

Introducción a las oscilaciones de neutrinos

Mauricio Bustamante

Pontificia Universidad Católica del Perú

6 de Octubre del 2010

Contenido

- 1 Introducción
- 2 Oscilaciones de dos neutrinos en el vacío
- 3 Evidencia experimental
 - Neutrinos solares
 - Neutrinos atmosféricos
 - Neutrinos de reactores
 - Neutrinos de aceleradores
- 4 Oscilaciones con tres neutrinos
- 5 Futuro y conclusiones

Contenido

- 1 Introducción
- 2 Oscilaciones de dos neutrinos en el vacío
- 3 Evidencia experimental
 - Neutrinos solares
 - Neutrinos atmosféricos
 - Neutrinos de reactores
 - Neutrinos de aceleradores
- 4 Oscilaciones con tres neutrinos
- 5 Futuro y conclusiones

- La historia de las oscilaciones de neutrinos comienza con el intento por entender cómo funciona el Sol.
- Fusión solar emite ν_e .
- 1962–1963: John Bahcall calcula por primera vez cuál debe ser el flujo de ν_e solares
- 1970–1994: Bahcall y Ray Davis operan el experimento Homestake en Dakota del Sur, EE.UU.
- Tanque de 380 000 L de percloroetileno (fluido para limpiar), dentro de una mina, a 1 500 m de profundidad.
- Primer experimento en detectar neutrinos solares.

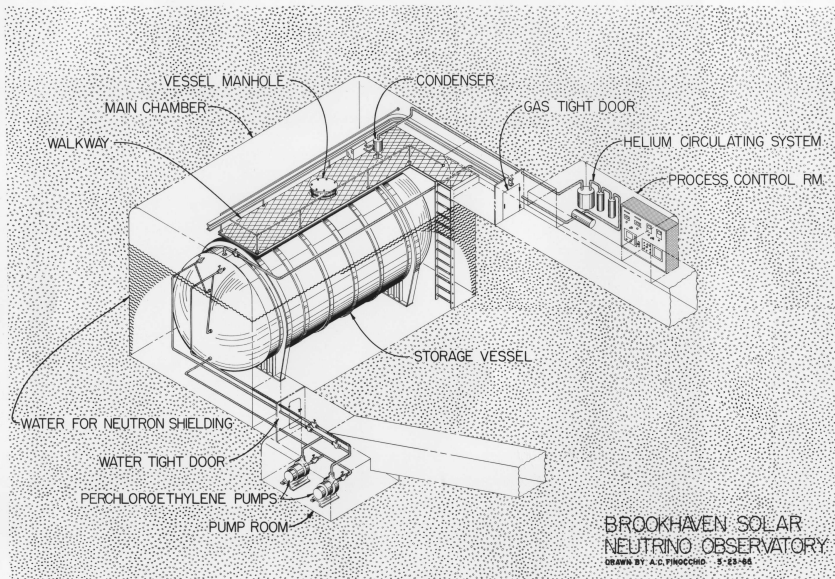
- La historia de las oscilaciones de neutrinos comienza con el intento por entender cómo funciona el Sol.
- Fusión solar emite ν_e .
- 1962–1963: John Bahcall calcula por primera vez cuál debe ser el flujo de ν_e solares
- 1970–1994: Bahcall y Ray Davis operan el experimento Homestake en Dakota del Sur, EE.UU.
- Tanque de 380 000 L de percloroetileno (fluido para limpiar), dentro de una mina, a 1 500 m de profundidad.
- Primer experimento en detectar neutrinos solares.

- La historia de las oscilaciones de neutrinos comienza con el intento por entender cómo funciona el Sol.
- Fusión solar emite ν_e .
- 1962–1963: John Bahcall calcula por primera vez cuál debe ser el flujo de ν_e solares
- 1970–1994: Bahcall y Ray Davis operan el experimento Homestake en Dakota del Sur, EE.UU.
- Tanque de 380 000 L de percloroetileno (fluido para limpiar), dentro de una mina, a 1 500 m de profundidad.
- Primer experimento en detectar neutrinos solares.

- La historia de las oscilaciones de neutrinos comienza con el intento por entender cómo funciona el Sol.
- Fusión solar emite ν_e .
- 1962–1963: John Bahcall calcula por primera vez cuál debe ser el flujo de ν_e solares
- 1970–1994: Bahcall y Ray Davis operan el experimento Homestake en Dakota del Sur, EE.UU.
- Tanque de 380 000 L de percloroetileno (fluido para limpiar), dentro de una mina, a 1 500 m de profundidad.
- Primer experimento en detectar neutrinos solares.

- La historia de las oscilaciones de neutrinos comienza con el intento por entender cómo funciona el Sol.
- Fusión solar emite ν_e .
- 1962–1963: John Bahcall calcula por primera vez cuál debe ser el flujo de ν_e solares
- 1970–1994: Bahcall y Ray Davis operan el experimento Homestake en Dakota del Sur, EE.UU.
- Tanque de 380 000 L de percloroetileno (fluido para limpiar), dentro de una mina, a 1 500 m de profundidad.
- Primer experimento en detectar neutrinos solares.

- La historia de las oscilaciones de neutrinos comienza con el intento por entender cómo funciona el Sol.
- Fusión solar emite ν_e .
- 1962–1963: John Bahcall calcula por primera vez cuál debe ser el flujo de ν_e solares
- 1970–1994: Bahcall y Ray Davis operan el experimento Homestake en Dakota del Sur, EE.UU.
- Tanque de 380 000 L de percloroetileno (fluido para limpiar), dentro de una mina, a 1 500 m de profundidad.
- Primer experimento en detectar neutrinos solares.





- Diseñado para detectar los ν 's del decaimiento del ^8B (en ^7Be).
- Energías $\lesssim 17$ MeV
- Los ν_e interactuaban con el Cl:



- Después de algunas semanas, se contaba el número de átomos de Ar en el tanque.

Resultado:

el número de ν_e detectados era $\sim 1/3$ del predicho
por el Modelo Estándar Solar

- Diseñado para detectar los ν 's del decaimiento del ^8B (en ^7Be).
- Energías $\lesssim 17 \text{ MeV}$
- Los ν_e interactuaban con el Cl:



- Después de algunas semanas, se contaba el número de átomos de Ar en el tanque.

Resultado:

el número de ν_e detectados era $\sim 1/3$ del predicho
por el Modelo Estándar Solar

- Diseñado para detectar los ν 's del decaimiento del ^8B (en ^7Be).
- Energías $\lesssim 17$ MeV
- Los ν_e interactuaban con el Cl:



- Después de algunas semanas, se contaba el número de átomos de Ar en el tanque.

Resultado:

el número de ν_e detectados era $\sim 1/3$ del predicho
por el Modelo Estándar Solar

- Diseñado para detectar los ν 's del decaimiento del ^8B (en ^7Be).
- Energías $\lesssim 17$ MeV
- Los ν_e interactuaban con el Cl:



- Después de algunas semanas, se contaba el número de átomos de Ar en el tanque.

Resultado:

el número de ν_e detectados era $\sim 1/3$ del predicho
por el Modelo Estándar Solar

- **Primera reacción:** dudar de los resultados de Davis y Bahcall
- Posibles explicaciones:
 - ▶ el MES era erróneo; o
 - ▶ Homestake estaba mal diseñado; o
 - ▶ el MES y Homestake eran correctos, pero algo pasaba con los ν_e entre el Sol y la Tierra
- 1957: Bruno Pontecorvo introdujo la idea de cambio de sabor de neutrinos
- i.e., neutrino creado como ν_e podría evolucionar y ser detectado como ν_μ ó ν_τ
- La comprobación experimental definitiva llegó recién a fines de 1990's y comienzos del siglo XXI:
 - los neutrinos cambian de sabor ("oscilan") debido a que tienen masa
- Primera indicación experimental de física más allá del Modelo Estándar.

- **Primera reacción:** dudar de los resultados de Davis y Bahcall
- Posibles explicaciones:
 - ▶ el MES era erróneo; o
 - ▶ Homestake estaba mal diseñado; o
 - ▶ el MES y Homestake eran correctos, pero algo pasaba con los ν_e entre el Sol y la Tierra
- 1957: Bruno Pontecorvo introdujo la idea de cambio de sabor de neutrinos
- i.e., neutrino creado como ν_e podría evolucionar y ser detectado como ν_μ ó ν_τ
- La comprobación experimental definitiva llegó recién a fines de 1990's y comienzos del siglo XXI:
 - los neutrinos cambian de sabor ("oscilan") debido a que tienen masa
- Primera indicación experimental de física más allá del Modelo Estándar.

- **Primera reacción:** dudar de los resultados de Davis y Bahcall
- Posibles explicaciones:
 - ▶ el MES era erróneo; o
 - ▶ Homestake estaba mal diseñado; o
 - ▶ el MES y Homestake eran correctos, pero algo pasaba con los ν_e entre el Sol y la Tierra
- 1957: Bruno Pontecorvo introdujo la idea de cambio de sabor de neutrinos
- i.e., neutrino creado como ν_e podría evolucionar y ser detectado como ν_μ ó ν_τ
- La comprobación experimental definitiva llegó recién a fines de 1990's y comienzos del siglo XXI:

los neutrinos cambian de sabor ("oscilan") debido a que tienen masa
- Primera indicación experimental de física más allá del Modelo Estándar.

- **Primera reacción:** dudar de los resultados de Davis y Bahcall
- Posibles explicaciones:
 - ▶ el MES era erróneo; o
 - ▶ Homestake estaba mal diseñado; o
 - ▶ el MES y Homestake eran correctos, pero algo pasaba con los ν_e entre el Sol y la Tierra
- 1957: Bruno Pontecorvo introdujo la idea de cambio de sabor de neutrinos
- i.e., neutrino creado como ν_e podría evolucionar y ser detectado como ν_μ ó ν_τ
- La comprobación experimental definitiva llegó recién a fines de 1990's y comienzos del siglo XXI:

los neutrinos cambian de sabor ("oscilan") debido a que tienen masa
- Primera indicación experimental de física más allá del Modelo Estándar.

- **Primera reacción:** dudar de los resultados de Davis y Bahcall
- Posibles explicaciones:
 - ▶ el MES era erróneo; o
 - ▶ Homestake estaba mal diseñado; o
 - ▶ el MES y Homestake eran correctos, pero **algo pasaba con los ν_e entre el Sol y la Tierra**
- 1957: Bruno Pontecorvo introdujo la idea de cambio de sabor de neutrinos
- i.e., neutrino creado como ν_e podría evolucionar y ser detectado como ν_μ ó ν_τ
- La comprobación experimental definitiva llegó recién a fines de 1990's y comienzos del siglo XXI:

los neutrinos cambian de sabor ("oscilan") debido a que tienen masa
- Primera indicación experimental de física **más allá del Modelo Estándar.**

- **Primera reacción:** dudar de los resultados de Davis y Bahcall
- Posibles explicaciones:
 - ▶ el MES era erróneo; o
 - ▶ Homestake estaba mal diseñado; o
 - ▶ el MES y Homestake eran correctos, pero **algo pasaba con los ν_e entre el Sol y la Tierra**
- **1957:** Bruno Pontecorvo introdujo la idea de cambio de sabor de neutrinos
- i.e., neutrino creado como ν_e podría evolucionar y ser detectado como ν_μ ó ν_τ
- La comprobación experimental definitiva llegó recién a fines de 1990's y comienzos del siglo XXI:

los neutrinos cambian de sabor ("oscilan") debido a que tienen masa
- Primera indicación experimental de física **más allá del Modelo Estándar.**

- **Primera reacción:** dudar de los resultados de Davis y Bahcall
- Posibles explicaciones:
 - ▶ el MES era erróneo; o
 - ▶ Homestake estaba mal diseñado; o
 - ▶ el MES y Homestake eran correctos, pero **algo pasaba con los ν_e entre el Sol y la Tierra**
- **1957:** Bruno Pontecorvo introdujo la idea de cambio de sabor de neutrinos
- i.e., neutrino creado como ν_e podría evolucionar y ser detectado como ν_μ ó ν_τ
- La comprobación experimental definitiva llegó recién a fines de 1990's y comienzos del siglo XXI:

los neutrinos cambian de sabor ("oscilan") debido a que tienen masa
- Primera indicación experimental de física **más allá del Modelo Estándar.**

- **Primera reacción:** dudar de los resultados de Davis y Bahcall
- Posibles explicaciones:
 - ▶ el MES era erróneo; o
 - ▶ Homestake estaba mal diseñado; o
 - ▶ el MES y Homestake eran correctos, pero **algo pasaba con los ν_e entre el Sol y la Tierra**
- **1957:** Bruno Pontecorvo introdujo la idea de cambio de sabor de neutrinos
- i.e., neutrino creado como ν_e podría evolucionar y ser detectado como ν_μ ó ν_τ
- La comprobación experimental definitiva llegó recién a fines de 1990's y comienzos del siglo XXI:

los neutrinos cambian de sabor ("oscilan") debido a que tienen masa
- Primera indicación experimental de física **más allá del Modelo Estándar.**

- **Primera reacción:** dudar de los resultados de Davis y Bahcall
- Posibles explicaciones:
 - ▶ el MES era erróneo; o
 - ▶ Homestake estaba mal diseñado; o
 - ▶ el MES y Homestake eran correctos, pero **algo pasaba con los ν_e entre el Sol y la Tierra**
- **1957:** Bruno Pontecorvo introdujo la idea de cambio de sabor de neutrinos
- i.e., neutrino creado como ν_e podría evolucionar y ser detectado como ν_μ ó ν_τ
- La comprobación experimental definitiva llegó recién a fines de 1990's y comienzos del siglo XXI:

los neutrinos cambian de sabor ("oscilan") debido a que tienen masa
- Primera indicación experimental de física **más allá del Modelo Estándar.**

Contenido

- 1 Introducción
- 2 Oscilaciones de dos neutrinos en el vacío
- 3 Evidencia experimental
 - Neutrinos solares
 - Neutrinos atmosféricos
 - Neutrinos de reactores
 - Neutrinos de aceleradores
- 4 Oscilaciones con tres neutrinos
- 5 Futuro y conclusiones

Para comenzar, asumiremos que ...

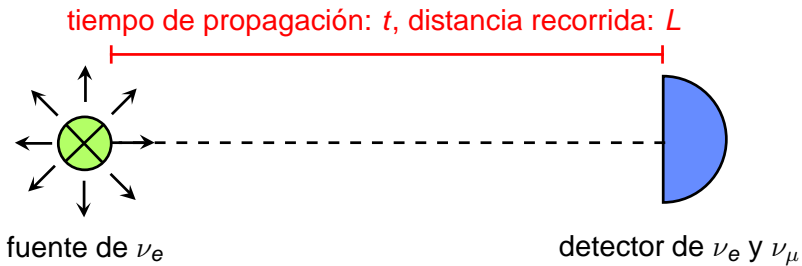
- ... sólo existen dos sabores de neutrinos (e.g., ν_e y ν_μ); y
- ... los neutrinos se propagan en el vacío.

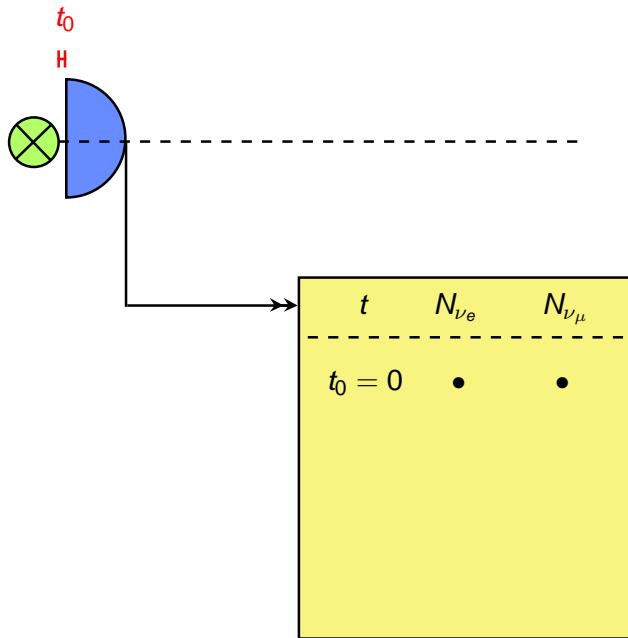
Veamos primero de qué se tratan las oscilaciones de neutrinos ►

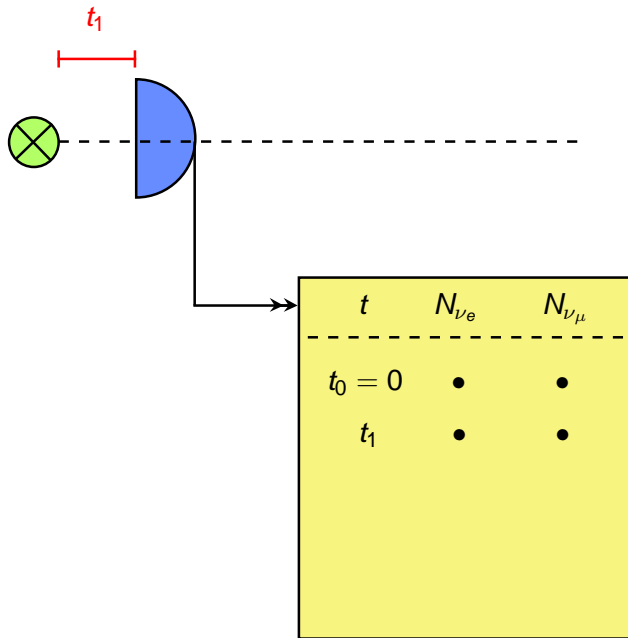
Para comenzar, asumiremos que ...

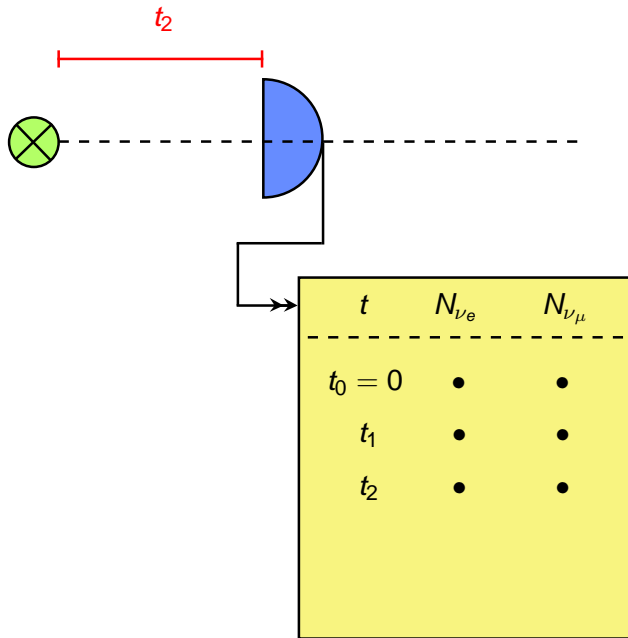
- ... sólo existen dos sabores de neutrinos (e.g., ν_e y ν_μ); y
- ... los neutrinos se propagan en el vacío.

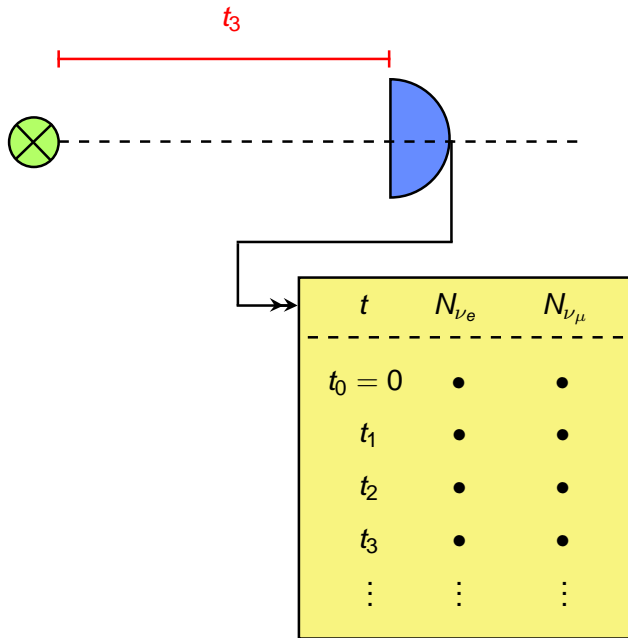
Veamos primero de qué se tratan las oscilaciones de neutrinos ►

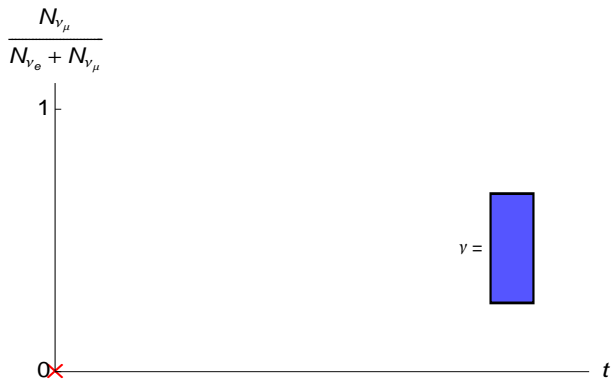


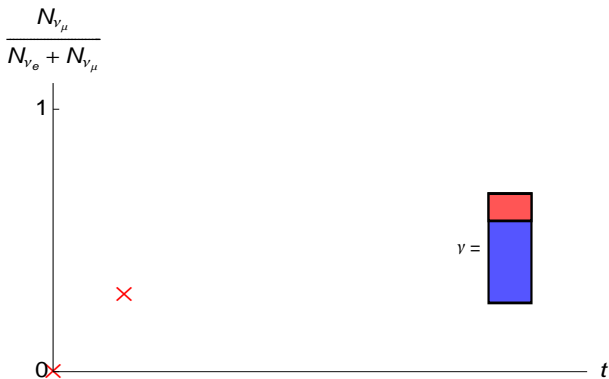


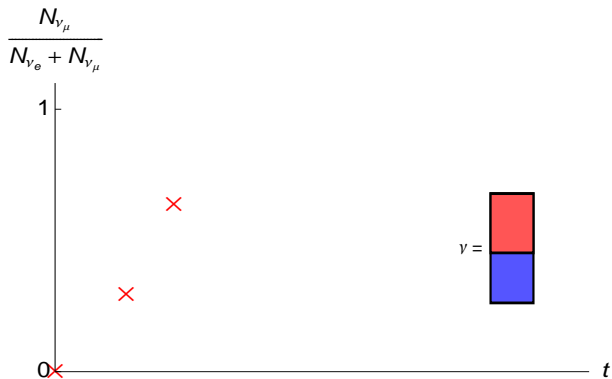
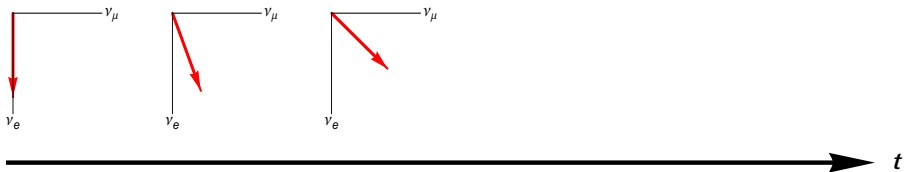


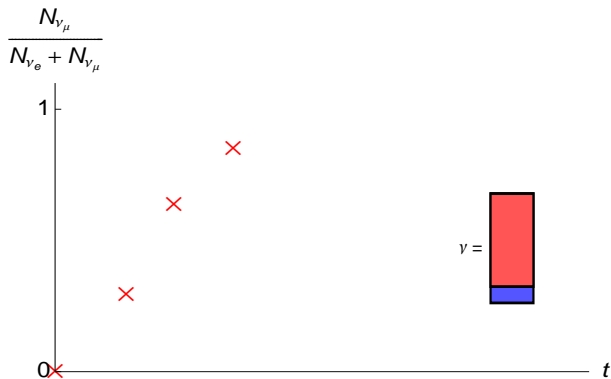
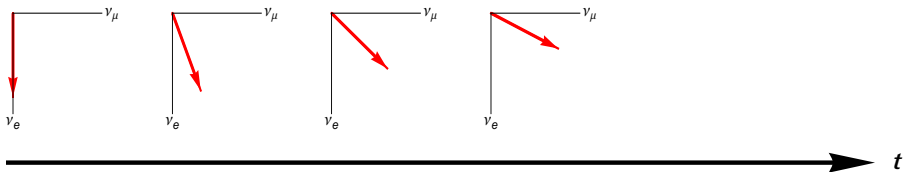


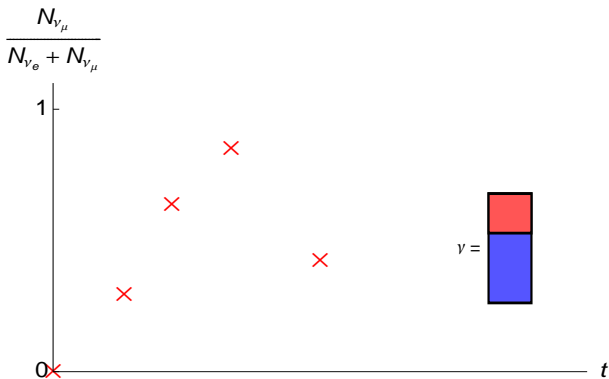
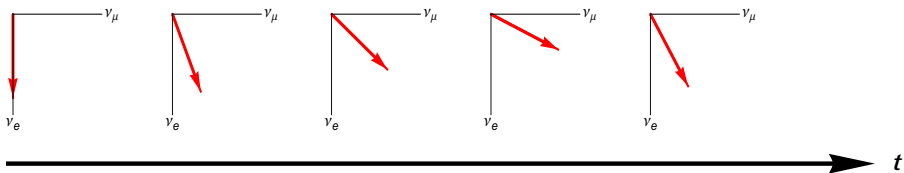


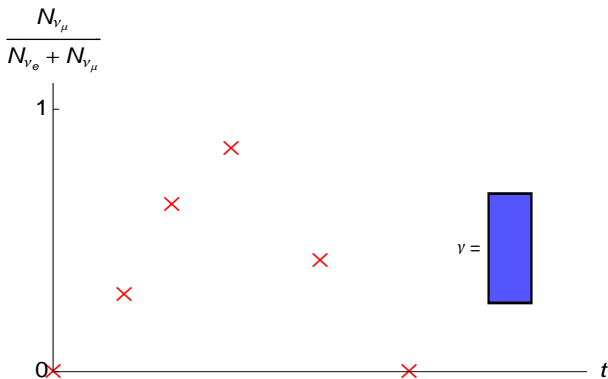
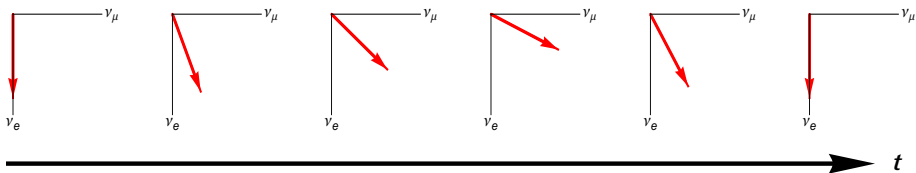


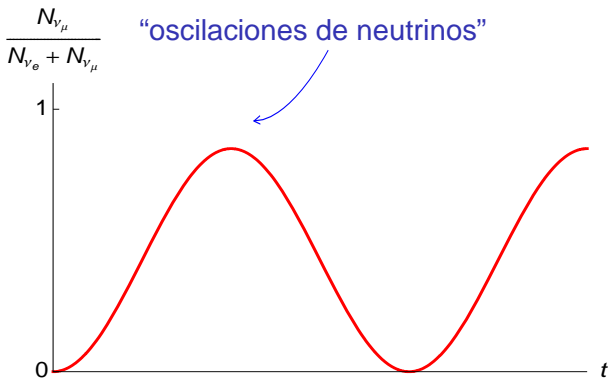
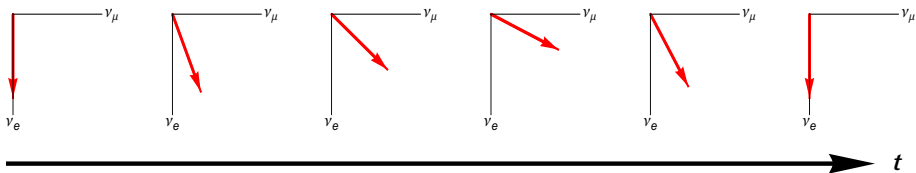












¿Por qué ocurren las oscilaciones?

- Postulamos dos bases:

$\underbrace{\{|\nu_e\rangle, |\nu_\mu\rangle\}}_{\text{base de neutrinos de sabor}}$
 $\underbrace{\{|\nu_1\rangle, |\nu_2\rangle\}}_{\text{base de autoestados de masa}}$

- Neutrino de sabor ν_α ($\alpha = e, \mu$): acompaña al (anti)leptón cargado l_α^+ que se crea en una interacción débil de corriente cargada
- Autoestado de masa ν_k ($k = 1, 2$): tiene masa definida m_k
- Bases conectadas por una rotación U :

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \end{pmatrix} = U \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \end{pmatrix}$$

¿Por qué ocurren las oscilaciones?

- Postulamos dos bases:

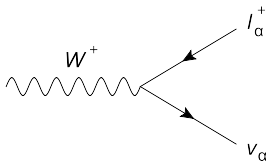
$$\{|\nu_e\rangle, |\nu_\mu\rangle\}$$

base de neutrinos de sabor

$$\{|\nu_1\rangle, |\nu_2\rangle\}$$

base de autoestados de masa

- Neutrino de sabor ν_α ($\alpha = e, \mu$): acompaña al (anti)leptón cargado l_α^+ que se crea en una interacción débil de corriente cargada



- Autoestado de masa ν_k ($k = 1, 2$): tiene masa definida m_k
- Bases conectadas por una rotación U :

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \end{pmatrix} = U \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \end{pmatrix}$$

¿Por qué ocurren las oscilaciones?

- Postulamos dos bases:

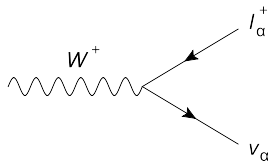
$$\{|\nu_e\rangle, |\nu_\mu\rangle\}$$

base de neutrinos de sabor

$$\{|\nu_1\rangle, |\nu_2\rangle\}$$

base de autoestados de masa

- Neutrino de sabor ν_α ($\alpha = e, \mu$): acompaña al (anti)leptón cargado l_α^+ que se crea en una interacción débil de corriente cargada



- Autoestado de masa ν_k ($k = 1, 2$): tiene masa definida m_k
- Bases conectadas por una rotación U :

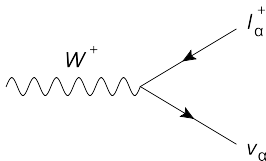
$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \end{pmatrix} = U \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \end{pmatrix}$$

¿Por qué ocurren las oscilaciones?

- Postulamos dos bases:

$\underbrace{\{|\nu_e\rangle, |\nu_\mu\rangle\}}_{\text{base de neutrinos de sabor}} \quad \underbrace{\{|\nu_1\rangle, |\nu_2\rangle\}}_{\text{base de autoestados de masa}}$

- Neutrino de sabor ν_α ($\alpha = e, \mu$): acompaña al (anti)leptón cargado l_α^+ que se crea en una interacción débil de corriente cargada



- Autoestado de masa ν_k ($k = 1, 2$): tiene masa definida m_k
- Bases conectadas por una rotación U :

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \end{pmatrix} = U \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \end{pmatrix}$$

- U es una matriz de rotación 2×2 :

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \end{pmatrix}$$

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

θ : ángulo de mezcla

- Por construcción: $\langle \nu_i | \nu_j \rangle = \delta_{ij}$.

- Como U es unitaria, entonces

$$\langle \nu_\alpha | \nu_\beta \rangle = \delta_{\alpha\beta} \quad (\alpha = e, \mu ; \quad \beta = e, \mu) ,$$

i.e., no hay componente de $|\nu_\alpha\rangle$ en $|\nu_\beta\rangle$ (si $\alpha \neq \beta$).

- U es una matriz de rotación 2×2 :

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \end{pmatrix}$$

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

θ : ángulo de mezcla

- Por construcción: $\langle \nu_i | \nu_j \rangle = \delta_{ij}$.

- Como U es unitaria, entonces

$$\langle \nu_\alpha | \nu_\beta \rangle = \delta_{\alpha\beta} \quad (\alpha = e, \mu ; \quad \beta = e, \mu) ,$$

i.e., no hay componente de $|\nu_\alpha\rangle$ en $|\nu_\beta\rangle$ (si $\alpha \neq \beta$).

- U es una matriz de rotación 2×2 :

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \end{pmatrix}$$

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

θ : ángulo de mezcla

- Por construcción: $\langle \nu_i | \nu_j \rangle = \delta_{ij}$.
- Como U es unitaria, entonces

$$\langle \nu_\alpha | \nu_\beta \rangle = \delta_{\alpha\beta} \quad (\alpha = e, \mu ; \quad \beta = e, \mu) ,$$

i.e., no hay componente de $|\nu_\alpha\rangle$ en $|\nu_\beta\rangle$ (si $\alpha \neq \beta$).

- Los $|\nu_k\rangle$ ($k = 1, 2$) son autoestados del Hamiltoniano H :

$$H|\nu_k\rangle = E_k|\nu_k\rangle \quad , \quad \text{con} \quad E_k = \sqrt{|\mathbf{p}|^2 + m_k^2}$$

Momentum \mathbf{p} común a $|\nu_1\rangle$ y $|\nu_2\rangle$.

- Autoestados de masa a tiempo t :

$$|\nu_k(t)\rangle = e^{-iE_k t} |\nu_k\rangle$$

- Neutrinos de sabor a tiempo t :

$$\begin{aligned} |\nu_e(t)\rangle &= \cos(\theta) e^{-iE_1 t} |\nu_1\rangle + \sin(\theta) e^{-iE_2 t} |\nu_2\rangle \\ |\nu_\mu(t)\rangle &= -\sin(\theta) e^{-iE_1 t} |\nu_1\rangle + \cos(\theta) e^{-iE_2 t} |\nu_2\rangle \end{aligned}$$

- Los $|\nu_k\rangle$ ($k = 1, 2$) son autoestados del Hamiltoniano H :

$$H|\nu_k\rangle = E_k|\nu_k\rangle \quad , \quad \text{con} \quad E_k = \sqrt{|\mathbf{p}|^2 + m_k^2}$$

Momentum \mathbf{p} común a $|\nu_1\rangle$ y $|\nu_2\rangle$.

- Autoestados de masa a tiempo t :

$$|\nu_k(t)\rangle = e^{-iE_k t} |\nu_k\rangle$$

- Neutrinos de sabor a tiempo t :

$$\begin{aligned} |\nu_e(t)\rangle &= \cos(\theta) e^{-iE_1 t} |\nu_1\rangle + \sin(\theta) e^{-iE_2 t} |\nu_2\rangle \\ |\nu_\mu(t)\rangle &= -\sin(\theta) e^{-iE_1 t} |\nu_1\rangle + \cos(\theta) e^{-iE_2 t} |\nu_2\rangle \end{aligned}$$

- Los $|\nu_k\rangle$ ($k = 1, 2$) son autoestados del Hamiltoniano H :

$$H|\nu_k\rangle = E_k|\nu_k\rangle \quad , \quad \text{con} \quad E_k = \sqrt{|\mathbf{p}|^2 + m_k^2}$$

Momentum \mathbf{p} común a $|\nu_1\rangle$ y $|\nu_2\rangle$.

- Autoestados de masa a tiempo t :

$$|\nu_k(t)\rangle = e^{-iE_k t} |\nu_k\rangle$$

- Neutrinos de sabor a tiempo t :

$$\begin{aligned} |\nu_e(t)\rangle &= \cos(\theta) e^{-iE_1 t} |\nu_1\rangle + \sin(\theta) e^{-iE_2 t} |\nu_2\rangle \\ |\nu_\mu(t)\rangle &= -\sin(\theta) e^{-iE_1 t} |\nu_1\rangle + \cos(\theta) e^{-iE_2 t} |\nu_2\rangle \end{aligned}$$

- Tomamos $|\mathbf{p}|^2 \gg m_k^2 \Rightarrow E_k \simeq |\mathbf{p}| + \frac{m_k^2}{2|\mathbf{p}|}$ y, con esto,

$$|\nu_e(t)\rangle = e^{-i|\mathbf{p}|t} \left[\cos(\theta) e^{-i\frac{m_1^2 t}{2|\mathbf{p}|}} |\nu_1\rangle + \sin(\theta) e^{-i\frac{m_2^2 t}{2|\mathbf{p}|}} |\nu_2\rangle \right]$$

- El neutrino creado (en $t = 0$) como $|\nu_e\rangle$ se convierte, a tiempo t , en una superposición de $|\nu_e\rangle$ y $|\nu_\mu\rangle$. Como

$$\begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \end{pmatrix} = U^{-1} \begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \end{pmatrix} \Rightarrow \begin{cases} |\nu_1\rangle = \cos(\theta) |\nu_e\rangle - \sin(\theta) |\nu_\mu\rangle \\ |\nu_2\rangle = \sin(\theta) |\nu_e\rangle + \cos(\theta) |\nu_\mu\rangle \end{cases},$$

entonces

- Tomamos $|\mathbf{p}|^2 \gg m_k^2 \Rightarrow E_k \simeq |\mathbf{p}| + \frac{m_k^2}{2|\mathbf{p}|}$ y, con esto,

$$|\nu_e(t)\rangle = \cancel{e^{-i|\mathbf{p}|t}} \left[\cos(\theta) e^{-i\frac{m_1^2 t}{2|\mathbf{p}|}} |\nu_1\rangle + \sin(\theta) e^{-i\frac{m_2^2 t}{2|\mathbf{p}|}} |\nu_2\rangle \right]$$

- El neutrino creado (en $t = 0$) como $|\nu_e\rangle$ se convierte, a tiempo t , en una superposición de $|\nu_e\rangle$ y $|\nu_\mu\rangle$. Como

$$\begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \end{pmatrix} = U^{-1} \begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \end{pmatrix} \Rightarrow \begin{cases} |\nu_1\rangle = \cos(\theta) |\nu_e\rangle - \sin(\theta) |\nu_\mu\rangle \\ |\nu_2\rangle = \sin(\theta) |\nu_e\rangle + \cos(\theta) |\nu_\mu\rangle \end{cases},$$

entonces

- Tomamos $|\mathbf{p}|^2 \gg m_k^2 \Rightarrow E_k \simeq |\mathbf{p}| + \frac{m_k^2}{2|\mathbf{p}|}$ y, con esto,

$$|\nu_e(t)\rangle = \cancel{e^{-i|\mathbf{p}|t}} \left[\cos(\theta) e^{-i\frac{m_1^2 t}{2|\mathbf{p}|}} |\nu_1\rangle + \sin(\theta) e^{-i\frac{m_2^2 t}{2|\mathbf{p}|}} |\nu_2\rangle \right]$$

- El neutrino creado (en $t = 0$) como $|\nu_e\rangle$ se convierte, a tiempo t , en una superposición de $|\nu_e\rangle$ y $|\nu_\mu\rangle$. Como

$$\begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \end{pmatrix} = U^{-1} \begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \end{pmatrix} \Rightarrow \begin{cases} |\nu_1\rangle = \cos(\theta) |\nu_e\rangle - \sin(\theta) |\nu_\mu\rangle \\ |\nu_2\rangle = \sin(\theta) |\nu_e\rangle + \cos(\theta) |\nu_\mu\rangle \end{cases},$$

entonces

$$\begin{aligned} |\nu_e(t)\rangle &= \left[\cos^2(\theta) e^{-i\frac{m_1^2 t}{2|\mathbf{p}|}} + \sin^2(\theta) e^{-i\frac{m_2^2 t}{2|\mathbf{p}|}} \right] |\nu_e\rangle \\ &\quad + \cos(\theta) \sin(\theta) \left[-e^{-i\frac{m_1^2 t}{2|\mathbf{p}|}} + e^{-i\frac{m_2^2 t}{2|\mathbf{p}|}} \right] |\nu_\mu\rangle \end{aligned}$$

- Tomamos $|\mathbf{p}|^2 \gg m_k^2 \Rightarrow E_k \simeq |\mathbf{p}| + \frac{m_k^2}{2|\mathbf{p}|}$ y, con esto,

$$|\nu_e(t)\rangle = \cancel{e^{-i|\mathbf{p}|t}} \left[\cos(\theta) e^{-i\frac{m_1^2 t}{2|\mathbf{p}|}} |\nu_1\rangle + \sin(\theta) e^{-i\frac{m_2^2 t}{2|\mathbf{p}|}} |\nu_2\rangle \right]$$

- El neutrino creado (en $t = 0$) como $|\nu_e\rangle$ se convierte, a tiempo t , en una superposición de $|\nu_e\rangle$ y $|\nu_\mu\rangle$. Como

$$\begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \end{pmatrix} = U^{-1} \begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \end{pmatrix} \Rightarrow \begin{cases} |\nu_1\rangle = \cos(\theta) |\nu_e\rangle - \sin(\theta) |\nu_\mu\rangle \\ |\nu_2\rangle = \sin(\theta) |\nu_e\rangle + \cos(\theta) |\nu_\mu\rangle \end{cases},$$

entonces

$$|\nu_e(t)\rangle = \cos^2(\theta) e^{-i\frac{m_1^2 t}{2|\mathbf{p}|}} |\nu_e\rangle + \sin^2(\theta) e^{-i\frac{m_2^2 t}{2|\mathbf{p}|}} |\nu_e\rangle + \cos(\theta) \sin(\theta) \left[-e^{-i\frac{m_1^2 t}{2|\mathbf{p}|}} |\nu_\mu\rangle + e^{-i\frac{m_2^2 t}{2|\mathbf{p}|}} |\nu_\mu\rangle \right]$$

- Amplitud del proceso $\nu_e \xrightarrow{t} \nu_\mu: \langle \nu_\mu | \nu_e(t) \rangle$

- Aproximamos $L \simeq t$ y $E \simeq |\mathbf{p}|$.

- Probabilidad de cambio de sabor:

$$P_{\nu_e \rightarrow \nu_\mu}(L, E) = |\langle \nu_\mu | \nu_e(t) \rangle|^2 = \sin^2(2\theta) \sin^2\left(\frac{\Delta m^2}{4E} L\right)$$

$$\Delta m^2 \equiv m_2^2 - m_1^2$$

- Probabilidad de supervivencia:

$$P_{\nu_e \rightarrow \nu_e}(L, E) = 1 - P_{\nu_e \rightarrow \nu_\mu}(L)$$

- Amplitud del proceso $\nu_e \xrightarrow{t} \nu_\mu$: $\langle \nu_\mu | \nu_e(t) \rangle$
- Aproximamos $L \simeq t$ y $E \simeq |\mathbf{p}|$.
- Probabilidad de cambio de sabor:

$$P_{\nu_e \rightarrow \nu_\mu}(L, E) = |\langle \nu_\mu | \nu_e(t) \rangle|^2 = \sin^2(2\theta) \sin^2\left(\frac{\Delta m^2}{4E} L\right)$$

$$\Delta m^2 \equiv m_2^2 - m_1^2$$

- Probabilidad de supervivencia:

$$P_{\nu_e \rightarrow \nu_e}(L, E) = 1 - P_{\nu_e \rightarrow \nu_\mu}(L)$$

- Amplitud del proceso $\nu_e \xrightarrow{t} \nu_\mu$: $\langle \nu_\mu | \nu_e(t) \rangle$
- Aproximamos $L \simeq t$ y $E \simeq |\mathbf{p}|$.
- Probabilidad de cambio de sabor:

$$P_{\nu_e \rightarrow \nu_\mu}(L, E) = |\langle \nu_\mu | \nu_e(t) \rangle|^2 = \sin^2(2\theta) \sin^2\left(\frac{\Delta m^2}{4E} L\right)$$

$$\Delta m^2 \equiv m_2^2 - m_1^2$$

- Probabilidad de supervivencia:

$$P_{\nu_e \rightarrow \nu_e}(L, E) = 1 - P_{\nu_e \rightarrow \nu_\mu}(L)$$

- Amplitud del proceso $\nu_e \xrightarrow{t} \nu_\mu$: $\langle \nu_\mu | \nu_e(t) \rangle$
- Aproximamos $L \simeq t$ y $E \simeq |\mathbf{p}|$.
- Probabilidad de cambio de sabor:

$$P_{\nu_e \rightarrow \nu_\mu}(L, E) = |\langle \nu_\mu | \nu_e(t) \rangle|^2 = \sin^2(2\theta) \sin^2\left(\frac{\Delta m^2}{4E} L\right)$$

$$\Delta m^2 \equiv m_2^2 - m_1^2$$

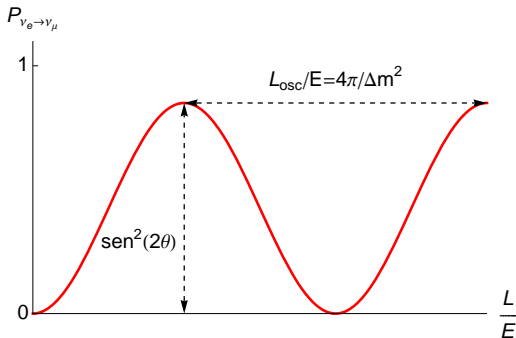
- Probabilidad de supervivencia:

$$P_{\nu_e \rightarrow \nu_e}(L, E) = 1 - P_{\nu_e \rightarrow \nu_\mu}(L)$$

Ahora que conocemos $P_{\nu_e \rightarrow \nu_\mu}$, veamos...

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

1 $P_{\nu_e \rightarrow \nu_\mu}$ oscila con $L/E \Rightarrow$ “oscilaciones de neutrinos”



	θ	Δm^2 [eV ²]
$\nu_e - \nu_\mu$	34°	8×10^{-5}
$\nu_\mu - \nu_\tau$	45°	2.5×10^{-3}

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

- 2 Si $m_1 = m_2 = 0$, entonces $\Delta m^2 = 0$ y $P_{\nu_e \rightarrow \nu_\mu} = 0$.
 \therefore **Detección de cambio de sabor implica que los ν 's son masivos.**
- 3 Si no existe mezcla de neutrinos, entonces $\theta = 0$ y $P_{\nu_e \rightarrow \nu_\mu} = 0$.
 \therefore **Detección de cambio de sabor implica que los ν 's se mezclan.**

Entonces ...

¿Por qué oscilan los neutrinos?

Porque

- son masivos; y
- neutrinos de sabor \neq autoestados de masa

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

- 2 Si $m_1 = m_2 = 0$, entonces $\Delta m^2 = 0$ y $P_{\nu_e \rightarrow \nu_\mu} = 0$.
 \therefore **Detección de cambio de sabor implica que los ν 's son masivos.**
- 3 Si no existe mezcla de neutrinos, entonces $\theta = 0$ y $P_{\nu_e \rightarrow \nu_\mu} = 0$.
 \therefore **Detección de cambio de sabor implica que los ν 's se mezclan.**

Entonces ...

¿Por qué oscilan los neutrinos?

Porque

- son masivos; y
- neutrinos de sabor \neq autoestados de masa

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

- 2 Si $m_1 = m_2 = 0$, entonces $\Delta m^2 = 0$ y $P_{\nu_e \rightarrow \nu_\mu} = 0$.
 \therefore **Detección de cambio de sabor implica que los ν 's son masivos.**
- 3 Si no existe mezcla de neutrinos, entonces $\theta = 0$ y $P_{\nu_e \rightarrow \nu_\mu} = 0$.
 \therefore **Detección de cambio de sabor implica que los ν 's se mezclan.**

Entonces ...

¿Por qué oscilan los neutrinos?

Porque

- son masivos; y
- neutrinos de sabor \neq autoestados de masa

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

- 2 Si $m_1 = m_2 = 0$, entonces $\Delta m^2 = 0$ y $P_{\nu_e \rightarrow \nu_\mu} = 0$.
 \therefore **Detección de cambio de sabor implica que los ν 's son masivos.**
- 3 Si no existe mezcla de neutrinos, entonces $\theta = 0$ y $P_{\nu_e \rightarrow \nu_\mu} = 0$.
 \therefore **Detección de cambio de sabor implica que los ν 's se mezclan.**

Entonces ...

¿Por qué oscilan los neutrinos?

Porque

- son masivos; y
- neutrinos de sabor \neq autoestados de masa

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

- 2 Si $m_1 = m_2 = 0$, entonces $\Delta m^2 = 0$ y $P_{\nu_e \rightarrow \nu_\mu} = 0$.
 \therefore **Detección de cambio de sabor implica que los ν 's son masivos.**
- 3 Si no existe mezcla de neutrinos, entonces $\theta = 0$ y $P_{\nu_e \rightarrow \nu_\mu} = 0$.
 \therefore **Detección de cambio de sabor implica que los ν 's se mezclan.**

Entonces ...

¿Por qué oscilan los neutrinos?

Porque

- **son masivos;** y
- neutrinos de sabor \neq autoestados de masa

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

- 2 Si $m_1 = m_2 = 0$, entonces $\Delta m^2 = 0$ y $P_{\nu_e \rightarrow \nu_\mu} = 0$.
 \therefore **Detección de cambio de sabor implica que los ν 's son masivos.**
- 3 Si no existe mezcla de neutrinos, entonces $\theta = 0$ y $P_{\nu_e \rightarrow \nu_\mu} = 0$.
 \therefore **Detección de cambio de sabor implica que los ν 's se mezclan.**

Entonces ...

¿Por qué oscilan los neutrinos?

Porque

- son masivos; y
- neutrinos de sabor \neq autoestados de masa

4 Dos formas de detectar cambios de sabor:

- ▶ Experimentos de aparición: comienzan con un haz de ν_e (ν_μ) y detectan cuántos ν_μ (ν_e) se encuentran luego de una distancia L
- ▶ Experimentos de desaparición: comienzan con un flujo conocido de ν_e ó ν_μ y observan cómo disminuye después de L

5 Incluyendo factores de \hbar y c :

$$\frac{\Delta m^2}{4E} L = 1.27 \frac{\Delta m^2 [\text{eV}^2]}{E [\text{GeV}]} L [\text{km}]$$

$\sin^2 \left(1.27 \frac{\Delta m^2 [\text{eV}^2] L [\text{km}]}{E [\text{GeV}]} \right)$ apreciable cuando el argumento ~ 1

e.g., un experimento con $L \sim 10^4$ km (diámetro de la Tierra) y $E \sim 1$ GeV es sensible hasta $\Delta m^2 \sim 10^{-4}$ eV².

4 Dos formas de detectar cambios de sabor:

- ▶ **Experimentos de aparición:** comienzan con un haz de ν_e (ν_μ) y detectan cuántos ν_μ (ν_e) se encuentran luego de una distancia L
- ▶ **Experimentos de desaparición:** comienzan con un flujo conocido de ν_e ó ν_μ y observan cómo disminuye después de L

5 Incluyendo factores de \hbar y c :

$$\frac{\Delta m^2}{4E} L = 1.27 \frac{\Delta m^2 [\text{eV}^2]}{E [\text{GeV}]} L [\text{km}]$$

$$\sin^2 \left(1.27 \frac{\Delta m^2 [\text{eV}^2] L [\text{km}]}{E [\text{GeV}]} \right) \text{ apreciable cuando el argumento } \sim 1$$

e.g., un experimento con $L \sim 10^4$ km (diámetro de la Tierra) y $E \sim 1$ GeV es sensible hasta $\Delta m^2 \sim 10^{-4}$ eV².

4 Dos formas de detectar cambios de sabor:

- ▶ **Experimentos de aparición:** comienzan con un haz de ν_e (ν_μ) y detectan cuántos ν_μ (ν_e) se encuentran luego de una distancia L
- ▶ **Experimentos de desaparición:** comienzan con un flujo conocido de ν_e ó ν_μ y observan cómo disminuye después de L

5 Incluyendo factores de \hbar y c :

$$\frac{\Delta m^2}{4E} L = 1.27 \frac{\Delta m^2 [\text{eV}^2]}{E [\text{GeV}]} L [\text{km}]$$

$$\sin^2 \left(1.27 \frac{\Delta m^2 [\text{eV}^2] L [\text{km}]}{E [\text{GeV}]} \right) \text{ apreciable cuando el argumento } \sim 1$$

e.g., un experimento con $L \sim 10^4$ km (diámetro de la Tierra) y $E \sim 1$ GeV es sensible hasta $\Delta m^2 \sim 10^{-4}$ eV².

4 Dos formas de detectar cambios de sabor:

- ▶ **Experimentos de aparición:** comienzan con un haz de ν_e (ν_μ) y detectan cuántos ν_μ (ν_e) se encuentran luego de una distancia L
- ▶ **Experimentos de desaparición:** comienzan con un flujo conocido de ν_e ó ν_μ y observan cómo disminuye después de L

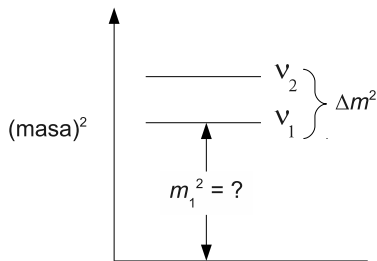
5 Incluyendo factores de \hbar y c :

$$\frac{\Delta m^2}{4E} L = 1.27 \frac{\Delta m^2 [\text{eV}^2]}{E [\text{GeV}]} L [\text{km}]$$

$$\sin^2 \left(1.27 \frac{\Delta m^2 [\text{eV}^2] L [\text{km}]}{E [\text{GeV}]} \right) \text{ apreciable cuando el argumento } \sim 1$$

e.g., un experimento con $L \sim 10^4$ km (diámetro de la Tierra) y $E \sim 1$ GeV es sensible hasta $\Delta m^2 \sim 10^{-4}$ eV².

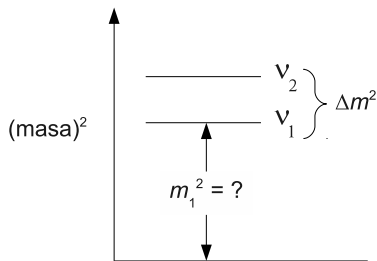
- 6 Las oscilaciones de neutrinos son **sensibles a Δm^2** , no a m^2 .



- 7 El flujo total de neutrinos, i.e., sumado sobre todos los sabores, se **conserva**. De la unitariedad de U ,

$$\sum_{\beta} P_{\nu_{\alpha} \rightarrow \nu_{\beta}} = P_{\nu_e \rightarrow \nu_{\mu}} + P_{\nu_e \rightarrow \nu_e} = P_{\nu_{\mu} \rightarrow \nu_e} + P_{\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{\mu}} = 1.$$

- 6 Las oscilaciones de neutrinos son sensibles a Δm^2 , no a m^2 .



- 7 El flujo total de neutrinos, i.e., sumado sobre todos los sabores, se conserva. De la unitariedad de U ,

$$\sum_{\beta} P_{\nu_{\alpha} \rightarrow \nu_{\beta}} = P_{\nu_e \rightarrow \nu_e} + P_{\nu_e \rightarrow \nu_{\mu}} = P_{\nu_{\mu} \rightarrow \nu_e} + P_{\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{\mu}} = 1.$$

Contenido

- 1 Introducción
- 2 Oscilaciones de dos neutrinos en el vacío
- 3 Evidencia experimental**
 - Neutrinos solares
 - Neutrinos atmosféricos
 - Neutrinos de reactores
 - Neutrinos de aceleradores
- 4 Oscilaciones con tres neutrinos
- 5 Futuro y conclusiones

¿Cómo sabemos que los neutrinos oscilan?

La evidencia de oscilaciones proviene de neutrinos ...

- solares
- atmosféricos
- de reactores ($L \sim 180$ km)
- de aceleradores ($L \sim 250$ km y 735 km)

¿Cómo sabemos que los neutrinos oscilan?

La evidencia de oscilaciones proviene de neutrinos ...

- solares
- atmosféricos
- de reactores ($L \sim 180$ km)
- de aceleradores ($L \sim 250$ km y 735 km)

¿Cómo sabemos que los neutrinos oscilan?

La evidencia de oscilaciones proviene de neutrinos ...

- solares
- atmosféricos
- de reactores ($L \sim 180$ km)
- de aceleradores ($L \sim 250$ km y 735 km)

¿Cómo sabemos que los neutrinos oscilan?

La evidencia de oscilaciones proviene de neutrinos ...

- solares
- atmosféricos
- de reactores ($L \sim 180$ km)
- de aceleradores ($L \sim 250$ km y 735 km)

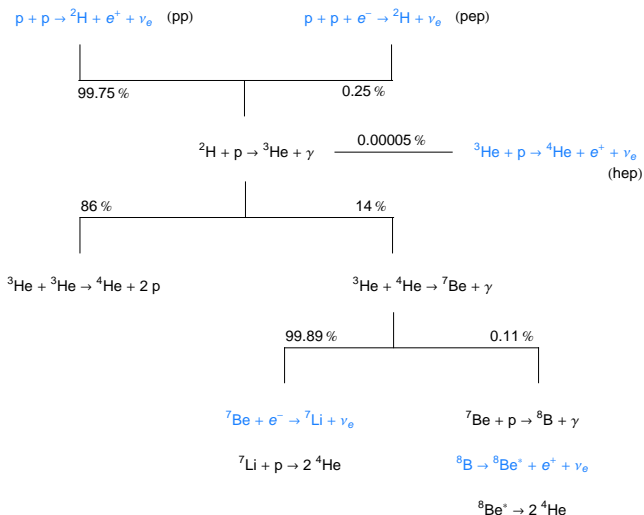
Contenido

- 1 Introducción
- 2 Oscilaciones de dos neutrinos en el vacío
- 3 **Evidencia experimental**
 - **Neutrinos solares**
 - Neutrinos atmosféricos
 - Neutrinos de reactores
 - Neutrinos de aceleradores
- 4 Oscilaciones con tres neutrinos
- 5 Futuro y conclusiones

Neutrinos solares

Los procesos nucleares en el Sol producen **sólo** ν_e .

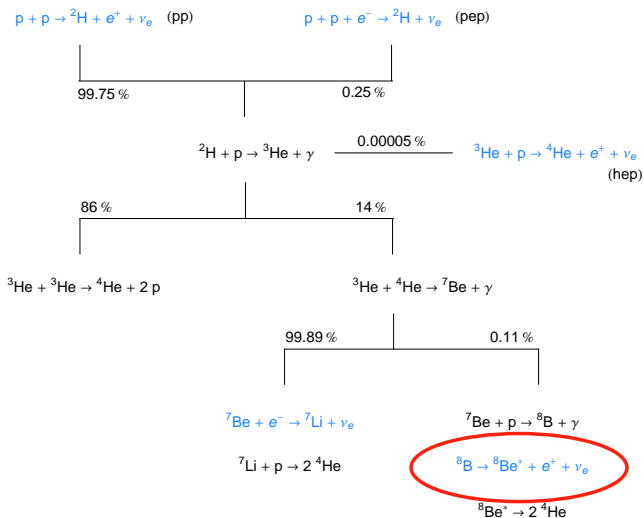
Cadena $p - p$:



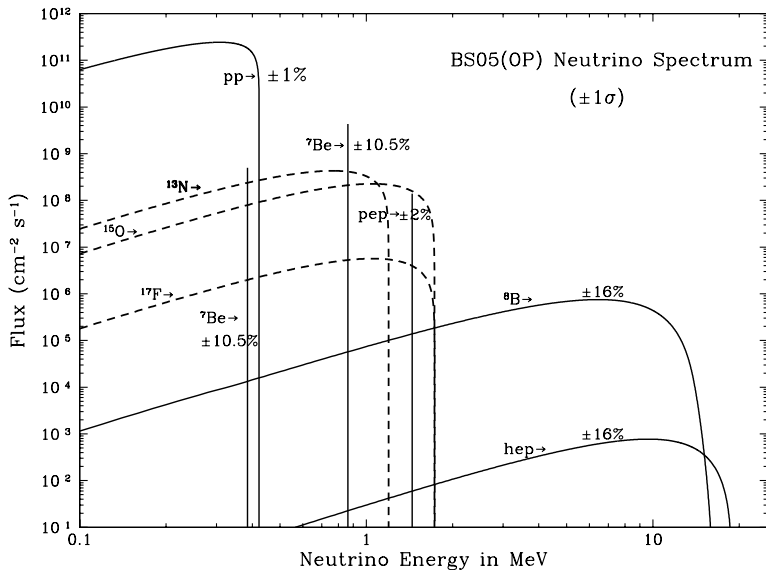
Neutrinos solares

Los procesos nucleares en el Sol producen **sólo** ν_e .

Cadena $p - p$:



Usamos los ν_e 's del ${}^8\text{B}$ porque llegan a energías “altas” ($E \lesssim 15 \text{ MeV}$):

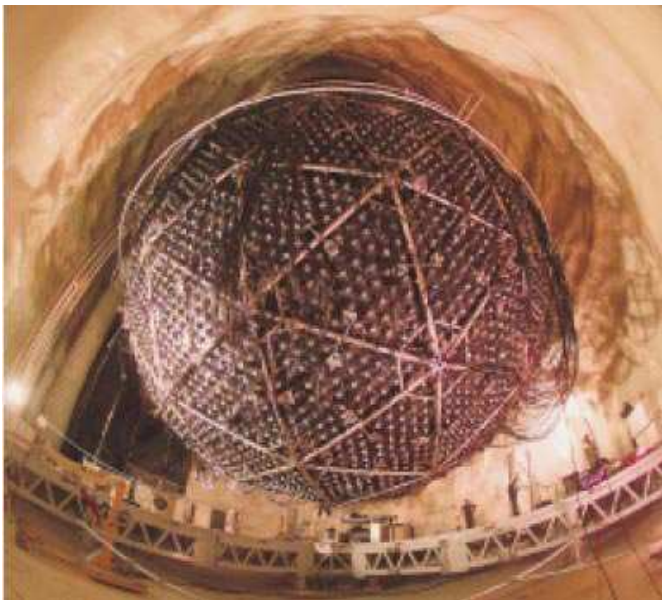


- Homestake y otros experimentos midieron $\sim 1/3$ del flujo de ν_e 's del ^8B predicho por el MES.
- Solución:
2/3 de los ν_e 's se convierten en ν_μ 's al propagarse dentro del Sol
- < 2001: experimentos medían sólo el flujo de ν_e .
- 2001: Sudbury Neutrino Observatory (SNO) midió los flujos $\phi(\nu_e)$ y $\phi(\nu_{\mu,\tau})$ por separado.

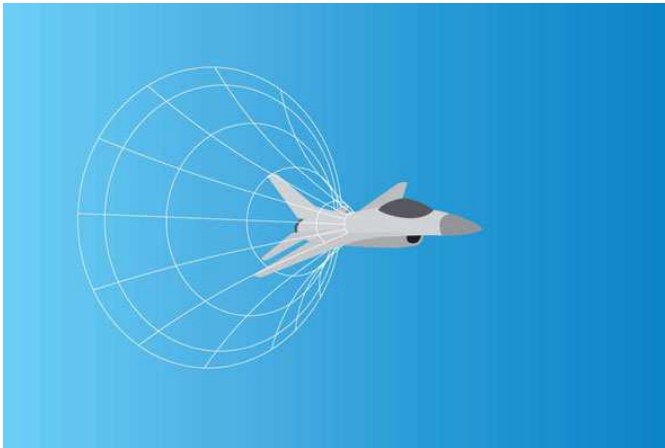
- Homestake y otros experimentos midieron $\sim 1/3$ del flujo de ν_e 's del ^8B predicho por el MES.
- Solución:
2/3 de los ν_e 's se convierten en ν_μ 's al propagarse dentro del Sol
- < 2001: experimentos medían sólo el flujo de ν_e .
- 2001: Sudbury Neutrino Observatory (SNO) midió los flujos $\phi(\nu_e)$ y $\phi(\nu_{\mu,\tau})$ por separado.

- Homestake y otros experimentos midieron $\sim 1/3$ del flujo de ν_e 's del ^8B predicho por el MES.
- Solución:
2/3 de los ν_e 's se convierten en ν_μ 's al propagarse dentro del Sol
- < 2001: experimentos medían sólo el flujo de ν_e .
- 2001: Sudbury Neutrino Observatory (SNO) midió los flujos $\phi(\nu_e)$ y $\phi(\nu_{\mu,\tau})$ por separado.

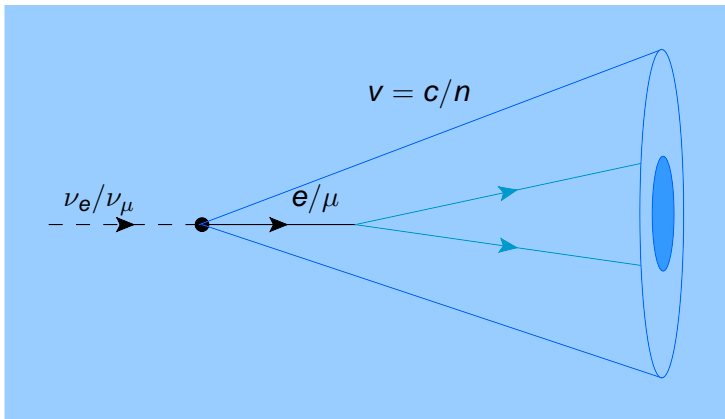
- Homestake y otros experimentos midieron $\sim 1/3$ del flujo de ν_e 's del ^8B predicho por el MES.
- Solución:
2/3 de los ν_e 's se convierten en ν_μ 's al propagarse dentro del Sol
- < 2001: experimentos medían sólo el flujo de ν_e .
- 2001: Sudbury Neutrino Observatory (SNO) midió los flujos $\phi(\nu_e)$ y $\phi(\nu_{\mu,\tau})$ por separado.



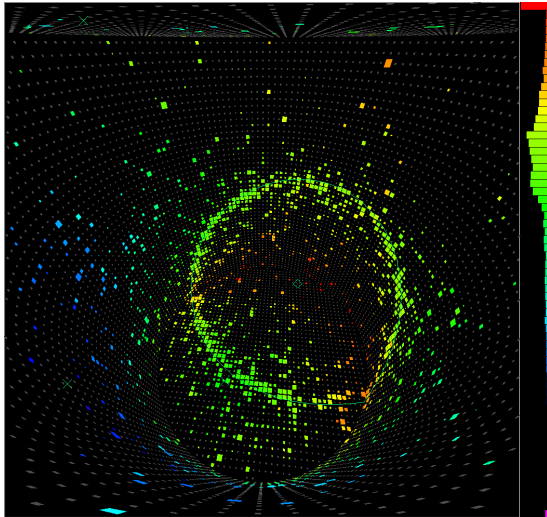
Radiación Čerenkov de neutrinos



Radiación Čerenkov de neutrinos



Radiación Čerenkov de neutrinos



- SNO detectaba neutrinos a través de tres reacciones:

- ▶ $\nu_e + d \rightarrow e^- + p + p$

(sólo ν_e)

↳ mide $\phi(\nu_e)$

- ▶ $\nu + d \rightarrow \nu + p + n$

(todos los sabores, con igual sección eficaz)

↳ mide $\phi(\nu_e) + \phi(\nu_{\mu,\tau})$

- ▶ $\nu + e^- \rightarrow \nu + e^-$

(con $\sigma(\nu_{\mu,\tau}e \rightarrow \nu_{\mu,\tau}e) \simeq \sigma(\nu_e e \rightarrow \nu_e e) / 6.5$)

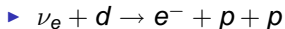
↳ mide $\phi(\nu_e) + \phi(\nu_{\mu,\tau}) / 6.5$

- Con esto, SNO encontró

$$\frac{\phi(\nu_e)}{\phi(\nu_e) + \phi(\nu_{\mu,\tau})} = 0.340 \pm 0.023(\text{stat})_{-0.031}^{+0.029}(\text{syst})$$

- Por lo tanto, $\phi(\nu_{\mu,\tau}) \neq 0$.

- SNO detectaba neutrinos a través de tres reacciones:



(sólo ν_e)

↳ mide $\phi(\nu_e)$



(todos los sabores, con igual sección eficaz)

↳ mide $\phi(\nu_e) + \phi(\nu_{\mu,\tau})$



(con $\sigma(\nu_{\mu,\tau}e \rightarrow \nu_{\mu,\tau}e) \simeq \sigma(\nu_e e \rightarrow \nu_e e) / 6.5$)

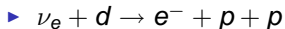
↳ mide $\phi(\nu_e) + \phi(\nu_{\mu,\tau}) / 6.5$

- Con esto, SNO encontró

$$\frac{\phi(\nu_e)}{\phi(\nu_e) + \phi(\nu_{\mu,\tau})} = 0.340 \pm 0.023(\text{stat})_{-0.031}^{+0.029}(\text{syst})$$

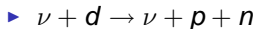
- Por lo tanto, $\phi(\nu_{\mu,\tau}) \neq 0$.

- SNO detectaba neutrinos a través de tres reacciones:



(sólo ν_e)

↳ mide $\phi(\nu_e)$



(todos los sabores, con igual sección eficaz)

↳ mide $\phi(\nu_e) + \phi(\nu_{\mu,\tau})$



(con $\sigma(\nu_{\mu,\tau}e \rightarrow \nu_{\mu,\tau}e) \simeq \sigma(\nu_e e \rightarrow \nu_e e) / 6.5$)

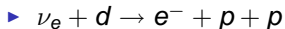
↳ mide $\phi(\nu_e) + \phi(\nu_{\mu,\tau}) / 6.5$

- Con esto, SNO encontró

$$\frac{\phi(\nu_e)}{\phi(\nu_e) + \phi(\nu_{\mu,\tau})} = 0.340 \pm 0.023(\text{stat})_{-0.031}^{+0.029}(\text{syst})$$

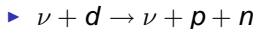
- Por lo tanto, $\phi(\nu_{\mu,\tau}) \neq 0$.

- SNO detectaba neutrinos a través de tres reacciones:



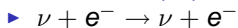
(sólo ν_e)

↳ mide $\phi(\nu_e)$



(todos los sabores, con igual sección eficaz)

↳ mide $\phi(\nu_e) + \phi(\nu_{\mu,\tau})$



(con $\sigma(\nu_{\mu,\tau}e \rightarrow \nu_{\mu,\tau}e) \simeq \sigma(\nu_e e \rightarrow \nu_e e) / 6.5$)

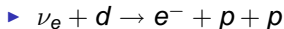
↳ mide $\phi(\nu_e) + \phi(\nu_{\mu,\tau}) / 6.5$

- Con esto, SNO encontró

$$\frac{\phi(\nu_e)}{\phi(\nu_e) + \phi(\nu_{\mu,\tau})} = 0.340 \pm 0.023(\text{stat})_{-0.031}^{+0.029}(\text{syst})$$

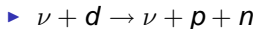
- Por lo tanto, $\phi(\nu_{\mu,\tau}) \neq 0$.

- SNO detectaba neutrinos a través de tres reacciones:



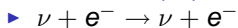
(sólo ν_e)

↳ mide $\phi(\nu_e)$



(todos los sabores, con igual sección eficaz)

↳ mide $\phi(\nu_e) + \phi(\nu_{\mu,\tau})$



(con $\sigma(\nu_{\mu,\tau}e \rightarrow \nu_{\mu,\tau}e) \simeq \sigma(\nu_e e \rightarrow \nu_e e) / 6.5$)

↳ mide $\phi(\nu_e) + \phi(\nu_{\mu,\tau}) / 6.5$

- Con esto, SNO encontró

$$\frac{\phi(\nu_e)}{\phi(\nu_e) + \phi(\nu_{\mu,\tau})} = 0.340 \pm 0.023(\text{stat})_{-0.031}^{+0.029}(\text{syst})$$

- Por lo tanto, $\phi(\nu_{\mu,\tau}) \neq 0$.

- SNO detectaba neutrinos a través de tres reacciones:

- ▶ $\nu_e + d \rightarrow e^- + p + p$

(sólo ν_e)

↳ mide $\phi(\nu_e)$

- ▶ $\nu + d \rightarrow \nu + p + n$

(todos los sabores, con igual sección eficaz)

↳ mide $\phi(\nu_e) + \phi(\nu_{\mu,\tau})$

- ▶ $\nu + e^- \rightarrow \nu + e^-$

(con $\sigma(\nu_{\mu,\tau}e \rightarrow \nu_{\mu,\tau}e) \simeq \sigma(\nu_e e \rightarrow \nu_e e) / 6.5$)

↳ mide $\phi(\nu_e) + \phi(\nu_{\mu,\tau}) / 6.5$

- Con esto, SNO encontró

$$\frac{\phi(\nu_e)}{\phi(\nu_e) + \phi(\nu_{\mu,\tau})} = 0.340 \pm 0.023(\text{stat})_{-0.031}^{+0.029}(\text{syst})$$

- Por lo tanto, $\phi(\nu_{\mu,\tau}) \neq 0$.

- En oscilaciones de ν 's solares, intervienen principalmente ν_e y ν_μ .
- Se puede usar la aproximación de dos familias.
- En esta aproximación, se encontró que

$$\theta_{\text{sol}} \approx 34.4^\circ, \quad \Delta m_{\text{sol}}^2 \approx 7.59 \times 10^{-5} \text{ eV}^2$$

- En oscilaciones de ν 's solares, intervienen principalmente ν_e y ν_μ .
- Se puede usar la aproximación de dos familias.
- En esta aproximación, se encontró que

$$\theta_{\text{sol}} \approx 34.4^\circ, \quad \Delta m_{\text{sol}}^2 \approx 7.59 \times 10^{-5} \text{ eV}^2$$

- En oscilaciones de ν 's solares, intervienen principalmente ν_e y ν_μ .
- Se puede usar la aproximación de dos familias.
- En esta aproximación, se encontró que

$$\theta_{\text{sol}} \approx 34.4^\circ, \quad \Delta m_{\text{sol}}^2 \approx 7.59 \times 10^{-5} \text{ eV}^2$$

Contenido

- 1 Introducción
- 2 Oscilaciones de dos neutrinos en el vacío
- 3 **Evidencia experimental**
 - Neutrinos solares
 - **Neutrinos atmosféricos**
 - Neutrinos de reactores
 - Neutrinos de aceleradores
- 4 Oscilaciones con tres neutrinos
- 5 Futuro y conclusiones

Neutrinos atmosféricos

- Producidos en la atmósfera terrestre por interacción de rayos cósmicos.
- Detectados en detectores Čerenkov subterráneos.
- Energía: GeV–TeV

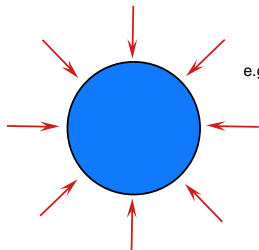
Neutrinos atmosféricos

- Producidos en la atmósfera terrestre por interacción de rayos cósmicos.
- Detectados en detectores Čerenkov subterráneos.
- Energía: GeV–TeV

Neutrinos atmosféricos

- Producidos en la atmósfera terrestre por interacción de rayos cósmicos.
- Detectados en detectores Čerenkov subterráneos.
- Energía: GeV–TeV

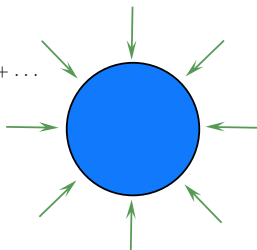
flujo isotrópico de rayos cósmicos



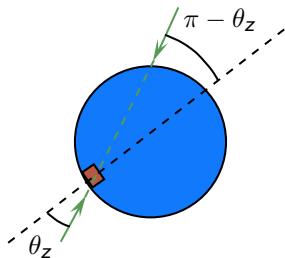
e.g., $p + p \rightarrow 2\pi^+ + \dots \rightarrow 2\mu^+ + 2\nu_\mu + \dots$



flujo isotrópico de ν_μ 's



Super-Kamiokande (SK), en Japón, midió la variación del flujo de ν_μ 's atmosféricos con el ángulo de cénit, θ_z .



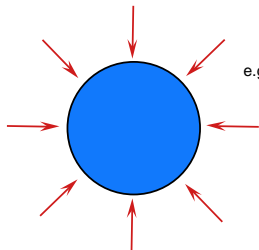
Ingenuamente, se pensaba que

$$\phi_{\nu_\mu}(\pi - \theta_z) = \phi_{\nu_\mu}(\theta_z)$$

Pero SK encontró que

$$\phi_{\nu_\mu}(\pi - \theta_z) \approx \frac{1}{2} \phi_{\nu_\mu}(\theta_z)$$

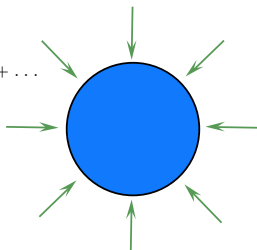
flujo isotrópico de rayos cósmicos



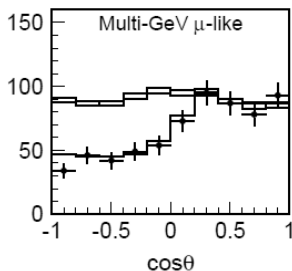
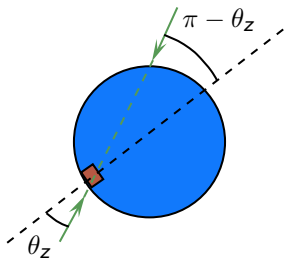
e.g., $p + p \rightarrow 2\pi^+ + \dots \rightarrow 2\mu^+ + 2\nu_\mu + \dots$



flujo isotrópico de ν_μ 's



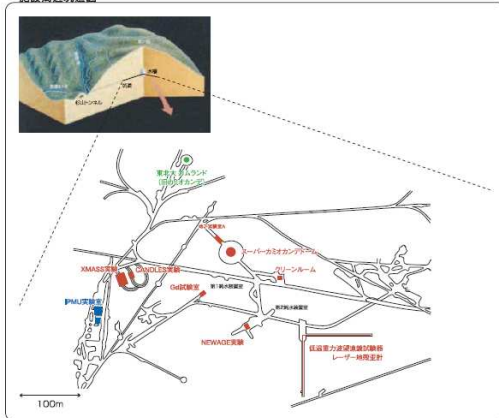
Super-Kamiokande (SK), en Japón, midió la variación del flujo de ν_μ 's atmosféricos con el ángulo de cénit, θ_z .



Super-Kamiokande (1996 –):

- En el Observatorio Kamioka (mina Mozumi), Japón.
- Ubicado a 1 km de profundidad, para evitar contaminación de rayos cósmicos.
- Detector:
 - ▶ Tanque de acero cilíndrico: 41.4 m de alto, 39.3 m de ancho
 - ▶ 50 000 ton de agua ultra-pura
 - ▶ 11 146 PMTs

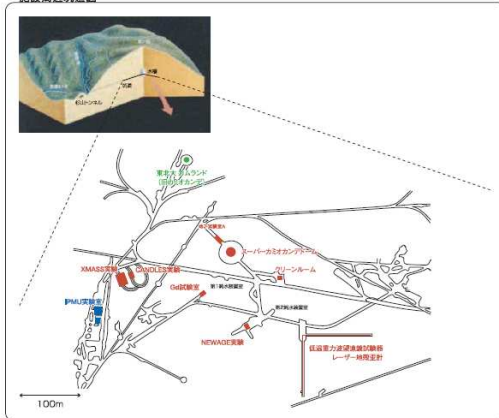
施設周辺坑道図



Super-Kamiokande (1996 –):

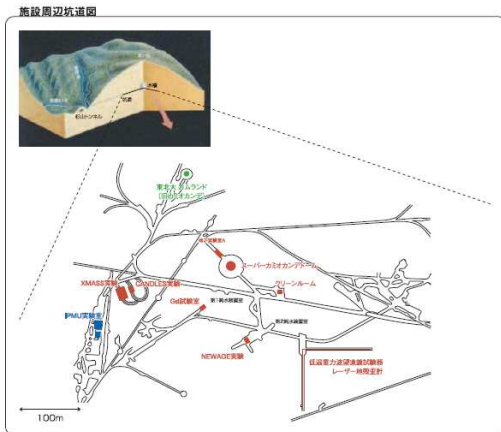
- En el Observatorio Kamioka (mina Mozumi), Japón.
- Ubicado a 1 km de profundidad, para evitar contaminación de rayos cósmicos.
- Detector:
 - ▶ Tanque de acero cilíndrico: 41.4 m de alto, 39.3 m de ancho
 - ▶ 50 000 ton de agua ultra-pura
 - ▶ 11 146 PMTs

施設周辺坑道図



Super-Kamiokande (1996 –):

- En el Observatorio Kamioka (mina Mozumi), Japón.
- Ubicado a 1 km de profundidad, para evitar contaminación de rayos cósmicos.
- Detector:
 - ▶ Tanque de acero cilíndrico: 41.4 m de alto, 39.3 m de ancho
 - ▶ 50 000 ton de agua ultra-pura
 - ▶ 11 146 PMTs





¿Por qué $\phi_{\nu_\mu}(\pi - \theta_z) = \frac{1}{2}\phi_{\nu_\mu}(\theta_z)$?

Los ν_μ 's que vienen “desde arriba” (θ_z) atraviesan la atmósfera (~ 10 km).

Los ν_μ 's que vienen “desde abajo” ($\pi - \theta_z$) atraviesan la atmósfera y el diámetro de la Tierra ($\sim 10^4$ km).

Entonces,

si los ν_μ 's están oscilando a otro sabor, aquellos que atraviesan la Tierra tienen más tiempo para hacerlo

\therefore (flujo desde abajo) < (flujo desde arriba)

- En oscilaciones de ν 's atmosféricos, intervienen principalmente ν_μ y ν_τ .
- Aquí también se puede usar la aproximación de dos familias.
- Se encontró que

$$\theta_{\text{atm}} \approx 42.8^\circ, \quad |\Delta m_{\text{atm}}^2| \approx 2.4 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$$

- En oscilaciones de ν 's atmosféricos, intervienen principalmente ν_μ y ν_τ .
- Aquí también se puede usar la aproximación de dos familias.
- Se encontró que

$$\theta_{\text{atm}} \approx 42.8^\circ, \quad |\Delta m_{\text{atm}}^2| \approx 2.4 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$$

- En oscilaciones de ν 's atmosféricos, intervienen principalmente ν_μ y ν_τ .
- Aquí también se puede usar la aproximación de dos familias.
- Se encontró que

$$\theta_{\text{atm}} \approx 42.8^\circ, \quad |\Delta m_{\text{atm}}^2| \approx 2.4 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$$

Contenido

- 1 Introducción
- 2 Oscilaciones de dos neutrinos en el vacío
- 3 **Evidencia experimental**
 - Neutrinos solares
 - Neutrinos atmosféricos
 - **Neutrinos de reactores**
 - Neutrinos de aceleradores
- 4 Oscilaciones con tres neutrinos
- 5 Futuro y conclusiones

Neutrinos de reactores

- Los reactores nucleares producen $\bar{\nu}_e$'s en los decaimientos de productos de fisión.
- Energía: \sim MeV
- Dependiendo del experimento, se estudiaron ...
 - ▶ "oscilaciones atmosféricas" (CHOOZ, Palo Verde): experimentos *short-baseline*, sensibles a θ_{atm} , Δm_{atm}^2
 - ▶ "oscilaciones solares" (KamLAND, Borexino): *long-baseline*, sensibles a θ_{sol} , Δm_{sol}^2
- Confirmaron los experimentos realizados con ν 's solares y atmosféricos.

Neutrinos de reactores

- Los reactores nucleares producen $\bar{\nu}_e$'s en los decaimientos de productos de fisión.
- Energía: \sim MeV
- Dependiendo del experimento, se estudiaron ...
 - ▶ "oscilaciones atmosféricas" (CHOOZ, Palo Verde): experimentos *short-baseline*, sensibles a θ_{atm} , Δm_{atm}^2
 - ▶ "oscilaciones solares" (KamLAND, Borexino): *long-baseline*, sensibles a θ_{sol} , Δm_{sol}^2
- Confirmaron los experimentos realizados con ν 's solares y atmosféricos.

Neutrinos de reactores

- Los reactores nucleares producen $\bar{\nu}_e$'s en los decaimientos de productos de fisión.
- Energía: \sim MeV
- Dependiendo del experimento, se estudiaron ...
 - ▶ "oscilaciones atmosféricas" (CHOOZ, Palo Verde): experimentos *short-baseline*, sensibles a θ_{atm} , Δm_{atm}^2
 - ▶ "oscilaciones solares" (KamLAND, Borexino): *long-baseline*, sensibles a θ_{sol} , Δm_{sol}^2
- Confirmaron los experimentos realizados con ν 's solares y atmosféricos.

Neutrinos de reactores

- Los reactores nucleares producen $\bar{\nu}_e$'s en los decaimientos de productos de fisión.
- Energía: \sim MeV
- Dependiendo del experimento, se estudiaron ...
 - ▶ "oscilaciones atmosféricas" (CHOOZ, Palo Verde): experimentos *short-baseline*, sensibles a θ_{atm} , Δm_{atm}^2
 - ▶ "oscilaciones solares" (KamLAND, Borexino): *long-baseline*, sensibles a θ_{sol} , Δm_{sol}^2
- Confirmaron los experimentos realizados con ν 's solares y atmosféricos.

Neutrinos de reactores

- Los reactores nucleares producen $\bar{\nu}_e$'s en los decaimientos de productos de fisión.
- Energía: \sim MeV
- Dependiendo del experimento, se estudiaron ...
 - ▶ "oscilaciones atmosféricas" (CHOOZ, Palo Verde): experimentos *short-baseline*, sensibles a θ_{atm} , Δm_{atm}^2
 - ▶ "oscilaciones solares" (KamLAND, Borexino): *long-baseline*, sensibles a θ_{sol} , Δm_{sol}^2
- Confirmaron los experimentos realizados con ν 's solares y atmosféricos.

Neutrinos de reactores

- Los reactores nucleares producen $\bar{\nu}_e$'s en los decaimientos de productos de fisión.
- Energía: \sim MeV
- Dependiendo del experimento, se estudiaron ...
 - ▶ "oscilaciones atmosféricas" (CHOOZ, Palo Verde): experimentos *short-baseline*, sensibles a θ_{atm} , Δm_{atm}^2
 - ▶ "oscilaciones solares" (KamLAND, Borexino): *long-baseline*, sensibles a θ_{sol} , Δm_{sol}^2
- Confirmaron los experimentos realizados con ν 's solares y atmosféricos.

CHOOZ

Palo Verde

No vieron evidencia de oscilaciones de $\bar{\nu}_e$'s

Excluyeron la oscilación $\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_x$ con $\Delta m_{\text{atm}}^2 \sim 10^{-3} \text{ eV}^2$

Asumiendo que se conserva CPT, también excluyeron $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ en SK

CHOOZ

Palo Verde

No vieron evidencia de oscilaciones de $\bar{\nu}_e$'s

Excluyeron la oscilación $\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_x$ con $\Delta m_{\text{atm}}^2 \sim 10^{-3} \text{ eV}^2$

Asumiendo que se conserva CPT, también excluyeron $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ en SK

CHOOZ

Palo Verde

No vieron evidencia de oscilaciones de $\bar{\nu}_e$'s

Excluyeron la oscilación $\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_x$ con $\Delta m_{\text{atm}}^2 \sim 10^{-3} \text{ eV}^2$

Asumiendo que se conserva CPT, también excluyeron $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ en SK

CHOOZ

- Ardennes, Francia
- A 1050 m de los dos reactores Chooz
- Bajo 100 m de roca
- 5 ton de centelleador líquido dopado con Gd

Palo Verde

No vieron evidencia de oscilaciones de $\bar{\nu}_e$'s

Excluyeron la oscilación $\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_x$ con $\Delta m_{\text{atm}}^2 \sim 10^{-3} \text{ eV}^2$

Asumiendo que se conserva CPT, también excluyeron $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ en SK

CHOOZ

- Ardennes, Francia
- A 1050 m de los dos reactores
Chooz
- Bajo 100 m de roca
- 5 ton de centelleador líquido
dopado con Gd

Palo Verde

No vieron evidencia de oscilaciones de $\bar{\nu}_e$'s

Excluyeron la oscilación $\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_x$ con $\Delta m_{\text{atm}}^2 \sim 10^{-3} \text{ eV}^2$

Asumiendo que se conserva CPT, también excluyeron $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ en SK

CHOOZ

- Ardennes, Francia
- A 1050 m de los dos reactores Chooz
- Bajo 100 m de roca
- 5 ton de centelleador líquido dopado con Gd

Palo Verde

No vieron evidencia de oscilaciones de $\bar{\nu}_e$'s

Excluyeron la oscilación $\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_x$ con $\Delta m_{\text{atm}}^2 \sim 10^{-3} \text{ eV}^2$

Asumiendo que se conserva CPT, también excluyeron $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ en SK

CHOOZ

- Ardennes, Francia
- A 1050 m de los dos reactores

Chooz

- Bajo 100 m de roca
- 5 ton de centelleador líquido dopado con Gd

Palo Verde

No vieron evidencia de oscilaciones de $\bar{\nu}_e$'s

Excluyeron la oscilación $\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_x$ con $\Delta m_{\text{atm}}^2 \sim 10^{-3} \text{ eV}^2$

Asumiendo que se conserva CPT, también excluyeron $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ en SK

CHOOZ

- Ardennes, Francia
- A 1050 m de los dos reactores
- Chooz
- Bajo 100 m de roca
- 5 ton de centelleador líquido dopado con Gd

Palo Verde

No vieron evidencia de oscilaciones de $\bar{\nu}_e$'s

Excluyeron la oscilación $\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_x$ con $\Delta m_{\text{atm}}^2 \sim 10^{-3} \text{ eV}^2$

Asumiendo que se conserva CPT, también excluyeron $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ en SK

CHOOZ

- Ardennes, Francia
 - A 1050 m de los dos reactores
- Chooz
- Bajo 100 m de roca
 - 5 ton de centelleador líquido dopado con Gd

Palo Verde

No vieron evidencia de oscilaciones de $\bar{\nu}_e$'s

Excluyeron la oscilación $\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_x$ con $\Delta m_{\text{atm}}^2 \sim 10^{-3} \text{ eV}^2$

Asumiendo que se conserva CPT, también excluyeron $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ en SK

CHOOZ



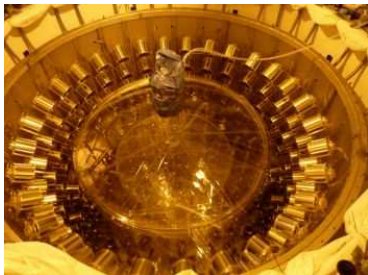
Palo Verde

No vieron evidencia de oscilaciones de $\bar{\nu}_e$'s

Excluyeron la oscilación $\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_x$ con $\Delta m_{\text{atm}}^2 \sim 10^{-3} \text{ eV}^2$

Asumiendo que se conserva CPT, también excluyeron $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ en SK

CHOOZ



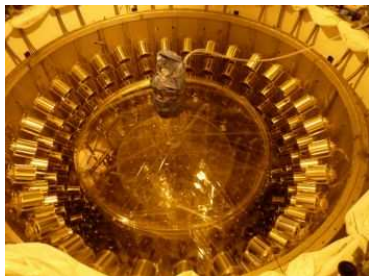
Palo Verde

No vieron evidencia de oscilaciones de $\bar{\nu}_e$'s

Excluyeron la oscilación $\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_x$ con $\Delta m_{\text{atm}}^2 \sim 10^{-3} \text{ eV}^2$

Asumiendo que se conserva CPT, también excluyeron $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ en SK

CHOOZ



Palo Verde

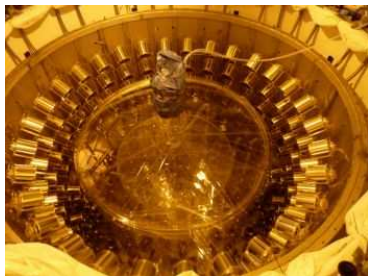
- Desierto de Arizona, EE.UU.
- A 750-890 m de tres reactores de agua presurizada
- Bajo 12 m de roca
- Centelleador líquido dopado con Gd

No vieron evidencia de oscilaciones de $\bar{\nu}_e$'s

Excluyeron la oscilación $\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_x$ con $\Delta m_{\text{atm}}^2 \sim 10^{-3} \text{ eV}^2$

Asumiendo que se conserva CPT, también excluyeron $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ en SK

CHOOZ



Palo Verde

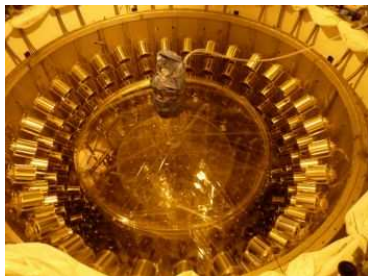
- Desierto de Arizona, EE.UU.
- A 750-890 m de tres reactores de agua presurizada
- Bajo 12 m de roca
- Centelleador líquido dopado con Gd

No vieron evidencia de oscilaciones de $\bar{\nu}_e$'s

Excluyeron la oscilación $\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_x$ con $\Delta m_{\text{atm}}^2 \sim 10^{-3} \text{ eV}^2$

Asumiendo que se conserva CPT, también excluyeron $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ en SK

CHOOZ



Palo Verde

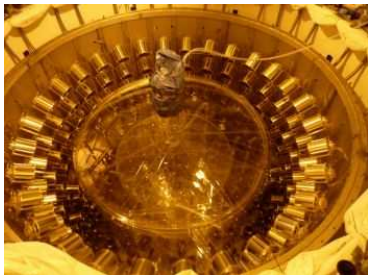
- Desierto de Arizona, EE.UU.
- A 750-890 m de tres reactores de agua presurizada
- Bajo 12 m de roca
- Centelleador líquido dopado con Gd

No vieron evidencia de oscilaciones de $\bar{\nu}_e$'s

Excluyeron la oscilación $\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_x$ con $\Delta m_{\text{atm}}^2 \sim 10^{-3} \text{ eV}^2$

Asumiendo que se conserva CPT, también excluyeron $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ en SK

CHOOZ



Palo Verde

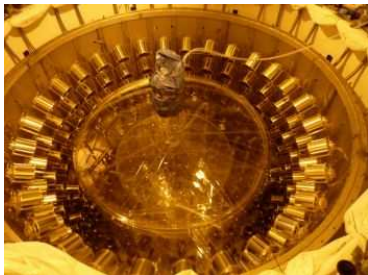


No vieron evidencia de oscilaciones de $\bar{\nu}_e$'s

Excluyeron la oscilación $\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_x$ con $\Delta m_{\text{atm}}^2 \sim 10^{-3} \text{ eV}^2$

Asumiendo que se conserva CPT, también excluyeron $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ en SK

CHOOZ



Palo Verde

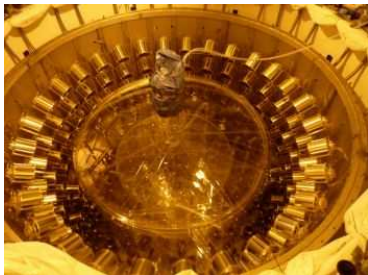


No vieron evidencia de oscilaciones de $\bar{\nu}_e$'s

Excluyeron la oscilación $\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_x$ con $\Delta m_{\text{atm}}^2 \sim 10^{-3} \text{ eV}^2$

Asumiendo que se conserva CPT, también excluyeron $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ en SK

CHOOZ



Palo Verde

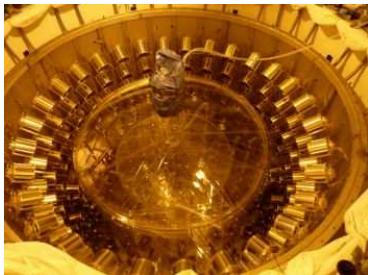


No vieron evidencia de oscilaciones de $\bar{\nu}_e$'s

Excluyeron la oscilación $\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_x$ con $\Delta m_{\text{atm}}^2 \sim 10^{-3} \text{ eV}^2$

Asumiendo que se conserva CPT, también excluyeron $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ en SK

CHOOZ



Palo Verde

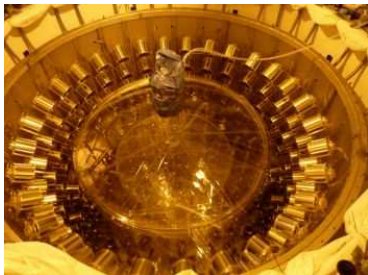


No vieron evidencia de oscilaciones de $\bar{\nu}_e$'s

Excluyeron la oscilación $\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_x$ con $\Delta m_{\text{atm}}^2 \sim 10^{-3} \text{ eV}^2$

Asumiendo que se conserva CPT, también excluyeron $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ en SK

CHOOZ



Palo Verde



No vieron evidencia de oscilaciones de $\bar{\nu}_e$'s

Excluyeron la oscilación $\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_x$ con $\Delta m_{\text{atm}}^2 \sim 10^{-3} \text{ eV}^2$

Asumiendo que se conserva CPT, también excluyeron $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ en SK

KamLAND:

- En el Observatorio Kamioka.
- Rodeado de 53 reactores.
- $\langle L \rangle = 180$ km
- 1 kton de centelleador líquido.
- 1900 PMTs
- Observó desaparición de $\bar{\nu}_e$.

Resultados consistentes con

$$\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_\mu \text{ con } \theta_{\text{atm}} \text{ y } \Delta m_{\text{atm}}^2.$$

KamLAND:

- En el Observatorio Kamioka.
- Rodeado de 53 reactores.
- $\langle L \rangle = 180$ km
- 1 kton de centelleador líquido.
- 1900 PMTs
- Observó desaparición de $\bar{\nu}_e$.

Resultados consistentes con

$\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_\mu$ con θ_{atm} y Δm_{atm}^2 .

KamLAND:

- En el Observatorio Kamioka.
- Rodeado de 53 reactores.
- $\langle L \rangle = 180$ km
- 1 kton de centelleador líquido.
- 1900 PMTs
- Observó desaparición de $\bar{\nu}_e$.

Resultados consistentes con

$$\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_\mu \text{ con } \theta_{\text{atm}} \text{ y } \Delta m_{\text{atm}}^2.$$



KamLAND:

- En el Observatorio Kamioka.
- Rodeado de 53 reactores.
- $\langle L \rangle = 180$ km
- 1 kton de centelleador líquido.
- 1900 PMTs
- Observó desaparición de $\bar{\nu}_e$.

Resultados consistentes con

$$\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_\mu \text{ con } \theta_{\text{atm}} \text{ y } \Delta m_{\text{atm}}^2.$$



KamLAND:

- En el Observatorio Kamioka.
- Rodeado de 53 reactores.
- $\langle L \rangle = 180$ km
- 1 kton de centelleador líquido.
- 1900 PMTs
- Observó desaparición de $\bar{\nu}_e$.

Resultados consistentes con

$$\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_\mu \text{ con } \theta_{\text{atm}} \text{ y } \Delta m_{\text{atm}}^2.$$

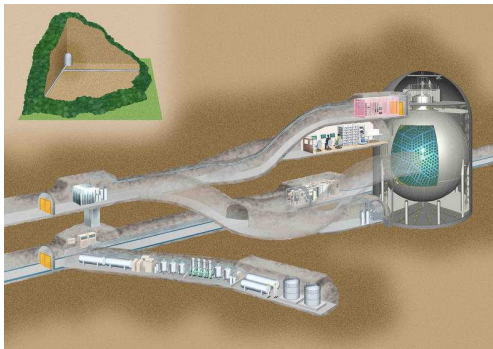


KamLAND:

- En el Observatorio Kamioka.
- Rodeado de 53 reactores.
- $\langle L \rangle = 180$ km
- 1 kton de centelleador líquido.
- 1900 PMTs
- Observó desaparición de $\bar{\nu}_e$.

Resultados consistentes con

$\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_\mu$ con θ_{atm} y Δm_{atm}^2 .

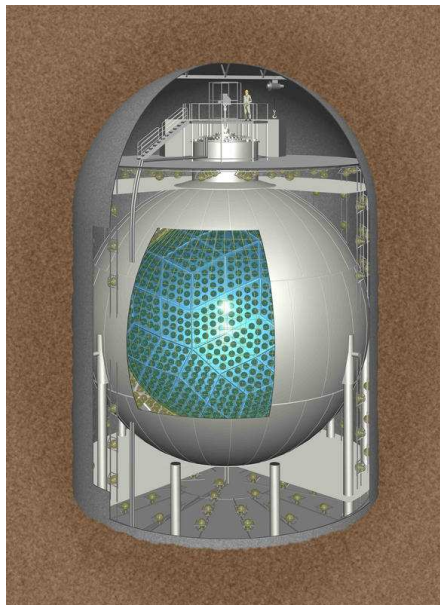


KamLAND:

- En el Observatorio Kamioka.
- Rodeado de 53 reactores.
- $\langle L \rangle = 180 \text{ km}$
- 1 kton de centelleador líquido.
- 1900 PMTs
- Observó desaparición de $\bar{\nu}_e$.

Resultados consistentes con

$\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_\mu$ con θ_{atm} y Δm_{atm}^2 .



KamLAND:

- En el Observatorio Kamioka.
- Rodeado de 53 reactores.
- $\langle L \rangle = 180$ km
- 1 kton de centelleador líquido.
- 1900 PMTs
- Observó desaparición de $\bar{\nu}_e$.

Resultados consistentes con

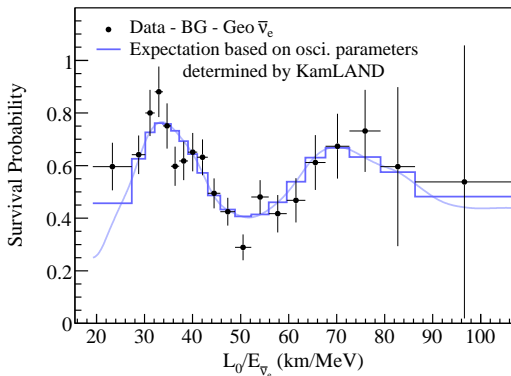
$\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_\mu$ con θ_{atm} y Δm_{atm}^2 .



KamLAND:

- En el Observatorio Kamioka.
- Rodeado de 53 reactores.
- $\langle L \rangle = 180$ km
- 1 kton de centelleador líquido.
- 1900 PMTs
- Observó desaparición de $\bar{\nu}_e$.

Resultados consistentes con
 $\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_\mu$ con θ_{atm} y Δm_{atm}^2 .

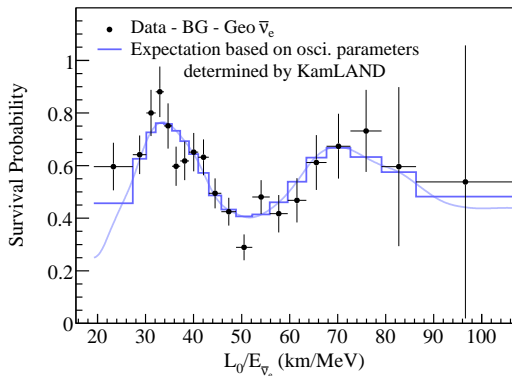


KamLAND:

- En el Observatorio Kamioka.
- Rodeado de 53 reactores.
- $\langle L \rangle = 180$ km
- 1 kton de centelleador líquido.
- 1900 PMTs
- Observó desaparición de $\bar{\nu}_e$.

Resultados consistentes con

$\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_\mu$ con θ_{atm} y Δm_{atm}^2 .



Contenido

- 1 Introducción
- 2 Oscilaciones de dos neutrinos en el vacío
- 3 Evidencia experimental**
 - Neutrinos solares
 - Neutrinos atmosféricos
 - Neutrinos de reactores
 - Neutrinos de aceleradores**
- 4 Oscilaciones con tres neutrinos
- 5 Futuro y conclusiones

Neutrinos de aceleradores

- Los aceleradores emiten ν_μ 's.
- Los experimentos miden el mismo efecto de desaparición que en SK: son sensibles a θ_{atm} y Δm_{atm}^2 .
- e.g., K2K y MINOS
- Energía: ~ 15 GeV
- Cada experimento cuenta con dos detectores:
Detector cercano: ubicado a ~ 1 km del acelerador
Detector lejano: a 250 km (K2K) ó 735 km (MINOS)

Neutrinos de aceleradores

- Los aceleradores emiten ν_μ 's.
- Los experimentos miden el mismo efecto de desaparición que en SK: son sensibles a θ_{atm} y Δm_{atm}^2 .
- e.g., K2K y MINOS
- Energía: ~ 15 GeV
- Cada experimento cuenta con dos detectores:
Detector cercano: ubicado a ~ 1 km del acelerador
Detector lejano: a 250 km (K2K) ó 735 km (MINOS)

Neutrinos de aceleradores

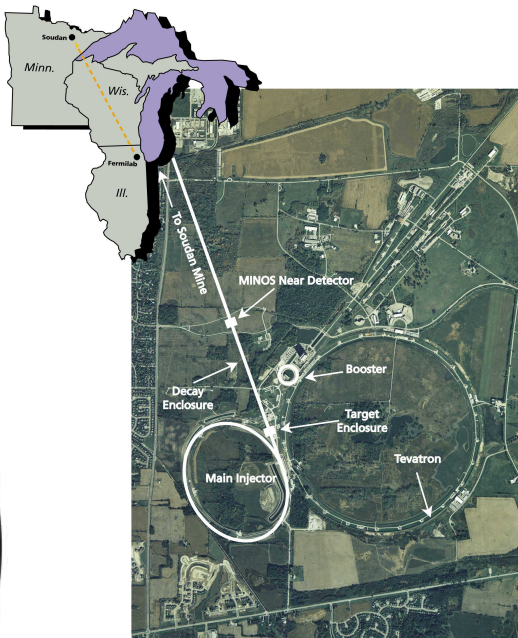
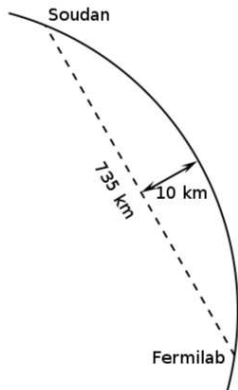
- Los aceleradores emiten ν_μ 's.
- Los experimentos miden el mismo efecto de desaparición que en SK: son sensibles a θ_{atm} y Δm_{atm}^2 .
- e.g., K2K y MINOS
- Energía: ~ 15 GeV
- Cada experimento cuenta con dos detectores:
Detector cercano: ubicado a ~ 1 km del acelerador
Detector lejano: a 250 km (K2K) ó 735 km (MINOS)

Neutrinos de aceleradores

- Los aceleradores emiten ν_μ 's.
- Los experimentos miden el mismo efecto de desaparición que en SK: son sensibles a θ_{atm} y Δm_{atm}^2 .
- e.g., K2K y MINOS
- Energía: ~ 15 GeV
- Cada experimento cuenta con dos detectores:
Detector cercano: ubicado a ~ 1 km del acelerador
Detector lejano: a 250 km (K2K) ó 735 km (MINOS)

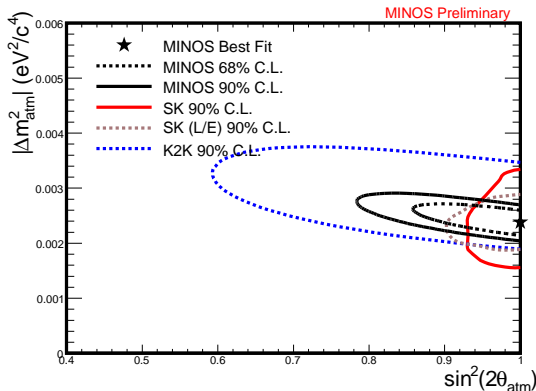
Neutrinos de aceleradores

- Los aceleradores emiten ν_μ 's.
- Los experimentos miden el mismo efecto de desaparición que en SK: son sensibles a θ_{atm} y Δm_{atm}^2 .
- e.g., K2K y MINOS
- Energía: ~ 15 GeV
- Cada experimento cuenta con dos detectores:
Detector cercano: ubicado a ~ 1 km del acelerador
Detector lejano: a 250 km (K2K) ó 735 km (MINOS)

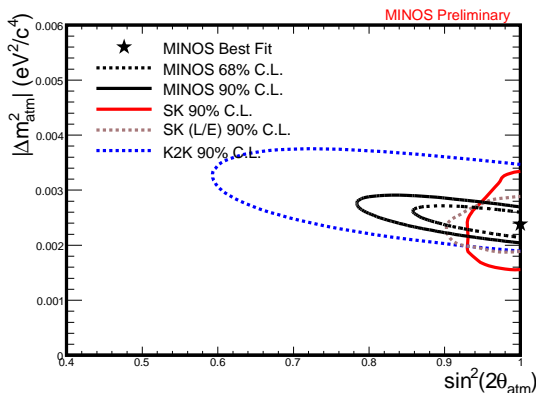


FERMILAB #98-1321D

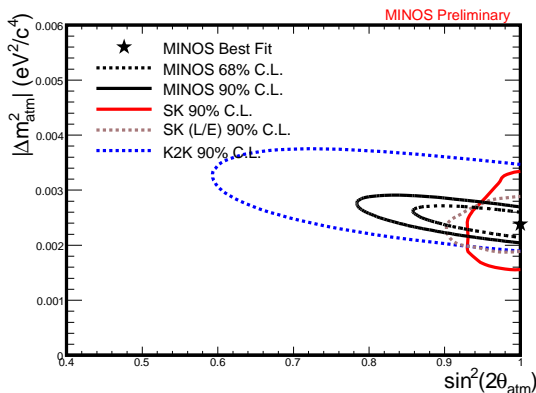
- El detector lejano de MINOS observó **215** ν_μ en lugar de los **336 ± 14.4** esperados si no existiese oscilación.
- El espectro está distorsionado de una manera consistente con la existencia de oscilaciones.
- Combinando datos de SK, K2K y MINOS, se encuentran las regiones de confianza de $\sin^2(2\theta_{\text{atm}})$ y $|\Delta m_{\text{atm}}^2|$.



- El detector lejano de MINOS observó **215** ν_μ en lugar de los **336 ± 14.4** esperados si no existiese oscilación.
- El espectro está distorsionado de una manera consistente con la existencia de oscilaciones.
- Combinando datos de SK, K2K y MINOS, se encuentran las regiones de confianza de $\sin^2(2\theta_{\text{atm}})$ y $|\Delta m_{\text{atm}}^2|$.



- El detector lejano de MINOS observó $215 \nu_\mu$ en lugar de los 336 ± 14.4 esperados si no existiese oscilación.
- El espectro está distorsionado de una manera consistente con la existencia de oscilaciones.
- Combinando datos de SK, K2K y MINOS, se encuentran las regiones de confianza de $\sin^2(2\theta_{\text{atm}})$ y $|\Delta m_{\text{atm}}^2|$.



Contenido

- 1 Introducción
- 2 Oscilaciones de dos neutrinos en el vacío
- 3 Evidencia experimental
 - Neutrinos solares
 - Neutrinos atmosféricos
 - Neutrinos de reactores
 - Neutrinos de aceleradores
- 4 Oscilaciones con tres neutrinos**
- 5 Futuro y conclusiones

- Existen tres familias de leptones:

cargados	neutros
e	ν_e
μ	ν_μ
τ	ν_τ

- Para describir las oscilaciones de los tres neutrinos, necesitaremos tres autoestados de masa: ν_1 , ν_2 , ν_3 .
- Bases conectadas por una rotación U :

$$|\nu_\alpha\rangle = \sum_k U_{\alpha k}^* |\nu_k\rangle$$

- U es ahora 3×3 y compleja, parametrizada por:

$$\theta_{12}, \theta_{13}, \theta_{23}, \delta$$

- Si $\delta \neq 0$, entonces $P_{\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta} \neq P_{\bar{\nu}_\alpha \rightarrow \bar{\nu}_\beta}$.

- Existen tres familias de leptones:

cargados	neutros
e	ν_e
μ	ν_μ
τ	ν_τ

- Para describir las oscilaciones de los tres neutrinos, necesitaremos tres autoestados de masa: ν_1 , ν_2 , ν_3 .
- Bases conectadas por una rotación U :

$$|\nu_\alpha\rangle = \sum_k U_{\alpha k}^* |\nu_k\rangle$$

- U es ahora 3×3 y compleja, parametrizada por:

$$\theta_{12}, \theta_{13}, \theta_{23},$$

$$\delta$$

- Si $\delta \neq 0$, entonces $P_{\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta} \neq P_{\bar{\nu}_\alpha \rightarrow \bar{\nu}_\beta}$.

- Existen tres familias de leptones:

cargados	neutros
e	ν_e
μ	ν_μ
τ	ν_τ

- Para describir las oscilaciones de los tres neutrinos, necesitaremos tres autoestados de masa: ν_1, ν_2, ν_3 .
- Bases conectadas por una rotación U :

$$|\nu_\alpha\rangle = \sum_k U_{\alpha k}^* |\nu_k\rangle$$

- U es ahora 3×3 y compleja, parametrizada por:

$$\theta_{12}, \theta_{13}, \theta_{23}, \delta$$

- Si $\delta \neq 0$, entonces $P_{\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta} \neq P_{\bar{\nu}_\alpha \rightarrow \bar{\nu}_\beta}$.

- Existen tres familias de leptones:

cargados	neutros
e	ν_e
μ	ν_μ
τ	ν_τ

- Para describir las oscilaciones de los tres neutrinos, necesitaremos tres autoestados de masa: ν_1 , ν_2 , ν_3 .
- Bases conectadas por una rotación U :

$$|\nu_\alpha\rangle = \sum_k U_{\alpha k}^* |\nu_k\rangle$$

- U es ahora 3×3 y compleja, parametrizada por:

$$\theta_{12}, \theta_{13}, \theta_{23}, \delta$$

- Si $\delta \neq 0$, entonces $P_{\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta} \neq P_{\bar{\nu}_\alpha \rightarrow \bar{\nu}_\beta}$.

- Existen tres familias de leptones:

cargados	neutros
e	ν_e
μ	ν_μ
τ	ν_τ

- Para describir las oscilaciones de los tres neutrinos, necesitaremos tres autoestados de masa: ν_1 , ν_2 , ν_3 .
- Bases conectadas por una rotación U :

$$|\nu_\alpha\rangle = \sum_k U_{\alpha k}^* |\nu_k\rangle$$

- U es ahora 3×3 y compleja, parametrizada por:

$$\theta_{12}, \theta_{13}, \theta_{23}, \delta$$

- Si $\delta \neq 0$, entonces $P_{\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta} \neq P_{\bar{\nu}_\alpha \rightarrow \bar{\nu}_\beta}$.

- Existen tres familias de leptones:

cargados	neutros
e	ν_e
μ	ν_μ
τ	ν_τ

- Para describir las oscilaciones de los **tres** neutrinos, necesitaremos **tres** autoestados de masa: ν_1 , ν_2 , ν_3 .
- Bases conectadas por una rotación U :

$$|\nu_\alpha\rangle = \sum_k U_{\alpha k}^* |\nu_k\rangle$$

- U es ahora 3×3 y compleja, parametrizada por:
 - tres ángulos de mezcla: θ_{12} , θ_{23} , θ_{13}
 - una fase de violación CP: δ
- Si $\delta \neq 0$, entonces $P_{\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta} \neq P_{\bar{\nu}_\alpha \rightarrow \bar{\nu}_\beta}$.

- Existen tres familias de leptones:

cargados	neutros
e	ν_e
μ	ν_μ
τ	ν_τ

- Para describir las oscilaciones de los tres neutrinos, necesitaremos tres autoestados de masa: ν_1 , ν_2 , ν_3 .
- Bases conectadas por una rotación U :

$$|\nu_\alpha\rangle = \sum_k U_{\alpha k}^* |\nu_k\rangle$$

- U es ahora 3×3 y compleja, parametrizada por:
 - tres ángulos de mezcla: θ_{12} , θ_{23} , θ_{13}
 - una fase de violación CP: δ
- Si $\delta \neq 0$, entonces $P_{\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta} \neq P_{\bar{\nu}_\alpha \rightarrow \bar{\nu}_\beta}$.

- Existen tres familias de leptones:

cargados	neutros
e	ν_e
μ	ν_μ
τ	ν_τ

- Para describir las oscilaciones de los **tres** neutrinos, necesitaremos **tres** autoestados de masa: ν_1 , ν_2 , ν_3 .
- Bases conectadas por una rotación U :

$$|\nu_\alpha\rangle = \sum_k U_{\alpha k}^* |\nu_k\rangle$$

- U es ahora 3×3 y compleja, parametrizada por:
 - tres ángulos de mezcla: θ_{12} , θ_{23} , θ_{13}
 - una fase de violación CP: δ
- Si $\delta \neq 0$, entonces $P_{\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta} \neq P_{\bar{\nu}_\alpha \rightarrow \bar{\nu}_\beta}$.

- Existen tres familias de leptones:

cargados	neutros
e	ν_e
μ	ν_μ
τ	ν_τ

- Para describir las oscilaciones de los **tres** neutrinos, necesitaremos **tres** autoestados de masa: ν_1 , ν_2 , ν_3 .
- Bases conectadas por una rotación U :

$$|\nu_\alpha\rangle = \sum_k U_{\alpha k}^* |\nu_k\rangle$$

- U es ahora 3×3 y compleja, parametrizada por:
 - ▶ **tres ángulos de mezcla:** θ_{12} , θ_{23} , θ_{13}
 - ▶ una fase de violación CP: δ
- Si $\delta \neq 0$, entonces $P_{\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta} \neq P_{\bar{\nu}_\alpha \rightarrow \bar{\nu}_\beta}$.

- Existen tres familias de leptones:

cargados	neutros
e	ν_e
μ	ν_μ
τ	ν_τ

- Para describir las oscilaciones de los **tres** neutrinos, necesitaremos **tres** autoestados de masa: ν_1 , ν_2 , ν_3 .
- Bases conectadas por una rotación U :

$$|\nu_\alpha\rangle = \sum_k U_{\alpha k}^* |\nu_k\rangle$$

- U es ahora 3×3 y compleja, parametrizada por:
 - ▶ **tres ángulos de mezcla:** θ_{12} , θ_{23} , θ_{13}
 - ▶ **una fase de violación CP:** δ
- Si $\delta \neq 0$, entonces $P_{\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta} \neq P_{\bar{\nu}_\alpha \rightarrow \bar{\nu}_\beta}$.

- Existen tres familias de leptones:

cargados	neutros
e	ν_e
μ	ν_μ
τ	ν_τ

- Para describir las oscilaciones de los tres neutrinos, necesitaremos tres autoestados de masa: ν_1 , ν_2 , ν_3 .
- Bases conectadas por una rotación U :

$$|\nu_\alpha\rangle = \sum_k U_{\alpha k}^* |\nu_k\rangle$$

- U es ahora 3×3 y compleja, parametrizada por:
 - tres ángulos de mezcla: θ_{12} , θ_{23} , θ_{13}
 - una fase de violación CP: δ
- Si $\delta \neq 0$, entonces $P_{\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta} \neq P_{\bar{\nu}_\alpha \rightarrow \bar{\nu}_\beta}$.

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

$$\begin{aligned}
 U &= \begin{array}{c} \text{Atmosféricos} \\ \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{bmatrix} \end{array} \times \begin{array}{c} \text{Cruzados} \\ \begin{bmatrix} c_{13} & 0 & s_{13}e^{-i\delta} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13}e^{i\delta} & 0 & c_{13} \end{bmatrix} \end{array} \\
 &\times \begin{array}{c} \text{Solares} \\ \begin{bmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{array} \times \begin{array}{c} \text{Fases de violación} \\ \text{CP Majorana} \\ \begin{bmatrix} e^{i\alpha_1/2} & 0 & 0 \\ 0 & e^{i\alpha_2/2} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{array} \\
 &\quad c_{ij} \equiv \cos(\theta_{ij}) \quad , \quad s_{ij} \equiv \sin(\theta_{ij})
 \end{aligned}$$

$$U = \begin{array}{c} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{array} \begin{array}{ccc} \nu_1 & \nu_2 & \nu_3 \\ \begin{pmatrix} c_{12}c_{13} & s_{12}c_{13} & s_{13}e^{-i\delta} \\ -s_{12}c_{23} - c_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta} & c_{12}c_{23} - s_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta} & s_{23}c_{13} \\ -s_{12}s_{23} - c_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta} & -c_{12}s_{23} - s_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta} & c_{23}c_{13} \end{pmatrix} \end{array}$$

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

$$U = \begin{array}{c} \text{Atmosféricos} \\ \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{bmatrix} \end{array} \times \begin{array}{c} \text{Cruzados} \\ \begin{bmatrix} c_{13} & 0 & s_{13}e^{-i\delta} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13}e^{i\delta} & 0 & c_{13} \end{bmatrix} \end{array}$$

$$\begin{array}{c} \text{Solares} \\ \times \begin{bmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{array}$$

$$c_{ij} \equiv \cos(\theta_{ij}) \quad , \quad s_{ij} \equiv \sin(\theta_{ij})$$

$$U = \begin{array}{c} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{array} \begin{array}{ccc} \nu_1 & \nu_2 & \nu_3 \\ \begin{pmatrix} c_{12}c_{13} & s_{12}c_{13} & s_{13}e^{-i\delta} \\ -s_{12}c_{23} - c_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta} & c_{12}c_{23} - s_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta} & s_{23}c_{13} \\ -s_{12}s_{23} - c_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta} & -c_{12}s_{23} - s_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta} & c_{23}c_{13} \end{pmatrix} \end{array}$$

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

$$U = \begin{array}{c} \text{Atmosféricos} \\ \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{bmatrix} \end{array} \times \begin{array}{c} \text{Cruzados} \\ \begin{bmatrix} c_{13} & 0 & s_{13}e^{-i\delta} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13}e^{i\delta} & 0 & c_{13} \end{bmatrix} \end{array}$$

$$\begin{array}{c} \text{Solares} \\ \times \begin{bmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{array}$$

$$c_{ij} \equiv \cos(\theta_{ij}) \quad , \quad s_{ij} \equiv \sin(\theta_{ij})$$

$$U = \begin{array}{c} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{array} \begin{array}{ccc} \nu_1 & \nu_2 & \nu_3 \\ \begin{pmatrix} c_{12}c_{13} & s_{12}c_{13} & s_{13}e^{-i\delta} \\ -s_{12}c_{23} - c_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta} & c_{12}c_{23} - s_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta} & s_{23}c_{13} \\ -s_{12}s_{23} - c_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta} & -c_{12}s_{23} - s_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta} & c_{23}c_{13} \end{pmatrix} \end{array}$$

Procedemos como antes y hallamos la probabilidad de oscilación $\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta$ ($\alpha, \beta = e, \mu, \tau$):

$$P_{\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta}(L, E) = \delta_{\alpha\beta} - 4 \sum_{i>j} \text{Re} \left(U_{\alpha i}^* U_{\beta i} U_{\alpha j} U_{\beta j}^* \right) \sin^2 \left[\frac{\Delta m_{ij}^2 L}{4E} \right] + 2 \sum_{i>j} \text{Im} \left(U_{\alpha i}^* U_{\beta i} U_{\alpha j} U_{\beta j}^* \right) \sin \left[\frac{\Delta m_{ij}^2 L}{2E} \right]$$

$i > j$ se cumple para $(i, j) = (2, 1), (3, 1)$ y $(3, 2)$

Ahora existen **tres** diferencias de masas: Δm_{21}^2 , Δm_{31}^2 y Δm_{32}^2

Sólo dos son independientes, e.g., $\Delta m_{32} = \Delta m_{31}^2 - \Delta m_{21}^2$.

(más sobre esto...) ►

Procedemos como antes y hallamos la probabilidad de oscilación $\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta$ ($\alpha, \beta = e, \mu, \tau$):

$$P_{\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta}(L, E) = \delta_{\alpha\beta} - 4 \sum_{i>j} \text{Re} \left(U_{\alpha i}^* U_{\beta i} U_{\alpha j} U_{\beta j}^* \right) \sin^2 \left[\frac{\Delta m_{ij}^2 L}{4E} \right] + 2 \sum_{i>j} \text{Im} \left(U_{\alpha i}^* U_{\beta i} U_{\alpha j} U_{\beta j}^* \right) \sin \left[\frac{\Delta m_{ij}^2 L}{2E} \right]$$

$i > j$ se cumple para $(i, j) = (2, 1), (3, 1)$ y $(3, 2)$

Ahora existen tres diferencias de masas: Δm_{21}^2 , Δm_{31}^2 y Δm_{32}^2

Sólo dos son independientes, e.g., $\Delta m_{32} = \Delta m_{31}^2 - \Delta m_{21}^2$.

(más sobre esto...) ►

Procedemos como antes y hallamos la probabilidad de oscilación

$\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta$ ($\alpha, \beta = e, \mu, \tau$):

$$P_{\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta}(L, E) = \delta_{\alpha\beta}$$

$$\begin{aligned}
 & - 4 \sum_{i>j} \text{Re} \left(U_{\alpha i}^* U_{\beta i} U_{\alpha j} U_{\beta j}^* \right) \sin^2 \left[\frac{\Delta m_{ij}^2}{4E} L \right] \\
 & + 2 \underbrace{\sum_{i>j} \text{Im} \left(U_{\alpha i}^* U_{\beta i} U_{\alpha j} U_{\beta j}^* \right) \sin \left[\frac{\Delta m_{ij}^2}{2E} L \right]}_{\neq 0 \text{ sólo si } \delta \neq 0}
 \end{aligned}$$

$i > j$ se cumple para $(i, j) = (2, 1), (3, 1)$ y $(3, 2)$

Ahora existen tres diferencias de masas: Δm_{21}^2 , Δm_{31}^2 y Δm_{32}^2

Sólo dos son independientes, e.g., $\Delta m_{32}^2 = \Delta m_{31}^2 - \Delta m_{21}^2$.

(más sobre esto...) ►

- Combinando los resultados de varios experimentos, se encontró que

$$\theta_{13} = 5.6^{+6.9}_{-5.6}^{\circ}$$

- Como θ_{13} es pequeño, se pueden hacer las identificaciones

$$\theta_{12} = \theta_{\text{sol}} = 34.4^{+3.2}_{-2.9}^{\circ}$$

$$\theta_{23} = \theta_{\text{atm}} = 42.8^{+10.7}_{-7.3}^{\circ}$$

$$\Delta m_{21}^2 = \Delta m_{\text{sol}}^2 = 7.59^{+0.61}_{-0.69} \times 10^{-5} \text{eV}^2$$

$$\Delta m_{31}^2 = \Delta m_{\text{atm}}^2 = \begin{cases} (+2.46 \pm 0.37) \times 10^{-3} \text{eV}^2, & \text{si } m_3 > m_1 \\ (-2.36 \pm 0.37) \times 10^{-3} \text{eV}^2, & \text{si } m_3 < m_1 \end{cases}$$

- No hay valor experimental para la fase de violación CP δ .

- Combinando los resultados de varios experimentos, se encontró que

$$\theta_{13} = 5.6^{+6.9}_{-5.6}^{\circ}$$

- Como θ_{13} es pequeño, se pueden hacer las identificaciones

$$\theta_{12} = \theta_{\text{sol}} = 34.4^{+3.2}_{-2.9}^{\circ}$$

$$\theta_{23} = \theta_{\text{atm}} = 42.8^{+10.7}_{-7.3}^{\circ}$$

$$\Delta m_{21}^2 = \Delta m_{\text{sol}}^2 = 7.59^{+0.61}_{-0.69} \times 10^{-5} \text{eV}^2$$

$$\Delta m_{31}^2 = \Delta m_{\text{atm}}^2 = \begin{cases} (+2.46 \pm 0.37) \times 10^{-3} \text{eV}^2, & \text{si } m_3 > m_1 \\ (-2.36 \pm 0.37) \times 10^{-3} \text{eV}^2, & \text{si } m_3 < m_1 \end{cases}$$

- No hay valor experimental para la fase de violación CP δ .

- Combinando los resultados de varios experimentos, se encontró que

$$\theta_{13} = 5.6^{+6.9}_{-5.6}^{\circ}$$

- Como θ_{13} es pequeño, se pueden hacer las identificaciones

$$\theta_{12} = \theta_{\text{sol}} = 34.4^{+3.2}_{-2.9}^{\circ}$$

$$\theta_{23} = \theta_{\text{atm}} = 42.8^{+10.7}_{-7.3}^{\circ}$$

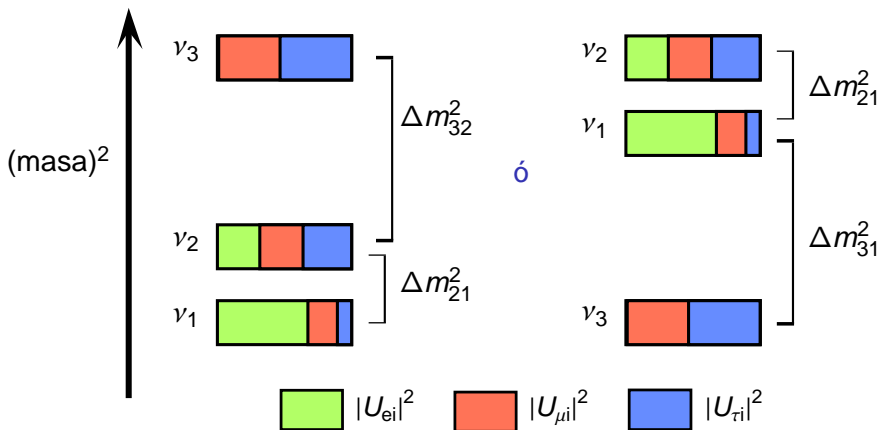
$$\Delta m_{21}^2 = \Delta m_{\text{sol}}^2 = 7.59^{+0.61}_{-0.69} \times 10^{-5} \text{eV}^2$$

$$\Delta m_{31}^2 = \Delta m_{\text{atm}}^2 = \begin{cases} (+2.46 \pm 0.37) \times 10^{-3} \text{eV}^2, & \text{si } m_3 > m_1 \\ (-2.36 \pm 0.37) \times 10^{-3} \text{eV}^2, & \text{si } m_3 < m_1 \end{cases}$$

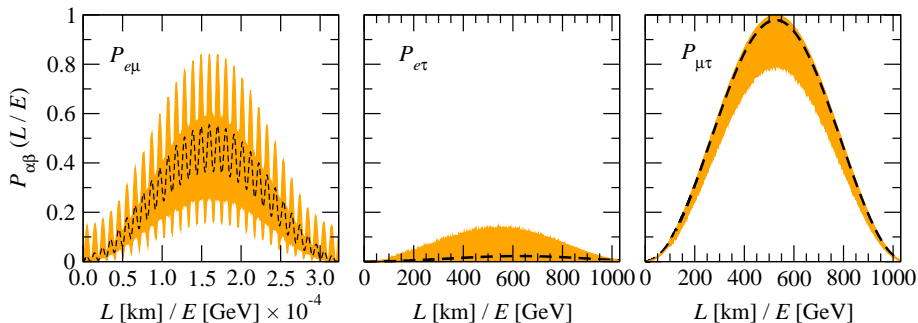
- No hay valor experimental para la fase de violación CP δ .

Evaluando los θ_{ij} en sus valores centrales (con $\delta = 0$):

$$\left(|U_{\alpha i}|^2\right) = \begin{matrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{matrix} \begin{pmatrix} \nu_1 & \nu_2 & \nu_3 \\ 0.67 & 0.32 & 0.01 \\ 0.22 & 0.32 & 0.46 \\ 0.11 & 0.36 & 0.53 \end{pmatrix}$$



Asumiendo $m_3 > m_1$ y $\delta = 0$:



Transformaciones C, P, T, CP y CPT

$$\begin{aligned}
 P_{\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta}(L, E) &= \delta_{\alpha\beta} \\
 &- 4 \sum_{i>j} \text{Re}(U_{\alpha i}^* U_{\beta i} U_{\alpha j} U_{\beta j}^*) \sin^2 \left[\frac{\Delta m_{ij}^2}{4E} L \right] \\
 &+ 2 \sum_{i>j} \text{Im}(U_{\alpha i}^* U_{\beta i} U_{\alpha j} U_{\beta j}^*) \sin \left[\frac{\Delta m_{ij}^2}{2E} L \right]
 \end{aligned}$$

● Transformación bajo ...

- ▶ ... **CP**: $\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta \xrightarrow{\text{CP}} \bar{\nu}_\alpha \rightarrow \bar{\nu}_\beta$
- ▶ ... **T**: $\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta \xrightarrow{\text{T}} \nu_\beta \rightarrow \nu_\alpha$
- ▶ ... **CPT**: $\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta \xrightarrow{\text{CPT}} \bar{\nu}_\beta \rightarrow \bar{\nu}_\alpha$

- Si se conserva CPT, entonces $P_{\bar{\nu}_\alpha \rightarrow \bar{\nu}_\beta} = P_{\nu_\beta \rightarrow \nu_\alpha}$.
- De la expresión para la probabilidad, $P_{\nu_\beta \rightarrow \nu_\alpha}(U) = P_{\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta}(U^*)$.
- Entonces, **asumiendo que CPT se conserva**,

$$P_{\bar{\nu}_\alpha \rightarrow \bar{\nu}_\beta}(U) = P_{\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta}(U^*)$$

Transformaciones C, P, T, CP y CPT

$$\begin{aligned}
 P_{\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta}(L, E) &= \delta_{\alpha\beta} \\
 &- 4 \sum_{i>j} \text{Re}(U_{\alpha i}^* U_{\beta i} U_{\alpha j} U_{\beta j}^*) \sin^2 \left[\frac{\Delta m_{ij}^2}{4E} L \right] \\
 &+ 2 \sum_{i>j} \text{Im}(U_{\alpha i}^* U_{\beta i} U_{\alpha j} U_{\beta j}^*) \sin \left[\frac{\Delta m_{ij}^2}{2E} L \right]
 \end{aligned}$$

● Transformación bajo ...

- ▶ ... **CP**: $\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta \xrightarrow{\text{CP}} \bar{\nu}_\alpha \rightarrow \bar{\nu}_\beta$
- ▶ ... **T**: $\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta \xrightarrow{\text{T}} \nu_\beta \rightarrow \nu_\alpha$
- ▶ ... **CPT**: $\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta \xrightarrow{\text{CPT}} \bar{\nu}_\beta \rightarrow \bar{\nu}_\alpha$

- Si se conserva CPT, entonces $P_{\bar{\nu}_\alpha \rightarrow \bar{\nu}_\beta} = P_{\nu_\beta \rightarrow \nu_\alpha}$.
- De la expresión para la probabilidad, $P_{\nu_\beta \rightarrow \nu_\alpha}(U) = P_{\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta}(U^*)$.
- Entonces, **asumiendo que CPT se conserva**,

$$P_{\bar{\nu}_\alpha \rightarrow \bar{\nu}_\beta}(U) = P_{\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta}(U^*)$$

Transformaciones C, P, T, CP y CPT

$$\begin{aligned}
 P_{\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta}(L, E) = & \delta_{\alpha\beta} \\
 & - 4 \sum_{i>j} \text{Re}(U_{\alpha i}^* U_{\beta i} U_{\alpha j} U_{\beta j}^*) \sin^2 \left[\frac{\Delta m_{ij}^2}{4E} L \right] \\
 & + 2 \sum_{i>j} \text{Im}(U_{\alpha i}^* U_{\beta i} U_{\alpha j} U_{\beta j}^*) \sin \left[\frac{\Delta m_{ij}^2}{2E} L \right]
 \end{aligned}$$

● Transformación bajo ...

- ▶ ... **CP**: $\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta \xrightarrow{\text{CP}} \bar{\nu}_\alpha \rightarrow \bar{\nu}_\beta$
- ▶ ... **T**: $\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta \xrightarrow{\text{T}} \nu_\beta \rightarrow \nu_\alpha$
- ▶ ... **CPT**: $\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta \xrightarrow{\text{CPT}} \bar{\nu}_\beta \rightarrow \bar{\nu}_\alpha$

- Si se conserva CPT, entonces $P_{\bar{\nu}_\alpha \rightarrow \bar{\nu}_\beta} = P_{\nu_\beta \rightarrow \nu_\alpha}$.
- De la expresión para la probabilidad, $P_{\nu_\beta \rightarrow \nu_\alpha}(U) = P_{\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta}(U^*)$.
- Entonces, **asumiendo que CPT se conserva,**

$$P_{\bar{\nu}_\alpha \rightarrow \bar{\nu}_\beta}(U) = P_{\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta}(U^*)$$

Transformaciones C, P, T, CP y CPT

$$\begin{aligned}
 P_{\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta}(L, E) &= \delta_{\alpha\beta} \\
 &- 4 \sum_{i>j} \text{Re}(U_{\alpha i}^* U_{\beta i} U_{\alpha j} U_{\beta j}^*) \sin^2 \left[\frac{\Delta m_{ij}^2}{4E} L \right] \\
 &+ 2 \sum_{i>j} \text{Im}(U_{\alpha i}^* U_{\beta i} U_{\alpha j} U_{\beta j}^*) \sin \left[\frac{\Delta m_{ij}^2}{2E} L \right]
 \end{aligned}$$

● Transformación bajo ...

- ▶ ... **CP**: $\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta \xrightarrow{\text{CP}} \bar{\nu}_\alpha \rightarrow \bar{\nu}_\beta$
- ▶ ... **T**: $\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta \xrightarrow{\text{T}} \nu_\beta \rightarrow \nu_\alpha$
- ▶ ... **CPT**: $\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta \xrightarrow{\text{CPT}} \bar{\nu}_\beta \rightarrow \bar{\nu}_\alpha$

- Si se conserva CPT, entonces $P_{\bar{\nu}_\alpha \rightarrow \bar{\nu}_\beta} = P_{\nu_\beta \rightarrow \nu_\alpha}$.
- De la expresión para la probabilidad, $P_{\nu_\beta \rightarrow \nu_\alpha}(U) = P_{\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta}(U^*)$.
- Entonces, **asumiendo que CPT se conserva,**

$$P_{\bar{\nu}_\alpha \rightarrow \bar{\nu}_\beta}(U) = P_{\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta}(U^*)$$

Transformaciones C, P, T, CP y CPT

$$\begin{aligned}
 P_{\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta}(L, E) = & \delta_{\alpha\beta} \\
 & - 4 \sum_{i>j} \text{Re}(U_{\alpha i}^* U_{\beta i} U_{\alpha j} U_{\beta j}^*) \sin^2 \left[\frac{\Delta m_{ij}^2}{4E} L \right] \\
 & + 2 \sum_{i>j} \text{Im}(U_{\alpha i}^* U_{\beta i} U_{\alpha j} U_{\beta j}^*) \sin \left[\frac{\Delta m_{ij}^2}{2E} L \right]
 \end{aligned}$$

- Transformación bajo ...

- ▶ ... **CP**: $\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta \xrightarrow{\text{CP}} \bar{\nu}_\alpha \rightarrow \bar{\nu}_\beta$
- ▶ ... **T**: $\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta \xrightarrow{\text{T}} \nu_\beta \rightarrow \nu_\alpha$
- ▶ ... **CPT**: $\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta \xrightarrow{\text{CPT}} \bar{\nu}_\beta \rightarrow \bar{\nu}_\alpha$

- Si se conserva CPT, entonces $P_{\bar{\nu}_\alpha \rightarrow \bar{\nu}_\beta} = P_{\nu_\beta \rightarrow \nu_\alpha}$.

- De la expresión para la probabilidad, $P_{\nu_\beta \rightarrow \nu_\alpha}(U) = P_{\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta}(U^*)$.
- Entonces, **asumiendo que CPT se conserva**,

$$P_{\bar{\nu}_\alpha \rightarrow \bar{\nu}_\beta}(U) = P_{\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta}(U^*)$$

Transformaciones C, P, T, CP y CPT

$$\begin{aligned}
 P_{\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta}(L, E) &= \delta_{\alpha\beta} \\
 &- 4 \sum_{i>j} \text{Re}(U_{\alpha i}^* U_{\beta i} U_{\alpha j} U_{\beta j}^*) \sin^2 \left[\frac{\Delta m_{ij}^2}{4E} L \right] \\
 &+ 2 \sum_{i>j} \text{Im}(U_{\alpha i}^* U_{\beta i} U_{\alpha j} U_{\beta j}^*) \sin \left[\frac{\Delta m_{ij}^2}{2E} L \right]
 \end{aligned}$$

- Transformación bajo ...

- ▶ ... **CP**: $\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta \xrightarrow{\text{CP}} \bar{\nu}_\alpha \rightarrow \bar{\nu}_\beta$
- ▶ ... **T**: $\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta \xrightarrow{\text{T}} \nu_\beta \rightarrow \nu_\alpha$
- ▶ ... **CPT**: $\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta \xrightarrow{\text{CPT}} \bar{\nu}_\beta \rightarrow \bar{\nu}_\alpha$

- Si se conserva CPT, entonces $P_{\bar{\nu}_\alpha \rightarrow \bar{\nu}_\beta} = P_{\nu_\beta \rightarrow \nu_\alpha}$.
- De la expresión para la probabilidad, $P_{\nu_\beta \rightarrow \nu_\alpha}(U) = P_{\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta}(U^*)$.
- Entonces, **asumiendo que CPT se conserva,**

$$P_{\bar{\nu}_\alpha \rightarrow \bar{\nu}_\beta}(U) = P_{\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta}(U^*)$$

Transformaciones C, P, T, CP y CPT

$$\begin{aligned}
 P_{\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta}(L, E) = & \delta_{\alpha\beta} \\
 & - 4 \sum_{i>j} \operatorname{Re}(U_{\alpha i}^* U_{\beta i} U_{\alpha j} U_{\beta j}^*) \sin^2 \left[\frac{\Delta m_{ij}^2}{4E} L \right] \\
 & + 2 \sum_{i>j} \operatorname{Im}(U_{\alpha i}^* U_{\beta i} U_{\alpha j} U_{\beta j}^*) \sin \left[\frac{\Delta m_{ij}^2}{2E} L \right]
 \end{aligned}$$

- Transformación bajo ...

- ▶ ... **CP**: $\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta \xrightarrow{\text{CP}} \bar{\nu}_\alpha \rightarrow \bar{\nu}_\beta$
- ▶ ... **T**: $\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta \xrightarrow{\text{T}} \nu_\beta \rightarrow \nu_\alpha$
- ▶ ... **CPT**: $\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta \xrightarrow{\text{CPT}} \bar{\nu}_\beta \rightarrow \bar{\nu}_\alpha$

- Si se conserva CPT, entonces $P_{\bar{\nu}_\alpha \rightarrow \bar{\nu}_\beta} = P_{\nu_\beta \rightarrow \nu_\alpha}$.
- De la expresión para la probabilidad, $P_{\nu_\beta \rightarrow \nu_\alpha}(U) = P_{\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta}(U^*)$.
- Entonces, **asumiendo que CPT se conserva**,

$$P_{\bar{\nu}_\alpha \rightarrow \bar{\nu}_\beta}(U) = P_{\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta}(U^*)$$

$$\begin{aligned}
P_{\nu_{\alpha} \rightarrow \nu_{\beta}}^{(-)}(L, E) &= \delta_{\alpha\beta} \\
&- 4 \sum_{i>j} \text{Re} \left(U_{\alpha i}^* U_{\beta i} U_{\alpha j} U_{\beta j}^* \right) \sin^2 \left[\frac{\Delta m_{ij}^2}{4E} L \right] \\
&+ 2 \sum_{i>j} \text{Im} \left(U_{\alpha i}^* U_{\beta i} U_{\alpha j} U_{\beta j}^* \right) \sin \left[\frac{\Delta m_{ij}^2}{2E} L \right]
\end{aligned}$$

- **Violación de CP:** si $\delta \neq 0$, entonces $U \neq U^*$, con lo cual $P_{\bar{\nu}_{\alpha} \rightarrow \bar{\nu}_{\beta}} \neq P_{\nu_{\alpha} \rightarrow \nu_{\beta}}$.
- **Medida de violación CP:**

$$A_{\alpha\beta}^{\text{CP}} = P_{\nu_{\alpha} \rightarrow \nu_{\beta}} - P_{\bar{\nu}_{\alpha} \rightarrow \bar{\nu}_{\beta}} = 4 \sum_{i>j} \text{Im} \left(U_{\alpha i}^* U_{\beta i} U_{\alpha j} U_{\beta j}^* \right) \sin \left[\frac{\Delta m_{ij}^2}{2E} L \right]$$

- **Dificultad:** $e^{\pm\delta}$ aparece acompañado de $\sin(\theta_{13})$.
Como $\theta_{13} \sim 0$, entonces es **difícil medir δ** .
- **Medida de violación CPT:**

$$A_{\alpha\beta}^{\text{CPT}} = P_{\nu_{\alpha} \rightarrow \nu_{\beta}} - P_{\bar{\nu}_{\beta} \rightarrow \bar{\nu}_{\alpha}}$$

$$\begin{aligned}
P_{\nu_{\alpha} \rightarrow \nu_{\beta}}^{(-)}(L, E) &= \delta_{\alpha\beta} \\
&- 4 \sum_{i>j} \text{Re} \left(U_{\alpha i}^* U_{\beta i} U_{\alpha j} U_{\beta j}^* \right) \sin^2 \left[\frac{\Delta m_{ij}^2}{4E} L \right] \\
&+ 2 \sum_{i>j} \text{Im} \left(U_{\alpha i}^* U_{\beta i} U_{\alpha j} U_{\beta j}^* \right) \sin \left[\frac{\Delta m_{ij}^2}{2E} L \right]
\end{aligned}$$

- **Violación de CP:** si $\delta \neq 0$, entonces $U \neq U^*$, con lo cual $P_{\bar{\nu}_{\alpha} \rightarrow \bar{\nu}_{\beta}} \neq P_{\nu_{\alpha} \rightarrow \nu_{\beta}}$.
- **Medida de violación CP:**

$$A_{\alpha\beta}^{\text{CP}} = P_{\nu_{\alpha} \rightarrow \nu_{\beta}} - P_{\bar{\nu}_{\alpha} \rightarrow \bar{\nu}_{\beta}} = 4 \sum_{i>j} \text{Im} \left(U_{\alpha i}^* U_{\beta i} U_{\alpha j} U_{\beta j}^* \right) \sin \left[\frac{\Delta m_{ij}^2}{2E} L \right]$$

- **Dificultad:** $e^{\pm\delta}$ aparece acompañado de $\sin(\theta_{13})$.
Como $\theta_{13} \sim 0$, entonces es **difícil medir δ** .
- **Medida de violación CPT:**

$$A_{\alpha\beta}^{\text{CPT}} = P_{\nu_{\alpha} \rightarrow \nu_{\beta}} - P_{\bar{\nu}_{\beta} \rightarrow \bar{\nu}_{\alpha}}$$

$$\begin{aligned}
P_{\nu_{\alpha} \rightarrow \nu_{\beta}}^{(-)}(L, E) &= \delta_{\alpha\beta} \\
&- 4 \sum_{i>j} \text{Re} \left(U_{\alpha i}^* U_{\beta i} U_{\alpha j} U_{\beta j}^* \right) \sin^2 \left[\frac{\Delta m_{ij}^2}{4E} L \right] \\
&+ 2 \sum_{i>j} \text{Im} \left(U_{\alpha i}^* U_{\beta i} U_{\alpha j} U_{\beta j}^* \right) \sin \left[\frac{\Delta m_{ij}^2}{2E} L \right]
\end{aligned}$$

- **Violación de CP:** si $\delta \neq 0$, entonces $U \neq U^*$, con lo cual $P_{\bar{\nu}_{\alpha} \rightarrow \bar{\nu}_{\beta}} \neq P_{\nu_{\alpha} \rightarrow \nu_{\beta}}$.
- **Medida de violación CP:**

$$A_{\alpha\beta}^{\text{CP}} = P_{\nu_{\alpha} \rightarrow \nu_{\beta}} - P_{\bar{\nu}_{\alpha} \rightarrow \bar{\nu}_{\beta}} = 4 \sum_{i>j} \text{Im} \left(U_{\alpha i}^* U_{\beta i} U_{\alpha j} U_{\beta j}^* \right) \sin \left[\frac{\Delta m_{ij}^2}{2E} L \right]$$

- **Dificultad:** $e^{\pm\delta}$ aparece acompañado de $\sin(\theta_{13})$.
Como $\theta_{13} \sim 0$, entonces es **difícil medir δ** .
- **Medida de violación CPT:**

$$A_{\alpha\beta}^{\text{CPT}} = P_{\nu_{\alpha} \rightarrow \nu_{\beta}} - P_{\bar{\nu}_{\beta} \rightarrow \bar{\nu}_{\alpha}}$$

$$\begin{aligned}
P_{\nu_{\alpha} \rightarrow \nu_{\beta}}^{(-)}(L, E) &= \delta_{\alpha\beta} \\
&- 4 \sum_{i>j} \text{Re} \left(U_{\alpha i}^* U_{\beta i} U_{\alpha j} U_{\beta j}^* \right) \sin^2 \left[\frac{\Delta m_{ij}^2}{4E} L \right] \\
&+ (-)^2 \sum_{i>j} \text{Im} \left(U_{\alpha i}^* U_{\beta i} U_{\alpha j} U_{\beta j}^* \right) \sin \left[\frac{\Delta m_{ij}^2}{2E} L \right]
\end{aligned}$$

- **Violación de CP:** si $\delta \neq 0$, entonces $U \neq U^*$, con lo cual $P_{\bar{\nu}_{\alpha} \rightarrow \bar{\nu}_{\beta}} \neq P_{\nu_{\alpha} \rightarrow \nu_{\beta}}$.
- **Medida de violación CP:**

$$A_{\alpha\beta}^{\text{CP}} = P_{\nu_{\alpha} \rightarrow \nu_{\beta}} - P_{\bar{\nu}_{\alpha} \rightarrow \bar{\nu}_{\beta}} = 4 \sum_{i>j} \text{Im} \left(U_{\alpha i}^* U_{\beta i} U_{\alpha j} U_{\beta j}^* \right) \sin \left[\frac{\Delta m_{ij}^2}{2E} L \right]$$

- **Dificultad:** $e^{\pm\delta}$ aparece acompañado de $\sin(\theta_{13})$.
Como $\theta_{13} \sim 0$, entonces es **difícil medir δ** .
- **Medida de violación CPT:**

$$A_{\alpha\beta}^{\text{CPT}} = P_{\nu_{\alpha} \rightarrow \nu_{\beta}} - P_{\bar{\nu}_{\beta} \rightarrow \bar{\nu}_{\alpha}}$$

Contenido

- 1 Introducción
- 2 Oscilaciones de dos neutrinos en el vacío
- 3 Evidencia experimental
 - Neutrinos solares
 - Neutrinos atmosféricos
 - Neutrinos de reactores
 - Neutrinos de aceleradores
- 4 Oscilaciones con tres neutrinos
- 5 Futuro y conclusiones

¿Qué sabemos que no sabemos?

- ¿Es $\theta_{13} = 0$?
- ¿Es $\theta_{23} = 45^\circ$?
- ¿Cuánto vale la fase de violación CP, δ ?
- ¿Cuáles son las masas m_1, m_2, m_3 de los autoestados ν_1, ν_2, ν_3 ?
- ¿La diferencia de masas $\Delta m_{31}^2 > 0$ ó $\Delta m_{31}^2 < 0$?
- ¿Cuál es el mecanismo de generación de las masas de neutrinos ?
- ¿Por qué la matriz CKM es tan distinta de la PMNS ?

$$|U_{\text{CKM}}| \approx \begin{pmatrix} 0.97 & 0.22 & 0.01 \\ 0.22 & 0.97 & 0.05 \\ 0.01 & 0.05 & 0.99 \end{pmatrix}, \quad |U_{\text{PMNS}}| \approx \begin{pmatrix} 0.82 & 0.56 & 0.10 \\ 0.47 & 0.57 & 0.68 \\ 0.32 & 0.60 & 0.73 \end{pmatrix}$$

i.e., ¿Por qué los ángulos de mezcla para quarks son pequeños mientras que para neutrinos son grandes ?

- ¿Los neutrinos son del tipo Dirac ($\nu \neq \bar{\nu}$) o del tipo Majorana ($\nu = \bar{\nu}$) ?

¿Qué sabemos que no sabemos?

- ¿Es $\theta_{13} = 0$?
- ¿Es $\theta_{23} = 45^\circ$?
- ¿Cuánto vale la fase de violación CP, δ ?
- ¿Cuáles son las masas m_1, m_2, m_3 de los autoestados ν_1, ν_2, ν_3 ?
- ¿La diferencia de masas $\Delta m_{31}^2 > 0$ ó $\Delta m_{31}^2 < 0$?
- ¿Cuál es el mecanismo de generación de las masas de neutrinos?
- ¿Por qué la matriz CKM es tan distinta de la PMNS?

$$|U_{\text{CKM}}| \approx \begin{pmatrix} 0.97 & 0.22 & 0.01 \\ 0.22 & 0.97 & 0.05 \\ 0.01 & 0.05 & 0.99 \end{pmatrix}, \quad |U_{\text{PMNS}}| \approx \begin{pmatrix} 0.82 & 0.56 & 0.10 \\ 0.47 & 0.57 & 0.68 \\ 0.32 & 0.60 & 0.73 \end{pmatrix}$$

i.e., ¿Por qué los ángulos de mezcla para quarks son pequeños mientras que para neutrinos son grandes?

- ¿Los neutrinos son del tipo Dirac ($\nu \neq \bar{\nu}$) o del tipo Majorana ($\nu = \bar{\nu}$)?

¿Qué sabemos que no sabemos?

- ¿Es $\theta_{13} = 0$?
- ¿Es $\theta_{23} = 45^\circ$?
- ¿Cuánto vale la fase de violación CP, δ ?
- ¿Cuáles son las masas m_1, m_2, m_3 de los autoestados ν_1, ν_2, ν_3 ?
- ¿La diferencia de masas $\Delta m_{31}^2 > 0$ ó $\Delta m_{31}^2 < 0$?
- ¿Cuál es el mecanismo de generación de las masas de neutrinos?
- ¿Por qué la matriz CKM es tan distinta de la PMNS?

$$|U_{\text{CKM}}| \approx \begin{pmatrix} 0.97 & 0.22 & 0.01 \\ 0.22 & 0.97 & 0.05 \\ 0.01 & 0.05 & 0.99 \end{pmatrix}, \quad |U_{\text{PMNS}}| \approx \begin{pmatrix} 0.82 & 0.56 & 0.10 \\ 0.47 & 0.57 & 0.68 \\ 0.32 & 0.60 & 0.73 \end{pmatrix}$$

i.e., ¿Por qué los ángulos de mezcla para quarks son pequeños mientras que para neutrinos son grandes?

- ¿Los neutrinos son del tipo Dirac ($\nu \neq \bar{\nu}$) o del tipo Majorana ($\nu = \bar{\nu}$)?

¿Qué sabemos que no sabemos?

- ¿Es $\theta_{13} = 0$?
- ¿Es $\theta_{23} = 45^\circ$?
- ¿Cuánto vale la fase de violación CP, δ ?
- ¿Cuáles son las masas m_1, m_2, m_3 de los autoestados ν_1, ν_2, ν_3 ?
- ¿La diferencia de masas $\Delta m_{31}^2 > 0$ ó $\Delta m_{31}^2 < 0$?
- ¿Cuál es el mecanismo de generación de las masas de neutrinos?
- ¿Por qué la matriz CKM es tan distinta de la PMNS?

$$|U_{\text{CKM}}| \approx \begin{pmatrix} 0.97 & 0.22 & 0.01 \\ 0.22 & 0.97 & 0.05 \\ 0.01 & 0.05 & 0.99 \end{pmatrix}, \quad |U_{\text{PMNS}}| \approx \begin{pmatrix} 0.82 & 0.56 & 0.10 \\ 0.47 & 0.57 & 0.68 \\ 0.32 & 0.60 & 0.73 \end{pmatrix}$$

i.e., ¿Por qué los ángulos de mezcla para quarks son pequeños mientras que para neutrinos son grandes?

- ¿Los neutrinos son del tipo Dirac ($\nu \neq \bar{\nu}$) o del tipo Majorana ($\nu = \bar{\nu}$)?

¿Qué sabemos que no sabemos?

- ¿Es $\theta_{13} = 0$?
- ¿Es $\theta_{23} = 45^\circ$?
- ¿Cuánto vale la fase de violación CP, δ ?
- ¿Cuáles son las masas m_1, m_2, m_3 de los autoestados ν_1, ν_2, ν_3 ?
- ¿La diferencia de masas $\Delta m_{31}^2 > 0$ ó $\Delta m_{31}^2 < 0$?
- ¿Cuál es el mecanismo de generación de las masas de neutrinos?
- ¿Por qué la matriz CKM es tan distinta de la PMNS?

$$|U_{\text{CKM}}| \approx \begin{pmatrix} 0.97 & 0.22 & 0.01 \\ 0.22 & 0.97 & 0.05 \\ 0.01 & 0.05 & 0.99 \end{pmatrix}, \quad |U_{\text{PMNS}}| \approx \begin{pmatrix} 0.82 & 0.56 & 0.10 \\ 0.47 & 0.57 & 0.68 \\ 0.32 & 0.60 & 0.73 \end{pmatrix}$$

i.e., ¿Por qué los ángulos de mezcla para quarks son pequeños mientras que para neutrinos son grandes?

- ¿Los neutrinos son del tipo Dirac ($\nu \neq \bar{\nu}$) o del tipo Majorana ($\nu = \bar{\nu}$)?

¿Qué sabemos que no sabemos?

- ¿Es $\theta_{13} = 0$?
- ¿Es $\theta_{23} = 45^\circ$?
- ¿Cuánto vale la fase de violación CP, δ ?
- ¿Cuáles son las masas m_1, m_2, m_3 de los autoestados ν_1, ν_2, ν_3 ?
- ¿La diferencia de masas $\Delta m_{31}^2 > 0$ ó $\Delta m_{31}^2 < 0$?
- ¿Cuál es el mecanismo de generación de las masas de neutrinos?
- ¿Por qué la matriz CKM es tan distinta de la PMNS?

$$|U_{\text{CKM}}| \approx \begin{pmatrix} 0.97 & 0.22 & 0.01 \\ 0.22 & 0.97 & 0.05 \\ 0.01 & 0.05 & 0.99 \end{pmatrix}, \quad |U_{\text{PMNS}}| \approx \begin{pmatrix} 0.82 & 0.56 & 0.10 \\ 0.47 & 0.57 & 0.68 \\ 0.32 & 0.60 & 0.73 \end{pmatrix}$$

i.e., ¿Por qué los ángulos de mezcla para quarks son pequeños mientras que para neutrinos son grandes?

- ¿Los neutrinos son del tipo Dirac ($\nu \neq \bar{\nu}$) o del tipo Majorana ($\nu = \bar{\nu}$)?

¿Qué sabemos que no sabemos?

- ¿Es $\theta_{13} = 0$?
- ¿Es $\theta_{23} = 45^\circ$?
- ¿Cuánto vale la fase de violación CP, δ ?
- ¿Cuáles son las masas m_1, m_2, m_3 de los autoestados ν_1, ν_2, ν_3 ?
- ¿La diferencia de masas $\Delta m_{31}^2 > 0$ ó $\Delta m_{31}^2 < 0$?
- ¿Cuál es el mecanismo de generación de las masas de neutrinos?
- ¿Por qué la matriz CKM es tan distinta de la PMNS?

$$|U_{\text{CKM}}| \approx \begin{pmatrix} 0.97 & 0.22 & 0.01 \\ 0.22 & 0.97 & 0.05 \\ 0.01 & 0.05 & 0.99 \end{pmatrix}, \quad |U_{\text{PMNS}}| \approx \begin{pmatrix} 0.82 & 0.56 & 0.10 \\ 0.47 & 0.57 & 0.68 \\ 0.32 & 0.60 & 0.73 \end{pmatrix}$$

i.e., ¿Por qué los ángulos de mezcla para quarks son pequeños mientras que para neutrinos son grandes?

- ¿Los neutrinos son del tipo Dirac ($\nu \neq \bar{\nu}$) o del tipo Majorana ($\nu = \bar{\nu}$)?

¿Qué sabemos que no sabemos?

- ¿Es $\theta_{13} = 0$?
- ¿Es $\theta_{23} = 45^\circ$?
- ¿Cuánto vale la fase de violación CP, δ ?
- ¿Cuáles son las masas m_1, m_2, m_3 de los autoestados ν_1, ν_2, ν_3 ?
- ¿La diferencia de masas $\Delta m_{31}^2 > 0$ ó $\Delta m_{31}^2 < 0$?
- ¿Cuál es el mecanismo de generación de las masas de neutrinos?
- ¿Por qué la matriz CKM es tan distinta de la PMNS?

$$|U_{\text{CKM}}| \approx \begin{pmatrix} 0.97 & 0.22 & 0.01 \\ 0.22 & 0.97 & 0.05 \\ 0.01 & 0.05 & 0.99 \end{pmatrix}, \quad |U_{\text{PMNS}}| \approx \begin{pmatrix} 0.82 & 0.56 & 0.10 \\ 0.47 & 0.57 & 0.68 \\ 0.32 & 0.60 & 0.73 \end{pmatrix}$$

i.e., ¿Por qué los ángulos de mezcla para quarks son pequeños mientras que para neutrinos son grandes?

- ¿Los neutrinos son del tipo Dirac ($\nu \neq \bar{\nu}$) o del tipo Majorana ($\nu = \bar{\nu}$)?

Conclusiones

- Los neutrinos pueden cambiar de sabor porque:
 - ▶ son masivos
 - ▶ neutrinos de sabor \neq autoestados de masa
- Numerosa evidencia sólida de experimentos realizados con neutrinos ...
 - ▶ solares
 - ▶ atmosféricos
 - ▶ de reactores
 - ▶ de aceleradores
- Las oscilaciones de neutrinos son la primera evidencia de física más allá del Modelo Estándar.

Existe un fuerte programa de investigación en neutrinos, así que muchas de las preguntas (con suerte) serán respondidas en la próxima década.

Conclusiones

- Los neutrinos pueden cambiar de sabor porque:
 - ▶ son masivos
 - ▶ neutrinos de sabor \neq autoestados de masa
- Numerosa evidencia sólida de experimentos realizados con neutrinos ...
 - ▶ solares
 - ▶ atmosféricos
 - ▶ de reactores
 - ▶ de aceleradores
- Las oscilaciones de neutrinos son la primera evidencia de física más allá del Modelo Estándar.

Existe un fuerte programa de investigación en neutrinos, así que muchas de las preguntas (con suerte) serán respondidas en la próxima década.

Conclusiones

- Los neutrinos pueden cambiar de sabor porque:
 - ▶ son masivos
 - ▶ neutrinos de sabor \neq autoestados de masa
- Numerosa evidencia sólida de experimentos realizados con neutrinos ...
 - ▶ solares
 - ▶ atmosféricos
 - ▶ de reactores
 - ▶ de aceleradores
- Las oscilaciones de neutrinos son la primera evidencia de física más allá del Modelo Estándar.

Existe un fuerte programa de investigación en neutrinos, así que muchas de las preguntas (con suerte) serán respondidas en la próxima década.

Conclusiones

- Los neutrinos pueden cambiar de sabor porque:
 - ▶ son masivos
 - ▶ neutrinos de sabor \neq autoestados de masa
- Numerosa evidencia sólida de experimentos realizados con neutrinos ...
 - ▶ solares
 - ▶ atmosféricos
 - ▶ de reactores
 - ▶ de aceleradores
- Las oscilaciones de neutrinos son la primera evidencia de física más allá del Modelo Estándar.

Existe un fuerte programa de investigación en neutrinos, así que muchas de las preguntas (con suerte) serán respondidas en la próxima década.

Conclusiones

- Los neutrinos pueden cambiar de sabor porque:
 - ▶ son masivos
 - ▶ neutrinos de sabor \neq autoestados de masa
- Numerosa evidencia sólida de experimentos realizados con neutrinos ...
 - ▶ solares
 - ▶ atmosféricos
 - ▶ de reactores
 - ▶ de aceleradores
- Las oscilaciones de neutrinos son la primera evidencia de física más allá del Modelo Estándar.

Existe un fuerte programa de investigación en neutrinos, así que muchas de las preguntas (con suerte) serán respondidas en la próxima década.

Conclusiones

- Los neutrinos pueden cambiar de sabor porque:
 - ▶ son masivos
 - ▶ neutrinos de sabor \neq autoestados de masa
- Numerosa evidencia sólida de experimentos realizados con neutrinos ...
 - ▶ solares
 - ▶ atmosféricos
 - ▶ de reactores
 - ▶ de aceleradores
- Las oscilaciones de neutrinos son la primera evidencia de física más allá del Modelo Estándar.

Existe un fuerte programa de investigación en neutrinos, así que muchas de las preguntas (con suerte) serán respondidas en la próxima década.

Conclusiones

- Los neutrinos pueden cambiar de sabor porque:
 - ▶ son masivos
 - ▶ neutrinos de sabor \neq autoestados de masa
- Numerosa evidencia sólida de experimentos realizados con neutrinos ...
 - ▶ solares
 - ▶ atmosféricos
 - ▶ de reactores
 - ▶ de aceleradores
- Las oscilaciones de neutrinos son la primera evidencia de física más allá del Modelo Estándar.

Existe un fuerte programa de investigación en neutrinos, así que muchas de las preguntas (con suerte) serán respondidas en la próxima década.

Conclusiones

- Los neutrinos pueden cambiar de sabor porque:
 - ▶ son masivos
 - ▶ neutrinos de sabor \neq autoestados de masa
- Numerosa evidencia sólida de experimentos realizados con neutrinos ...
 - ▶ solares
 - ▶ atmosféricos
 - ▶ de reactores
 - ▶ de aceleradores
- Las oscilaciones de neutrinos son la primera evidencia de física más allá del Modelo Estándar.

Existe un fuerte programa de investigación en neutrinos, así que muchas de las preguntas (con suerte) serán respondidas en la próxima década.

Conclusiones

- Los neutrinos pueden cambiar de sabor porque:
 - ▶ son masivos
 - ▶ neutrinos de sabor \neq autoestados de masa
- Numerosa evidencia sólida de experimentos realizados con neutrinos ...
 - ▶ solares
 - ▶ atmosféricos
 - ▶ de reactores
 - ▶ de aceleradores
- Las oscilaciones de neutrinos son la primera evidencia de física más allá del Modelo Estándar.

Existe un fuerte programa de investigación en neutrinos, así que muchas de las preguntas (con suerte) serán respondidas en la próxima década.

Conclusiones

- Los neutrinos pueden cambiar de sabor porque:
 - ▶ son masivos
 - ▶ neutrinos de sabor \neq autoestados de masa
- Numerosa evidencia sólida de experimentos realizados con neutrinos ...
 - ▶ solares
 - ▶ atmosféricos
 - ▶ de reactores
 - ▶ de aceleradores
- Las oscilaciones de neutrinos son la **primera evidencia de física más allá del Modelo Estándar**.

Existe un fuerte programa de investigación en neutrinos, así que muchas de las preguntas (con suerte) serán respondidas en la próxima década.

Conclusiones

- Los neutrinos pueden cambiar de sabor porque:
 - ▶ son masivos
 - ▶ neutrinos de sabor \neq autoestados de masa
- Numerosa evidencia sólida de experimentos realizados con neutrinos ...
 - ▶ solares
 - ▶ atmosféricos
 - ▶ de reactores
 - ▶ de aceleradores
- Las oscilaciones de neutrinos son la **primera evidencia de física más allá del Modelo Estándar**.

Existe un fuerte programa de investigación en neutrinos, así que muchas de las preguntas (con suerte) serán respondidas en la próxima década.

Conclusiones

- Los neutrinos pueden cambiar de sabor porque:
 - ▶ son masivos
 - ▶ neutrinos de sabor \neq autoestados de masa
- Numerosa evidencia sólida de experimentos realizados con neutrinos ...
 - ▶ solares
 - ▶ atmosféricos
 - ▶ de reactores
 - ▶ de aceleradores
- Las oscilaciones de neutrinos son la **primera evidencia de física más allá del Modelo Estándar**.

Existe un fuerte programa de investigación en neutrinos, así que **muchas de las preguntas (con suerte) serán respondidas en la próxima década.**