



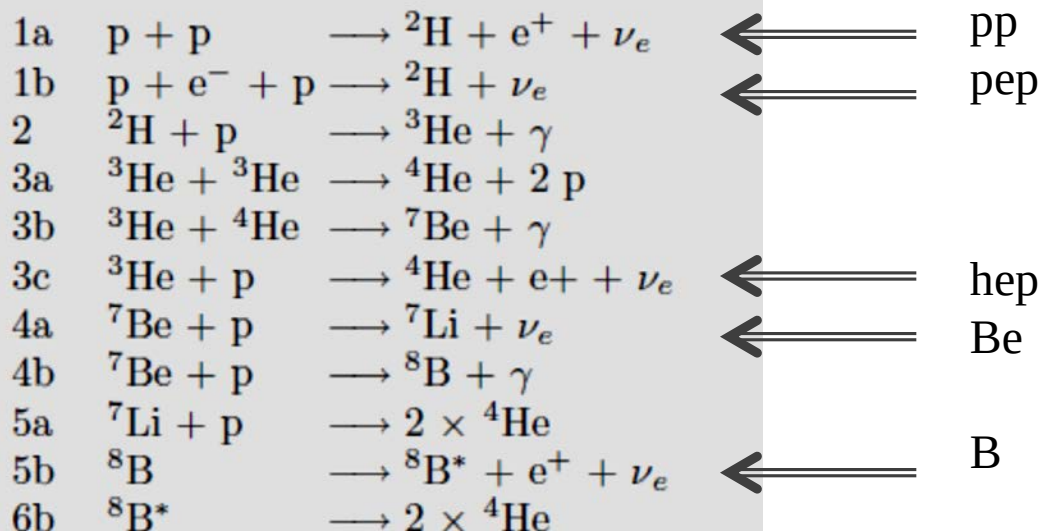
Ηλιακά νετρίνα

Πρόβλημα ηλιακών νετρίνων,
ταλαντώσεις.

Αντιδράσεις στο εσωτερικό του Ηλίου (Τυπικό Ηλιακό Μοντέλο)

The *pp* chain consists of the following reactions:

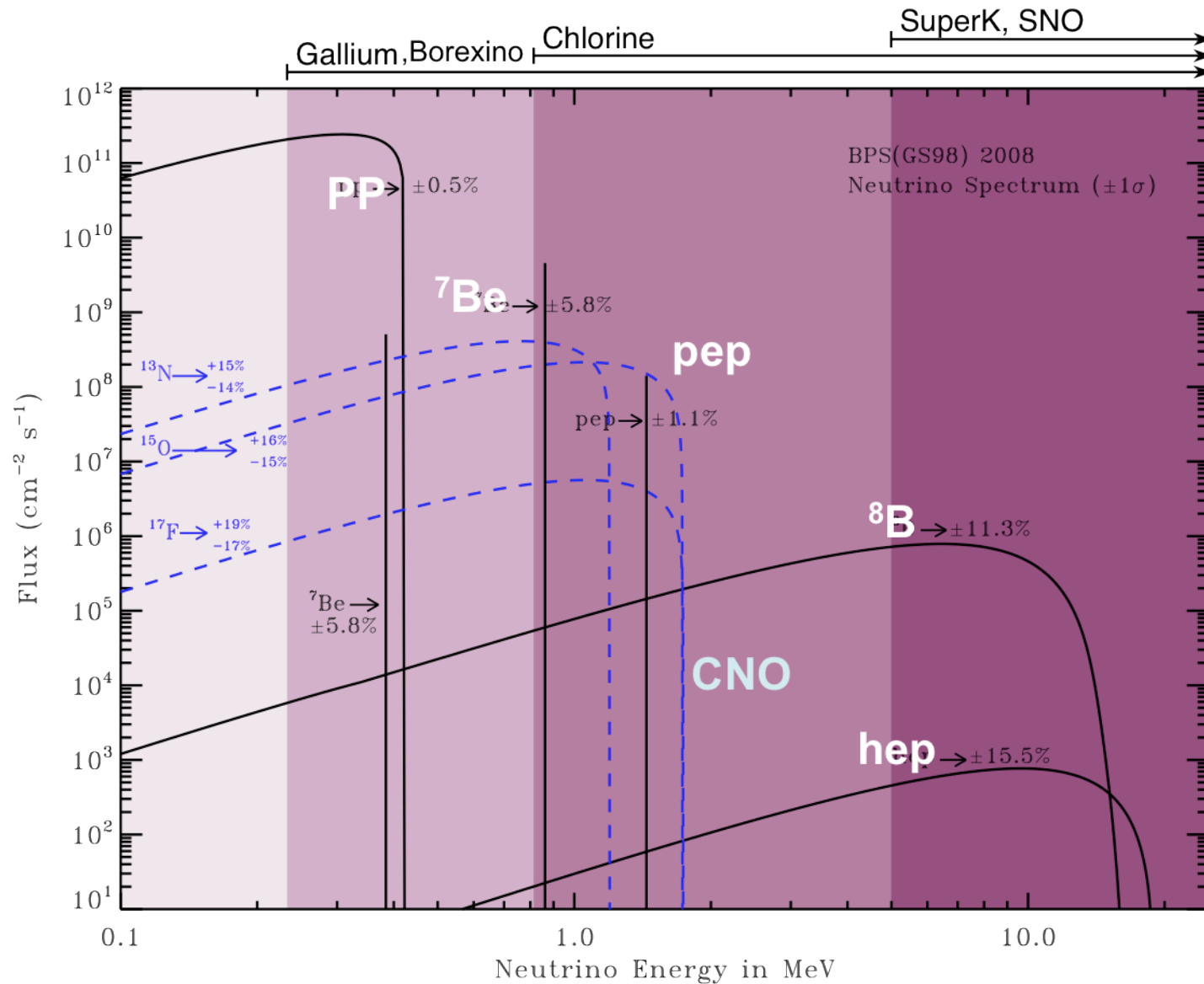
98,4 %



Εικόνα 1 Πυρηνικές αντιδράσεις στο κέντρο του ηλίου



J. Bacall (2005)

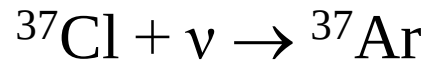


- Ο αριθμός των ηλιακών νετρίνων που φθάνει στη γη είναι $6 \cdot 10^{10} / \text{s cm}^2$.
- Η μονάδα 1 SNU (Solar Neutrino Unit) αντιστοιχεί σε 10^{-38} αντιδράσεις το δευτερόλεπτο ανά πυρήνα στόχου.
- Για έναν τόνο από ένα υλικό με $A=20$, ο αριθμός των ατόμων που περιέχονται θα είναι $10^6 \cdot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



Το πρόβλημα των ηλιακών νετρίνων.

1964 R. Davis J.N.Bachall

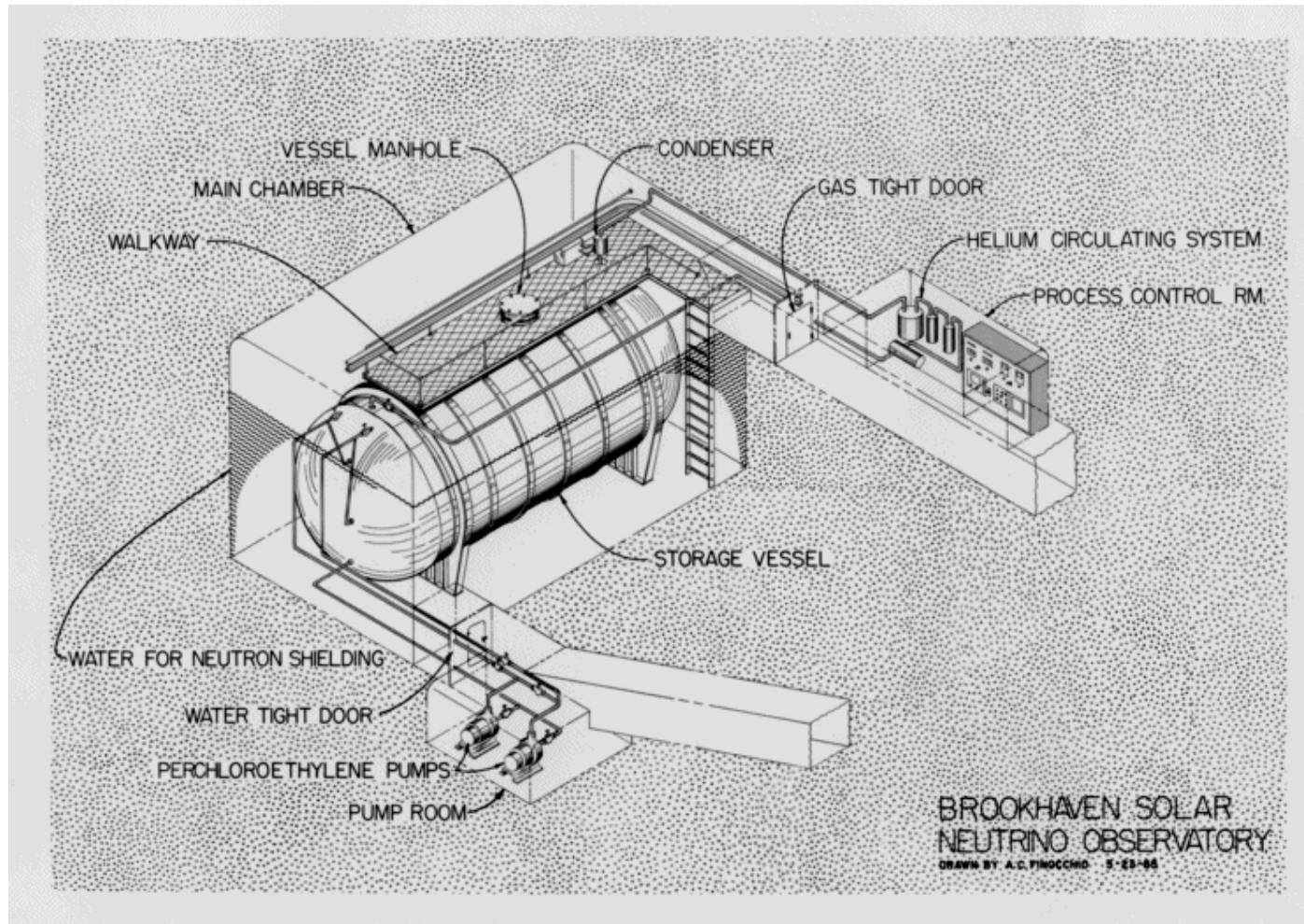


1969 Πρώτα αποτελέσματα, N_ν μικρότερο από αναμενόμενο.

1979 Υπόθεση ταλάντωσης.

2001 Αποτελέσματα SNO επιβεβαίωση.

Πείραμα Homestake mine



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

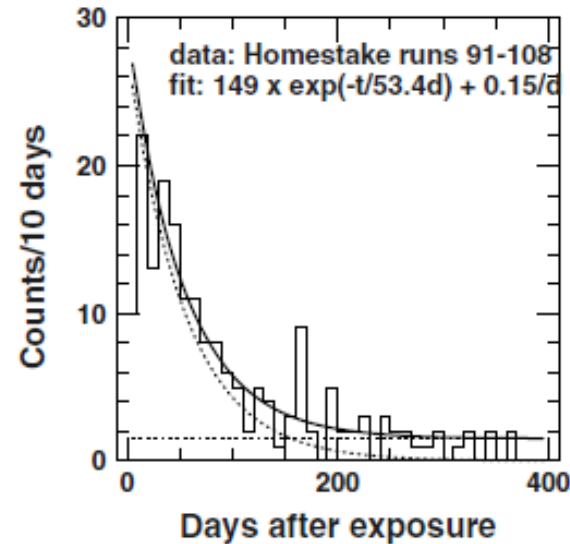
Αντιδρούν τα νετρίνα από την αντίδραση:



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

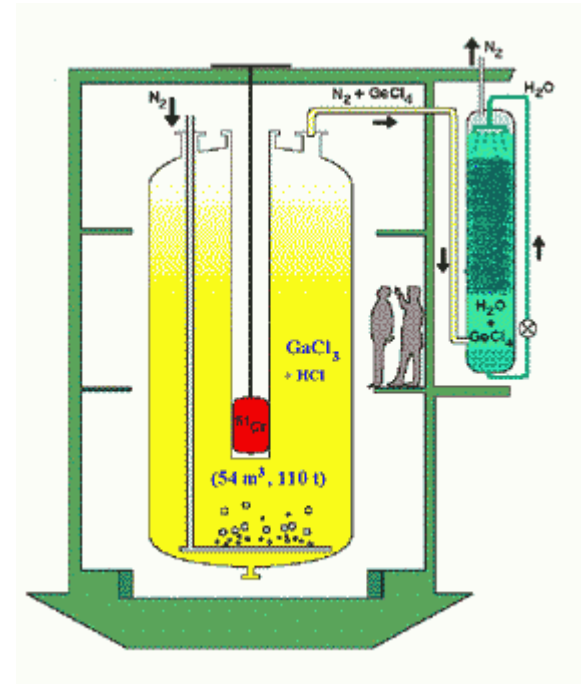
Η ροή νετρίνων που μετρούσε, ήταν περίπου το 30% της προβλεπόμενης από το Τυπικό Ηλιακό Μοντέλο.

Το ^{37}Ar διασπάται με ακτινοβολία β .



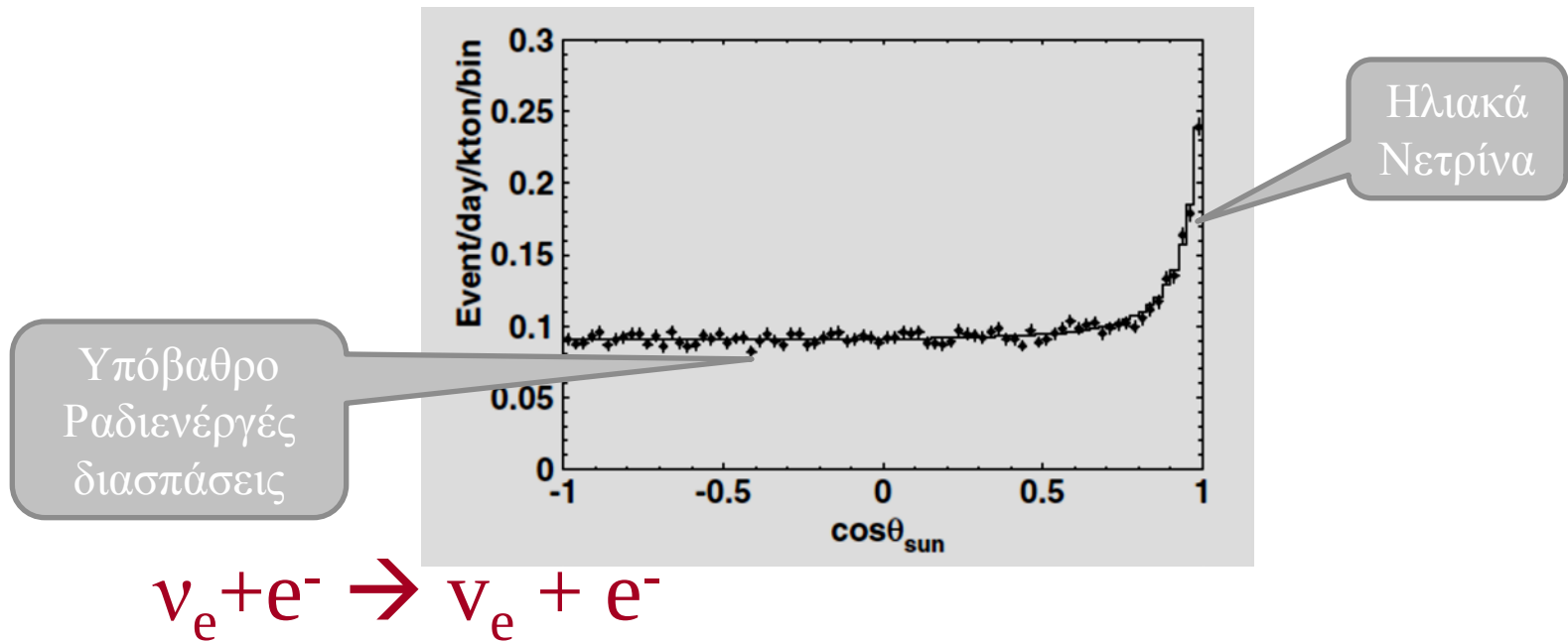
GALLEX, SAGE

- 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.

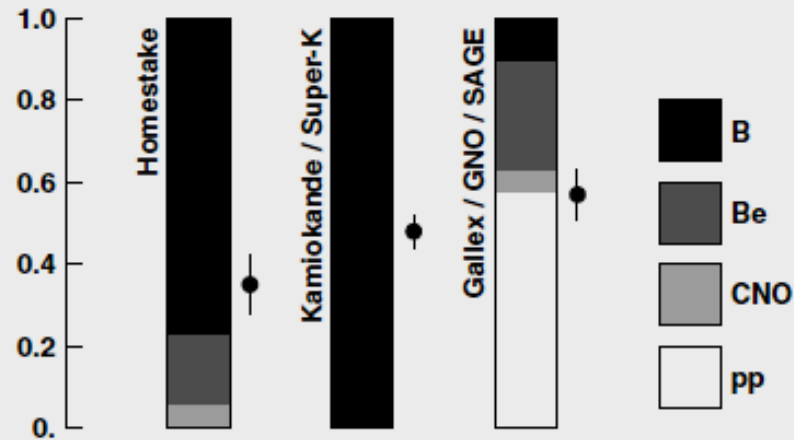
Συνοπτικά αποτελέσματα

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)

- **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.

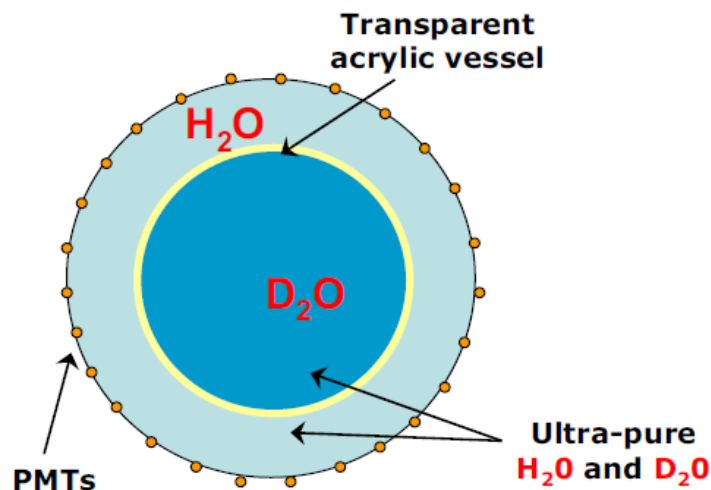
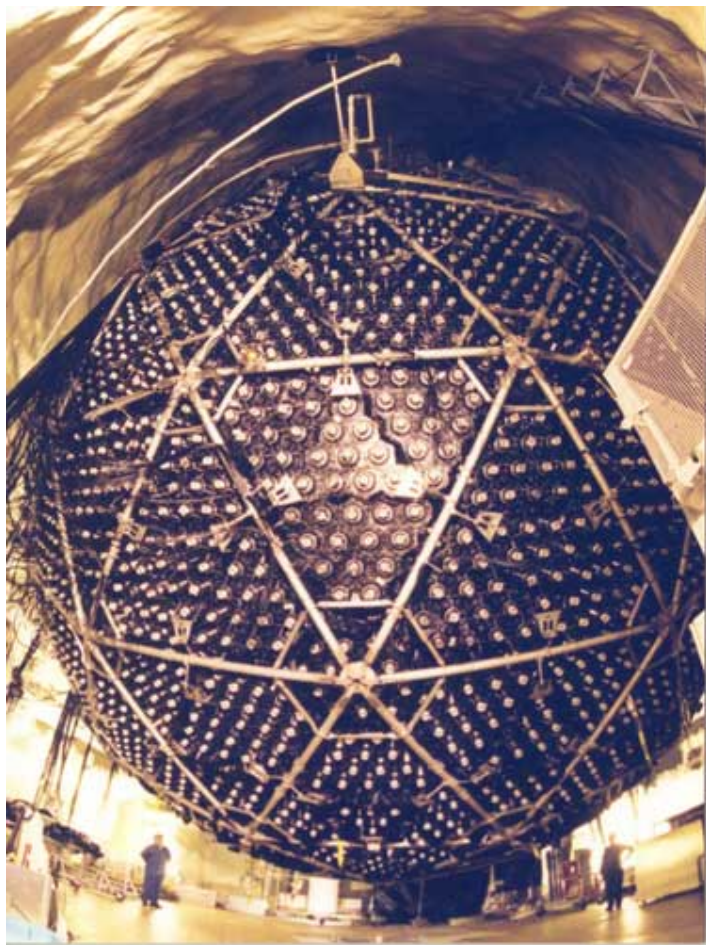


Το ποσοστό από κάθε αντίδραση που ανιχνεύει κάθε πείραμα, και το ποσοστό των μετρούμενων νετρίνων.

ates

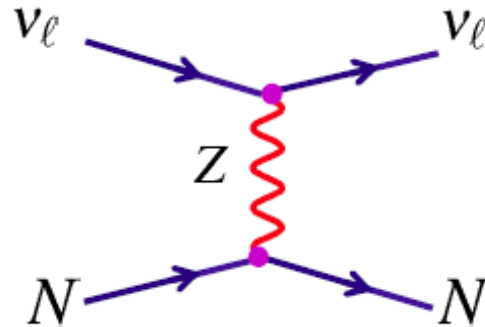
$$\nu_e \leftrightarrow \nu_\mu$$

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.

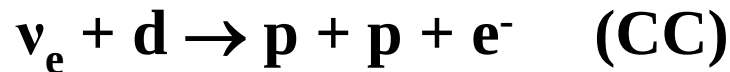
Αντίδραση ουδέτερου ρεύματος στο πείραμα SNO



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:

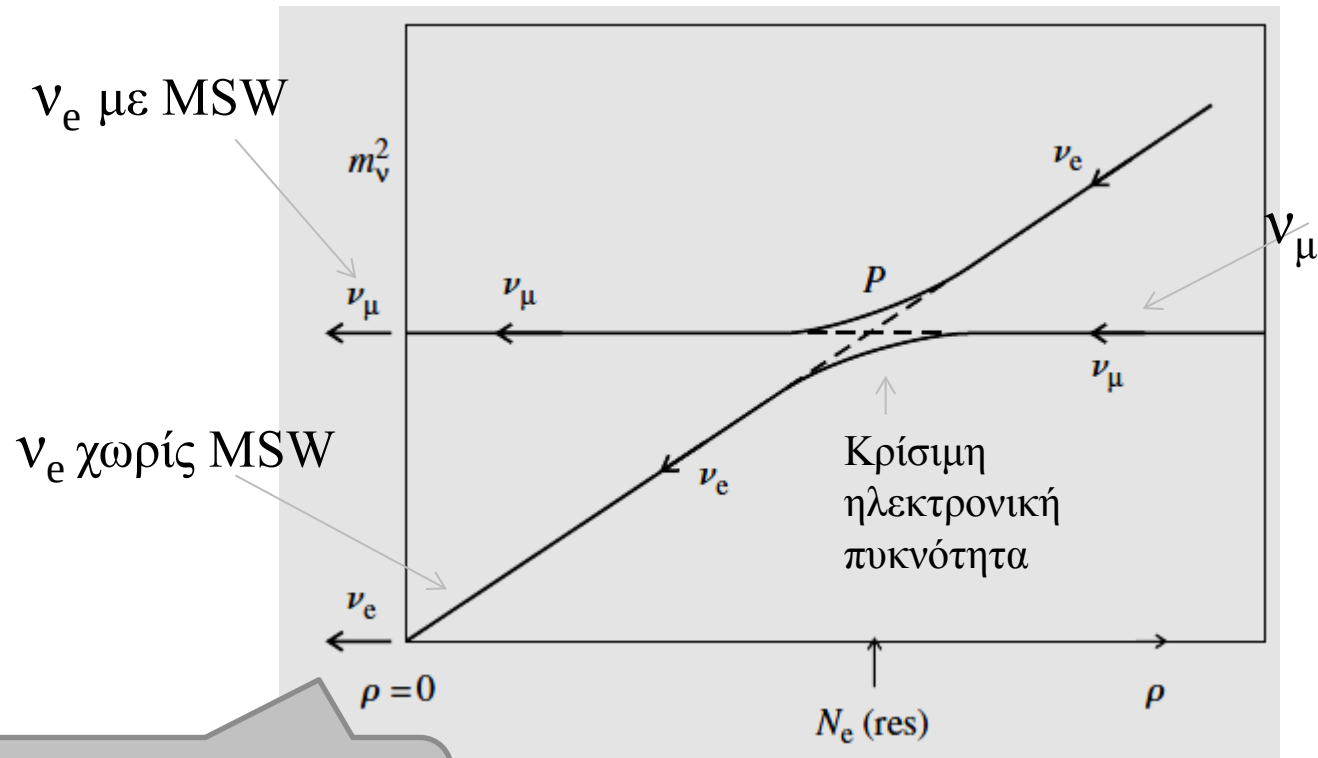


Μέτρησε την ροή των ηλιακών νευτρίνων στις δύο ομάδες αντιδράσεων και τα αποτελέσματα του για μεν τις αντιδράσεις φορτισμένων ρευμάτων (ν_e) είναι συμβατές με τα προηγούμενα πειράματα ενώ η ροή στα ουδέτερα είναι πολύ μεγαλύτερη, (περίπου τριπλάσια $\Phi_e = 1,76 \pm 0,05 \pm 0,09$ $\Phi_{nc} = 5,09 \pm 0,43 \pm 0,44$) το οποίο σημαίνει ότι έχει γίνει ταλάντωση των νευτρίνων με τη μέγιστη γωνία ανάμειξης.

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.

Μηχανισμός MSW



Ο κατακορυφός άξονας αντιστοιχεί στα ποσοστά των δύο «γεύσεων» v_e και v_μ



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 νεutrino εμφανίζεται σαν μιονικό.
- Το μιονικό νεutrino 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

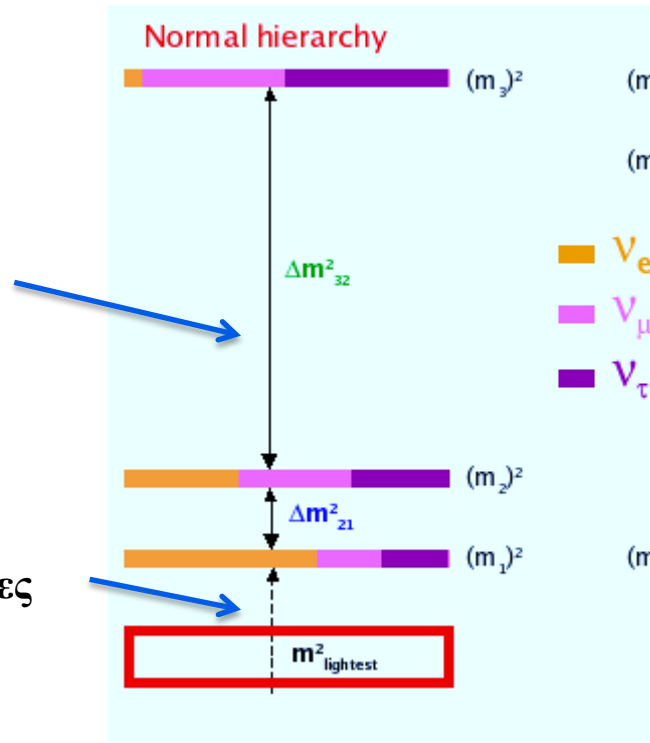
$$\Delta m_{21}^2 \equiv \Delta m^2_{\text{sol}} = 7.59 + 0.20 - 0.21 \times 10^{-5} \text{ eV}^2 \text{ [16]}$$

$$|\Delta m_{31}^2| \approx |\Delta m_{32}^2| \equiv \Delta m^2_{\text{atm}}$$

$$= 2.43 + 0.13 - 0.13 \times 10^{-3} \text{ eV}^2 \text{ [16]}$$

Μέτρηση σε
επιταχυντές και
ατμοσφαιρικά
νεutrίνα.

Μέτρηση σε
αντιδραστήρες
και ηλιακά
νεutrίνα.



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

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

$s = (p_\nu + p_n)^2 = (E_\nu + m_n)^2 - E_\nu^2$
Require: $s > (m_\ell + m_p)^2$
 $\Rightarrow E_\nu > \frac{(m_p^2 - m_n^2) + m_\ell^2 + 2m_p m_\ell}{2m_n}$

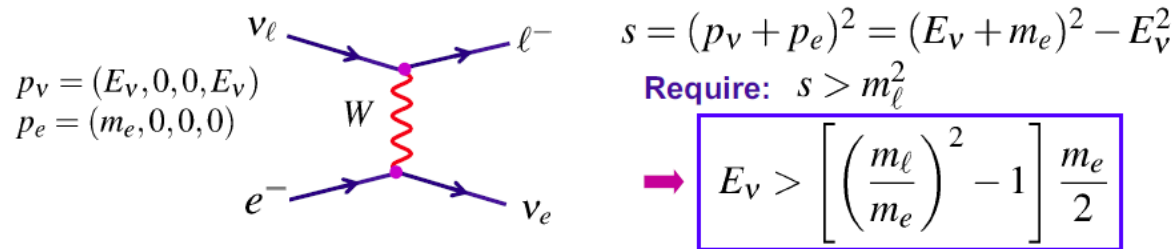
$$E_{\nu_e} > 0$$

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

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

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.

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



$$E_{\nu_e} > 0$$

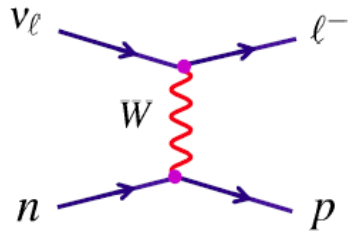
$$E_{\nu_\mu} > 110 \text{ MeV}$$

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

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.

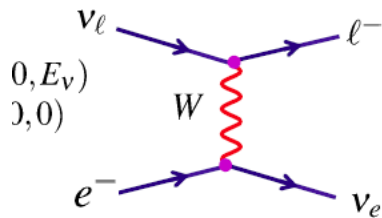
Αντιστοιχία νετρίνου λεπτονίου.



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

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

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



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

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

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

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)