



Ηλιακά νετρίνα

Πρόβλημα ηλιακών νετρίνων,
ταλαντώσεις.

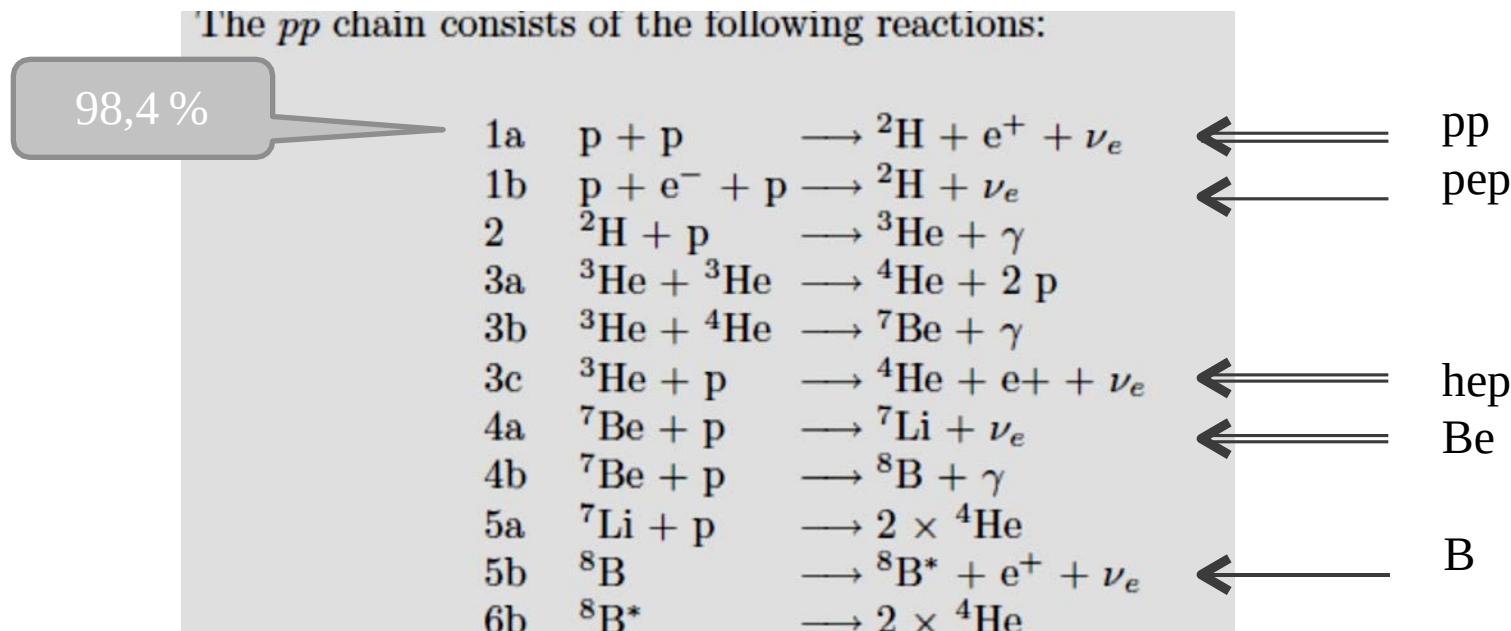
Σημείωση 1

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)



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:

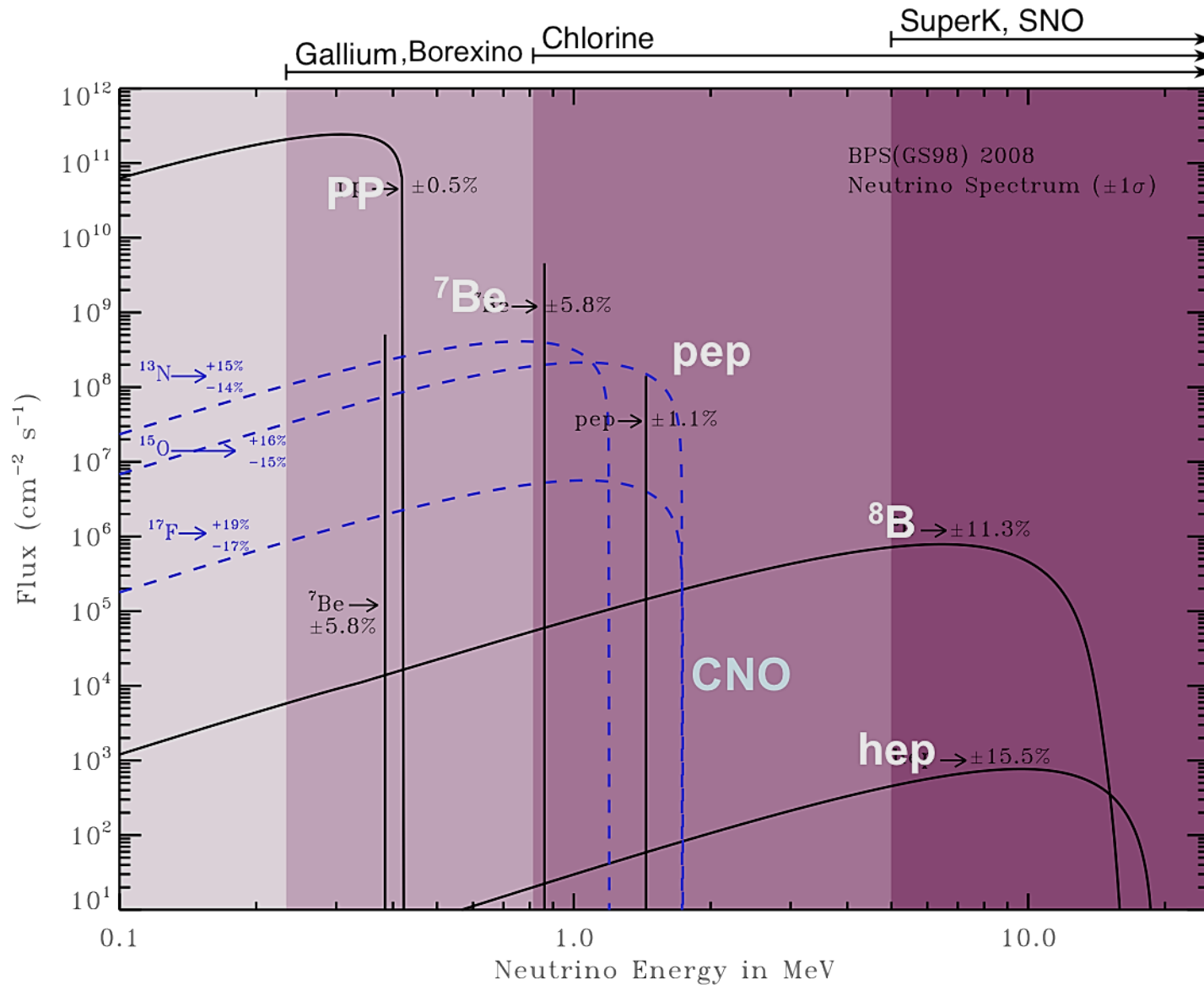
- α) Η σύντηξη Υδρογόνου ή αλυσίδα pp I όπου τελικά σχηματίζεται ${}^2\text{He}$
- β) Η κατάλυση Ηλίου ή κύκλοι pp II και pp III, όπου το ${}^3\text{H}$ μετατρέπεται σε ${}^4\text{H}$.
- γ) Ο κύκλος $C N O$ (άνθρακας, άζωτο, οξυγόνο).

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 ${}^7\text{Be}$, per είναι γραμμικό.

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

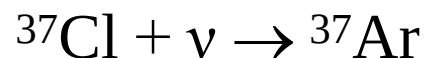
Για το super-KND περίπου 5 MeV, για το Homestake που χρησιμοποιεί Χλώριο 0,800 MeV και για τους ανιχνευτές που χρησιμοποιούν Γάλιο 0,200 MeV.

- 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.

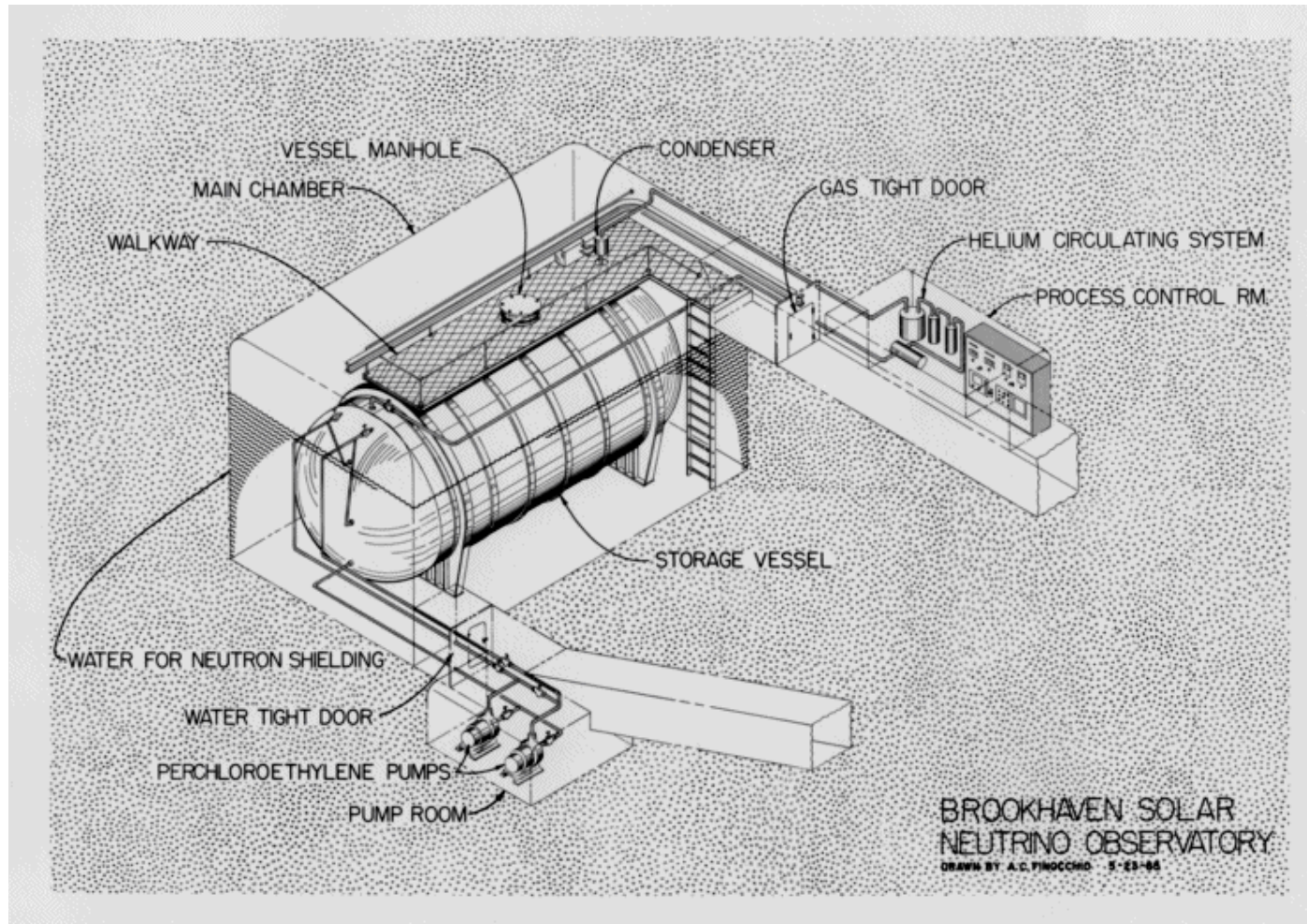
Η αντίστροφη διάσπαση β στηρίζεται στην αντίδραση $\nu e + n \rightarrow p + e^-$ δηλαδή ο ατομικός αριθμός Z αυξάνεται κατά 1. Αν ο πυρήνας που προκύπτει είναι ασταθής μπορούμε να τον ανιχνεύσουμε από την ακτίνα γ που εκπέμπει κατά την αποδιέγερση του. Σαν μονάδα μέτρησης χρησιμοποιούμε 1 SNU (Solar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

615 τόνοι τετραχλωροαιθάνιο C_2Cl_4

Ένα n του Χλωρίου μετατρέπεται σε p



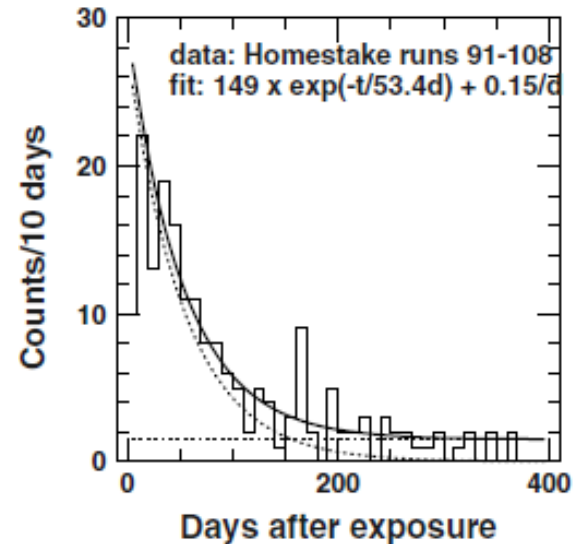
Κατώφλι Ενέργειας 0,814 MeV Αντιδρούν τα νετρίνα από την αντίδραση:



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

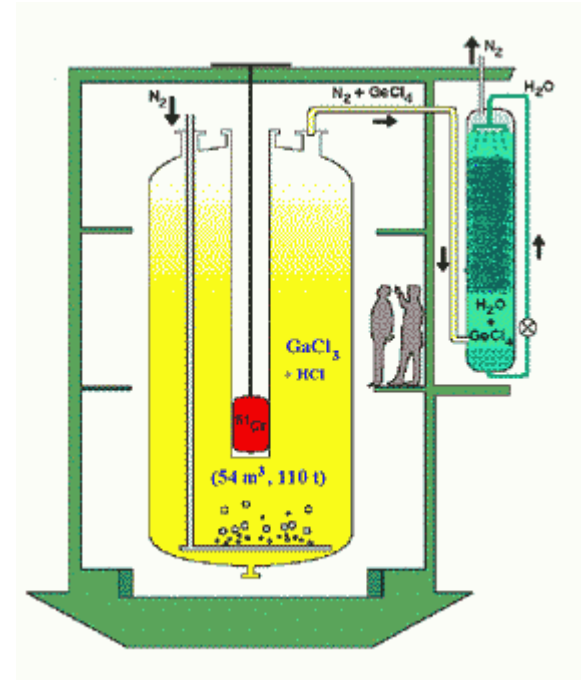
Η ροή νετρίνων που μετρούσε, ήταν περίπου το 30% της προβλεπόμενης από το Τυπικό Ηλιακό Μοντέλο.

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



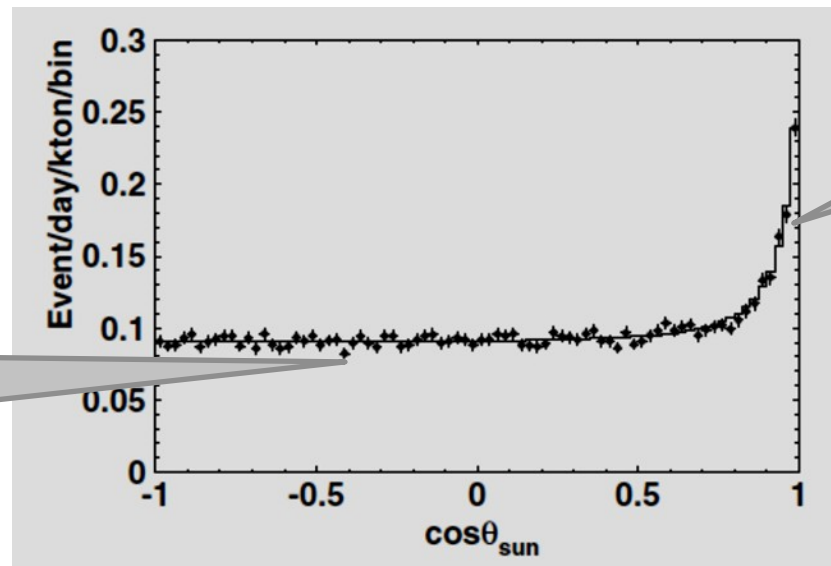
GALLEX, SAGE

- 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.



Ηλιακά
Νετρίνα

Υπόβαθρο
Ραδιενέργές
διασπάσεις



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 $E_\nu > 6.5 \text{ MeV}$.

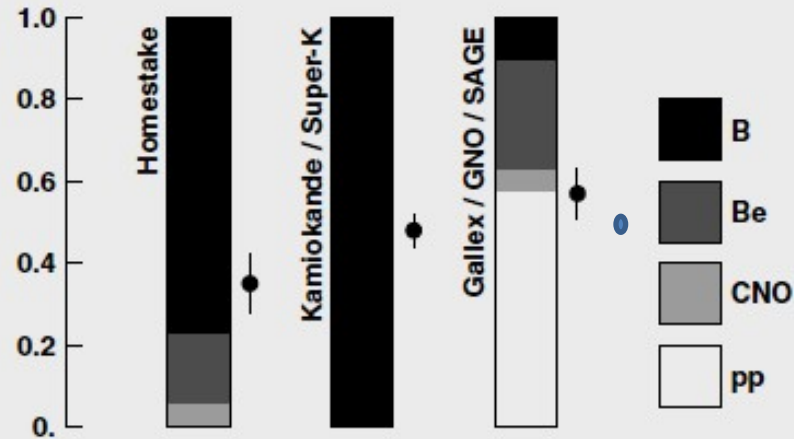
Στο διάγραμμα βλέπουμε τον αριθμό των νετρίνων σε σχέση με την γωνία που σχηματίζει η τροχιά τους με τον ήλιο. Και εδώ ο καταμετρούμενος αριθμός αντιδράσεων είναι ο μισός από τον υπολογιζόμενο θεωρητικά.

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	$\nu + e \rightarrow \nu + e$		
		${}^7\text{Be}$		0.46 ± 1.5
		${}^8\text{Be}$		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.

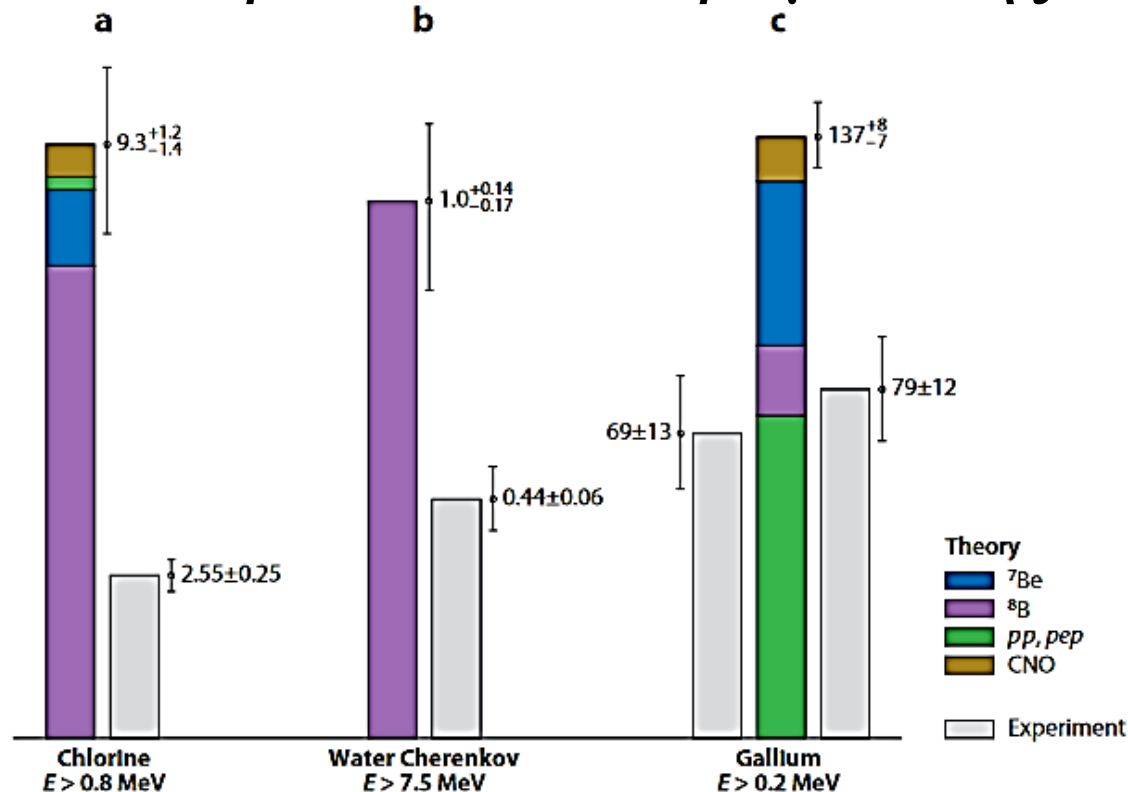
Αποτελέσματα.



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

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

Σύγκριση της θεωρητικά υπολογισμένης ροής νετρίνων και πειραματικής.



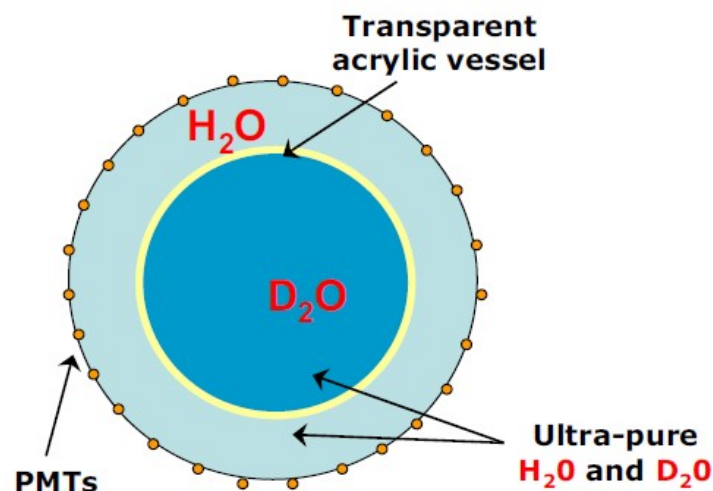
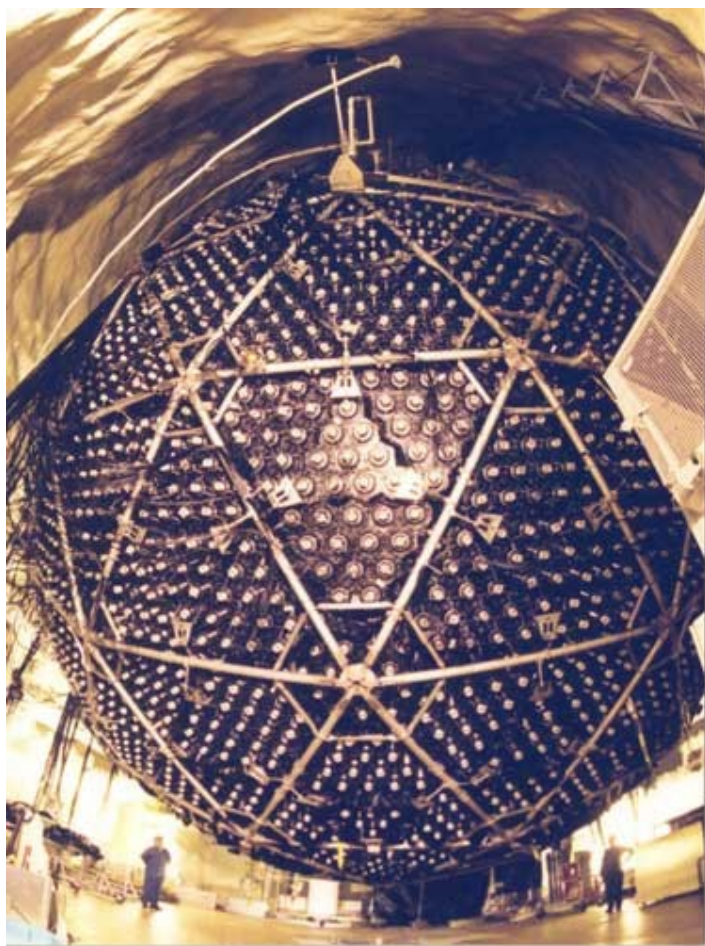
Οι χρωματιστές στήλες δείχνουν την αναμενόμενη ροή νετρίνων για κάθε πείραμα, ενώ τα διαφορετικά χρώματα αντιστοιχούν στις διαφορετικές πυρηνικές αντιδράσεις στο εσωτερικό του ηλίου.

Οι γκρίζες στήλες δείχνουν την ροή που μετρήθηκε,

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.

Αποτελέσματα SNO.

Το πείραμα SNO χρησιμοποιεί για ανιχνευτή «βαρύ νερό» (D₂O) 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.

Περισσότερα για το πείραμα SNO

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 D_2O είναι 1 προς 10^{14} πυρήνες και για το H_2O 1 προς 10^{13} . Επίσης η καθαρότητα αυτή πρέπει να διατηρείται σε όλη τη διάρκεια του πειράματος.

Το δεύτερο σφαιρικό κέλυφος, είναι γεμάτο με H_2O και λειτουργεί σαν απορροφητής της ακτινοβολίας των ραδιενεργών υλικών του υπεδάφους.

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.

Περισσότερα για το πείραμα SNO



Η αντίδραση CC γίνεται μόνον από τα ηλεκτρονικά νετρίνα και δίνει ένα ηλεκτρόνιο με ενέργεια ίση με την ενέργεια του νετρίνου μείον 1.44 MeV. Επιπλέον έχει και μια μικρή κατευθυντικότητα. Από το παραγόμενο φως Cerenkov υπολογίζεται και η ενέργεια του αρχικού νετρίνου.



Η αντίδραση ES έχει πολύ μικρότερη ενεργή διατομή από τις άλλες δύο. Το παραγόμενο ηλεκτρόνιο διατηρεί την διεύθυνση του αρχικού νετρίνου. Παράγεται και από τα τρία είδη των νετρίνων όμως η ενεργή διατομή των ν_e είναι έξι φορές μεγαλύτερη από τις άλλες γεύσεις.

Περισσότερα για το πείραμα SNO



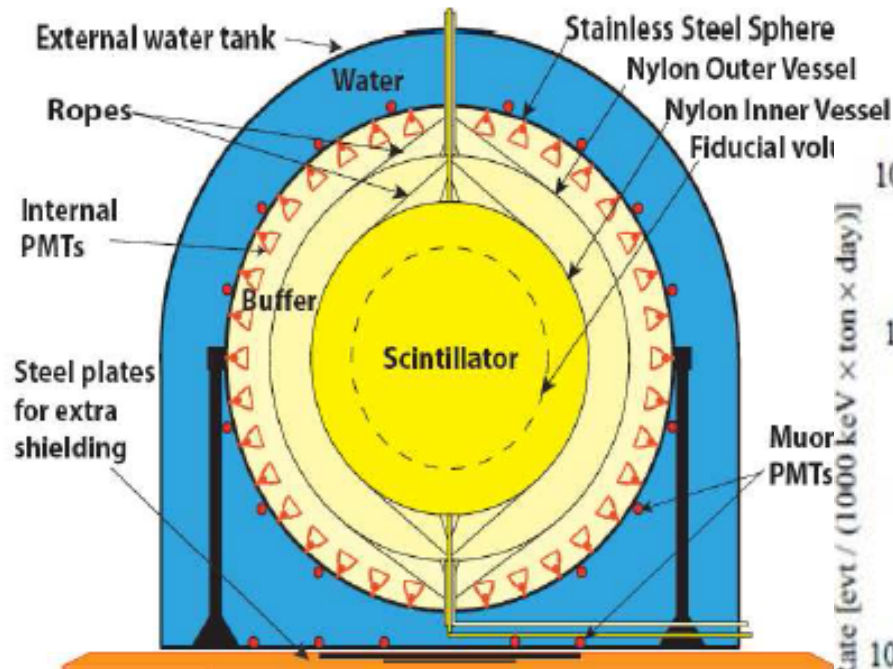
Στην αντίδραση NC το νετρόνιο που παράγεται απορροφάται από έναν πυρήνα δευτερίου και παράγεται μια ακτίνα γ με ενέργεια 6.25 MeV. Με σκέδαση Compton παράγονται ηλεκτρόνια τα οποία στη συνέχεια εκπέμπουν φως Cerenkov.

Στη δεύτερη φάση, στο δευτέριο διαλύθηκε NaCl έτσι ώστε το νετρόνιο απορροφάται από το Cl ελευθερώνεται μια ακτίνα γ με ενέργεια 8.6 MeV, το οποίο ανιχνεύεται όπως προηγούμενα.

Στην τρίτη φάση του πειράματος τοποθετήθηκαν στο εσωτερικό της μετρητές νετρονίων ώστε να ανιχνεύουν τα νετρόνια ανεξάρτητα από τους φωτοπολλαπλασιαστές και γίνονταν παράλληλες μετρήσεις της ροής νετρονίων.

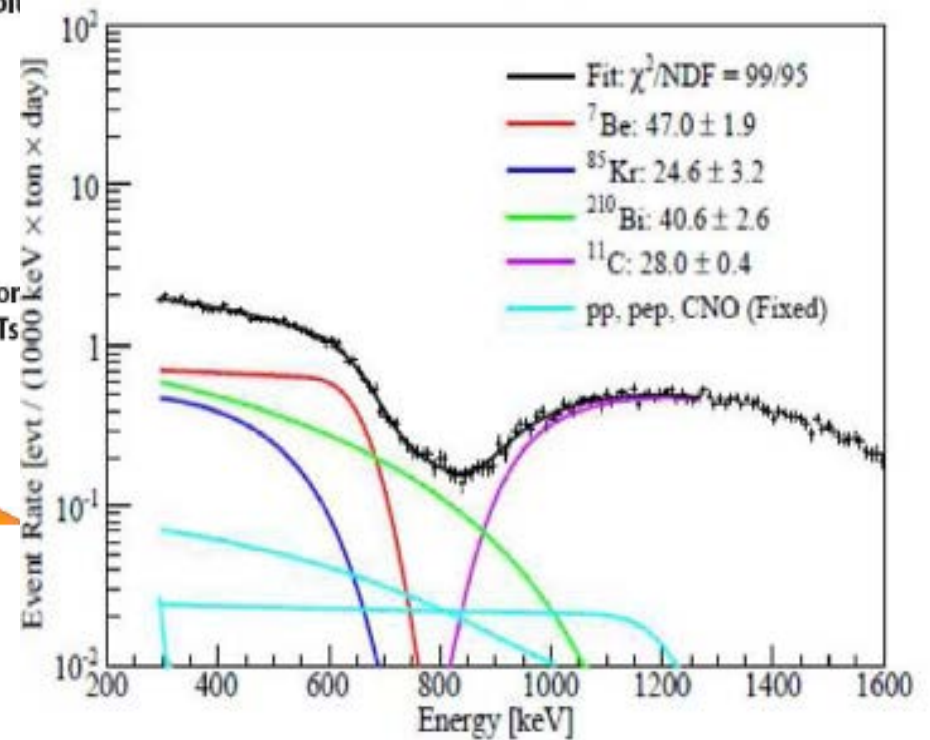
Λόγω του υποστρώματος από ραδιενεργές διασπάσεις το κατώφλι ανίχνευσης νετρίνων ήταν 4 MeV έτσι τα νετρίνα που ανιχνεύτηκαν προέρχονταν από την διάσπαση του 8B και την αντίδραση (hep) ${}^3\text{He} + p \rightarrow {}^4\text{He} + e^+ + \nu_e$

BOREXINO



Liquid scintillator

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





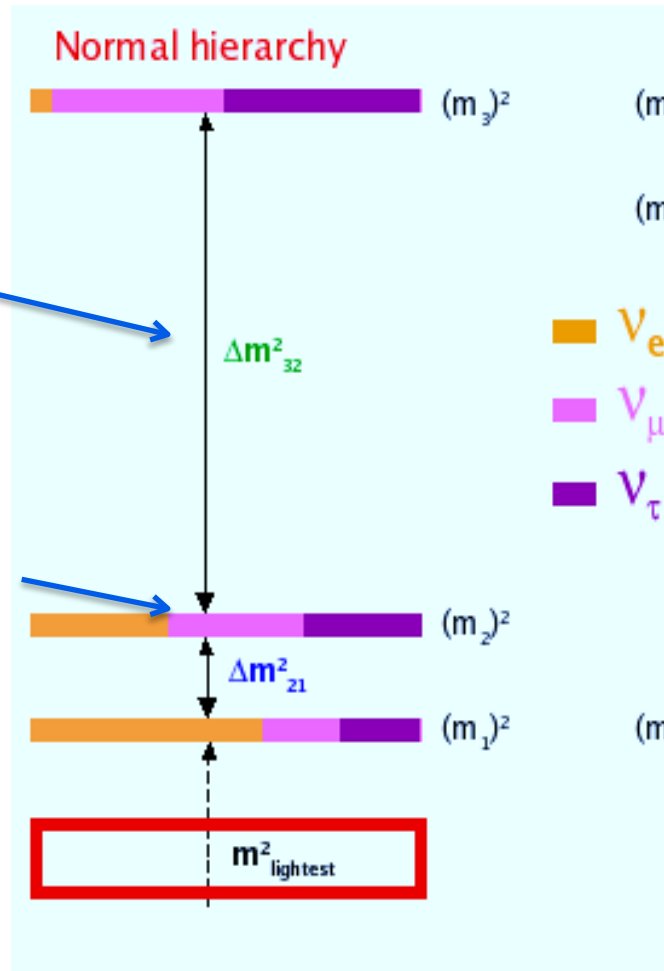
Διαφορά μαζών

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

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

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.

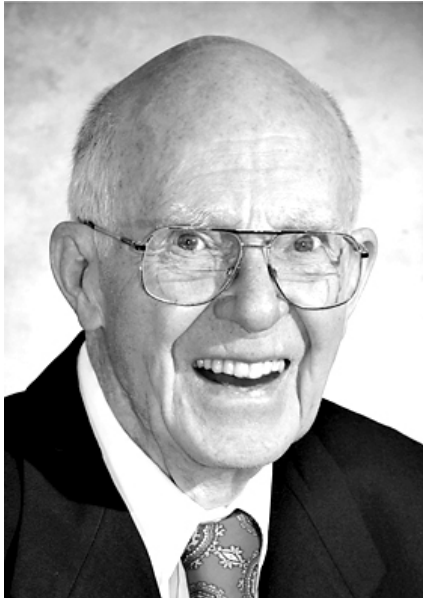
Οι ιδιοκαταστάσεις μάζας είναι $\nu_1 \ \nu_2 \ \nu_3$

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