

XXX Reunión Anual de La División  
de Partículas y Campos  
Sociedad Mexicana de Física

Fases de violación de CP y  
momentos magnéticos de  
neutrinos de Majorana en  
left-right

Héctor Novales Sánchez  
FCFM-BUAP





Wolfgang Pauli

**1930:** Propuesta de neutrinos (antes neutrones)...  
y propiedades:

- Masa  $\sim$  masa del electrón
- Espín  $1/2$
- Eléctricamente neutro

Experimentos en Hanford y la  
Planta de Savannah River

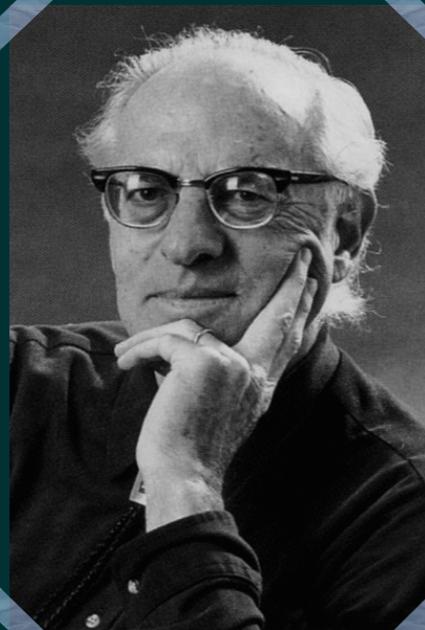
Buscaron el proceso  $\bar{\nu} + p \rightarrow e^+ + n$

1956:

Confirmación del antineutrino



Clyde Cowan



Frederick Reines

**Premio Nobel de 1956:**

**"for the detection of the neutrino"**





Bruno Pontecorvo

1957: Oscilaciones de neutrinos



$\nu_e$



Desplazamiento



$\nu_\mu$

Efecto provocado por mezclas de neutrinos:

$$|\nu_\alpha\rangle = \sum_k \underline{U_{\alpha k}^*} |\nu_k\rangle \quad (\alpha = e, \mu, \tau)$$

Transformación unitaria

Por ejemplo:

- Aproximación de dos familias
- Neutrinos ultrarelativistas
- Neutrinos en el vacío

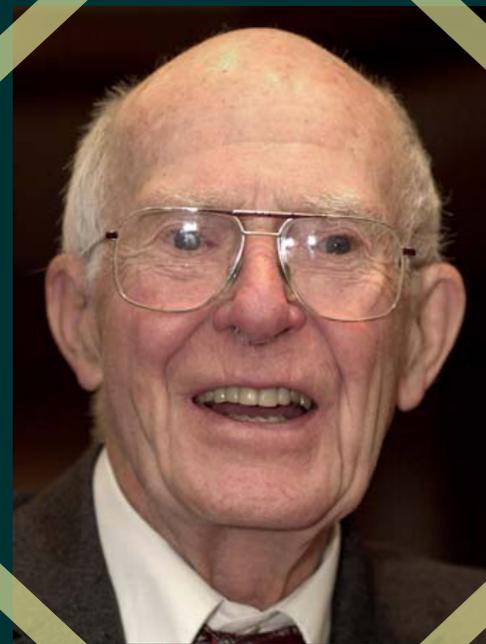
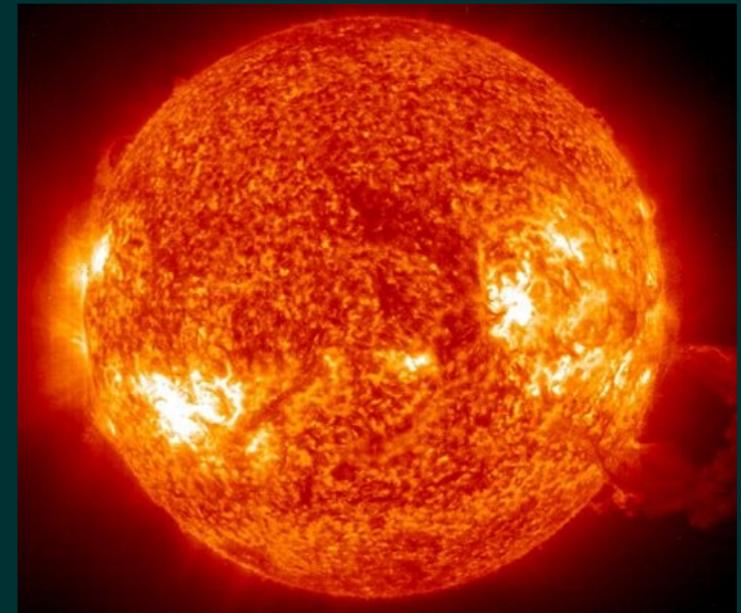
$$\implies P(\nu_e \rightarrow \nu_\mu) = \sin 2\theta \sin^2 \left( \frac{\Delta m^2 L}{4E} \right)$$



John Bahcall

Modelo solar:

Predicción del flujo  
de neutrinos solares



Raymond Davis Jr.



Experimento Homestake:

Mediciones de neutrinos  
provenientes del Sol



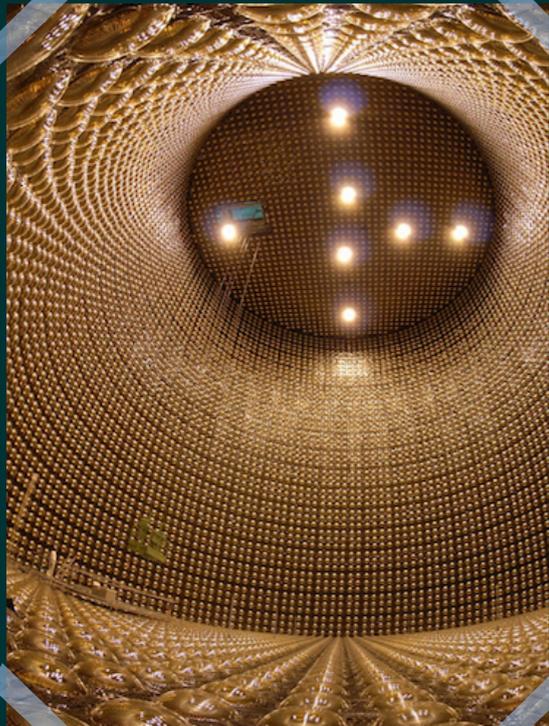
Premio Nobel del 2002:

"for pioneering contributions to  
astrophysics, in particular for the  
detection of cosmic neutrinos"

Discrepancia: sólo se midió 1/3 de la predicción teórica

# Controversia resuelta por las oscilaciones de neutrinos

## Super-Kamiokande



Primera evidencia de oscilaciones de neutrinos (1998)

Neutrinos atmosféricos:  $\nu_\mu \leftrightarrow \nu_e$

$$\sin 2\theta_{23} > 0.82$$

$$4 \times 10^{-4} \text{ eV}^2 < \Delta m^2 < 6 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$$

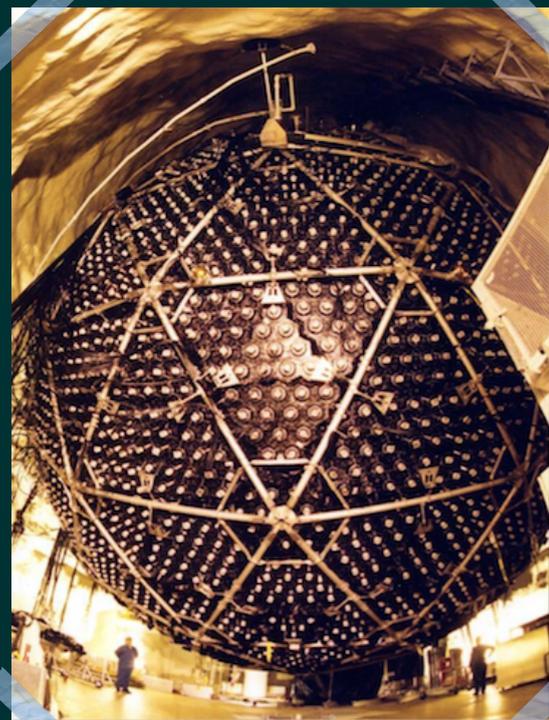


Takaaki Kajita



Premio Nobel del 2015:

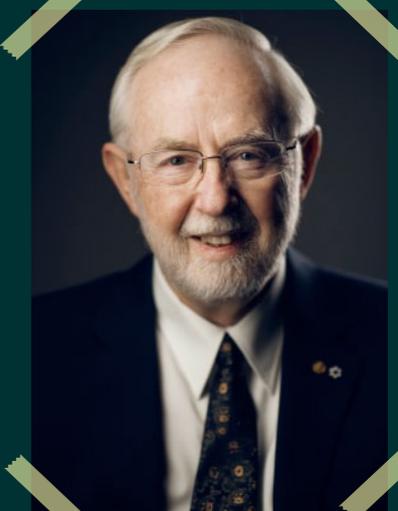
## Sudbury Neutrino Observatory (SNO)



Neutrinos solares

- Medición de flujo de  $\nu_e$
- Medición de flujo que no corresponde a  $\nu_e$

¡Flujo total consistente con modelos solares!



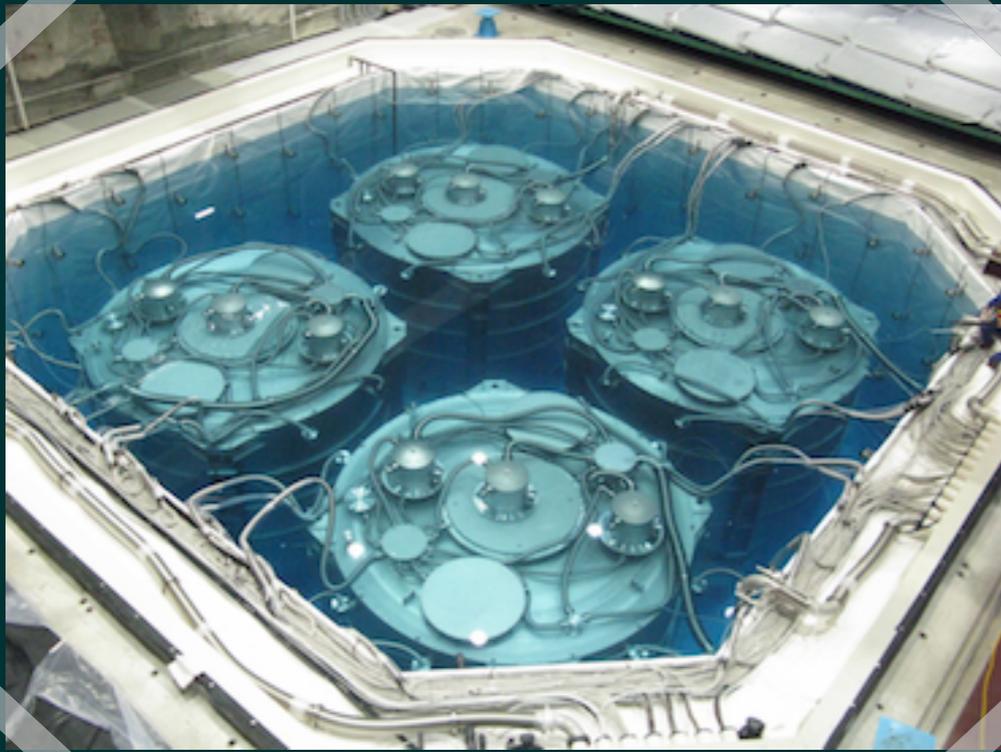
Arthur B. McDonald



Premio Nobel del 2015:

Recientemente (2012)

Daya Bay y RENO



Daya Bay Neutrino Experiment

Antineutrinos de Reactor

Último ángulo de mezcla,  
diferente a cero:

$$\sin^2 2\theta_{13} = 0.090^{+0.008}_{-0.009}, \quad (5.2\sigma)$$

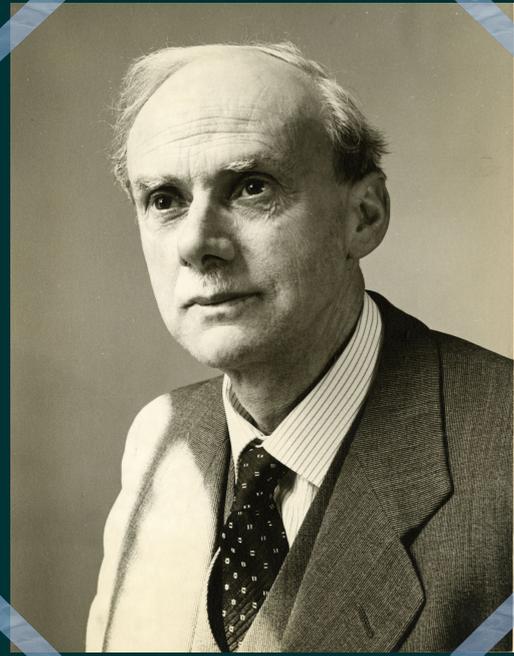
Última pieza: los neutrinos son masivos y se mezclan

Modelo Estándar: los neutrinos no son masivos

⇒ ¡Nueva física!

Pregunta muy interesante:

¿Dirac o Majorana?



Paul Dirac

La ecuación de Dirac:  $(i\gamma^\mu \partial_\mu - m)\psi = 0$

En términos de campos quirales:  $i\gamma^\mu \partial_\mu \psi_L = m\psi_R$

$i\gamma^\mu \partial_\mu \psi_R = m\psi_L$

Si  $m = 0 \Rightarrow$  Una sola ecuación para un campo quiral (espinor de Weyl, con sólo 2 componentes)

En el Modelo Estándar sólo hay neutrinos izquierdos

¿Se puede describir a un fermión masivo usando un solo espinor de 2 componentes?

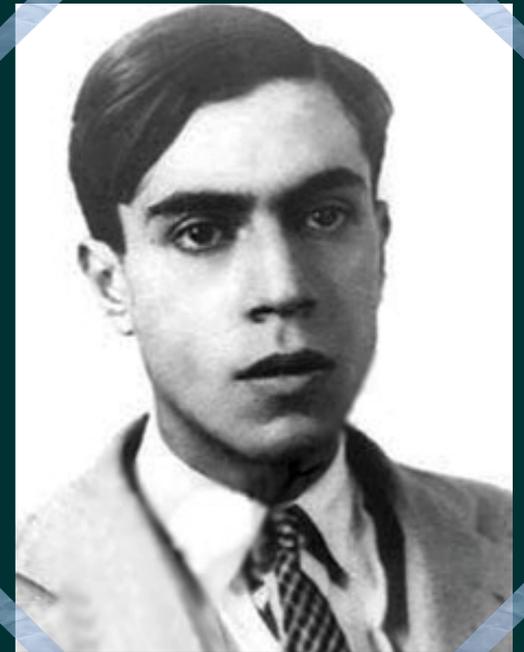
Sí, si se satisface:

$$\psi_R = C\overline{\psi}_L^T \quad (\psi_L \text{ y } \psi_R \text{ no son independientes})$$

$$\Rightarrow \bullet \text{ La ecuación de Majorana: } i\gamma^\mu \partial_\mu \psi_L = mC\overline{\psi}_L^T$$

$$\bullet \text{ La condición de Majorana: } \psi = C\overline{\psi}^T$$

$$\Rightarrow \text{ Partícula = Antipartícula (Sólo fermiones neutros)}$$



Ettore Majorana

## Diferencias:

### 1. Grados de Libertad (GL)

Si CPT se conserva:

Dirac, 4 GL (2 helicidades, partícula y antipartícula)

Majorana, 2 GL (2 helicidades)

### 2. Parametrización de la matriz de mezcla: $U = VP$

$V$ , matriz de tipo CKM:

Tres ángulos de mezcla  $\theta_{12}$ ,  $\theta_{23}$ ,  $\theta_{13}$  y una fase  $\delta$  (fase de Dirac)

$P$ , matriz diagonal:

Dos fases  $\varphi_2$  y  $\varphi_3$  (fases de Majorana)

¡Sólo Majorana!

Fases diferentes a cero  $\implies$  Violación de CP

Diferencias:

## 2. Parametrización de la matriz de mezcla (continuación)

### Oscilaciones de neutrinos

- Insensibles a las fases de Majorana
- Información sobre:

#### i. Ángulos de mezcla

- Ángulo atmosférico,  $\theta_{23}$

Primera medición en

Super-Kamiokande (1998):  $\sin^2 2\theta_{23} > 0.82$

Estimación actual en T2K (2015):

Jerarquía normal  
(escenario favorecido):

$$\sin^2 \theta_{23} = 0.528_{-0.038}^{+0.055}$$

$$|\Delta m_{32}^2| = (2.51 \pm 0.11) \times 10^{-3} \text{ eV}^2$$

Se busca la desviación de  $\theta_{23} = \pi/4$  (T2K, NOVA)

## Diferencias:

### Oscilaciones de neutrinos (continuación)

- Ángulo solar,  $\theta_{12}$

Resultados de Super-

Kamiokande (2015):  $\sin^2 \theta_{12} = 0.305 \pm 0.013$

$$\Delta m_{21}^2 = 7.49_{-0.17}^{+0.19} \times 10^{-5} \text{ eV}^2$$

Mejoras en el futuro, por ejemplo, en JUNO (2020-¿?)

- Ángulo  $\theta_{13}$

2012, un año muy importante: Primera medición de  $\theta_{13}$   
en Daya Bay y RENO

Se pensaba que  $\theta_{13} = 0$

⇒ Motivación para modelos (p. e., mezcla tribimaximal)

Pero  $\theta_{13} \neq 0 \Rightarrow$  violación de CP a través de  $\delta$

Estimación actual en Daya Bay (2015):  $\sin^2 2\theta_{13} = 0.090_{-0.009}^{+0.008}$

Diferencias:

## Oscilaciones de neutrinos (continuación)

### ii. Fases complejas

- La fase de Dirac

Efectos en oscilaciones  
de neutrinos:

$$A_{CP}^{(l,l')} = P(\nu_l \rightarrow \nu_{l'}) - P(\bar{\nu}_l \rightarrow \bar{\nu}_{l'})$$

El experimento T2K

Valores excluidos (90% C.L.):

Jerarquía normal:  $\delta \in (0.19\pi, 0.80\pi)$

Jerarquía invertida:  $\delta \in (-\pi, -0.97\pi)$  y  $\delta \in (-0.04\pi, \pi)$

Valor favorecido:  $\delta = -\frac{\pi}{2}$

Diferencias:

### 3. Violación del sabor leptónico

Doble decaimiento beta sin neutrinos,  $(\beta\beta)_{0\nu}$



- Sólo puede ocurrir si los neutrinos son fermiones de Majorana

- Si no se observa, se acota la masa de Majorana efectiva,  $\langle m_{\beta\beta} \rangle$

Heidelberg-Moscow experiment: Anunciaron medición del  $(\beta\beta)_{0\nu}$

Controversia, pues nadie más lo ha observado

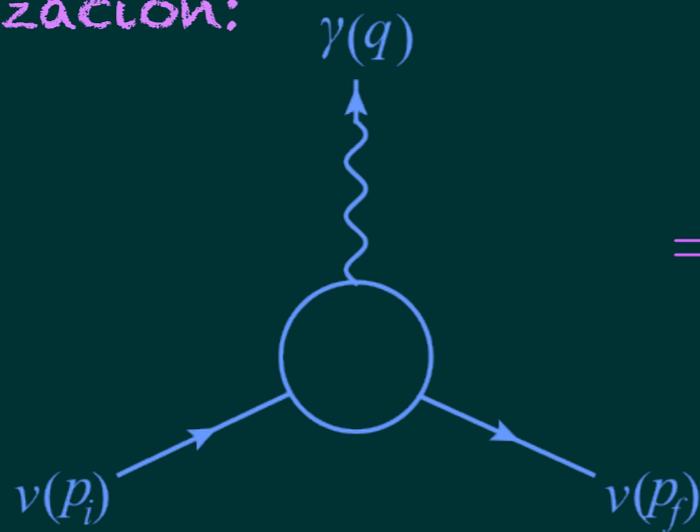
En el último capítulo (2013)...

KamLAND-Zen excluyó estos resultados con 97.5% C.L.

Diferencias:

#### 4. Propiedades electromagnéticas

Parametrización:



$$= \left( \gamma_\mu - \frac{q_\mu \not{q}}{q^2} \right) \left[ f_Q(q^2) + f_A(q^2) q^2 \gamma_5 \right] - i \sigma_{\mu\nu} q^\nu \left[ f_M(q^2) + i f_E(q^2) \gamma_5 \right]$$

Factores de forma (matrices 3x3)...

$f_Q(q^2)$ de carga	—————>	$e_{fi} = f_Q^{fi}(0)$	momentos de carga
$f_A(q^2)$ anapolar	—————>	$a_{fi} = f_A^{fi}(0)$	momentos anapolares
$f_M(q^2)$ magnético	—————>	$\mu_{fi} = f_M^{fi}(0)$	momentos magnéticos
$f_E(q^2)$ eléctrico	—————>	$\epsilon_{fi} = f_E^{fi}(0)$	momentos eléctricos

$f = i$ , momentos diagonales (reales)

$f \neq i$ , momentos de transición (complejos)

Diferencias:

## Momentos electromagnéticos distintos para Dirac y Majorana

Neutrinos de Dirac:

Momentos de transición  $\neq 0$

Momentos diagonales  $\neq 0$

VS

Neutrinos de Majorana

Momentos de transición  $\neq 0$

Momentos diagonales: de carga = 0

magnéticos = 0

eléctricos = 0

anapolares  $\neq 0$

## Teoría

Modelo Estándar + neutrinos derechos estériles

Momentos diagonales:

$$\mu_j \approx 3.2 \times 10^{-19} \mu_B \left( \frac{m_j}{1 \text{ eV}} \right)$$

$$\epsilon_j = 0$$

## Experimento

Mejores cotas:

1. GEMMA experiment (reactor):

$$\mu_\nu < 2.9 \times 10^{-11} \mu_B \text{ (90\% C.L.)}$$

2. Astrofísica (procesos estelares):

$$\mu_\nu < 4.5 \times 10^{-12} \mu_B \text{ (95\% C.L.)}$$

## Gran diferencia

Para acortar la disparidad..

Otras extensiones del Modelo Estándar: 331, dimensiones extras, left-right...

Nos interesa: left-right con neutrinos de Majorana

# El Modelo left-right

Grupo de norma extendido:  $SU(2)_L \times SU(2)_R \times U(1)_{B-L}$

Sector escalar:

Tripletes:

$$\Delta_{L,R} = \begin{pmatrix} \delta_{L,R}^+ / \sqrt{2} & \delta_{L,R}^{++} \\ \delta_{L,R}^0 & -\delta_{L,R}^+ / \sqrt{2} \end{pmatrix}$$

Dos rompimientos de simetría:

$$\langle \Delta_{L,R} \rangle = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ v_{L,R} & 0 \end{pmatrix}$$

Bidoblete:

$$\Phi = \begin{pmatrix} \phi_1^0 & \phi_1^+ \\ \phi_2^- & \phi_2^0 \end{pmatrix}$$



$$\langle \Phi \rangle = \begin{pmatrix} \kappa & 0 \\ 0 & \kappa \end{pmatrix}$$

$$SU(2)_L \times SU(2)_R \times U(1)_{B-L} \longrightarrow SU(2)_L \times U(1)_Y \longrightarrow U_e(1)$$

Sube y baja (seesaw)  $\implies$  Neutrinos de Majorana

## EL Modelo left-right

Dos bosones cargados: izquierdo,  $W_L$ , y derecho,  $W_R$ ,

y mezclados:  $W_L^+ = \cos \zeta W^{+1} - \sin \zeta W^{+2}$

$$W_R^+ = e^{i\omega} (\sin \zeta W^{+1} + \cos \zeta W^{+2})$$

Corrientes cargadas:  $W_{a\mu}^+ \bar{\nu}_\alpha \gamma^\mu (v_{a,\alpha j} - a_{a,\alpha j} \gamma_5) l_j$   
 $+ W_{a\mu}^- \bar{l}_j \gamma^\mu (v_{a,\alpha j}^* - a_{a,\alpha j}^* \gamma_5) \nu_\alpha$

• Índices:  $\alpha = 1, 2, 3$ ;  $j = e, \mu, \tau$ ;  $a = 1, 2$

• Acoplamiento vectorial y axial:  $v_{a,\alpha j}, a_{a,\alpha j}$

• Violación de CP

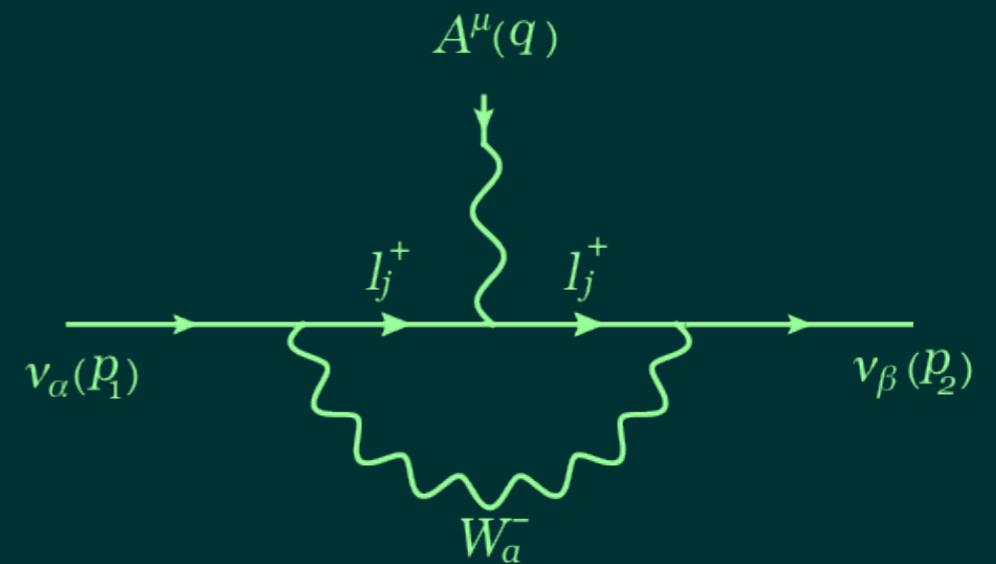
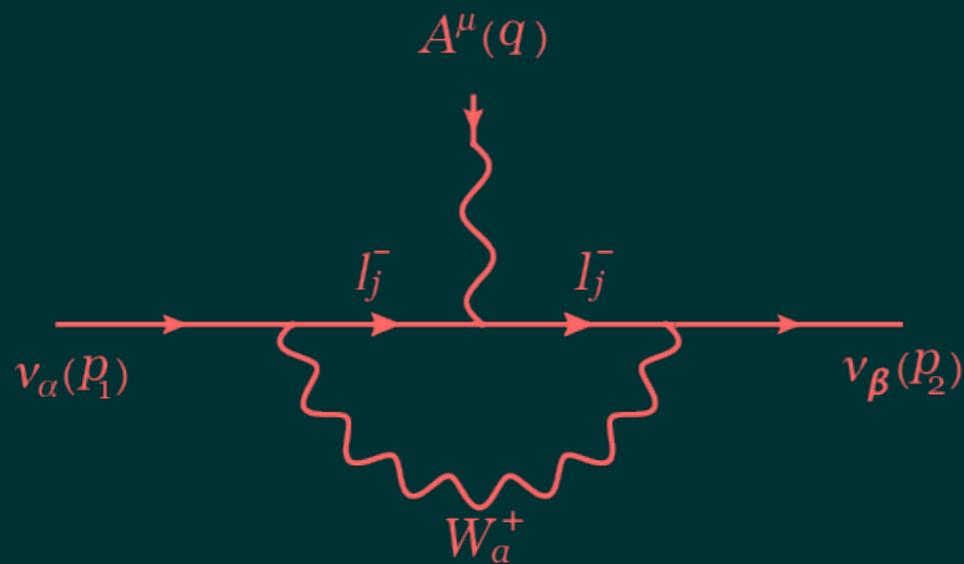
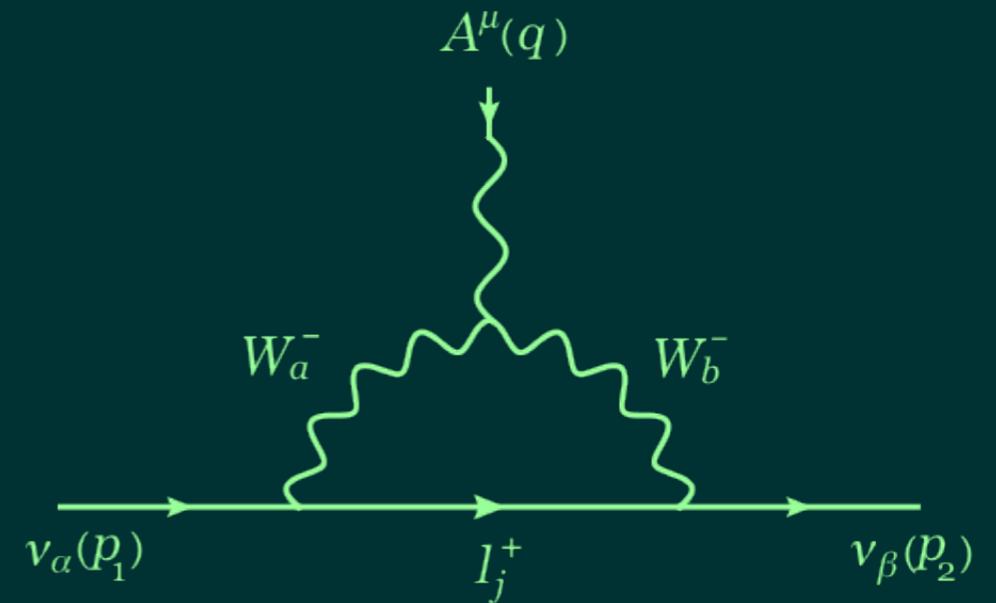
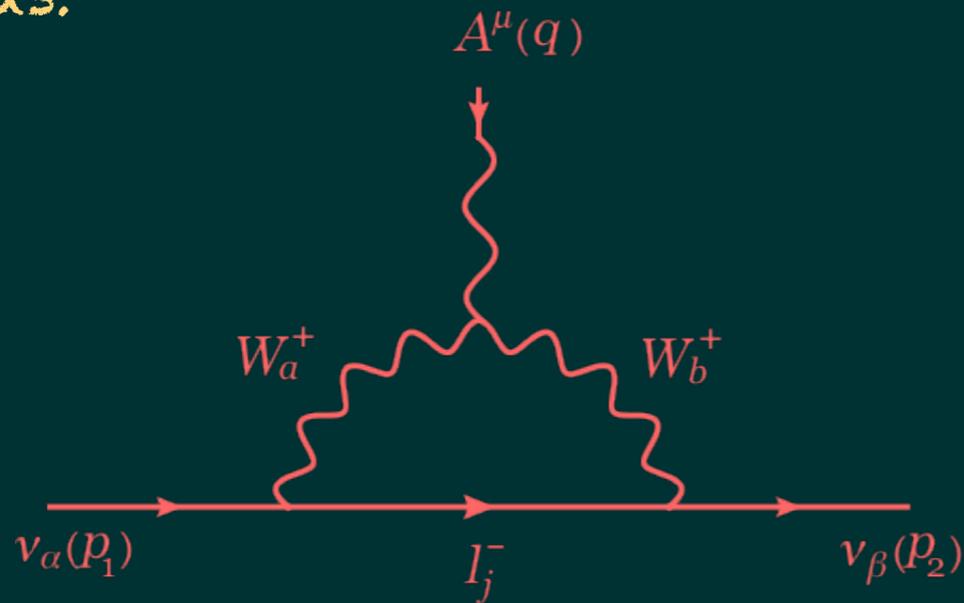
• Dos matrices PMNS:  $\mathcal{L}_{j\alpha}$  y  $\mathcal{R}_{j\alpha}$

• Dos constantes de acoplamiento:  $g_L$  y  $g_R$

• Ángulo de mezcla y fases:  $\zeta$  y  $\omega$

# Momentos magnéticos

Diagramas:

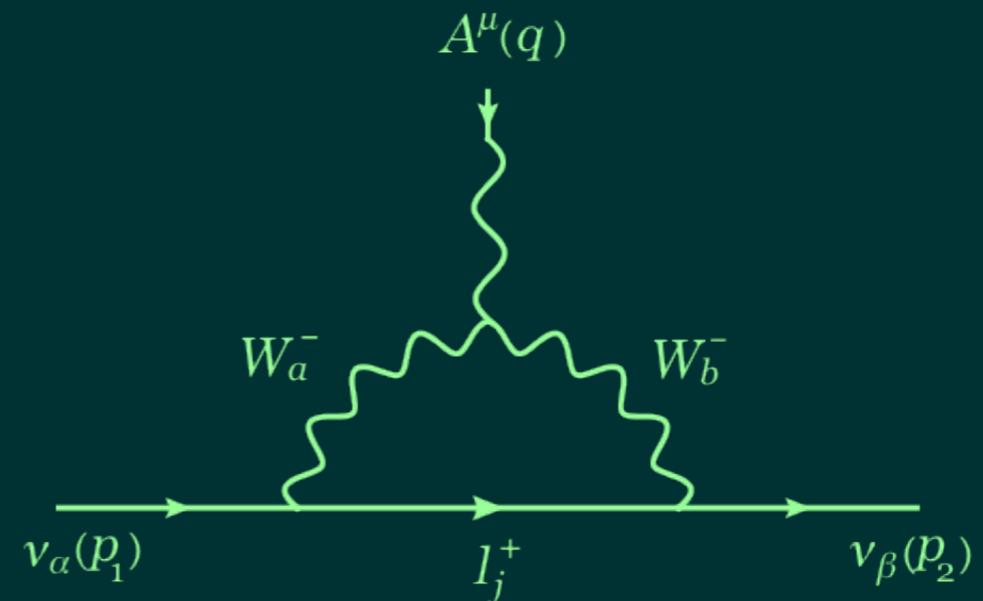
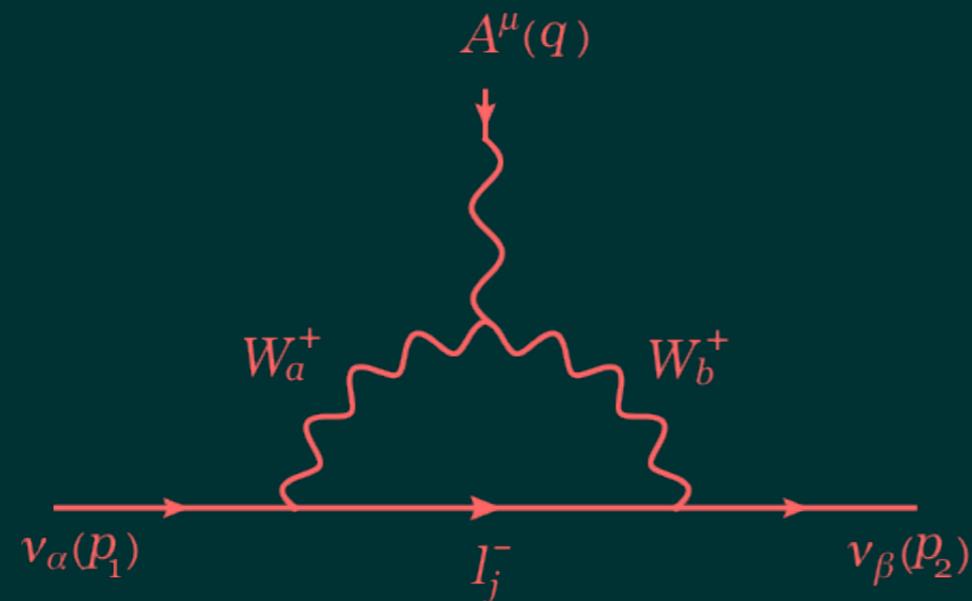


Neutrinos de Majorana, ■ y ■

Neutrinos de Dirac, sólo ■

# Momentos magnéticos

Contribuciones dominantes:



Factores magnéticos resultantes:

$$f_M^{\beta\alpha}(q^2) = \frac{m_e}{8\pi^2} \mu_B \sum_i \sum_a \left[ \left( a_{a,\beta i} a_{a,\alpha i}^* - a_{a,\beta i}^* a_{a,\alpha i} \right) I_1 + \left( v_{a,\beta i} v_{a,\alpha i}^* - v_{a,\beta i}^* v_{a,\alpha i} \right) I_2 \right]$$

- No momentos diagonales
- Se requiere violación de CP
- En términos de integrales paramétricas
- Dependencia de la norma

## Análisis de los resultados

### Primer escenario: mezcla derecha maximal

- Mezclas izquierda y derecha iguales:  $\mathcal{R} = \mathcal{L}$
- Norma unitaria  $\Rightarrow$  menos diagramas
- Suponemos que  $m_2 \sim \text{TeV}$

Las contribuciones dominantes:

$$|\mu_{\beta\alpha}| \lesssim \mu_B (4 \times 10^{-11} \text{GeV}^{-1}) |m_{1,\beta\alpha} \sin \phi_{\beta\alpha} + (m_{2,\beta\alpha} - m_{2,\alpha\beta}) \sin \delta \cos \phi_{\beta\alpha} + (m_{2,\beta\alpha} + m_{2,\alpha\beta}) \cos \delta \sin \phi_{\beta\alpha}|$$

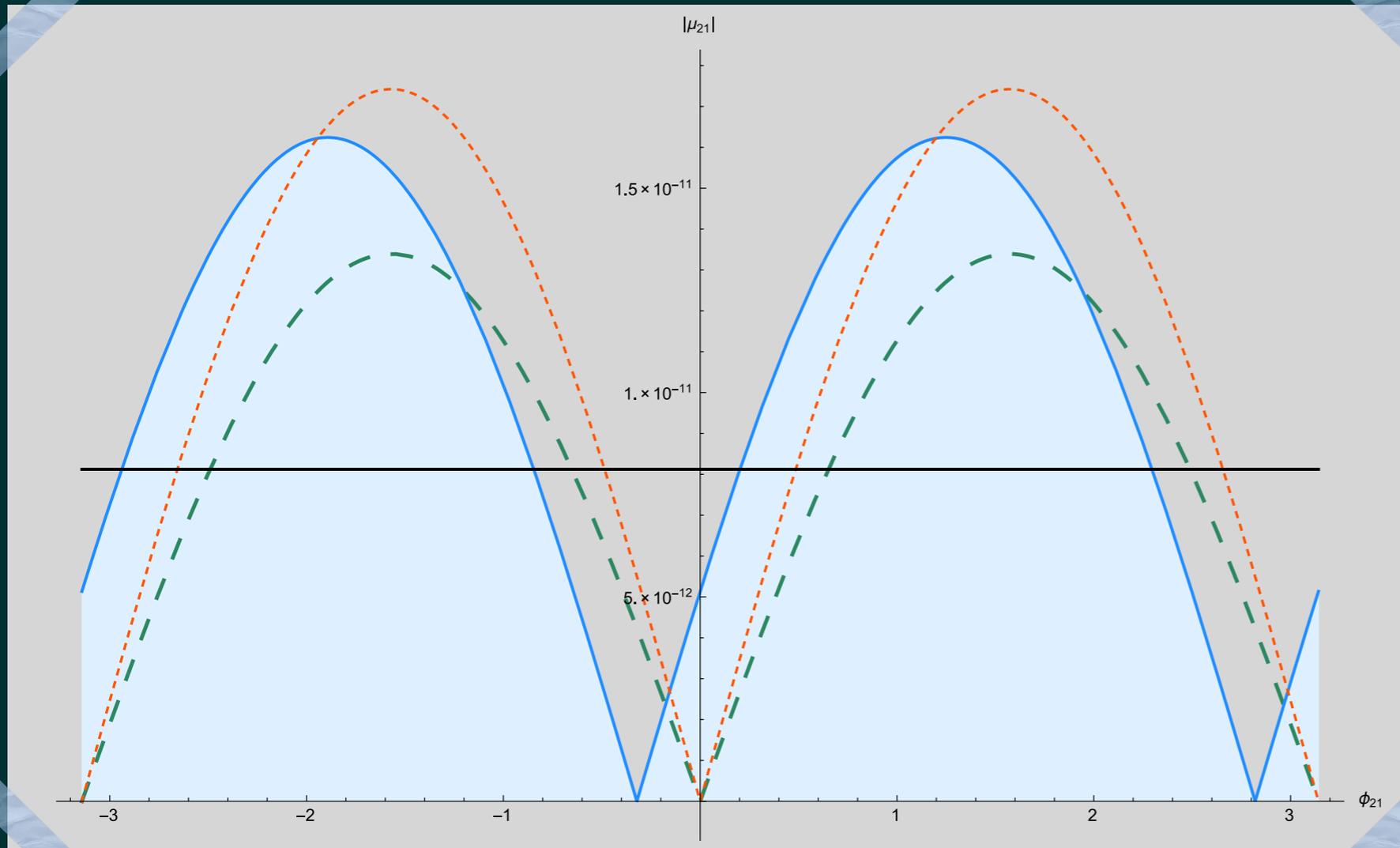
- Diferencias de fase de Majorana:  $\phi_{\beta\alpha} = (\varphi_\beta - \varphi_\alpha)/2$
- Masas de leptones cargados en las  $m_{n,\beta\alpha}$
- Ángulos de mezcla:  $\theta_{12}, \theta_{23}, \theta_{13}$
- Fase de Dirac:  $\delta$

**Independientes de masas de neutrinos ligeros**

# Análisis de los resultados

Primer escenario: mezcla derecha maximal

El momento magnético  $\mu_{21}$ :



- $\delta = 0$ , Majorana
- $\delta = -\frac{\pi}{2}$ , Majorana
- $\delta = -\pi$ , Majorana
- $-\frac{\pi}{2}$ , Dirac

Depende de una sola diferencia de fase  $\phi_{\beta\alpha}$

Valor absoluto  $|\mu_{21}|$  como función de la diferencia de fase  $\phi_{21}$

Valor máximo  $\sim 10^{-11}$

## Análisis de los resultados

Primer escenario: mezcla derecha maximal

Análisis de T2K:  $\delta = -\frac{\pi}{2}$

Ceros de los dipolos magnéticos:

$$|\mu_{21}| \approx 0, \quad \varphi_2 \approx -36.86^\circ$$

$$|\mu_{31}| \approx 0, \quad \varphi_3 \approx -31.98^\circ$$

$$|\mu_{32}| \approx 0, \quad \phi_{32} \approx -172.87^\circ, 7.13^\circ$$

Notamos que

$$\phi_{32} = \frac{\varphi_3 - \varphi_2}{2} \approx 2.44^\circ \neq -172.87^\circ, 7.13^\circ$$

¡Incompatible!

Dos dipolos magnéticos nulos  $\implies$  El tercer dipolo no se anula

## Análisis de los resultados

Segundo escenario: mezcla derecha de tipo CKM

- Ángulos de mezcla pequeños  $\Rightarrow$  Mezcla derecha cercana a la identidad
- Norma unitaria  $\Rightarrow$  Menos diagramas
- Suponemos que  $m_2 \sim \text{TeV}$

Las contribuciones dominantes:

$$|\mu_{\beta\alpha}| \lesssim \mu_B (2 \times 10^{-11} \text{GeV}^{-1}) (|c_{e,\beta\alpha}| + |c_{\mu,\beta\alpha}| + |c_{\tau,\beta\alpha}|)$$

Coeficientes  $c_{j,\beta\alpha}$ :

- 2 diferencias de fase de Majorana:  $\phi_{\beta\alpha} = (l_\beta - r_\alpha)/2$

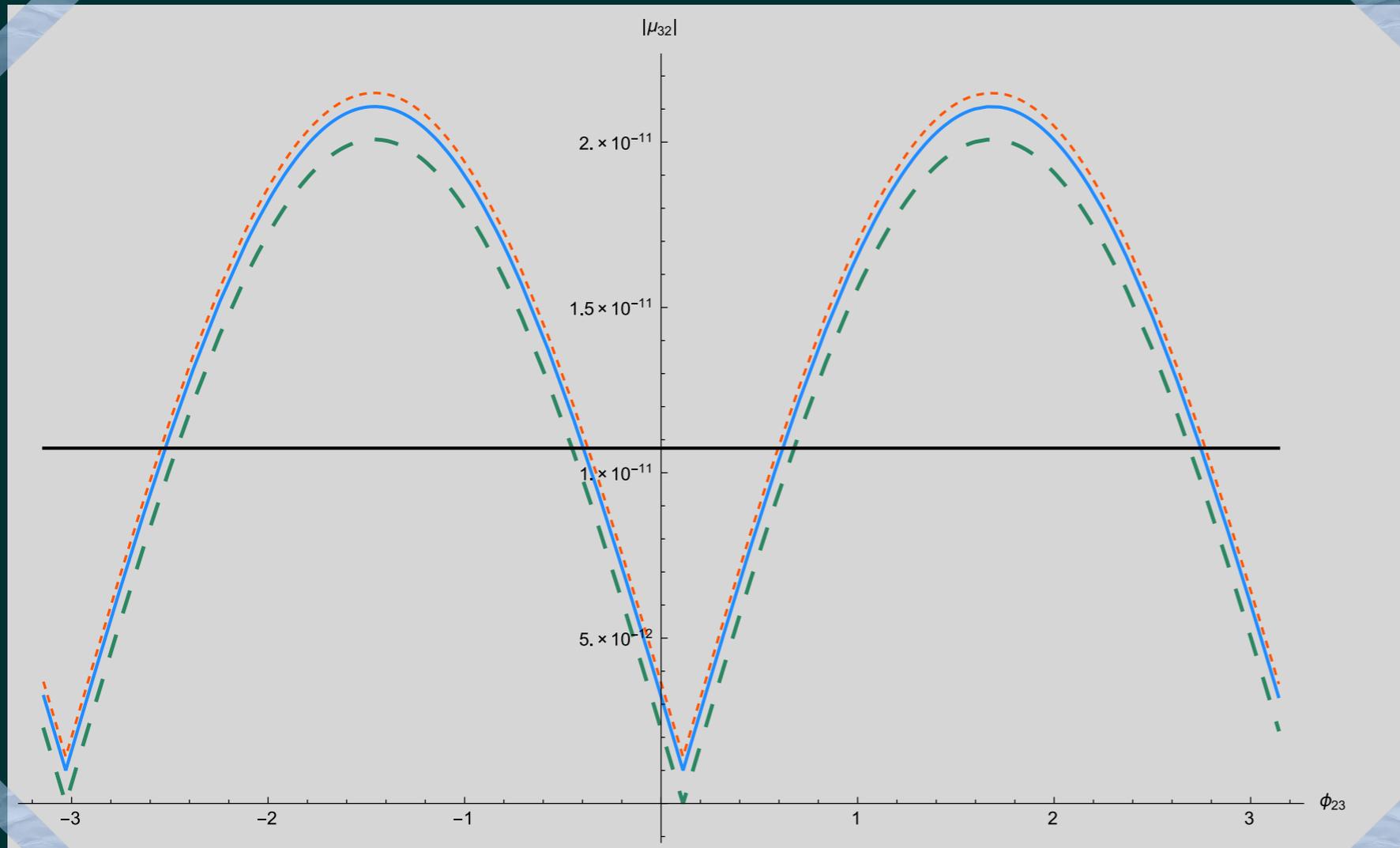
Fases izquierdas y derechas diferentes

- Ángulos de mezcla y fase de Dirac
- Masas de leptones cargados
- Independientes de masas de neutrinos ligeros

# Análisis de los resultados

Segundo escenario: mezcla derecha de tipo CKM

El momento magnético  $\mu_{32}$ :



- $\phi_{32} = 0$ , Majorana
- $\phi_{32} = \frac{\pi}{4}$ , Majorana
- $\phi_{32} = \frac{\pi}{2}$ , Majorana
- Dirac

$$\text{T2K: } \delta = -\frac{\pi}{2}$$

Dependencia de masas de leptones cargados

⇒ fase dominante y fase dominada

Valor máximo  $\sim 10^{-11} \mu_B$

## Análisis de los resultados

Segundo escenario: mezcla derecha de tipo CKM

$$\text{Colaboración T2K: } \delta = -\frac{\pi}{2}$$

Ceros de los dipolos magnéticos:

$$|\mu_{21}| \approx 0, \begin{cases} r_2 \approx -24^\circ \\ l_2 = 0^\circ \end{cases} \quad |\mu_{31}| \approx 0, \begin{cases} r_3 \approx 28.82^\circ \\ l_3 = 180^\circ \end{cases} \quad |\mu_{32}| \approx 0, \begin{cases} \phi_{23} \approx 6.40^\circ, -173.60^\circ \\ \phi_{32} = 0^\circ, 180^\circ \end{cases}$$

Notamos que...

$$\frac{l_2 - r_3}{2} \approx -14.41^\circ \neq \phi_{23}$$

$$\frac{l_3 - r_2}{2} \approx 102^\circ \neq \phi_{32}$$

¡Incompatible!

Dos dipolos magnéticos nulos  $\implies$  El tercer dipolo no se anula

## Resumen

- Algunos aspectos de la física de los neutrinos

### Neutrinos de Dirac y Majorana

Oscilaciones de neutrinos

Doble decaimiento beta sin neutrinos

Propiedades electromagnéticas

- Modelo left-right con neutrinos de Majorana

### Propiedades electromagnéticas

Momentos magnéticos  $\sim 10^{-11} \mu_B$

Mezcla derecha maximal

Mezcla derecha tipo CKM

Impacto de las fases de Majorana