

La Física de Neutrinos y el Helado Napolitano

Sheryl Melara

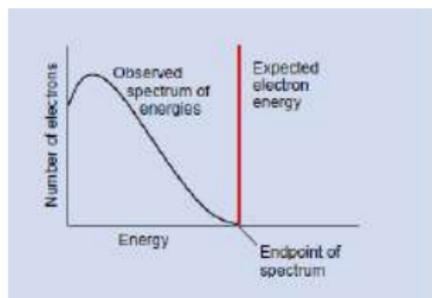
Escuela de Física, Departamento de Gravitación, Altas Energías y Radiaciones

19 de abril de 2018

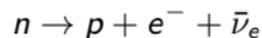


Historia del Neutrino

Pauli propuso la existencia de una nueva partícula, la cual debía ser neutra y muy ligera.



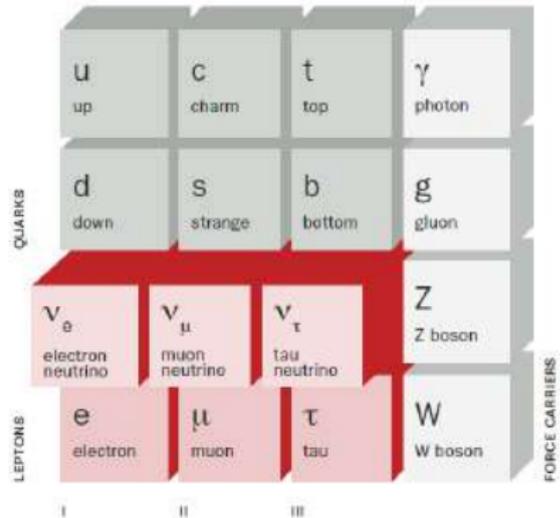
¡El principio de conservación de energía parecía no ser válido a escalas subatómicas!



El modelo estándar y los neutrinos

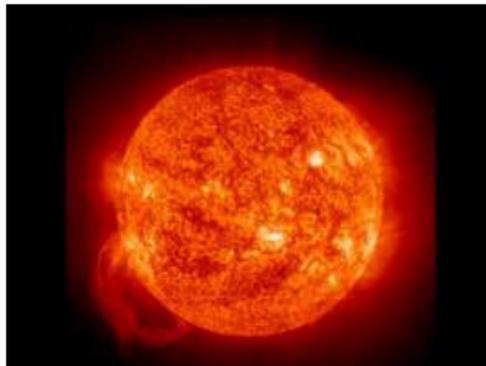
Características de los neutrinos según el ME:

- Son partículas fundamentales que vienen en tres sabores: ν_e , ν_μ y ν_τ
- No poseen carga eléctrica
- Sólo interactúan mediante la fuerza débil
- No poseen masa.



¿Cómo se producen los neutrinos?

Fuentes Naturales



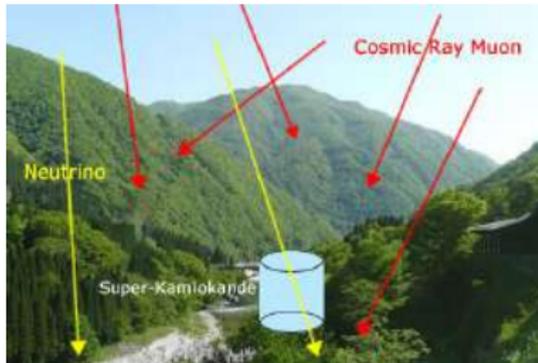
Fuentes Artificiales



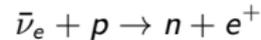
En busca del fantasma...

Características de los detectores de neutrinos:

- Deben ser muy grandes para detectar un número significativo de neutrinos.
- Se construyen bajo tierra para evitar el background de rayos cósmicos.



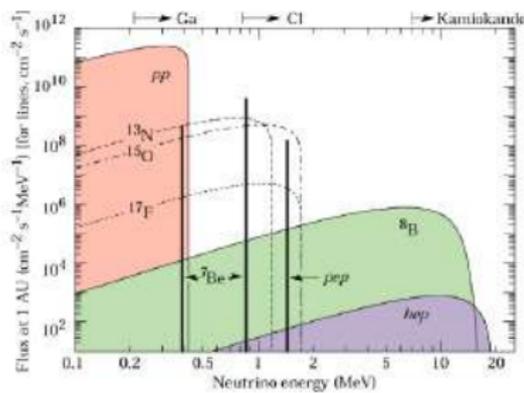
En 1956 Reines y Cowan observaron el primer antineutrino del electrón. En 1995 Frederick Reines recibió el Premio Nobel en Física por la detección del neutrino.



El problema de los neutrinos solares



En 1968 Raymond Davis observó sólo 1/3 del flujo de neutrinos predichos por el ME. Los resultados fueron confirmados por varios experimentos y durante 30 años los físicos no pudieron resolver el *problema de los neutrinos solares*



¿Estaba mal el experimento o el modelo? ¿Había algo que no comprendíamos acerca de los neutrinos?

Oscilaciones de Neutrinos

Bruno Pontecorvo propuso la idea de que los neutrinos existían como una mezcla de los tres estados de sabor, de manera que los neutrinos del electrón producidos en el Sol, podían llegar a la tierra como neutrinos de otro sabor...



- Los estados del hamiltoniano poseen masa y energía definida
- Los estados de sabor no poseen masa definida

Considerando dos sabores...

Podemos escribir los estados de sabor como combinación lineal de los estados del hamiltoniano:

$$|\nu_e\rangle = \cos\theta|\nu_1\rangle + \sin\theta|\nu_2\rangle$$

$$|\nu_\mu\rangle = -\sin\theta|\nu_1\rangle + \cos\theta|\nu_2\rangle$$

Si un estado $|\nu_e\rangle$ es creado en $t = 0$, después de un tiempo:

$$|\psi(t)\rangle = e^{-iHt}|\nu_e\rangle = e^{-iE_1t}\cos\theta|\nu_1\rangle + e^{-iE_2t}\sin\theta|\nu_2\rangle$$

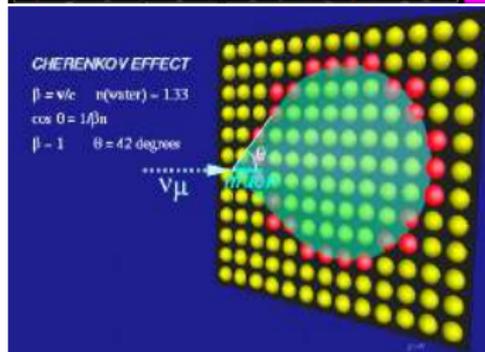
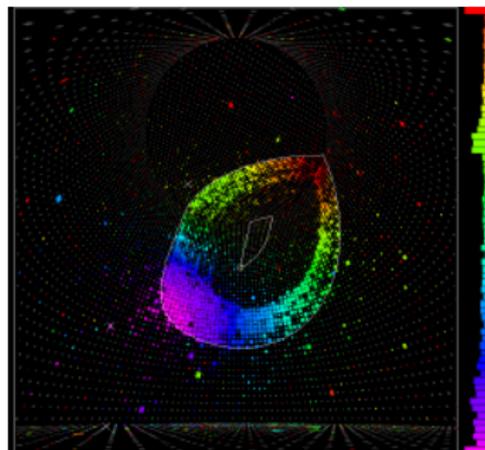
La probabilidad de detectar al neutrino en el estado $|\nu_e\rangle$ es:

$$P_{\nu_e \rightarrow \nu_e} = |\langle \nu_e | \psi(t) \rangle|^2 = 1 - \sin^2 2\theta \sin^2 \left(\frac{k\Delta m^2 L}{E} \right)$$

Super-Kamiokande

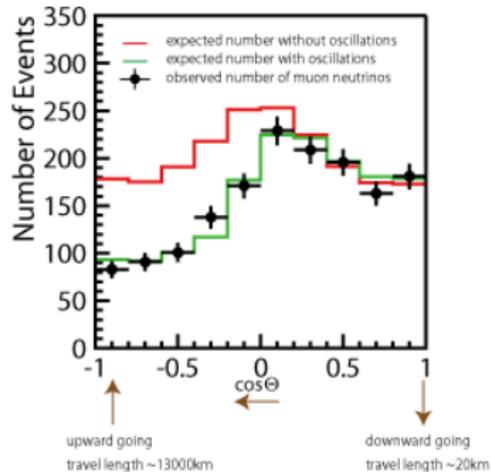
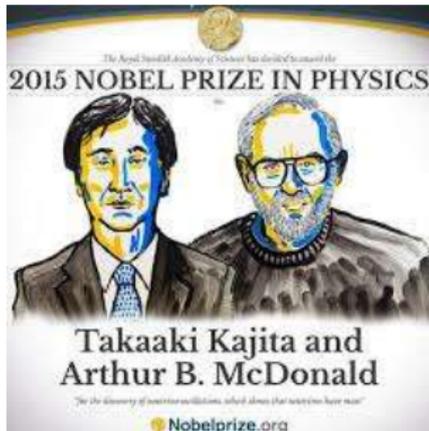


- 1000 metros bajo tierra
- 50,000 toneladas de agua
- 41.4 m de altura, 39.3 m de diámetro
- Luz Cherenkov



Problema Resuelto

En 1998 Super-Kamiokande anunció la observación de oscilaciones de neutrinos atmosféricos.



¡Los neutrinos si tienen masa!

Modelo de los tres neutrinos masivos.

Probabilidad de Oscilación

$$P(\nu_i \rightarrow \nu_n) = \sum_{j,j'} U_{ij} U_{nj}^* U_{nj'} U_{ij'}^* e^{-i(E_j - E_{j'})t}$$

$$i, n = e, \mu, \tau$$

$$j, j' = 1, 2, 3$$

Donde U es la matriz de Pontecorvo-Maki-Nakagawa-Sakata (PMNS):

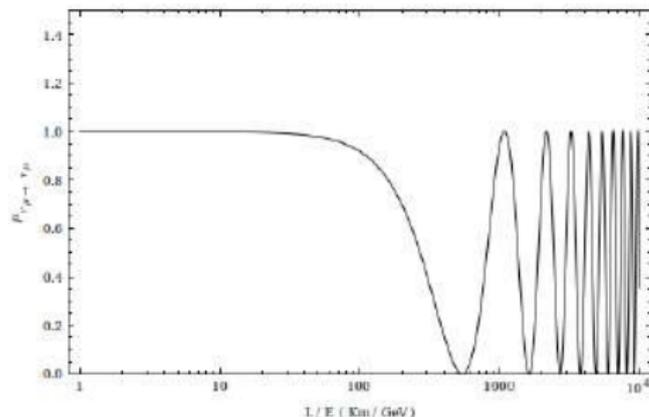
$$U = \begin{pmatrix} c_{12}c_{13} & s_{12}c_{13} & s_{13}e^{-i\delta} \\ -s_{12}c_{23} - c_{12}s_{23}s_{13}e^{-i\delta} & c_{12}c_{23} - s_{12}s_{23}s_{13}e^{-i\delta} & s_{23}c_{13} \\ s_{12}s_{23} - c_{12}c_{23}s_{13}e^{-i\delta} & -c_{12}s_{23} - s_{12}c_{23}s_{13}e^{-i\delta} & c_{23}c_{13} \end{pmatrix}$$

El modelo $3\nu SM$ depende de seis parámetros:

- $\Delta m_{23}^2, \theta_{23}$: Neutrinos atmosféricos.
- $\Delta m_{12}^2, \theta_{12}$: Neutrinos Solares.
- θ_{13} : Neutrinos de reactor.
- δ : Violación CP



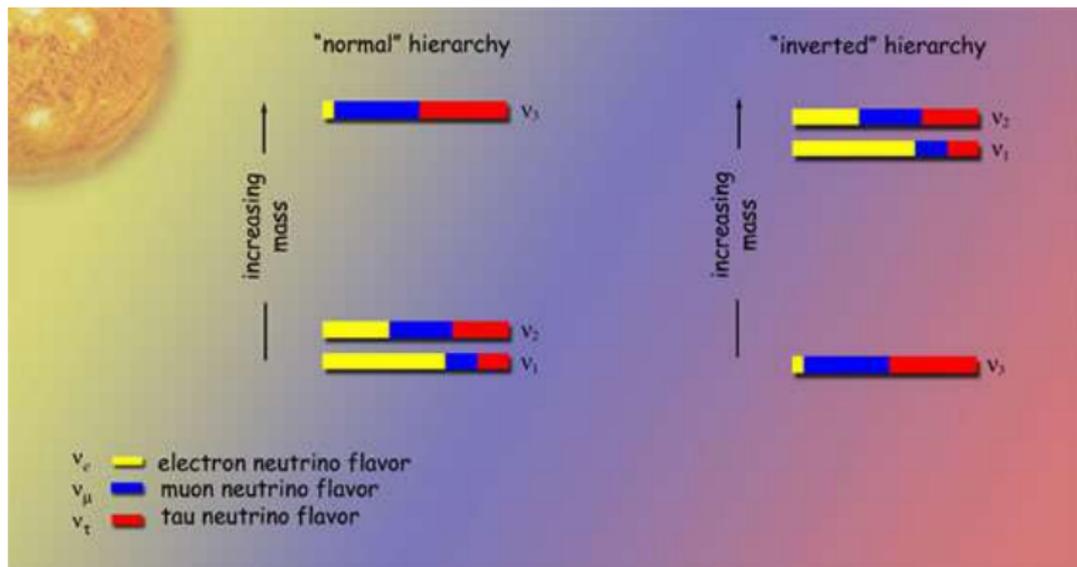
$$P_{\mu \rightarrow \mu} = 1 - \sin^2 2\theta_{23} \sin^2 \left(\frac{\Delta m_{23}^2 L}{4E} \right)$$



- Sobrevivencia para neutrinos atmosféricos
- Comparación con datos obtenidos por SK
- Dip alrededor de $L/E = 500 - 600 \text{ Km}/\text{GeV}$
- $\theta_{23} = \pi/4$
- $\Delta m_{23} = 2.50 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$
- Presentes experimentos: SK, T2K, MINOS, No ν a.

Jerarquía de Masa

Aún no conocemos el signo de Δm_{31}^2 , si es positivo se denomina "Jerarquía Normal", si es negativo "Jerarquía Invertida"



Si los parámetros de oscilación de los neutrinos son distintos a los parámetros de los antineutrinos y si $\delta \neq 0, \pi, 2\pi$ existe una posible violación CP.

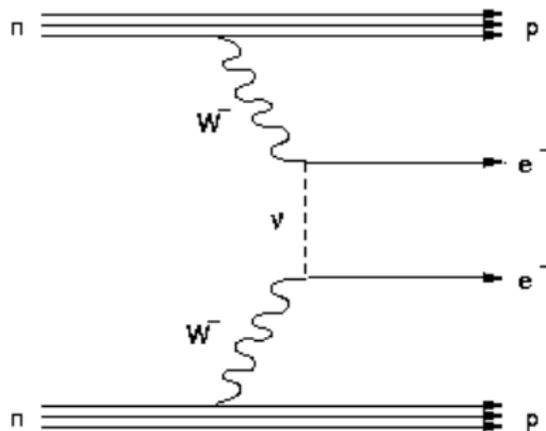
¿Son los neutrinos responsables de nuestra propia existencia?



Neutrinoless Double Beta Decay

Si en neutrino se comporta como un antineutrino o viceversa, puede ocurrir:

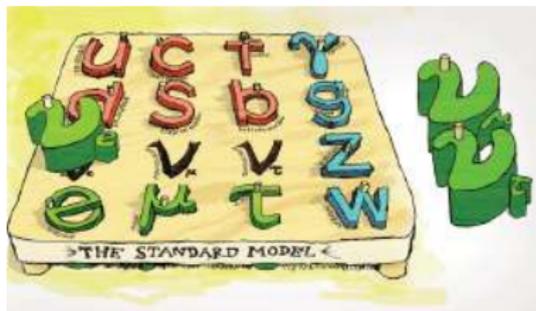
$$n \rightarrow p^+ + e^- + (\bar{\nu}_e + n \rightarrow p^+ + e^-) = 2p^+ + 2e^-$$



Este proceso indicaría la violación de número leptónico y que los neutrinos son *partículas de Majorana*, sin embargo aún no ha sido observado.

Perspectivas para el futuro

- Determinar la naturaleza de los neutrinos, es decir si son partículas de Dirac o Majorana.
- Determinar el signo de Δm_{31}^2 (Δm_{32}^2).
- Determinar si los neutrinos violan CP (Simetría CP en el sector leptónico).
- Mejorar la precisión de los parámetros del modelo de oscilaciones de neutrinos.



¡Gracias por su atención!