Oscillations de neutrinos

neutrino : particule neutre, interagissant très faiblement avec la matière.
Prédit par Pauli pour expliquer le spectre des e^- dans la désintégration β : $n \longrightarrow p^+ + e^- + \bar{\nu}_e$

Le soleil produit des neutrinos :

$$p^+ + p^+ \longrightarrow D^+ + e^+ + \nu_e$$

ν_e = neutrino électronique
$\bar{\nu}_e$ = antineutrino électronique

Lors des interactions, le nombre leptonique est conservé

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

Il existe 3 saveurs de neutrinos :

neutrino électronique	ν_e $\bar{\nu}_e$	associé au e^- e^+
neutrino muonique	ν_μ $\bar{\nu}_\mu$	——— μ^- μ^+
neutrino tau	ν_τ $\bar{\nu}_\tau$	——— τ^- τ^+

V, ν:B

Les neutrinos sont produit dans le soleil lors de la fusion.

Ils se propagent presque sans absorption jusqu'à la terre.

On peut les mesurer (difficile).

On en détecte approximativement 1/2 le flux attendu.

Résolution :

- les neutrinos ont une masse (très faible)
- les états propre de masse ne sont pas les états produit/absorbés lors de l'interaction avec la matière.

Supposons 1 seule espèce de neutrino ν de masse m.

Si le neutrino a énergie E, sa fonction d'onde est

$$\psi(t,x) = e^{-i(Et - px)} \qquad (\hbar = c = 1)$$

Neutrino ultra-relativiste $E, p \gg m$

$$E^2 = m^2 + p^2 \longrightarrow p = E - \frac{m^2}{2E}$$

$$\longrightarrow \psi(t,x) = e^{-i\left(Et - Ex + \frac{m^2}{2E}x\right)} = e^{-iE(t-x)} \, e^{-i\frac{m^2 x}{2E}}$$

nous écrirons $|\psi(t,x)\rangle = e^{-i(Et-px)} \, |\nu\rangle$

↳ dénote l'espèce de neutrino.

IV D

Supposons 2 espèces de neutrinos $|\nu_e\rangle$ et $|\nu_\mu\rangle$.

Sur le soleil on produit $|\nu_e\rangle$.
Sur terre on détecte $|\nu_e\rangle$.

Lors de la propagation, le neutrino $|\nu_1\rangle$ a masse m_1,
le neutrino $|\nu_2\rangle$ a masse m_2.

$$\begin{cases} |\nu_e\rangle = \cos\theta\, |\nu_1\rangle + \sin\theta\, |\nu_2\rangle \\ |\nu_\mu\rangle = -\sin\theta\, |\nu_1\rangle + \cos\theta\, |\nu_2\rangle \end{cases}$$

$$\begin{cases} |\nu_1\rangle = \cos\theta\, |\nu_e\rangle - \sin\theta\, |\nu_\mu\rangle \\ |\nu_2\rangle = \sin\theta\, |\nu_e\rangle + \cos\theta\, |\nu_\mu\rangle \end{cases}$$

IV ν_E

1) $|\nu_e\rangle$ produit dans le soleil (en $t=0, x=0$) $\longrightarrow$ base (ν_e, ν_μ)

$|\psi(t=0, x=0)\rangle = |\nu_e\rangle = \cos\theta\, |\nu_1\rangle + \sin\theta\, |\nu_2\rangle$

2) le neutrino se propage vers la terre $\longrightarrow$ base (ν_1, ν_2)

$$|\psi(t,x)\rangle = e^{-iE(t-x)}\left[e^{-i\frac{m_1^2}{2E}x} \cos\theta\, |\nu_1\rangle + e^{-i\frac{m_2^2}{2E}x} \sin\theta\, |\nu_2\rangle \right]$$

3) Sur terre, en $x = L$, on détecte des ν_e.

$\longrightarrow$ base (ν_e, ν_μ)

$$|\psi(t,L)\rangle = e^{-iE(t-L)}\left(e^{-i\frac{m_1^2}{2E}L} \cos\theta \left(\cos\theta\, |\nu_e\rangle - \sin\theta\, |\nu_\mu\rangle\right) + e^{-i\frac{m_2^2}{2E}L} \sin\theta \left(\sin\theta\, |\nu_e\rangle + \cos\theta\, |\nu_\mu\rangle\right)\right)$$

$$= e^{-iE(t-L)}\left(|\nu_e\rangle \left(\cos^2\theta\, e^{-i\frac{m_1^2}{2E}L} + \sin^2\theta\, e^{-i\frac{m_2^2}{2E}L}\right) + |\nu_\mu\rangle \cos\theta \sin\theta \left(e^{-i\frac{m_2^2}{2E}L} - e^{-i\frac{m_1^2}{2E}L}\right)\right)$$

Probabilité de ne pas détecter de neutrino

$$P(\text{NO}\ \nu) = |\langle \nu_\mu | \psi(t,L)\rangle|^2$$

$$= \left| \cos\theta \sin\theta \left(e^{-i\frac{m_2^2 L}{2E}} - e^{-i\frac{m_1^2}{2E}L}\right) \right|^2$$

$$= \sin^2 2\theta\, \sin^2\left(\frac{\Delta m^2 L}{4E}\right)$$

avec $\Delta m^2 = m_1^2 - m_2^2$

Expérimentalement, on a déterminé que

$$\sin^2(2\theta) \simeq 0,85$$

$$\Delta m^2 \simeq 8\ 10^{-5}\ eV^2$$

Le problème est un peu plus complexe car il y a 3 familles de neutrinos.