιτητών είναι το «πεδίο Higgs», και οι εν λόγω νεαροί αποτελούν τα «μποζόνια Higgs» (τα κβάντα του πεδίου).

Κάποια στιγμή κάνει την εμφάνισή του στο χορό ένας «ξενέρωτος» καθηγητής (π.χ., ο γράφων). Κανείς δεν του δίνει σημασία καθώς μπαίνει στο δωμάτιο, κι έτσι αυτός μπορεί να κινείται ανενόχλητα και να επιταχύνεται κατά βούληση. Είναι ένα «σωμάτιο» χωρίς μάζα (χωρίς αδράνεια), αφού το πεδίο Higgs και τα κβάντα του (οι φοιτητές) δεν καταδέχονται ν' ασχοληθούν μαζί του ώστε να προβάλουν εμπόδια στην κίνησή του!

Φανταστείτε τώρα ότι στο χορό καταφθάνει καθυστερημένα η ωραία συνοδός του καθηγητή. Καθώς τραβάει την προσοχή των φοιτητών, σπεύδουν όλοι να την προσεγγίσουν, δυσχεραίνοντας την κίνησή της μέσα στη σάλα. Έτσι, για να επιταχύνει το βήμα της θα χρειαστεί να καταβάλει δύναμη: το πεδίο Higgs (οι φοιτητές) της προσέδωσε μάζα (αδράνεια)!

Τώρα, αν υποθέσουμε πως οι φοιτητές γίνονταν αόρατοι, κάποιος εξωτερικός παρατηρητής θα μπορούσε να **νομίσει** ότι η αδράνεια αυτή είναι μια ιδιότητα που πρωτογενώς φέρει η ίδια η γυναίκα. Πιστεύουμε, λοιπόν, ότι η αδράνεια που εμφανίζουν όλα τα σώματα δεν είναι μία εγγενής ιδιότητά τους αλλά οφείλεται στην αλληλεπίδρασή τους με το «αόρατο» πεδίο Higgs. Και το πεδίο αυτό γίνεται «ορατό» μέσω του κβάντου του – του μποζονίου Higgs. Το Καθιερωμένο Πρότυπο της σωματιδιακής φυσικής μπορεί τώρα να πάρει μια βαθιά ανάσα ανακούφισης!

Επίλογος

Με βάση τα πειράματα των τελευταίων χρόνων, όλα δείχνουν ότι η θεωρία του Higgs είναι σωστή. Η καθυστέρηση που υπήρξε στην ανακάλυψη του σχετικού μποζονίου οφείλεται στην πολύ μεγάλη μάζα του, πράγμα που σημαίνει ότι η δημιουργία του σωματιδίου στο

εργαστήριο απαιτεί πολύ υψηλές ενέργειες (θυμηθείτε την περίφημη σχέση του Einstein που καθιστά τη μάζα και την ενέργεια ισοδύναμες). Αυτό το πρόβλημα έλυσε ο επιταχυντής LHC στο CERN.

Οι Φυσικοί υψηλών ενεργειών (τουλάχιστον, οι περισσότεροι από αυτούς) αισθάνονται τώρα δικαιωμένοι για τις προσπάθειες που κατέβαλαν και το χρήμα που δαπανήθηκε για την επιβεβαίωση της ύπαρξης του «δύστροπου» μποζονίου και την διατήρηση της πίστης στην ορθότητα του Καθιερωμένου Προτύπου. Γιατί, σε αντίθετη περίπτωση, θα χρειαζόταν να ξαναγράψουμε απ' την αρχή μεγάλο μέρος της Φυσικής του δεύτερου μισού του 20ού αιώνα. Για κάποιους Φυσικούς, αυτό θα φάνταζε σαν εφιάλτης. Για κάποιους άλλους, σαν ευκαιρία για να γράψουν Ιστορία!

* Το κείμενο αποτελεί μεταφρασμένη και επικαιροποιημένη εκδοχή του δημοσιευμένου παιδαγωγικού επιστημονικού άρθρου "*The hidden symmetry and Mr. Higgs!*" (<https://arxiv.org/abs/1401.1327>)