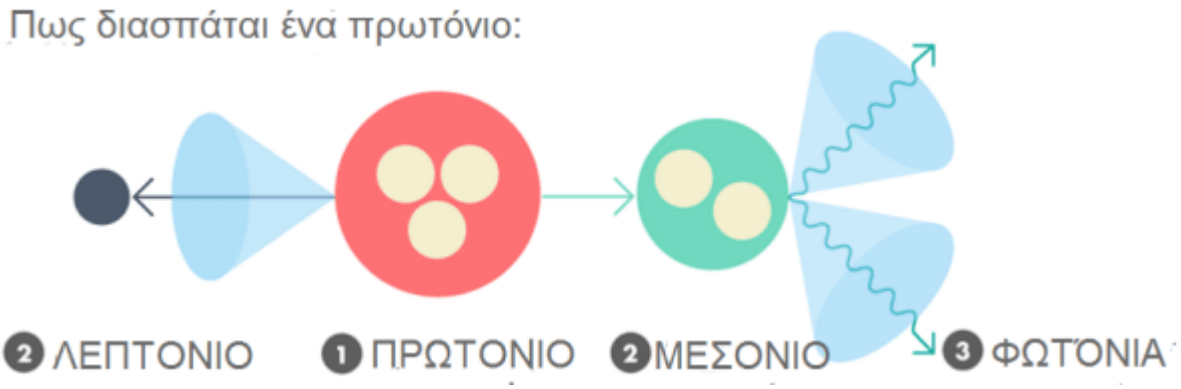
24 Δεκεμβρίου 2016

# Πόσο καιρό «ζει» στ’ αλήθεια ένα πρωτόνιο;

/ Πεμπτουσία

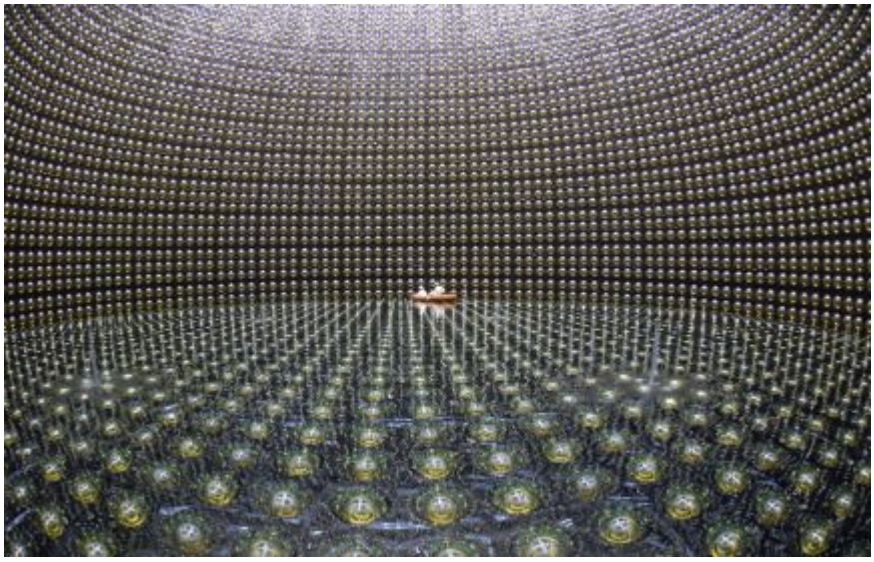
Image not found or type unknown

## Ποιος είναι ο χρόνος ζωής του πρωτονίου;




Επί 20 χρόνια, οι φυσικοί στην Ιαπωνία παρακολουθούν μια γιγαντιαία δεξαμενή καθαρού νερού, σε ένα εγκαταλειμμένο ορυχείο ψευδαργύρου, 250 χιλιόμετρα νοτιο-δυτικά του Τόκιο, ελπίζοντας ότι θα δουν την διάσπαση των πρωτονίων.

Πρόκειται για το πείραμα Super-Kamiokande (ή Super-K) που βασίζεται σ’ έναν τεράστιο ανιχνευτή κατασκευασμένο 1000 μέτρα κάτω από την επιφάνεια της Γης που διαθέτει μια δεξαμενή γεμάτη με 50.000 τόνους υπερ-καθαρού νερού. Το νερό είναι τόσο καθαρό που οι φωτεινές ακτίνες ταξιδεύουν 70 μέτρα μέχρι η έντασή τους να μειωθεί στο μισό, όταν στο νερό μιας συνηθισμένης πισίνας αυτό συμβαίνει μετά από μερικά μέτρα. Περισσότεροι από 11.000 φωτοανιχνευτές είναι τοποθετημένοι στα πλάγια, στο πάνω και κάτω μέρος της δεξαμενής και σκοπό έχουν μετρήσουν τις ασθενείς εκλάμψεις φωτός που θα οφείλονται στην διάσπαση των πρωτονίων.



*Το παρατηρητήριο Super-Kamiokande σε φωτογραφία του 2006 καθώς η δεξαμενή του ξαναγεμίζει με νερό*

Εν τω μεταξύ, ο ανιχνευτής Super-K κέρδισε ένα βραβείο Νόμπελ για μια διαφορετική ανακάλυψη που σχετίζεται με τα σωματίδια που ονομάζονται νετρίνα. Αλλά η ερευνητική ομάδα που αναζητά τις διασπάσεις των πρωτονίων περιμένει ακόμα. Η διάσπαση των πρωτονίων θα επιβεβαιώσει την υπόθεση ότι οι τρεις από τις τέσσερις δυνάμεις της φύσης διαχωρίστηκαν από μια ενιαία δύναμη, την μια θεμελιώδη δύναμη που υπήρχε στην αρχή του χρόνου.

«Μέχρι στιγμής, δεν έχουμε δει στα δεδομένα μας την διάσπαση του πρωτονίου», δηλώνει ο Makoto Miura του Πανεπιστημίου του Τόκιο, ο οποίος ηγείται της ερευνητικής ομάδας που αναζητά την διάσπαση των πρωτονίων στο πείραμα του Super-Kamiokande.

Ενώ σύμφωνα με το Καθιερωμένο Πρότυπο των στοιχειωδών σωματιδίων το πρωτόνιο θεωρείται σταθερό σωματίδιο, οι Μεγάλες Θεωρίες Ενοποίησης (Grand Unified Theories, συντομογραφικά GUTs) που ενοποιούν τις ισχυρές, τις ασθενείς και τις ηλεκτρομαγνητικές δυνάμεις, κάνουν μια σειρά από προβλέψεις για το ποιος είναι ο χρόνος ζωής του πρωτονίου.

Η τελευταία ανάλυση του πειράματος Super-K διαπιστώνει ότι τα πρωτόνια πρέπει να ζουν, κατά μέσο όρο, τουλάχιστον $16 \cdot 10^{33}$ έτη, μια αύξηση από την ελάχιστη διάρκεια ζωής πρωτονίων των $13 \cdot 10^{33}$ ετών που είχε υπολογιστεί το 2012. Τα ευρήματα, που κυκλοφόρησαν τον Οκτώβριο και είναι προς δημοσίευση στο περιοδικό Physical Review D, αποκλείουν ένα μεγαλύτερο εύρος στον προβλεπόμενο χρόνο ζωής των πρωτονίων από τις διάφορες GUTs και κάνουν την αγαπημένη υπόθεση της δεκαετίας του 1970, την υπόθεση της Μεγάλης Ενοποίησης ως ένα άπιαστο και αναπόδεικτο όνειρο. «Μέχρι στιγμής ο πιο πιθανός τρόπος για να ελέγξει κανείς αυτή την ιδέα είναι η διάσπαση πρωτονίων», δήλωσε

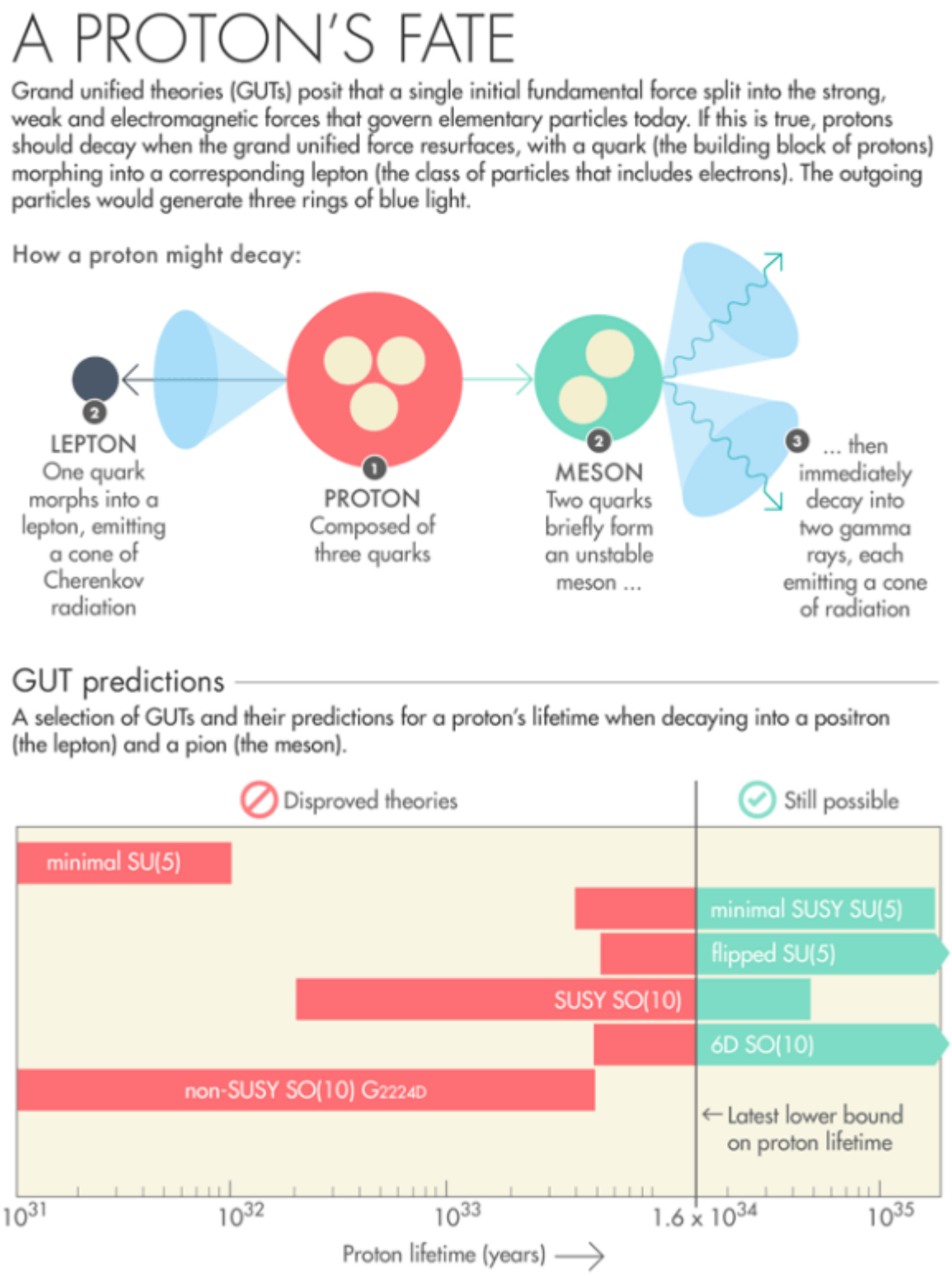
ο Stephen Barr, ένας φυσικός στο Πανεπιστήμιο του Delaware.

Η διάσπαση του πρωτονίου αποτελεί την απόδειξη ότι οι δυνάμεις που κυβερνούν τα στοιχειώδη σωματίδια σήμερα είναι στην πραγματικότητα θραύσματα μιας ενιαίας «μεγάλης ενοποιημένης» δύναμης. Καθώς τείνουμε προς τις υψηλότερες ενέργειες, οι τιμές της ισχύος των τριών δυνάμεων (ηλεκτρομαγνητική, ασθενής, ισχυρή) φαίνεται να συγκλίνουν και οι μαθηματικές δομές τους υποδεικνύουν την ένταξη σε ένα μεγαλύτερο σύνολο, όπως το σχήμα των ηπείρων της Γης υπαινίσσεται την αρχαία υπερ-ήπειρο Παγγαία: «Υπάρχουν αυτά τα κομμάτια και ταιριάζουν μεταξύ τους τόσο τέλεια» λέει ο Barr, «Οι περισσότεροι άνθρωποι πιστεύουν ότι δεν μπορεί να είναι μια σύμπτωση.»

Αν οι δυνάμεις ήταν πράγματι μία δύναμη κατά την «εποχή της μεγάλης ενοποίησης», του πρώτου τρισεκατομμυριοστού ενός τρισεκατομμυριοστό του τρισεκατομμυριοστού του δευτερολέπτου από τον σχηματισμό του σύμπαντος, τότε τα σωματίδια που έχουν πλέον διαφορετικές αποκρίσεις στις τρεις δυνάμεις, τότε θα ήταν συμμετρικά και εναλλάξιμα, όπως οι έδρες ενός κρυστάλλου. Καθώς το σύμπαν ψυχόταν, αυτές οι συμμετρίες έσπασαν, όπως θρυμματίζεται το κρύσταλλο, εισάγοντας τα διακριτά σωματίδια και την πολυπλοκότητα που βλέπουμε στο σύμπαν σήμερα.

Κατά τη διάρκεια των τελευταίων τεσσάρων δεκαετιών, οι φυσικοί έχουν προτείνει μια ποικιλία μοντέλων GUT που περιγράφουν τις πιθανές αρχικές συμμετρικές διατάξεις των σωματιδίων. Ανακαλύπτοντας ποιο μοντέλο είναι σωστό, δεν αποκαλύπτουμε μόνο την υποκείμενη μαθηματική δομή των νόμων της φύσης (και το πώς θα μπορούσε να συμβιβαστεί με την τέταρτη δύναμη, την βαρύτητα), αλλά επίσης και το ποια άλλα σωματίδια μπορεί να υπάρχουν, εκτός από αυτά που γνωρίζουμε. Αυτό με τη σειρά του θα μπορούσε δώσει λύσεις σε άλλα βαθιά μυστήρια της φυσικής, όπως η ασυμμετρία ύλης-αντιύλης στο σύμπαν και οι ανεξήγητες μάζες των νετρίνων.

«Το όνειρό μας, φυσικά, είναι να έχουμε μια ενοποιημένη θεωρία των πάντων», δηλώνει ο Δημήτρης Νανόπουλος, ο οποίος ως γνωστόν επινόησε τον όρο GUT.




***Η μοίρα του πρωτονίου*** *(πηγή: [Lucy Reading-Ikkanda](#) for Quanta Magazine; chart data source: [Snowmass 2013](#))*

Για να αναπαράγουμε στο εργαστήριο την απευθείας συγχώνευση των δυνάμεων απαιτείται μια σχεδόν «άπειρη» ποσότητα ενέργειας. Ευτυχώς όμως, η μεγάλη ενοποίηση θα έπρεπε να αφήνει ένα αμυδρό ίχνος στο σύμπαν σήμερα. Όλα τα μοντέλα GUT υποθέτουν ότι τα κουάρκ, οι θεμελιώδεις δομικές μονάδες των

πρωτονίων και των νετρονίων, αρχικά δεν διακρίνονταν από τα λεπτόνια, την τάξη των σωματιδίων που περιλαμβάνει τα ηλεκτρόνια. Λόγω της κβαντικής αβεβαιότητας, η μεγάλη ενοποιημένη δύναμη που συνδέεται μ' αυτή την θεμελιώδη συμμετρία θα πρέπει περιστασιακά να επανεμφανίζεται αυθόρμητα, μορφοποιώντας ένα κουάρκ ή αντικουάρκ σε ένα αντίστοιχο λεπτόνιο ή αντιλεπτόνιο. Όταν αυτό συμβαίνει σε ένα από τα κουάρκ στο εσωτερικό του πρωτονίου, το πρωτόνιο διασπάται, εκπέμποντας ένα ανιχνεύσιμο φλας ακτινοβολίας. Αυτό είναι που περιμένουν να δουν οι φυσικοί στο πείραμα Super-Kamiokande (και τα νετρόνια διασπώνται με παρόμοιο τρόπο – αλλά συντομογραφικά το φαινόμενο αναφέρεται πάλι ως διάσπαση πρωτονίου).

Το όνειρο της Μεγάλης Ενοποίησης ξεκίνησε το 1974, όταν ο μετέπειτα νομπελίστας Sheldon Glashow, τώρα στο Πανεπιστήμιο της Βοστόνης, και ο Howard Georgi, τώρα στο Χάρβαρντ, ανακάλυψαν ότι οι μαθηματικές ομάδες συμμετρίας γνωστές ως SU(3), SU(2) και U(1), οι οποίες αντιστοιχούν, διαδοχικά, στις ισχυρές, στις ασθενείς και στις ηλεκτρομαγνητικές δυνάμεις και όλες μαζί αποτελούν το «Καθιερωμένο Πρότυπο» της σωματιδιακής φυσικής, μπορούν να ενσωματωθούν σε μια ενιαία, μεγαλύτερη ομάδα των συμμετριών η οποία σχετίζεται με όλα τα γνωστά σωματίδια: την SU (5). «Σκεφτόμασταν ότι ήταν η απόλυτη ομορφιά», θυμάται ο Glashow.

Η πεπερασμένη ζωή του πρωτονίου που προβλεπόταν από την πρώτη και πιο απλή GUT, μαζί με τους χρόνους ζωής που προέβλεπαν κι άλλα μοντέλα που ακολούθησαν, έχουν ήδη αποκλειστεί. Το όριο που θέτει σήμερα το πείραμα Super-Kamiokande περιορίζει κι άλλο τις προβλέψεις των μοντέλων GUTs που επιβιώνουν μέχρι σήμερα.

Ο Barr, ένας από τους δημιουργούς μιας θεωρίας GUT, της επονομαζόμενης «flipped SU (5)», που είναι ακόμα ζωντανή, συγκρίνει την κατάσταση με την αναμονή του (της) συζύγου σας στο σπίτι. «Αν αργήσει 10 λεπτά, θα υπάρχει μια απλή εξήγηση για αυτό. Για μία ώρα καθυστέρηση, ίσως οι εξηγήσεις να είναι λιγότερο πειστικές. Αν καθυστερεί οκτώ ώρες … τότε θα αρχίσετε να ανησυχείτε για το χειρότερο, ότι ίσως ο (η) σύζυγός σας να είναι νεκρός. Έτσι, το ζητούμενο είναι, από ποιο σημείο και μετά θα λέμε ότι θεωρία μας είναι νεκρή;»

Αυτή τη στιγμή, συνεχίζει, «βρισκόμαστε μάλλον στο σημείο όπου ο σύζυγος καθυστερεί 10 λεπτά ή το πολύ μια ώρα. Συνεπώς είναι ακόμα απολύτως εύλογο η μεγάλη ενοποίηση να είναι σωστή. »

Εάν η μεγάλη ενοποίηση είναι πράγματι σωστή, αυτό σημαίνει ότι οι θεμελιώδεις συμμετρίες που υπήρχαν στην αρχή του σύμπαντος, στη συνέχεια έσπασαν καθώς

η θερμοκρασία μειώθηκε, όπως ακριβώς συμβαίνει με το νερό, το οποίο ενώ φαίνεται να είναι το ίδιο προς κάθε κατεύθυνση, όταν ψύχεται και γίνεται πάγος αποκτά διακριτές κατευθύνσεις.

Πάρτε την SU(3), το σύνολο των συμμετριών που αντιστοιχεί στην ισχυρή δύναμη (η οποία κολλάει τα κουάρκ μεταξύ τους, για να σχηματιστούν τα πρωτόνια και άλλα σύνθετα σωματίδια). Αυτή η ομάδα συμμετρίας περιλαμβάνει τον κανόνα ότι τα «πάνω κουάρκ» (ένα από τα έξι είδη κουάρκ) εμφανίζονται με τρία διαφορετικά φορτία – ονομάζονται κόκκινο, μπλε και πράσινο – που μπορούν να εναλλάσσονται. Δηλαδή, αν αλλάξουμε όλα τα κόκκινα κουάρκ του σύμπαντος με τα μπλε, όλα τα μπλε με πράσινα και όλα τα πράσινα με κόκκινα, κανείς δεν θα μπορούσε να το καταλάβει. Τα «κάτω» κουάρκ και όλα τα άλλα κουάρκ εμφανίζονται σε τέτοιες συμμετρικές τριάδες, που μοιάζουν με τις πλευρές ενός ισοπλεύρου τριγώνου. Τα γλοιόνια, τα οκτώ σωματίδια που μεταφέρουν την ισχυρή δύναμη, μπορούν να θεωρηθούν ως οι περιστροφείς αυτών των τριγώνων.

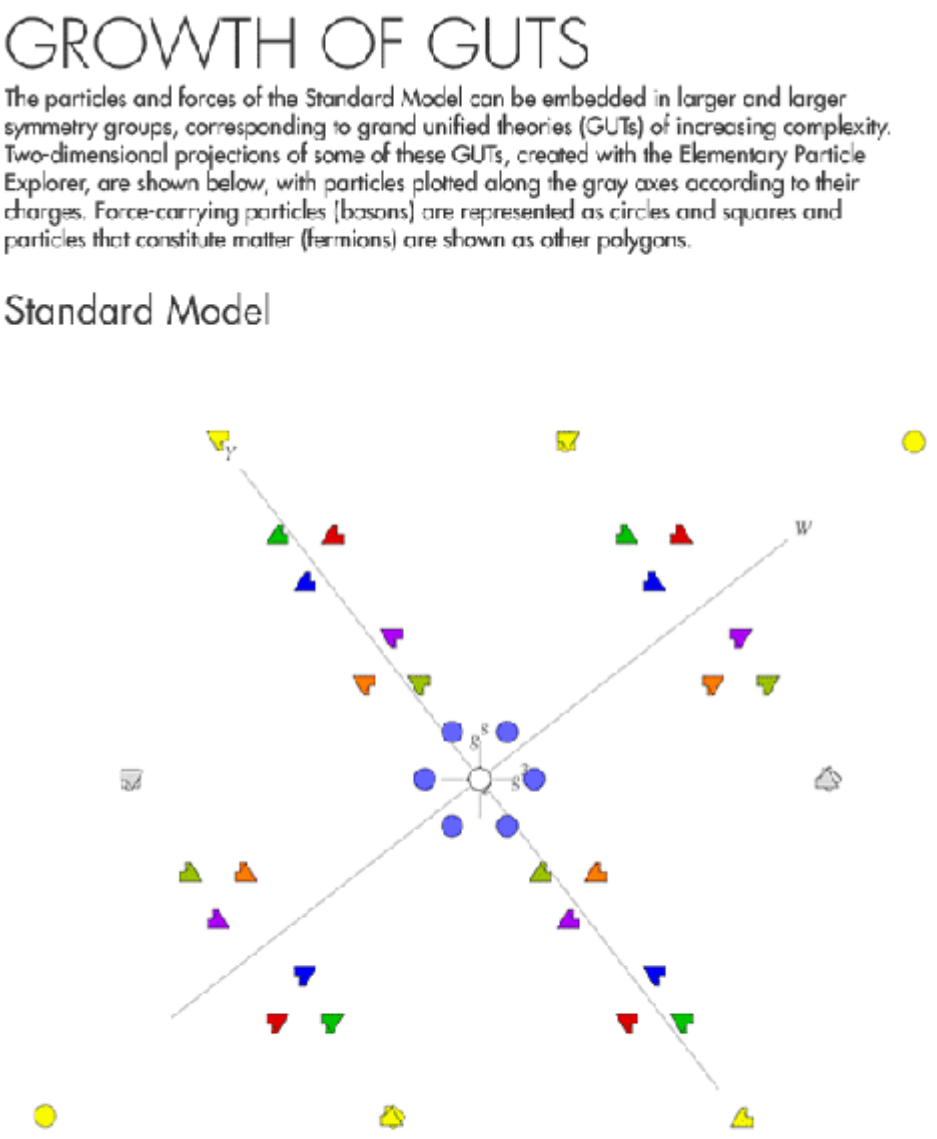
Εν τω μεταξύ, οι συμμετρίες SU(2) που συνδέονται με την ασθενή δύναμη (η οποία είναι υπεύθυνη για την βήτα ραδιενεργό διάσπαση) περιλαμβάνουν, για παράδειγμα, μια συμμετρία μεταξύ των πάνω κουάρκ και κάτω κουάρκ. Εναλλάξτε όλα τα πάνω με τα κάτω κουάρκ στις εξισώσεις που περιγράφουν την ασθενή δύναμη, «και πάλι, κανείς δεν πρόκειται ποτέ να καταλάβει ότι το έχετε κάνει», λέει ο Νανόπουλος.

Οι θεωρίες της μεγάλης ενοποίησης όπως η SU(5) περιλαμβάνουν όλες τις συμμετρίες των SU(3), SU(2) και U(1) και προσθέτουν νέες στο μίγμα. Για παράδειγμα, η SU(5) συνδέει τα κουάρκ και αντικουάρκ μαζί με τα λεπτόνια και αντιλεπτόνια σε “πεντάδες”, που είναι σαν τις ίδιες πλευρές ενός κανονικού πενταγώνου. Τα σωματίδια που μεταφέρουν τις ισχυρές, τις ασθενείς και τις ηλεκτρομαγνητικές δυνάμεις είναι ταυτόσημα σε αυτή τη μεγαλύτερη μαθηματική δομή. Και τα 12 από αυτά, μαζί με μια επιπλέον δωδεκάδα που προκύπτει με φυσικό τρόπο, μεταφέρουν την μια «μεγάλη ενοποιημένη» δύναμη.

Όταν ανακάλυψαν το μοντέλο SU (5) μοντέλο οι Glashow και Georgi συνειδητοποίησαν ότι οι 12 επιπλέον φορείς της δύναμης που υπάρχουν στην δομή της SU(5) θα προκαλέσει διάσπαση του πρωτονίου. Όταν η SU(5) έσπασε στα τρία κομμάτια που βλέπουμε σήμερα, οι 12 από τους αρχικούς φορείς της δύναμης πήραν την σημερινή μορφή τους, αλλά η άλλη δωδεκάδα, αντί να εξαφανιστεί, έγινε απλώς εξαιρετικά βαριά και ασθενής. Αυτά τα φαντάσματα-φορείς δύναμης κατά καιρούς θα εμφανίζονται και θα εναλλάσσουν ένα κουάρκ με ένα λεπτόνιο. Ο Georgi και άλλοι υπολόγισαν ότι αν το μοντέλο SU(5) είναι σωστό, τότε κατά μέσο

όρο το πρωτόνιο (το οποίο αποτελείται από τρία κουάρκ) θα αποσυντεθεί σε $10^{29}$ χρόνια.

Αυτή η πρόβλεψη διαψεύστηκε στη δεκαετία του 1980 τόσο από το πείραμα Irvine-Michigan-Brookhaven και το πείραμα Kamiokande, τον προκάτοχο του πειράματος Super-K. Και το 1996 το πείραμα Super-K απέκλεισε οριστικά την SU(5).
Η κατάσταση έχει γίνει από τότε αρκετά περίπλοκη. Λαμβάνοντας υπόψη ότι η SU(5) ήταν η απλούστερη δυνατή, οι ερευνητές βρήκαν μια ποικιλία από άλλες ομάδες συμμετρίας όπου όλα τα υπάρχοντα σωματίδια μπορούν να ενσωματωθούν σ' αυτές, με επιπλέον χαρακτηριστικά και τις μεταβλητές που θα μπορούσαν να προβλέπουν μεγαλύτερο ή μικρότερο χρόνο ζωής των πρωτονίων. Μερικά από αυτά τα μοντέλα προσθέτουν μια επιπλέον συμμετρία, που ονομάζεται «υπερσυμμετρία» , η οποία διπλασιάζει τον αριθμό των σωματιδίων. Άλλα μοντέλα, όπως η «flipped SU(5)», με τις δικές της εναλλαγές δημιουργεί επίσης μια επιπλέον συμμετρία. Το μοντέλο αυτό και παραλλαγές του προτάθηκαν από τους Stephen Barr, Δημήτρη Νανόπουλο, Ιγνάντιο Αντωνιάδη, John Ellis και John Hagelin (ο τελευταίος αποτελεί μιά από τις πιο αμφιλεγόμενες μορφές στον χώρο της φυσικής, εξαιτίας της ενασχόλησής του με τον υπερβατικό διαλογισμό του Μαχαρίσι, τον οποίο προσπάθησε ατυχώς να συνδέσει με τις GUTs και την Υπερσυμμετρία).




*Η εξέλιξη των GUTs (Πηγή: [Elementary Particle Explorer](), designed and written by Garrett Lisi, Troy Gardner, and Greg Little)*

Τα τελευταία αποτελέσματα του Super-K, θέτουν το κατώτερο όριο για τη διάρκεια ζωής του πρωτονίου ακριβώς πάνω από $10^{34}$ χρόνια, το οποίο βρίσκεται στην περιοχή των προβλέψεων πολλών θεωριών – μεταξύ των οποίων και η «flipped SU(5)», η οποία προβλέπει ότι για να διασπαστούν τα πρωτόνια χρειάζονται $10^{34}$ μέχρι $10^{36}$ χρόνια. «Είμαι πολύ ενθουσιασμένος για αυτό», δήλωσε ο Νανόπουλος, ένας από τους ερευνητές που παρουσίασαν το μοντέλο αυτό, στις αρχές του 1980.

Αλλά ενώ το πείραμα Super-K θα μπορούσε ξαφνικά να χτυπήσει φλέβα χρυσού στα αμέσως επόμενα χρόνια και να επιβεβαιώσει ένα από αυτά τα μοντέλα, θα

μπορούσε επίσης να λειτουργήσει για άλλα 20 χρόνια, πλησιάζοντας το κατώτερο όριο για τη διάρκεια ζωής του πρωτονίου, χωρίς να αποκλείει οριστικά κάποιο από τα μοντέλα.

Η Ιαπωνία εξετάζει την κατασκευή ενός ανιχνευτή κόστους 1 δισεκατομμυρίου δολαρίων που θα ονομάζεται Hyper-Kamiokande, ο οποίος θα είναι 8 έως 17 φορές μεγαλύτερος από το Super-K και θα μπορούσε να μετρήσει μετά από δύο δεκαετίες χρόνους ζωής πρωτονίων της τάξης των $10^{35}$ ετών. Μπορεί να αρχίσετε να βλέπετε ψήγματα των διασπάσεων. Ή μπορεί και όχι. «Θα μπορούσαμε να είμαστε άτυχοι,» δήλωσε ο Barr. «Θα μπορούσαμε να κατασκευάσουμε τον μεγαλύτερο ανιχνευτή που είναι δυνατό να κατασκευαστεί και η διάσπαση των πρωτονίων να είναι λίγο πιο αργή και να μην ανιχνευτεί»

Αλλά δεν έχει σημασία πόσο μεγάλος είναι ο ανιχνευτής, γιατί όλο και πιο ακραία μοντέλα GUT θα μπορούσαν να κατασκευαστούν, τα οποία θα ήταν αδύνατον να ελεγχθούν πειραματικά – όπως οι ομάδες συμμετρίας E6 ή E8, των οποίων πολλές παράμετροι μπορούν να ρυθμιστούν έτσι ώστε τα πρωτόνια να ζουν «όσο θέλουμε» . Ένα από αυτά τα μοντέλα θα μπορούσε να είναι το σωστό, αλλά κανείς δεν θα το μάθει ποτέ. «Οι άνθρωποι μπορούν να κατασκευάσουν μοντέλα με υψηλότερες συμμετρίες, προσπαθώντας να αποφύγουν την διάσπαση πρωτονίων», δήλωσε ο Νανόπουλος. «Εντάξει, μπορείς να το κάνεις, αλλά … δεν θα μπορείς να το δείξεις στη μητέρα σου κοιτώντας την στα μάτια.»

Ο πρώτος διδάξας των GUTs, ο Sheldon Glashow, έχασε την πίστη του στην όλη υπόθεση, όταν η SU(5) αποκλείστηκε, δηλώνοντας ότι «η διάσπαση του πρωτονίου ήταν μια αποτυχία … έτσι έχουν πεθάνει πολλές μεγάλες ιδέες».

Στην πραγματικότητα όμως τίποτε δεν έχει τελειώσει ακόμα όσον αφορά τα πειράματα για τον προσδιορισμό της διάσπασης των πρωτονίων, παρά το γεγονός ότι πολλοί φυσικοί, όχι μόνο έμαθαν να υπολογίζουν τον χρόνο ζωής των πρωτονίων, αλλά και να βγάζουν ως αποτέλεσμα όποιο νούμερο επιθυμούν!

*πηγή: τα παραπάνω είναι μια συνοπτικά ελεύθερη απόδοση του άρθρου της Natalie Wolchover με τίτλο «Grand Unification Dream Kept at Bay» στον ιστότοπο quantamagazine.org*

**Πηγή: https://physicsgg.me/**