

ΤΟ ΚΑΘΙΕΡΩΜΕΝΟ ΠΡΟΤΥΠΟ ΤΗΣ ΚΒΑΝΤΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

Όλα τα υλικά σωματίδια κατατάσσονται σε δύο κατηγορίες:

A. Φερμιόνια (πχ ηλεκτρόνια, πρωτόνια, νετρόνια) με ημιακέραιο spin που υπακούουν στην απαγορευτική αρχή του Pauli «Δεν υπάρχουν στο ίδιο άτομο 2 ηλεκτρόνια με την ίδια τετράδα κβαντικών αριθμών»

B. Μποζόνια(πχ φωτόνια) με ακέραιο spin που δεν υπακούουν στην απαγορευτική αρχή του Pauli.

Στα φερμιόνια **εκφυλισμένα τροχιακά** είναι αυτά που εμφανίζονται διαφορετικά στο χώρο γύρω από τον πυρήνα αλλά έχουν την **ίδια ενέργεια**. Πχ το τροχιακό P αποτελείται από τρία επιμέρους τροχιακά P_x , P_y , P_z με διαφορετικό προσανατολισμό στο χώρο που όμως έχουν ίδια ενέργεια δηλαδή είναι εκφυλισμένα(μόνο η δράση μαγνητικού πεδίου σπάει τον εκφυλισμό).

Σύμφωνα με την **απαγορευτική αρχή του Παουλί** σε ένα άτομο δε μπορεί να υπάρχουν δύο ηλεκτρόνια με την ίδια τετράδα κβαντικών αριθμών(δύο ηλεκτρόνια με κβαντικό αριθμό $+1/2$ ή δύο με $-1/2$). Όταν συμπληρωθούν όλα τα τροχιακά μιάς στιβάδας με τα επιμέρους εκφυλισμένα τροχιακά(πλήρης εκφυλισμός) τότε κάθε επόμενο ηλεκτρόνιο τοποθετείται σε ανώτερη στιβάδα υψηλότερης ενέργειας. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να αναδύεται μία πίεση που ονομάζεται **πίεση εκφυλισμού** που εμποδίζει την περαιτέρω συμπίεση σε μικρότερους όγκους(χωρίς την πίεση εκφυλισμού το άτομο με συμπίεση θα κατέρρεε στον πυρήνα).

Ένα σύνολο μη αλληλεπιδρόντων φερμιονίων π.χ ηλεκτρόνια ή πρωτόνια ή νετρόνια είναι γνωστό σαν **αέριο Fermi**.

Ας πάμε τώρα στα αστέρια.

Ένας ερυθρός γίγαντας αστέρας στο τέλος της ζωής του εκτινάσσει τα εξωτερικά του στρώματα και ο πυρήνας του καταρρέει βαρυτικά αυξάνοντας την πίεση και τη θερμοκρασία . Η θερμοκρασία όμως δεν επαρκεί για την εκκίνηση θερμοπυρρικών αντιδράσεων καύσεως C και O . Το σύνολο των ηλεκτρονίων του πυρήνα του άστρου είναι ένα **φερμιονικό αέριο** που δεν μπορεί να καταρρεύσει αν η μάζα του πυρήνα είναι μικρότερη από το **όριο Chandrasekhar(1,44 ηλιακές μάζες)**. Έτσι αναδύεται μία πίεση γνωστή σαν **πίεση εκφυλισμού ηλεκτρονίων** που εμποδίζει την περαιτέρω κατάρρευση του άστρου. Αυτό που μένει είναι ένας **λευκός νάνος**.

Αν η μάζα του πυρήνα που καταρρέει είναι μεγαλύτερη από 1.44 ηλιακές τότε η πίεση των εκφυλισμένων ηλεκτρονίων δεν ανακόπτει τη βαρυτική κατάρρευση και στον πυρήνα σχηματίζονται νετρόνια. Η τεράστια πίεση **εκφυλισμού των νετρονίων** προκαλεί ανάκρουση του καταρρέοντος με ταχύτητες πάνω από 50.000 km/s πυρήνα ο οποίος συμπαρασύρει βίαια τα εξωτερικά στρώματα σε μία **έκρηξη supernova**. Στη θέση του πυρήνα σχηματίστηκε ένας **αστέρας νετρονίων**.

Αν και η πίεση των εκφυλισμένων νετρονίων δε μπορέσει να ανακόψει την βαρυτική κατάρρευση, τότε έχουμε πλήρη επικράτηση της βαρύτητας με σχηματισμό **μαύρης τρύπας**.

Μονάδα ενέργειας ηλεκτρονιοβόλτ (ev)

Από την εξίσωση ηλεκτρικής ενέργειας $E = qv$ για $q = 1e$ έχουμε $E = 1 \text{ ev}$
 $1 \text{ ev} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ J}$. Χρησιμοποιούνται συχνά τα πολλαπλάσια keV, MeV, GeV.

Από την ισοδυναμία μάζας ενέργειας $E = mc^2$ μετράμε τη μάζα σαν ενέργεια/ c^2 πχ το πρωτόνιο έχει μάζα $m_p = 938,272 \text{ MeV}/c^2$. Πολλές φορές χρησιμοποιούμε τον όρο σχετικιστικά πρωτόνια(κινούμενα με ταχύτητες κοντά στο φως) ή ενεργητικά πρωτόνια(πολύ υψηλής ενέργειας). Πχ πρωτόνιο κινούμενο με $u = 0,99995c$ έχει ενέργεια $E = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2} \cdot 1,672622 \times 10^{-27} \cdot 0,99995^2 \cdot 9 \times 10^{16} = 7,526 \times 10^{-11} \text{ J} = (7,526 \times 10^{-11}) : (1,6 \times 10^{-19}) \text{ ev} \Rightarrow E = 470,375 \text{ MeV}$

Στοιχειώδη σωματίδια Σ (Μάζα, φορτίο, spin) ή Σ(φορτίο, spin)

Σε κάθε στοιχειώδες σωματίδιο αντιστοιχεί ένα αντισωματίδιο με μόνη τη διαφορά αντίθετο φορτίο.

Δομικά συστατικά της ύλης(δε διασπώνται περαιτέρω) είναι:

A. Τα 6 quark με βασικά δύο, το up $u(2,2 \text{ MeV}/c^2, 2/3, 1/2)$ και το down $d(4,7 \text{ MeV}/c^2, -1/3, 1/2)$

B. Τα Λεπτόνια με τα αντίστοιχα νεutrino τους

Ηλεκτρόνιο $e(-1, 1/2)$ – νεutrino ηλεκτρονίου $\nu_e(0, 1/2)$

Μιόνιο $\mu(-1, 1/2)$ - $\nu_\mu(0, 1/2)$

Τα νεutrino έχουν αμελητέα μάζα συγκριτικά με τα υπόλοιπα στοιχειώδη σωματίδια όχι όμως μηδενική.

Στοιχειώδη σωματίδια φορείς αλληλεπιδράσεων(Μποζόνια)

Γκλουόνιο	$g (0, 0, 1)$
φωτόνιο	$\gamma (0, 0, 1)$
Z μποζόνιο	$Z (91,19 \text{ MeV}/c^2, 0, 1)$
W μποζόνιο	$W (80.39 \text{ MeV}/c^2, \pm 1, 1)$

Το μποζόνιο Higgs $H(0, 0, 125 \text{ GeV}/c^2)$ είναι αυτό που αλληλεπιδρώντας με τα W και Z μποζόνια προσθέτει σε αυτά μάζα. Με μάζα $125 \text{ GeV}/c^2$ όσο 133 πρωτόνια το μποζόνιο Higgs ήταν γνωστό από το 1964 ανιχνεύτηκε όμως το 2012, καθότι μεγάλη μάζα σωματιδίου απαιτεί μεγάλη ενέργεια από τον επιταχυντή. Προφανώς ο όρος «σωματίδιο του Θεού» είναι από υπερβολικός έως παραπλανητικός.

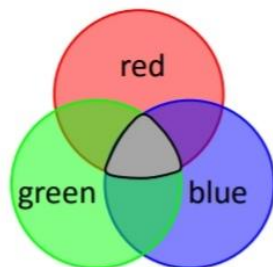
Σύνθετα σωματίδια – οι τρεις θεμελιώδεις αλληλεπιδράσεις(δυνάμεις)

Για να αντιληφθούμε πως πραγματοποιείται μια αλληλεπίδραση(H/M , ισχυρή πυρηνική, ασθενής πυρηνική), ας φανταστούμε δυο ανθρώπους. Ο ένας ασκεί στιγμιαία δύναμη σε μία μπάλα, άρα ορμή , κατευθύνοντας τη στον άλλο ο οποίος την πιάνει ακινητοποιώντας τη, με αποτέλεσμα να δεχτεί τη δύναμη του πρώτου. Η μπάλα είναι ο φορέας της αλληλεπίδρασης.

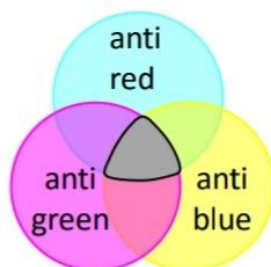
1.Στη γνωστή μας H/M αλληλεπίδραση φορείς είναι τα **φωτόνια**.

2. Ισχυρή αλληλεπίδραση

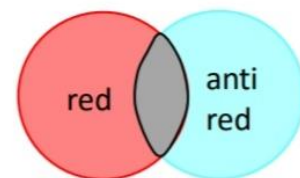
Είναι δυνάμεις μεταξύ quark με φορείς αλληλεπίδρασης γλουόνια. Η τα quark τα έχουμε κατηγοριοποιήσει σε 3 χρώματα(μπλέ, κόκκινο, πράσινο).



τα τρία χρώματα μαζί δίνουν μηδενικό χρωματικό φορτίο



τα τρία αντι-χρώματα μαζί δίνουν μηδενικό χρωματικό φορτίο



ένα χρώμα μαζί με το αντι-χρώμα δίνουν μηδενικό χρωματικό φορτίο

Αλληλεπίδραση έχουμε μεταξύ δύο quark διαφορετικού χρώματος προς σχηματισμό **αδρονίων**. Τα αδρόνια διακρίνονται σε **μεσόνια** που είναι μποζόνια και **βαρυόνια(νετρόνιο,πρωτόνιο)** που είναι φερμιόνια.

Τα μεσόνια αποτελούνται από 1 quark και 1 αντι – quark πχ το πιόνιο π

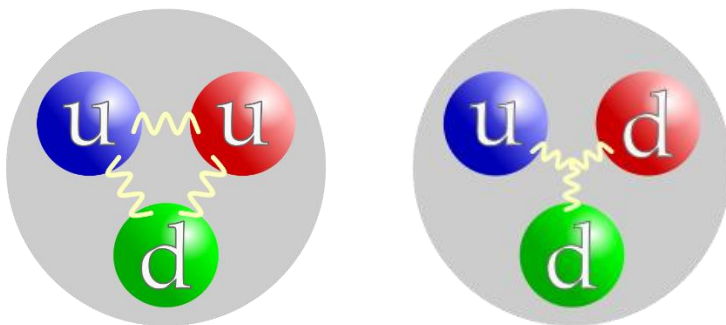
$u(2/3,1/2)$, αντι-d($1/3,1/2$) => π^+ (**1,1**)

$u(2/3,1/2)$, αντι-u($-2/3,1/2$) => π^0 (**0,1**)

$d(-1/3,1/2)$, αντι-u($-2/3,1/2$) => π^- (**-1,1**)

Η δύναμη που συγκρατεί το κουάρκ και το αντικουάρκ στα μεσόνια είναι ισχυρή αλληλεπίδραση πολύ πιο ισχυρή από την H/M αλλά πολύ μικρής εμβέλειας 10^{-15} m έναντι άπειρης θεωρητικά εμβέλειας της H/M. Να τονίσουμε άλλη μία φορά ότι η ισχυρή αλληλεπίδραση ασκείται μεταξύ quark και αντι-quark διαφορετικού χρωματικού φορτίου.

Τα βαρυόνια αποτελούνται από 3 quark



Αριστερά το πρωτόνιο $p(1, 3/2)$ και το νετρόνιο $n(0, 3/2)$

Μέσα στον πυρήνα ισχυρές αλληλεπιδράσεις έχουμε μεταξύ των quark από δυο γειτονικά πρωτόνια ή νετρόνια ή νετρόνιο – πρωτόνιο. Οι δυνάμεις αυτές είναι μεν μικρής εμβέλειας αλλά πολύ πιο ισχυρές από τις δυνάμεις Coulomb ώστε να εξασφαλίζεται η σταθερότητα του πυρήνα.

Βαριονικός αριθμός B

Είναι ένας αριθμός των στοιχειωδών σωματιδίων που αποτελούνται από quark και αντικουάρκ ο οποίος διατηρείται. Ορίζεται ως:

$$B = \frac{1}{3} (n_q - n_{\bar{q}}) \quad \text{όπου:}$$

n_q ο όπου n_q ο αριθμός των quark και $n_{\bar{q}}$ ο αριθμός των αντικουάρκ

Πχ το πρωτόνιο και το νετρόνιο με 3 quark και κανένα αντικουάρκ έχουν $B = +1$, τα μεσόνια με 1 κουάρκ και 1 αντικουάρκ έχουν $B = 0$.

Τα αντιβαρυόνια με 3 αντικουάρκ και κανένα κουάρκ έχουν βαρυονικό αριθμό -1.

Λεπτονικός αριθμός L

Κάτι αντίστοιχο είναι και ο λεπτονικός αριθμός:

$$L = n_l - n_l^- \text{ όπου:}$$

n_l ο αριθμός λεπτονίων και n_l^- ο αριθμός των αντιλεπτονίων

Άρα τα $e, \mu, \tau, \nu_e, \mu_e, \tau_e$ έχουν λεπτονικό αριθμό 1 και τα αντιλεπτόνιά τους -1.

3) Ασθενής αλληλεπίδραση

10000 φορές πιο ασθενής από την ισχυρή. Οι ασθενείς αλληλεπιδράσεις ευθύνονται για τις διασπάσεις κουάρκ και λεπτονίων σε ελαφρύτερα κουάρκ και λεπτόνια. Η περιοχή δράσης τους είναι περίπου 10^{-18} m, δηλαδή μόλις το 0,1% της διαμέτρου του πρωτονίου.

Κατά τη διάσπαση το αρχικό σωματίδιο **εξαφανίζεται** και αντικαθίσταται από δύο ή περισσότερα σωματίδια.

Ένα μέρος της μάζας του αρχικού σωματιδίου μετατρέπεται σε **κινητική ενέργεια** των προϊόντων με αποτέλεσμα **τα προϊόντα να έχουν συνολικά μικρότερη μάζα από το αρχικό σωματίδιο.**

Η ΣΤΑΘΕΡΗ ΥΛΗ ΓΥΡΩ ΜΑΣ ΑΠΟΤΕΛΕΙΤΑΙ ΑΠΟ ΤΑ ΕΛΑΦΡΥΤΕΡΑ ΚΟΥΑΡΚ ΚΑΙ ΛΕΠΤΟΝΙΑ ΤΑ ΟΠΟΙΑ ΔΕ ΜΠΟΡΟΥΝ ΝΑ ΔΙΑΣΠΑΣΤΟΥΝ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ.

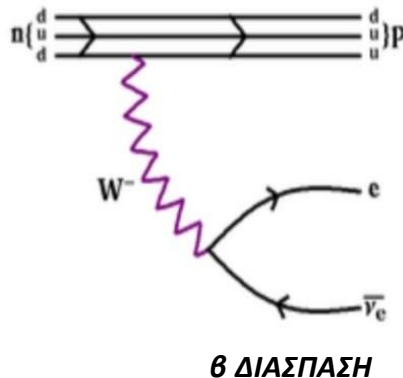
Ενώ η ανταλλαγή φωτονίων και γλουονίων κατά την H/M και την ισχυρή αλληλεπίδραση γίνεται πάρα πολύ γρήγορα, η ανταλλαγή μποζονίων κατά την ασθενή αλληλεπίδραση μπορεί να χρειαστεί ώρες, ημέρες, μήνες ή ακόμα και έτη.

Η ασθενής αλληλεπίδραση συμμετέχει στη σχάση και στη σύντηξη όπως για παράδειγμα η **θερμοπυρηνική σύντηξη του υδρογόνου στον πυρήνα των άστρων.**

Φορείς της ασθενούς αλληλεπίδρασης είναι τα **μποζόνια Z^0, W^-, W^+ .**

Κλασικό παράδειγμα είναι η λεγόμενη β διάσπαση του νετρονίου σε πρωτόνιο με φορέα το μποζόνιο W^- .

Neutron Decay



β ΔΙΑΣΠΑΣΗ

Κατά τη β διάσπαση (δημιουργία ηλεκτρονίου που στην πυρηνική ονομάζεται σωματίδιο β) ένα d κουάρκ του νετρονίου μετατρέπεται σε u κουάρκ και άρα το νετρόνιο μετατρέπεται σε πρωτόνιο και το W^- μποζόνιο διασπάται σε ηλεκτρόνιο και αντινεutrino ηλεκτρονίου. Η παρουσία του αντινεutrino επιβάλλεται από την **αρχή διατήρησης του λεπτονικού αριθμού** (αρχικά $n = 0$, τελικά $p = 0$, $e = 1$, αντινεutrino = -1) και από την **αρχή διατήρησης της ορμής**.

Εφαρμογή στην κοσμολογία

Η ΜΕΓΑΛΗ ΕΝΟΠΟΙΗΣΗ: Στα 10^{-43} s η βαρύτητα διαχωρίζεται και οι υπόλοιπες 3 αλληλεπιδράσεις είναι ενοποιημένες σε μία. Οι υπερυψηλές ενέργειες των 10^{16} GeV που αυτή η ενοποίηση λαμβάνει χώρα είναι απαγορευτικές για τους επιταχυντές ώστε να την επιβεβαιώσουμε πειραματικά.

Σήμερα δεν υπάρχει κοινά αποδεκτή θεωρία για την **GUT (Grand Unified Theory)**. Το μόνο σίγουρο είναι τα τότε σωματίδια είχαν πολύ υψηλές μάζες γύρω από την ενέργεια των 10^{16} GeV.

Στα 10^{-36} s διαχωρίζεται η ισχυρή πυρηνική αλληλεπίδραση από την ενοποιημένη ηλεκτρασθενή και πιθανόν η ενέργεια αυτού του διαχωρισμού να προκάλεσε την τεραστίων διαστάσεων **διαστολή του σύμπαντος**.

Ηλεκτρασθενής αλληλεπίδραση

Είναι η πρώτη και μοναδική μέχρις στιγμής αποδεδειγμένη **ενοποιημένη θεωρία** μετά την ηλεκτρομαγνητική θεωρία του Maxwell.

Σύμφωνα με αυτήν σε πολύ μεγάλες ενέργειες η ηλεκτρομαγνητική και η ασθενής αλληλεπίδραση αποτελούν μία ενιαία αλληλοεπίδραση καλούμενη **ηλεκτρασθενή**.

Φορείς αλληλεπίδρασης είναι τα **τρία άμαζα όμως μποζόνια** και το **φωτόνιο**, δηλαδή **4 ισοδύναμα μποζόνια**.

Αν υποθέσουμε ότι στην αρχή της δημιουργίας ήταν ενοποιημένες και οι 4 αλληλεπιδράσεις τότε μιλάμε για μία **θεωρία των πάντων** που έμεινε μόνο σαν όραμα στο μυαλό του Einstein και του Hawking.

Τα περισσότερα από τα στοιχειώδη σωματίδια είναι βραχύβια και ανιχνεύονται είτε στην ατμόσφαιρα σαν δευτερογενής κοσμική ακτινοβολία ή στους μεγάλους επιταχυντές αδρονίων όπως του CERN.

Τα μίονια της δευτερογενούς κοσμικής ακτινοβολίας έχουν χρόνο ημιζωής 2 μς οπότε κινούμενα σχεδόν με την ταχύτητα του φωτός θα διένυαν μία απόσταση περίπου 600 m και δε θα έφταναν στην επιφάνεια της γης. Όμως τα 2 μς είναι ως προς το σύστημα αναφοράς τους. Για ακίνητο γήινο παρατηρητή λόγω διαστολής του χρόνου ζουν 16 μς διανύοντας περίπου 5 km με αποτέλεσμα να ανιχνεύονται στην επιφάνεια της γης.

Το 1976, πειράματα με μίονια πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο του Ευρωπαϊκού Κέντρου Πυρηνικών Ερευνών (CERN) στη Γενεύη. Μίονια διοχετεύθηκαν σε μεγάλο κυκλικό επιταχυντή, όπου απέκτησαν ταχύτητες περίπου $0,9994c$ (δηλ. 99,94% της ταχύτητας του φωτός). Ηλεκτρόνια που παρήχθησαν από τη διάσπαση των μιονίων ανιχνεύθηκαν από απαριθμητές γύρω από τον επιταχυντή, γεγονός που επέτρεψε στους επιστήμονες να μετρήσουν τον ρυθμό διάσπασης και επομένως τον χρόνο ζωής των μιονίων. Ο χρόνος ζωής των κινούμενων μιονίων μετρήθηκε ότι είναι 30 φορές μεγαλύτερος από τον χρόνο ζωής ενός ακίνητου μιονίου σε συμφωνία με την πρόβλεψη της σχετικότητας και με ενδεχόμενη απόκλιση 2‰.

