

Τα μίονια στην κοσμική ακτινοβολία.

Παραγωγή.

Όταν τα πρωτόνια υψηλής ενέργειας φθάνουν στην ατμόσφαιρα αντιδρούν και στο μεγαλύτερο ποσοστό παράγουν πόνια (π^+ , π^- , π^0), σε μικρότερο ποσοστό K^+ , K^- . Τα φορτισμένα μεσόνια στη συνέχεια διασπώνται:

$$\pi^\pm \rightarrow \mu^\pm + \nu_\mu, (\approx 100\%)$$

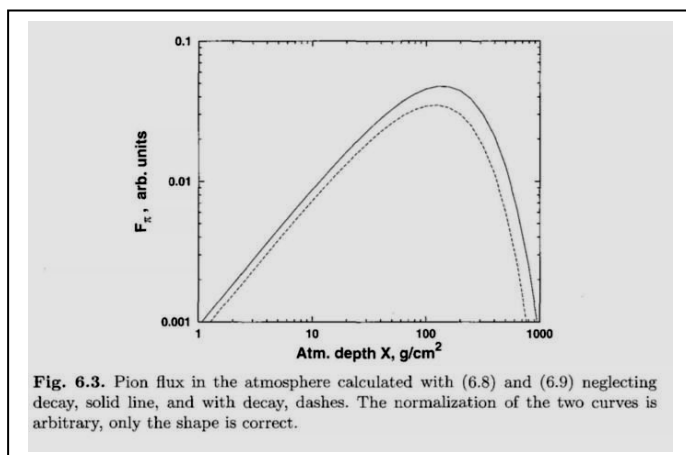
$$K^\pm \rightarrow \mu^\pm + \nu_{\mu}, (\approx 63,5\%)$$

Η συνεισφορά των καονίων είναι 5% στις χαμηλές ενέργειες μιονίων, 8% στα 100 GeV και 19% στα 1000 GeV.

Ο χρόνος ζωής του φορτισμένου πιονίου είναι μικρός $2,6 \times 10^{-8}$ s γι' αυτό τα μίονια παράγονται στα πρώτα μέτρα μετά την αντίδραση του αρχικού πρωτονίου. Τα μίονια διασπώνται σε ηλεκτρόνια και νετρίνα με χρόνο ζωής 2.196×10^{-6} s :

$$\mu^\pm \rightarrow e^\pm + \nu_e (\bar{\nu}_e) + \bar{\nu}_\mu (\nu_\mu)$$

Το μίονιο έχει σχετικά μεγάλο χρόνο ζωής, έχει μικρή πιθανότητα να αντιδράσει και μικρές απώλειες ενέργειας. Έτσι μπορεί να διασχίσει την ατμόσφαιρα και είναι το πολυπληθέστερο κοσμικό σωματίδιο στην επιφάνεια της γης.



Στη διπλανή εικόνα παρατηρούμε ότι η μέγιστη παραγωγή πιονίων συμβαίνει σε βάθος 100 g/cm², που αντιστοιχεί σε ύψος 15 km.

Αντίστοιχα με την εξέλιξη του αριθμού των πιονίων ο Gaisser υπολογίζει και τις εξιώσεις παραγωγής μιονίων. Όπως αναφέραμε παραπάνω, τα μίονια παράγονται κυρίως από τη διάσπαση των φορτισμένων πονίων και καονίων.

$$(1) \quad \frac{dN_\mu}{dE_\mu d\Omega} \approx \frac{0.14 E_\mu^{-2.7}}{\text{cm}^2 \text{ s sr GeV}} \times \left\{ \frac{1}{1 + \frac{1.1 E_\mu \cos \theta}{115 \text{ GeV}}} + \frac{0.054}{1 + \frac{1.1 E_\mu \cos \theta}{850 \text{ GeV}}} \right\}$$

Ο πρώτος όρος περιγράφει την συνεισφορά των πιονίων ενώ ο δεύτερος την συνεισφορά των καονίων. Ο τύπος δεν υπολογίζει τις απώλειες στην ατμόσφαιρα και προσεγγίζει τα δεδομένα στις υψηλές ενέργειες. Στην ενέργεια 115 GeV για τα πόνια, 850 GeV για τα καόνια, το μήκος διάσπασης γίνεται ίσο με το «βάθος» της ατμόσφαιρας. Δηλαδή σε ενέργεια μικρότερη από αυτήν επικρατεί η διάσπαση των πιονίων και το φάσμα ακολουθεί το φάσμα των πρωτογενών ενώ σε υψηλότερες

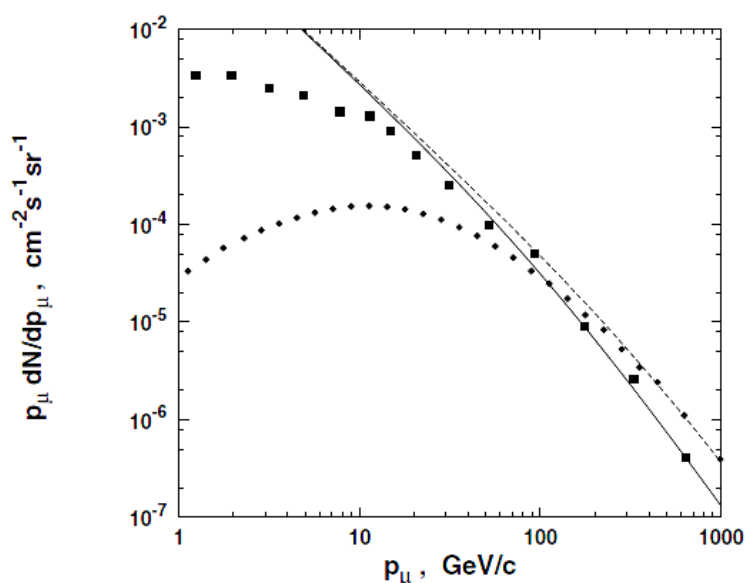
ενέργειες, γίνεται πιο απότομο κατά μία μονάδα επειδή το μήκος διάσπασης γίνεται υπερβολικά μεγάλο σε σχέση με το ύψος της ατμόσφαιρας και τα πόνια δεν προλαβαίνουν να διασπαστούν. ($c\tau=7.8 \text{ m}$ $E_\pi=1000 \text{ GeV}$ γίνεται $55,7 \text{ km}$).

Ενεργειακό Φάσμα.

Στην εικόνα () βλέπουμε το ενεργειακό φάσμα των μιονίων στην επιφάνεια της θάλασσας. Στις χαμηλές ενέργειες κάτω από 10 GeV , ένα μέρος χάνεται λόγω απώλειας ενέργειας (dE/dX) και διάσπασης. Στις μεγαλύτερες ενέργειες το ποσοστό αυτό είναι πολύ μικρό.

Ένα μόνιο με ενέργεια 1 GeV έχει διαδρομή διάσπασης περίπου 6 km ενώ με ενέργεια 10 GeV γύρω στα 60 km άρα δεν προλαβαίνει να διασπαστεί μέσα στην ατμόσφαιρα.

Επίσης η απώλεια ενέργειας για ένα φορτισμένο σωματίδιο που διασχίζει την ατμόσφαιρα είναι περίπου 2 GeV με συνέπεια ένα μόνιο μικρής ενέργειας, που δημιουργήθηκε ψηλά στην ατμόσφαιρα, δεν μπορεί να φθάσει στη γη.



Βλέπουμε την ροή των μιονίων σαν συνάρτηση της ορμής, όπως τα μετράμε στην επιφάνεια της θάλασσας. Τα τετράγωνα αντιστοιχούν σε κατακόρυφη διαδρομή, ενώ οι ρόμβοι σε γωνία 75° από την κατακόρυφο. Η συμπαγής γραμμές είναι ο υπολογισμός για τις δύο περιπτώσεις (σχέση 1). Παρατηρούμε την απώλεια ενέργειας στις χαμηλές ενέργειες, που οφείλεται στην ατμόσφαιρα. Στη δεύτερη περίπτωση διασχίζει πολύ μεγαλύτερο πάχος ατμόσφαιρας.

Η απώλεια ενέργειας στην ατμόσφαιρα είναι κατά προσέγγιση ίση με:

$$\frac{dE}{dx} \approx - \left(1,8 + 0,08 \ln \left(\frac{E_\mu}{\mu} \right) \right)$$

προσεγγιστικά χρησιμοποιούμε τον τύπο:

$$\frac{dE}{dx} \approx -1.8 \text{ MeV} / g \text{ cm}^{-2}$$

Το x είναι η επιφανειακή πυκνότητα σε g/cm^2 . Η επιφανειακή πυκνότητα που αντιστοιχεί σε μια κατακόρυφη αέριο στήλη είναι περίπου $1030 g/cm^2$. (Μεταβάλλεται με τη θερμοκρασία).

Η απώλεια ενέργειας λόγω της διαδρομής στην ατμόσφαιρα φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα (). Μετρήσεις με τα μαύρα σημεία αντιστοιχούν σε κατακόρυφα ($\theta=0^\circ$) μίονια ενώ τα ανοικτά σημεία σε γωνία $\theta=75^\circ$. Φαίνεται η απορρόφηση των μιονίων χαμηλής ορμής.

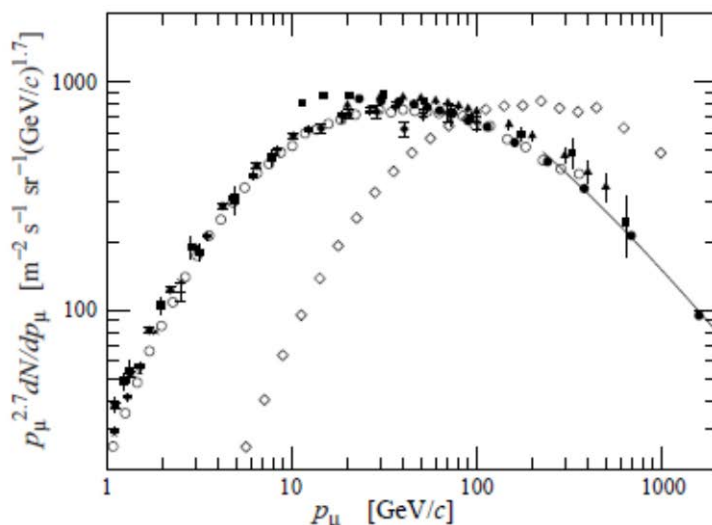


Figure 26.4: Spectrum of muons at $\theta = 0^\circ$ ($\blacklozenge$ [41], $\blacksquare$ [46], $\blacktriangledown$ [47], $\blacktriangle$ [48], $\times$, $+$ [43], $\circ$ [44], and $\bullet$ [45] and $\theta = 75^\circ$ $\diamond$ [49]). The line plots the result from Ea. (26.4) for vertical showers.

:

Η παραγωγή μιονίων εξαρτάται από τη διάσπαση των πιονίων, καονίων. Όμως ένα σημαντικό ποσοστό θα αλληλεπιδράσει στην ατμόσφαιρα πριν διασπαστεί. Η πιθανότητα διάσπασης ελαττώνεται, λόγω του παράγοντα Lorentz, όσο αυξάνεται η ενέργεια. Η πιθανότητα αλληλεπίδρασης είναι περίπου σταθερή (το μήκος αντίδρασης είναι περίπου 120 gr/cm^2).

Φορτίο.

Ο λόγος των θετικών μιονίων προς τα αρνητικά, μ^+/μ^- , είναι περίπου ίσος με 1,25 δηλαδή τα παραγόμενα θετικά μίονια είναι περισσότερα από τα αρνητικά. Αυτό επειδή τα αρχικά σωματίδια είναι πρωτόνια στο μεγαλύτερο ποσοστό (87%). Λόγω διατήρησης του φορτίου στα δευτερογενή το άθροισμα του φορτίου είναι +1. Παράδειγμα η αντίδραση $p+n \rightarrow \pi^+ + \dots$. Στις υψηλότερες ενέργειες αυξάνει λόγω της συνεισφοράς των K_L .

$$\pi^\pm \rightarrow \mu^\pm + \nu_\mu (\bar{\nu}_\mu)$$

$$\mu^\pm \rightarrow e^\pm + \nu_e (\bar{\nu}_e) + \bar{\nu}_\mu (\nu_\mu)$$

$$\text{Συνεισφορά από } K_L : K_L \rightarrow \pi^\pm e^\pm \nu_e (\bar{\nu}_e) \quad 38.7\%$$

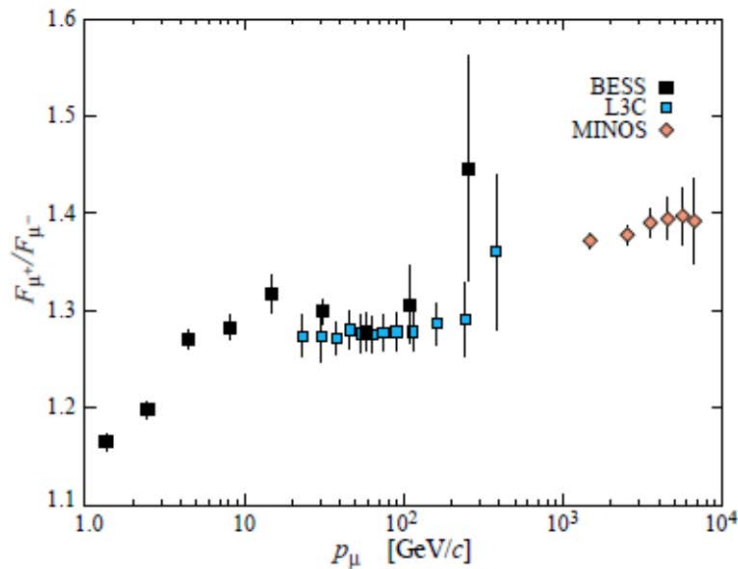


Figure 26.5: Muon charge ratio as a function of the muon momentum from Refs. [44,45,51].

- 44. S. Haino et al. (BESS Collab.), Phys. Lett. B594, 35 (2004).
- 45. P. Archard et al. (L3+C Collab.), Phys. Lett. B598, 15 (2004).
- 51. P. Adamson et al. (MINOS Collab.), Phys. Rev. D76, 052003 (2007).

Ο λόγος θετικών προς αρνητικά μίονια αντιστοιχεί στο λόγο π^- και K^- προς π^+ και K^+ θετικά κατά την παραγωγή καθώς και το μικρό ποσοστό νετρονίων στο αρχικό φάσμα. Η αύξηση του λόγου σε ορμή πάνω από 1 TeV οφείλεται στην παραγωγή $(p \rightarrow \Lambda + K^+)$

Τα μίονια πολύ υψηλής ενέργειας προέρχονται από την διάσπαση των φορτισμένων πιονίων κατά την πρώτη αντίδραση του πρωτεύοντος. Μεταφέρουν σημαντικό κομμάτι της ενέργειας του πρωτεύοντος και η μορφή του φάσματος είναι ίδια με την μορφή του φάσματος των πρωτευνόντων.

Απώλειες Ενέργειας

Τα μίονια χάνουν ενέργεια στην ατμόσφαιρα, λόγω ιονισμού, περίπου 1,8 MeV / g/cm² ενώ σε υψηλότερες ενέργειες χάνουν λόγω ακτινοβολίας, με τούς μηχανισμούς της ακτινοβολίας πέδης, απευθείας δίδυμης γέννησης και δημιουργίας αδρονίων μέσω φανταστικού φωτονίου. Στις πολύ υψηλές ενέργειες, σημαντικότερος μηχανισμός είναι της δίδυμης γέννησης και ακολουθεί η ακτινοβολία πέδης. Η κρίσιμη ενέργεια (οι απώλειες ιονισμού ίσες με τις απώλειες ακτινοβολίας) είναι περίπου ίση με 500 GeV.

Συγκρίνοντας την ακτινοβολία του μιονίου με του ηλεκτρονίου, είναι μικρότερη κατά τον λόγο του τετραγώνου των μαζών (m_e^2/m_μ^2) δηλαδή περίπου 1/4000 μικρότερη.

Στην ατμόσφαιρα βασικός μηχανισμός είναι η απώλεια λόγω ιονισμού. Ένα μίονιο με ενέργεια 1 GeV που παράγεται σε ύψους 15km, θα διασπαστεί πριν φθάσει στην επιφάνεια της θάλασσας. Στο φάσμα των μιονίων υπάρχουν όμως μίονια μικρής ενέργειας που έχουν παραχθεί σε μικρότερα ύψη. Ένα μίονιο με ενέργεια 6 GeV έχει μήκος διάσπασης 24 km και μπορεί να φθάσει στην επιφάνεια της θάλασσας.

Τα μίονια επειδή δεν αλληλεπιδρούν ισχυρά και έχουν μικρές απώλειες ενέργειας, μπορούν να διεισδύσουν σε μεγάλο βάθος στο έδαφος ή το νερό. Μια κατηγορία πειραμάτων, μελετά τη ροή των μιονίων σε ορυχεία ή με υποθαλάσσιους ανιχνευτές.

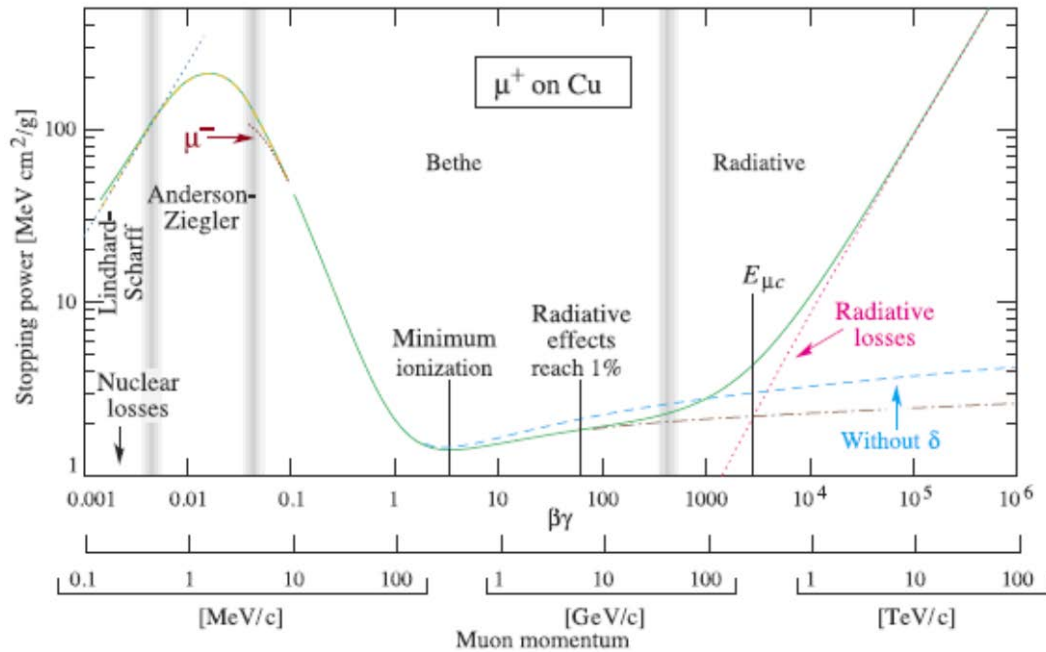
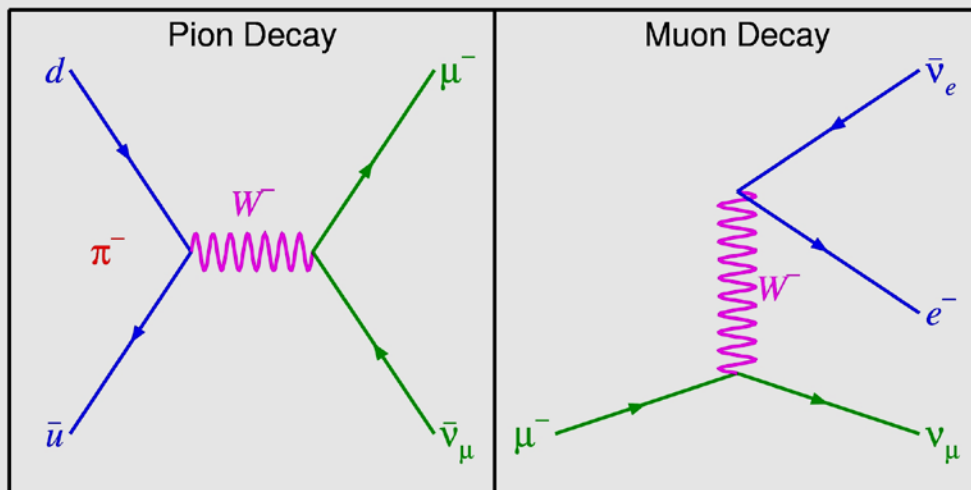


Fig. 30.1: Stopping power ($= \langle -dE/dx \rangle$) for positive muons in copper as a function of $\beta\gamma = p/Mc$ over nine orders of magnitude in momentum (12 orders of magnitude in kinetic energy). Solid curves indicate the total stopping power. Data below the break at $\beta\gamma \approx 0.1$ are taken from ICRU 49 [4], and data at higher energies are from Ref. 5. Vertical bands indicate boundaries between different approximations discussed in the text. The short dotted lines labeled “ μ^- ” illustrate the “Barkas effect,” the dependence of stopping power on projectile charge at very low energies [6].

J. Beringer *et al.*(PDG), PR D86, 010001 (2012)



Εικόνα 10. Διαγράμματα Feynman για την διάσπαση του πιονίου και του μιονίου. Η διαδικασία γίνεται μέσω ασθενούς αλληλεπίδραση

Particle name	Particle symbol	Quark content	^[9] Rest mass (MeV/c ²)	Spin	Mean lifetime (s)
Pion	π^0	$\frac{u\bar{u}-d\bar{d}}{\sqrt{2}}$ ^[a]	134.976	0	8.4×10^{-17}
Pion	$\pi^\pm$	ud, du	139.570	0	2.6033×10^{-8}
muon	$\mu^\pm$		105.658	1/2	2.197×10^{-6}
Kaon	$K^\pm$	us ⁻ , u ⁻ s	493.677	0	1.237×10^{-8}

T. J. Beringer *et al.*(PDG), PR D86, 010001 (2012).

K. Gaisser, “Cosmic Rays and Particle Physics” Cambridge University Press, 1990.

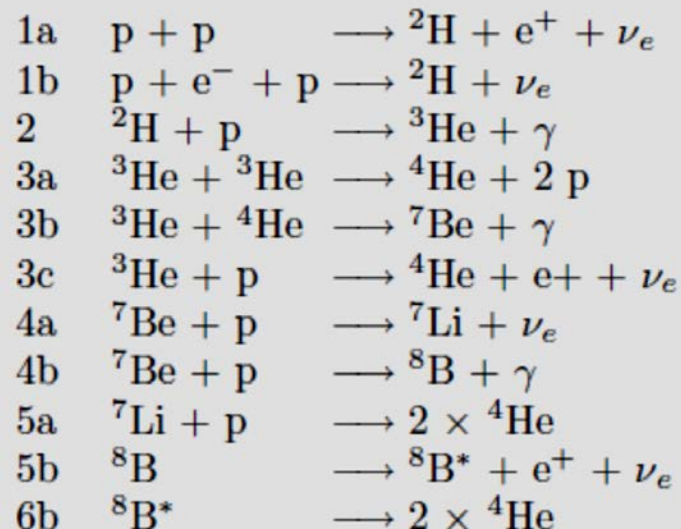
T. Stanev, “High Energy Cosmic Rays” Springer, 2009.

Ηλιακά νετρίνα

Πρόβλημα ηλιακών νετρίνων,
ταλαντώσεις.

Αντιδράσεις στο εσωτερικό των αστέρων

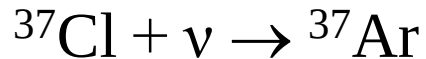
The *pp* chain consists of the following reactions:



Εικόνα 1 Πυρηνικές αντιδράσεις στο κέντρο του ηλίου

Το πρόβλημα των ηλιακών νετρίνων.

1964 R. Davis J.N.Bachall

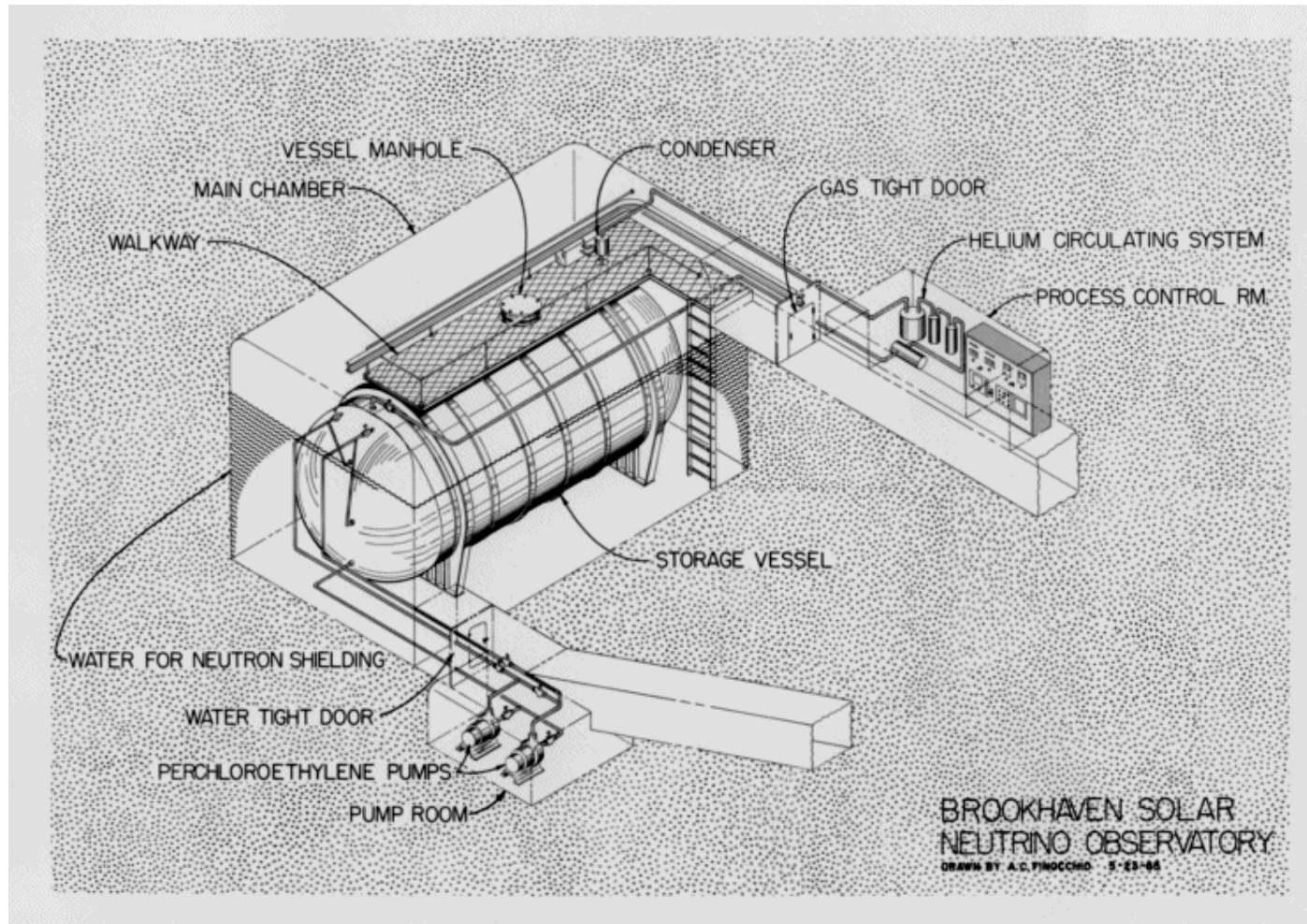


1969 Πρώτα αποτελέσματα N_ν μικρότερο από αναμενόμενο.

1979 Υπόθεση ταλάντωσης.

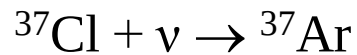
2001 Αποτελέσματα SNO επιβεβαίωση.

Πείραμα Homestake mine

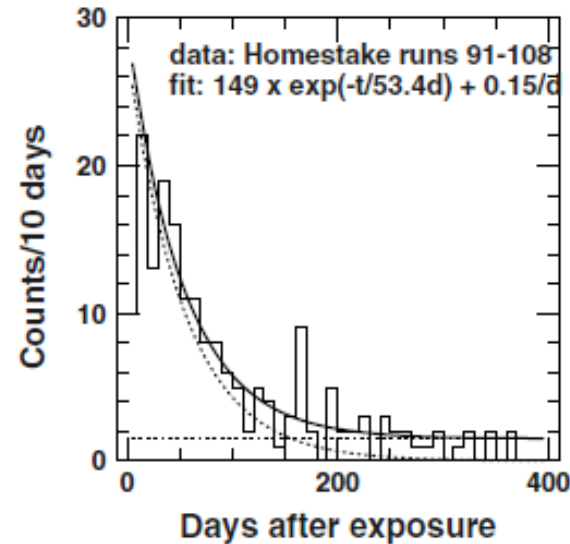
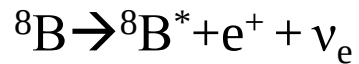


Μετρήσεις

615 τόνοι τετραχλωροαιθάνιο

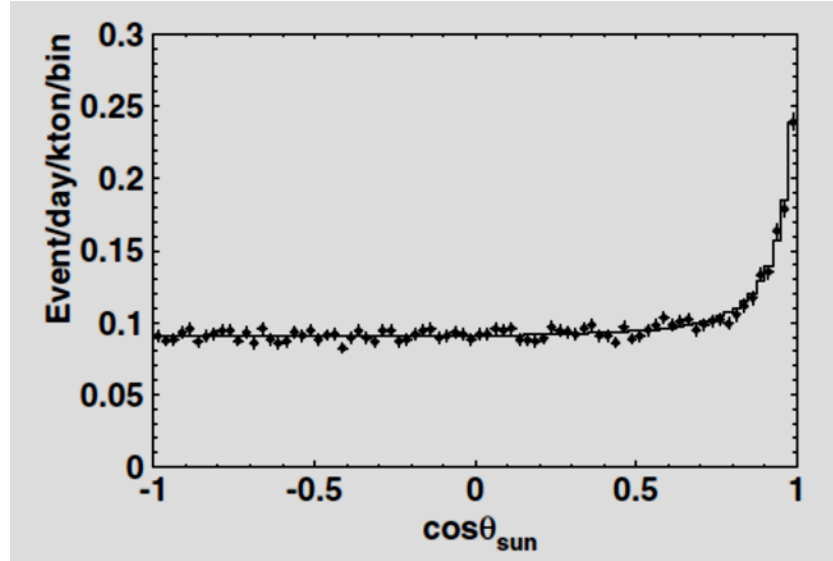


κατώφλι 0,814 MeV



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

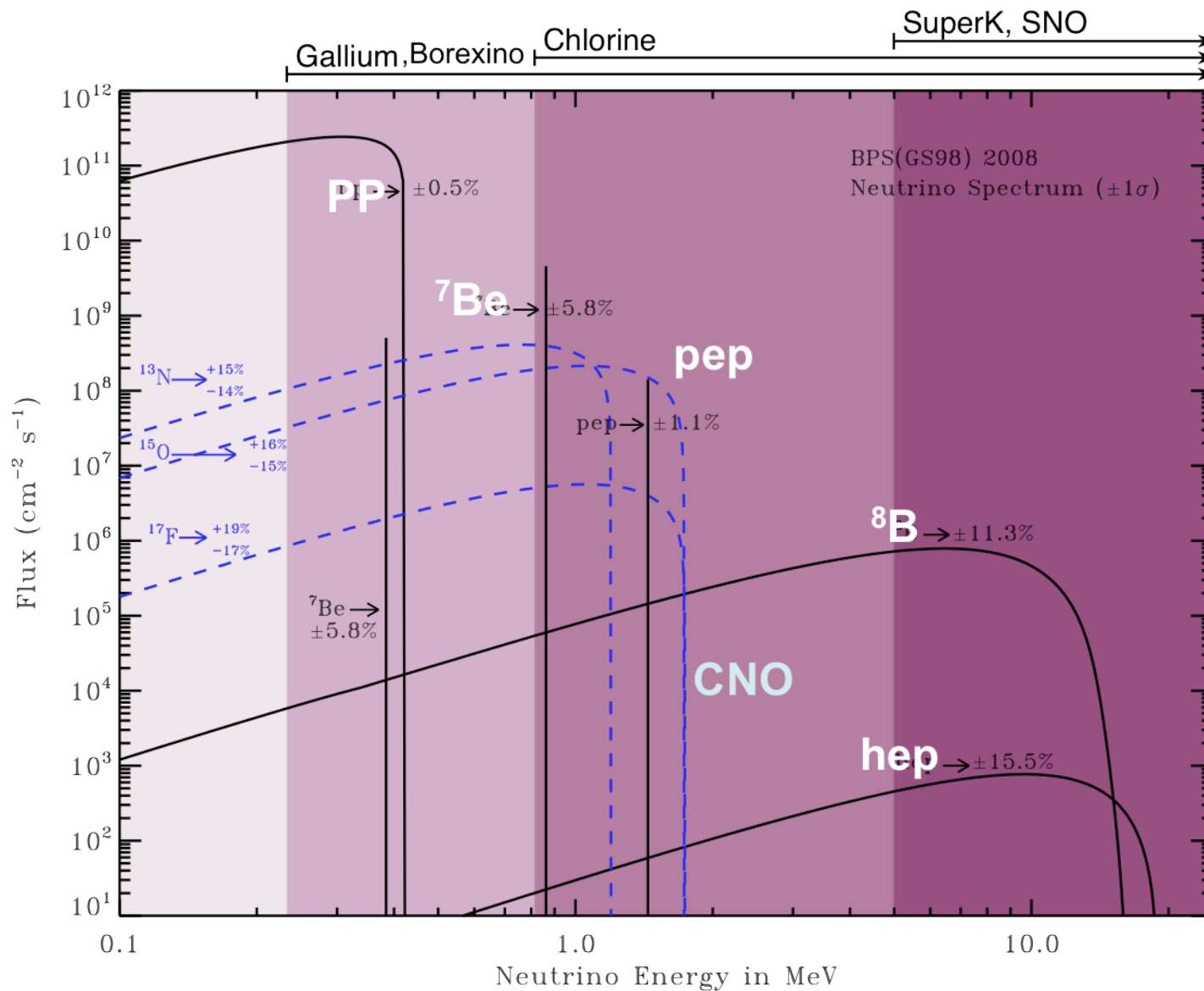
Πείραμα Kamiokande.



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

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

J. Bacall (2005)



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.

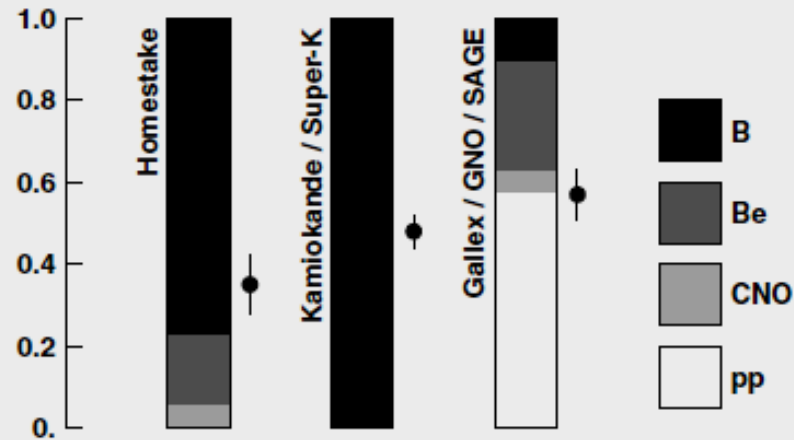
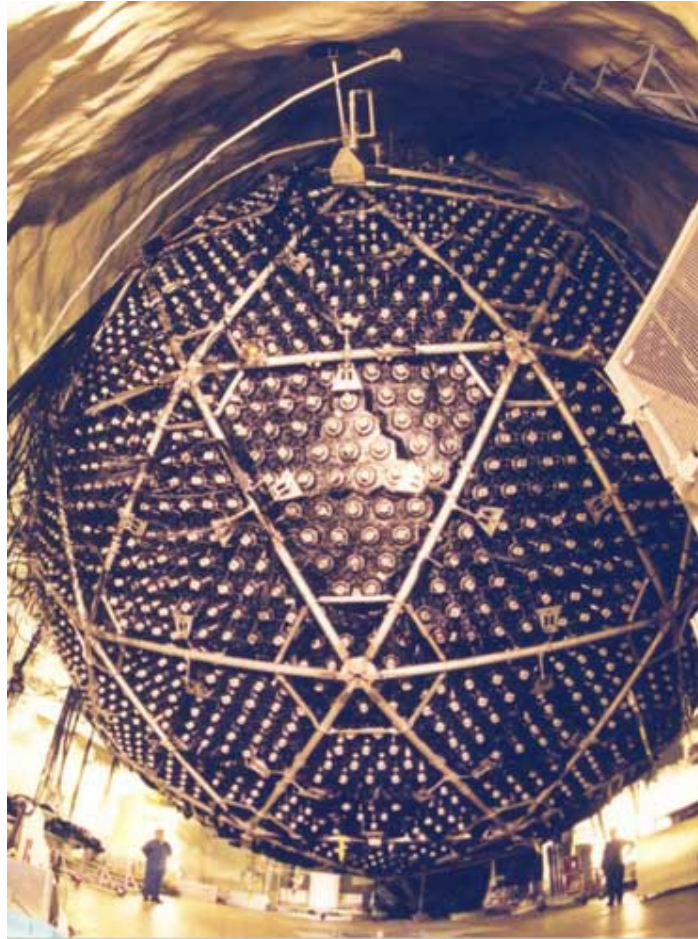


Fig. 3.3. Predictions of the contribution of different reactions to the neutrino rates in different types of detectors are compared to the observed rates.

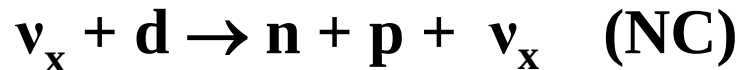
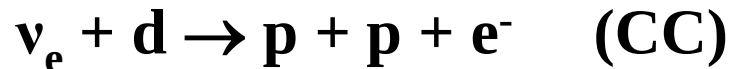
Το ποσοστό από κάθε αντίδραση που ανιχνεύει κάθε πείραμα, και το ποσοστό των μετρούμενων νετρίνων.

Το πείραμα SNO (Sandbury Neutrino Observatory)



Αποτελέσματα SNO.

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



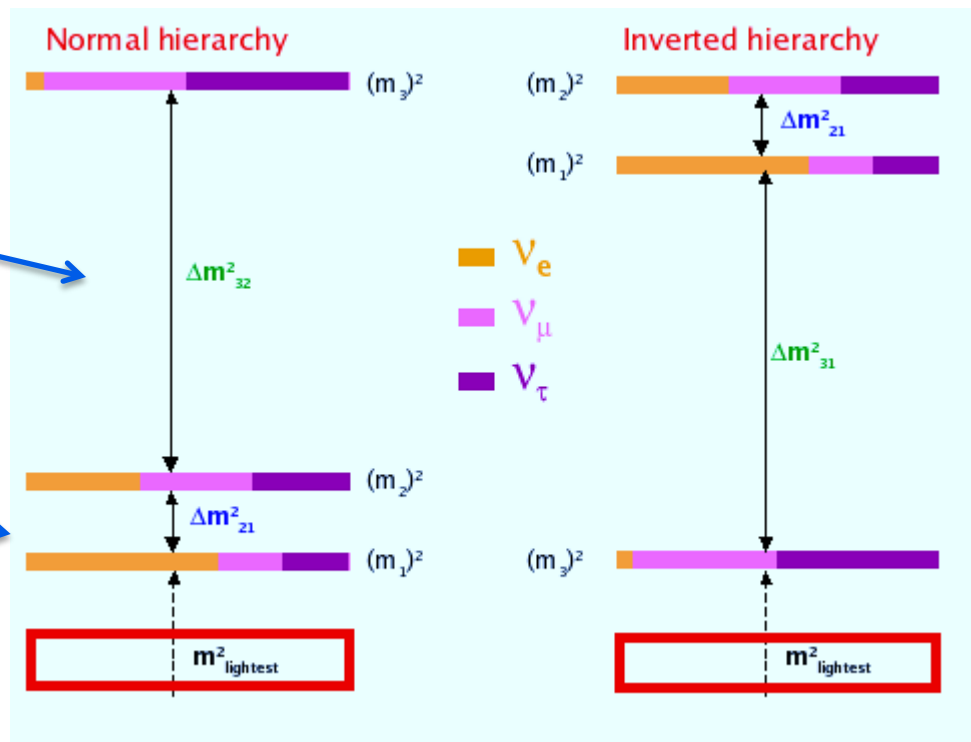
Μέτρησε την ροή των ηλιακών νετρίνων στις δύο ομάδες αντιδράσεων και τα αποτελέσματα του για μεν τις αντιδράσεις φορτισμένων ρευμάτων (ν_e) είναι συμβατές με τα προηγούμενα πειράματα ενώ η ροή στα ουδέτερα είναι πολύ **μεγαλύτερη. (περίπου τριπλάσια $\Phi_e = 1,76 \pm 0,05 \pm 0,09$ $\Phi_{nc} = 5,09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

Ταλαντώσεις νετρίνων.

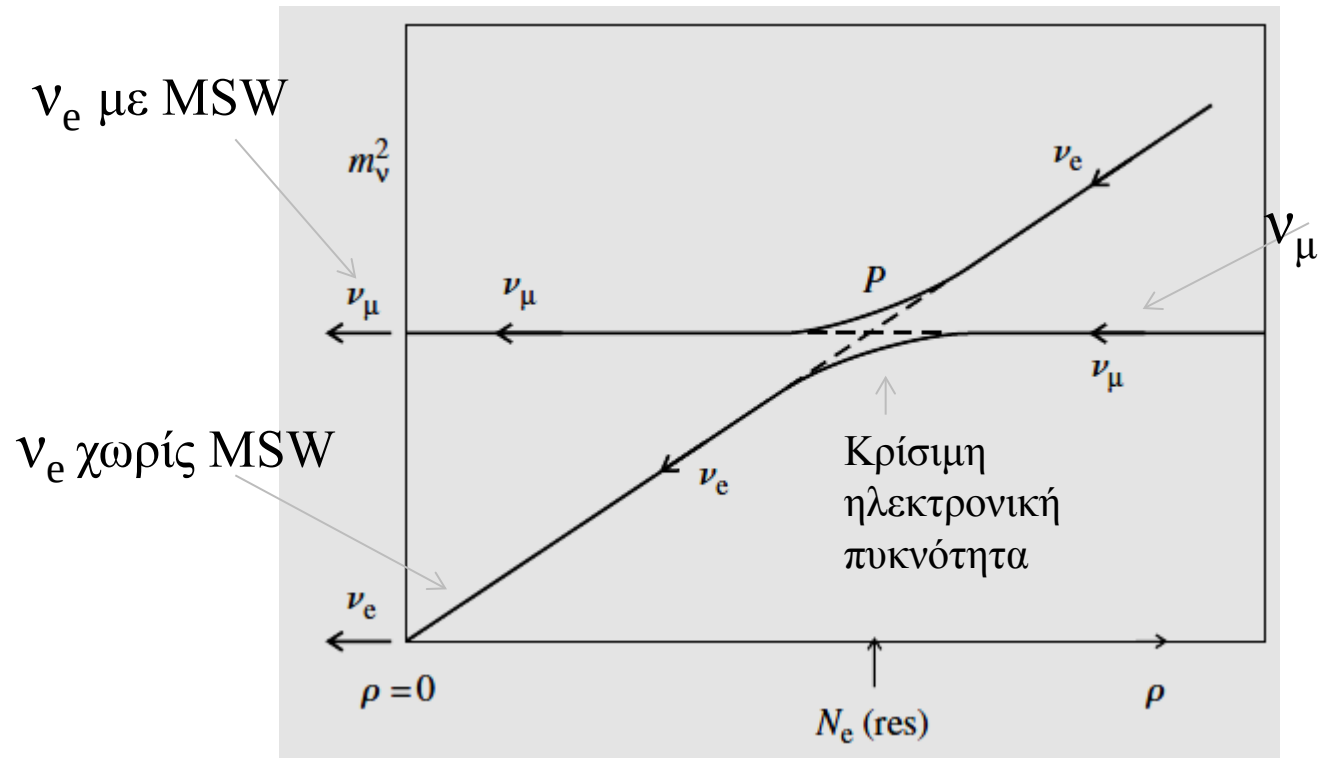
- Από το 1980 και μετά , έγινε γενικά αποδεκτό ότι τα νετρίνα έχουν μάζα διαφορετική από το μηδέν και ότι είναι δυνατόν να μετατρέπονται από το ένα είδος στο άλλο (π.χ. από ν_e σε ν_μ).
- Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται ταλάντωση νετρίνων. Αν ένα πείραμα μπορεί να ανιχνεύσει μόνον το ν_e λόγω της ταλάντωσης θα εμφανίζεται έλλειμμα .
- Η ταλάντωση θα μπορούσε να εξηγήσει το πείραμα του Davies
- 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.

Μέτρηση σε
επιταχυντές και
ατμοσφαιρικά
νετρίνα.

Μέτρηση σε
αντιδραστήρες
και ηλιακά
νετρίνα.



Μηχανισμός MSW



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.

Βιβλιογραφία

- 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)

Ηλιακά νετρίνα.

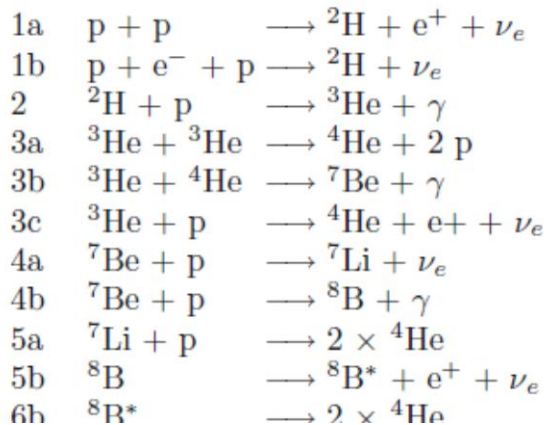
Γνωρίζουμε ότι ενέργεια που ακτινοβολεί ο ήλιος, παράγεται από θερμοπυρηνικές αντιδράσεις στον πυρήνα του ηλίου. Στα προϊόντα των αντιδράσεων περιλαμβάνεται μεγάλος αριθμός νετρίνων. Μπορούμε να υπολογίσουμε ότι ο αριθμός των νετρίνων που φθάνει στη γη είναι $10^{11} / \text{cm}^2$. Τα νετρίνα αυτά δεν 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.

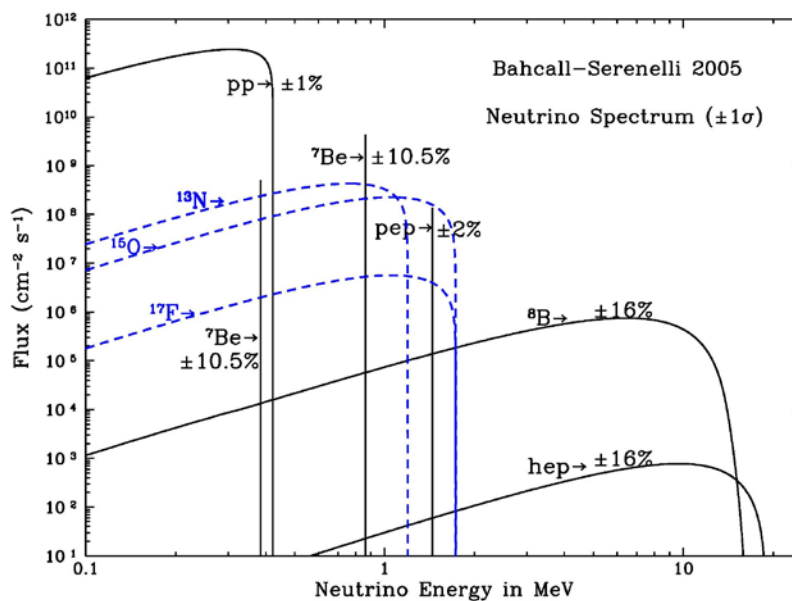
Η αντίστροφη διάσπαση β στηρίζεται στην αντίδραση $\nu_e + n \rightarrow p + e^-$ δηλαδή ο ατομικός αριθμός Z αυξάνεται κατά 1. Αν ο πυρήνας που προκύπτει είναι ασταθής μπορούμε να τον ανιχνεύσουμε από την ακτίνα γ που εκπέμπει κατά την αποδιέγερση του.

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.

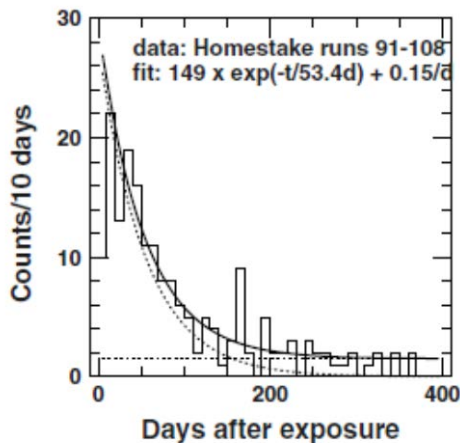


Εικόνα 2 Ενέργεια των νετρίνων που παράγονται από τις πυρηνικές αντιδράσεις στον ήλιο.

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 KAMIOKANDE 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 KAMIOKANDE είναι το πρώτο πείραμα που έκαμε αξιόπιστο υπολογισμό της μάζας του ηλεκτρονιακού νετρίνου.

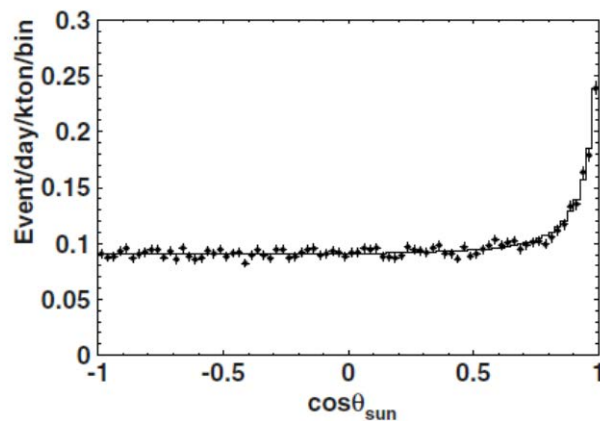


Fig. 3.1. Angular distribution of Super-Kamiokande neutrino events with respect to the direction of the Sun at the time of detection.

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 ροής 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)

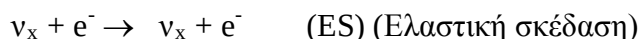
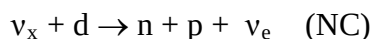
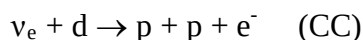
Εικόνα 6 Συνολικά αποτελέσματα. Όλα τα πειράματα που μετρούν φορτισμένα ρεύματα βρίσκουν μικρότερη ροή από την θεωρητική. Η μέτρηση του SNO σε ουδέτερα ρεύματα συμπίπτει με την θεωρητική.

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 νεutrίνο. 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 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 που αντιστοιχεί σε αύξηση της ιδιοκατάστασης ν_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.

Η ενεργός διατομή για την ελαστική CC αντίδραση είναι ανάλογη της ενέργειας για $E > 1$ GeV. $7 \cdot 10^{-38} \text{ cm}^2 \text{ E/GeV per nucleon}$ $\sigma = 7.5 \times 10^{-44} (\text{E/MeV}) \text{ cm}^2$. Για αντineutrino η μισή.
Η ημιαστική (NC) ($p \rightarrow n$, $n \rightarrow p$) είναι σχεδόν σταθερή για ενέργειες μεγαλύτερες από 2 GeV $1 \cdot 10^{-38} \text{ cm}^2 \text{ per nucleon}$

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

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

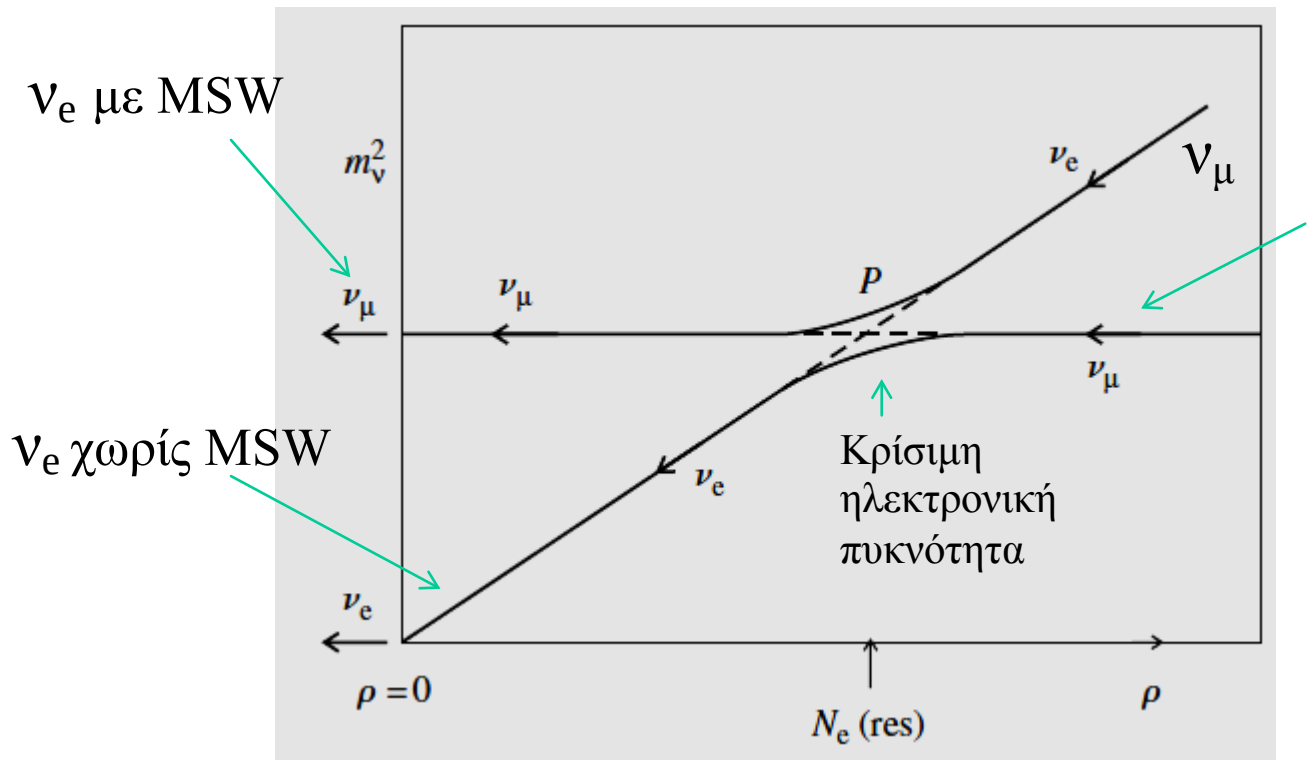
The SNO collaborarion, *Phys.Rev.Lett.*,87: 071301 (2001)

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



Κοσμικά Νετρίνα

Ηλιακά Νετρίνα , (ν_e)

Προέρχονται από τις πυρηνικές αντιδράσεις που γίνονται στο εσωτερικό του Ηλίου. Ο αριθμός τους είναι εξαιρετικά μεγάλος $6 \cdot 10^7 / \text{cm}^2 \text{ s}$. Η ενέργεια τους είναι της τάξης μερικών MeV.

Ατμοσφαιρικά νετρίνα, (ν_μ, ν_e)

Προέρχονται από την διάσπαση πιονίων και καονίων τα οποία δημιουργούνται από τις αντιδράσεις των πρωτογενών πρωτονίων, πυρήνων. Η ενέργεια τους ακολουθεί την ενέργεια των πρωτογενών, η μέση τιμή είναι περίπου 1 GeV.

Γαλαξιακά, Εξωγαλαξιακά

Προέρχονται από αντιδράσεις πρωτονίων με το CMB και, από ενεργά αντικείμενα όπως τα AGN. Ενέργεια πάνω από TeV.

Ρυθμός αντιδράσεων ατμοσφαιρικών.

$$\sigma = 0,5 \cdot 10^{-38} \text{ E}_\nu$$

$$\rho = 1 \text{ n cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

$$\text{Αριθμός νουκλεονίων ανά kTn νερού} = 6 \times 10^{32}$$

$$\frac{1 \nu}{\text{cm}^2 \text{ s}} \cdot \frac{.5 \times 10^{-38} \times 1}{\text{nucleon}} \cdot \frac{6 \times 10^{32}}{\text{kTn}} \cdot \frac{3.15 \times 10^7 \text{ s}}{\text{y}} \approx 100 \frac{\text{interactions}}{\text{y} \cdot \text{kTn}}$$

Διασπάσεις μεσονίων

$$\pi^{\pm} \rightarrow \mu^{\pm} + \nu_{\mu}(\bar{\nu}_{\mu})$$

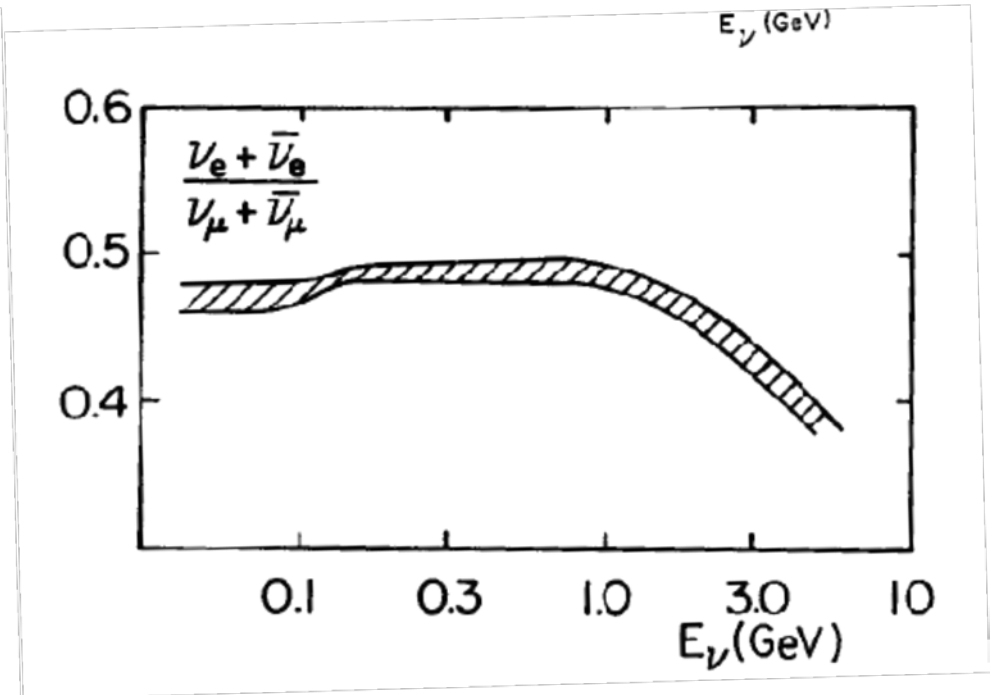
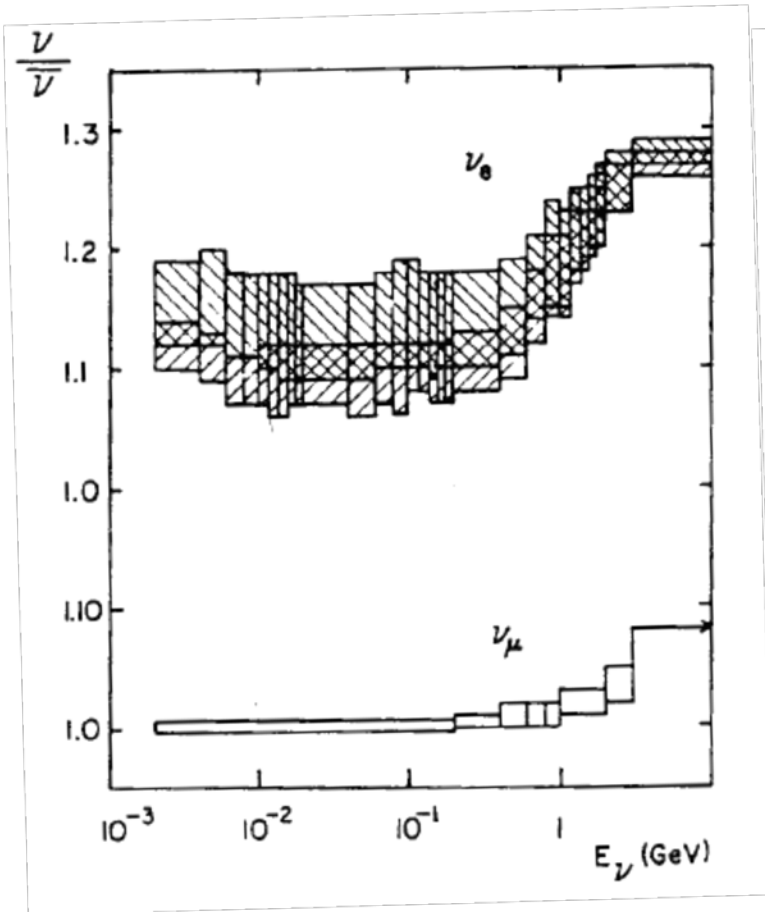
$$K^{\pm} \rightarrow \mu^{\pm} + \nu_{\mu}(\bar{\nu}_{\mu}) \approx 63.5\%$$

$$\mu^{\pm} \rightarrow e^{\pm} + \nu_e(\bar{\nu}_e) + \bar{\nu}_{\mu}(\nu_{\mu})$$

$$\frac{\nu_{\mu} + \bar{\nu}_{\mu}}{\nu_e + \bar{\nu}_e} = 2$$

Μικρές ενέργειες. Τα μίονια με ενέργεια πάνω από 2.5 GeV δεν προλαβαίνουν να διασπαστούν

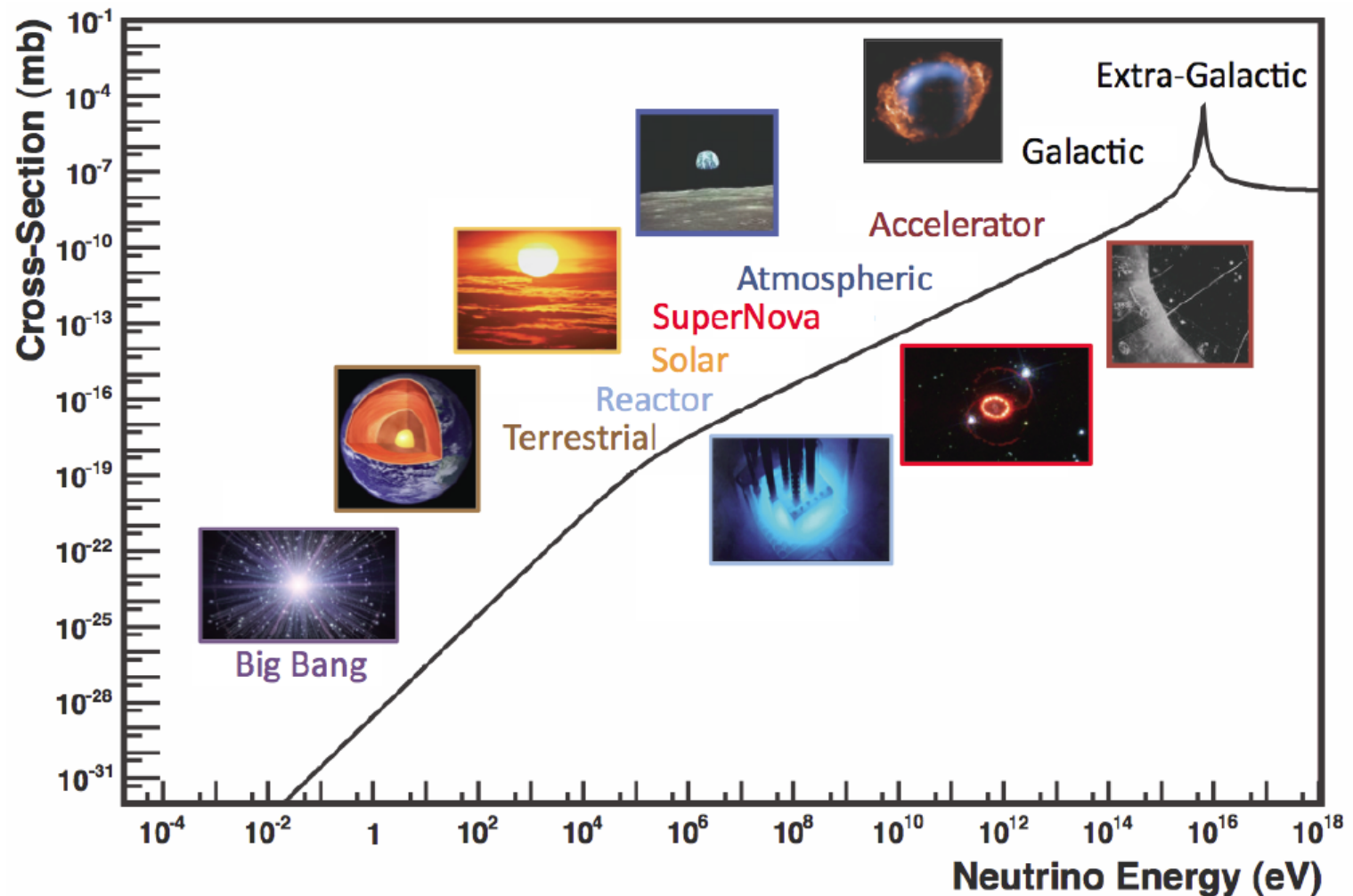
Λόγοι $\nu_e \nu_\mu$ στην ατμόσφαιρα



T.K. Gaisser et al., Phys. Rev., D38, 85, 1988.

G. Barr et al., Phys. Rev. D39,3532, 1989.

Ενεργειακή κλίμακα



Υπόγεια πειράματα νετρίνων

SN 1987

Ταλαντώσεις ν_e

Ταλαντώσεις ν_μ

Επίδραση μάζας στις ταλαντώσεις ν

Όριο στη διάσπαση πρωτονίου.

$$S_{\nu_e} : S_{\bar{\nu}_e} : S_{\nu_\mu} = 2 : 40 : 1$$

SN 1987

- KAMIOKANDE
- IMB
- BAKSAN

$$\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+ \quad \sigma = 7.5 \times 10^{-44} (E / \text{MeV}) \text{cm}^2$$

Τι προέκυψε από τη μέτρηση

- Μοντέλα SN
- Ενέργεια σε ν $3 \cdot 10^{53}$ erg
- Μάζα $m_\nu < 15$ eV

Μετρήσεις

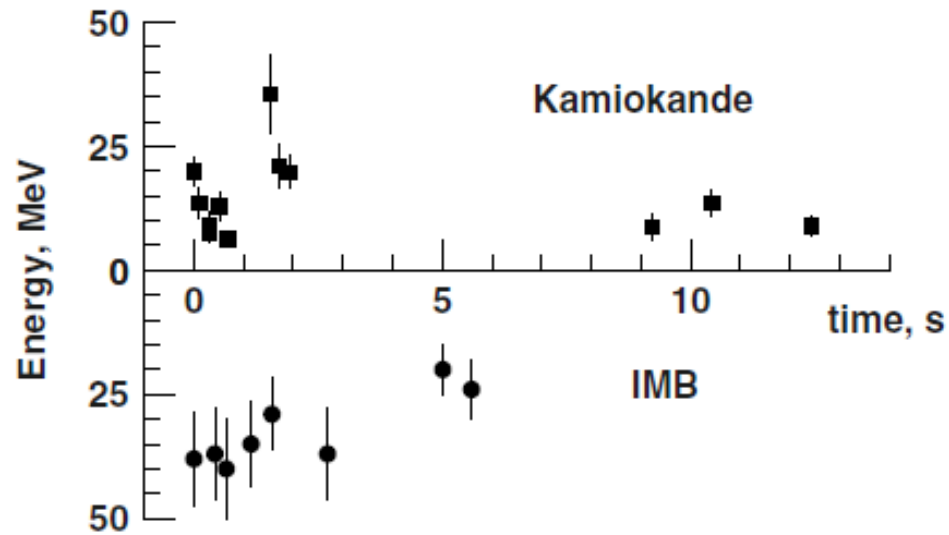


Fig. 3.5. Energy–time plot of the neutrinos detected by Kamiokande (squares) and IMB (filled circles). Note the higher energy threshold of the IMB detector. The first neutrinos detected by each detector are assumed to arrive simultaneously.

Ενέργεια μοντέλα.

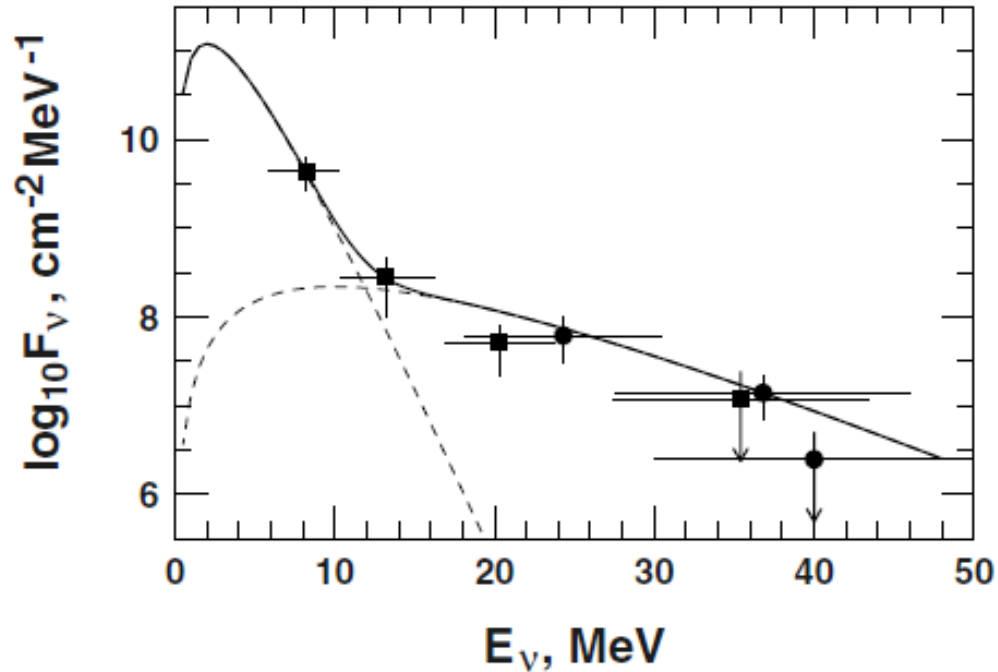


Fig. 3.6. Energy spectrum of the supernova neutrinos. The Kamiokande data are plotted with squares and IMB – with dots. The two dashed lines represent black body spectra with temperatures 1.5 and 5 MeV and the solid line is their sum.

Νετρίνα σε μεγάλο βάθος

Πρωτα αποτελέσματα
IMB, KAMIOKANDE

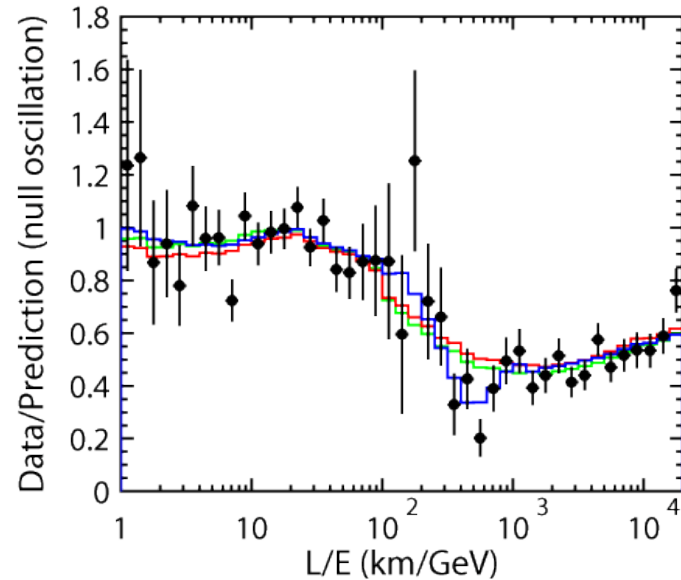
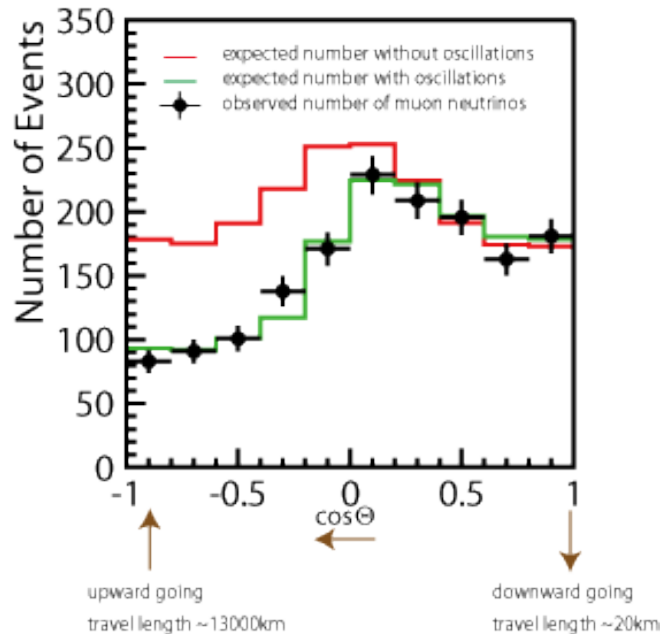
$$R2 = \frac{R(\mu/e)_{\text{observed}}}{R(\mu/e)_{\text{predicted}}} \sim \frac{1.25}{2.00} \sim 0.6$$



Τα νετρίνα που ανεβαίνουν καλύπτουν μεγάλη επιφάνεια της γής και έτσι η ροή τους δεν είναι ευαίσθητη στα μαγνητικά πεδία.

Ανάλογα με την ζενιθιακή γωνία διανύουν μεγ'λύτερη απόσταση μέσα στη γη.

KAMIOKANDE neutrino oscillation



Η μείωση εμφανίζεται στα νετρίνα που ανεβαίνουν και εξαρτάται από τη γωνία. Το φαινόμενο δεν εμφανίζεται στα νετρίνα που κατεβαίνουν. Η πράσινη γραμμή αντιστοιχεί στην υπόθεση τη ταλάντωσης.

S. Fukuda et al., (Super-Kamiokande), Phys. Lett., B616, 174 (2005).

Κοσμικά Νετρίνα

Προέλευση νετρίνων που φθάνουν στη γή.

Ηλιακά Νετρίνα, (ν_e)

Προέρχονται από τις πυρηνικές αντιδράσεις που γίνονται στο εσωτερικό του Ηλίου. Ο αριθμός τους είναι εξαιρετικά μεγάλος $6 \cdot 10^7 / \text{cm}^2 \text{ s}$. Η ενέργεια τους είναι της τάξης μερικών MeV.

Ατμοσφαιρικά νετρίνα, (ν_μ, ν_e)

Προέρχονται από την διάσπαση πιονίων και καονίων τα οποία δημιουργούνται από τις αντιδράσεις των πρωτογενών πρωτονίων, πυρήνων. Η ενέργεια τους ακολουθεί την ενέργεια των πρωτογενών, η μέση τιμή είναι περίπου 1 GeV.

Γαλαξιακά,

Προέρχονται από αντιδράσεις πρωτονίων με το CMB και Εξωγαλαξιακά, από ενεργά αντικείμενα όπως τα AGN. Ενέργεια πάνω από TeV.

Ατμοσφαιρικά νετρίνα.

Τα νετρίνα αντιδρούν πολύ σπάνια με την ύλη δηλαδή η ενεργός διατομή τους είναι πού μικρή.

Για μικρές ενέργειες της τάξης των MeV η εν. διατομή δίνεται από:

$$10^{-43} \text{ E}_\nu$$

Για ενέργειες 1-3000 GeV η διατομή είναι περίπου $0,5 \cdot 10^{-38} \text{ E}_\nu$

Αν η ροή για νετρίνα 1 GeV είναι περίπου $1 \text{ n cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ μπορούμε να υπολογίσουμε τον ρυθμό αντιδράσεων σε ένα ανιχνευτή με μάζα 1 kTn

$$\frac{1 \text{ n}}{\text{cm}^2 \text{ s}} \cdot \frac{.5 \times 10^{-38} \times 1}{\text{nucleon}} \cdot \frac{6 \times 10^{32}}{\text{kTn}} \cdot \frac{3.15 \times 10^7 \text{ s}}{\text{y}} \approx 100 \frac{\text{interactions}}{\text{y kTn}}$$

Άρα για να ανιχνεύσουμε έναν σημαντικό αριθμό νετρίνων χρειαζόμαστε έναν ανιχνευτή με πολύ μεγάλη μάζα.

Τα νετρίνα υψηλής ενέργειας προέρχονται από την διάσπαση των πιονίων. Τα νετρίνα από την διάσπαση των μιονίων είναι σε χαμηλότερη ενέργεια γιατί τα μιονία που διασπώνται στην ατμόσφαιρα έχουν μικρή ενέργεια.

$$\pi^\pm \rightarrow \mu^\pm + \nu_\mu (\bar{\nu}_\mu)$$

$$\mu^\pm \rightarrow e^\pm + \nu_e (\bar{\nu}_e) + \bar{\nu}_\mu (\nu_\mu)$$

Η διάσπαση των μιονίων δίνει ένα ηλεκτρονικό νετρίνο και ένα ηλεκτρονικό. Στις ενέργειες αυτές τα μιονία είναι η μοναδική πηγή των ηλ. νετρίνων.

Σύμφωνα με τις παραπάνω διαδικασίες ο λόγος των μιονικών προς τα

ηλεκτρονικά νετρίνα είναι $\frac{\nu_{\mu} + \bar{\nu}_{\mu}}{\nu_e + \bar{\nu}_e} = 2$.

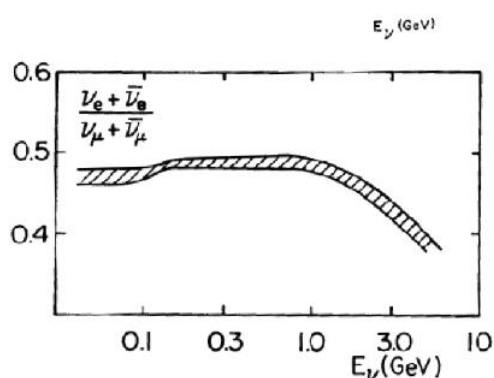
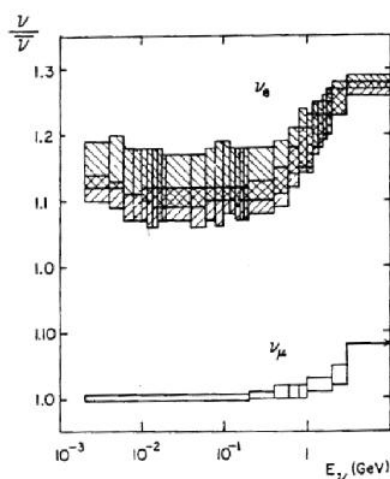
Όταν αυξάνεται η ενέργεια των πιονίων το μήκος διάσπασης αυξάνεται και έτσι αυξάνεται η πιθανότητα να αντιδράσουν. Στις ενέργειες πιονίων πάνω από τα **115 GeV** τα πιονια αντιδρούν πριν διασπαστούν και τα μιονικά νετρίνα, παράγονται από διασπάσεις **K_L** σε λόγο **3/1**.

Στις πολύ μεγάλες ενέργειες που το πάχος της ατμόσφαιρας δεν αρκεί για να διασπαστεί ένα μόνιο, η πηγή των ηλεκτρονιακών νετρίνων είναι οι διασπάσεις **$K_L \rightarrow \pi^{\pm} e^{\mp} \bar{\nu}_e (\nu_e)$**

Ο ακριβής αριθμός των παραγόμενων νετρίνων γίνεται με προσομοίωση Μόντε Κάρλο. Εκτός από τις ακριβείς αντιδράσεις χρειάζεται να γίνει υπολογισμός και για την επίδραση του μαγνητικού πεδίου της γης και του ηλιακού ανέμου.

Η αιτία που προσπαθούμε να υπολογίσουμε με ακρίβεια τον αριθμό των νετρίνων είναι α) Ο υπολογισμός της ταλάντωσης των νετρίνων συγκρίνοντας τη ροή των μιονικών και ηλεκτρονιακών νετρίνων β) είναι το υπόβαθρο σε πειράματα δέσμης νετρίνων, γ) υπόβαθρο σε πειράματα ζωής πρωτονίου.

Η ενεργός διατομή των νετρίνων με ενέργεια πάνω από 1 GeV αυξάνεται γραμμικά με την ενέργεια και **$\sigma_{\nu} = 0,7 \cdot 10^{-38} \cdot E_{\nu}$ (GeV)**. Η γη είναι ουσιαστικά διαφανής για τα νετρίνα εκτός αν το μήκος αντίδρασης γίνει ίσο με τη διάμετρο της γης. Αυτό συμβαίνει για ενέργειες μεγαλύτερες από **10⁵ GeV**. Η ροή των νετρίνων εξαρτάται από την ροή των μητρικών τους και τους παράγοντες που την επηρεάζουν. Δηλαδή στις χαμηλές ενέργειες επηρεάζεται από το γεωμαγνητικό πεδίο και τον ηλιακό άνεμο. Αν ένας ανιχνευτής τοποθετηθεί σε ένα ορυχείο σε μεγάλο βάθος η ροή στις υψηλές ενέργειες είναι ομογενής γιατί δεν επηρεάζεται από την μάζα της γης.



Λόγοι ν_e ν_μ στην ατμόσφαιρα.

Πειράματα Ανίχνευσης Νετρίνων

Τα νετρίνα ανιχνεύονται μέσα από τις αντιδράσεις φορτισμένου ρεύματος,

$$\nu_i + N \rightarrow l_i + X.$$

Στο πείραμα βλέπουμε το ηλεκτρόνιο ή το μόνιο που προκύπτει από την αντίδραση.

Επειδή η ενεργός διατομή είναι πολύ μικρή και η ροή των νετρίνων από κοσμικές ακτίνες είναι μικρή, για την ανίχνευση τους κατασκευάστηκαν πειράματα με μεγάλο όγκο. Τα πειράματα αυτά κατασκευάζονται σε μεγάλο βάθος ώστε να απορροφώνται τα ατμοσφαιρικά μόνια. Στις μικρές ενέργειες κάνουμε διόρθωση για τα την επίδραση των γεωμαγνητικού πεδίο στη ροή των πρωτογενών.

Το χαρακτηριστικό πείραμα είναι το **SuperKamiokande** στην Ιαπωνία.

Αποτελείται από μια μεγάλη δεξαμενή νερού που περιβάλλεται από χιλιάδες PMT. Η δεξαμενή είναι κατασκευασμένη σε βάθος **1000 m** για την προστασία από τα ατμοσφαιρικά μόνια. Η δεξαμενή έχει όγκο **40x40 m** και μάζα νερού **50 ktn**. Ο όγκος περιβάλλεται από **11000** φωτοπολ/τές διαμέτρου **51 cm**.

Τα λεπτόνια ανιχνεύονται από φως **Cherenkov** το οποίο παράγουν. Το μόνιο χάνει μικρό ποσοστό ενέργειας και τα φωτόνια σχηματίζουν μια καθαρή περιφέρεια. Τα ηλεκτρόνια χάνουν ενέργεια κατά τη κίνηση τους και τα φωτόνια εκπέμπονται σε συνεχώς μικρότερη ακτίνα σχηματίζοντας έναν γεμάτο κύκλο. Από την γωνία του κώνου υπολογίζουν την ταχύτητα και στη συνέχεια την ενέργεια του σωματιδίου.

Η κατακόρυφη ροή Νετρίνων χωρίζεται προς τα κάτω και προς τα πάνω. Η ροή προς τα κάτω επηρεάζεται από τα μαγνητικό πεδίο που αποκόπτει τις χαμηλές ενέργειες των πρωτευόντων και έτσι η ροή εξαρτάται από το γεωγραφικό πλάτος. Αντίθετα η ροή των προς τα επάνω δεν επηρεάζεται λόγω της μεγαλύτερης περιοχής που καλύπτει η γωνία του ανιχνευτή. Για αυτό είναι προτιμότερη η κατεύθυνση αυτή για την έρευνα σημειακών πηγών. Η ενέργεια των νετρίνων έχει μέγιστο στο **1 GeV** και προέρχονται από διασπάσεις μεσονίων με μέγιστο ενέργειας περίπου **20 GeV**. Για μεγαλύτερες ενέργειες χρειάζεται πολύ μεγαλύτερος όγκος και πρέπει να χρησιμοποιήσουμε τα μόνια που παράγονται στο βράχο κάτω από τον ανιχνευτή και τον διαπερνούν χωρίς να σταματήσουν. Για τις ενέργειες αυτές έχουν κατασκευαστεί ή σχεδιάζονται πειράματα σε μεγάλο βάθος στη θάλασσα και στον πάγο του νοτίου πόλου.

Συνεισφορά Πειραμάτων.

Ατμοσφαιρικά νετρίνα

Ανίχνευση SN 1989

Ηλιακά νετρίνα

Ταλαντώσεις, Μάζα νετρίνων

Το ενδιαφέρον στη φυσική των νετρίνων είναι ότι μπορούν να ταξιδέψουν τεράστιες αποστάσεις στο διάστημα χωρίς να σκεδαστούν και μπορούμε να υπολογίσουμε την προέλευση τους. Υποψήφιες σημειακές πηγές είναι οι Ενεργοί Γαλαξιακοί Πυρήνες , **(AGN)** .

2 45. Neutrino Cross Section Measurements

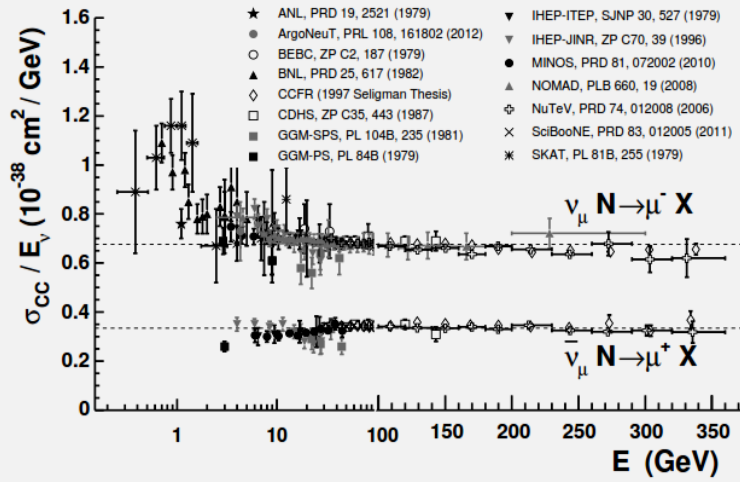


Figure 45.1: Measurements of ν_μ and $\bar{\nu}_\mu$ CC inclusive scattering cross sections divided by neutrino energy as a function of neutrino energy. Note the transition between logarithmic and linear scales occurring at 100 GeV. Neutrino-nucleon cross sections are typically twice as large as the corresponding antineutrino cross sections, though this difference can be larger at lower energies. NC cross sections (not shown) are generally smaller (but non-negligible) compared to their CC counterparts.

J. Beringer et al.(PDG), PR D86, 010001 (2012)