

Νετρίνα

Παύλου Γεώργιος

2 Δεκεμβρίου 2012

# Σύνοψη της παρουσίασης

- Εισαγωγή - Γενικές ιδιότητες νετρίνων
- Η θεωρητική φυσική των νετρίνων
- Σημαντικά πειράματα που έχουν να κάνουν με νετρίνα
- Ταλαντώσεις νετρίνων - Το κυνήγι της μάζας των νετρίνων

# Εισαγωγή

Σύνοψη των στοιχειώδων σωματιδίων του Καθιερωμένου Προτύπου

Three Generations of Matter (Fermions)			
	I	II	III
mass →	2.4 MeV	1.27 GeV	171.2 GeV
charge →	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$
spin →	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
name →	u up	c charm	t top
Quarks			
mass →	4.8 MeV	104 MeV	4.2 GeV
charge →	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$
spin →	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
name →	d down	s strange	b bottom
Leptons			
mass →	<2.2 eV	<0.17 MeV	<15.5 MeV
charge →	0	0	0
spin →	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
name →	$\nu_e$ electron neutrino	$\nu_\mu$ muon neutrino	$\nu_\tau$ tau neutrino
Gauge Bosons			
mass →	0.511 MeV	105.7 MeV	1.777 GeV
charge →	-1	-1	-1
spin →	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
name →	e electron	$\mu$ muon	$\tau$ tau
mass →	80.4 GeV	80.4 GeV	80.4 GeV
charge →	$\pm 1$	$\pm 1$	$\pm 1$
spin →	1	1	1
name →	$W^\pm$ W boson	$Z^0$ Z boson	

# Εισαγωγή

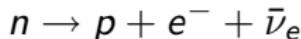
Ιδιότητες των νετρίνων

- Έχουν 3 δυνατές γεύσεις :  $\nu_e$ ,  $\nu_\mu$ ,  $\nu_\tau$
- Τηπάρχουν και τα αντίστοιχα 3 αντινετρίνα
- Έχουν μηδενικό φορτίο (δεν αλληλεπιδρούν ηλεκτρομαγνητικά)
- Φερμιόνια με σπιν  $\frac{1}{2}$
- Στα πλαίσια του Καθιερωμένου Προτύπου αλληλεπιδρούν μονό με ασθενείς αλληλεπιδράσεις και άρα αλληλεπιδρούν εξαιρετικά ασθενώς με την ύλη
- Έχουν εξαιρετικά μικρή μάζα, όπως φαίνεται στο προηγούμενο σχήμα (πολύ μικρότερη από τα αντίστοιχα βαρέα λεπτόνια)

# Η ανακάλυψη των νετρίνων

Η πρώτη θεωρητική εισαγωγή

Η β διάσπαση είχε προβληματίσει πολύ στις αρχές του προηγούμενου αιώνα



- Δεν ξέραμε για νετρόνια και νετρίνα
- Είχε συνεχές φάσμα και όχι γραμμικό
- Για την εξήγηση του φάσματος, το 1930, ο *Pauli* πρότεινε ότι, εκτός του ηλεκτρονίου, εκπέμπεται και ένα ακόμη σωματίδιο με σπιν  $\frac{1}{2}$  πολύ μικρής μάζας και άρα οι τότε ανιχνευτές δεν μπορούσαν να το δουν
- Το 1933 ο *Fermi* ονόμασε το σωματίδιο νετρίνο (“μικρό ουδέτερο”) και ανέπτυξε, χρησιμοποιώντας τη νέα κβαντική θεωρία, τη θεωρία του για τη β διάσπαση η οποία, με μικρές τροποποιήσεις, ισχύει μέχρι σήμερα
- Κανένας δεν πίστεψε ότι το νετρίνο, αν υπάρχει, θα έχει μηδενική μάζα

# Η ανακάλυψη των νετρίνων

Η πρώτη πειραματική ανακάλυψη

Η ανίχνευση του νετρίνου ήταν δύσκολη λόγο των ιδιοτήτων του σωματιδίου και των τεχνικών μέσων της δεκαετίας του '30.

'Επερπε να περιμένουμε δύο δεκαετίες!

Το νετρίνο πρωτοανιχνεύτηκε το 1956 (*Reines, Cowan*)

- Αν μία ραδιενεργός πηγή ασταθής σε β-διάσπαση εκπέμπει ηλεκτρόνια θα εκπέμπει και αντινετρίνα τα οποία δεσμεύονται από πρωτόνια νερού που βρίσκονται σε αντιδραστήρα:

$$\overline{\nu_e} + p \rightarrow e^+ + n$$

- Τα ποζιτρόνια αντιδρούν με ηλεκτρόνια και εξαϋλώνονται αμέσως ενώ τα νετρόνια δεσμεύονται από Κάδμιο που υπάρχει στον αντιδραστήρα
- Η παρατήρηση και των δύο αυτών φαινομένων δίνουν υπογραφή της ύπαρξης του αντινετρίνου
- Η ομάδα ανακοίνωσε την ανακάλυψη το 1956 και για αυτή πήρε Νόμπελ λίγο αργότερα, το 1995!

# Η ανακάλυψη των νετρίνων

## Η πρώτη πειραματική ανακάλυψη

- Με το που παρατηρούσαμε κάποιο λεπτόνιο για λόγους συμμετρίας υποθέταμε την ύπαρξη του αντίστοιχου νετρίνου και το αναζητούσαμε
- Το 1962 ανακαλύφθηκε πειραματικά το  $\nu_\mu$  (*Lederman, Schwartz, Steinberger*, βραβείο Νόμπελ το 1988, πρίν τους *Reines, Cowan!*) και το 2000 παρατηρήθηκε το  $\nu_\tau$  (Πείραμα *DONUT* στο *Fermilab* με ελληνική συμμετοχή)
- Το  $\nu_\tau$  είναι το προτελευταίο σωματίδιο που προβλέπει το Καθιερωμένο Πρότυπο που ανακαλύφθηκε. Το τελευταίο είναι το περιβόητο σωματίδιο *Higgs*
- Το ερώτημα που ακολούθησε είναι αν υπάρχουν και άλλες γεύσεις νετρίνων

# Τελικά πόσες γεύσεις νετρίνων υπάρχουν ;

Μέτρηση στο *LEP* το 2000

- Το *LEP* σημαίνει *Large Electron Positron*, βρισκόταν στο *CERN* και είναι ο προκάτοχος του *LHC*
- Το μποζόνιο  $Z^0$  (ένας από τους φορείς της ασθενούς αλληλεπίδρασης) μπορεί να διασπαστεί σε οποιοδήποτε ζεύγος νετρίνου και αντινετρίνου
- Όσο περισσότερες γεύσεις νετρίνων υπάρχουν τόσο μικρότερη είναι η διάρκεια ζωής του  $Z^0$
- Οι μετρήσεις του χρόνου ζωής του  $Z^0$  στο *LEP* έχουν δείξει ότι υπάρχουν 3 γεύσεις νετρίνων
- Η αντιστοιχία μεταξύ των έξι κουάρκ στο Καθιερωμένο Μοντέλο και των έξι λεπτονίων, μεταξύ των οποίων και τα τρία νετρίνα, δείχνει ότι πρέπει να υπάρχουν τρεις γεύσεις νετρίνων
- Ωστόσο η πραγματική απόδειξη ότι υπάρχουν μόνο τρία είδη νετρίνων παραμένει ανοιχτή

# Πηγές ακτινοβολίας νετρίνων

Οι κυριότερες εξωγήινες πηγές νετρίνων είναι:

- Νετρίνα από εκρήξεις υπερκαινοφανών (Τα πρώτα νετρίνα από υπερκαινοφανή ανιχνεύτηκαν στις 23 Φεβρουαρίου του 1987 από τον περιβόητο *SN1987A*)
- Ηλιακά νετρίνα (δημιουργούνται από τις πυρηνικές αντιδράσεις στο εσωτερικό του)
- Νετρίνα από διάσπαση σκοτεινής ύλης και την μεγάλη έκρηξη κοσμικά νετρίνα υποβάθρου (είναι υποθετικές). Τα νετρίνα, παρότι αλληλεπιδρούν ασθενώς με την ύλη, δεν μπορούν να είναι η σκοτεινή ύλη επειδή δεν καλύπτουν τα άλλα κριτήρια της

Γήινες πηγές νετρίνων:

- Νετρίνα που παράγονται σε αντιδραστήρες, επιταχυντές και φυσικές ραδιενεργές διασπάσεις
- Νετρίνα παράγονται λόγο της εισόδου της πρωτογενούς κοσμικής ακτινοβολίας στην ατμόσφαιρα

# Νετρίνα από SN1987A

(αλλά και γενικά από υπερκαινοφανείς)

- Ανιχνεύτηκαν από το *Kamiokande II* αλλά και από άλλους ανιχνευτές τύπου *Cherenkov*
- Ουσιαστικά τότε ξεκίνησε η αστρονομία νετρίνων
- Οι μετρήσεις έδωσαν άνω όρια στις μάζες και σε άλλες ιδιότητες των νετρίνων και συνδυάστηκαν με δεδομένα από πειράματα
- Επειδή τα νετρίνα αλληλεπιδρούν ασθενώς με την ύλη, ίσως να μεταφέρουν πληροφορίες από το εσωτερικό της έκρηξης

# Παραβίαση της διατήρησης της ομοτιμίας και της συζυγίας φορτίου από τα νετρίνα |

- Η χωρική αναστροφή των συντεταγμένων  $(x, y, z)$  σε  $(-x, -y, -z)$  είναι ένας διακριτός μετασχηματισμός αποτέλεσμα της δράσης του τελεστή της ομοτιμίας
- Οι νόμοι της φύσης φαινόταν να παραμένουν αναλλοίωτοι κάτω από την αναστροφή όλων των χωρικών αξόνων
- Το 1956 οι *Lee* και *Yang* πρότειναν ότι δεν ισχύει η διατήρηση της ομοτιμίας στις ασθενείς αλληλεπιδράσεις
- Το 1957 η ομάδα της *Wu* το επιβεβαίωσε πειραματικά στο διάσημο πείραμα στη διάσπαση του  $^{60}Co$

# Παραβίαση της διατήρησης της ομοτιμίας και της συζυγίας φορτίου από τα νετρίνα //

- Η παραβίαση οφείλεται στα νετρίνα
- 'Όπως δείχθηκε πειραματικά στη φύση υπάρχουν μόνο αριστερόστροφα νετρίνα (στο σπιν είναι αντιπαράλληλο της ορμής) και μόνο δεξιόστροφα αντινετρίνα
- Για τον ίδιο λόγο οι ασθενείς αλληλεπιδράσεις δεν διατηρούν τη συζυγία φορτίου (αν αντικαταστήσω σε μία αντίδραση τα σωματίδια με αντισωματίδια η αντίδραση δεν γίνεται γιατί δεν υπάρχει δεξιόστροφο νετρίνο)

# Το κυνήγι της μάζας των νετρίνων ξεκινά: Το πρόβλημα των ηλιακών νετρίνων

- Κατά τη μαθηματική ολοκλήρωση του Καθιερωμένου Προτύπου Θεωρήθηκε, για διευκόλυνση κάποιων υπολογισμών, ότι η μάζα των νετρίνων είναι ακριβώς μηδέν
- Η πρώτη σοβαρή πειραματική ένδειξη ότι τα νετρίνα έχουν μάζα προέκυψε από την απόπειρα εξήγησης του προβλήματος των ηλιακών νετρίνων:
- Τα  $\nu_e$  από τον Ήλιο είναι λιγότερα από τα αναμενόμενα
- Από τη στιγμή που δεν υπάρχει κάποιο “περίεργο” είδος ύλης ανάμεσα στη Γη και στον Ήλιο για να λύσουμε το πρόβλημα εισάγαμε την έννοια της ταλαντώσεως νετρίνων
- Ένα νετρίνο ενός τύπου θα μπορεί να μεταβεί σε κάποιο νετρίνο άλλης γεύσης:

$$\nu_e \leftrightarrow \nu_\mu \leftrightarrow \nu_\tau$$

- Μερικά ηλιακά νετρίνα του ηλεκτρονίου μετατρέπονται σε μιονικά και έτσι ανιχνεύουμε λιγότερα, άρα λύνεται το πρόβλημα των ηλιακών νετρίνων

# Το κυνήγι της μάζας των νετρίνων ξεκινά: Ταλαντώσεις νετρίνων |

- Η ιδέα της θεωρίας αυτής είναι ότι οι ιδιοκαταστάσεις μάζας ( $|v_1(t)\rangle, |v_2(t)\rangle, |v_3(t)\rangle$ ) είναι άλλες από τις ιδιοκαταστάσεις γεύσης ( $|v_e(t)\rangle, |v_\mu(t)\rangle, |v_\tau(t)\rangle$ ) και πχ για δύο γεύσεις νετρίνων αυτές συνδέονται με έναν πίνακα στροφής:

$$\begin{pmatrix} |v_e(t)\rangle \\ |v_\mu(t)\rangle \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sigma v \nu \theta & \eta \mu \theta \\ -\eta \mu \theta & \sigma v \nu \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} |v_1(t)\rangle \\ |v_2(t)\rangle \end{pmatrix}$$

- Αναζητώ την πιθανότητα να γίνει η αντίδραση:

$$\nu_\mu \rightarrow \nu_e$$

- Αυτή θα δίνεται από τη γνωστή από την κβαντομηχανική σχέση:

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) = |<\nu_e(t)|\nu_\mu(0)>|^2$$

# Το κυνήγι της μάζας των νετρίνων ξεκινά: Ταλαντώσεις νετρίνων //

- Κάνοντας τις πράξεις βρίσκουμε:

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) = \eta \mu^2 (2\theta) \eta \mu^2 \left( 1.27 \frac{\Delta m^2}{E} L \right)$$

- όπου  $L$  η απόσταση που διανύουν τα νετρίνα σε  $km$ ,  $E$  η ενέργειά τους σε  $GeV$  και  $\Delta m^2 = m_2^2 - m_1^2$  σε  $(eV)^2$
- Αν πάρουμε υπόψη 3 γεύσεις νετρίνων υπάρχουν περισσότερες γωνίες μίξης και  $\Delta m^2$  αλλά η δομή της σχέσης από όπου υπολογίζουμε την πιθανότητα είναι ίδια
- Πειραματικά μετράμε τις πιθανότητες μετάβασης, τις γωνίες μίξης και τα  $\Delta m^2$  και από εκεί υπολογίζουμε τα όρια για τις μάζες
- Δύο σημαντικά πειράματα που μελετούν τις ταλαντώσεις νετρίνων είναι το *Super – Kamiokande* στην Ιαπωνία και το *MINOS* στο *Fermilab* (με ελληνική συμμετοχή)

## *Super – Kamiokande*

- Βρίσκεται σε ένα ορυχείο σε βάθος 1000 μέτρων στην περιοχή *Kamioka* στην Ιαπωνία
- Είναι ανιχνευτής τύπου *Cherenkov*
- Στο χώρο του υπάρχουν 50000 τόνοι νερού
- Ψάχνει τη διάσπαση του πρωτονίου και νετρίνα από όλες τις δυνατές πηγές
- Το 1998 παρατήρησαν την πρώτη ταλάντωση νετρίνου
- Η β διάσπαση του πρωτονίου μπορεί να γίνει μόνο εάν αυτό είναι μέσα στον πυρήνα. Οι πρώτες θεωρίες που ενοποιούσαν τις 3 δυνάμεις του μικρόκοσμου προέβλεπαν ένα μεγάλο χρόνο ζωής για το πρωτόνιο αλλά και τη διάσπασή του. Στο *Super – Kamiokande* συγκεντρώθηκε ένας μεγάλος αριθμός πρωτονίων (από το υδρογόνο του νερού) αλλά δεν παρατηρήθηκε κάποια διάσπαση

# Πείραμα MINOS στο Fermilab



# Πείραμα *MINOS* στο *Fermilab*

- Το πείραμα αυτό δουλεύει με το σύστημα των δύο ανιχνευτών
- Ο πρώτος είναι στο *Fermilab* και μετράει τα νετρίνα όταν παράγονται από την πηγή και βρίσκεται σε βάθος 100 μέτρων
- Τα νετρίνα ταξιδεύουν 730 km και συναντούν τον μακρινό ανιχνευτή που βρίσκεται σε βάθος 716 μέτρων σε ένα ορυχείο στο Σουδάν στη βόρεια Μινεσότα όπου ανιχνεύονται ξανά
- Από τις διαφορές στις μετρήσεις εξάγεται η πιθανότητα μετάβασης και από εκεί τα όρια για τις μάζες των νετρίνων

# Οι μάζες των νετρίνων από τη σκοπιά της θεωρίας

- Τα προηγούμενα πειράματα απέδειξαν ότι τα νετρίνα έχουν μάζα
- Άρα είναι η πρώτη (και μοναδική μέχρι στιγμής) ένδειξη ότι υπάρχει Φυσική πέρα από το Καθιερωμένο Πρότυπο όπου οι μάζες των νετρίνων είναι μηδέν. Για Φυσική πέρα από το Καθιερωμένο Πρότυπο φάχνει αυτή την περίοδο ο *LHC* στο *CERN*
- Με ποιον μηχανισμό όμως παίρνουν μάζα τα νετρίνα ;
- Ένα Φερμιόνιο με σπιν  $\frac{1}{2}$  ονομάζεται σωματίδιο *Dirac* όταν ικανοποιεί την ομόνυμη εξίσωση η οποία είναι μια σχετικιστική γενίκευση της εξίσωσης *Schrödinger*
- Τα σωματίδια *Dirac* παίρνουν μάζα με τον μηχανισμό *Higgs*
- Όμως τα σωματίδια *Dirac* έχουν και αριστερόστροφη και δεξιόστροφη συνιστώσα σε αντίθεση με τα νετρίνα (υπάρχουν μόνο αριστερόστροφα νετρίνα μόνο δεξιόστροφα αντινετρίνα)

# *Dirac εναντίον Majorana*

- Από τη στιγμή που δεν υπάρχει αντίθετο φορτίο να ξεχωρίσει το νετρίνο από το αντινετρίνο (όπως γίνεται με το ηλεκτρόνιο και το ποζιτρόνιο) μπορεί κάποιος να υποθέσει ότι το αριστερόστροφο νετρίνο είναι το ίδιο σωματίδιο με το δεξιόστροφο αντινετρίνο
- Δηλαδή στα νετρίνα το σωματίδιο ίσως είναι ίδιο με τα αντισωματίδια
- Ένα φερμιόνιο με αυτή την ιδιότητα ονομάζεται σωματίδιο *Majorana* και έχει κάποιες διαφορετικές ιδιότητες από το σωματίδιο *Dirac*

# *Dirac* εναντίον *Majorana*

- Μία βασική διαφορά είναι ότι τα σωματίδια *Majorana* παίρνουν μάζα με άλλους μηχανισμούς και όχι με τον μηχανισμό *Higgs*
- Το βασικό πρόβλημα που υπάρχει είναι ότι είναι δύσκολο να δοθούν στα νετρίνα οι σχετικά μικρές μάζες που παρατηρούνται
- Το αν τα νετρίνα είναι σωματίδια *Dirac* ή *Majorana* είναι σημαντικό θεωρητικό ερώτημα και δεν υπάρχει ξεκάθαρη απάντηση. Πάντως πειραματικά δεν έχει ανιχνευτεί κάποιο σωματίδιο *Majorana* ακόμη

# Σύνοψη

Από τα διάφορα πειραματικά αποτελέσματα τα όρια για τις μάζες των νετρίνων είναι:

- $\nu_e, \bar{\nu}_e : m < 2.2\text{eV}$
- $\nu_\mu, \bar{\nu}_\mu : m < 170\text{keV}$
- $\nu_\tau, \bar{\nu}_\tau : m < 15.5\text{MeV}$

Τα νετρίνα έχουν μάζα άρα θα πρέπει να ταξιδεύουν με ταχύτητα μικρότερη από αυτή του φωτός ή μήπως όχι ;