

## Η ΕΝΟΠΙΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΔΥΝΑΜΕΩΝ ΚΑΙ Η ΠΗΓΗ ΤΗΣ ΜΑΖΑΣ

Του Γιώργου Τριανταφύλλου, Ph. D., Σεπτέμβριος 2004

Η πορεία των φυσικών επιστημών ανά τους αιώνες καθορίστηκε από την ορθολογική αντιμετώπιση των φαινομένων τα οποία κατά κοινή ομολογία υποπίπτουν στην αντίληψη των ανθρώπων. Μια ποσοτική ανάλυση και περιγραφή των φαινομένων αυτών στο πιο βασικό επίπεδο είναι δυνατή σήμερα στο πλαίσιο των τεσσάρων θεμελιωδών αλληλεπιδράσεων, δηλαδή της βαρυτικής, της ηλεκτρομαγνητικής, της ασθενούς και της ισχυρής πυρηνικής αλληλεπίδρασης. Η δράση τους, ως δύναμη ασκουμένη επί των στοιχειωδών σωματιδίων, καθορίζεται από δύο βασικές παραμέτρους: από το είδος του στοιχειώδους σωματιδίου, αφού υπάρχουν σωματίδια τα οποία δεν αλληλεπιδρούν καθόλου με άλλα σωματίδια μέσω ορισμένων αλληλεπιδράσεων (το ηλεκτρόνιο π.χ. δεν έχει ισχυρές πυρηνικές αλληλεπιδράσεις), και από την ταχύτητα των σωματιδίων.

Πράγματι, σύμφωνα με την κβαντική θεωρία η οποία αναπτύχθηκε κατά τον 20ο αιώνα, η ισχύς με την οποία αλληλεπιδρά ένα στοιχειώδες σωματίδιο με τα άλλα σωματίδια μέσω μίας συγκεκριμένης δύναμης εξαρτάται από την ενέργεια, ή εναλλακτικά από την ταχύτητα, του σωματιδίου και από τον τύπο της αλληλεπίδρασης. Όσο πιο μεγάλη ταχύτητα - ή ενέργεια - έχει ένα κουάρκ π.χ. (συστατικό των νουκλεονίων, δηλαδή των πρωτονίων και νετρονίων στους ατομικούς πυρήνες), τόσο ασθενέστερη γίνεται η ισχυρή πυρηνική δύναμη με την οποία αλληλεπιδρά με τα άλλα κουάρκ. Αντιθέτως, όσο πιο μεγάλη είναι η ενέργεια ενός ηλεκτρονίου, τόσο ισχυρότερη γίνεται η ηλεκτρομαγνητική του αλληλεπίδραση. Αυτό οφείλεται στην συνεχή, κβαντικής υφής, εκπομπή και απορρόφηση "δυνάμει" σωματιδίων, τα οποία "ζουν" για απειροελάχιστο χρόνο, από τα αλληλεπιδρώντα σωματίδια

Θεωρώντας σωματίδια με όλο και υψηλότερες ενέργειες, παρατηρούμε πως η ισχύς των διαφόρων δυνάμεων - πλην της βαρυτικής - συγκλίνει κατά προσέγγιση σε μια κοινή τιμή σε ενέργειες περίπου 16 τάξεις μεγέθους υψηλότερες από την μάζα του πρωτονίου (σύμφωνα με την θεωρία της σχετικότητας, χρησιμοποιούμε σε αυτό το άρθρο εναλλακτικά τους όρους "μάζα" και "ενέργεια"). Μια απόλυτη σύγκλιση της ισχύος και των τεσσάρων αλληλεπιδράσεων σε ενέργειες 19 τάξεις μεγέθους πάνω από την μάζα του πρωτονίου, δηλαδή στην ενέργεια Planck όπου η ισχύς και της βαρυτικής δύναμης γίνεται συγκρίσιμη με τις υπόλοιπες, θα μας έφερνε πολύ κοντά στην θεωρητική ενοποίηση των αλληλεπιδράσεων, διότι θα καθιστούσε δυνατή την υπόθεση ότι κατά τις πρώτες στιγμές του σύμπαντος λίγο μετά την Μεγάλη Έκρηξη, όταν τα σωματίδια είχαν τόσο υψηλές ενέργειες, αυτά αλληλεπιδρούσαν μεταξύ τους μέσω μίας κοινής, μοναδικής αλληλεπίδρασης που είχε μία συγκεκριμένη ισχύ

Έχοντας παρατηρήσει ότι η κάθε αλληλεπίδραση περιγράφεται μέσω μίας μαθηματικής συμμετρίας κάτω από την οποία κατατάσσονται και τα σωματίδια που την αισθάνονται, η κοινή ενοποιημένη αλληλεπίδραση στην ενέργεια Planck θα έπρεπε να αντιστοιχεί σε μία μεγάλη συμμετρία η οποία να εμπεριέχει όλες τις μικρότερες συμμετρίες οι οποίες περιγράφουν τις γνωστές σε εμάς αλληλεπιδράσεις. Θα ερχόμασταν έτσι πολύ κοντά στα προφητικά γραφόμενα του φιλοσόφου Kant: " Η λογική προϋποθέτει την ενότητα των διαφόρων δυνάμεων, διότι συγκεκριμένοι φυσικοί νόμοι υπάγονται σε γενικότερους, και η φειδώ στις αρχές δεν είναι μόνο ένα οικονομικό αξίωμα της λογικής, αλλά εσωτερικός νόμος της Φύσης" (Κριτική του καθαρού λόγου, 1787).

Επειδή το πρότυπο μοντέλο της φυσικής στοιχειωδών σωματιδίων, το οποίο είναι πλέον πειραματικώς επιβεβαιωμένο, δεν επιτρέπει την ακριβή ενοποίηση της ισχύος των αλληλεπιδράσεων σε υψηλές ενέργειες, έχουν κατά καιρούς υπάρξει διάφορες προσπάθειες να εισαχθούν νέα συστατικά στο μοντέλο τα οποία να επιτρέπουν αυτή την πλήρη ενοποίηση μέσω των αλλαγών που επιφέρουν. Αυτό πρέπει να γίνεται με τρόπο που να εξηγεί παράλληλα γιατί τα στοιχειώδη σωματίδια W+, W- και Z, τα οποία ανακαλύφθηκαν το 1983 στο CERN (Centre European de Recherche Nucleaire) στην Γενεύη και είναι οι φορείς των ασθενών αλληλεπιδράσεων, καθώς και γιατί το υποθετικό σωματίδιο Higgs που δεν έχει ανακαλυφθεί ακόμα και στο οποίο πιστεύεται ότι οφείλονται εν πολλοίς οι μάζες των σωματιδίων, έχουν μάζες 2 με 3 τάξεις μεγέθους υψηλότερες από την μάζα του πρωτονίου. Γιατί αυτά τα σωματίδια δεν είναι πολύ πιο βαριά, γιατί δηλαδή δεν έχουν μάζες ίσες με την ενέργεια Planck, η οποία σημειωτέον αντιστοιχεί στην μάζα ενός μικρού κόκκου άμμου; Αυτό ονομάζεται "πρόβλημα της ιεραρχίας" των ενεργειακών επιπέδων στην Φύση, διότι αν δεν υπάρχει ιδιαίτερος λόγος, οι τάξεις μεγέθους διαφόρων ενεργειών, όπως θα μας υπαγόρευε και μία απλή διαστατική ανάλυση άλλωστε, δεν θα έπρεπε να διαφέρουν μεταξύ τους.

Οι μέχρι τώρα ενδείξεις μας οδηγούν στο συμπέρασμα ότι το κλειδί του μυστηρίου αυτού βρίσκεται στο σπιν των στοιχειωδών σωματιδίων, δηλαδή σε μία φυσική διανυσματική

ποσότητα κβαντομηχανικής υφής η οποία μοιράζεται ορισμένες μόνο ιδιότητες με την κλασική ιδιοστροφορμή, όπως αυτή μίας σβούρας π.χ.. Τα στοιχειώδη σωματίδια ύλης που έχουν ανακαλυφθεί, δηλαδή κουάρκς, ηλεκτρόνια, νετρίνα, κλπ., έχουν σπιν ίσο με  $1/2$ . Όταν προσπαθούμε να κατατάξουμε τα σωματίδια αυτά σε πιο μεγάλες συμμετρίες που αντιστοιχούν σε ενοποιημένες θεωρίες όπου όλες οι δυνάμεις είναι απλώς διαφορετικές εκφάνσεις μίας μοναδικής αλληλεπίδρασης, ανακαλύπτουμε πως στην αρχή του σύμπαντος θα πρέπει να υπήρξαν και πολλά άλλα είδη σωματιδίων, μερικά εκ των οποίων διαφάνονται από τα ήδη γνωστά σωματίδια τις αρχικές εκείνες στιγμές κυρίως κατά το σπιν τους

Πιο συγκεκριμένα, στην αρχή του σύμπαντος αντιστοιχούσε σε κάθε γνωστό σήμερα σωματίδιο ύλης ένα άλλο σωματίδιο με τις ίδιες ιδιότητες εκτός από το σπιν του, το οποίο ήταν ίσο με 0, και ονομάζεται "υπερσυμμετρικό" αντίγραφο του. Αντιστοιχούσε επίσης σε κάθε σωματίδιο ύλης και ένα άλλο σωματίδιο με σπιν ίσο με  $-1/2$ , το οποίο ονομάζεται "κατοπτρικό" αντίγραφο του (διότι η κατοπτρική συμμετρία αντιστρέφει την σχετική φορά του σπιν σε σχέση με την φορά κίνησης του σωματιδίου), η αλλιώς "κατοπτρόνιο". Επειδή αυτά τα αντίγραφα δεν έχουν παρατηρηθεί πειραματικώς στον σημερινό μας κόσμο, οι θεωρητικοί υποθέτουν πως είναι πολύ βαρύτερα από τα ήδη γνωστά σωματίδια και διεσπάρθησαν λίγο μετά την Μεγάλη Έκρηξη στα γνωστά σωματίδια λόγω της εγγενούς ασταθείας τους

Οι θεωρητικοί φυσικοί έχουν προσπαθήσει να λύσουν το πρόβλημα της ιεραρχίας με το να υποθέσουν πως ορισμένα από αυτά τα σωματίδια-αντίγραφα έχουν μάζες συγκρίσιμες με την μάζα του Higgs, και επομένως μπορεί να παρατηρηθούν στα πειράματα του επιταχυντή LHC στο CERN το 2008, και ότι συμμετέχουν στον μηχανισμό που δίνει μάζες στα σωματίδια  $W^+$ ,  $W^-$ ,  $Z$  και Higgs. Οι λεγόμενες "υπερσυμμετρικές" θεωρίες σε χαμηλές ενέργειες χρησιμοποιούν για τον σκοπό αυτό τα υπερσυμμετρικά αντίγραφα, ενώ η θεωρία των "κατοπτρώνων" χρησιμοποιεί τα κατοπτρόνια. Και οι δύο προσεγγίσεις οδηγούν σε ενοποίηση των αλληλεπιδράσεων σε υψηλές ενέργειες, και μάλιστα συχνά κάτω από την ίδια μεγάλη κοινή συμμετρία, η οποία συμβολίζεται μαθηματικώς ως  $E_8 \times E_8$ . Η διαφορά τους είναι ότι υποθέτουν εναλλακτικά πως μόνο ένας εκ των δύο τύπων αντιγράφων έχει μάζα κοντά στην μάζα του Higgs, ενώ ο άλλος τύπος έχει μάζα κοντά στην ενέργεια Planck, πάνω από 14 τάξεις μεγέθους πιο ψηλά.

Μόνο τα πειράματα στο μέλλον θα καθορίσουν τελεσιδικα ποια από τις δύο προσεγγίσεις - ή μπορεί και κάποια άλλη λύση- είναι η σωστή. Μέχρι τότε ωστόσο, αξίζει να προσπαθήσει κανείς να αναλύσει τα προτερήματα της μίας έναντι της άλλης λύσης. Η ουσία του προβλήματος της ιεραρχίας, η οποία συχνά διαφεύγει από πολλούς ερευνητές, δεν είναι απλώς η εξήγηση της υπάρξεως του ενεργειακού χάσματος μεταξύ της μάζας του Higgs και της ενέργειας Planck. Το βασικό ερώτημα είναι γιατί αυτό το χάσμα σαρώνει 13 τάξεις μεγέθους και όχι 5, 7, 9, ή οποιοδήποτε άλλο ενεργειακό εύρος. Είναι αλήθεια ότι οι υπερσυμμετρικές θεωρίες κατορθώνουν να ενοποιήσουν τις θεμελιώδεις αλληλεπιδράσεις με την προϋπόθεση ότι τα υπερσυμμετρικά αντίγραφα έχουν μάζες κοντά στην μάζα του Higgs. Βρίσκουν επίσης ότι η μάζα του Higgs και η μάζα του βαρύτερου στοιχειώδους σωματιδίου που έχει ανακαλυφθεί μέχρι τώρα, του "top" κουάρκ, είναι της ίδιας τάξης μεγέθους, κάτι που είναι συνεπές με τις πειραματικές και θεωρητικές προσδοκίες

Το πρόβλημα έγκειται δυστυχώς στο ότι το επιχείρημα των υπερσυμμετρικών θεωριών φαντάζει κυκλικό και ad hoc. Σύμφωνα, έχουμε ενοποίηση των δυνάμεων, η μάζα του top κουάρκ σε σχέση με την μάζα του Higgs προβλέπεται σωστά, αλλά τι είναι αυτό που σταθεροποιεί τις μάζες των υπερσυμμετρικών αντιγράφων σε επίπεδα 2-3 τάξεις μεγέθους υψηλότερα από την μάζα του πρωτονίου και όχι 4, 6, 7 τάξεις μεγέθους υψηλότερα: Η υπερσυμμετρία είναι αρκετή για να συγκρατήσει τις μάζες σταθερές σε ένα ενεργειακό επίπεδο, αλλά όχι για να καθορίσει μονοσήμαντα σε πρώτο χρόνο αυτό το επίπεδο. Άλλωστε, δεν είναι η μοναδική θεωρία που επιτυγχάνει κάτι τέτοιο. Το ότι το επίπεδο της μάζας του Higgs είναι το μόνο συμβατό με την ενοποίηση των δυνάμεων είναι αυτοσυνεπές αλλά δεν αποτελεί θεμελιώδη εξήγηση. Επιβεβαιώνει απλώς την ήδη γνωστή υπόθεση ότι στην ενέργεια όπου αναμένουμε την μάζα του Higgs υπάρχουν νέα σωματίδια ή άλλη νέα Φυσική

Αντιθέτως, η θεωρία των κατοπτρώνων είναι η πρώτη θεωρία μέχρι στιγμής η οποία όχι μόνο επιτυγχάνει την ενοποίηση των θεμελιωδών αλληλεπιδράσεων, αλλά και προβλέπει μονοσήμαντα το εύρος της ενεργειακής ερήμου προσφέροντας προς τούτο μία θεμελιώδη εξήγηση. Αυτό γίνεται μέσω μίας νέας υποθετικής αλληλεπίδρασης μεταξύ κατοπτρώνων που καθίσταται ισχυρή σε ενέργειες 2-3 τάξεις μεγέθους πάνω από την μάζα του πρωτονίου. Το μοντέλο επιλύει με αυτόν τον τρόπο το πρόβλημα της ιεραρχίας όχι απλώς με το να είναι συνεπής με τις ενεργειακές κλίμακες και την ενοποίηση των δυνάμεων, αλλά και με το να υπολογίζει και να σταθεροποιεί αυτομάτως, χωρίς να χρειάζεται την αυθαίρετη προσαρμογή κάποιας παραμέτρου, τις μάζες των κατοπτρώνων, των  $W^+$ ,  $W^-$ ,  $Z$ , top κουάρκ και Higgs στα επιθυμητά επίπεδα.

Η λύση του προβλήματος έγκειται ακριβώς στο γεγονός ότι η ισχύς των αλληλεπιδράσεων είναι συνάρτηση της ενέργειας των σωματιδίων που τις αισθάνονται, όπως προαναφέρθηκε. Υποθέτουμε, σύμφωνα με την αρχή ενοποίησης των αλληλεπιδράσεων, πως η ισχύς της νέας αλληλεπίδρασης μεταξύ κατοπτρονίων  $a(\text{new})$  ισούται με την ισχύ της ασθενούς αλληλεπίδρασης  $a(\text{weak})$  σε ενέργειες 16 τάξεις μεγέθους πάνω από την μάζα του πρωτονίου, δηλαδή ενέργειες  $10^{16}$  GeV, όπου GeV είναι μονάδα μέτρησης ενεργείας πολύ κοντά στην μάζα του πρωτονίου.

Υποθέτουμε επίσης πως η ισχύς της ασθενούς αλληλεπίδρασης δεν εξαρτάται από την ενέργεια, κάτι που εξ αριθμητικής συμπτώσεως είναι κατά προσέγγιση ορθό, και ισούται σύμφωνα με τα πειραματικά δεδομένα με  $a(\text{weak}) = 1/30$ . Άρα  $a(\text{weak}, 10^{16} \text{ GeV}) = a(\text{weak}, 10^{16} \text{ GeV}) = 1/30$ .

Λόγω της ενοποίησης των δυνάμεων όμως, έχουμε και πως  $a(\text{weak}, 10^{16} \text{ GeV}) = a(\text{new}, 10^{16} \text{ GeV}) = 1/30$ . (Κάτι παρόμοιο συμβαίνει με την ηλεκτρομαγνητική και με την ισχυρή πυρηνική δύναμη ώστε να ενοποιηθούν με τις υπόλοιπες). Η κβαντομηχανική τώρα μας διδάσκει πως η συνάρτηση της ισχύος της νέας δύναμης με την ενέργεια  $E$  σε GeV είναι φθίνουσα και δίνεται από την σχέση

$$1/a(\text{new}, E(\text{GeV})) = 1/a(\text{new}, 10^{16} \text{ GeV}) + k \cdot \ln(E/10^{16} \text{ GeV}),$$

όπου η παράμετρος  $k = 17/(6\pi)$  καθορίζεται μονοσήμαντα από την συμμετρία που περιγράφει την νέα αλληλεπίδραση και λαμβάνει υπόψη την ύπαρξη κατοπτρονίων

Παρατηρούμε πως για  $E < 100 \text{ GeV}$ ,  $a(\text{new}, E) > 1$ . Όταν η ισχύς μιας αλληλεπιδράσεως υπερβαίνει την μονάδα, αυτή θεωρείται ισχυρή και ο παραπάνω τύπος παύει να ισχύει. Κάτι αντίστοιχο συμβαίνει και στις ισχυρές πυρηνικές αλληλεπιδράσεις: η ενέργεια 1 GeV όπου αυτές γίνονται πράγματι ισχυρές βρίσκεται πολύ κοντά στην μάζα του πρωτονίου και νετρονίου, και έχει την ίδια τάξη μεγέθους με τις μάζες των κουάρκ που τα αποτελούν. Αυτό έχει οδηγήσει τους θεωρητικούς σε μοντέλα που χαρακτηρίζουν τις μάζες των κουάρκ και των νουκλεονίων "δυναμικές", δηλαδή προερχόμενες από τις ισχυρές αλληλεπιδράσεις των σωματιδίων μεταξύ τους. Η ιδέα ότι το μεγαλύτερο μέρος της ύλης γύρω μας έχει μάζα, εντός των ατομικών πυρήνων, η οποία οφείλεται στις ισχυρές πυρηνικές αλληλεπιδράσεις αποτελεί μεγάλη τομή στην κατανόηση του κόσμου γύρω μας, και είναι εξέχον παράδειγμα για να κατανοήσουμε την βάση της θεωρίας των κατοπτρονίων.

Η νέα υποθετική αλληλεπίδραση γίνεται επομένως αυτομάτως ισχυρή για ενέργειες μικρότερες των 100 GeV εφόσον υποθέσουμε πως ενοποιείται με τις υπόλοιπες σε πολύ υψηλές ενέργειες. Αυτό το συμπέρασμα συνάγεται βέβαια μόνο με την προϋπόθεση ότι δεν εμφανίζεται νέα Φυσική ή νέα σωματίδια πέραν των προτεινομένων με μάζες μεταξύ των 100 GeV και της ενέργειας ενοποίησης των δυνάμεων. Όπως και οι ισχυρές πυρηνικές αλληλεπιδράσεις κάτω από 1 GeV συνενώνουν τα κουάρκ μεταξύ τους ανά δυάδες και τριάδες σχηματίζοντας τα μεσόνια και τα νουκλεόνια και τους προσδίδουν μάζες ίδιας τάξης μεγέθους, έτσι και η νέα αυτή υποθετική δύναμη πιστεύουμε ότι συνενώνει τα κατοπτρόνια ανά ζεύγη σχηματίζοντας σύνθετα σωματίδια Higgs και τους δίνει παράλληλα μάζες της τάξεως του  $10^2$ - $10^3$  GeV. Αυτά είναι υπεύθυνα για την γέννηση των μαζών των υπολοίπων γνωστών σωματιδίων.

Το εύρος της ενεργειακής ερήμου (Plank-Higgs) δεν είναι πλέον αποτέλεσμα αυθαίρετης ρύθμισης μίας παραμέτρου. Υποθέτοντας πως έχουμε ενοποίηση των δυνάμεων στο επίπεδο των  $10^{16}$  GeV, η συναρτησιακή σχέση της ισχύος της νέας υποθετικής δύναμης που δίνουμε καθορίζει μονοσήμαντα το επίπεδο των 100 GeV και τις μάζες των κατοπτρονίων, προσφέροντας έναν πολύ συγκεκριμένο μηχανισμό για να εξηγήσει το φαινόμενο της γέννησης της μάζας (πλην της δυναμικής μάζας των κουάρκ που έχει ήδη εξηγηθεί από την ισχυρή πυρηνική αλληλεπίδραση, η οποία γίνεται ισχυρή σε ενέργειες περίπου 3 τάξεις μεγέθους χαμηλότερα)

Λεπτομέρειες του μηχανισμού είναι δύσκολο να μελετηθούν επακριβώς εξαιτίας της ισχυρής φύσεως της νέας υποθετικής αλληλεπιδράσεως στα 100 GeV. Ωστόσο, οι συμμετρίες και ο κατοπτρικός κόσμος που εισάγει, η ενοποίηση των δυνάμεων που έρχεται ως επακόλουθο, και η θεωρητική κατανόηση που οικοδομεί την καθιστούν μία από τις πιο ελκυστικές λύσεις του προβλήματος της ιεραρχίας και της γέννησης της μάζας. Περιμένουμε όλοι με αγωνία το πείραμα του 2008 στο CERN το οποίο θα δείξει ποια λύση έχει διαλέξει η Φύση για να μας δώσει τα φαινόμενα και τις σωματιδιακές μάζες όπως τις παρατηρούμε γύρω μας, και να δούμε τι σπιν έχουν τα αντίγραφα των ήδη γνωστών

σωματιδίων που αυτή διάλεξε να έχουν μάζες 2-3 τάξεις και όχι 16-19 τάξεις μεγέθους υψηλότερες από την μάζα του πρωτονίου.

**Βιβλιογραφία**

1. C.T. Hill and E. H. Simmons, *Physics Reports* 381 (2003) 235.
2. Γιώργος Τριανταφύλλου, Η γέννηση της μάζας, Αθήνα 2003 (Κεντρική Διάθεση: Α. Χριστάκης, Οδ. Ιπποκράτους 10, Αθήνα).
3. G. Triantaphyllou, *Modern Physics Letters A* 16 (2001) 53.