

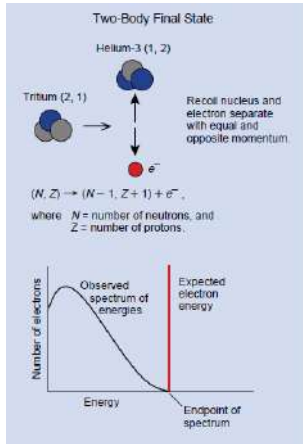
Los Neutrinos y su rol en la Astrofísica

Sheryl Melara

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

5 de abril de 2019

Historia del Neutrino: Decaimiento Beta



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



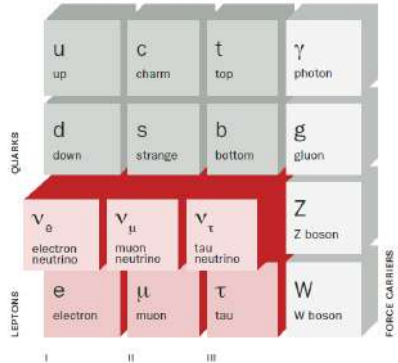
¡El principio de conservación de energía parecía no ser válido a escalas subatómicas!

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$$

El modelo estándar y los neutrinos

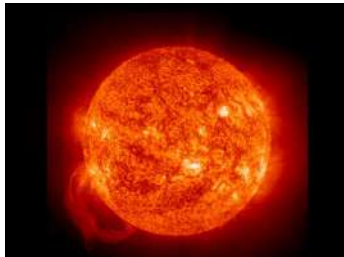
Características de los neutrinos según el ME:

- 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



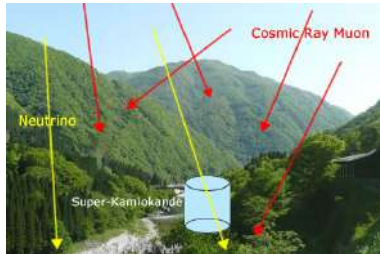
Fuentes Artificiales



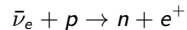
En busca del fantasma...

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.



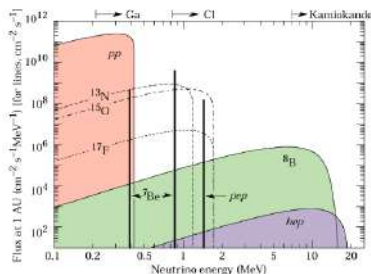
En 1956 Reines y Cowan observaron el primer antineutrino del electrón. En 1995 Frederick Reines recibió el Premio Nobel en Física por la detección del neutrino.



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*

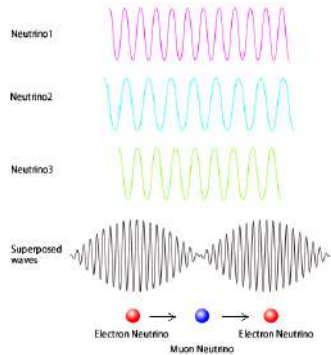
Experiment	Type of detector	Result/Theory
Homestake (USA)	^{37}Cl	0.33 ± 0.029
Kamiokande (Japan)	H_2O	0.54 ± 0.07
GALLEX (Italy)	^{71}Ga	0.60 ± 0.06
SAGE (Russia)	^{71}Ga	0.52 ± 0.06
SuperKamiokande (Japan)	H_2O	0.474 ± 0.020



¿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:

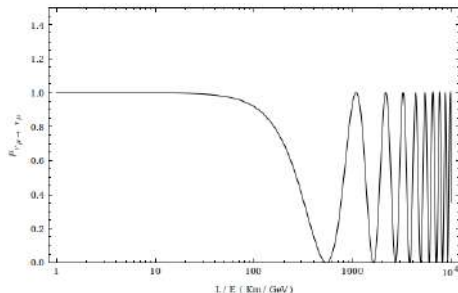
$$|\psi(t)\rangle = e^{-iHt}|\nu_e\rangle = e^{-iE_1t}\cos\theta|\nu_1\rangle + e^{-iE_2t}\sin\theta|\nu_2\rangle$$

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

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

Neutrinos Atmosféricos

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

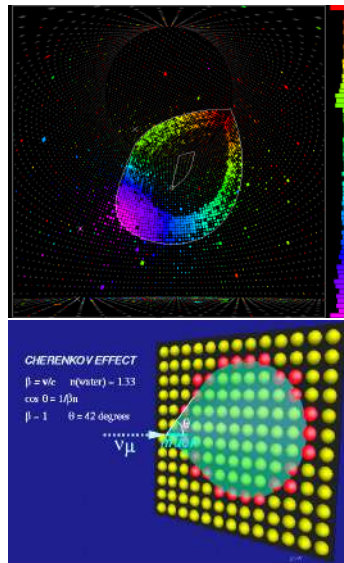


- Sobrevivencia para neutrinos atmosféricos
- Comparación con datos obtenidos por SK
- Dip alrededor de $L/E = 500 - 600 \text{ Km/GeV}$
- $\theta_{23} = \pi/4$
- $\Delta m_{23}^2 = 2.50 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$
- Presentes experimentos: SK, T2K, MINOS, No ν a.

Super-Kamiokande

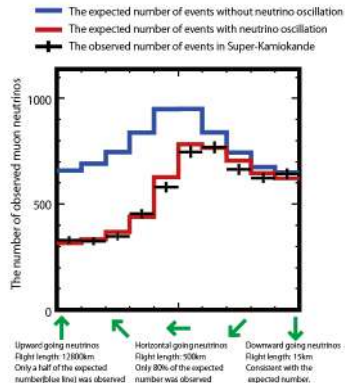
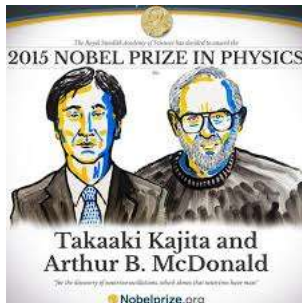


- 1000 metros bajo tierra
- 50,000 toneladas de agua
- 41.4 m de altura, 39.3 m de diámetro
- Luz Cherenkov



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

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

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

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

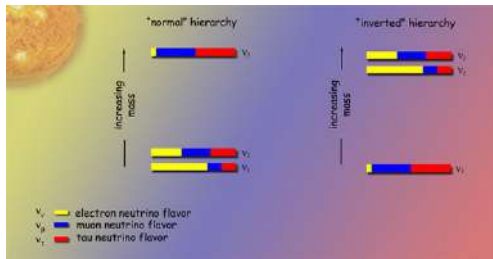
Donde U es la matriz de Pontecorvo-Maki-Nakagawa-Sakata (PMNS):

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

Parámetros del modelo

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



Aún no conocemos el signo de Δm_{13}^2 , si es positivo se denomina "jerarquía normal" y si es negativo "jerarquía invertida"

¿Por qué estudiar neutrinos?

Sabemos que hay mucha más materia que anti-materia... Si al comienzo se crearon en igual cantidad, ¿Por qué la materia es dominante?

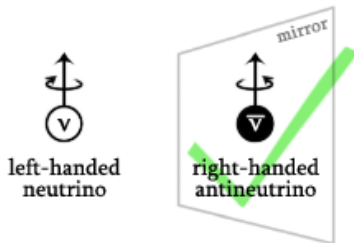
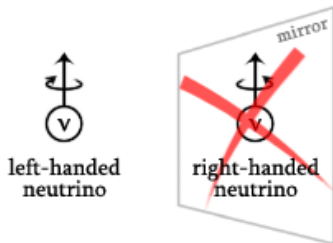
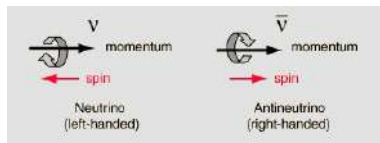
Si los parámetros de oscilación de los neutrinos son distintos a los parámetros de los antineutrinos y si $\delta \neq 0, \pi, 2\pi$ existe una posible violación CP.

¿Son los neutrinos responsables de nuestra propia existencia?



Paridad

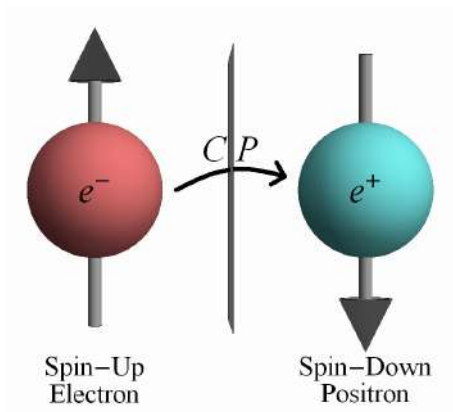
Paridad: Las leyes de la física deben ser las mismas vistas al revés en un espejo.



¡La paridad se viola en los decaimientos débiles!

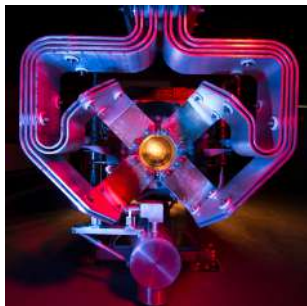
Violación CP: Conjugación de Carga y Paridad

Al aplicar CP obtenemos...



¿Violación CP en neutrinos?

El experimento T2K en el 2017 midió los parámetros para neutrinos y antineutrinos obteniendo el intervalo de confianza para δ_{CP} :
 $[-171^\circ, 34^\circ]$ para la jerarquía normal
 y $[-88^\circ, 68^\circ]$ para la jerarquía invertida. Nivel de confianza: 95 %



La violación CP ocurre si:

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) \neq P(\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e)$$

Leptogénesis y los neutrinos de Majorana

Leptogénesis es el proceso mediante el cual se produjo una asimetría entre los leptones y anti-leptones en el universo temprano. Actualmente no se ha observado ningún proceso mediante el cual se viole la conservación del número leptónico, sin embargo existe una posibilidad...

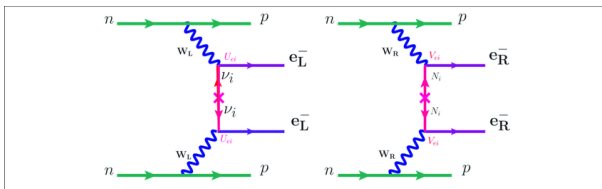


Partículas de Majorana: Son partículas neutras de espín $1/2$ que son su misma antipartícula.

Neutrinoless Double Beta Decay

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

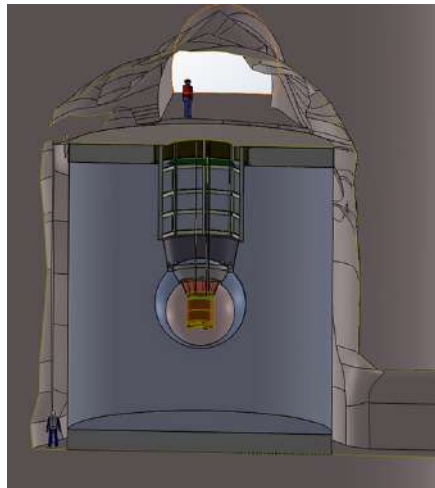
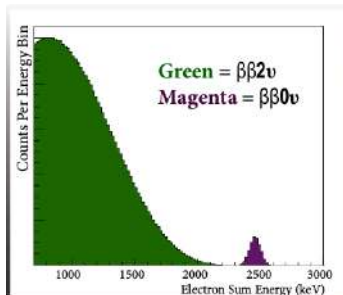
$$n \rightarrow p^+ + e^- + (\bar{\nu}_e + n \rightarrow p^+ + e^-) = 2p^+ + 2e^-$$



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

Experimento nEXO

- Meta: observar $0\nu\beta\beta$
- 5109 Kg de gas xenón líquido enriquecido con ^{136}Xe
- $Q = 2485.07 \pm 0.31 \text{ KeV}$
- Tanque de acero inoxidable de 10 m de altura y 9 m de diámetro.
- Posible ubicación: SNOLAB, Ontario, Canadá.



Perspectivas para el futuro

Aún queda por determinar...

- la naturaleza de los neutrinos, es decir si son partículas de Dirac o Majorana.
- el signo de Δm_{31}^2 , es decir si la jerarquía de masa es normal o invertida.
- la fase de violación CP δ_{cp} (mejorando el intervalo de confianza).
- el mecanismo mediante el cual los neutrinos adquieren masa.
- la existencia o no de los *neutrinos estériles*.



¡Gracias por su atención!