[**Πώς τα πράγματα αποκτούν το βάρος τους: Η φύση της μάζας**](http://viewonphysics.gr/?p=5877)

[Γιάννης Γαϊσίδης](http://viewonphysics.gr)

[23 Οκτωβρίου 2017](http://viewonphysics.gr/?p=5877)

[Επιστήμη](http://viewonphysics.gr/?cat=4)

[Comments](http://viewonphysics.gr/?p=5877#comment-area)

* **Του Don Lincoln**
* **Από το «The Physics Teacher»**

**Περίληψη**

Η φυσική είναι ένα βαρύ αντικείμενο, γεμάτο ουσία και σοβαρότητα. Επομένως, είναι ίσως εντελώς λογικό, ένα κεντρικό ζήτημα προσήλωσης να είναι η μάζα. Αλλά τι είναι η μάζα στην πραγματικότητα; Ποια είναι η προέλευση και η φύση αυτού του πιο ουσιώδους στοιχείου του κόσμου γύρω μας; Και υπάρχουν άραγε κάποιες εκπλήξεις, που θα μπορούσαμε να δούμε, καθώς θα σκάβουμε βαθύτερα σε αυτό το ερώτημα; Σε αυτό το άρθρο, ελπίζω να εκπλήξω κάθε αναγνώστη τουλάχιστον μία φορά.

Όλοι έχουμε μια διαισθητική κατανόηση της μάζας. Είναι το ποσό των «υλικών» που αποτελούν κάτι. Ενώ οι φυσικοί μπορεί να έχουν μια πιο ξεχωριστή εκτίμηση του θέματος, η καθημερινή μας διαίσθηση για τη μάζα είναι στενά συνδεδεμένη με την έννοια του ξαδέλφου του βάρους. Τα πιο μαζικά πράγματα ζυγίζουν περισσότερο. Η σύνδεση βάρους / μάζας άρχισε να γίνεται κατανοητή κατά τη διάρκεια του μεσαίου μέρους της τελευταίας χιλιετίας και αποδεικνύεται ότι είναι ένα κρίσιμο και, μερικές φορές, απροσδόκητο χαρακτηριστικό της δομής του σύμπαντος. Θα επιστρέψω σε αυτό αργότερα.

Η μάζα παίζει ρόλο τόσο στην αδράνεια, δηλαδή στην τάση ενός αντικειμένου να μετατοπιστεί ή να παραμείνει ακίνητο, όσο και στο βάρος, που είναι η δύναμη που ασκείται σε ένα αντικείμενο λόγω βαρύτητας. Ο Αριστοτέλης υποστήριξε τον 4ο αιώνα π.Χ. ότι τα αντικείμενα έπεφταν με ταχύτητα ανάλογη προς τη μάζα τους. (Και με τον όρο μάζα εννοούσε πραγματικά αυτό που τώρα αποκαλούμε βάρος.)

Τα πειράματα του Galileo (Εικόνα 1) άλλαξαν όλα αυτά στα τέλη του 16ου αιώνα. Το 1589-1592, ο Galileo μελέτησε τον τρόπο με τον οποίο τα διάφορα αντικείμενα πέφτουν υπό την επίδραση της βαρύτητας και διαπίστωσε ότι έπεφταν ανεξάρτητα από τη μάζα τους. Αυτό επιβεβαίωσε τη διαίσθησή του, την οποία σχημάτισε μέσω ενός πειράματος σκέψης. Κάθε στερεό αντικείμενο μπορεί να φανταστείτε ότι αποτελείται από δύο ξεχωριστά αντικείμενα, το ένα να έχει το διπλάσιο βάρος του άλλου. Όταν ρίχνετε το εννιαίο βάρος και τα δύο κομμάτια πέφτουν με τον ίδιο ρυθμό. Επιπλέον, εάν τα δύο βάρη διαχωρίστηκαν πράγματι, ενώθηκαν με ένα νήμα και στη συνέχεια έπεσαν, φανταστείτε ότι θα πέσουν μαζί και όχι με διαφορετικούς ρυθμούς. Με αυτό το σκεπτικό, περίμενε να διαψεύσει τον Αριστοτέλη, κάτι που τελικά το παρατήρησε.



Εικ. 1. Οι πρώτες πραγματικές ιδέες για τη σύνδεση μεταξύ μάζας, βάρους και κίνησης καταγράφηκαν από τον Galileo.

Ο σπουδαστής του, Vincenzo Viviani, περιέγραψε τη βιογραφία του Galileo το 1654 και είναι εκεί όπου αναφέρθηκε η ιστορία του Galileo που ρίχνει μπάλες από τον Πύργο της Πίζας. Δεν υπάρχει τέτοια ιστορία στα γραπτά του Galileo. Μάλλον στο έργο του *Δύο Νέες Επιστήμες*, που δημοσιεύθηκε το 1638, ο Γαλιλαίος περιέγραψε τα πειράματα χρησιμοποιώντας μια χάλκινη μπάλλα και μια ξύλινη ράμπα. Ενώ οι σύγχρονοι καθηγητές φυσικής θα αναγνωρίσουν ότι μια σωστή αντιμετώπιση αυτής της κατάστασης απαιτεί να λαμβάνονται υπόψη οι περιστροφικές ιδιότητες του αντικειμένου, τα δύο βασικά συμπεράσματα του Galileo ήταν ότι αντικείμενα με τις ίδιες διαστάσεις παρουσιάζουν πανομοιότυπη κίνηση (ανεξάρτητα από τη μάζα τους) και ότι η απόσταση που διανύει το αντικείμενο είναι ανάλογη του τετραγώνου του χρόνου της κίνησης.

**Ο Νεύτων και ο Χουκ**

Κατά τη διάρκεια περίπου μιας δεκαετίας, ο Sir Isaac Newton (Εικόνα 2) και ο Robert Hooke εργάστηκαν ανεξάρτητα πάνω σε μια θεωρία βαρύτητας. Οι δυο τους δεν ήταν φίλοι και πολλά έχουν γραφτεί για το ποιος ήταν αυτός που αρχικά δημιούργησε κάποια ιδέα. Ο Hooke ήταν ευάλωτος και ο Newton πιο επιτυχημένος και λίγο εκδικητικός – έχει λεχθεί ακόμη κι ότι κατέστρεψε το μοναδικό ζωγραφικό πορτραίτο του Hooke. Οι ιστορικοί πιστεύουν γενικά ότι ο Hooke αρχικά υπολόγισε ότι η δύναμη που οφείλεται στη βαρύτητα μεταξύ δύο αντικειμένων, ήταν αντιστρόφως ανάλογη προς το τετράγωνο της απόστασης μεταξύ τους και ότι ο Newton χρησιμοποίησε την πρόσφατα αναπτυγμένη θεωρία λογισμού για να αποδείξει ότι αυτή η υπόθεση ήταν αληθινή. Αλλά τότε ο Νεύτωνας μπήκε πολύ βαθύτερα στο θέμα.



Εικ. 2. Ο Sir Isaac Newton και ο Robert Hooke ήταν σκληροί αντίπαλοι, με τον καθένα να ισχυρίζεται ότι έχει βασικές γνώσεις σχετικά με τη συμπεριφορά της βαρύτητας. Ο Νεύτωνας, που απεικονίζεται εδώ, λέγεται ότι κατέστρεψε τη μοναδικό ζωγραφικό πορτραίτο του Hooke.

Ανεξάρτητα από τη αυμβολή του καθενός, οι σύγχρονοι φυσικοί χρησιμοποιούν την περιγραφή του Νεύτωνα για να περιγράψουν την κίνηση ενός αντικειμένου μικρότερης μάζας, m, γύρω από μία πολύ μεγαλύτερη μάζα, M. Μπορεί κανείς να συνδυάσει τον γενικό νόμο της βαρύτητας του Νεύτωνα, , με τον δεύτερο νόμο του Νεύτωνα της κίνησης (για κυκλική κίνηση), . Εξισώνοντας τα δεύτερα μελη, βλέπουμε ότι η ταχύτητα του ελαφρύτερου αντικειμένου σε μια κυκλική τροχιά είναι , όπου r είναι η απόσταση μεταξύ των κέντρων μάζας των δύο αντικειμένων και G είναι η σταθερά βαρύτητας. Διαπιστώνουμε ότι η επιτρόχια ταχύτητα του ελαφρύτερου αντικειμένου είναι ανεξάρτητη από τη δική του μάζα.

Αυτό είναι ένα γνωστό αποτέλεσμα, αλλά με πιο προσεκτικό έλεγχο είναι πραγματικά εκπληκτικό. Ο λόγος είναι ότι αυτός ο απλός υπολογισμός συνδυάζει δύο διαφορετικές έννοιες. Η πρώτη είναι η βαρυτική μάζα, η οποία είναι μια ποσότητα που συμμετέχει στη δημιουργία μιας δύναμης. Στην ουσία, η βαρυτική μάζα είναι ένα φορτίο βαρύτητας. Η άλλη έννοια είναι η αδρανειακή μάζα, η οποία είναι μια ποσότητα που αντιστέκεται στις αλλαγές στην κίνηση ενός αντικειμένου. A priori, δεν υπάρχει λόγος να είναι οι δύο αυτές ποσότητες ίδιες. Έτσι, θα πρέπει να επανεξετάσουμε προσεκτικότερα τον νόμο της βαρύτητας του Νεύτωνα ως εξής:

(1)

και την εξίσωση του Νεύτωνα για κυκλική κίνηση ως

(2)

Λαμβάνοντας αυτή την πιο προσεκτική προσέγγιση, θα σημειώσουμε ότι η ταχύτητα ενός αντικειμένου χαμηλής μάζας που είναι σε τροχιά γύρω από ένα αντικείμενο ανώτερης μάζας θα πρέπει πραγματικά να είναι:

(3)

Το γεγονός ότι αντικείμενα διαφορετικής αδρανειακής μάζας κινούνται σε τροχιά γύρω από ένα βαρύτερο αντικείμενο με την ίδια ταχύτητα, υποδηλώνει σαφώς ότι . Όπως θα συζητήσω αργότερα, αυτός ο ισχυρισμός, ο οποίος έχει υποβληθεί σε αυστηρές εμπειρικές δοκιμασίες, παίζει κεντρικό ρόλο στη θεωρία γενικής σχετικότητας του Αϊνστάιν (Εικόνα 3).



Εικ. 3. Οι θεωρίες του Albert Einstein τόσο της ειδικής όσο και της γενικής σχετικότητας περιείχαν βασικές γνώσεις σχετικά με τη φύση της μάζας και τον ρόλο που παίζει στον ιστό της πραγματικότητας.

Αυτή η ιδέα είναι ίσως οικεία, αλλά λέει κάτι πολύ θεμελιώδες για τους νόμους που διέπουν το σύμπαν. Υποθέστε, για παράδειγμα, ότι η ίδια ανάλυση πραγματοποιήθηκε για ένα ζεύγος σωματιδίων που αλληλεπιδρούν με ηλεκτρική δύναμη. Στη συνέχεια, θα αντικαταστήσαμε το νόμο της βαρύτητας του Νεύτωνα με τον νόμο του Coulomb. Λαμβάνοντας k ως σταθερά του Coulomb και τα και να αντιπροσωπεύουν το φορτίο της χαμηλής και της υψηλής μάζας αντίστοιχα, η εξίσωση ([3](http://viewonphysics.gr/?p=5877#id3065843247)) θα ήταν:

(4)

Σε αυτή την περίπτωση, βλέπουμε ότι έχουμε το λόγο φορτίου προς μάζα του ελαφρού αντικειμένου (q / m) και δεν έχουμε καμία προσδοκία ότι θα ακυρωθούν. Αυτό το παράδειγμα υπογραμμίζει ότι από τις τέσσερις γνωστές θεμελιώδεις δυνάμεις (βαρύτητα, ηλεκτρομαγνητικές και ισχυρές και ασθενείς πυρηνικές δυνάμεις), η βαρύτητα έχει μια μοναδική σχέση με την αδράνεια, η οποία έχει βαθιές συνέπειες στην κατανόηση της δομής του σύμπαντος.

**Η Θεωρία της Ειδικής Σχετικότητας του Αϊνστάιν**

Η μάζα διαδραματίζει κεντρικό ρόλο στην κλασική μηχανική, αλλά έχει και έναν ρόλο στον τομέα της σχετικότητας. Ίσως ο πιο διάσημος ισχυρισμός της ειδικής σχετικότητας είναι ότι η μάζα ενός αντικειμένου αυξάνεται καθώς αυξάνεται η ταχύτητά του. Απλά αυτό δεν είναι αλήθεια. Και το λέω με κάποια ανησυχία, λόγω της μακράς και θλιβερής εμπειρίας μου, που μου λέει ότι οι σκεπτικιστές της σχετικότητας θα πάρουν τη δήλωση αυτή ως μία δήλωση έξω από το σωστό πλαίσιο. Δεν πρέπει να λάβετε αυτή τη δήλωση ως ένδειξη ότι έχω κάποιες επιφυλάξεις για τις προβλέψεις της ειδικής σχετικότητας. Δεν κάνω αυτό. Η σχετικότητα είναι σωστή. Αυτό που είναι λάθος είναι η πιο συνηθισμένη ερμηνεία των εξισώσεων.

Τώρα, η αλήθεια είναι, η δήλωση ότι η μάζα ενός αντικειμένου αυξάνεται καθώς αυξάνεται η ταχύτητα, είναι ποιοτικά και απλοϊκά λογική. Όπως φαίνεται στην Εικ. 4, είναι πιο δύσκολο και απαιτεί περισσότερη ενέργεια (συγκεκριμένα 725 φορές περισσότερη) για να αυξηθεί η ταχύτητα ενός αντικειμένου από το 90% στο 95% της ταχύτητας του φωτός από ό, τι χρειάζεται για να πάει από το 0% στο 5% της ταχύτητας. Και είναι αδύνατο να επιταχυνθεί ένα αντικείμενο σε ταχύτητα μεγαλύτερη από την ταχύτητα του φωτός. Αλλά αυτές οι διαπιστώσεις δεν αφορούν στην μάζα. Πρόκειται για την αδράνεια. Και εδώ θα ήθελα να κάνω δύο επισημάνσεις. Πρώτον, σε χαμηλές ταχύτητες, η μάζα και η αδράνεια είναι στενά συνδεδεμένες. Δεύτερον, η μάζα είναι ένα ποσοτικοποιημένο μέγεθος, ενώ η αδράνεια είναι απλώς η έννοια ότι τα αντικείμενα αντιστέκονται στις αλλαγές της κίνησής τους.



Εικ. 4. Η θεωρία της σχετικότητας από τον Αϊνστάιν δείχνει ότι η σχέση μεταξύ ταχύτητας και ενέργειας είναι εξαιρετικά μη γραμμική και συχνά είναι εσφαλμένη ως προκαλούμενη από την αλλαγή μάζας ενός αντικειμένου. Τα σημεία δεδομένων είναι από μετρήσεις στην έξοδο ορισμένων από τους προ-επιταχυντές στα συγκροτήματα Fermilab Tevatron και CERN LHC.

Έτσι είναι πιο σωστό να πούμε ότι η αδράνεια αυξάνεται καθώς αυξάνεται η ταχύτητα, αλλά όχι η μάζα. Και οι φυσικοί, οι καθηγητές και οι εκλαϊκευτές της φυσικής, κατηγορούνται για αυτό το εννοιολογικό λάθος. Προέρχεται από τις δυσκολίες που προκύπτουν όταν εισάγουμε ως ενδιάμεσους φοιτητές στις μη διαισθητικές πτυχές της ειδικής σχετικότητας. Μετά τη διδασκαλία των μετασχηματισμών Lorentz, οι καθηγητές στρέφουν την προσοχή τους στην ενέργεια και την ορμή. Οι σχετικιστικές εξισώσεις για την ορμή, p και τη συνολική ενέργεια, E, είναι

(5)

όπου m είναι η μάζα, υ είναι η ταχύτητα, c είναι η ταχύτητα του φωτός και
Καθώς υ → c, γ → ∞. Αν  υ = 0, γ = 1. Έτσι, σε χαμηλές ταχύτητες, οι εξισώσεις ([5](http://viewonphysics.gr/?p=5877#id4062748902)) μπορούν να γραφτούν με το γνωστό και .

Κατά συνέπεια, επινοήθηκε ένα κατασκεύασμα που ονομάζεται σχετικιστική μάζα, η οποία είναι απλώς . Η μάζα ενός αντικειμένου σε κατάσταση ηρεμίας (δηλαδή όταν v = 0) ονομάζεται μάζα ηρεμίας, . Σε αυτή την προσέγγιση, μπορούμε να ανακτήσουμε τις γνωστές εξισώσεις ως και . Η εξοικείωση αυτών των εξισώσεων παρέχει ένα παιδαγωγικό δεκανίκι για τους φοιτητές καθώς εισάγονται στις μη-διαισθητικές προβλέψεις της ειδικής σχετικότητας. Στην πραγματικότητα, υπάρχει μόνο μια μάζα, η οποία είναι η μάζα ηρεμίας. Επειδή υπάρχει μία μάζα (αδράνειας), μπορεί να γραφτεί απλά ως m. Η αδράνεια στα σχετικιστικά συστήματα είναι .

Η ιδέα μιας μάζας που εξαρτάται από το σύστημα αναφοράς συχνά δεινοπαθεί από τους καλοπροαίρετους ανθρώπους, που οφείλεται σε κάποια παρανόηση της σχετικότητας. Θα μπορούσαν να συνδυάσουν τη σχετικιστική μάζα με, για παράδειγμα, τον νόμο της βαρύτητας του Νεύτωνα και να βρουν κάποια ανόητα αποτελέσματα. Αξίζει να σημειωθεί ότι υπάρχουν παθιασμένοι υποστηρικτές της έννοιας της σχετικιστικής μάζας και η συζήτηση σχετικά με την αξία της ιδέας μπορεί να βρεθεί στη βιβλιογραφία.

Υπάρχει μια άλλη εξίσωση σχετικότητας που προσφέρει μερικές ενδιαφέρουσες γνώσεις. Αυτή η εξίσωση σχετίζεται με την ενέργεια, την ορμή και τη μάζα ηρεμίας (η οποία τώρα βλέπουμε είναι η μόνη μάζα). Αυτή η εξίσωση είναι

(6)

Μπορούμε να απεικονίσουμε το κεντρικό της μήνυμα εκφράζοντας την εξίσωση πρώτα σε ένα σύστημα μονάδων στο οποίο όλες οι ταχύτητες εκφράζονται ως κλάσματα της ταχύτητας του φωτός (π.χ., c = 1) και κάνοντας λίγη άλγεβρα. Βλέπουμε λοιπόν ότι

(7)

Αυτή η εξίσωση είναι αληθινή σε οποιοδήποτε σύστημα αναφοράς, που απλά σημαίνει ότι αν μετρήσετε την ενέργεια και την ορμή ενός σωματιδίου σε οποιοδήποτε σύστημα, θα καθορίσετε τη μάζα του. Αυτή η δήλωση είναι πιθανώς μαθηματικά προφανής, καθώς η μάζα ηρεμίας είναι ένας μοναδικός αριθμός. Αλλά μπορεί να επαληθεύεται με τη χρήση των μετασχηματισμών Lorentz για την ενέργεια και την ορμή και μπορεί κανείς να επιβεβαιώσει ότι η μάζα είναι κατά Larentz αναλλοίωτη, η ίδια σε οποιοδήποτε σύστημα αναφοράς.

Αυτή η εξίσωση είναι πολύ σημαντική, καθώς στην αριστερή πλευρά έχετε αναλλοίωτη Lorentz, ενώ στη δεξιά πλευρά υπάρχουν δυναμικές μεταβλητές εξαρτώμενες από το σύστημα αναφοράς. Επίσης, καθιστά σαφή τη σχέση μεταξύ ενέργειας, ορμής και μάζας. Αυτή η σύνδεση θα γίνει σημαντική λίγο αργότερα σε αυτό το άρθρο.

**Γενική σχετικότητα**

Η θεωρία της ειδικής σχετικότητας του Αϊνστάιν τοποθετείται σε ένα περιβάλλον που στερείται βαρύτητας. Χρησιμοποιείται γενικά σε μη επιταχυνόμενα συστήματα αναφοράς, αν και οι εξισώσεις μπορούν να επεκταθούν.

Ωστόσο, το 1915, ο Αϊνστάιν πρόσθεσε την βαρύτητα στην προηγούμενη θεωρία του και το αποτέλεσμα είναι η γενική σχετικότητα. Ο Αϊνστάιν εφάρμοσε την αρχή της ισοδυναμίας, η οποία υποθέτει ότι υπήρχε μια πλήρης ισοδυναμία μεταξύ ενός πεδίου βαρύτητας και ενός επιταχυνόμενου συστήματος αναφοράς. Εν ολίγοις, το γεγονός ότι η αδρανειακή και η βαρυτική μάζα είναι ίδιες είναι ένα απολύτως βασικό συστατικό της γενικής σχετικότητας, οδηγώντας στις εκπληκτικές συνέπειες της επιβράδυναης του χρόνου σε περιοχές υψηλού βαρυτικού πεδίου και απαιτώντας ότι ο χώρος και ο χρόνος είναι εύκαμπτα μεγέθη.

Ενώ μια λεπτομερής συζήτηση είναι πέρα ​​από τις προθέσεις αυτού του άρθρου, αξίζει να σημειωθεί ότι υπάρχουν τρεις εκδοχές της αρχής της ισοδυναμίας, με λεπτές διαφορές.

* Η ***ασθενής ισοδυναμία*** προϋποθέτει την ισοδυναμία της αδρανειακής και της βαρυτικής μάζας. Επιπλέον, τα αποτελέσματα είναι τοπικά, δηλαδή ισχύουν σε όγκους αρκετά μικρούς ώστε να μην είναι εμφανείς οι κλίσεις στο βαρυτικό πεδίο. Τέλος, τα αντικείμενα συγκολλούνται μόνο από δυνάμεις χωρίς βαρύτητα, π.χ., η ενέργεια της βαρυτικής δέσμευσης μπορεί να αγνοηθεί.
* Η ***ισοδυναμία του Αϊνστάιν*** προϋποθέτει τις αρχές της ασθενούς ισοδυναμίας και προσθέτει την απαίτηση ότι το αποτέλεσμα ενός μη-βαρυτικού πειράματος μέσα σε ένα εργαστήριο που πέφτει ελεύθερα, είναι ανεξάρτητο τόσο από την ταχύτητά του όσο και από τη θέση του στο χωροχρόνο. Αυτό ισοδυναμεί με το συνδυασμό της αρχής της ασθενούς ισοδυναμίας και της αναλλοίωτης Lorentz.
* Η ***ισχυρή ισοδυναμία*** υποδηλώνει μερικές από τις αρχές της ισοδυναμίας του Αϊνστάιν, αλλά χαλαρώνει κάποιες συνθήκες. Η πρώτη αλλαγή είναι ότι τα εξεταζόμενα αντικείμενα μπορούν να συγκρατηθούν από βαρυτικές δυνάμεις. Επιτρέπει επίσης ότι ενώ οι νόμοι της βαρύτητας είναι ανεξάρτητοι της ταχύτητας και της θέσης, η κίνηση ενός δοκιμαστικού σώματος μπορεί να εξαρτάται και από τα δύο.

Οι αρχές αυτές έχουν ήδη δοκιμαστεί και δεν έχει υπάρξει ένδειξη ότι είναι ψευδείς. Οι δοκιμές της αρχής της *ασθενούς ισοδυναμίας* περιλαμβάνουν τις ίδιες αρχές με εκείνες που παίρνουμε σε ένα εργαστήριο εισαγωγικής φυσικής, όπως η ρίψη δύο διαφορετικών βαρών και η παρατήρηση ότι πέφτουν με την ίδια ταχύτητα. Το πιο δραματικό παράδειγμα είναι, όταν το 1971 ο αστροναύτης Ντέιβιντ Σκοτ ​​έριξε ταυτόχρονα ένα φτερό και ένα σφυρί στη Σελήνη.(video παρακάτω)

*Στο τέλος της τελευταίας βόλτας στη Σελήνα του Απόλλωνα 15, ο διοικητής Ντέιβιντ Σκοτ (που απεικονίστηκε παραπάνω) έκανε μια ζωντανή επίδειξη για τις τηλεοπτικές κάμερες. Έβαλε ένα σφυρί και ένα φτερό στο ίδιο ύψος και τα έριξε την ίδια στιγμή. Και τα δύο έπεσαν μαζί.*

Οι δοκιμές της αρχής της *ισοδυναμίας του Αϊνστάιν* απαιτούν πρώτα την επικύρωση της ασθενούς αρχής, αλλά απαιτούν επίσης δοκιμές ώστε οι λόγοι των αδιάστατων σταθερών και των λόγων των μαζών να είναι σταθεροί με το χρόνο. Οι δοκιμές αυτού του τύπου περιλαμβάνουν την αναλογία μάζας ηλεκτρονίου προς μάζα πρωτονίου ή λεπτής σταθερής υφής, όπως αποδεικνύεται από την εξέταση μακρινών κβάζαρ ή από πληροφορίες από τον αντιδραστήρα φυσικής σχάσης του Oklo, μια περιοχή στη Γκαμπόν στην οποία μια πυρηνική αντίδραση συνέβη σε ορυχείο ουρανίου περίπου δύο δισεκατομμύρια χρόνια πριν. Μια άλλη δοκιμή της ισοδυναμίας του Αϊνστάιν είναι το πείραμα Pound-Rebka, το οποίο εξετάζει την ομοιομορφία των νόμων της φυσικής όταν αντικείμενα μετατοπίζονται. Αυτή η μέθοδος μπορεί επίσης να ελέγξει την βαρυτική μετατόπιση στο ερυθρό.

Οι δοκιμές της αρχής της *ισχυρής ισοδυναμίας* αναζητούν μεταβολές της σταθεράς βαρύτητας G ως συνάρτηση του χρόνου. Μία τέτοια δοκιμή, που χρησιμοποιείται από τη NASA, παρακολουθεί την απόσταση μεταξύ της Γης και της Σελήνης. Άλλες δοκιμές αναζητούν μια «πέμπτη δύναμη», που σημαίνει μεταβολή στη φύση της βαρύτητας που διαφέρει από την αναμενόμενη συμπεριφορά της ως προς το .

Η επιτυχία της γενικής σχετικότητας μας υποχρεώνει να καταλήξουμε στο συμπέρασμα ότι η ισοδυναμία της αδρανειακής και βαρυτικής μάζας, που εισήχθη αρχικά στις τάξεις εισαγωγικής φυσικής, συνδέεται στενά κυριολεκτικά με την υφή του ίδιου του σύμπαντος. Αλλά δεν ξέρουμε γιατί. Είναι απλώς ένα επαληθευμένο συμπέρασμα της γενικής σχετικότητας και το γεγονός ότι η αδράνεια συνδέεται με τη βαρύτητα με τρόπους που διαφέρουν από τις άλλες δυνάμεις, είναι μια πραγματική ένδειξη για το τι μπορεί να μοιάζει μια τελική θεωρία της φυσικής.

**Το πεδίο Higgs**

Μέχρι στιγμής, η συζήτηση περιορίστηκε στη συμπεριφορά της μάζας, αλλά δεν ασχολήθηκε με την προέλευση της μάζας. Για να γίνει αυτό, θα πρέπει να επικαλεστείτε τη φυσική που αποκαλύφθηκε το τελευταίο μισό αιώνα.

Στη δεκαετία του ’60, οι φυσικοί διερευνούσαν τρόπους για να αποδείξουν ότι η ασθενής δύναμη και η ηλεκτρομαγνητική δύναμη έχουν μια κοινή προέλευση. Επικαλούμενοι μια ασθενή υπερφόρτιση και ισoστροβιλισμό, οι ερευνητές κατάφεραν να ενώσουν τις δύο στην ηλεκτρασθενή δύναμη, αν και η προσπάθειά τους φάνηκε να περιέχει ένα θανατηφόρο ελάττωμα. Τα σωματίδια που μεσολαβούν στις ασθενείς και τις ηλεκτρομαγνητικές δυνάμεις βρέθηκαν να είναι άμαζα και έτσι είχαν άπειρη εμβέλεια. Ενώ ικανοποιήθηκε για το φωτόνιο, αυτή η πρόβλεψη ήταν σε έντονη διαφωνία με τις μετρήσεις του εύρους της ασθενούς δύναμης, η οποία είναι της τάξεως των μέτρων. Η κατάσταση επιλύθηκε το 1964 όταν μια ομάδα επιστημόνων, μεταξύ των οποίων οι Robert Brout, Francois Englert και Peter Higgs, πρότειναν βαθμωτά πεδία που αλληλεπιδρούν με τα θεωρητικά προβλεπόμενα ηλεκτρασθενή μποζόνια και παράγουν το πειραματικά παρατηρούμενο φωτόνιο της ηλεκτρομαγνητικής δύναμης και τα βαριά μποζόνια W & Z της ασθενούς δύναμης. Η ιστορία αυτών των γεγονότων λέγεται σε ένα εξαιρετικό βιβλίο του Ian Sample.

Το πεδίο της δημιουργίας μάζας είναι κβαντισμένο, με αποτέλεσμα ένα προβλεπόμενο σωματίδιο που ονομάζεται τώρα μποζόνιο Higgs. Η ανακάλυψη του μποζονίου Higgs ανακοινώθηκε το 2012. Στα επόμενα χρόνια, οι μετρήσεις έχουν ενισχύσει το συμπέρασμα ότι έχουμε ανακαλύψει το μποζόνιο Higgs που προβλεπόταν πριν από μισό αιώνα.

Ωστόσο παραμένουν μυστήρια στη θεωρία Higgs. Ενώ τώρα πιστεύουμε ότι το πεδίο Higgs μεταδίδει μάζα στα κουάρκ, φορτισμένα λεπτόνια και μερικά μποζόνια που μεταφέρουν δύναμη, δεν καταλαβαίνουμε πλήρως γιατί κάποια σωματίδια έχουν περισσότερη μάζα από άλλα. Στο πιο απλή εκδοχή, κάθε σωματίδιο πρέπει να έχει ένα είδος φορτίου που αλληλεπιδρά με το πεδίο Higgs. Εκείνα που αλληλεπιδρούν περισσότερο με το πεδίο Higgs καταλήγουν να έχουν περισσότερη μάζα. Υπάρχει ένα σημαντικό σημείο που πρέπει να τονίσουμε εδώ. Συχνά λέγεται ότι τα υψηλότερης μάζας αντικείμενα αλληλεπιδρούν περισσότερο με το πεδίο Higgs, αλλά αυτή η αιτιότητα λειτουργεί ανάποδα. Η αλληλεπίδραση είναι η αιτία και η μάζα είναι το αποτέλεσμα. Έτσι, το φορτίο Higgs είναι μια πιο θεμελιώδης ιδιότητα από τη μάζα. Δεν υπάρχει επαληθεύσιμη θεωρία που να προβλέπει αυτές τα φορτία εκ των προτέρων.

**Η ισχυρή δύναμη**

Με την ανακάλυψη του μποζονίου Higgs, θα μπορούσε κανείς να σκεφτεί ότι η κατανόησή μας για την προέλευση της μάζας μπορεί να πλησιάζει την πληρότητα. Ωστόσο, σε αυτό το θέμα, οι πρόσφατες διαδιδόμενες επιστημονικές εξελίξεις έχουν κάνει μια μεγάλη κακομεταχείριση για τους θεατές της επιστήμης αλλά και για τους καθηγητές φυσικής και άλλους αρκετά εξειδικευμένους καταναλωτές της επιστήμης. Αποδεικνύεται ότι το πεδίο Higgs *δεν* είναι η αιτία της μάζας του μεγαλύτερου μέρους της συνηθισμένης ύλης.

Αν θέλετε να καταλάβετε από πού προέρχεται η μάζα σας, ίσως θα έπρεπε να εξετάσετε τα άτομα από τα οποία συγκροτήστε. Και, αν αθροίσετε τη μάζα των ατόμων, θα φτάσετε σε μια τιμή που είναι ίση με τη μάζα σας. Αν σκάβετε πιο βαθιά στο άτομο, συναντάτε πρωτόνια, νετρόνια και ηλεκτρόνια. Τα πρωτόνια και τα νετρόνια βρίσκονται στον ατομικό πυρήνα και έχουν παρόμοια μάζα, ώστε να τα συσσωρεύουμε σε μια κοινή κατηγορία που ονομάζεται νουκλεόνια. Αντίθετα, το ηλεκτρόνιο έχει μάζα περίπου 0,05% εκείνης του νουκλεονίου και ως εκ τούτου η συνεισφορά μάζας των ηλεκτρονίων είναι αμελητέα για συνήθη ύλη. Ωστόσο, εάν προσθέσετε τη μάζα των νουκλεονίων σας, θα πάρετε έναν αριθμό που είναι πολύ κοντά στη μάζα σας.

Σκάβοντας βαθύτερα στα μικρότερα γνωστά σωματίδια της ύλης, γνωρίζουμε ότι τα νουκλεόνια περιέχουν τρία κουάρκ. Μπορούμε λοιπόν να περιμένουμε ότι κάθε κουάρκ έχει μάζα περίπου του ενός τρίτου από εκείνη ενός πυρήνα. Εντούτοις, εδώ η κατάσταση αρχίζει να γίνεται ενδιαφέρουσα. Εάν αθροίσετε τη μάζα των κουάρκ που περιέχονται στο σώμα σας, φτάνετε σε μια μάζα που είναι 1% ή 2% της μάζας σας. Αυτό έρχεται σε πλήρη αντίθεση με αυτό που συμβαίνει όταν προσθέτουμε τις μάζες των συστατικών των πυρήνων σας.

Επομένως, από πού προέρχεται η μάζα σας; Σκεφτείτε τι συμβαίνει μέσα στο νουκλεόνιο. Στο απλούστερο μοντέλο, έχετε τρία κουάρκ δεσμευμένα σε μια σφαίρα με ακτίνα της τάξης του femtometer(). Ταξιδεύουν κοντά στην ταχύτητα του φωτός. Έτσι, χρησιμοποιώντας την εξίσωση ([5](http://viewonphysics.gr/?p=5877#id4062748902)), βλέπουμε ότι το είναι μεγάλο και επομένως έχουν σημαντική ενέργεια, συγκεκριμένα από τα είδη της κινητικής. Επιπλέον, αυτά τα σωματίδια συμπιέζονται σε ένα μικρό όγκο και επίσης ταξιδεύουν κοντά στην ταχύτητα του φωτός. Αυτό συνεπάγεται εξαιρετικά ισχυρές δεσμευτικές δυνάμεις, οι οποίες οδηγούν σε μια εξαιρετική ποσότητα δυναμικής ενέργειας σε κάθε νουκλεόνιο.

Επί πλέον, όταν περιλάβουμε την κίνηση των κουάρκ ενός σταθερού νουκλεονίου, βλέπουμε ότι η μέσες ροπές τους δίνουν άθροισμα μηδέν. Συνεπώς, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε την εξίσωση ([7](http://viewonphysics.gr/?p=5877#id1378725440)) και να διαπιστώνουμε ότι από αυτήν την τεράστια ποσότητα ενέργειας στην πραγματικότητα προέρχεται το 98-99% της μάζας σας. Με λίγα λόγια, η γνωστή μάζα προκύπτει σχεδόν εξ ολοκλήρου από την κινητική και τη δυναμική ενέργεια των κουάρκ μέσα στο σώμα σας.

Η εναπομένουσα μάζα προέρχεται από την αλληλεπίδραση των φορτίων Higgs των κουάρκ και των λεπτονίων με το πεδίο Higgs κατά τρόπο ανάλογο με τις αλληλεπιδράσεις φορτίων και ηλεκτρικών πεδίων, από όπου προκύπτει δυναμική ενέργεια. Έτσι, είμαστε υποχρεωμένοι να συμπεράνουμε ότι δεν είναι αρκετά σωστό να πούμε ότι η μάζα και η ενέργεια είναι ισοδύναμες. Η πιο σωστή δήλωση είναι ότι η μάζα δεν είναι τίποτα περισσότερο από συγκεντρωμένη ενέργεια. Συνδυάζοντας αυτή την συνειδητοποίηση με την παρατηρούμενη επιτυχία της γενικής σχετικότητας, μπορούμε να συμπεράνουμε ότι η συμπυκνωμένη ενέργεια μπορεί να παραμορφώσει τον χωροχρόνο.

**Το αίνιγμα που παραμένει**

Δεδομένης της συνήθους εξοικείωσής μας με το θέμα, η μελέτη της μάζας φαίνεται να είναι μάλλον κάτι πεζό. Αλλά, όπως είδαμε, σε βαθύ και θεμελιώδες επίπεδο, είναι πιθανό ότι μελλοντικές μελέτες για τη φύση της μάζας θα συνεχίσουν να μας εκπλήσσουν. Ακολουθούν ορισμένα ερωτήματα που δεν έχουν ακόμη απαντηθεί.

Ενώ γνωρίζουμε την προέλευση της συνηθισμένης μάζας των ατόμων, γνωρίζουμε επίσης ότι η συνηθισμένη ύλη είναι μόνο το 5% της ύλης του σύμπαντος. Σύμφωνα με τις σύγχρονες εκτιμήσεις (που έγινan δημοφιλείς από την Vera Rubin, Εικ. 5), η σκοτεινή ύλη περιλαμβάνει πενταπλάσια μάζα. Τεχνικά, η σκοτεινή ύλη δεν έχει ανακαλυφθεί, οπότε πρέπει να είμαστε προσεκτικοί, υποθέτοντας όμως ότι υπάρχει, Δεν γνωρίζουμε την προέλευση της μάζας αυτής της εξωτικής ουσίας. Είναι η σκοτεινή ύλη ένα σύνθετο αντικείμενο όπως το νουκλεόνιο; Η σκοτεινή ύλη παίρνει τη μάζα της από την αλληλεπίδραση με το πεδίο Higgs; Ή υπάρχει εδώ ακόμα ένα φαινόμενο για δουλειά;



Εικ. 5. Η Vera Rubin έκανε βασικές μετρήσεις της ταχύτητας τροχιάς των αστεριών μέσα στους γαλαξίες ως συνάρτηση της απόστασης τους από το γαλαξιακό κέντρο. Ο πρόσφατος θάνατός της σημαίνει ότι δεν θα δει την απάντηση στις ερωτήσεις που έθεσαν οι ανακαλύψεις της.

Ένα δεύτερο μυστήριο περιλαμβάνει τα νετρίνα. Τα νετρίνα είναι ένα γνωστό μτήμα στο πάνθεον της συνηθισμένης ύλης, αλλά από εκεί πού παίρνουν τη μάζα τους απλά δεν είναι γνωστό. Θα μπορούσαν να πάρουν τη μάζα τους από αλληλεπιδράσεις με το πεδίο Higgs, αλλά φαίνεται να είναι διαφορετικά από τα άλλα κουάρκ και τα λεπτόνια. Το φωτόνιο και το γλουόνιο (το σωματίδιο που συνδέει μαζί τα κουάρκ) είναι άμαζα, ενώ το ηλεκτρόνιο, το πιο ελαφρύ από τα φορτισμένα κουάρκ και τα λεπτόνια, έχει μάζα . Το κορυφαίο κουάρκ έχει μάζα περίπου . Αντίθετα, το άθροισμα της μάζας των τριών γνωστών «γεύσεων» των νετρίνων είναι κάτω από 0,3 eV.

Δεδομένου ότι η μάζα των φορτισμένων λεπτονίων, κουάρκ και μποζονίων, που μεταφέρουν δύναμη, φαίνεται να είναι της τάξης των MeV έως μερικών εκατοντάδων GeV, η πολύ χαμηλή αλλά μη μηδενική μάζα των νετρίνων καθιστά τουλάχιστον δυνατό η  μάζα τους να προκύπτει από διαφορετική πηγή. Τι μπορεί να είναι αυτός ο μηχανισμός είναι άγνωστο, αλλά έχουν προταθεί αρκετές δημιουργικές ιδέες. Σε μια πρόταση, υπάρχει μια άλλη κατηγορία από νετρίνα που δεν έχουν ανακαλυφθεί ακόμα, αλλά πολύ μεγάλης μάζας, που ονομάζονται στείρα νετρίνα. Σε αντίθεση με τα συνηθισμένα νετρίνα που αλληλεπιδρούν μέσω της ασθενούς δύναμης, έχουν μικρή μάζα και έχουν μόνο αριστερόστροφη περιστροφή, τα στείρα νετρίνα δεν αλληλεπιδρούν μέσω της ασθενούς δύναμης, είναι τεράστια και περιστρέφονται δεξιόστροφα. Η μάζα των συνηθισμένων και στειρωμένων νετρίνων σχετίζεται μέσω μιας εξίσωσης γενικευμένης μορφής του τύπου . Επομένως, εάν μία μάζα ανεβαίνει (π.χ. των στείρων νετρίνων), η μάζα του άλλου κατεβαίνει. Αυτή η σύνδεση συνήθως αποκαλείται μηχανισμός τράμπα

Τέλος, υπάρχει ένας τεράστιος ελέφαντας στο δωμάτιο της θεωρητικής φυσικής. Η γενική σχετικότητα δεν λειτουργεί στον κβαντικό κόσμο. Έτσι, ενώ η ισοδυναμία της αδρανειακής και βαρυτικής μάζας έχει αποδειχθεί σε μεγάλες κλίμακες, οδηγώντας στην ελατότητα του χώρου και του χρόνου και στη θεωρία της γενικής σχετικότητας, δεν γνωρίζουμε τι συμβαίνει στον μικρόκοσμο. Γνωρίζουμε ότι η υποατομική μάζα είναι πραγματικά απλή ενέργεια και μετρήσαμε την αδρανειακή μάζα των υποατομικών σωματιδίων, αλλά δεν γνωρίζουμε πώς κυβερνάται η βαρύτητα στο βασίλειο του μικρόκοσμου. Έτσι, θα μπορούσε η ισοδυναμία αδρανειακής και βαρυτικής μάζας / ενέργειας να σπάσει όταν γραφτεί μια σωστή θεωρία της κβαντικής βαρύτητας. Απλά δεν το ξέρουμε.

Η μάζα είναι σίγουρα οικεία έννοια, αλλά είναι αυτή που συχνά παρεξηγείται σε ένα θεμελιώδες επίπεδο. Και, καθώς επιστρέφουμε ξανά και ξανά, θα συνεχίσει να μας λέει ακόμη περισσότερα για τα βαθύτερα μυστικά του σύμπαντος.