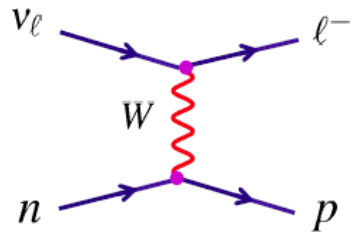


Αντιδράσεις νετρίνων στους
ανιχνευτές.

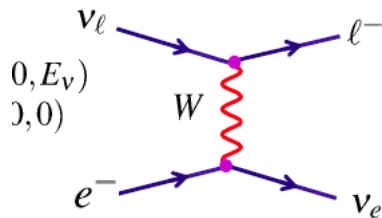
Αντιστοιχία νετρίνου - λεπτονίου.



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

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

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



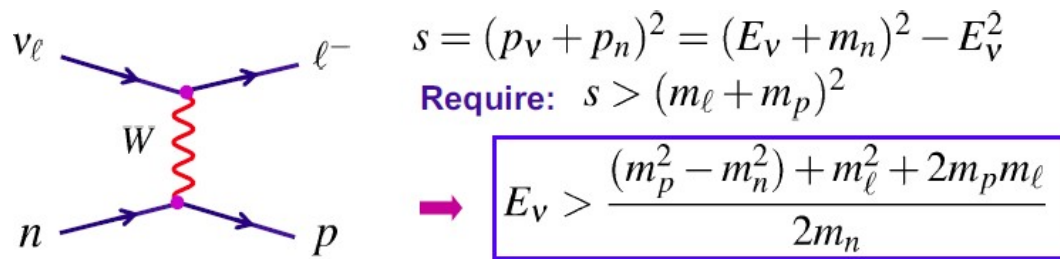
$$\nu_e + e^- \rightarrow e^- + \nu_e$$

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

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

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.

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

$p_\nu = (E_\nu, 0, 0, E_\nu)$
 $p_e = (m_e, 0, 0, 0)$

$s = (p_\nu + p_e)^2 = (E_\nu + m_e)^2 - E_\nu^2$
Require: $s > m_\ell^2$

$\rightarrow E_\nu > \left[\left(\frac{m_\ell}{m_e} \right)^2 - 1 \right] \frac{m_e}{2}$

$$E_{\nu_e} > 0$$

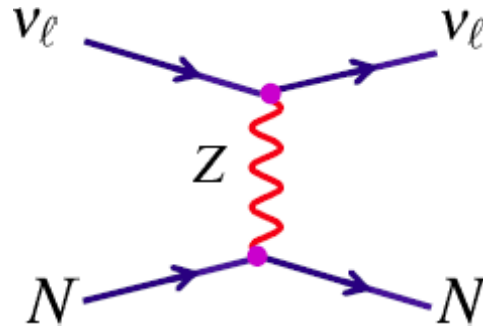
$$E_{\nu_\mu} > 110 \text{ MeV}$$

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

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.

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.

Ταλαντώσεις νετρίνων σε υλικό μέσο.

Ταλαντώσεις νετρίνων σε υλικό μέσο.

- 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 ιδιοκατάσταση μάζας 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.

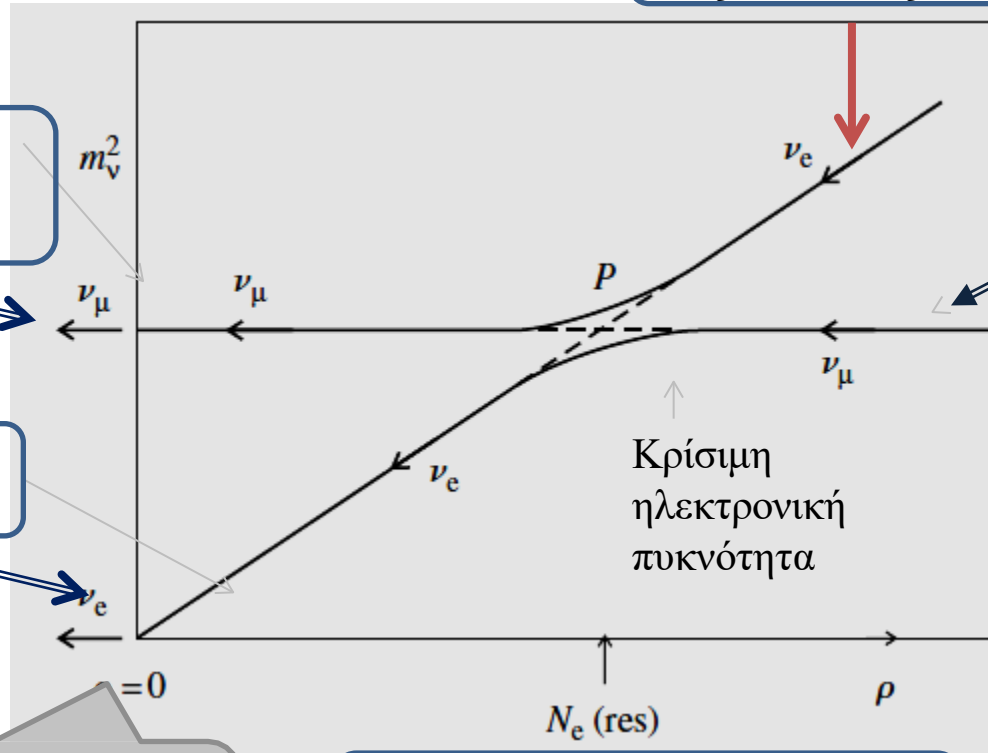
Μηχανισμός MSW

Το ν_e αποκτά μεγαλύτερη μάζα λόγω της σκέδασης στα e

ν_e με MSW
μετατρέπεται σε ν_μ

ν_e δίχως MSW

ν_μ ταξιδεύει χωρίς μετατροπή.



Πυκνότητα
ηλεκτρονίων

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

Στην τιμή αυτή, τα ν_e
μετατρέπονται κατά 50% σε ν_μ

Υπολογισμός ηλεκτρονικής πυκνότητας συντονισμού

Γράφουμε την εξίσωση Shcr. **Για νετρίνο σαν συνδυασμό δύο καταστάσεων μάζας στο κενό.** 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.

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

Μοντέλο MSW (Mikheyiev, Smyrnov, Wolfenstein).

Το ν_e σκεδάζεται στα ηλεκτρόνια

$$\bar{\nu}_e + e^- = \bar{\nu}_e + e^-$$

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 νεutrino να απέκτησε επιπλέον μάζα Δm^2 !
Η διαφορά αυτή πρέπει να προστεθεί στον πίνακα μάζας για την διάδοση στο κενό και προκύπτει ο πίνακας για την διάδοση σε υλικό μέσο!

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.

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

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

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

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

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

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

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/m³ και το αντίστοιχο μήκος ταλάντωσης L_m είναι 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 v_μ και v_τ .

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)