

Ηλιακά νετρίνα.

Γνωρίζουμε ότι ενέργεια που ακτινοβολεί ο ήλιος, παράγεται από θερμοπυρηνικές αντιδράσεις στον πυρήνα του ηλίου. Στα προϊόντα των αντιδράσεων περιλαμβάνεται μεγάλος αριθμός νετρίνων. Μπορούμε να υπολογίσουμε ότι ο αριθμός των νετρίνων που φθάνει στη γη είναι $10^{11} / \text{cm}^2$. Τα νετρίνα αυτά δεν μπορούμε να τα ανιχνεύσουμε διότι έχουν πολύ μικρή ενεργή διατομή, περίπου ίση με 10^{-44} cm^2 . Για να τα ανιχνεύσουμε πρέπει να χρησιμοποιήσουμε ανιχνευτή με μεγάλη μάζα. Ο αριθμός των αντιδράσεων είναι μικρός.

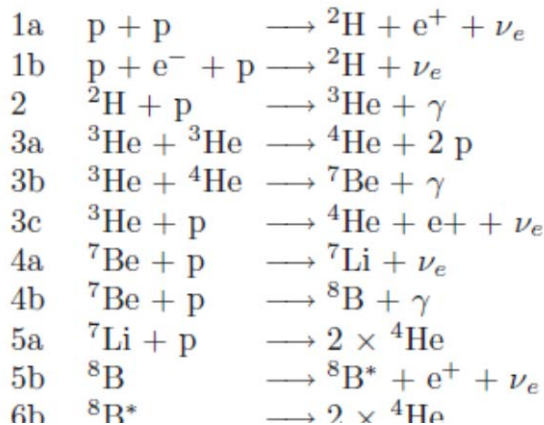
Υπάρχουν δύο μέθοδοι για την ανίχνευση των ηλιακών νετρίνων. Η ραδιοχημική μέθοδος που στηρίζεται στην αντίστροφη διάσπαση β και η ηλεκτρονιακή σκέδαση.

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.

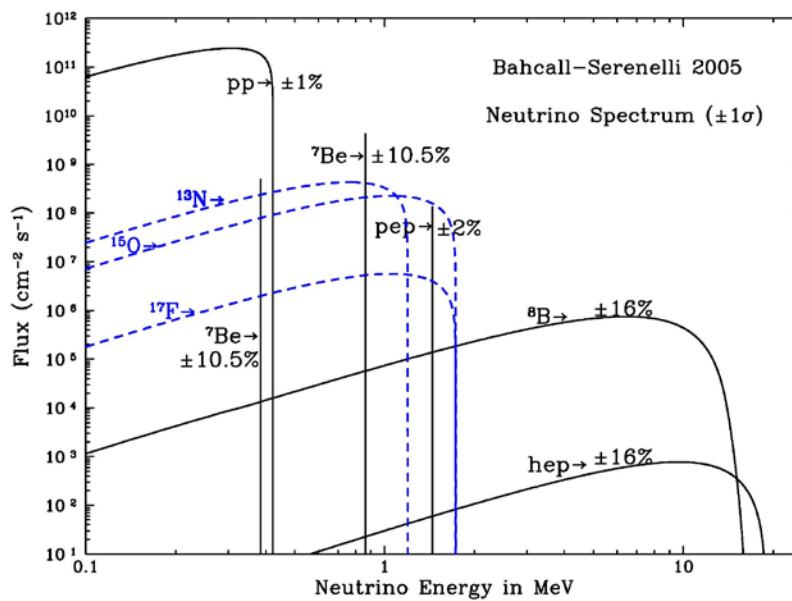
Έστω ότι έχουμε έναν τόνο από ένα υλικό με $A=20$ ο αριθμός των ατόμων που περιέχονται θα είναι $10^6 * N_A / A = 3 * 10^{28}$ άτομα. Για ροή 1 SNU περιμένουμε λιγότερο από μια αντίδραση τον χρόνο.

The *pp* chain consists of the following reactions:



Εικόνα 1 Πυρηνικές αντιδράσεις στο κέντρο του ηλίου

* $\sigma_{\nu_e} : 9.3 * 10^{-45} \text{ cm}^2 (\text{E}/\text{Mev})^2$

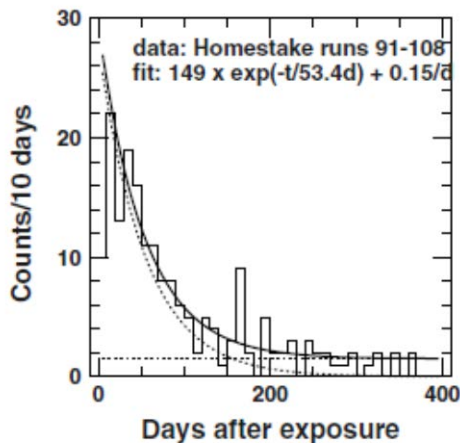


Εικόνα 2 Ενέργεια των νετρίνων που παράγονται από τις πυρηνικές αντιδράσεις στον ήλιο.

Το πρόβλημα των ηλιακών νετρίνων.

Από το 1965 ξεκίνησε ένα πείραμα (Davis et al) 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 ηλεκτρονιακού 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 και του B. Σε τακτικά χρονικά διαστήματα ελέγχονταν η παρουσία των ατόμων του Αργού στο υγρό. Η καμπύλη διάσπασης των ατόμων αργού που συλλέγονταν φαίνεται στην εικόνα. Από τα πρώτα αποτελέσματα ήταν σαφές ότι η καταμετρούμενη ροή νετρίνων ήταν μικρότερη από την αναμενόμενη. Στα χρόνια που ακολούθησαν βελτιώθηκε η απόδοση του ανιχνευτή και σταθεροποιήθηκαν οι θεωρίες για τις πυρηνικές αντιδράσεις στο εσωτερικό του ηλίου. Παρ' όλα αυτά η ροή που μετρούσε το πείραμα, ήταν περίπου η μισή από αυτήν που προέβλεπε τον μοντέλο του ηλίου. Το πείραμα λειτούργησε επί 30 χρόνια.

Νεώτερα πειράματα (GALLEX, SAGE) χρησιμοποιώντας ανιχνευτές Γαλλίου (Ga), μέτρησαν τη ροή νετρίνων μικρότερης ενέργειας. σύμφωνα με την αντίδραση $\nu_e + ^{71}Ga \rightarrow ^{71}Ge + e^-$. Το κατώφλι της αντίδρασης είναι 0,232 MeV μπορεί να ανιχνεύσει νετρίνα από την αντίδραση pp. Το GALLEX χρησιμοποιούσε 30 τόνους Γαλλίου και το SAGE 57 τόνους. Τα πειράματα αυτά μέτρησαν περίπου 70 SNU ενώ το ηλιακό μοντέλο προβλέπει περίπου 130 SNU. Όλα τα αποτελέσματα είναι συμβατά με ροή μικρότερη από αυτήν που προβλέπει το τυπικό ηλιακό μοντέλο.



Εικόνα 3 Από τη σταθερά διάσπασης προκύπτει ότι το ισότοπο που συλλέχτηκε ήταν ^{37}Ar .

Η σκέδαση $\nu_e + e^- \rightarrow \nu_e + e^-$ είναι ένας άλλος τρόπος να ανιχνεύσουμε τα νετρίνα. Το τελικό e^- μεταφέρει ένα μεγάλο μέρος από την ορμή του ν και η τροχιά του είναι κοντά στη τροχιά του αρχικού ν_e . Το ηλεκτρόνιο ανιχνεύεται από την ακτινοβολία Cerenkov που εκπέμπει.

Το πείραμα KAMIOKANE χρησιμοποιεί ανιχνευτή με νερό. Ο όγκος του νερού περιβάλλεται από φωτοπλ/στές που ανιχνεύουν το φως Cerenkov. Μέτρησε την ροή νετρίνων με ενέργεια $> 7,5 \text{ MeV}$ και στη συνέχεια $> 6.5 \text{ MeV}$. 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.

Αξίζει να σημειώσουμε ότι το πείραμα KAMIOKANE είναι το πρώτο πείραμα που έκαμε αξιόπιστο υπολογισμό της μάζας του ηλεκτρονιακού νετρίνου.

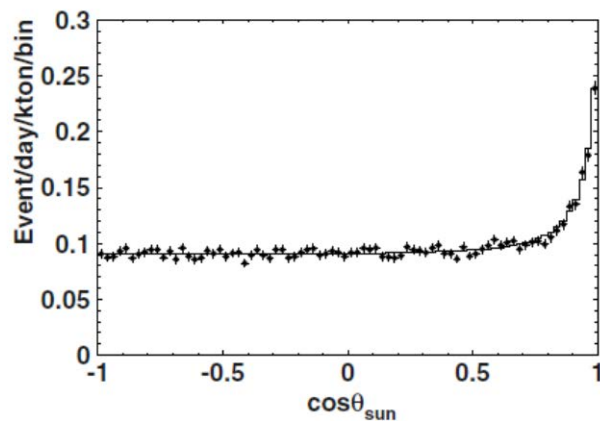


Fig. 3.1. Angular distribution of Super-Kamiokande neutrino events with respect to the direction of the Sun at the time of detection.

Εικόνα 4 Βλέπουμε αύξηση των γεγονότων στην κατεύθυνση του ήλιου. Το υπόστρωμα είναι σταθερό και ανεξάρτητο από τη γωνία.

Στην εικόνα (3) βλέπουμε την συνεισφορά των διαφόρων αντιδράσεων στην παραγωγή νετρίνων και την περιοχή ενεργειών που είναι ευαίσθητοι οι ανιχνευτές με Χλώριο και Γάλλιο.

Table 3.1. Predicted and detected fluxes of solar neutrinos. The first detection line gives the results of Homestake, Gallex and Kamiokande and the other entries are labeled. All results are from the latest publications of all groups by the end of 2001. The numbers for the radio-chemical detectors are in solar neutrino units, and those for water-Cherenkov detectors are in $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$.

Predicted	Cl	Gallium	Water
BPB2001 [38]	7.6 ± 1.1	128 ± 8	5.05×10^6
Brun et al [39]	7.55	129	5.10×10^6
detected	2.56 ± 0.23	74.1 ± 7	2.80 ± 0.4
SAGE/SKAM		75.4 ± 8	2.40 ± 0.1
SNO			$1.75 - 2.39 \times 10^6$

Εικόνα 5 Ροή ηλιακών νετρίνων σύμφωνα με τις μετρήσεις των πειραμάτων,

Τα αποτελέσματα ήταν πλέον επιβεβαιωμένα και έμενε να δοθεί η ερμηνεία τους. Η υπόθεση ότι οι πυρηνικές αντιδράσεις στον ήλιο γίνονταν σε διαφορετικά ποσοστά είχε απορριφθεί από την δεκαετία του 80. Προτάθηκε η υπόθεση της ταλάντωσης των νετρίνων στη διαδρομή τους από τον ήλιο στη γη, της ταλάντωσης στο εσωτερικό του ηλίου και άλλες πιο εξωτικές όπως η υπόθεση της μαγνητικής ροπής του νετρίνου.

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)

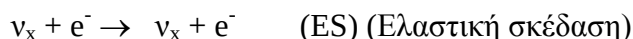
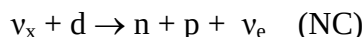
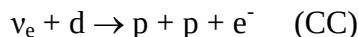
Εικόνα 6 Συνολικά αποτελέσματα. Όλα τα πειράματα που μετρούν φορτισμένα ρεύματα βρίσκουν μικρότερη ροή από την θεωρητική. Η μέτρηση του SNO σε ουδέτερα ρεύματα συμπίπτει με την θεωρητική.

Το πείραμα SNO (Sandbury Neutrino Observatory)

Οι αντιδράσεις που χρησιμοποίησαν τα προηγούμενα 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.

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



όπου ν_x είναι τα τρία είδη των νετρίνων. Η δεύτερη αντίδραση πραγματοποιείται από τα τρία είδη των νετρίνων και από τα γεγονότα αυτά μπορούμε να υπολογίσουμε την συνολική ροή των νετρίνων. Αν η ροή που υπολογίζεται από τη δεύτερη αντίδραση είναι μεγαλύτερη από αυτήν που υπολογίζεται από την πρώτη, τότε έχει γίνει ταλάντωση.

Η ανίχνευση των αντιδράσεων αυτών και ιδιαίτερα της δεύτερης είναι δύσκολη λόγω του υπόβαθρου που προέρχεται από την κοσμική ακτινοβολία στην ατμόσφαιρα και την φυσική ραδιενέργεια των υλικών. Για να θωρακιστεί ο ανιχνευτής από την κοσμική τοποθετήθηκε σε στοά ορυχείου σε βάθος 2000 m. Το δυσκολότερο ήταν να απομακρυνθούν τα φυσικά ραδιενεργά ισότοπα που υπάρχουν σε όλα τα υλικά. Η φυσική ραδιενέργεια του νερού ήταν ικανή να καλύψει τις παραπάνω αντιδράσεις. Η καθαρότητα που επιτεύχθηκε για το δευτέριο είναι 1 προς 10^{14} πυρήνες και για το νερό 1 προς 10^{13} . Επίσης η καθαρότητα αυτή πρέπει να διατηρείται σε όλη τη διάρκεια του πειράματος.

Τα ηλεκτρόνια που παράγονται στις αντιδράσεις αυτές καθώς κινούνται στο νερό εκπέμπουν φως (ακτινοβολία Cerenkov) το οποίο ανιχνεύεται από τους φωτοπολλαπλασιαστές που περιβάλλουν το δοχείο (10.000 λυχνίες). Από την πληροφορία που δίνουν οι λυχνίες βρίσκουν τη θέση που έγινε η αντίδραση και την ενέργεια του ηλεκτρονίου.

Τελικά είναι ένα πείραμα εξαιρετικά μεγάλης ακρίβειας και χρειάστηκε προετοιμασία περίπου 10 χρόνων.

Μπόρεσε να μετρήσει την ροή των ηλιακών νετρίνων 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 γίνεται ταλάντωση των νετρίνων 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 θα μπορούσε να εξηγήσει το πείραμα του Davies αλλά τα πειραματικά δεδομένα από τους επιταχυντές για την μάζα των νετρίνων και το ποσοστό ανάμειξης των διαφορετικών ειδών που περιγράφεται από την γωνία μείξης, δεν μπορούσαν να δικαιολογήσουν την διαφορά. Από τα μοντέλα που προτάθηκαν το σημαντικότερο είναι το μοντέλο που προτάθηκε από τους Mikheyev – Smirnov, 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.

Με λίγα λόγια η ιδιοκατάσταση μάζας ν_1 του νετρίνου, σκεδάζεται στα ηλεκτρόνια. Η αλληλεπίδραση αυτή είναι ισοδύναμη με την αύξηση της μάζας της από m_1 σε m_2 και 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 ενέργειες των νετρίνων όπως φαίνεται στον πίνακα.

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)

Μηχανισμός MSW

