

# ΜΑΖΑ

Η κλασσική, η σχετικιστική και η κβαντική προσέγγιση

Θωμάς Μελίστας Α΄3

# Η έννοια

- ▣ Σύμφωνα με την κλασική μηχανική και την γενική αντίληψη η μάζα είναι μία εγγενής ιδιότητα των φυσικών σωμάτων. Μάζα είναι η ποσότητα της ύλης που περιέχεται σε ένα σώμα.
- ▣ Μπορούμε να διακρίνουμε την μάζα σε αδρανειακή (A.M.) και σε βαρυτική (B.M.).

# A.M.

- ▣ A.M. : Στο πλαίσιο της κλασικής μηχανικής, η **αδρανειακή μάζα** είναι ένα μέτρο της **αδράνειας** ενός σώματος, που είναι η **αντίσταση** που προβάλλει ένα σώμα σε κάθε αλλαγή της κινητικής του κατάστασης όταν του ασκείται μία δύναμη.
- ▣ Στην κλασική μηχανική, η **αδρανειακή μάζα** εμφανίζεται ως σταθερά αναλογίας στον 2ο νόμο του Νεύτωνα:
  - ▣  $F = ma$
- ▣ Όσο μεγαλύτερη είναι η **αδρανειακή μάζα** ενός σώματος, τόσο μικρότερη επιτάχυνση υφίσταται από δεδομένη δύναμη που θα του ασκηθεί (βάσει του τύπου  $a = \frac{F}{m}$ ).

# B.M.

▣ **B.M.** : Η **βαρυτική μάζα** είναι ένα μέτρο του πόσο ισχυρή είναι η **αλληλεπίδραση** ενός σώματος με τη βαρυτική δύναμη. Στο ίδιο βαρυτικό πεδίο, ένα σώμα με μικρότερη **βαρυτική μάζα** δέχεται μικρότερη δύναμη από ένα σώμα με μεγαλύτερη **βαρυτική μάζα**.

Στα πλαίσια της κλασικής βαρυτικής θεωρίας κατά Νεύτωνα, η **βαρυτική μάζα** εμφανίζεται στην έκφραση της βαρυτικής δύναμης βάσει του νόμου της παγκόσμιας έλξης:  $F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$

# Η αρχή της ισοδυναμίας

- Η αρχή της ισοδυναμίας (ΑΙ) προσβέυει ότι η κίνηση ενός σώματος, όπως παρατηρείται από ένα μη αδρανειακό (επιταχυνόμενο) σύστημα αναφοράς, είναι η ίδια όπως και η κίνησή του σε ένα αδρανειακό σύστημα αναφοράς, παρουσία όμως ενός (κατάλληλου) βαρυτικού πεδίου. Με άλλα λόγια, *ένα μη αδρανειακό σύστημα αναφοράς είναι ισοδύναμο με ένα βαρυτικό πεδίο ορισμένης μορφής*. Σύμφωνα με την ΑΙ, οι νόμοι της μηχανικής είναι ταυτόσημοι μεταξύ ενός συστήματος αναφοράς που βρίσκεται εντός πεδίου βαρύτητας έντασης  $g$  και ενός άλλου που επιταχύνεται με επιτάχυνση  $a=-g$ . Συνεπώς, η ΑΙ απαιτεί οι δύο μάζες (**αδρανειακή** και **βαρυτική**) να είναι ίσες μεταξύ τους. Στην ΑΙ βασίστηκε και ο Αϊνστάιν για να αναπτύξει την γενική θεωρία της σχετικότητας, στα πλαίσια της οποίας δεχόμαστε αξιωματικά ότι η αδρανειακή μάζα ταυτίζεται με τη βαρυτική.
- Πειραματικά, η ισότητα των δύο μαζών έχει επιβεβαιωθεί με ακρίβεια 13ου ψηφίου

# Η αρχή της ισοδυναμίας

$$g = a$$



gravitational  
mass



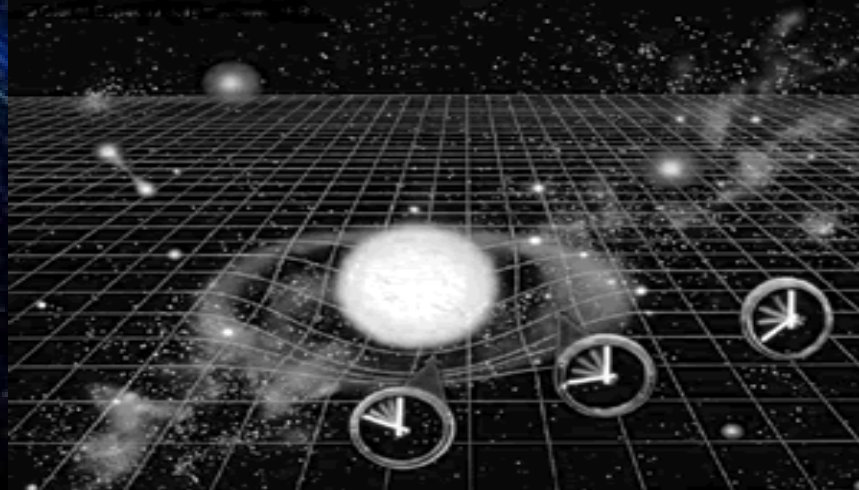
inertial  
mass

# Σχετικιστική και κβαντική προσέγγιση

- Μπορεί η κλασσική Νευτώνεια φυσική να εξηγεί επιτυχώς την καθημερινότητά μας και τις κινήσεις σωμάτων με μικρές ταχύτητες αλλά όταν εφαρμόζεται **σε σωματίδια μικρού μεγέθους** ή **σε κινήσεις με μεγάλες ταχύτητες**, συγκρίσιμες με αυτή του φωτός ( $c$ ) δεν έχει απολύτως καμία ισχύ.
- Για αυτόν τον λόγο αναπτύχθηκαν νέες θεωρίες όπως **η κβαντομηχανική για τη συμπεριφορά σωματιδίων** και **η σχετικότητα για ταχύτητες συγκρίσιμες με αυτή του φωτός**.

# Ειδική σχετικότητα

- Η ειδική σχετικότητα είναι η θεωρία που διατυπώθηκε από τον Άλμπερτ Αϊνστάιν το 1905 και προκύπτει από την αρχή του Αϊνστάιν, σύμφωνα με την οποία, *η ταχύτητα του φωτός είναι ίδια για όλους τους αδρανειακούς παρατηρητές, ανεξάρτητα από τη σχετική τους ταχύτητα*. Σύμφωνα με την γενικευμένη αρχή της σχετικότητας, οι φυσικοί νόμοι που ισχύουν σε ένα αδρανειακό σύστημα αναφοράς έχουν την ίδια μορφή σε οποιοδήποτε άλλο αδρανειακό σύστημα αναφοράς.





# Ειδική σχετικότητα

- ▣ Οι άμεσες συνέπειες αυτής της θεωρίας είναι η **κατάργηση του απόλυτου χρόνου**, καθώς δυο γεγονότα ταυτόχρονα για έναν παρατηρητή είναι ετεροχρονισμένα για έναν άλλον που κινείται ως προς τον πρώτο. Επίσης **ο χρόνος δεν ρέει με τον ίδιο ρυθμό** για δύο διαφορετικούς αδρανειακούς παρατηρητές, συγκεκριμένα εμφανίζεται διαστολή του χρόνου, κατά την οποία σύμφωνα με έναν ακίνητο παρατηρητή, **ένα κινούμενο ρολόι είναι πιο αργό από ένα ακίνητο**. Ακόμα ένα αποτέλεσμα είναι η **συστολή του μήκους**, δηλαδή τα αντικείμενα παρατηρούνται να μικραίνουν στην κατεύθυνση που κινούνται σε σχέση με τον παρατηρητή. Οι αλλαγές αυτές υπολογίζονται με τους μετασχηματισμούς Λόρεντζ :

$$t' = \frac{t - \frac{v}{c^2}x}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$
$$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

# Ειδική σχετικότητα

- ▣ Οι πιο σημαντικές ίσως όμως συνέπειες της θεωρίας αυτής είναι: πως η αδρανειακή μάζα ενός κινούμενου σώματος αυξάνεται καθώς αυξάνεται και η ταχύτητά του.
- ▣ Ας φανταστούμε ένα σώμα ορισμένης μάζας, που κινείται κατά μήκος μιας ευθείας γραμμής και υφίσταται τη δράση μιας εξωτερικής δύναμης κατά την κατεύθυνση της κίνησης του. Για την *κλασική μηχανική*, η δύναμη είναι *ανάλογη* με την *αλλαγή της ταχύτητας*. Για την *θεωρία της σχετικότητας*, ο νόμος αυτός ισχύει προσεγγιστικά και μόνο για μικρές ταχύτητες. Για αυτήν, *όσο πιο πολύ πλησιάζει μια ταχύτητα την ταχύτητα του φωτός, τόσο πιο δύσκολο είναι να αυξηθεί*. Κι όταν μια ταχύτητα είναι ίση με του φωτός, είναι αδύνατο να την αυξήσουμε περισσότερο.
- ▣ Ένα ακίνητο σώμα έχει ορισμένη μάζα, που ονομάζεται μάζα ηρεμίας ( $m_0$ ). Ένα σώμα αντιπαρατάσσει στην αλλαγή της ταχύτητας *μεγαλύτερη αντίσταση*, όχι μόνο αν η *μάζα ηρεμίας* του είναι μεγαλύτερη, αλλά κι αν η *ταχύτητα του είναι μεγαλύτερη* και γίνεται απείρως μεγάλη, όταν η ταχύτητα πλησιάζει την ταχύτητα του φωτός.

# Ειδική σχετικότητα

- ▣ Στη σχετικιστική μηχανική, η μάζα ενός σώματος εξαρτάται από το σύστημα αναφοράς για το οποίο μιλάμε και αλλάζει όταν εκείνο κινείται με σχετικιστικές ταχύτητες. Συγκεκριμένα, η μάζα εξαρτάται από την ταχύτητα βάσει του τύπου: 
$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{u}{c}\right)^2}}$$
- ▣ όπου  $m_0$  η μάζα ηρεμίας του σώματος, που ισούται με τη μάζα που μετράει ένας παρατηρητής για τον οποίο το σώμα βρίσκεται σε ηρεμία. Όσο μεγαλύτερη είναι η ταχύτητα ενός σώματος ως προς κάποιο αδρανειακό σύστημα αναφοράς, τόσο αυξάνεται η μάζα του. Στην οριακή περίπτωση όπου  $u \rightarrow c$  η μάζα του σώματος τείνει στο άπειρο και η επιτάχυνσή του στο μηδέν, αποτρέποντας το σώμα από το να φθάσει ποτέ την ταχύτητα του φωτός.
- ▣ Όταν η ταχύτητα είναι πολύ μικρότερη από την ταχύτητα του φωτός, μπορούμε να αγνοήσουμε όρους της τάξης του  $(u/c)^2$ . Στην περίπτωση αυτή, η μάζα ηρεμίας  $m_0$  ταυτίζεται (για κάθε πρακτικό σκοπό) με τη μάζα αδράνειας  $m$ .

# Ειδική σχετικότητα

Με βάση τα προηγούμενα προκύπτει κάτι που άλλαξε τα πιστεύω και τη νοοτροπία των φυσικών του 20<sup>ου</sup> και 21<sup>ου</sup> αιώνα.

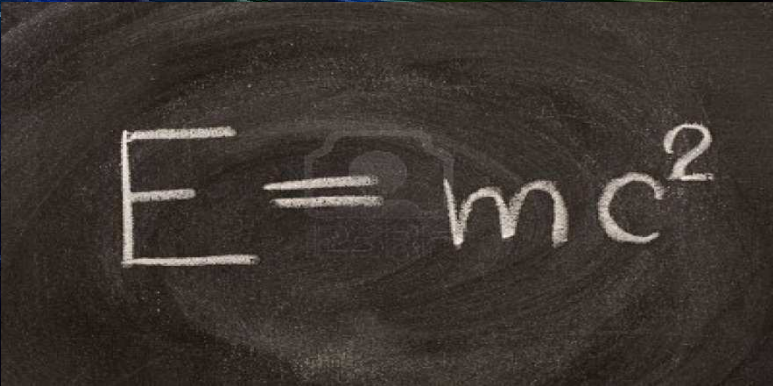
Η θεωρία της σχετικότητας συνάγει, λοιπόν, από τη θεμελιώδη της παραδοχή ότι η κινητική και γενικά κάθε ενέργεια αντιστέκεται στην αλλαγή της κίνησης. Κάθε ενέργεια συμπεριφέρεται όπως η ύλη.

Σύμφωνα με τη θεωρία της σχετικότητας δεν υπάρχει ουσιώδης διάκριση ανάμεσα στη μάζα και την ενέργεια. Η ενέργεια έχει μάζα και η μάζα αντιπροσωπεύει ενέργεια. Κι αντί για δυο νόμους διατήρησης (ενέργειας και μάζας), έχουμε ένα μονάχα, το νόμο για τη μάζα-ενέργεια.

Δηλαδή με λίγα λόγια, **η μάζα είναι απλά μια μορφή ενέργειας.**

# Ειδική σχετικότητα

- ▣ Αυτός ο απολύτως σωστός χαρακτηρισμός της μάζας ερχόταν σε αντίθεση με την κλασική πεποίθηση και την φυσική μέχρι τότε, η οποία θεωρούσε δεδομένο πως η μάζα και η ενέργεια είναι διαφορετικές έννοιες και δεν υπάρχει κάποια σύνδεση μεταξύ τους, όμως η ισοδυναμία μάζας-ενέργειας αποδείχτηκε επιτυχώς και οδήγησε στην διασημότερη εξίσωση :

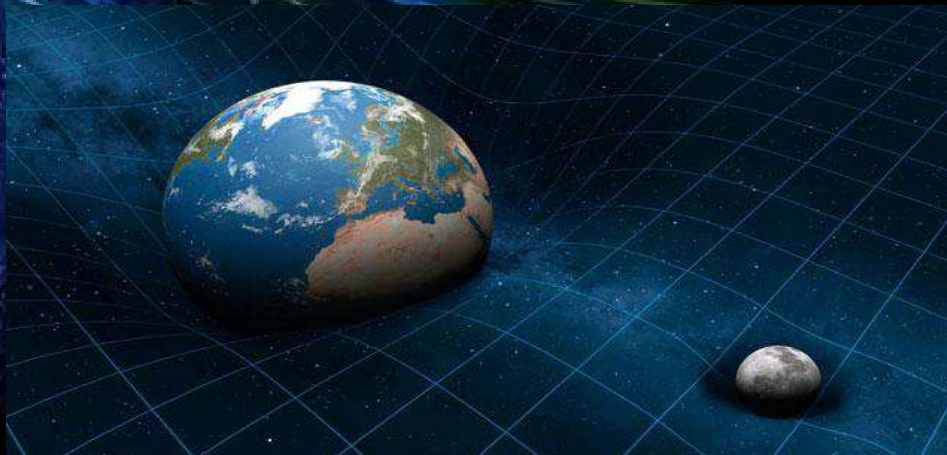

$$E = mc^2$$

# Γενική σχετικότητα

- Ο Αϊνστάιν αργότερα συμπλήρωσε την **ειδική θεωρία της σχετικότητας** (που ίσχυε για αδρανειακά συστήματα) με την **γενική θεωρία της σχετικότητας** (που όπως αναφέραμε νωρίτερα βασίστηκε στην αρχή της ισοδυναμίας) έτσι ώστε να έχει ισχύ και σε επιταχυνόμενα συστήματα. Η γενική σχετικότητα αναπτύχθηκε την περίοδο 1907-1915 και ήταν μια θεωρία βαρύτητας που αντικατέστησε επιτυχώς τη Νευτώνεια εικόνα για τη βαρύτητα. Σύμφωνα με τη θεωρία αυτή, οι καταστάσεις επιταχυνόμενης κίνησης και ηρεμίας σε ένα βαρυτικό πεδίο είναι ταυτόσημες. Το αποτέλεσμα της ιδέας αυτής είναι ότι η ελεύθερη πτώση είναι αδρανειακή κίνηση σε μη ευκλείδειο χώρο. Με άλλα λόγια, **ένα αντικείμενο σε ελεύθερη πτώση, πέφτει επειδή αυτός είναι ο τρόπος με τον οποίο τα αντικείμενα κινούνται όταν δεν ασκείται πάνω τους δύναμη, αντί να πέφτει λόγω της δύναμης της βαρύτητας, όπως συμβαίνει στην κλασική μηχανική**. Αυτό είναι ασύμβατο με την κλασική μηχανική και την ειδική σχετικότητα, επειδή σε αυτές τις θεωρίες αντικείμενα που κινούνται αδρανειακά δε μπορούν να επιταχύνουν το ένα σε σχέση με το άλλο. Για να λυθεί η δυσκολία, ο Αϊνστάιν πρότεινε αρχικά πως ο χωροχρόνος είναι καμπυλωμένος. Το 1915 ανακοίνωσε τις πεδιακές εξισώσεις Αϊνστάιν, οι οποίες συσχετίζουν την καμπύλωση του χωροχρόνου σε σχέση με τη μάζα, την ενέργεια και την ορμή μέσα σε αυτόν.

# Γενική σχετικότητα

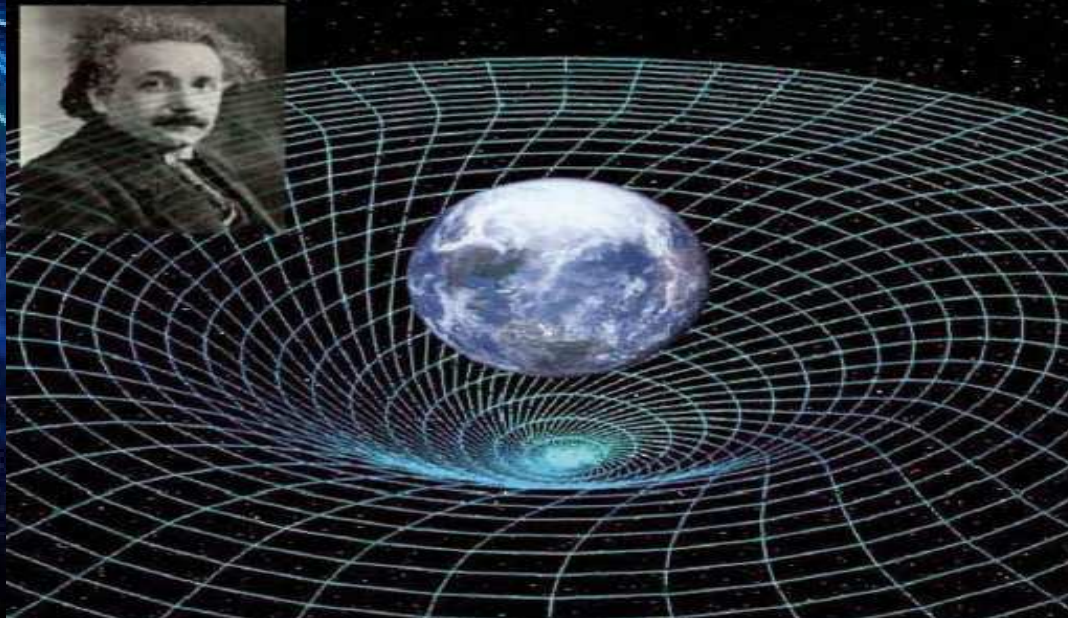
- Επομένως η μάζα παίζει μεγάλο ρόλο στη θεωρία αυτή καθώς συνδέεται άρρηκτα με την καμπύλωση του χωροχρόνου (ενός πολύπτυχου τετραδιάστατου μορφώματος που συνδέει τον ευκλείδειο χώρο τριών διαστάσεων με τον μονοδιάστατο χρόνο). Η παρουσία μάζας αλλάζει τη γεωμετρία του χωροχρόνου, η οποία ερμηνεύεται ως βαρύτητα. Συγκεκριμένα, η βαρύτητα ερμηνεύεται ως καμπύλωση του χωροχρόνου, η οποία προκαλείται από τη παρουσία μάζας, δηλαδή ύλης.



# Γενική σχετικότητα

Αποτελέσματα της γενικής θεωρίας της σχετικότητας:

- Ο χρόνος περνά διαφορετικά σε χαμηλότερα βαρυτικά δυναμικά. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται βαρυτική διαστολή του χρόνου.
- Οι τροχιές μεταβάλλονται με τρόπο μη αναμενόμενο από τη θεωρία του Νεύτωνα για τη βαρύτητα.
- Ακόμα και οι ακτίνες του φωτός αλλάζουν πορεία παρουσία ενός βαρυτικού πεδίου.
- Το σύμπαν διαστέλλεται σχεδόν με την ταχύτητα του φωτός.





# Κβαντική προσέγγιση

Όμως πώς ερμηνεύεται η μάζα στον μικρόκοσμο, από πού προέρχεται και τι κάνει τα σωματίδια να έχουν μάζα ; Αυτά τα ερωτήματα προσπάθησαν να απαντηθούν από την **κβαντομηχανική** και οι απαντήσεις που δόθηκαν ήταν ανέλπιστα καλές. Καταρχάς για να προσεγγίσουμε την μάζα με κβαντικές έννοιες θα πρέπει πρώτα να κατανοήσουμε την έννοια της κβάντωσης. Κβάντωση είναι το φαινόμενο κατά το οποίο ένα ποσό παίρνει μόνο διακριτές τιμές. Η κβάντωση είναι ένα ευρέως παρατηρούμενο γεγονός της φύσης, σχεδόν όλες οι φυσικές ιδιότητες υπόκεινται σε κβάντωση, παίρνοντας διακριτές τιμές. Ένα ευρέως διαδεδομένο κβαντωμένο ποσό είναι το ηλεκτρικό φορτίο (τα κβάντα του οποίου έχουν φορτίο ίσο με αυτό του ηλεκτρονίου) ή το φως (τα κβάντα του είναι τα φωτόνια).

# Κβαντική προσέγγιση

Με τον ίδιο τρόπο υπόκεινται σε κβάντωση και όλα τα πεδία. Δηλαδή, όλα τα πεδία και οι θεμελιώδεις δυνάμεις που τα συνιστούν αποτελούνται από κβάντα.

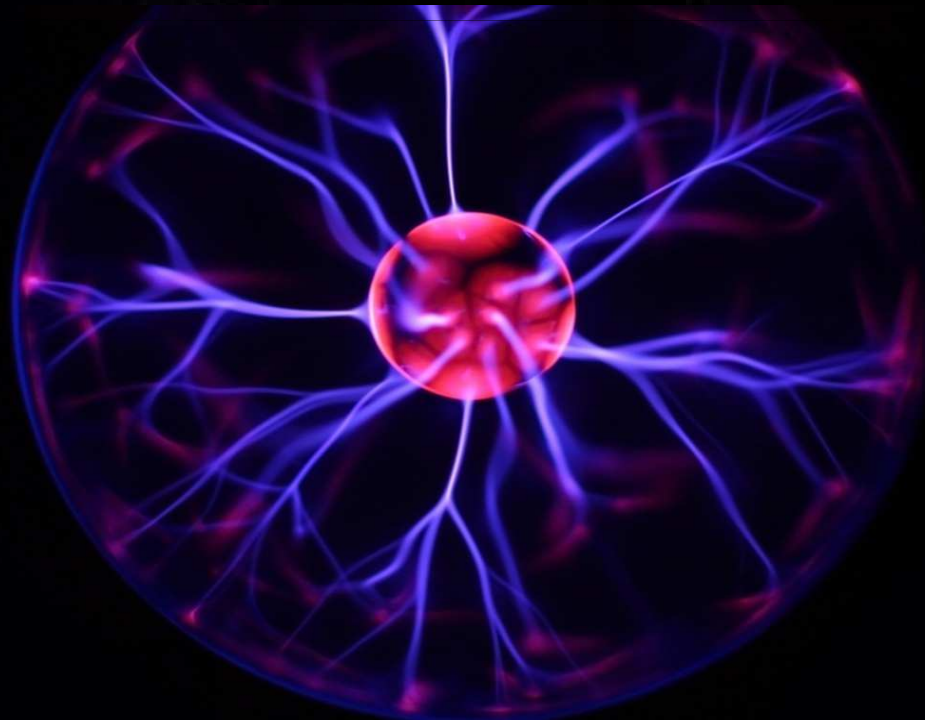
Άρα εκτός από την **ύλη** που αποτελείται από σωματίδια (**φερμιόνια**) και οι **θεμελιώδεις δυνάμεις** (και τα πεδία που συνιστούν) αποτελούνται από σωματίδια (**μποζόνια**). Υπάρχουν 4 θεμελιώδεις δυνάμεις και αυτές μαζί με τα σωματίδια αλληλεπίδρασής τους είναι :

- **Ισχυρή πυρηνική (γκλουόνιο)**
- **Ηλεκτρομαγνητική (φωτόνιο)**
- **Ασθενής πυρηνική ( $W^+$ ,  $W^-$ ,  $Z_0$  μποζόνια)**
- **Βαρυτική (βαρυτόνιο)**

# Κβαντική προσέγγιση

Όπως παρατηρείται κβάντωση στα πεδία και τις θεμελιώδεις δυνάμεις θεωρείται πως το ίδιο συμβαίνει και με την μάζα.

Όμως πρώτα πρέπει να δούμε το πεδίο και τον μηχανισμό που δίνει μάζα στα στοιχειώδη σωμάτια, σύμφωνα με το Καθιερωμένο Πρότυπο.

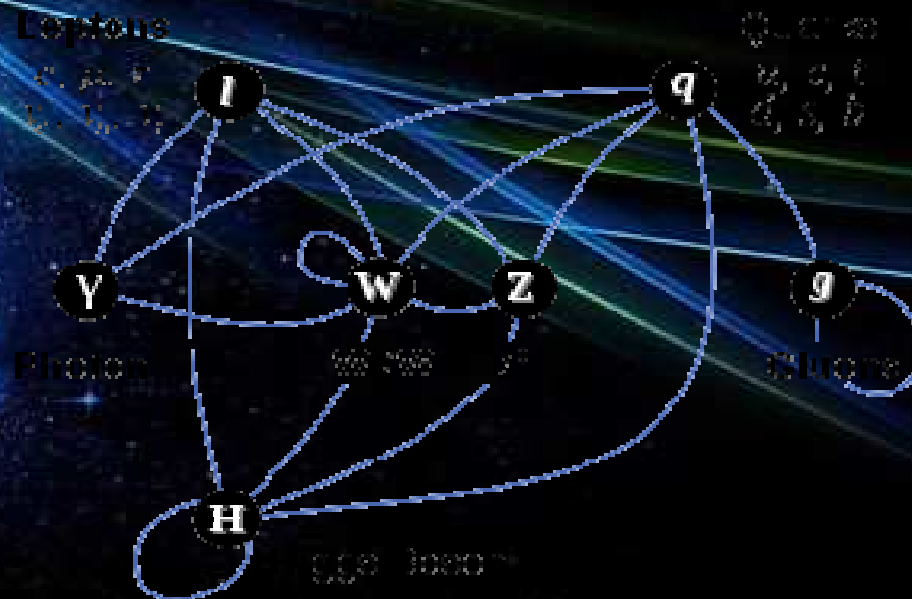


# Μηχανισμός Higgs

Ο μηχανισμός αυτός λοιπόν που σύμφωνα με την *κβαντομηχανική* «δίνει» μάζα στα σωματίδια (σε όλα τα φερμιόνια και στα μποζόνια-φορείς δυνάμεων {συμπεριλαμβανομένου του ίδιου του μποζονίου Higgs} εκτός από τα φωτόνια και τα βαρυτόνια) ονομάζεται **Μηχανισμός Higgs** και το πεδίο που δημιουργεί **πεδίο Higgs** και βρίσκεται παντού στο σύμπαν. Τα πεδία και τα σωματίδια που αλληλεπιδρούν με το πεδίο Higgs αποκτούν μάζα καθώς η συμμετρία του συστήματος σπάει αυθόρμητα. Έτσι αυτό το πεδίο καταλαμβάνει το απόλυτο κενό και το ψευδοκενό και δημιουργήθηκε μετά το Big Bang και τον διαχωρισμό των θεμελιωδών δυνάμεων, ενώ ευθύνεται και για τη διαστολή του σύμπαντος.

# Μποζόνιο Higgs

Όπως όλα τα πεδία στην κβαντομηχανική αποτελούνται από σωματίδια, έτσι και το πεδίο **Higgs** αποτελείται από τα **μποζόνια Higgs**. Το **μποζόνιο Higgs** είναι ένα θεμελιώδες σωματίδιο που προβλέφθηκε θεωρητικά από τον Peter Higgs. Η ύπαρξή του θεωρείται απαραίτητη από το Καθιερωμένο Πρότυπο και είναι η εξήγηση του αυθόρμητου σπασίματος της συμμετρίας της Ηλεκτρασθενούς δύναμης.



# Αυθόρμητο σπάσιμο συμμετρίας

Το *αυθόρμητο σπάσιμο της συμμετρίας*, που θίχτηκε προηγουμένως, είναι μια χαρακτηριστική έννοια της κβαντομηχανικής δύσκολη στην εξήγηση και πολύ πιο δύσκολη στην κατανόηση. Με απλά λόγια μπορούμε να πούμε όμως πως είναι μια διαδικασία η οποία οδηγεί ένα σύστημα από μια κρίσιμη κατάσταση απόλυτης συμμετρίας σε μια εκ των πιθανών ασύμμετρων και χαμηλότερης ενέργειας ενδεχομένων.

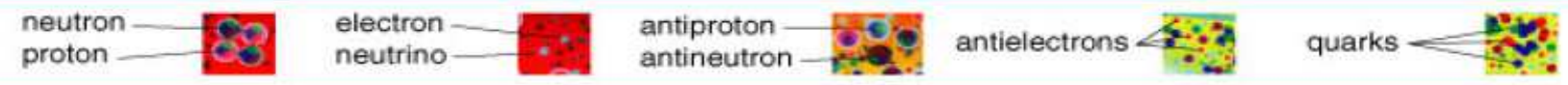
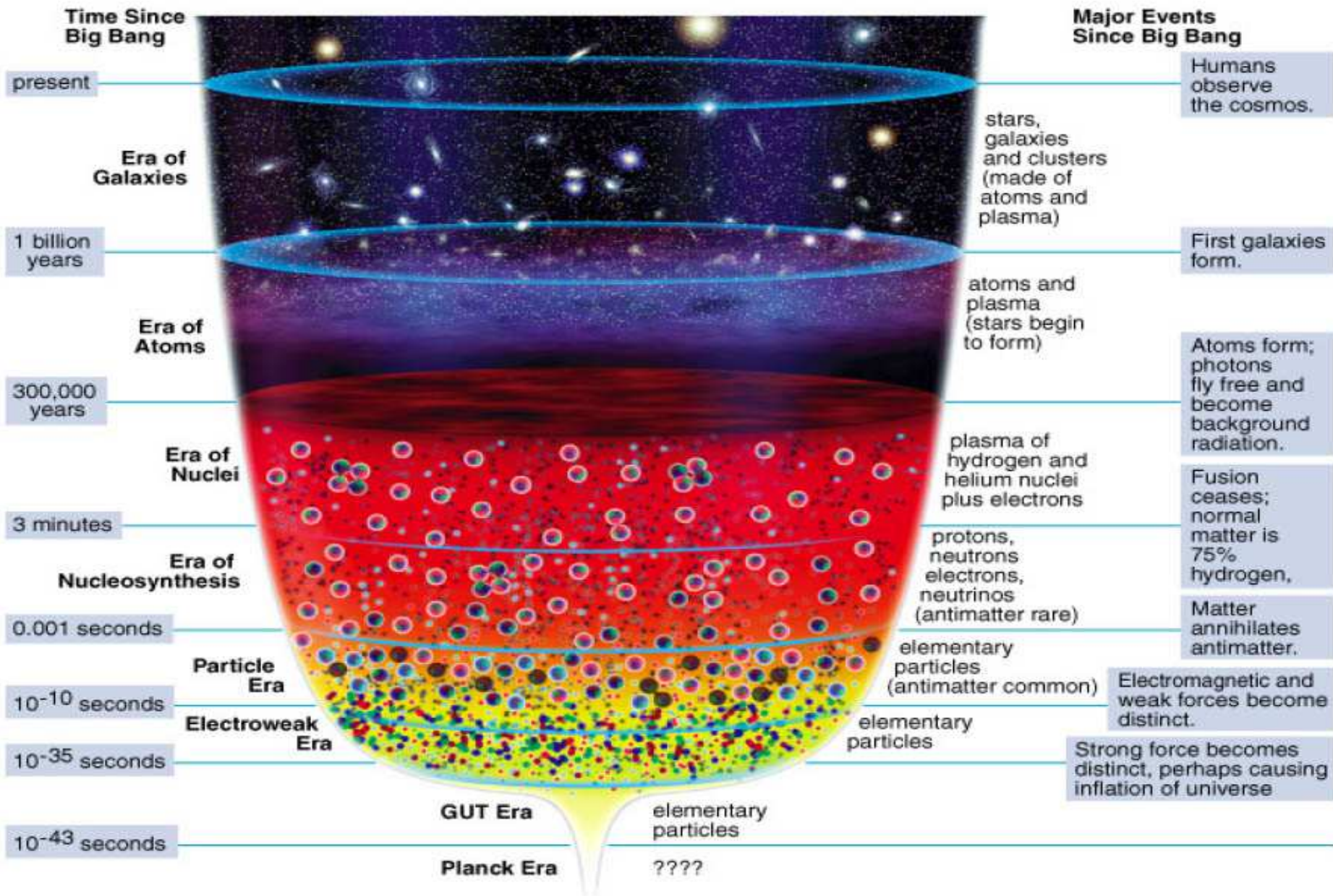
Συγκεκριμένα, *το Σύμπαν ξεκίνησε από μια κατάσταση απόλυτης συμμετρίας*. Και οι 4 θεμελιώδεις δυνάμεις ήταν ενωμένες. Όμως, όπως προκύπτει, η συμμετρία μπορεί να σπάσει αυθόρμητα και ως αποτέλεσμα να έχουμε την δημιουργία σωματιδίων με μάζα. *Χωρίς το σπάσιμο της συμμετρίας δεν θα υπήρχε ούτε μάζα ούτε ύλη.*

# Αυθόρμητο σπάσιμο συμμετρίας

Η συμμετρία και η αυθόρμητη ρήξη της που απασχόλησαν όμως τον Higgs ήταν αυτή κατά την οποία, αρχικά και σε καταστάσεις πολύ μεγάλης ενέργειας, η ηλεκτρομαγνητική και η ασθενής δύναμη ήταν ενωμένες αποτελώντας την ηλεκτρασθενή αλληλεπίδραση. Τότε όταν υπήρχε συμμετρία στο σύστημα, τα μποζόνια της ασθενούς αλληλεπίδρασης όπως και της ηλεκτρομαγνητικής δεν είχαν μάζα. Ο μηχανισμός που πρότεινε ο Higgs εξηγούσε τη δημιουργία μαζών για τα μποζόνια της ασθενούς αλληλεπίδρασης όταν η συμμετρία της ηλεκτρασθενούς αλληλεπίδρασης έσπαγε αυθόρμητα. Με άλλα λόγια : το φωτόνιο, φορέας της ηλεκτρομαγνητικής και τα 3 μποζόνια-φορείς της ασθενούς εμφανίζονται ως διαφορετικά είδη σωματιδίων, όταν παρατηρούνται σε χαμηλές ενέργειες (σε συνθήκες δηλαδή σαν αυτές που ζούμε καθημερινά).

Ωστόσο σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες, όπως εκείνες που επικρατούσαν στα πρώτα δευτερόλεπτα του Big Bang τα 3 αυτά μποζόνια έχουν μηδενική μάζα και συμπεριφέρονται σαν φωτόνια.

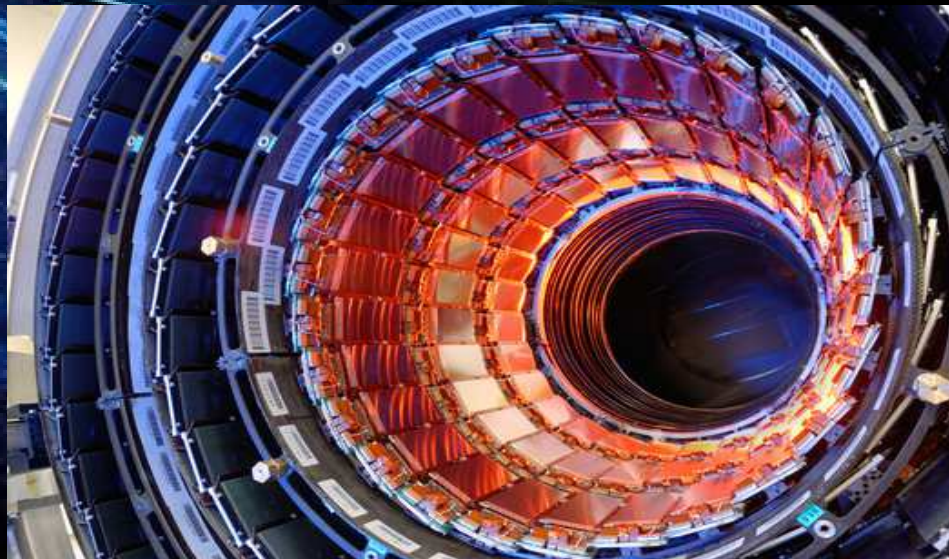
Με αυτόν τον μηχανισμό ο Higgs εξήγησε την ύπαρξη μάζας ως επακόλουθο της ρήξης της συμμετρίας και προέβλεψε επίσης την ύπαρξη του μποζονίου Higgs (το οποίο δημιουργούταν και αλληλεπιδρούσε με τα σωματίδια δίνοντας τους μάζα όταν η συμμετρία του συστήματος έσπαγε).





# CERN

Το **μποζόνιο Higgs** δεν έχει βρεθεί ακόμα αν και η ύπαρξη του θεωρείται βέβαιη από τους φυσικούς. Αν όμως δεν βρεθεί πειραματικά, όλο το Καθιερωμένο Πρότυπο (η θεωρία που ισχύει τα τελευταία 40 χρόνια) θα «τιναχτεί στον αέρα» και θα αντικατασταθεί από μια πιο σύνθετη και περίπλοκη θεωρία καθώς δεν θα μπορεί να εξηγήσει πλήρως τη σύγχρονη Φυσική. Για αυτό το λόγο η εύρεσή του αποτελεί κύριο στόχο των επιστημόνων που προσπαθούν να το ανιχνεύσουν με την σύγκρουση αδρονίων στον LHC του CERN (κόστους περίπου 5 δισ.) και αν και υπάρχουν ενδείξεις δεν έχει βρεθεί ακόμη.



"Two things are  
infinite. The universe  
and human stupidity.

...and i'm not so sure  
about the universe."

