

Ηλιακά νετρίνα

Πρόβλημα ηλιακών νετρίνων,
ταλαντώσεις.

Σημείωση 1

Γνωρίζουμε ότι ενέργεια που ακτινοβολεί ο ήλιος, παράγεται από θερμοπυρηνικές αντιδράσεις στον πυρήνα του ηλίου. Στα προϊόντα των αντιδράσεων περιλαμβάνεται μεγάλος αριθμός νετρίνων. Τα νετρίνα μπορούν να διασχίσουν την μάζα του ηλίου χωρίς να αντιδράσουν, έτσι αν μπορέσουμε να τα ανιχνεύσουμε, παίρνουμε πληροφορίες για τις αντιδράσεις στο εσωτερικό του Ηλίου.

Το ηλιακό μοντέλο προκύπτει από σειρά υπολογισμών και επανατροφοδότηση των παραμέτρων έτσι ώστε να αναπαράγονται τα χαρακτηριστικά του Ηλίου όπως η ακτινοβολούμενη ενέργεια, η θερμοκρασία, η μάζα κ.α. Οι υπολογισμοί έχουν σταθεροποιηθεί και το μοντέλο ονομάζεται Τυπικό Ηλιακό Μοντέλο, (SSM).

Μπορούμε να υπολογίσουμε ότι ο αριθμός των ηλιακών νετρίνων που φθάνει στη γη είναι $6 \cdot 10^{10} / \text{s cm}^2$. Τα νετρίνα αυτά, δεν μπορούμε να τα ανιχνεύσουμε εύκολα, διότι έχουν πολύ μικρή ενεργή διατομή, περίπου ίση με 10^{-44} cm^2 . Για να τα ανιχνεύσουμε πρέπει να χρησιμοποιήσουμε ανιχνευτή με πολύ μεγάλη μάζα. Ο αριθμός των αντιδράσεων είναι μικρός.

Αντιδράσεις στο εσωτερικό του Ηλίου (Τυπικό Ηλιακό Μοντέλο)

The *pp* chain consists of the following reactions:

98,4 %	1a	$p + p \longrightarrow {}^2\text{H} + e^+ + \nu_e$	←←	pp
	1b	$p + e^- + p \longrightarrow {}^2\text{H} + \nu_e$	←	pep
	2	${}^2\text{H} + p \longrightarrow {}^3\text{He} + \gamma$		
	3a	${}^3\text{He} + {}^3\text{He} \longrightarrow {}^4\text{He} + 2 p$		
	3b	${}^3\text{He} + {}^4\text{He} \longrightarrow {}^7\text{Be} + \gamma$		
	3c	${}^3\text{He} + p \longrightarrow {}^4\text{He} + e^+ + \nu_e$	←←	hep
	4a	${}^7\text{Be} + p \longrightarrow {}^7\text{Li} + \nu_e$	←	Be
	4b	${}^7\text{Be} + p \longrightarrow {}^8\text{B} + \gamma$		
	5a	${}^7\text{Li} + p \longrightarrow 2 \times {}^4\text{He}$		
	5b	${}^8\text{B} \longrightarrow {}^8\text{B}^* + e^+ + \nu_e$	←	B
	6b	${}^8\text{B}^* \longrightarrow 2 \times {}^4\text{He}$		

Εικόνα 1 Πυρηνικές αντιδράσεις στο κέντρο του ηλίου

Σημείωση 2

Οι πυρηνικές αντιδράσεις που γίνονται στα άστρα χωρίζονται σε ομάδες ανάλογα με τα στοιχεία τα οποία συντήκονται.

Το ποσοστό του κάθε κύκλου στην παραγωγή ενέργειας εξαρτάται από την μάζα και την ηλικία του άστρου. Πιο σωστά, από τη θέση του άστρου στο διάγραμμα Hertzsprung -Russell.

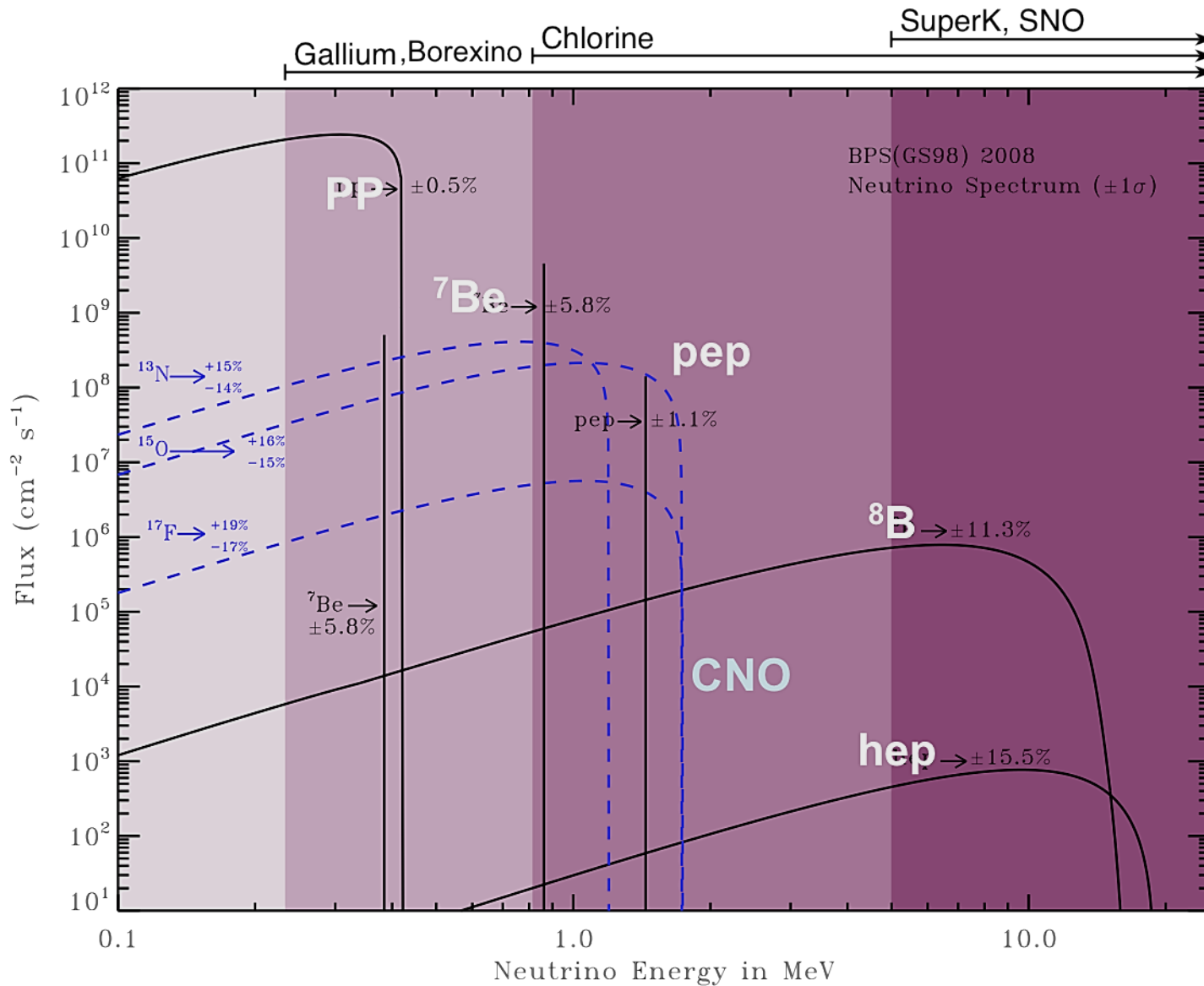
Οι ομάδες αυτές για τον ήλιο είναι:

- α) Η σύντηξη Υδρογόνου ή αλυσίδα pp I όπου τελικά σχηματίζεται ^2He
- β) Η κατάλυση Ηλίου ή κύκλοι pp II και pp III, όπου το ^3H μετατρέπεται σε ^4H .
- γ) Ο κύκλος C N O (άνθρακας, άζωτο, οξυγόνο).

Οι αντιδράσεις που παράγουν νετρίνα ανήκουν σ' αυτές τις αλυσίδες.

Για περισσότερες πληροφορίες κοιτάξτε στο L.Valentin, Subatomic Physics, N.Holland, Vol I p.231 ή σε άλλο βιβλίο Πυρηνικής Φυσικής.

J. Bacall (2005)



Σημείωση 3

Το ενεργειακό φάσμα και η ροή των ηλιακών νετρίνων, σύμφωνα με τους υπολογισμούς του J.N.Bacall.

Οι κλίμακες είναι λογαριθμικές. Η κλίμακα ενέργειας των νετρίνων, ξεκινά από 0,1 MeV.

Παρατηρούμε ότι το ενεργειακό φάσμα των αντιδράσεων pp , ${}^8\text{Be}$, και hep είναι συνεχές, ενώ των ${}^7\text{Be}$, pep είναι γραμμικό.

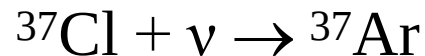
Τα διαφορετικά χρώματα δείχνουν το κατώφλι ενέργειας (ελάχιστη ενέργεια) για την ανίχνευση νετρίνων στα πειράματα.

Για το super-KND περίπου 5 MeV, για το Homestake που χρησιμοποιεί Χλώριο 0,800 MeV και για τους ανιχνευτές που χρησιμοποιούν Γάλιο 0,200 MeV.

- Ο αριθμός των ηλιακών νετρίνων που φθάνει στη γη είναι $6 \cdot 10^{10} / \text{s cm}^2$.
- Η μονάδα 1 SNU (Solar Neutrino Unit) αντιστοιχεί σε 10^{-38} αντιδράσεις το δευτερόλεπτο ανά πυρήνα στόχου.
- Για έναν τόνο από ένα υλικό με $A=20$, ο αριθμός των ατόμων που περιέχονται θα είναι $10^6 \cdot N_A / A = 3 \cdot 10^{28}$ άτομα. Για ροή 1 SNU περιμένουμε λιγότερο από μια αντίδραση τον χρόνο.

Το πρόβλημα των ηλιακών νετρίνων.

1964 R. Davis J.N.Bachall



1969 Πρώτα αποτελέσματα, N_ν μικρότερο από αναμενόμενο.

1979 Υπόθεση ταλάντωσης.

2001 Αποτελέσματα SNO επιβεβαίωση.

Σημείωση 4

Υπάρχουν δύο μέθοδοι για την ανίχνευση των ηλιακών νετρίνων. Η ραδιοχημική μέθοδος που στηρίζεται στην αντίστροφη διάσπαση β και η ηλεκτρονική σκέδαση και η ανίχνευση του ηλεκτρονίου που εμφανίζεται στην τελική κατάσταση.

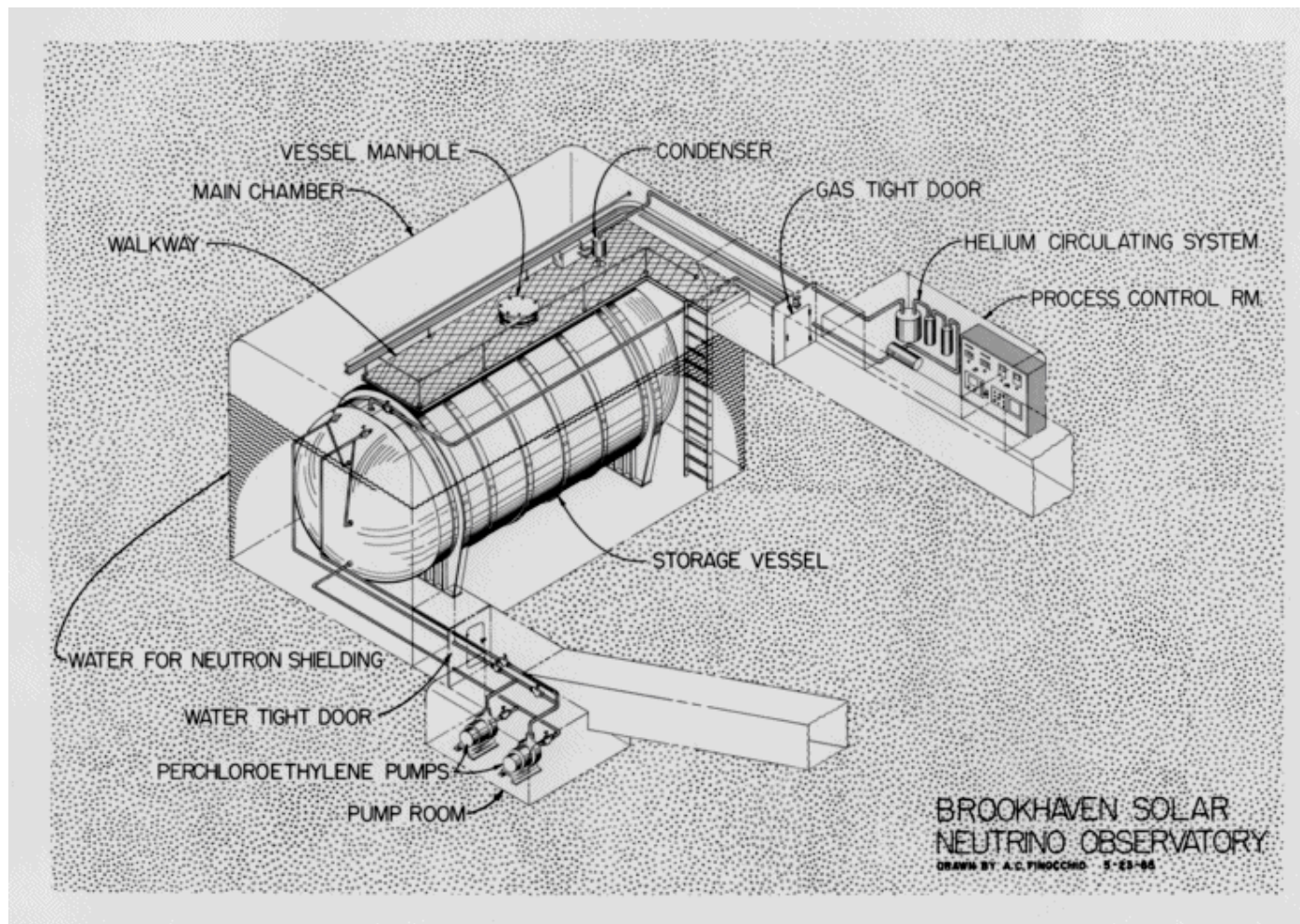
Η αντίστροφη διάσπαση β στηρίζεται στην αντίδραση $\nu e + n \rightarrow p + e^-$ δηλαδή ο ατομικός αριθμός Z αυξάνεται κατά 1. Αν ο πυρήνας που προκύπτει είναι ασταθής μπορούμε να τον ανιχνεύσουμε από την ακτίνα γ που εκπέμπει κατά την αποδιέγερση του. Σαν μονάδα μέτρησης χρησιμοποιούμε 1 SNU (Solar Neutrino Unit) που αντιστοιχεί σε 10^{-38} αντιδράσεις το δευτερόλεπτο ανά πυρήνα.

Έστω ότι έχουμε έναν τόνο από ένα υλικό με $A=20$ ο αριθμός των ατόμων που περιέχονται θα είναι $10^6 \cdot N_A / A = 3 \cdot 10^{28}$ άτομα. Για ροή 1 SNU περιμένουμε λιγότερο από μια αντίδραση τον χρόνο.

R. Davis J.N.Bachall

Το 1964 πρότειναν ένα πείραμα το οποίο θα μετρούσε τα νετρίνα που παράγονται στον ήλιο από τις πυρηνικές αντιδράσεις. Από τα πρώτα αποτελέσματα φάνηκε ότι η ροή των νετρίνων ήταν μικρότερη από την υπολογιζόμενη από τα ηλιακά μοντέλα. Γύρω στο 1980 η υπόθεση της ταλάντωσης νετρίνων κερδίζει έδαφος.

Πείραμα Homestake mine



Σημείωση 5

Από το 1965 ξεκίνησε ένα πείραμα (Davis et al) (1) για την μέτρηση της ροής των νετρίνων που προέρχονται από τον ήλιο. Τα νετρίνα αυτά παράγονται από τις πυρηνικές διασπάσεις που συμβαίνουν στο κέντρο του ηλίου. Τα νετρίνα αυτά προέρχονται από διασπάσεις β και είναι ηλεκτρονικού είδους. Αρχικός σκοπός ήταν να γίνει μια άμεση μέτρηση των πυρηνικών αντιδράσεων που γίνονται στον ήλιο και ο έλεγχος του ηλιακού μοντέλου. Ο ανιχνευτής αποτελούνταν από ένα μεγάλο ντεπόζιτο που ήταν γεμάτο με 615 τόνους τετραχλωροαιθάνιο (C_2Cl_4) και χρησιμοποιούσε την αντίδραση $^{37}Cl + \nu_e \rightarrow ^{37}Ar + e^-$. Η αντίδραση αυτή έχει κατώφλι 0,814 MeV άρα μπορούσε να ανιχνεύσει νετρίνα από τις αντιδράσεις του Be (4a) και του B (5b).

Μετρήσεις

615 τόνοι τετραχλωροαιθάνιο C_2Cl_4

Ένα n του Χλωρίου μετατρέπεται σε p

$$\nu_e + n \rightarrow p + e^-$$



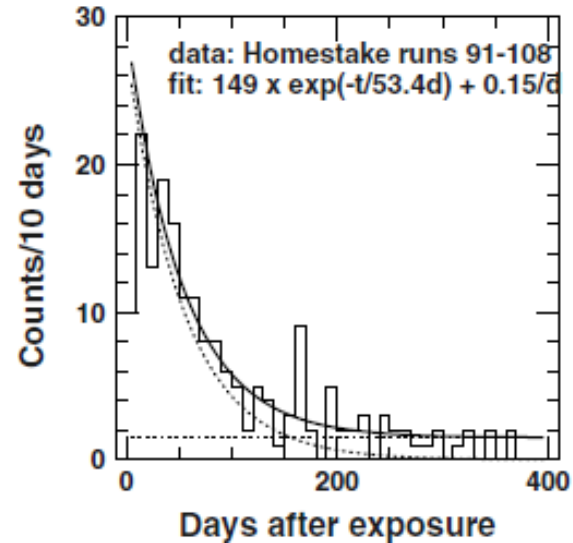
Κατώφλι Ενέργειας 0,814 MeV Αντιδρούν τα νετρίνα από την αντίδραση:



Κάθε 6 μήνες εξάγονταν τα άτομα Ar. Η ταυτοποίηση γίνεται από την καμπύλη διάσπασης.

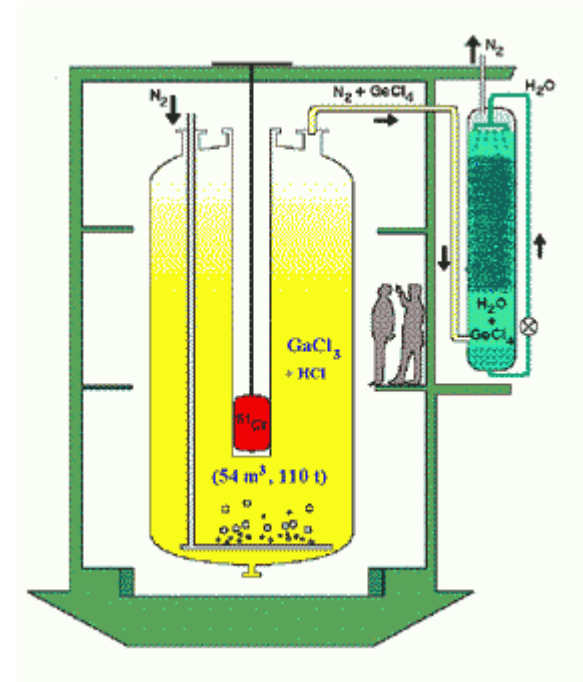
Η ροή νετρίνων που μετρούσε, ήταν περίπου το 30% της προβλεπόμενης από το Τυπικό Ηλιακό Μοντέλο.

Το ^{37}Ar διασπάται με ακτινοβολία β^- .



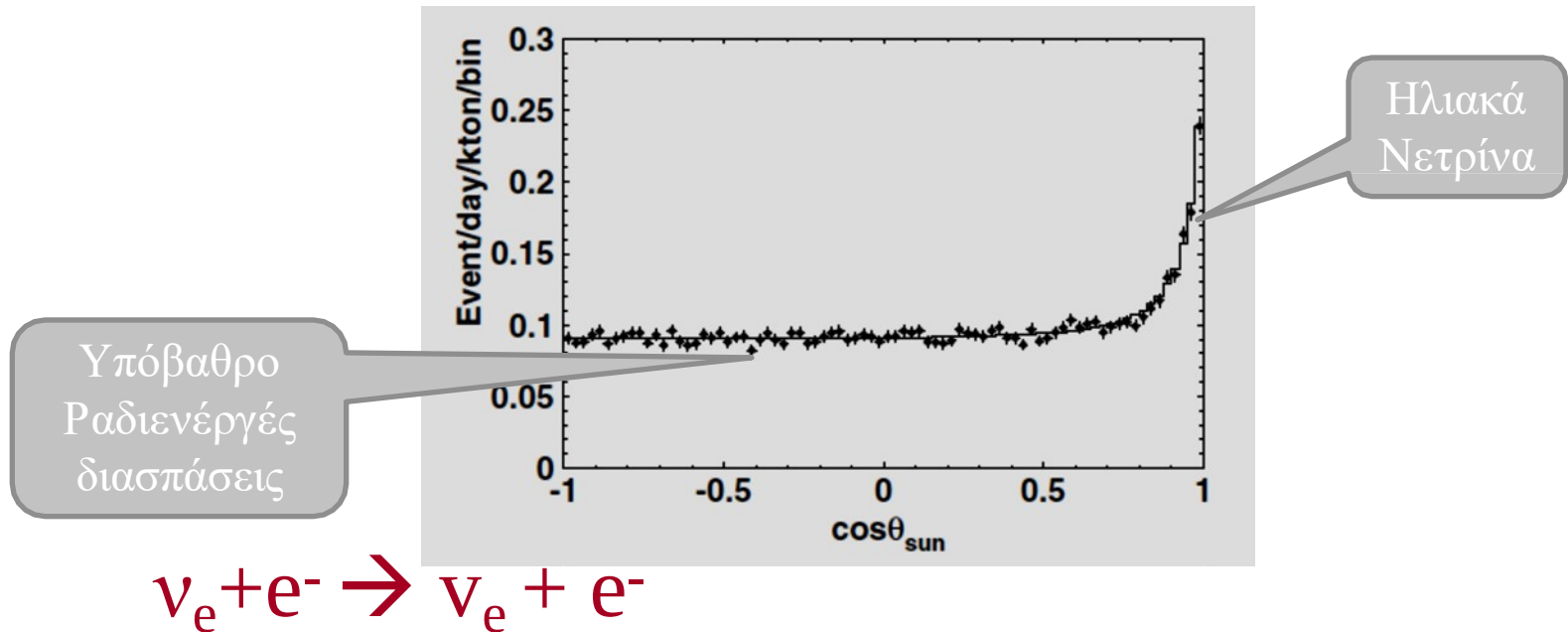
GALLEX, SAGE

- Στόχος Γάλιο Ga,
- $\nu_e + {}^{71}\text{Ga} \rightarrow {}^{71}\text{Ge} + e^-$
- GALLEX 31 tn SAGE 57 tn
- Εξαγωγή Γερμανίου με χημική επεξεργασία.
- Κατώφλι ενέργειας 0,232 MeV μπορεί να ανιχνεύσει νετρίνα από την αντίδραση pp .
- Επιβεβαίωσε ότι η αντίδραση αυτή είναι η επικρατούσα στην παραγωγή ενέργειας..
- Μέτρησαν ~ 67 SNU αντί του αναμενόμενου 130 SNU.



Διάγραμμα του ανιχνευτή GALLEX

Πείραμα Kamiokande.



Γωνία των νετρίνων ως προς τη διεύθυνση του ήλιου. Διακρίνονται τα ηλιακά από το υπόβαθρο.

Σημείωση 6

Το πείραμα KAMIOKANDE χρησιμοποιεί ανιχνευτή με νερό. Ο όγκος του νερού περιβάλλεται από φωτοπλ/στές που ανιχνεύουν το φως Cerenkov .

Ανιχνεύει την αντίδραση $\nu_e + e^- \rightarrow \nu_e + e^-$

Η διεύθυνση του παραγόμενου ηλεκτρονίου, βρίσκεται κοντά διεύθυνση του αρχικού νετρίνου.

Μέτρησε την ροή νετρίνων με ενέργεια $E_\nu > 7,5 \text{ MeV}$ και στη συνέχεια $E_\nu > 6.5 \text{ MeV}$.

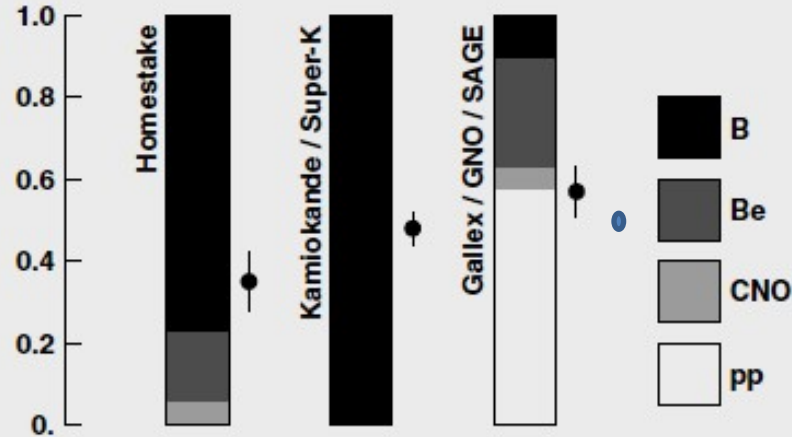
Στο διάγραμμα βλέπουμε τον αριθμό των νετρίνων σε σχέση με την γωνία που σχηματίζει η τροχιά τους με τον ήλιο. Και εδώ ο καταμετρούμενος αριθμός αντιδράσεων είναι ο μισός από τον υπολογιζόμενο θεωρητικά.

Συνοπτικά αποτελέσματα

Table 9.1 Solar neutrino experiments				
Experiment		Reaction	Threshold (MeV)	Observed/Expected Rate
SAGE + GNO	CC	$^{71}\text{Ga} (\nu_e, e)^{71}\text{Ge}$	0.2	0.58 ± 0.04
HOMESTAKE	CC	$^{37}\text{Cl} (\nu_e, e)^{37}\text{Ar}$	0.8	0.34 ± 0.03
SNO	CC	$\nu_e + {}^2\text{H} \rightarrow p + p + e$	~ 5	0.30 ± 0.05
SUPER-K	ES	$\nu + e \rightarrow \nu + e$	~ 5	0.46 ± 0.01
SNO	ES	$\nu + e \rightarrow \nu + e$	~ 5	0.47 ± 0.05
SNO	NC	$\nu + {}^2\text{H} \rightarrow p + n + \nu$	~ 5	0.98 ± 0.09
CC = charged current (W-exchange); NC = neutral current (Z exchange); ES = electron scattering (via NC for ν_μ, ν_τ , and via NC and CC for ν_e)				
Borexino	ES	$\nu + e \rightarrow \nu + e$		0.46 ± 1.5
		${}^7\text{Be}$		
		${}^8\text{Be}$		0.22 ± 0.4

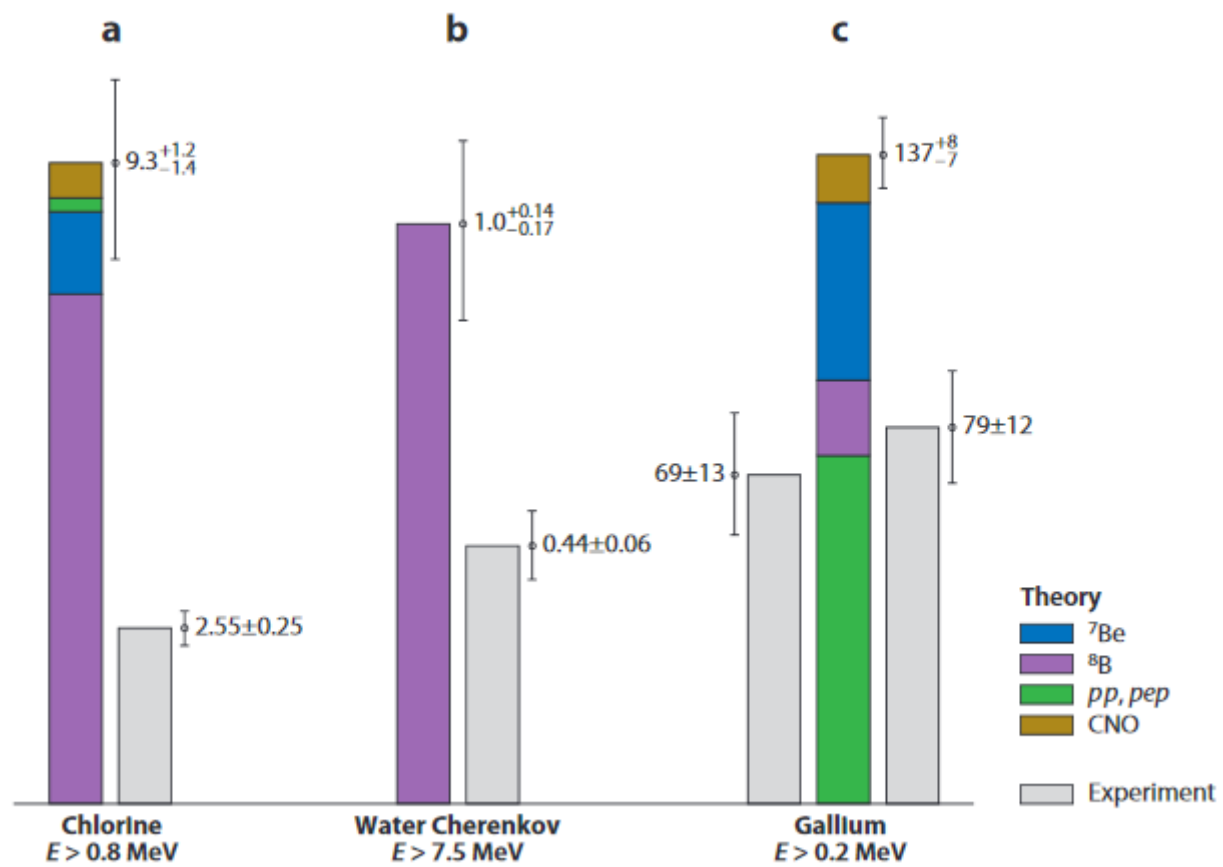
- **Συνολικά αποτελέσματα.** Όλα τα πειράματα που μετρούν φορτισμένα ρεύματα βρίσκουν μικρότερη ροή από την θεωρητική.
- Η μέτρηση του SNO σε ουδέτερα ρεύματα συμπίπτει με την θεωρητική.

Αποτελέσματα.



Το ποσοστό από κάθε αντίδραση που ανιχνεύει κάθε πείραμα, και το ποσοστό των μετρούμενων νετρίνων.

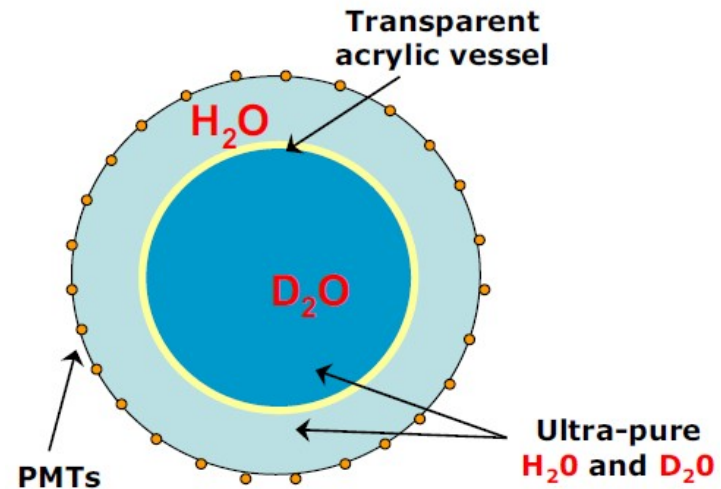
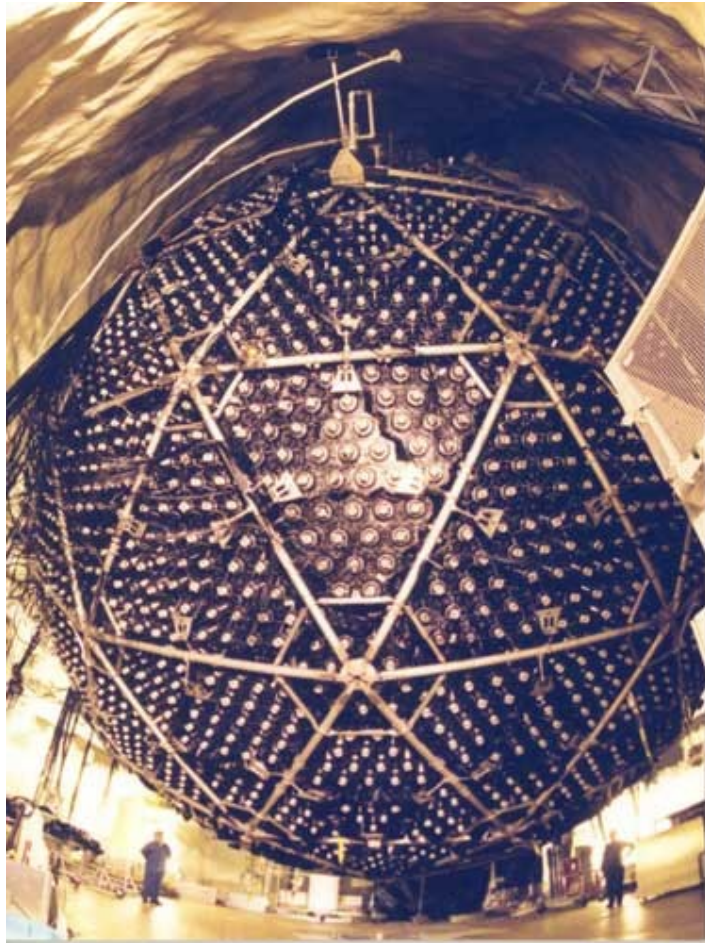
$$\nu_e \leftrightarrow \nu_\mu$$



Σημείωση

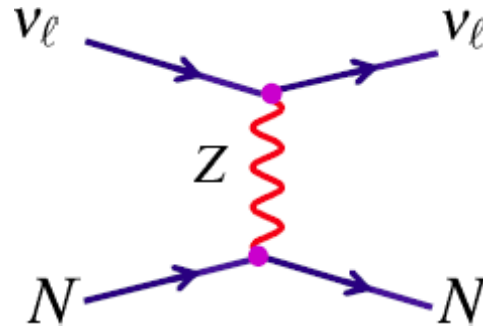
- Οι αντιδράσεις που χρησιμοποίησαν τα παραπάνω πειράματα για να ανιχνεύσουν τα νετρίνα ανήκουν στην κατηγορία των «φορτισμένων ρευμάτων» (CC) .
- Στις αντιδράσεις αυτές εμφανίζεται το λεπτόνιο το οποίο αντιστοιχεί στο νετρίνο. Τα ηλιακά νετρίνα έχουν μέγιστη ενέργεια 10 MeV. Ας θεωρήσω ότι μερικά από αυτά έχουν μετατραπεί σε μιονικά νετρίνα, η ενέργεια τους θα είναι περίπου η ίδια.
- Τα νετρίνα αυτής της ενέργειας δεν μπορούν να δημιουργήσουν μίονια γιατί το μίονιο έχει μάζα περίπου 105 MeV και συνεπώς δεν μπορούμε να τα δούμε σε αντιδράσεις φορτισμένων ρευμάτων.
- Τα νετρίνα αυτά, θα δώσουν μόνο αντιδράσεις «ουδετέρων ρευμάτων» (NC) δηλαδή αντιδράσεις στις οποίες δεν εμφανίζεται το φορτισμένο λεπτόνιο.

Το πείραμα SNO (Sandbury Neutrino Observatory)



1000 τόνοι βαρύ ύδωρ D_2O , στο εσωτερικό διαφανές δοχείο.
Περιβάλεται από 3000 τόνους νερού, για αποκλεισμό ραδιενέργειας περιβάλλοντος.
Το H_2O και το D_2O εξαιρετικά υψηλής καθαρότητας.
Χρησιμοποιούνται 9546 PMT.

Αντίδραση ουδέτερου ρεύματος στο πείραμα SNO



Η αντίδραση αυτή προκαλείται από όλα τα είδη των νετρίνων άρα μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν μέτρο της συνολικής ροής των νετρίνων. Το χαρακτηριστικό είναι η δημιουργία νετρονίου το οποίο διασπάται με διάσπαση β .

Όμως παρόμοια χαρακτηριστικά έχουν οι διασπάσεις από άλλα ισότοπα που υπάρχουν στο νερό και τα τοιχώματα. Για το πείραμα SNO χρησιμοποιήθηκαν υλικά εξαιρετικής καθαρότητας σε επίπεδο ισοτόπων.

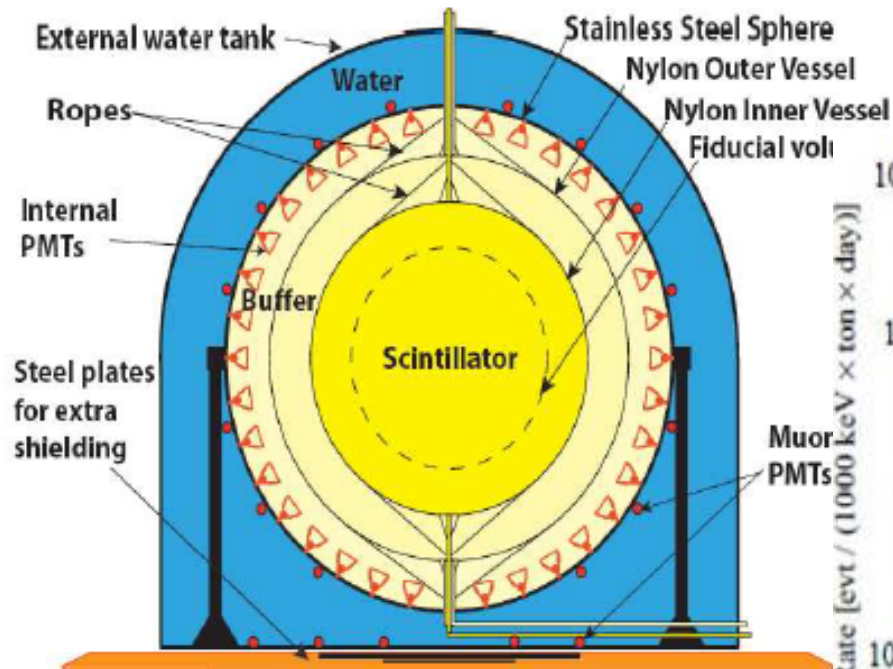
Αποτελέσματα SNO.

Το πείραμα SNO χρησιμοποιεί για ανιχνευτή «βαρύ νερό» (D_2O) και ανιχνεύει τις αντιδράσεις:



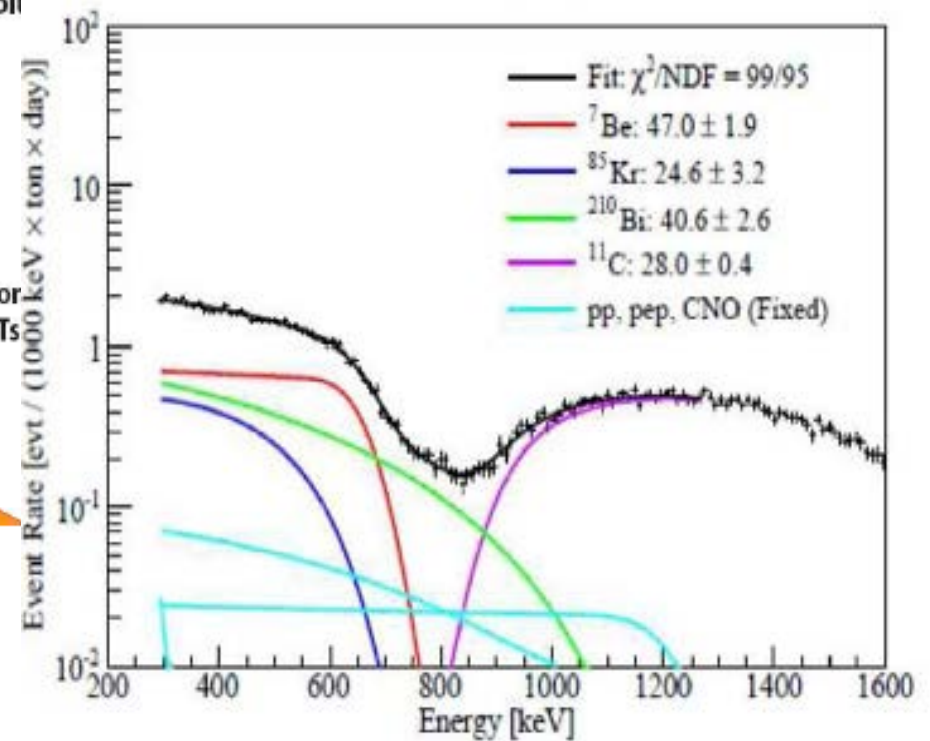
Μέτρησε την ροή των ηλιακών νευτρίνων στις δύο ομάδες αντιδράσεων και τα αποτελέσματα του για μεν τις αντιδράσεις φορτισμένων ρευμάτων (ν_e) είναι συμβατές με τα προηγούμενα πειράματα ενώ η ροή στα ουδέτερα είναι πολύ μεγαλύτερη. (περίπου τριπλάσια $\Phi_e = 1.76 \pm 0.05 \pm 0.09$ $\Phi_{nc} = 5.09 \pm 0.43 \pm 0.44$) το οποίο σημαίνει ότι έχει γίνει ταλάντωση των νευτρίνων με τη μέγιστη γωνία ανάμειξης.

BOREXINO



Liquid scintillator

ES $\nu_e + e \rightarrow \nu_e + e$



Ταλαντώσεις νετρίνων.

- Από το 1980 και μετά , έγινε γενικά αποδεκτό ότι τα νετρίνα έχουν μάζα διαφορετική από το μηδέν και ότι είναι δυνατόν να μετατρέπονται από το ένα είδος στο άλλο (π.χ. από ν_e σε ν_μ).
- Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται ταλάντωση νετρίνων. Αν ένα πείραμα μπορεί να ανιχνεύσει μόνον το ν_e , λόγω της ταλάντωσης θα εμφανίζεται έλλειμμα .
- Η ταλάντωση μπορεί να εξηγήσει το πείραμα του Davies
- Από τα μοντέλα που προτάθηκαν το σημαντικότερο είναι το μοντέλο που προτάθηκε από τους Mikheyev – Smirnov (2), που στηρίχθηκε στις ιδέες του Wolfenstein (MSW).
- Σύμφωνα με το μοντέλο αυτό η ταλάντωση των νετρίνων είναι διαφορετική στο εσωτερικό του ηλίου από το κενό διότι η αλληλεπίδραση των νετρίνων με το μεγάλης πυκνότητας ηλεκτρονικό νέφος στο εσωτερικό του ηλίου μεγιστοποιεί την γωνία μείξης και συνεπώς το ποσοστό των ηλεκτρονικών νετρίνων που μετατρέπονται σε μυονικά ή νετρίνα ταυ.

Μηχανισμός MSW

- Με λίγα λόγια η ν_1 κατάσταση του νετρίνου σκεδάζεται στα ηλεκτρόνια.
- Η αλληλεπίδραση αυτή είναι ισοδύναμη με την αύξηση της μάζας της από m_1 σε m_2 και με τη αύξηση της συνιστώσας ν_2 το νετρίνο εμφανίζεται σαν μιονικό.
- Το μιονικό νετρίνο μπορεί να βγει από την ηλιακή σφαίρα χωρίς να υποστεί άλλη μετατροπή.
- Επίσης βλέπουμε ότι για μια κρίσιμη πυκνότητα έχουμε τη μέγιστη μετατροπή. Η κρίσιμη πυκνότητα εξαρτάται από την ορμή του νετρίνου. Σαν αποτέλεσμα το ποσοστό μετατροπής διαφέρει για τις διάφορες ενέργειας των νετρίνων όπως φαίνεται στον πίνακα.

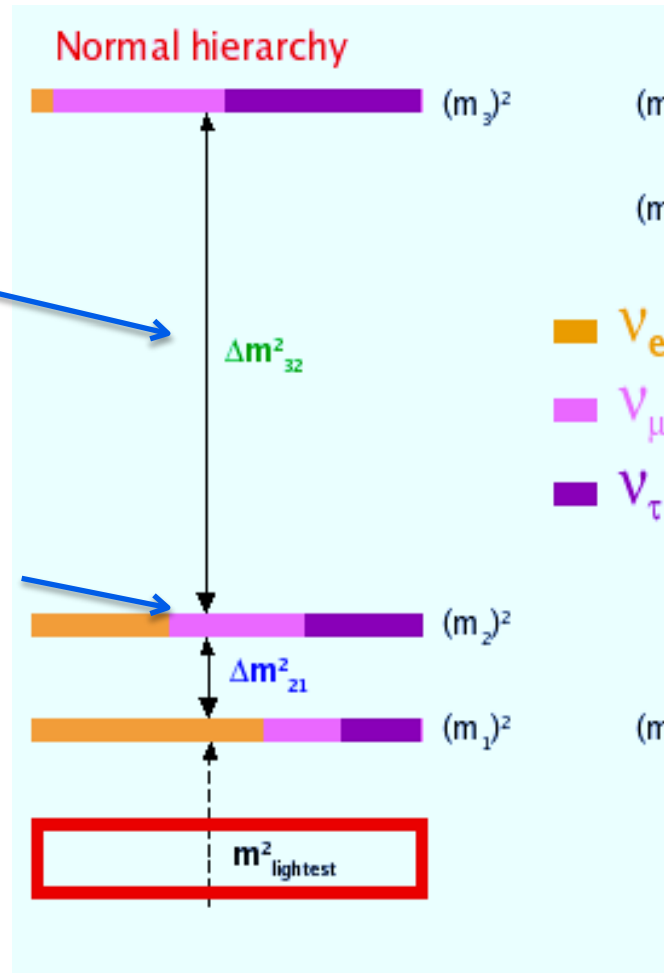
Διαφορά μαζών

$$|\Delta m_{31}^2| \approx |\Delta m_{32}^2| \equiv \Delta m^2_{atm} = 2.43 + 0.13 - 0.13 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$$

$$|\Delta m_{21}^2| \equiv \Delta m^2_{sol} = 7.59 + 0.20 - 0.21 \times 10^{-5} \text{ eV}^2$$

Μέτρηση σε
επιταχυντές και
ατμοσφαιρικά
νετρίνα.

Μέτρηση σε
αντιδραστήρες
και ηλιακά
νετρίνα.



Σημείωση

Με τα πειράματα ταλαντώσεων, μετράμε μόνο τη διαφορά των μαζών, όχι την απόλυτη τιμή της μάζας των νετρίνων.

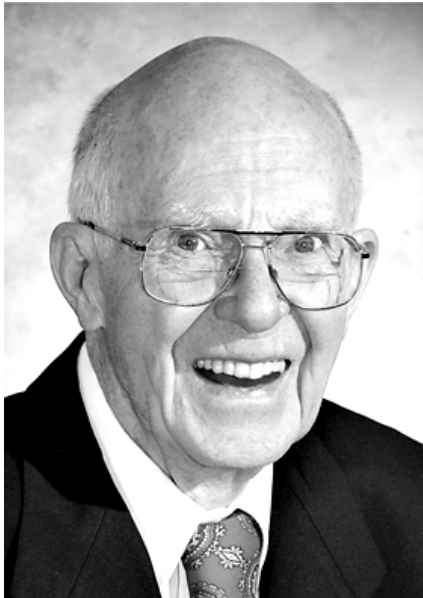
Οι ιδιοκαταστάσεις μάζας είναι $\nu_1 \nu_2 \nu_3$

Τα $\nu_e \nu_\mu \nu_\tau$ είναι «ιδιότητες» με τις οποίες αντιδρούν (flavor).

Στην εικόνα βλέπουμε τις ιδιοκαταστάσεις μάζας ν_i και τα χρώματα αντιστοιχούν στη συμμετοχή των τριών flavors.

Η υπόθεση της Κανονικής ιεραρχίας έχει αποδειχθεί.

The Nobel Prize in Physics 2002



**Raymond
Davis Jr.**

Solar neutrino Deficite



Masatoshi Koshihara

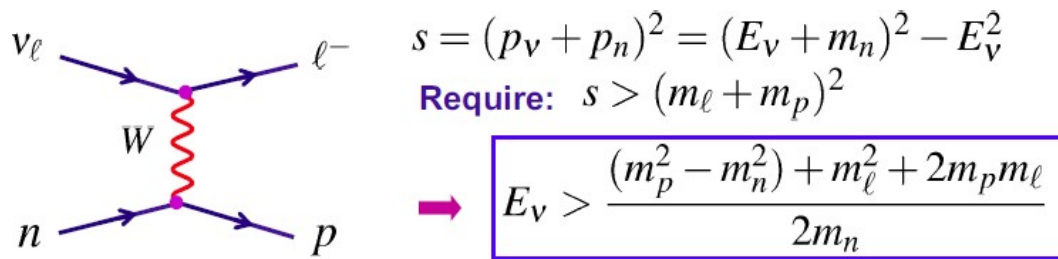


Riccardo Giacconi

X-ray astronomy

Αντίστροφη β , χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα Homestake, Galex και Sage.

Στην αντίδραση ν_e με νετρόνιο, αναγνωρίζουμε την αντίστροφη της διάσπασης β .



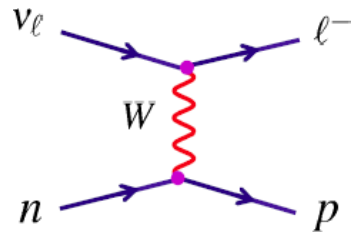
$$E_{\nu_e} > 0$$

$$E_{\nu_\mu} > 110 \text{ MeV}$$

$$E_{\nu_\tau} > 3.5 \text{ GeV}$$

Κινητικά το κατώφλι για την αντίδραση αυτή είναι μηδέν, όμως λόγω πυρηνικών φαινομένων, είναι μεγαλύτερο από το μηδέν και εξαρτάται από το είδος του πυρήνα.

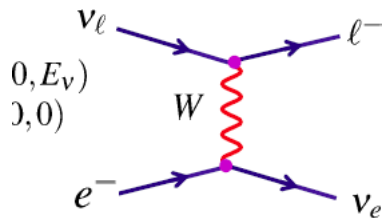
Αντιστοιχία νετρίνου - λεπτονίου.



$$\nu_e + n \rightarrow e^- + p$$

$$\nu_\mu + n \rightarrow \mu^- + p$$

$$\nu_\tau + n \rightarrow \tau^- + p$$

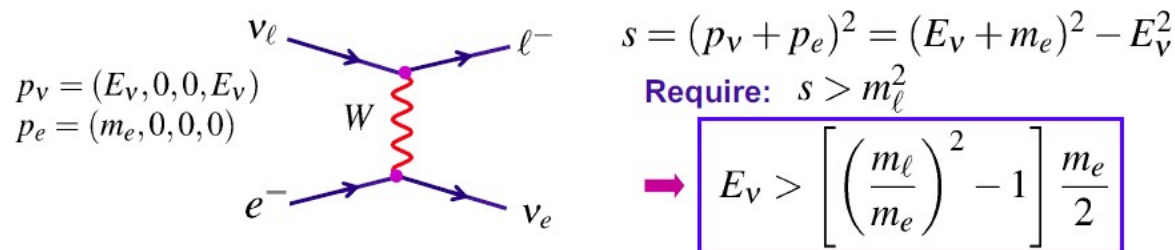


$$\nu_e + e^- \rightarrow e^- + \nu_e$$

$$\nu_\mu + e^- \rightarrow \mu^- + \nu_e$$

$$\nu_\tau + e^- \rightarrow \tau^- + \nu_e$$

Σκέδαση $\nu_e + e^- \rightarrow \nu_e + e^-$, χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα KamioKande και SNO



$$E_{\nu_e} > 0$$

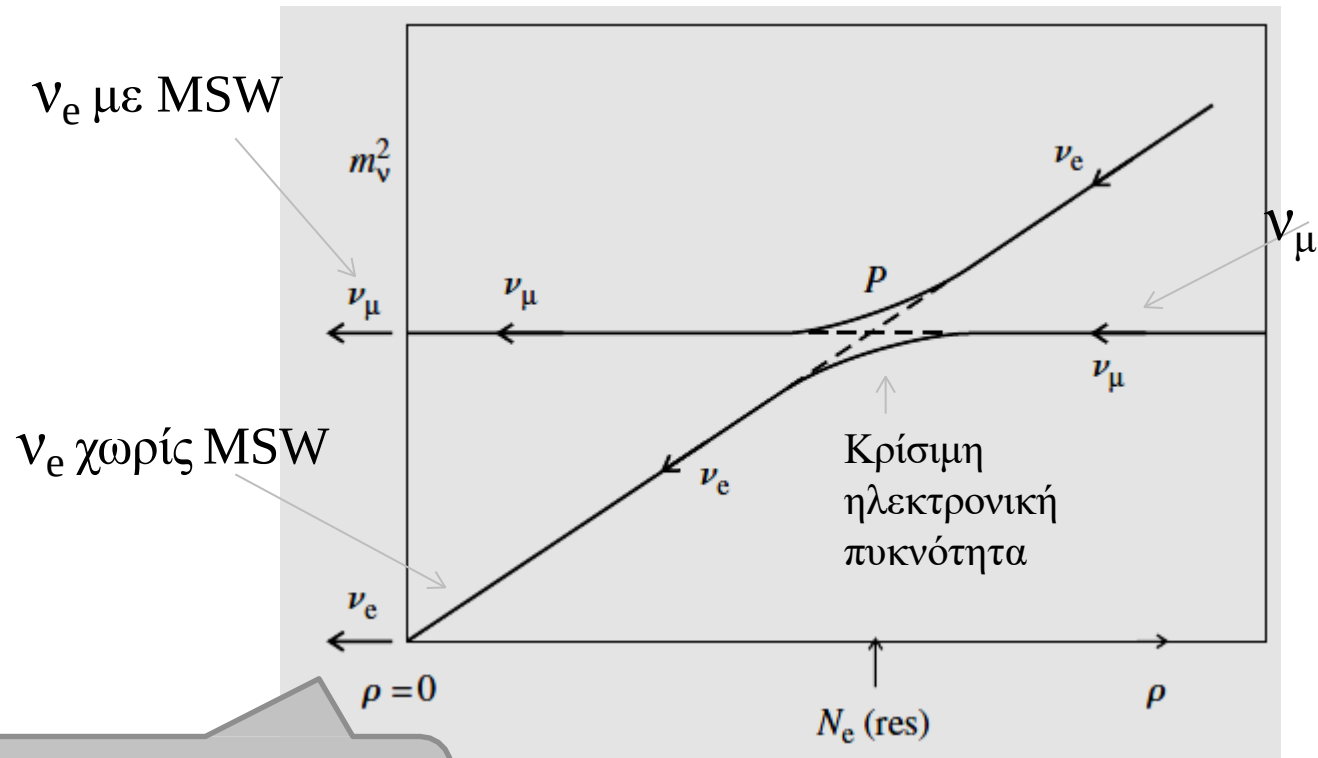
$$E_{\nu_\mu} > 110 \text{ MeV}$$

$$E_{\nu_\tau} > 3.5 \text{ GeV}$$

Κινητικά η ελάχιστη ενέργεια του ηλεκτρονίου είναι μηδέν, χρειάζεται όμως μεγαλύτερη ενέργεια (5 MeV), ώστε το παραγόμενο ηλεκτρόνιο να μπορέσει να ανιχνευτεί.

Αν $\nu_e \rightarrow \nu_\mu$ και $E_{\nu_\mu} < 110 \text{ MeV}$ δεν παράγουν μίονια άρα δεν ανιχνεύονται.

Μηχανισμός MSW



Ο κατακόρυφος άξονας αντιστοιχεί
στα ποσοστά των δύο «γεύσεων»
 ν_e και ν_μ

Υπολογισμός ηλεκτρονικής πυκνότητας συντονισμού

Γραφουμε την εξίσωση Shcr. Για νετρίνο σαν συνδυασμό δύο καταστάσεων μάζας . Ο όρος δεξιά επηρεάζει εξ ίσου τις δύο καταστάσεις και τον παραλείπουμε.

$$i \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E_1 & 0 \\ 0 & E_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} m_1^2 / 2p & 0 \\ 0 & m_2^2 / 2p \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} p & 0 \\ 0 & p \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \end{pmatrix}$$

$$i \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \end{pmatrix} = M_V \begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \end{pmatrix}$$

Μετά από τριγωνομετρικές πράξεις ο πίνακας μάζας παίρνει την μορφή , όπου θ είναι η γωνία μείξης των δύο καταστάσεων.

$$M_V \left[\frac{(m_1^2 + m_2^2)}{4p} \right] \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} + \left(\frac{\Delta m^2}{4p} \right) \begin{pmatrix} -\cos 2\theta & \sin 2\theta \\ \sin 2\theta & \cos 2\theta \end{pmatrix}$$

Σύμφωνα με το μοντέλο MSW , τα ηλεκτρονικά νετρίνα, μπορούν να αντιδράσουν με ηλεκτρόνια . Τα ν_μ και ν_τ που θα προκύψουν από την ταλάντωση, δεν μπορούν να αντιδράσουν . Το ν_e σκεδάζεται στα ηλεκτρόνια και μπορούμε να την περιγράψουμε σαν σκέδαση σε δυναμικό V_e .

$$V_e = G_F \sqrt{2} N_e$$

$$m^2 = E^2 - p^2 \rightarrow (E + V_e)^2 - p^2 \approx m^2 + 2EV_e$$

$$\Delta m^2 = 2G_F N_e E$$

Η σκέδαση μεταβάλλει την φάση σαν το νετρίνο να απέκτησε επιπλέον μάζα Δm^2 ! Η διαφορά αυτή πρέπει να προστεθεί στον πίνακα μάζας για την διάδοση στο κενό!

Υπολογισμός ηλεκτρονικής πυκνότητας συντονισμού

Στη σχέση που προκύπτει, το πρώτο μέρος επηρεάζει εξ' ίσου τις δύο συνιστώσες και το παραλείπουμε. Ορίζουμε μια νέα γωνία θ_m που περιγράφει την μείξη όταν το νεutrίνο ταξιδεύει μέσα στην ύλη.

$$M_V = \left[\frac{(m_1^2 + m_2^2)}{4p} + \frac{\sqrt{2}G_F N_e}{2} \right] \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} + \left[\frac{\Delta m^2}{4p} \right] \begin{pmatrix} -\cos 2\theta + A & \sin 2\theta \\ \sin 2\theta & \cos 2\theta - A \end{pmatrix}$$
$$= \left[\frac{\Delta m^2}{4p} \right] \begin{pmatrix} -\cos 2\theta_m & \sin 2\theta_m \\ \sin 2\theta_m & \cos 2\theta_m \end{pmatrix}$$

$$A = 2\sqrt{2}G_F N_e P / \Delta m^2$$

$$\tan 2\theta_m = \frac{\sin 2\theta}{[\cos 2\theta - A]} = \frac{\tan 2\theta}{1 - (L_V / L_e) \sec 2\theta}$$

$$N_e = \frac{\Delta m^2 \cos 2\theta}{2\sqrt{2}G_F p}$$

$$L_V = \frac{4\pi p}{\Delta m^2} \quad L_e = \frac{4\pi}{2\sqrt{2}G_F N_e}$$

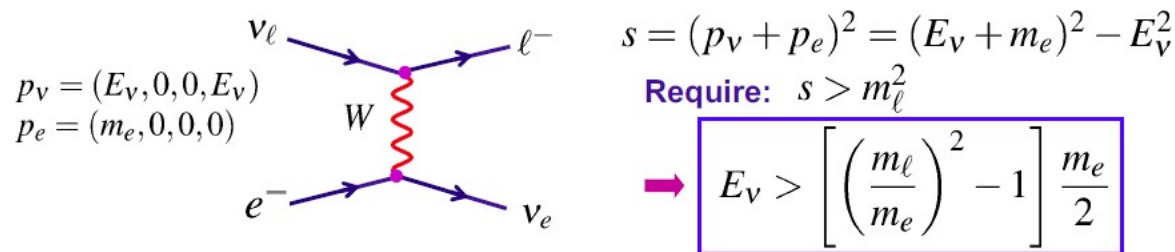
$$L_V = L_e \cos 2\theta$$

Παρατηρούμε ότι για την τιμή αυτή της ηλεκτρονικής πυκνότητας, η μείξη γίνεται μέγιστη. Δηλ $\theta_m = 45^\circ$

Η πυκνότητα ηλεκτρονίων στον πυρήνα του ηλίου, είναι περίπου ίση με 10^{31} ηλ/ m^3 και το αντίστοιχο L_γ περίπου ίσο με 10^5 μέτρα, πολύ μικρό σε σχέση με την ακτίνα του ηλίου περίπου 10^8 m.

Οι παραγόμενες καταστάσεις θα διαδοθούν στο κενό σαν ν_μ και ν_τ .

Σκέδαση $\nu_e + e^- \rightarrow \nu_e + e^-$, χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα KamioKande και SNO



$$E_{\nu_e} > 0$$

$$E_{\nu_\mu} > 110 \text{ MeV}$$

$$E_{\nu_\tau} > 3.5 \text{ GeV}$$

Κινητικά η ελάχιστη ενέργεια του ηλεκτρονίου είναι μηδέν, χρειάζεται όμως μεγαλύτερη ενέργεια (5 MeV), ώστε το παραγόμενο ηλεκτρόνιο να μπορέσει να ανιχνευτεί.

Αν $\nu_e \rightarrow \nu_\mu$ και $E_{\nu_\mu} < 110 \text{ MeV}$ δεν παράγουν μίονια άρα δεν ανιχνεύονται.

Βιβλιογραφία

Βραβείο Nobel Φυσικής 2002

T. Gaisser, Cosmic Rays and Particle Physics, Cambridge 1990

D. Perkins Astroparticle Physics, Oxford, 2009

Bahcall J.N., H.M. Pinsonneault, and S. Basu Astroph. J. **555**, 990 (2001)

Barnett R.M. et al. (Review of Particle Physics) Phys. Rev. **D54**, 1 (1996)

Davis et al 1968, Phys. Rev. Lett. 20 1205

Mikheyev S.P. and Smirnov A.Yu. 1986 Sov. J. Nucl. Phys. 42 913

The SNO collaborarion, Phys.Rev.Lett.,87: 071301 (2001)

Q.R. Ahmad et al,Phys.Rev.Lett.,89:011302,(2002)

Y. Fukuda et al., Phys.Rev.Lett., 82, 1810 (1999)

Y. Fukuda et al., Phys.Rev.Lett., 82, 2644 (1999)

Σημείωση 6

Οι αντιδράσεις που χρησιμοποίησαν τα παραπάνω πειράματα για να ανιχνεύσουν τα νετρίνα ανήκουν στην κατηγορία των «φορτισμένων ρευμάτων» (CC) . Στις αντιδράσεις αυτές εμφανίζεται το λεπτόνιο το οποίο αντιστοιχεί στο νετρίνο. Τα ηλιακά νετρίνα έχουν μέγιστη ενέργεια 10 MeV. Ας θεωρήσω ότι μερικά από αυτά έχουν μετατραπεί σε μιονικά νετρίνα, η ενέργεια τους θα είναι περίπου η ίδια. Τα νετρίνα αυτής της ενέργειας δεν μπορούν να δημιουργήσουν μόνια γιατί το μόνιο έχει μάζα περίπου 105 MeV και συνεπώς δεν μπορούμε να τα δούμε σε αντιδράσεις φορτισμένων ρευμάτων. Τα νετρίνα αυτά θα δώσουν μόνο αντιδράσεις «ουδετέρων ρευμάτων» (NC) δηλαδή αντιδράσεις στις οποίες δεν εμφανίζεται φορτισμένο λεπτόνιο.