

Las búsquedas de Oscilaciones de Neutrinos de MiniBooNE

Alexis A. Aguilar-Arévalo (ICN-UNAM),
(por la Colaboración MiniBooNE)

26 de mayo de 2011

*Seminario del Cuerpo Académico de
Partículas, Campos y Relatividad General*

*Facultad de Ciencias Físico-Matemáticas
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla*

Resumen

Neutrinos y Oscilaciones de Neutrinos

Resultados experimentales – ¿tres Δm^2 's?

El experimento MiniBooNE

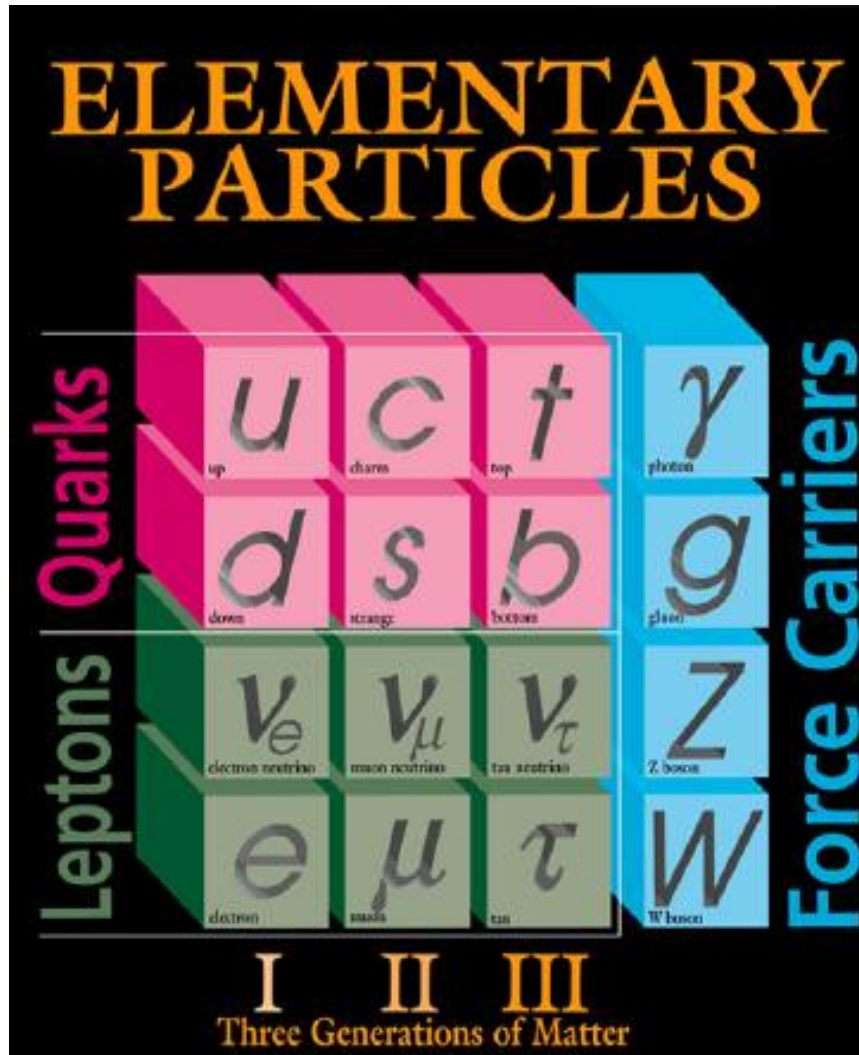
Resultados de oscilaciones de MiniBooNE (ν y $\bar{\nu}$)

Discusión de resultados, neutrinos estériles

Posibilidades a futuro

Conclusiones

Neutrinos en el modelo estándar

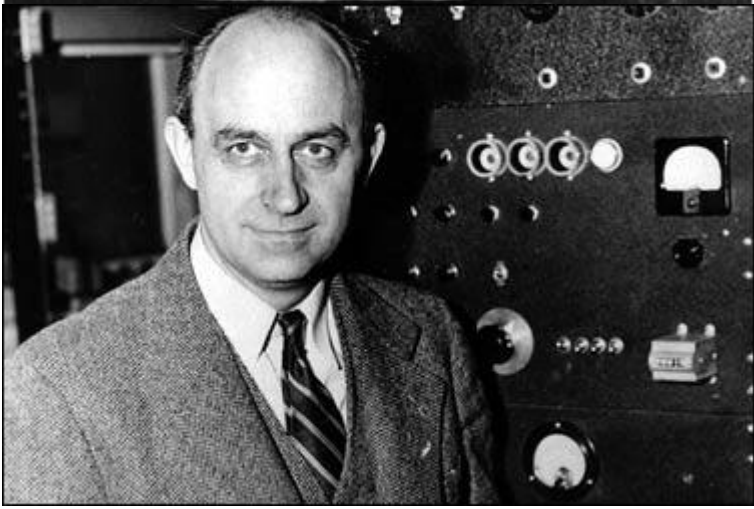
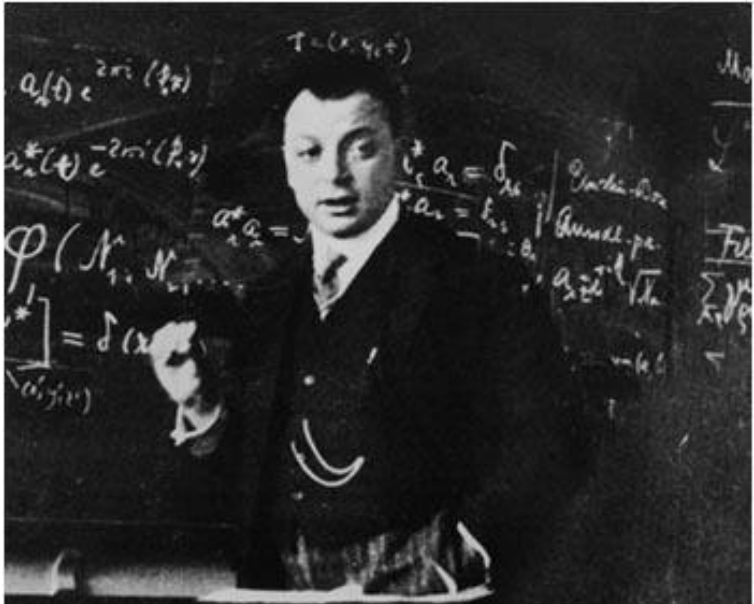
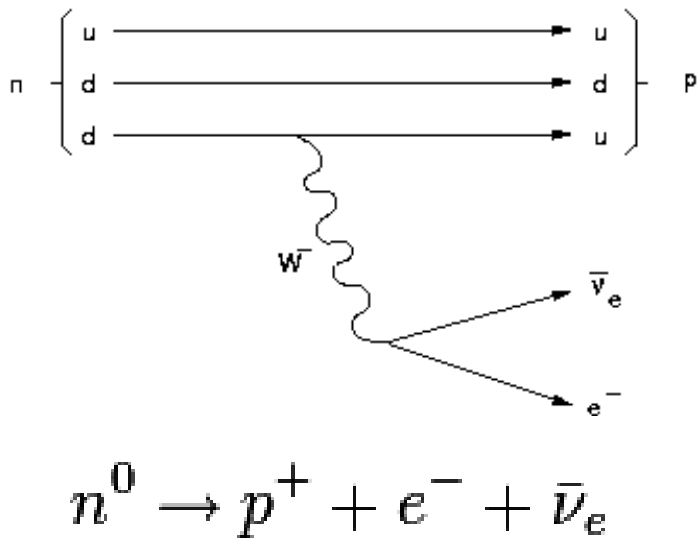


1897: e descubierto (tubo de rayos catódicos)
1900s: γ interpretado como partícula (otra vez)
1930s: μ descubierto (rayos cósmicos)
1950s: ν_e *observado* (reactor nuclear)
1960s: 1ª evidencia de quarks
 u y d observados (SLAC)
 s observado (BNL)
 ν_μ *observado* (BNL)
1970s: **nace el Modelo Estándar**
 c descubierto (SLAC, BNL)
 τ observado (SLAC)
 b observado (FNAL)
1980s: W y Z observados (CERN)
1990s: t quark observado (FNAL)
2000s: ν_τ *observado* (FNAL)

Neutrinos

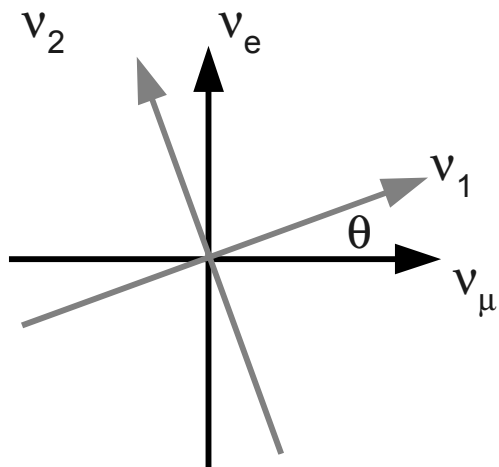
Pauli postula su existencia para explicar el espectro de energía de los e's en el decaimiento beta nuclear para mantener la conservación de la energía.

Enrico Fermi introduce su teoría del decaimiento beta en 1934



Oscilaciones de Neutrinos

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



$$|\nu(t)\rangle = -\sin\theta |\nu_1\rangle e^{-iE_1 t} + \cos\theta |\nu_2\rangle e^{-iE_2 t}$$

$$P_{\text{osc}}(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) = |\langle \nu_e | \nu(t) \rangle|^2$$

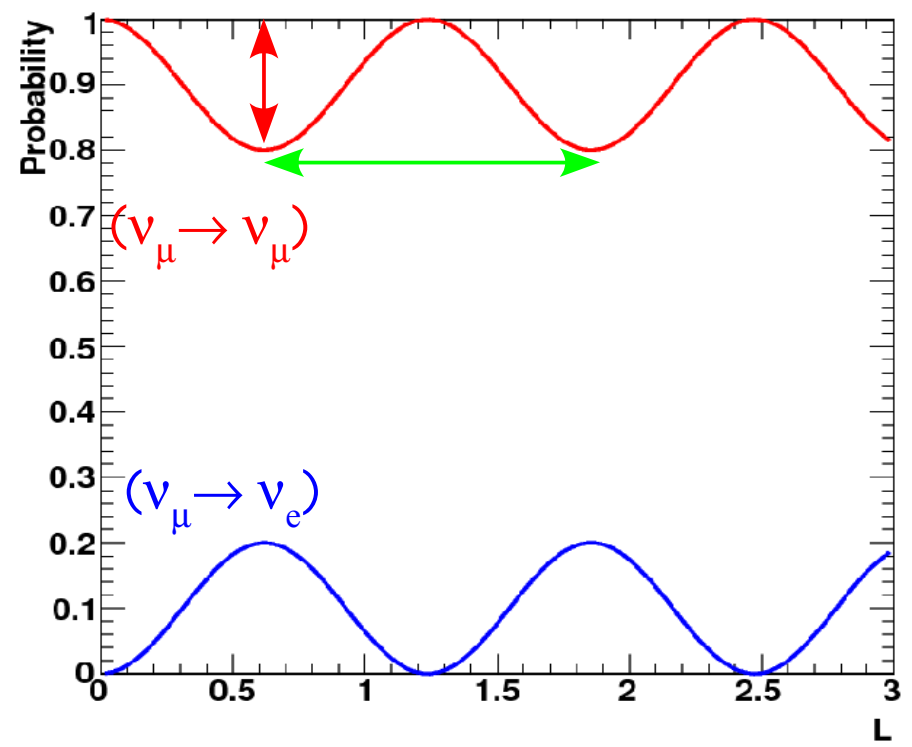
- Consideremos sólo dos tipos de neutrinos
- Si los estados de masa definida son distintos de los estados con sabor definido,

$$i.e. (\nu_\mu, \nu_e) \neq (\nu_1, \nu_2)$$

- Entonces los estados de sabor definido son mezclas de los estados de masa definida
- Probabilidad de hallar un ν_e cuando se comienza con un ν_μ

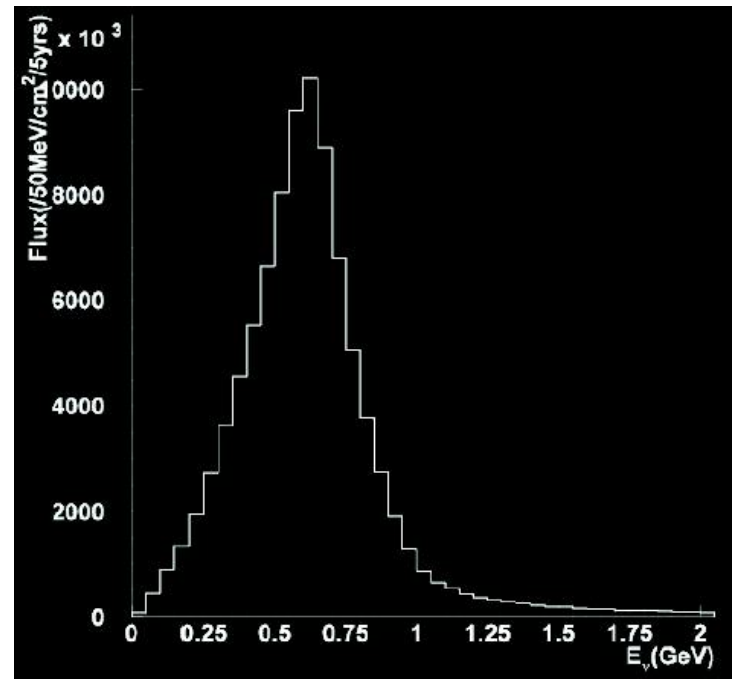
$$P_{\text{osc}}(\nu_{\mu} \rightarrow \nu_e) = \sin^2 2\theta \sin^2(1.27 \Delta m^2 L/E)$$

- 2 parámetros fundamentales:
 - $\Delta m^2 (= m_1^2 - m_2^2) \leftrightarrow$ período
 - $\theta \leftrightarrow$ magnitud
- 2 parámetros experimentales
 - $L =$ distancia recorrida
 - $E =$ energía del neutrino



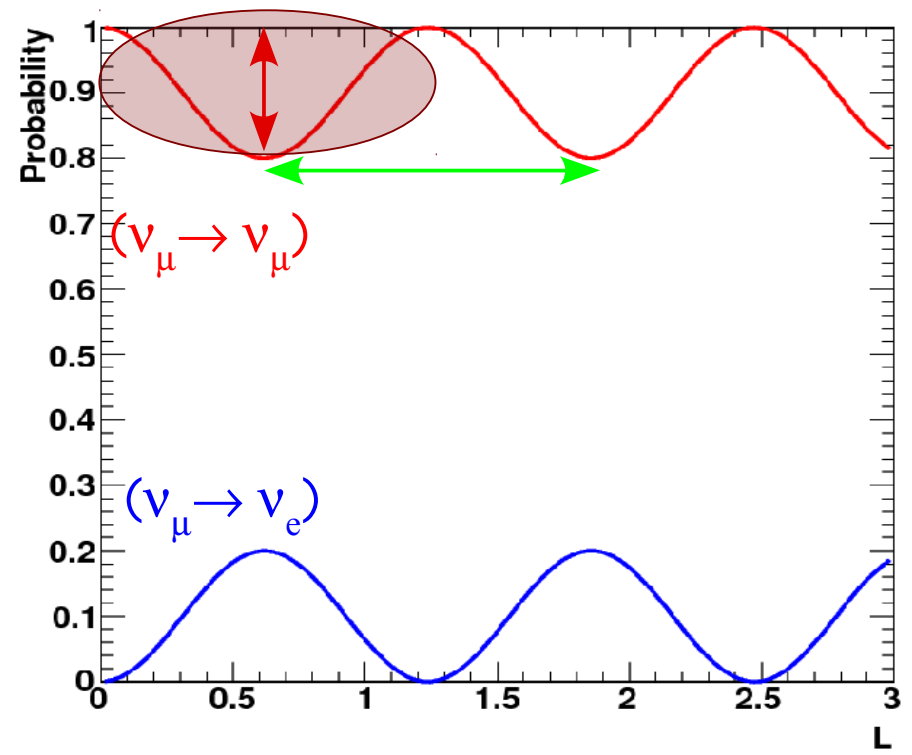
En un experimento:

- Ajustar L/E de acuerdo a Δm^2 . Las incertidumbres determinan la sensibilidad en θ .
- Desaparición y aparición de neutrinos



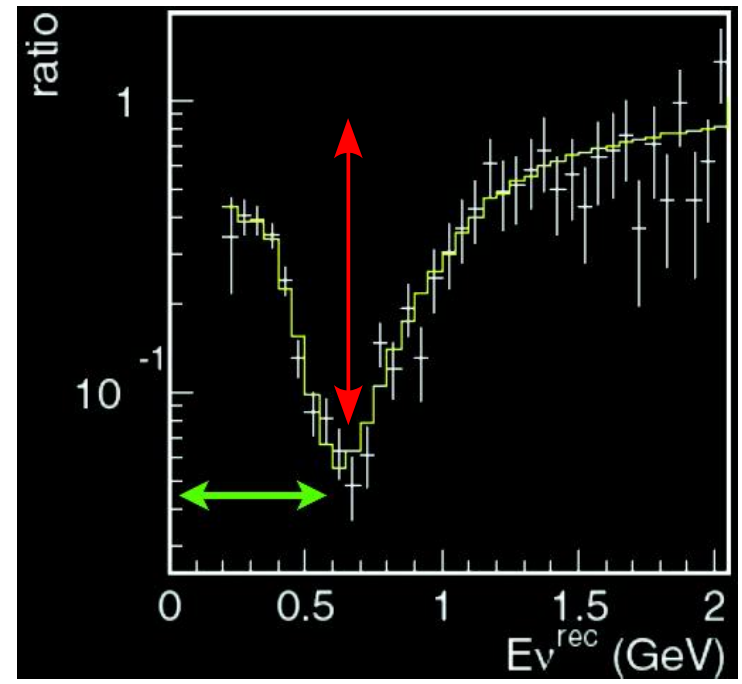
$$P_{\text{osc}}(\nu_{\mu} \rightarrow \nu_e) = \sin^2 2\theta \sin^2(1.27 \Delta m^2 L/E)$$

- 2 parámetros fundamentales:
 - $\Delta m^2 (= m_1^2 - m_2^2) \leftrightarrow$ período
 - $\theta \leftrightarrow$ magnitud
- 2 parámetros experimentales
 - L = distancia recorrida
 - E = energía del neutrino



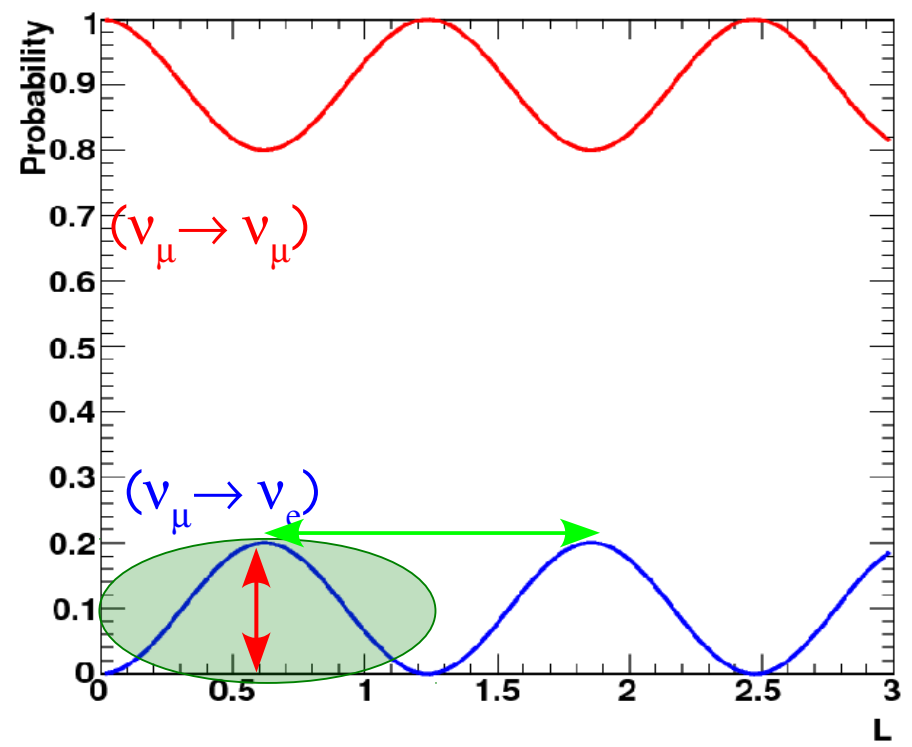
En un experimento:

- Ajustar L/E de acuerdo a Δm^2 . Las incertidumbres determinan la sensibilidad en θ .
- **Desaparición** y aparición de neutrinos



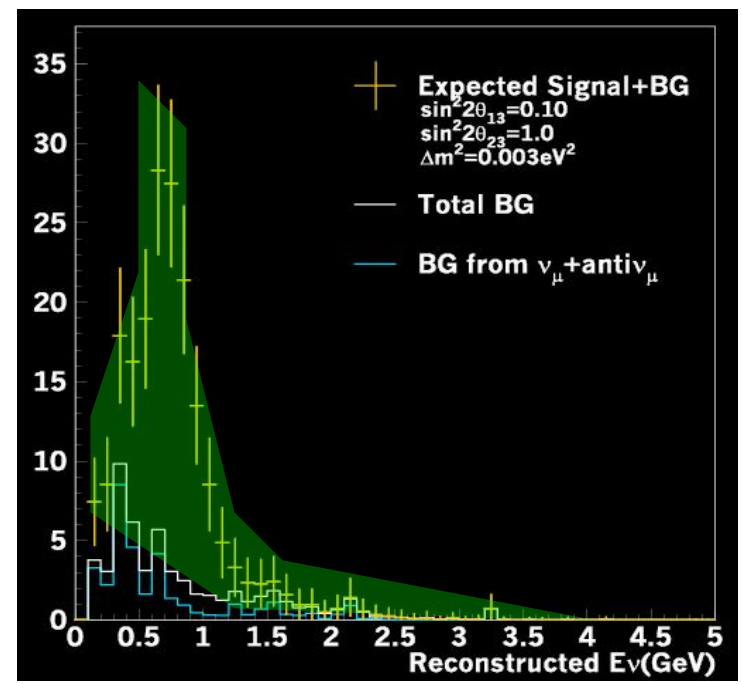
$$P_{\text{osc}}(\nu_{\mu} \rightarrow \nu_e) = \sin^2 2\theta \sin^2(1.27 \Delta m^2 L/E)$$

- 2 parámetros fundamentales:
 - $\Delta m^2 (= m_1^2 - m_2^2) \leftrightarrow$ período
 - $\theta \leftrightarrow$ magnitud
- 2 parámetros experimentales
 - L = distancia recorrida
 - E = energía del neutrino



En un experimento:

- Ajustar L/E de acuerdo a Δm^2 . Las incertidumbres determinan la sensibilidad en θ .
- Desaparición y aparición de neutrinos



Oscilaciones con 3 neutrinos

Matriz *Maki-Nakagawa-Sakata* (MNS – matriz de mezcla)

$$|\nu_\alpha\rangle = \sum_i U_{\alpha i}^* |\nu_i\rangle \quad |\nu_\alpha\rangle \text{ neutrino con sabor definido, } \alpha = e, \mu, \tau.$$

$$|\nu_i\rangle = \sum_\alpha U_{\alpha i} |\nu_\alpha\rangle \quad |\nu_i\rangle \text{ neutrino con masa definida, } i = 1, 2, 3. \quad \Delta m_{13}^2 = \Delta m_{12}^2 + \Delta m_{23}^2$$

fase δ distinta de cero si la oscilación viola la simetría CP

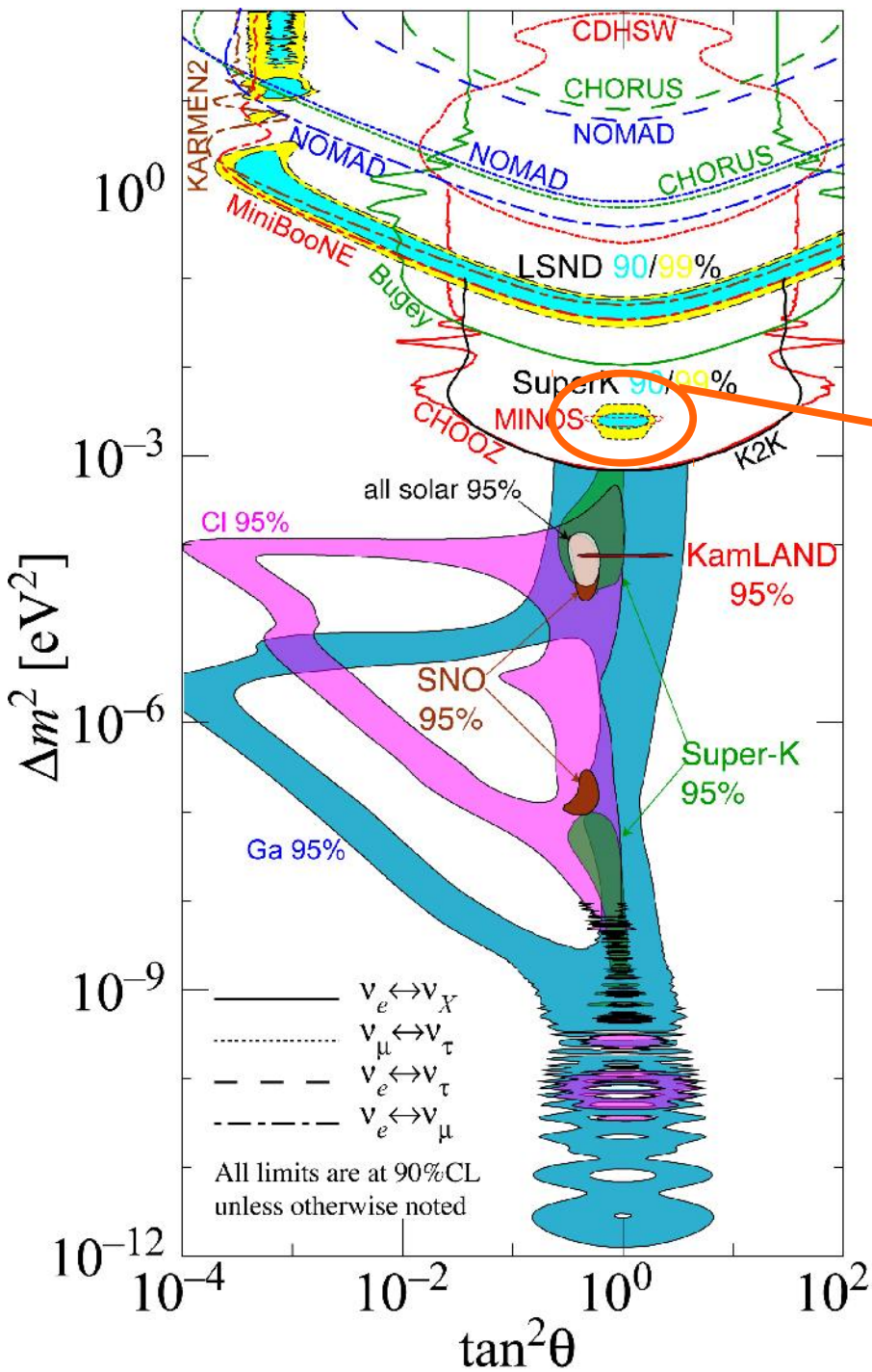
fases α_1 y α_2 distintas de cero si los neutrinos son partículas de Majorana

$$U = \begin{bmatrix} U_{e1} & U_{e2} & U_{e3} \\ U_{\mu1} & U_{\mu2} & U_{\mu3} \\ U_{\tau1} & U_{\tau2} & U_{\tau3} \end{bmatrix}$$

$s_{ij} = \sin\theta_{ij}, \quad c_{ij} = \cos\theta_{ij}$

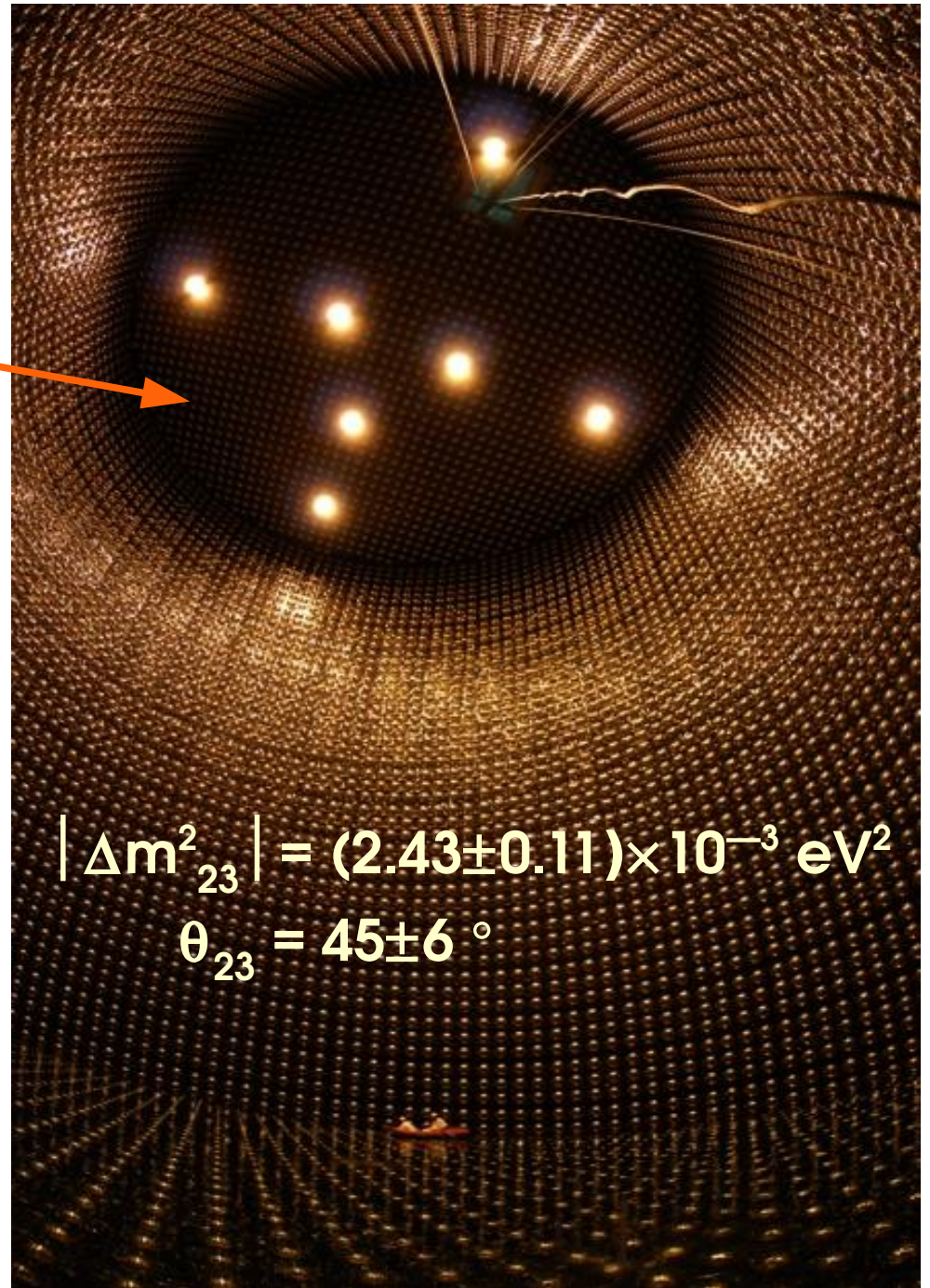
$$= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_{13} & 0 & s_{13}e^{-i\delta} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13}e^{i\delta} & 0 & c_{13} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e^{i\alpha_1/2} & 0 & 0 \\ 0 & e^{i\alpha_2/2} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} c_{12}c_{13} & s_{12}c_{13} & s_{13}e^{-i\delta} \\ -s_{12}c_{23} - c_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta} & c_{12}c_{23} - s_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta} & s_{23}c_{13} \\ s_{12}s_{23} - c_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta} & -c_{12}s_{23} - s_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta} & c_{23}c_{13} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e^{i\alpha_1/2} & 0 & 0 \\ 0 & e^{i\alpha_2/2} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$



<http://hitoshi.berkeley.edu/neutrino>

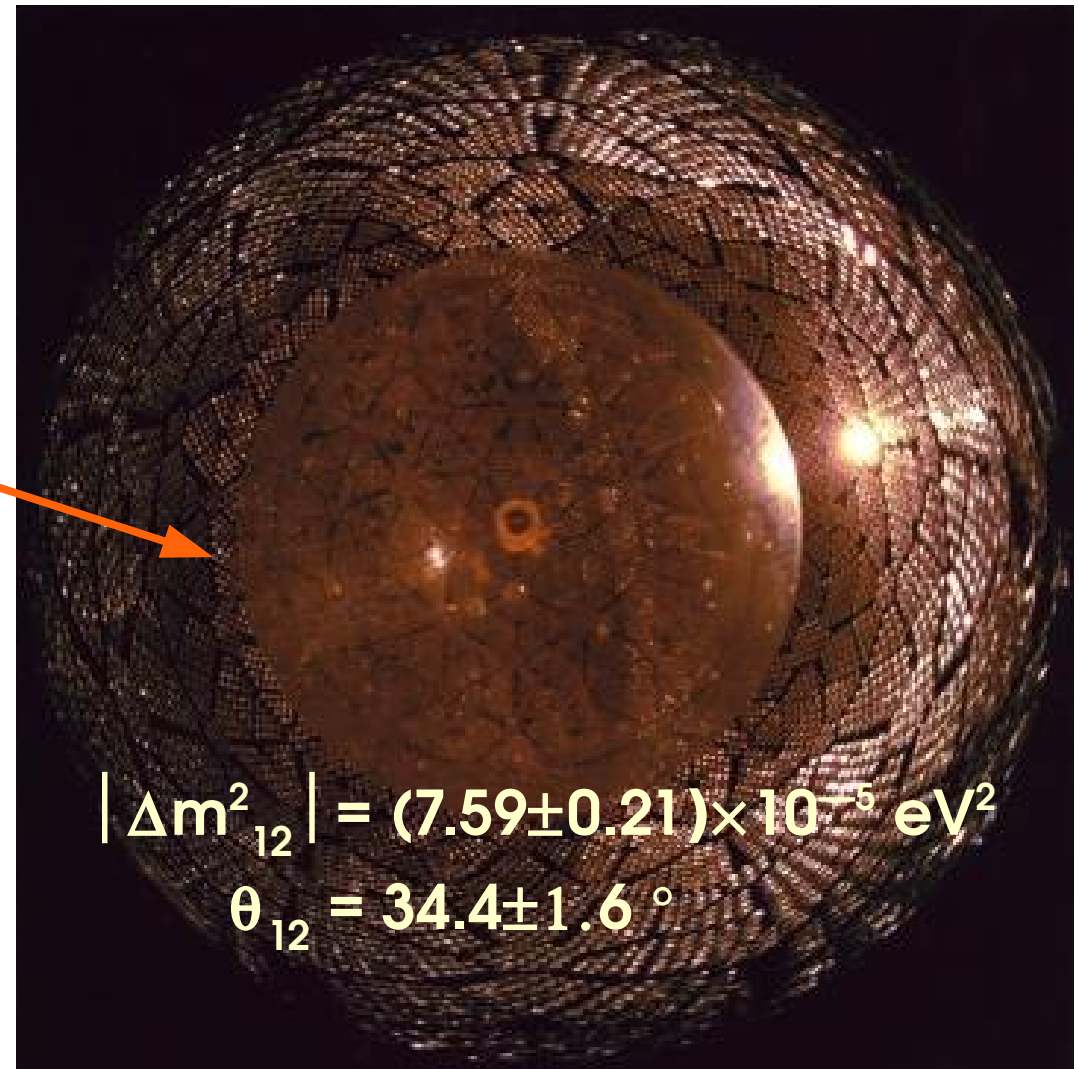
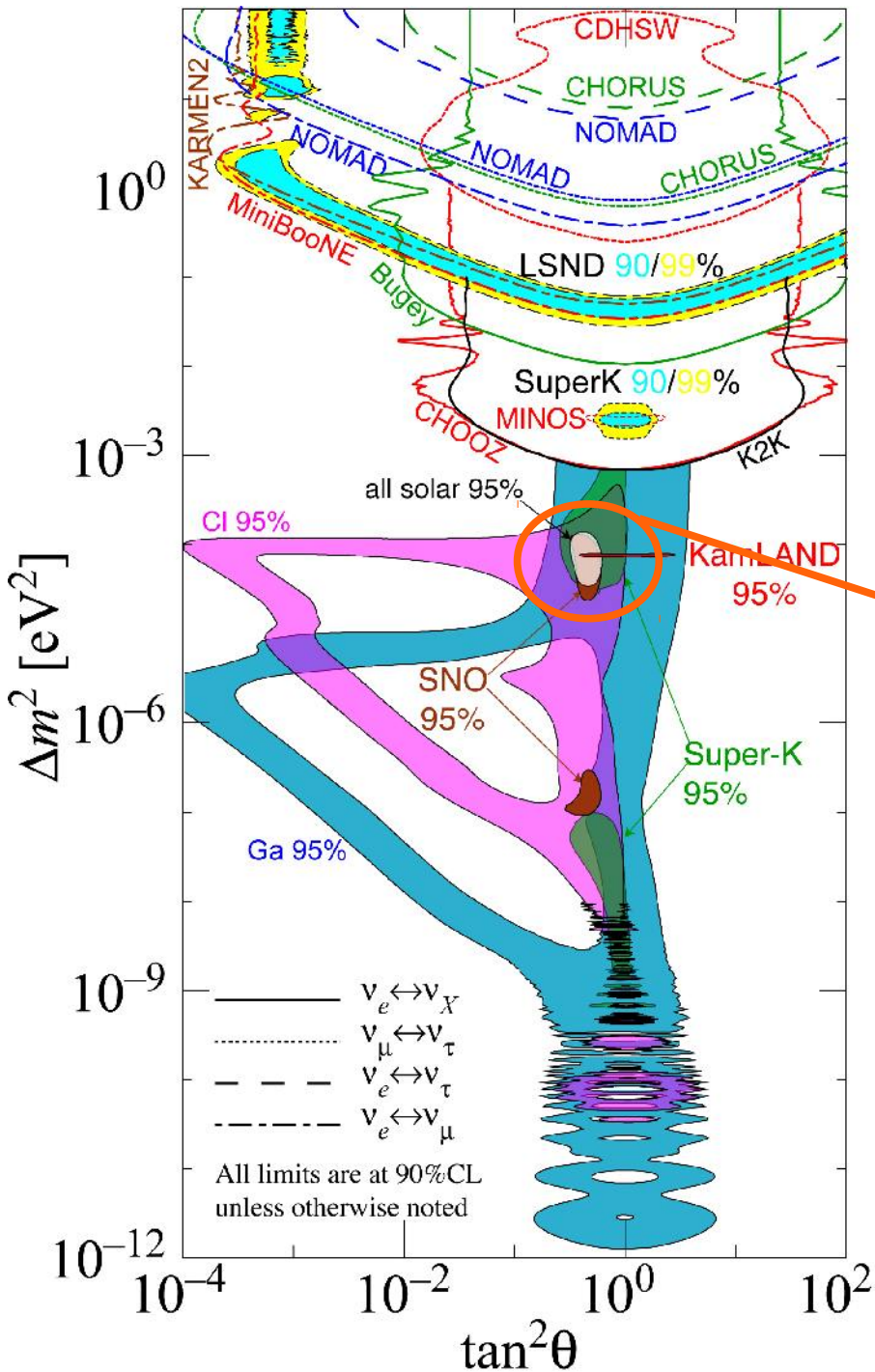
Atmosféricos



$$|\Delta m_{23}^2| = (2.43 \pm 0.11) \times 10^{-3} \text{ eV}^2$$

$$\theta_{23} = 45 \pm 6^\circ$$

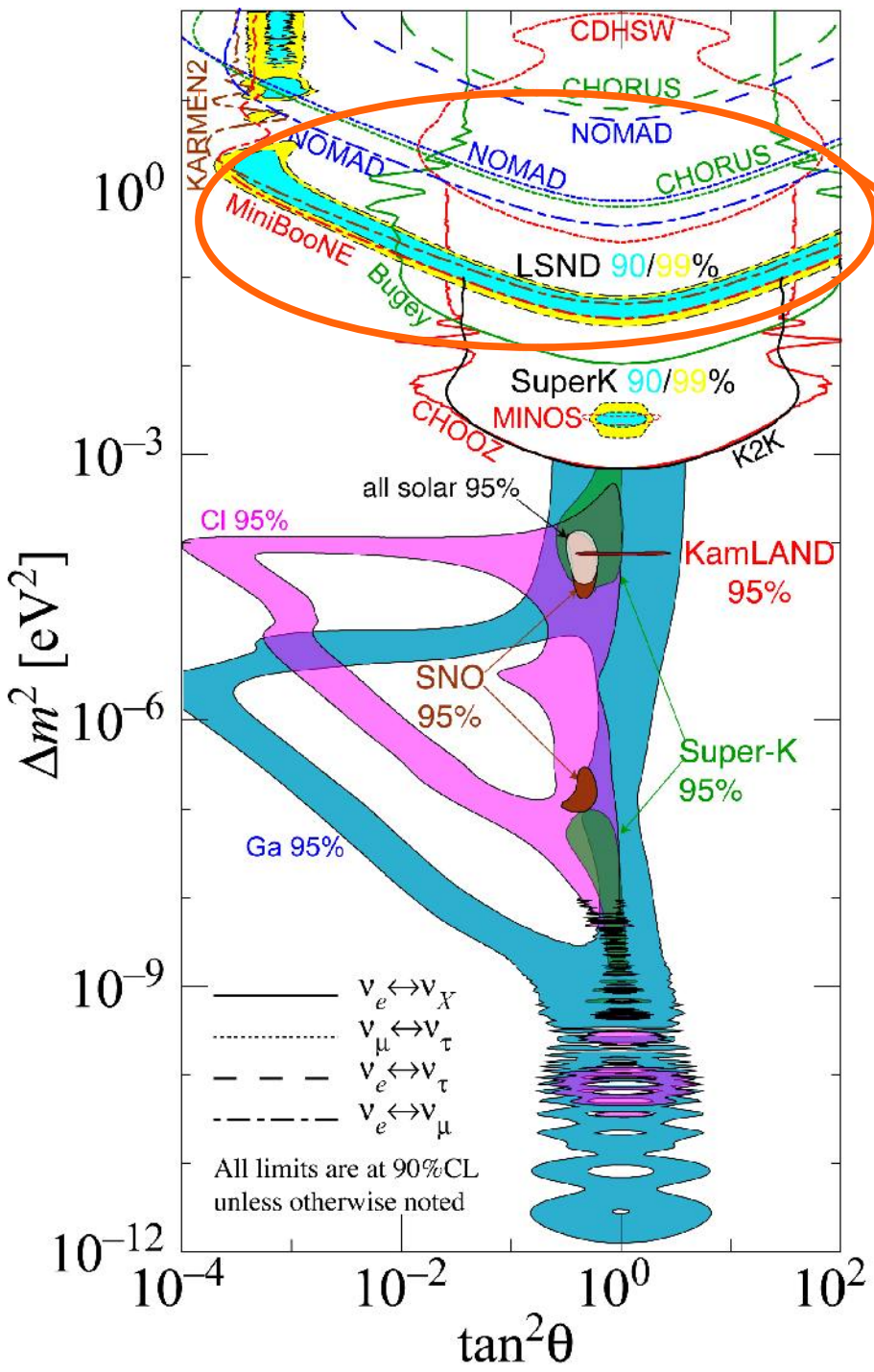
Solares+KamLAND



En el Sol: a través del efecto MSW

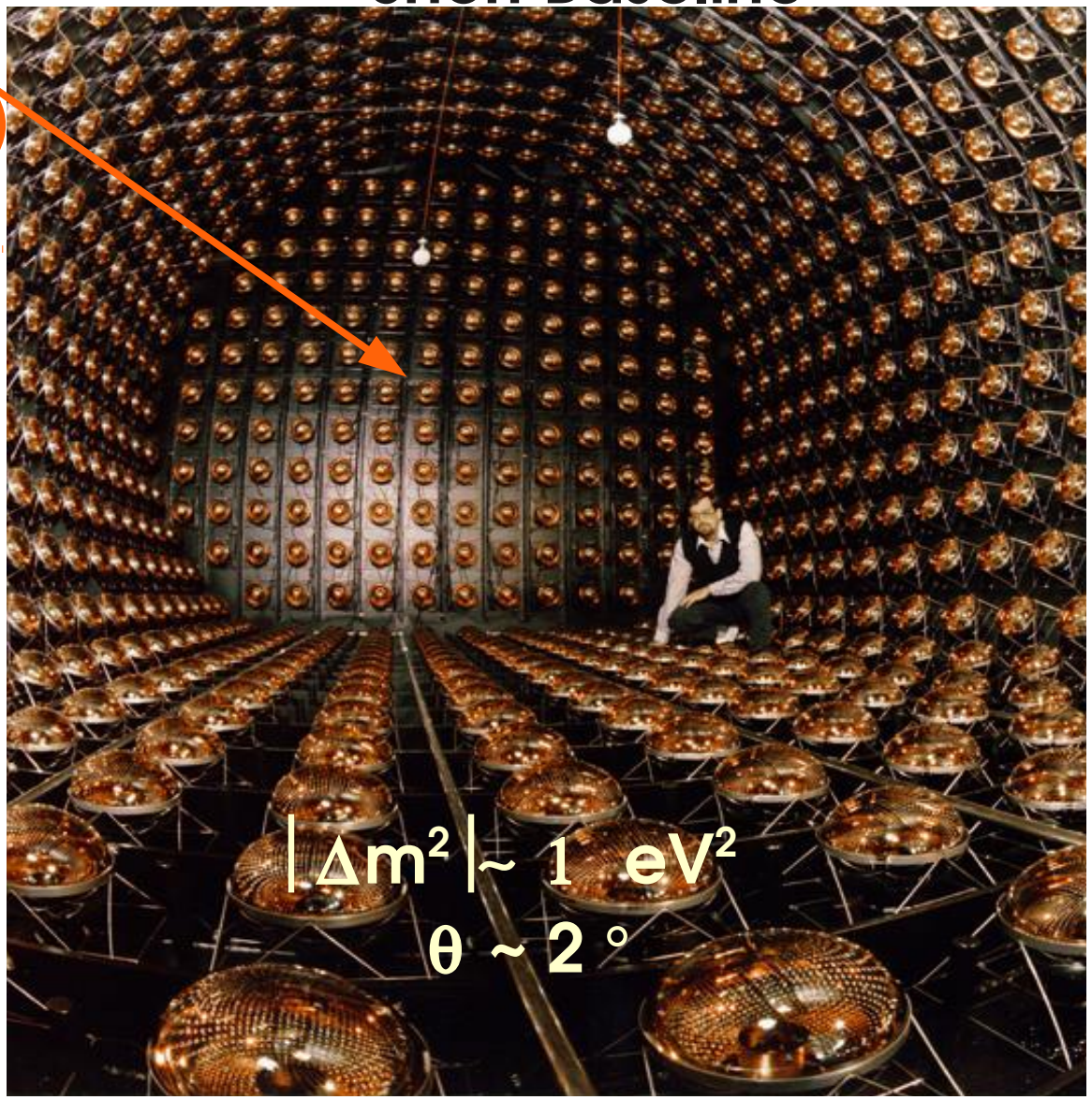
S.P. Mikheyev, A.Y. Smirnov, Sov. J. Nucl. Phys. **42**, 913 (1985)

L. Wolfenstein, PRD **17**, 2369 (1978)



<http://hitoshi.berkeley.edu/neutrino>

Short Baseline

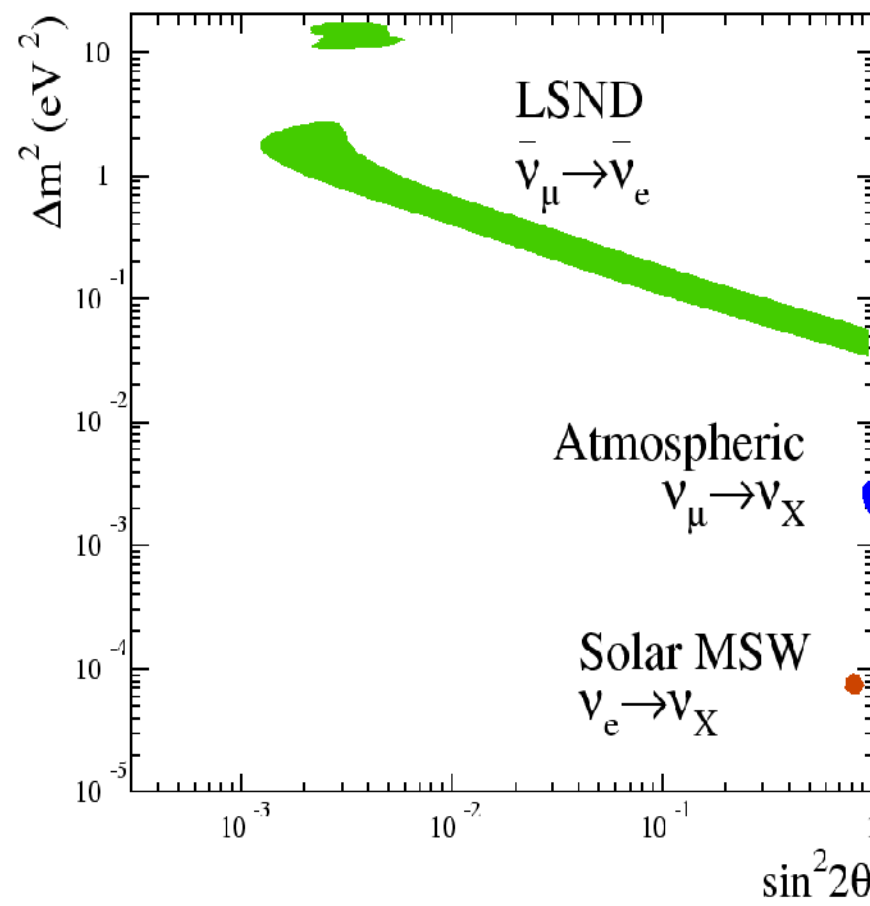
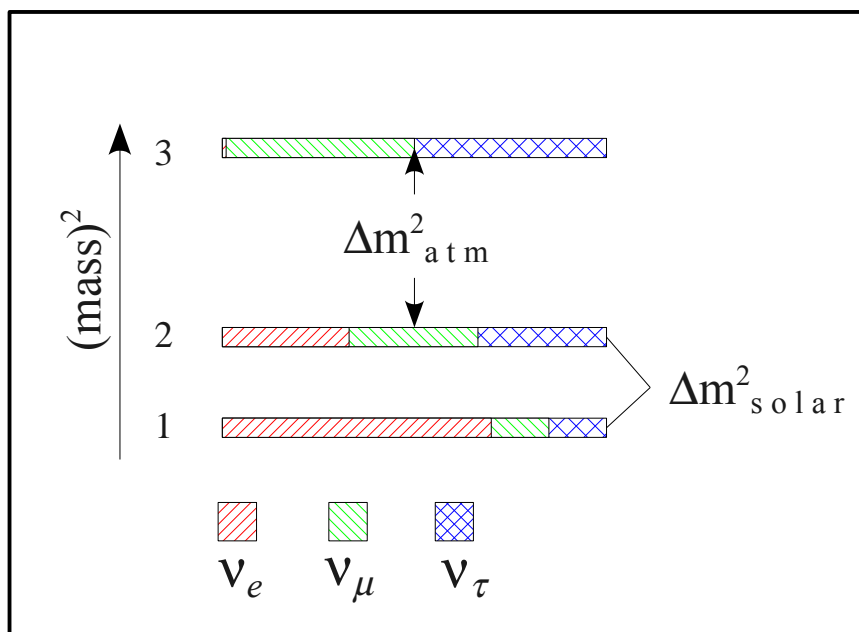


Intuición: ¿Algo no encaja?

Implicación de señal "short baseline" (LSND)

En conflicto con resultados de neutrinos solares y atmosféricos si hay sólo 3 ν 's

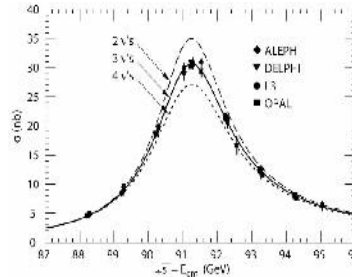
3 neutrinos \Rightarrow 2 distintas Δm^2 's



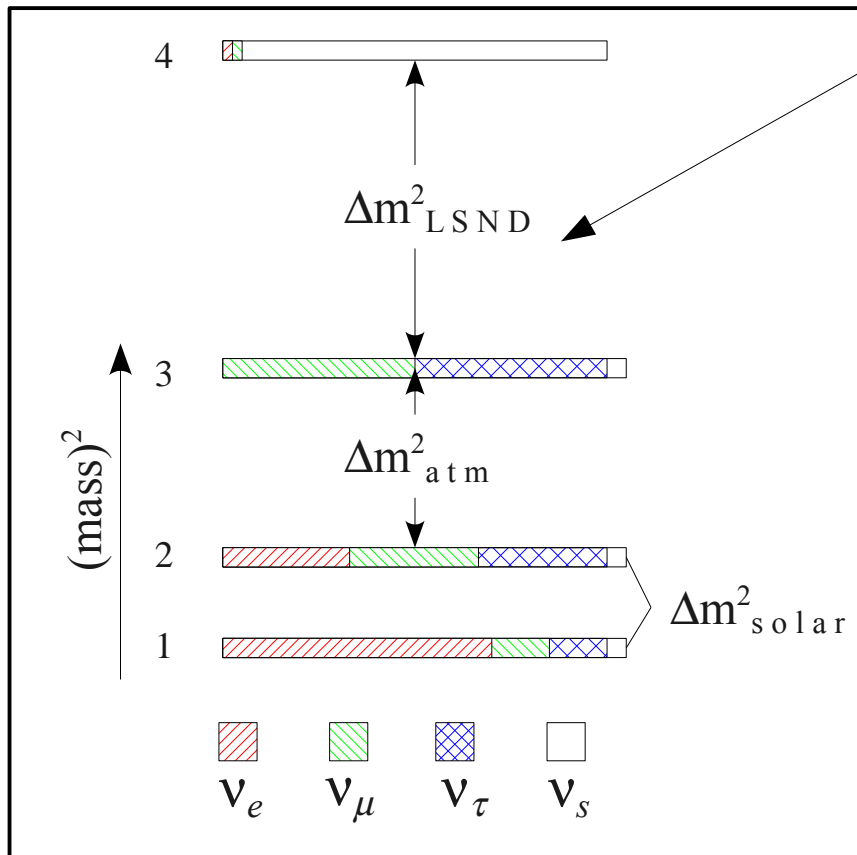
$$\Delta m^2_{\text{LSND}} \neq \Delta m^2_{\text{atm}} + \Delta m^2_{\text{solar}}$$

Neutrinos "estériles"

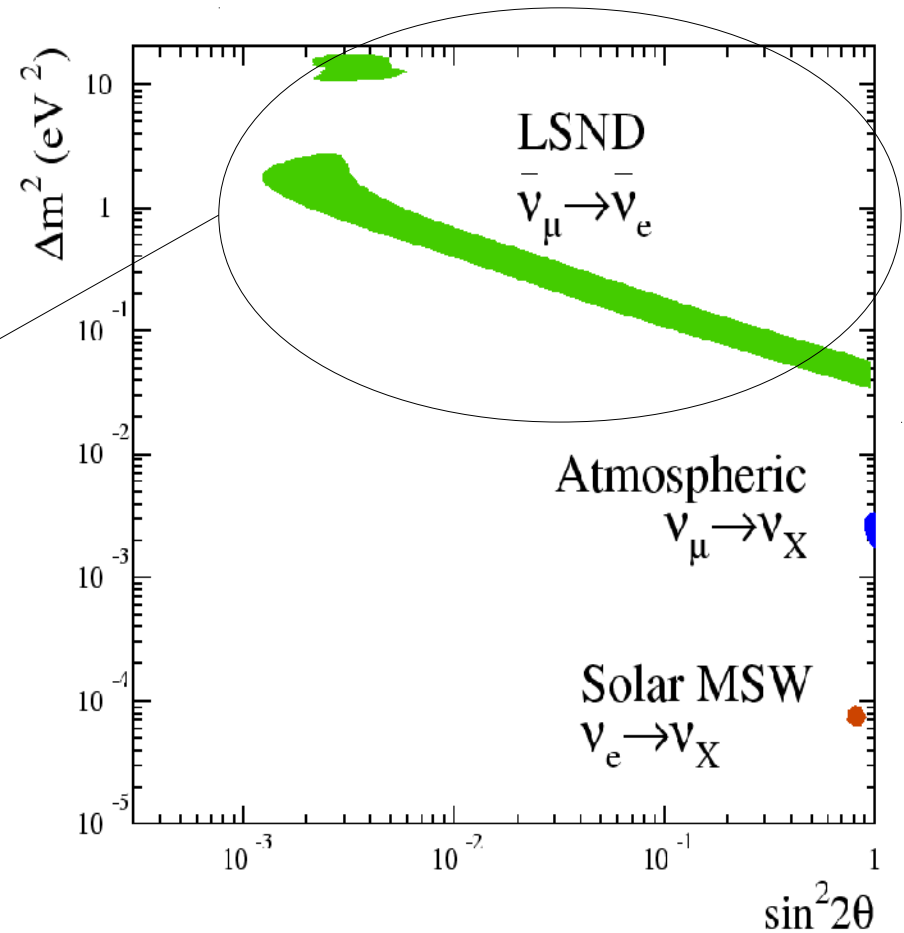
LEP exp's (anchura del Z^0):
 "sólo 3 ν 's activos ligeros"



3 activos + 1 estéril:



4 neutrinos \Rightarrow 3 Δm^2 's



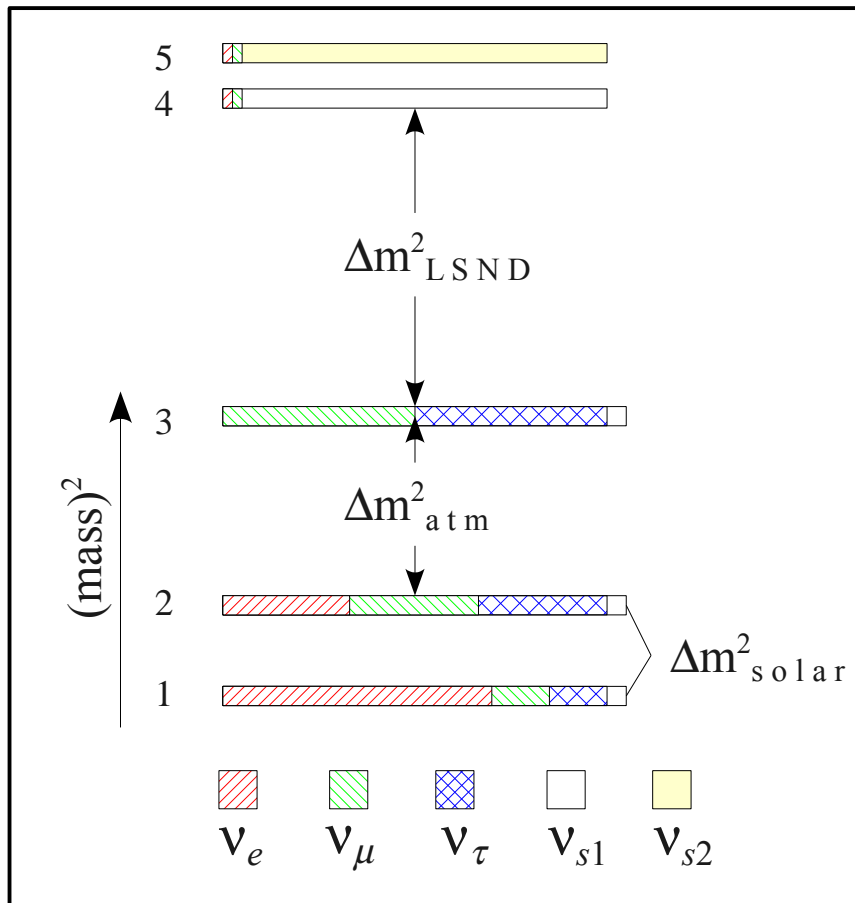
modelo 3+1:

$$P(\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e) = \underbrace{\sin^2 2\theta}_{4|U_{e4}|^2|U_{\mu 4}|^2} \sin^2(1.27 \underbrace{\Delta m^2}_{\Delta m_{41}^2} L/E)$$

Neutrinos "estériles" (cont.)

Oscilaciones con neutrinos estériles con violación de CP

3 activos + 2 estériles:



Diferencia entre probabilidades de aparición entre ν y $\bar{\nu}$.
Proveniente de término de interferencia con fase φ_{45} .

modelo 3+2:

$$P(\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e) =$$

$$4 |U_{e4}|^2 |U_{\mu 4}|^2 \sin^2(1.27 \Delta m_{41}^2 L/E)$$

$$+ 4 |U_{e5}|^2 |U_{\mu 5}|^2 \sin^2(1.27 \Delta m_{51}^2 L/E)$$

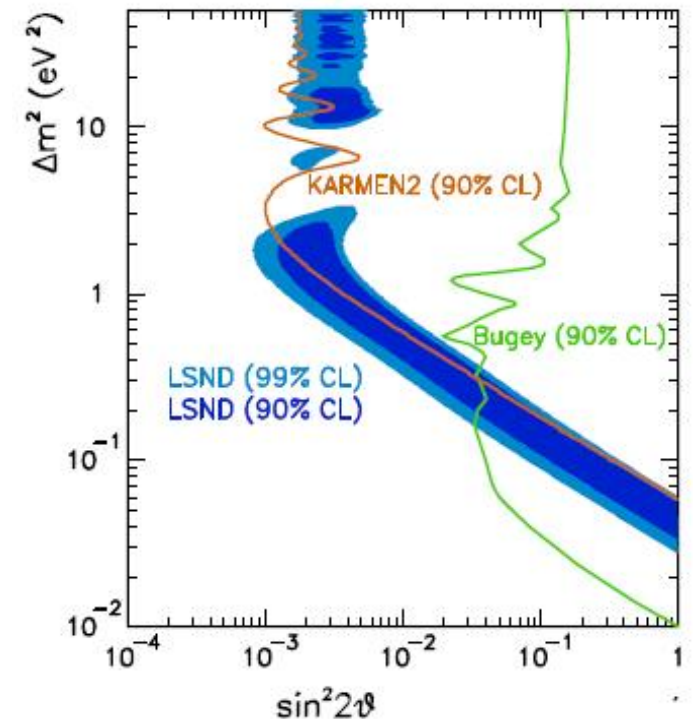
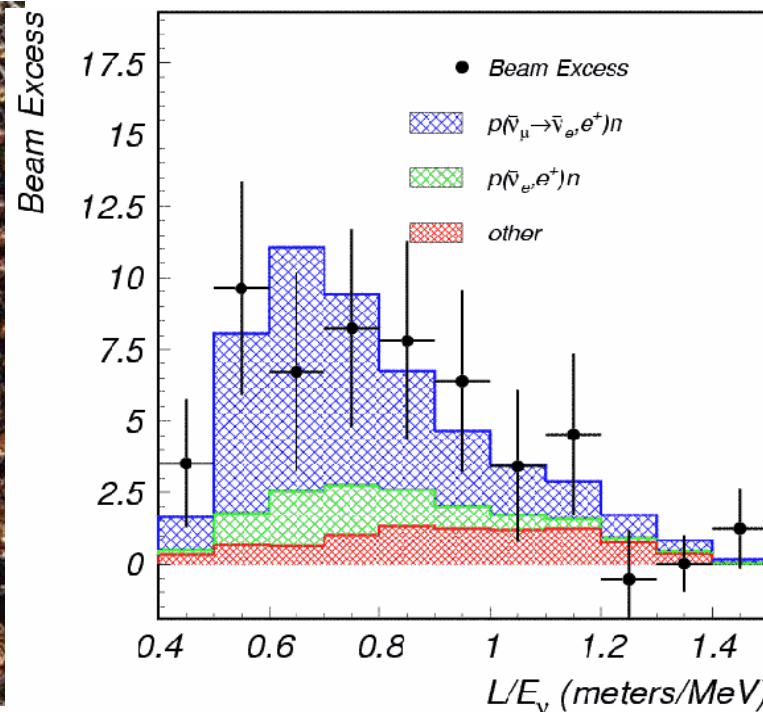
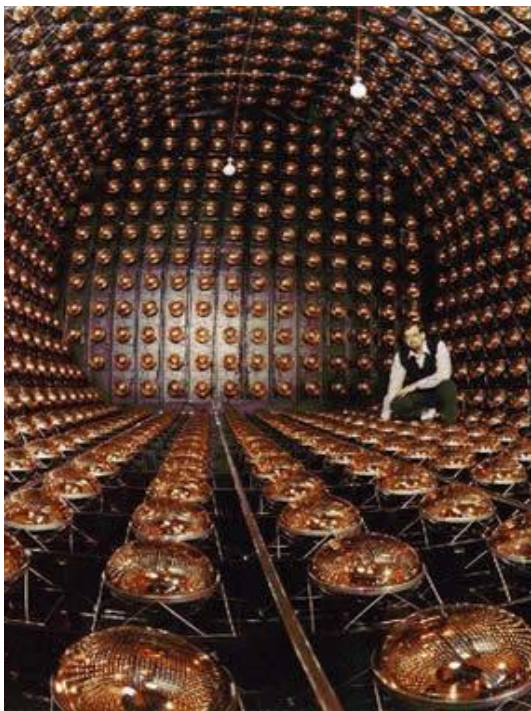
$$+ 4 |U_{e4}| |U_{\mu 4}| |U_{e5}| |U_{\mu 5}|$$

$$\sin(1.27 \Delta m_{41}^2 L/E) \sin(1.27 \Delta m_{51}^2 L/E)$$

$$\cos(1.27 \Delta m_{54}^2 L/E \pm \varphi_{45})$$

MiniBooNE motivation

- LSND experiment (Los Alamos)
- Excess of $\bar{\nu}_e$ in a $\bar{\nu}_\mu$ beam: $\text{Excess} = 87.9 \pm 22.4 \pm 6$ (3.8σ)
- Used stopped pion beam: $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$, $\mu^+ \rightarrow e^+ + \bar{\nu}_\mu + \nu_e$
 ν_e signature: Cherenkov light from e^+ with delayed n capture (2.2 MeV γ)
- Interpreted as 2 ν oscillations: $P(\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e) = \sin^2 2\theta \sin^2(1.27 \Delta m^2 L/E)$
 $= (0.245 \pm 0.067 \pm 0.045)\%$



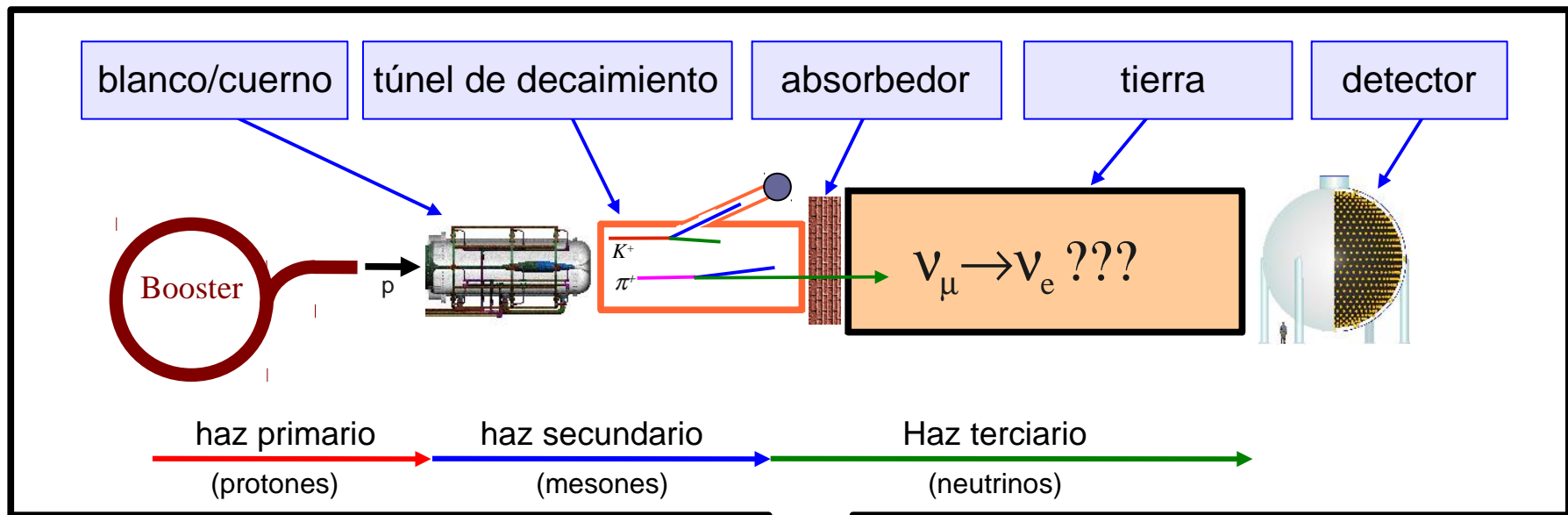
MiniBooNE



A. A. Aguilar-Arevalo¹², C. E. Anderson¹⁵, S. J. Brice⁶, B. C. Brown⁶, L. Bugel¹¹, J. M. Conrad¹¹, Z. Djurcic², B. T. Fleming¹⁵, R. Ford⁶, F. G. Garcia⁶, G. T. Garvey⁹, J. Mirabal⁹, J. Grange⁷, J. A. Green^{8,9}, R. Imlay¹⁰, R. A. Johnson³, G. Karagiorgi¹¹, T. Katori^{8,11}, T. Kobilarcik⁶, S. K. Linden¹⁵, W. C. Louis⁹, K. B. M. Mahn⁵, W. Marsh⁶, C. Mauger⁹, W. Metcalf¹⁰, G. B. Mills⁹, C. D. Moore⁶, J. Mousseau⁷, R. H. Nelson⁴, V. Nguyen¹¹, P. Nienaber¹⁴, J. A. Nowak¹⁰, B. Osmanov⁷, Z. Pavlovic⁹, D. Perevalov¹, C. C. Polly⁶, H. Ray⁷, B. P. Roe¹³, A. D. Russell⁶, M. H. Shaevitz⁵, M. Sorel^{5*}, J. Spitz¹⁵, I. Stancu¹, R. J. Stefanski⁶, R. Tayloe⁸, M. Tzanov⁴, R. G. Van de Water⁹, M. O. Wascko^{10†}, D. H. White⁹, M. J. Wilking⁴, G. P. Zeller⁶, E. D. Zimmerman⁴

(The MiniBooNE Collaboration)

Mini-Booster Neutrino Experiment



L/E similar a LSND

MiniBooNE ~ 500 m / ~ 500 MeV

LSND ~ 30 m / 30 MeV

Haz enfocado, "cuerno magnético"

Polaridad \rightarrow neutrinos o anti-neutrinos

Detector Cherenkov

800 ton aceite mineral



Mini-Booster Neutrino Experiment

blanco/cuerno

túnel de decaimiento

absorbedor

tierra

detector

Detector

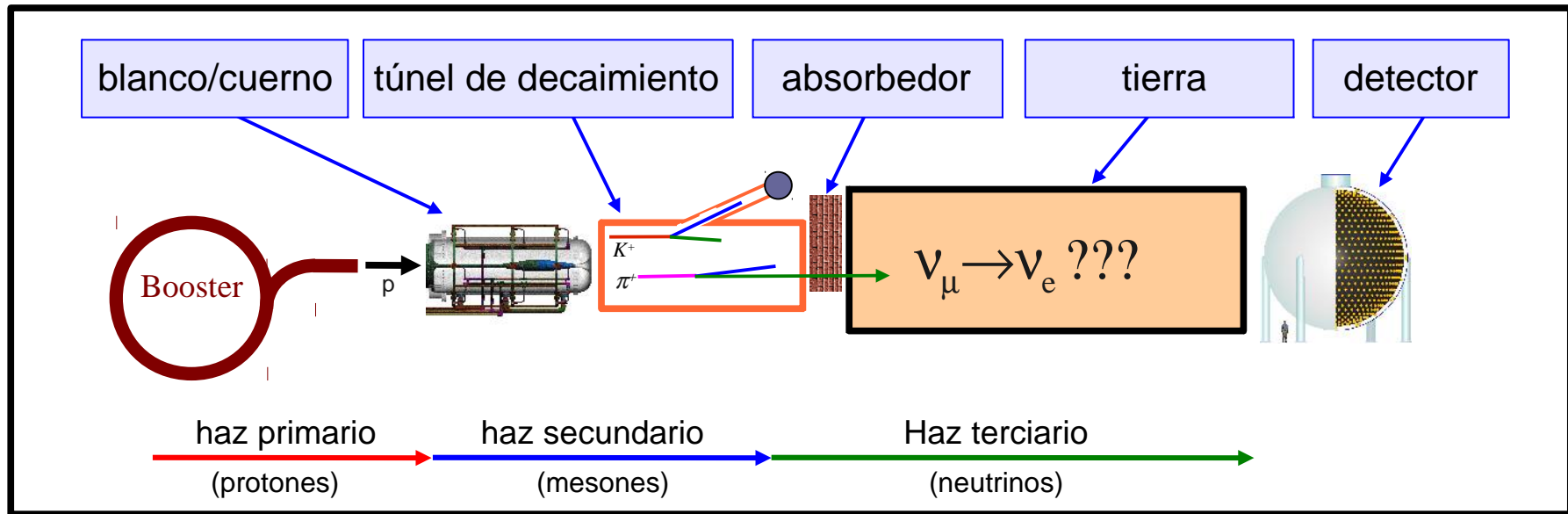
- A 541 metros del blanco
- 3 metros bajo tierra
- 12.2 metros de diámetro - esfera-
(10 metros volumen "fiducial")
- Lleno con 800 t aceite mineral (CH_2) puro
(volumen fiducial: 450 t)
- 1280 fototubos interiores,
- 240 fototubos de "veto"

Simulado con Monte Carlo en GEANT3

Detector Cherenkov
800 ton aceite mineral



Mini-Booster Neutrino Experiment



$$P(\bar{\nu}_{\mu} \rightarrow \bar{\nu}_{e}) = \sin^2 2\theta \sin^2(1.27 \Delta m^2 L/E)$$

Modo de Neutrinos: (cuerno con polaridad positiva)

Búsqueda de $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{e}$ con $6.5E20$ POT → **supone conservación de CP**

Modo de Antineutrinos: (cuerno con polaridad negativa)

Búsqueda de $\bar{\nu}_{\mu} \rightarrow \bar{\nu}_{e}$ con $5.66E20$ POT → **prueba directa de LSND**

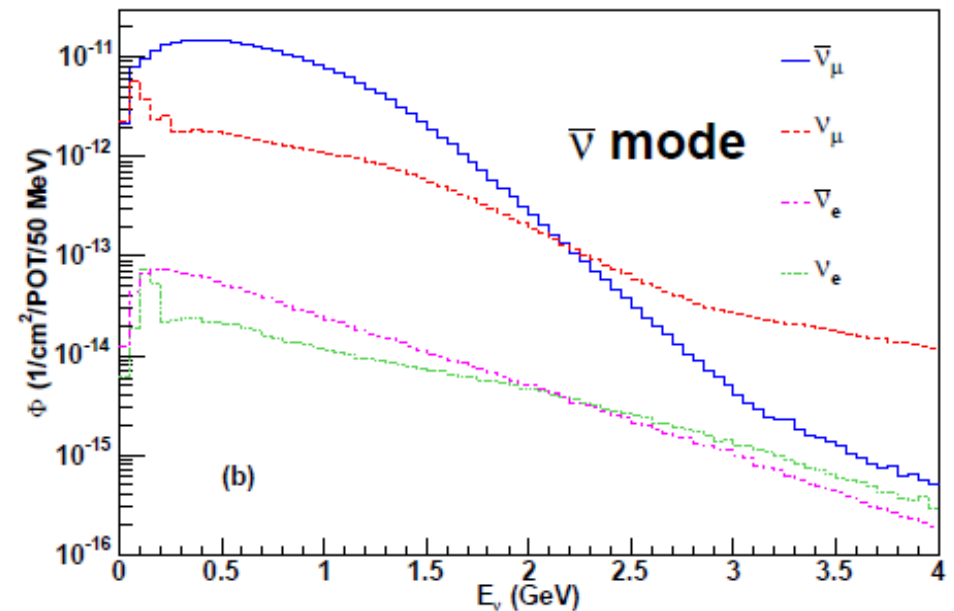
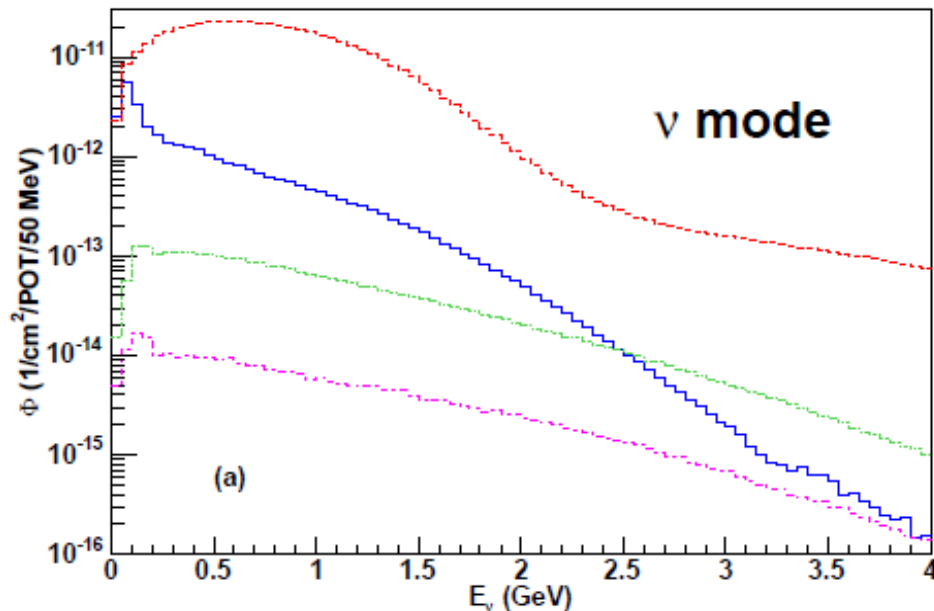
Flujo de neutrinos

Neutrino mode:

ν_μ	93.6 %
$\bar{\nu}_\mu$	5.86 % (WS)
$\nu_e + \bar{\nu}_e$	0.57 %

Anti-neutrino mode:

ν_μ	15.7 % (WS)
$\bar{\nu}_\mu$	83.7 %
$\nu_e + \bar{\nu}_e$	0.6 %



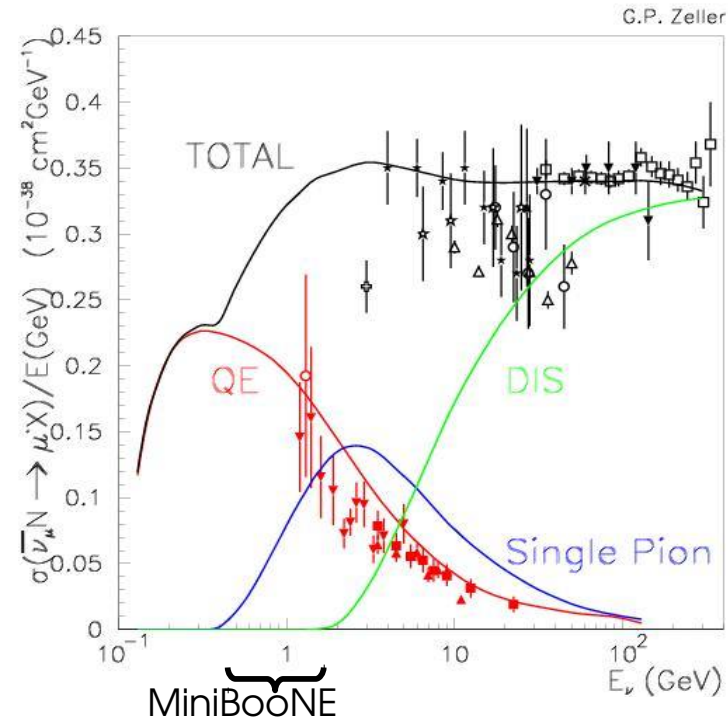
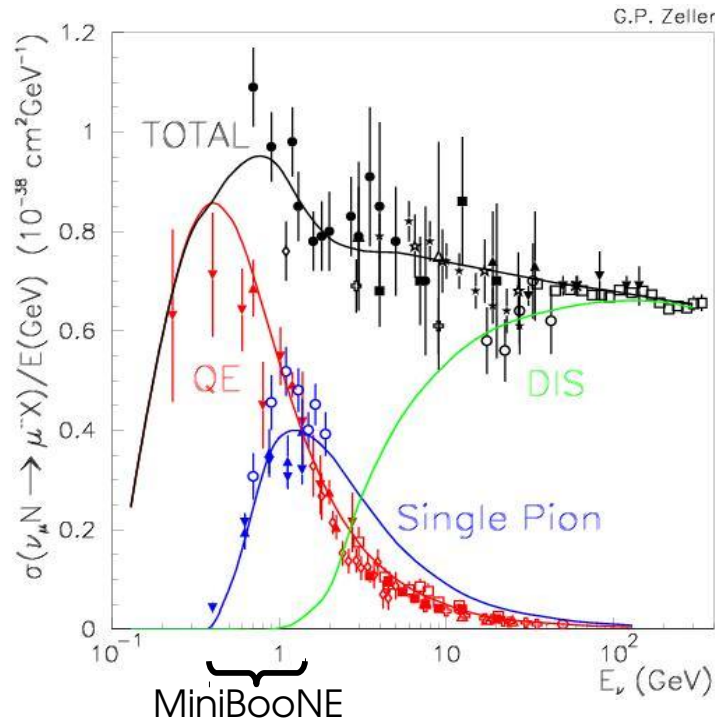
Phys.Rev. D79, 072002 (2009)

WS: "wrong sign"

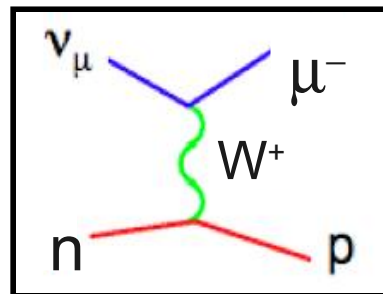
Utiliza datos de producción de π^\pm del experimento HARP (CERN)

Interacciones de ν y $\bar{\nu}$

Secciones eficaces modeladas con generador NUANCE (D. Casper, U.C. Irvine)

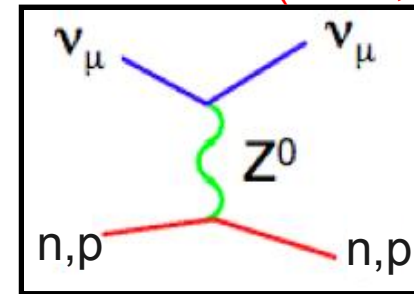


(T. Katori)
CCQE (MB ✓)



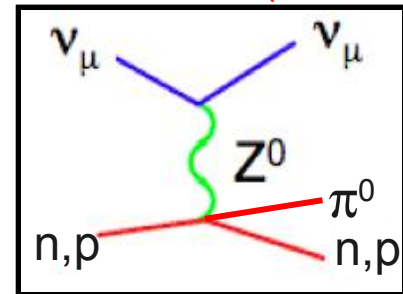
PRL **100**, 032301 (2008)
PRD **81**, 092005 (2010)

(D. Perevalov)
NC Elastic (MB ✓)



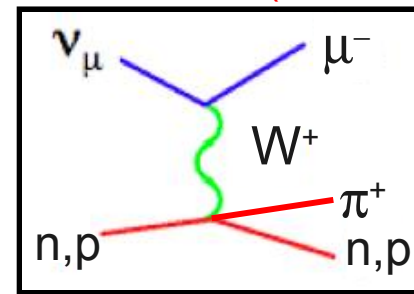
PRD **82**, 092005 (2010)

(C. Anderson, J. Link)
NC pi^0 (MB ✓)



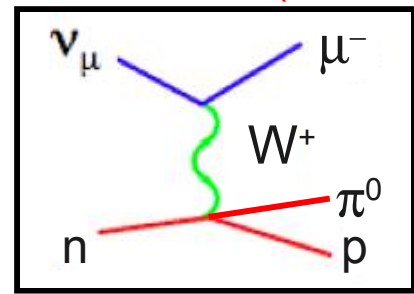
PLB **664**, 41 (2008)
PRD **81**, 013005 (2010)

(S. Linden, M. Wilking)
CC pi^+ (MB ✓)



PRL **103**, 081801 (2009)
PRD **83**, 052007 (2011)

(R. Nelson)
CC pi^0 (MB ✓)

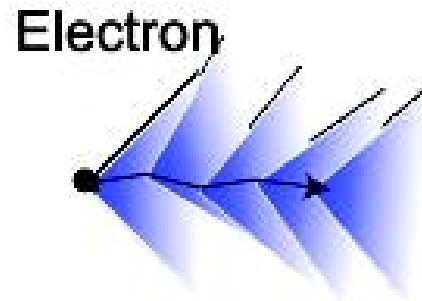
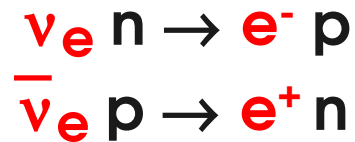
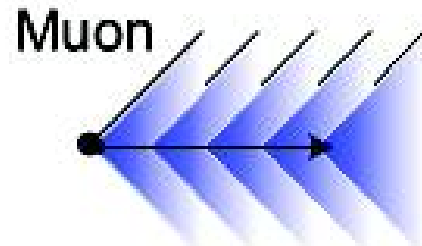
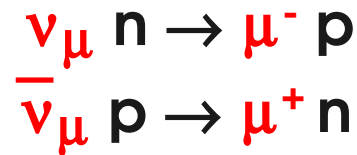


PRD **83**, 052009 (2011)

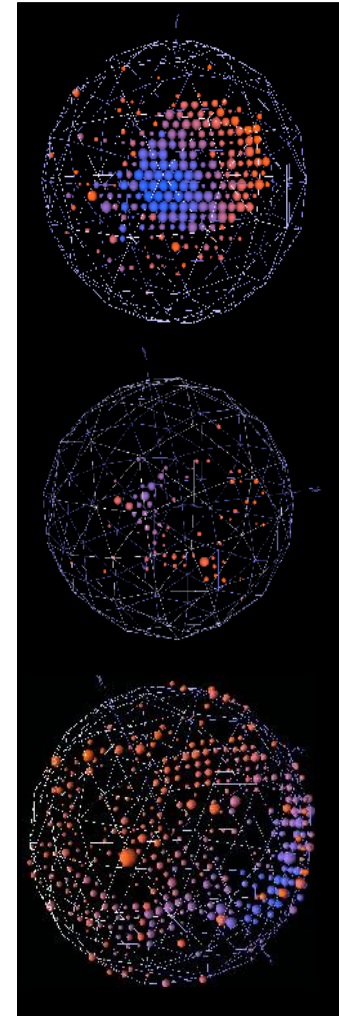
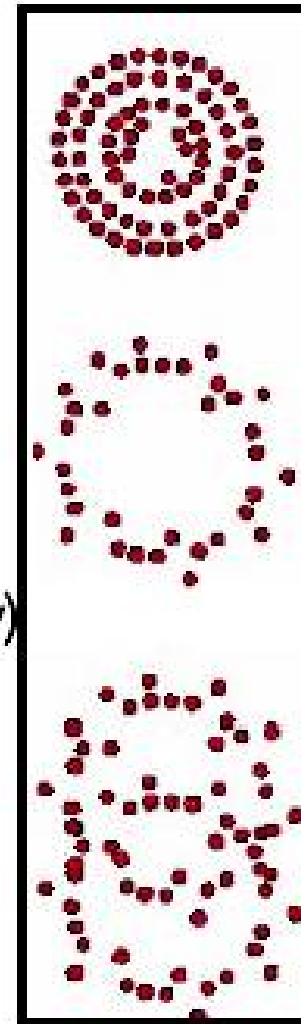
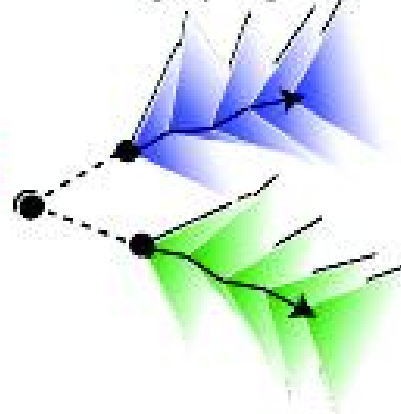
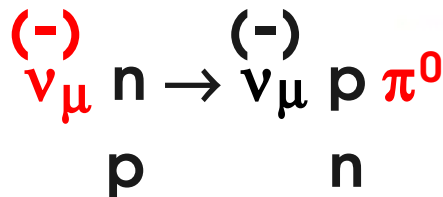
Eventos en MiniBooNE

Identificación basada en *topología de eventos*.

Usa principalmente luz Cherenkov, también luz de centelleo



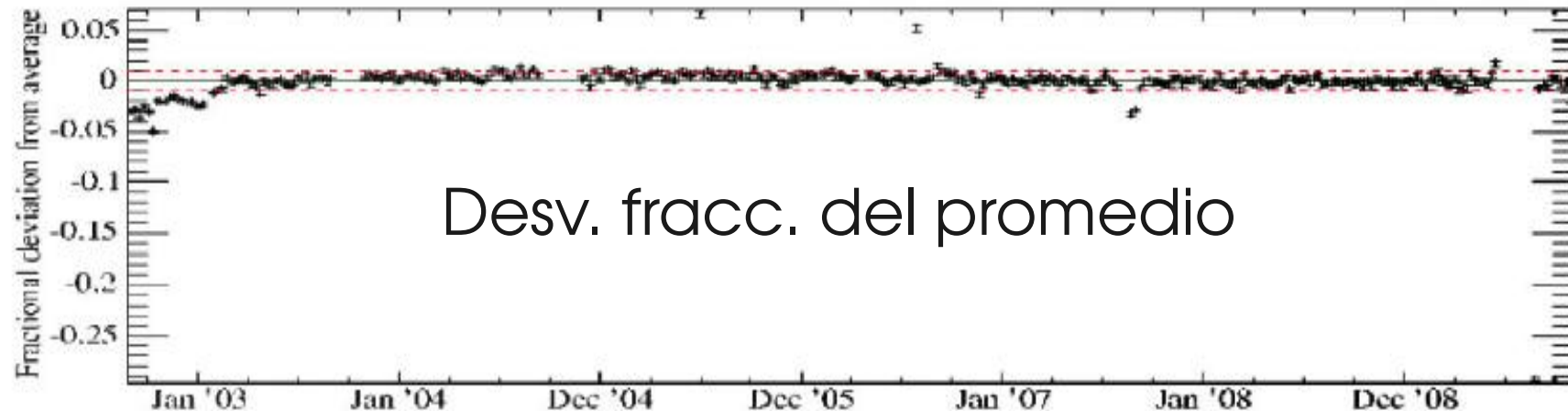
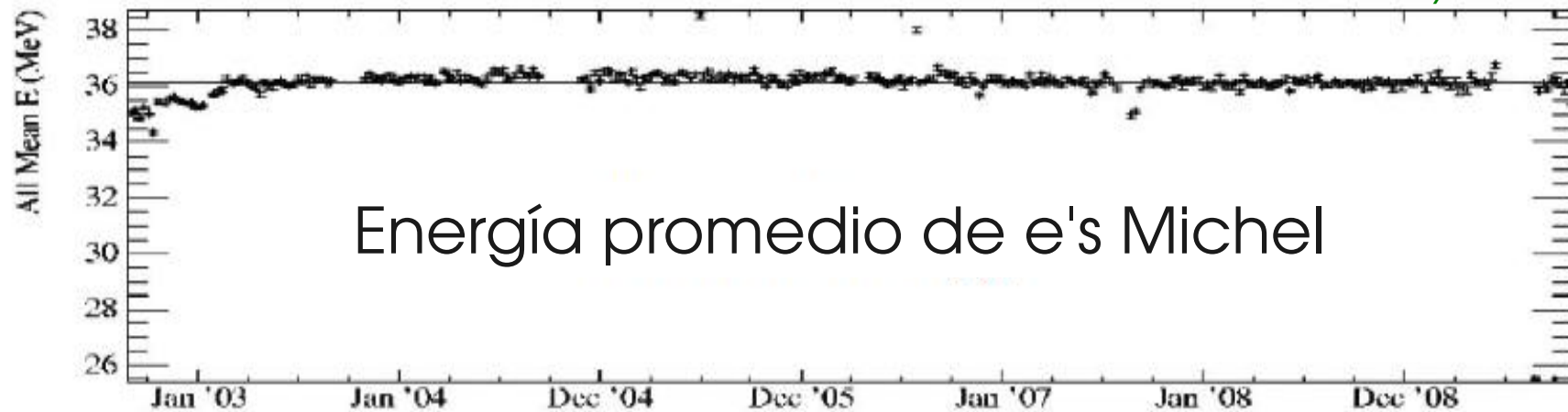
Multi-ring (e.g. $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$)



Estabilidad de calibración

Muy estable, Ejemplo: Variación de energía media de e's Michel
Inferior a 1% desde el 2002 (inicio del exp.)

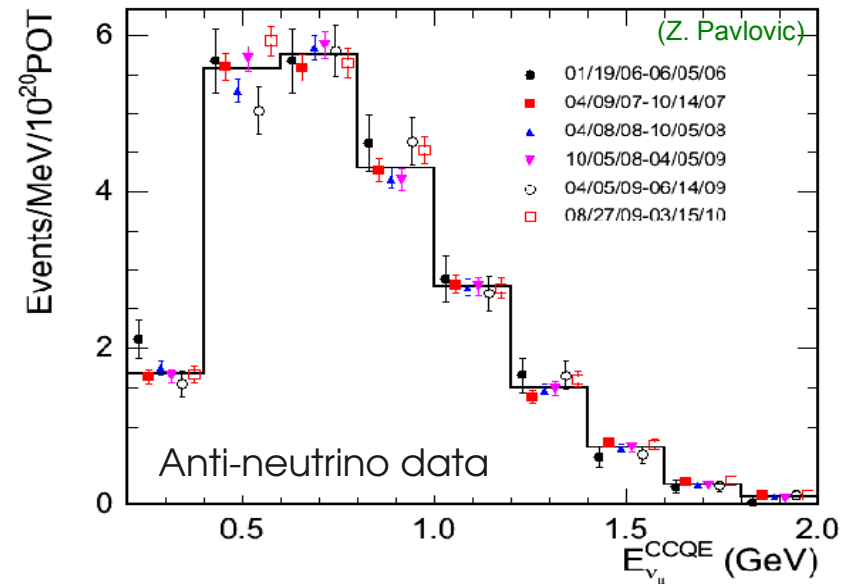
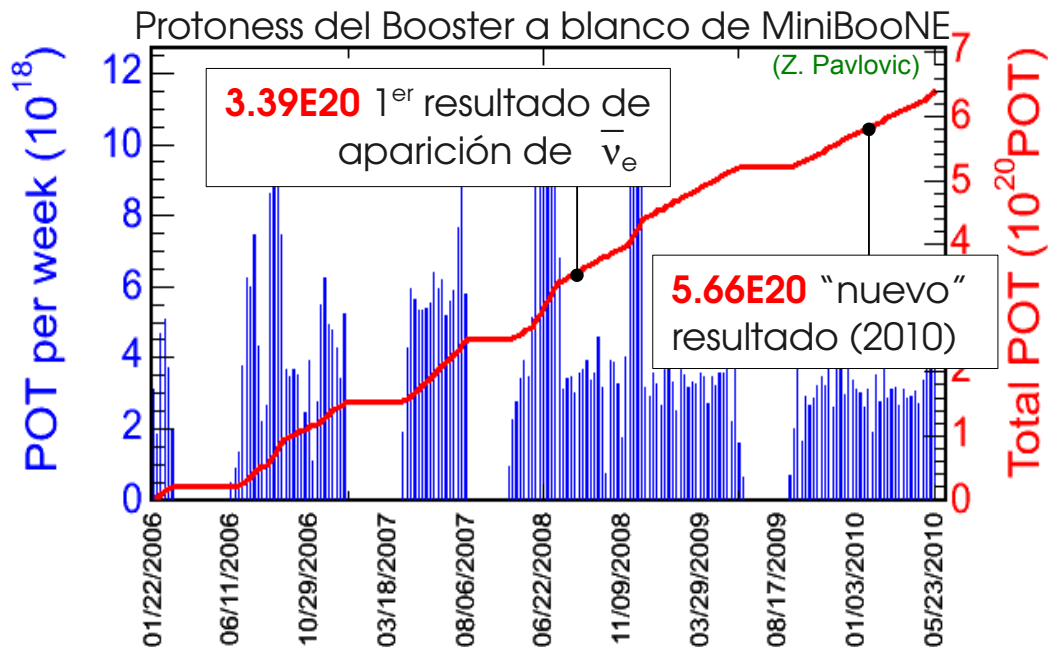
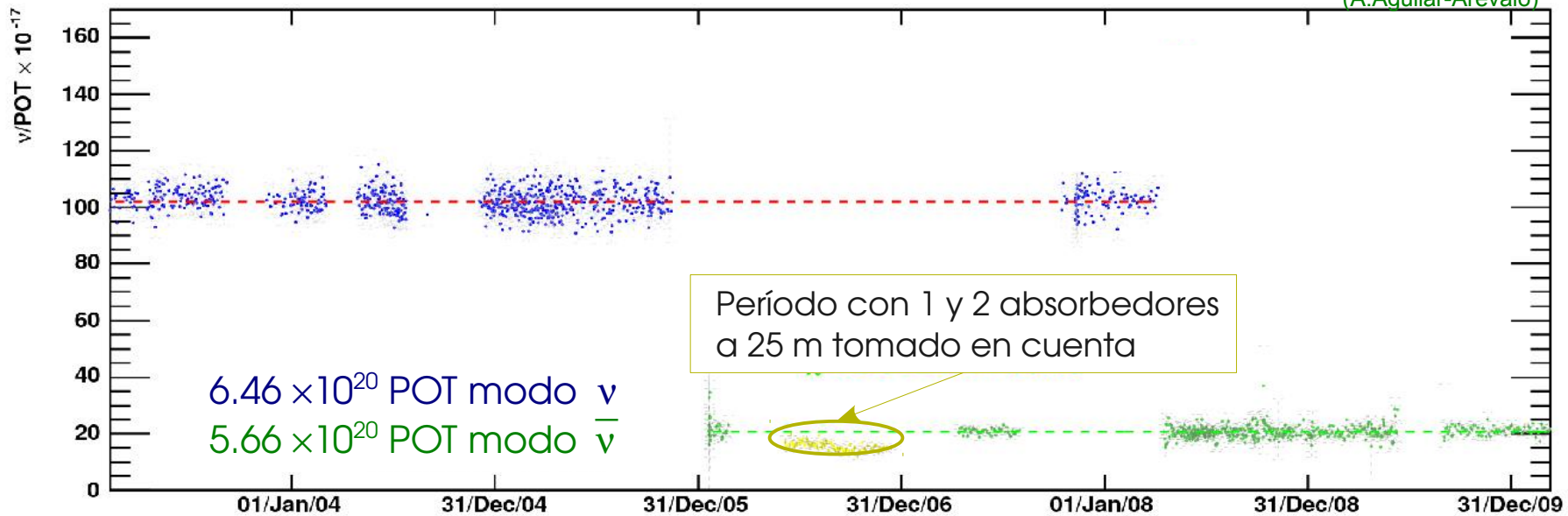
Michel e: electron from muon decay at rest



± 1%

Estabilidad del experimento

(A. Aguilar-Arévalo)



Estrategia de MiniBooNE

Estudiar la aparición de ν_e ($\bar{\nu}_e$) en un haz de ν_μ ($\bar{\nu}_\mu$)

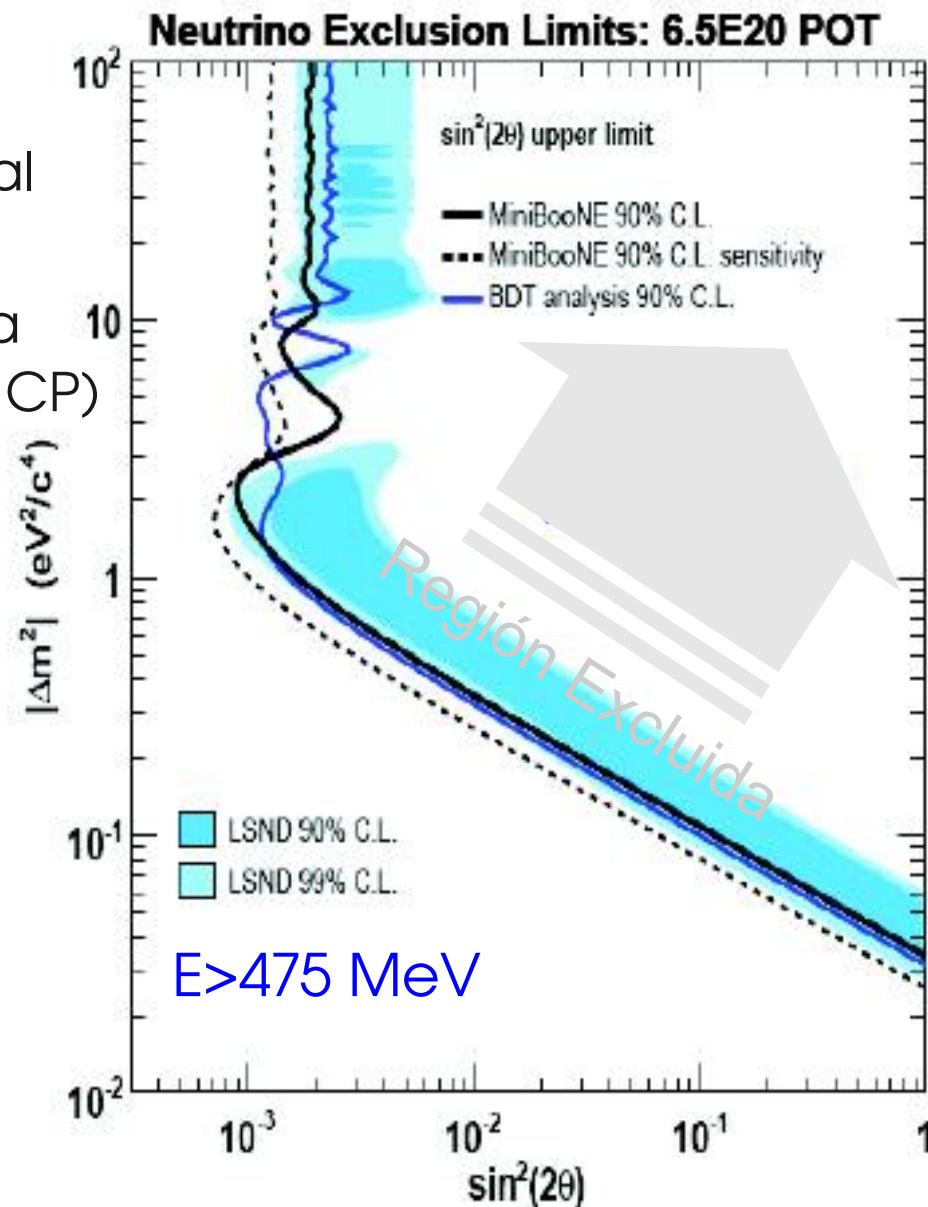
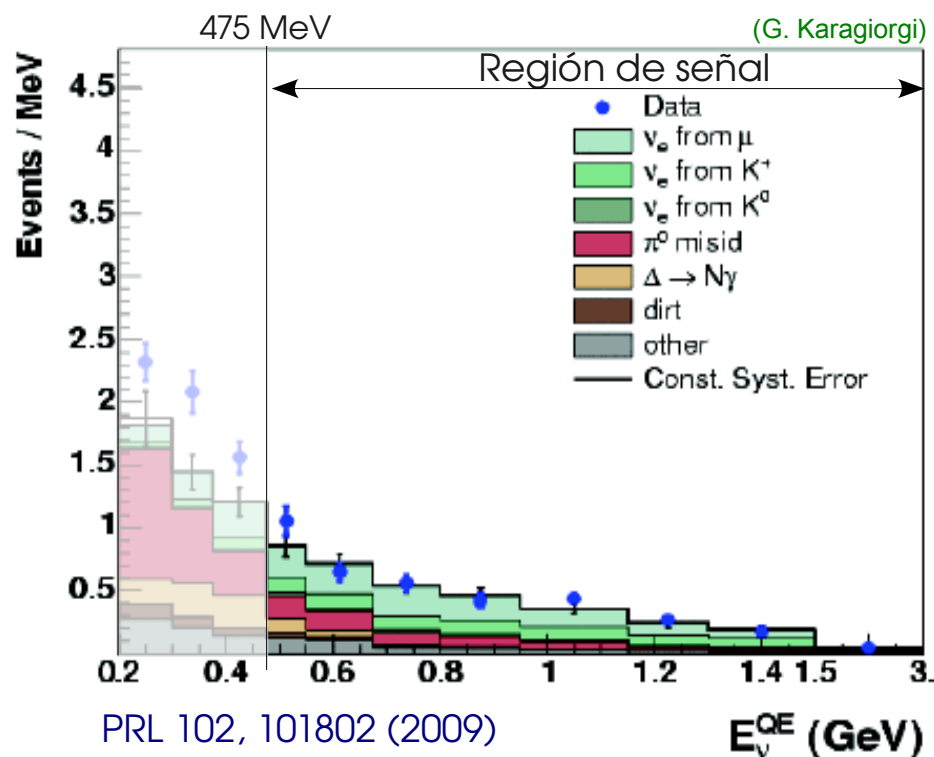
- Comenzar con un haz compuesto principalmente por ν_μ ($\bar{\nu}_\mu$).
- Medir los ν_e ($\bar{\nu}_e$) presentes en el haz.
- Interpretar cualquier exceso de ν_e ($\bar{\nu}_e$) como oscilaciones
 $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ ($\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$).

MB: resultado con neutrinos

6.5E20 POT en modo de neutrinos

No exceso de evts. en región de señal
($E > 475$ MeV).

Excluye oscilaciones de 2 ν 's como la explicación de LSND (si no violación CP)



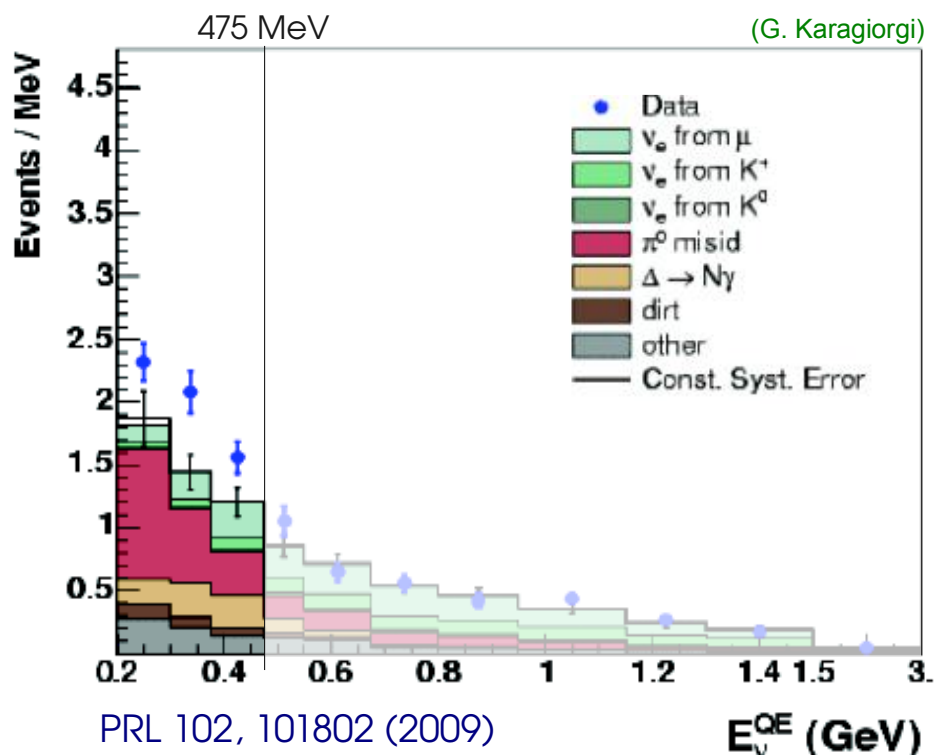
MB: resultado con neutrinos

Región $E < 475$ MeV muestra un **exceso de eventos *tipo- ν_e*** :

$$128.8 \pm 20.4 \pm 38.3 (3\sigma)$$

forma no consistente con osc. de 2ν
Magnitud consistente con LSND

Origen: desconocido. Algunas ideas \rightarrow



Anomaly Mediated Neutrino-Photon interactions at Finite Baryon Density: J.A. Harvey, C.T. Hill, R. J. Hill, arXiv:0708.1281

CP-Violation 3+2 Model: Maltoni & Schwetz, arXiv:0705.0107; T. Goldman, G. J. Stephenson Jr., B. H. J. McKellar, Phys. Rev. D75 (2007) 091301.

Extra Dimensions 3+1 Model: Pas, Pakvasa, & Weiler, Phys. Rev. D72 (2005) 095017.

Lorentz Violation: Katori, Kostelecky, & Tayloe, Phys. Rev. D74 (2006) 105009

CPT Violation 3+1 Model: Barger, Marfatia, & Whisnant, Phys. Lett. B576 (2003) 303

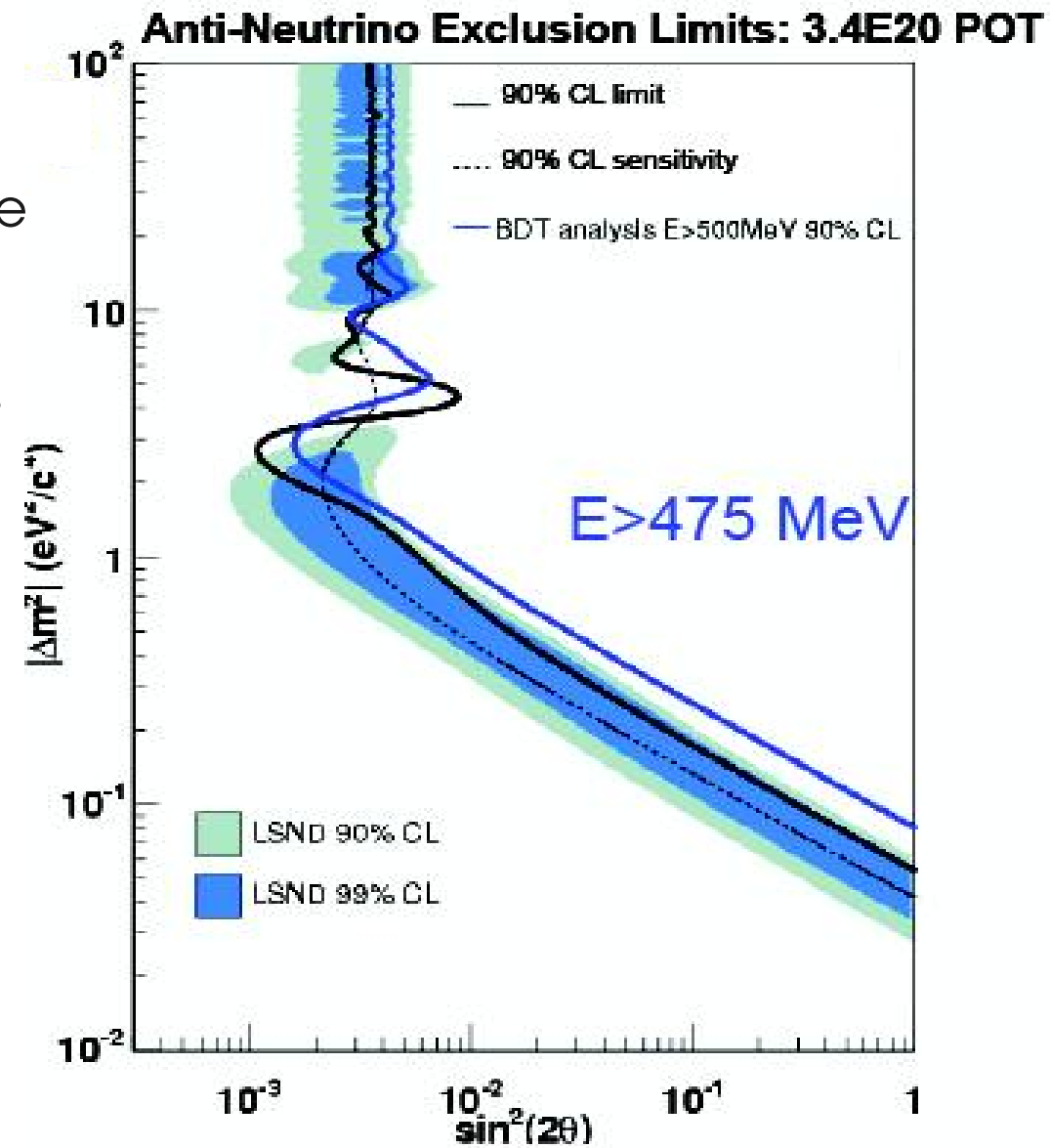
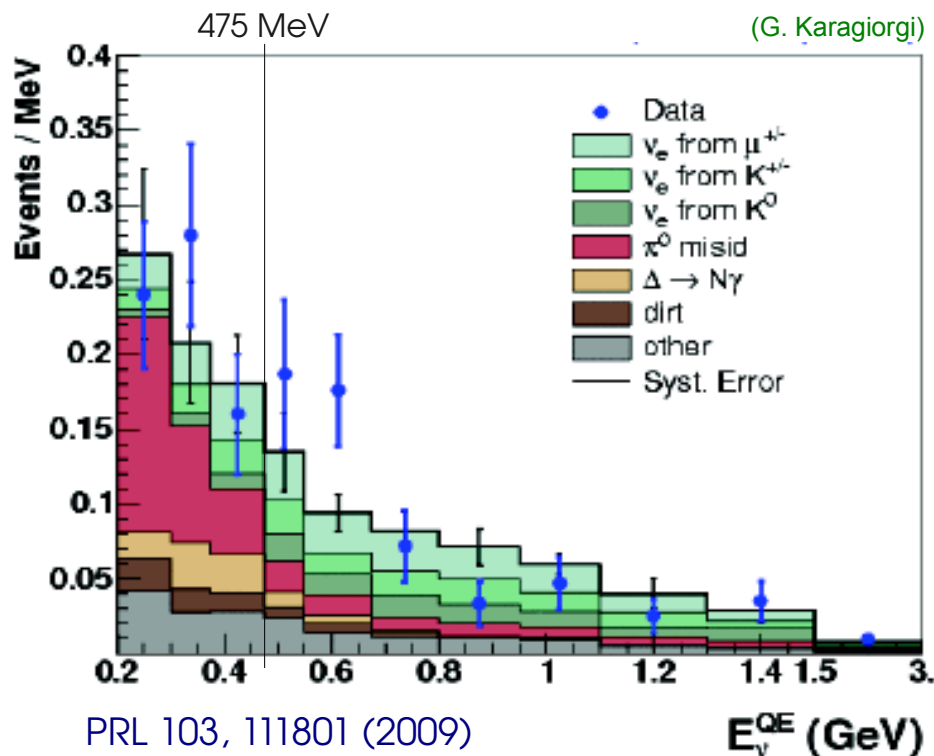
New Gauge Boson with Sterile Neutrinos: Ann E. Nelson & Jonathan Walsh, arXiv:0711.1363

MB: 1er resultado con antineutrinos

3.4E20 POT modo de anti-neutrinos.

Error estadístico grande. No distingue señal de LSND de resultado nulo.

Exceso en $E > 475$ MeV es consistente con LSND pero no significativo.



No exceso significativo en $E < 475$ MeV
No concluyente resp. a Oscilaciones

Análisis de aparición de \bar{v}_e

Método de ajuste de Oscilaciones

Ajuste combinado a datos ν_e y ν_μ

- Para cada “bin” i :

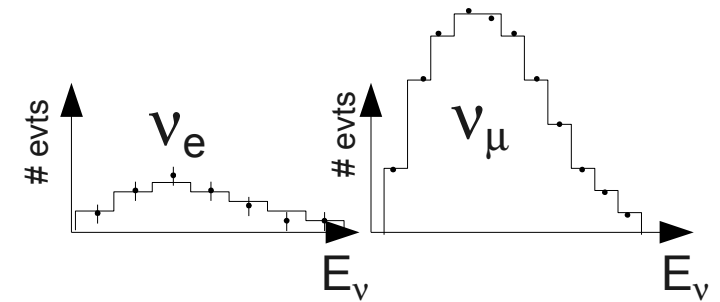
$$\Delta_i = N_i^{DATA} - N_i^{MC}$$

- Barrido en Δm^2 y $\sin^2 2\theta$ para calcular $-2\ln(\mathcal{L})$ **sobre “bins” de ν_e y ν_μ**

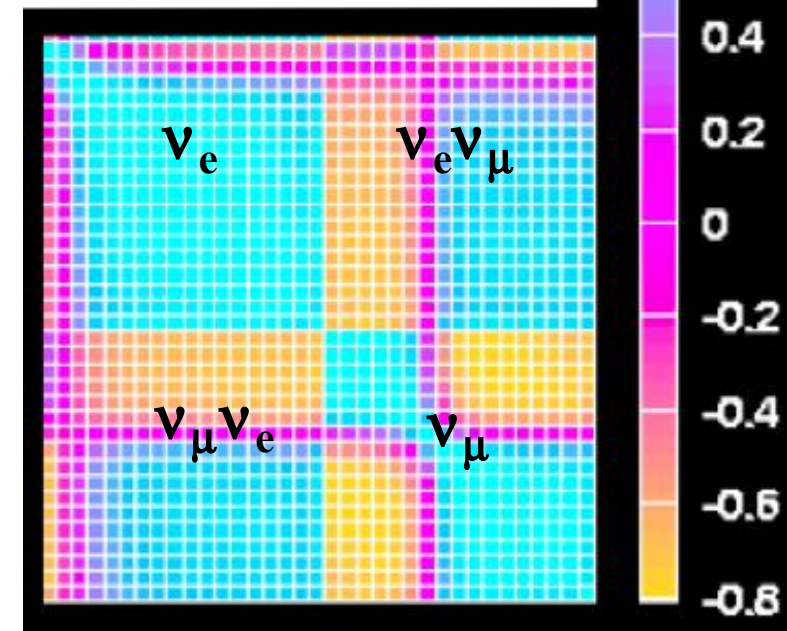
$$-2 \ln(\mathcal{L}) = \Delta M^{-1} \Delta^T + \ln(|M|)$$

- Matriz de errores M incluye errores sistemáticos para ν_e y ν_μ
- Muestra de ν_μ grande constriñe muchas de las incertidumbres

los ν_μ funcionan como detector cercano



Correlaciones entre bins de E_ν^{QE} , matriz *Modelo Optico*



Método de ajuste de Oscilaciones

Ajuste combinado a datos ν_e y ν_μ

- Para cada “bin” i :

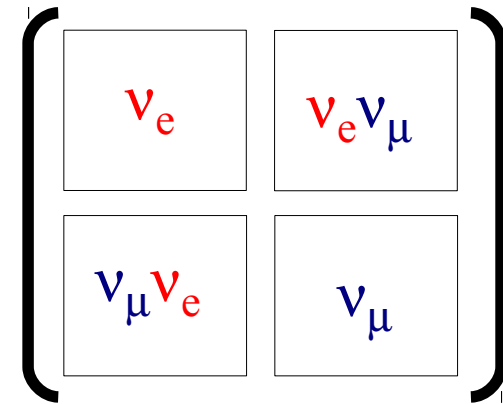
$$\Delta_i = N_i^{DATA} - N_i^{MC}$$

- Barrido en Δm^2 y $\sin^2 2\theta$ para calcular $-2\ln(\mathcal{L})$ **sobre “bins” de ν_e y ν_μ**

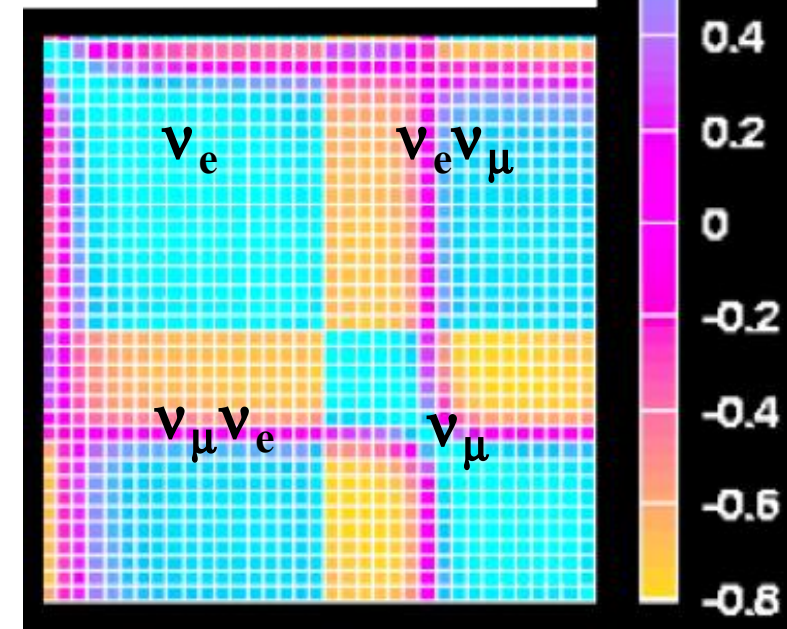
$$-2 \ln(\mathcal{L}) = \Delta M^{-1} \Delta^T + \ln(|M|)$$

- Matriz de errores M incluye errores sistemáticos para ν_e y ν_μ
- Muestra de ν_μ grande constriñe muchas de las incertidumbres

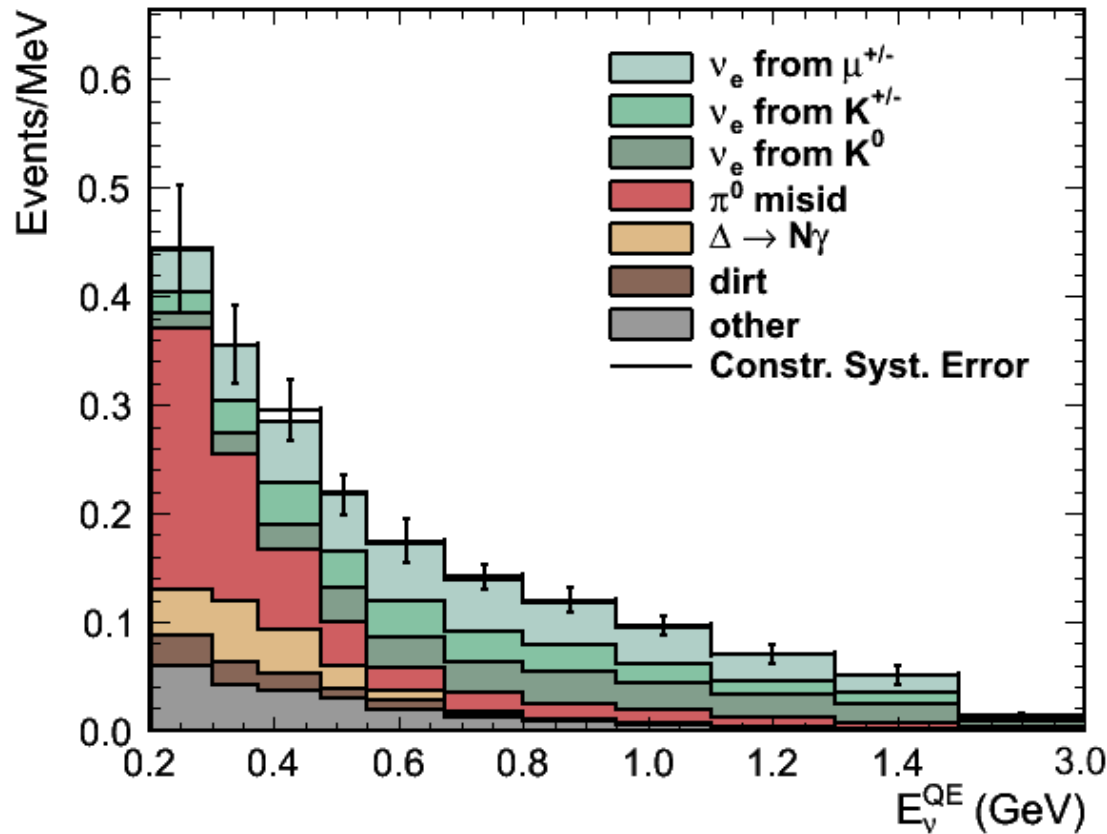
los ν_μ funcionan como detector cercano



Correlaciones entre bins de E_ν^{QE} , matriz *Modelo Optico*



Background *tipo-* $\bar{\nu}_e$ esperado



5.66e20 POT			
Fuente	200-475	475-1250	
μ^\pm	13.4	31.4	Intrinsic ν_e
K^\pm	8.2	18.6	
K^0	5.1	21.2	
other ν_e	1.3	2.0	
$NC\pi^0$	41.6	12.6	
$\Delta \rightarrow \gamma$	12.4	3.4	
dirt	6.2	2.6	
ν_μ CCQE	4.3	2.0	
other ν_μ	7.0	4.2	
TOTAL	99.5	98.0	

Restringidos por mediciones externas y mediciones en MiniBooNE 33

Incertidumbres del *background*

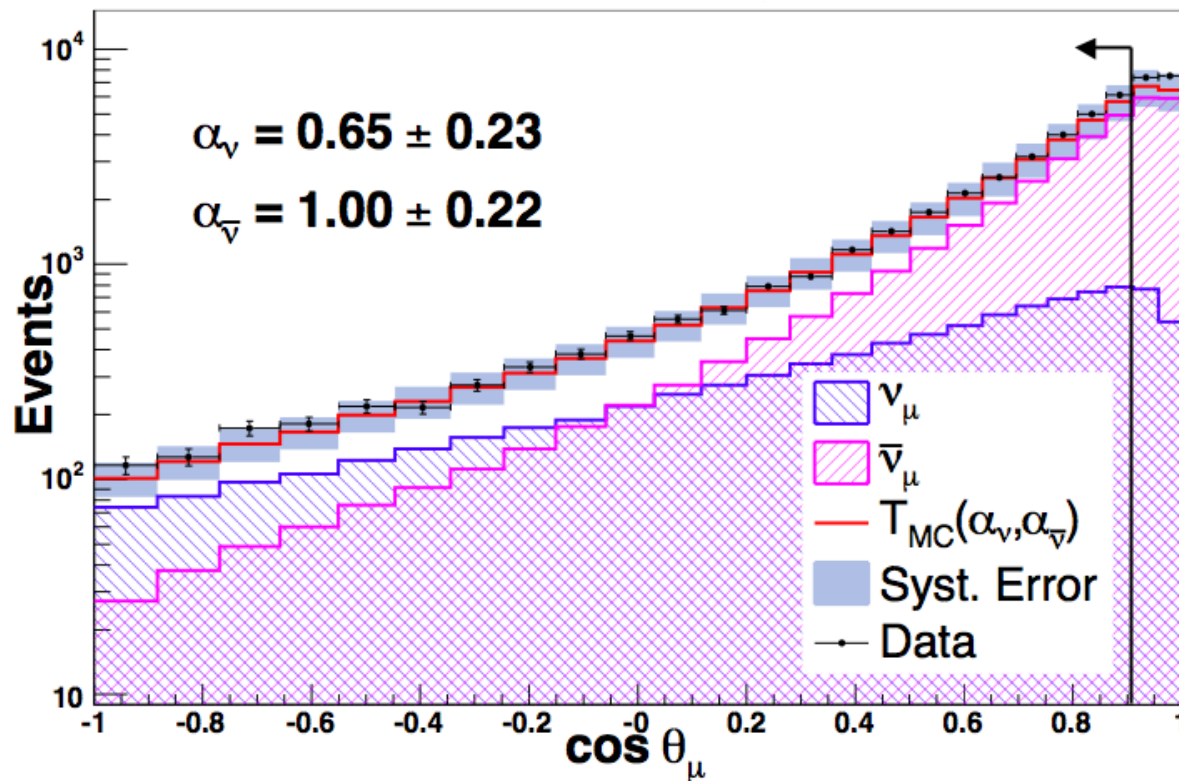
Fuente	Neutrino (MeV)		Antineutrino (MeV)	
	200-475	475-1100	200-475	475-1100
Flujo por π^+/μ^+	0.4	0.9	1.8	2.2
Flujo por π^-/μ^-	3.0	2.3	0.1	0.2
Flujo por K^+	2.2	4.7	1.4	5.7
Flujo por K^-	0.5	1.2	-	-
Flujo por K^0	1.7	5.4	0.5	1.5
Modelos del blanco y haz	1.7	3.0	1.3	2.5
secciones eficaces (ν)	6.5	13.0	5.9	11.9
Producción de π^0 (NC)	1.5	1.3	1.4	1.9
Interacciones hadrónicas	0.4	0.2	0.8	0.3
Interacciones externas (tierra)	1.6	0.7	0.8	0.4
Modelo óptico	8.0	3.7	8.9	2.3
Electrónica & modelo de DAQ	7.0	2.0	5.0	1.7
TOTAL (no constreñido)	13.5	16.0	12.3	14.2

(números son %)

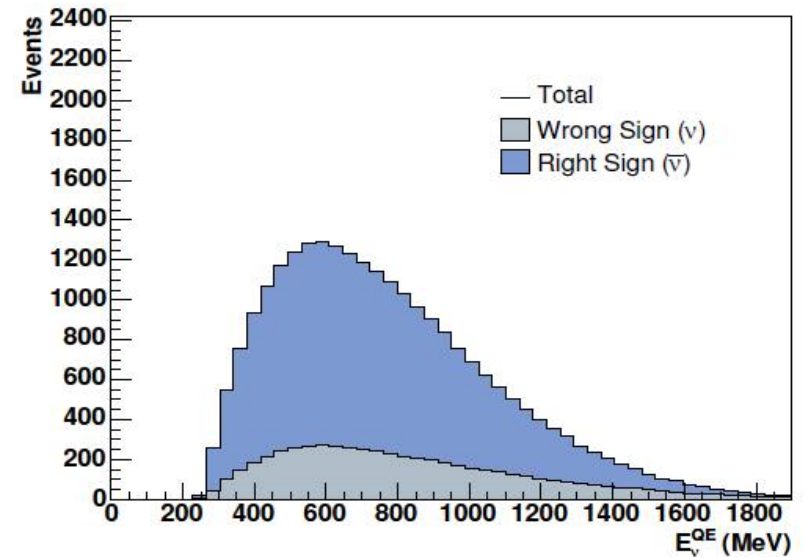
WS backgrounds

- Suponemos que solo los $\bar{\nu}_\mu$ oscilan (*signo correcto*)
- Necesario conocer fracción de eventos con *signo incorrecto (WS)*.
- Dos métodos de restricción:
 - a) medida de distribución angular de muones CCQE
 - b) medida de eventos CC π^+ (indep. de modelaje de efectos nucleares)
- **Resultado: predicción de BG de WS reducida en un ~30%**

(Joe Grange)



Eventos en modo de antineutrinos



arXiv:1102.1964

35

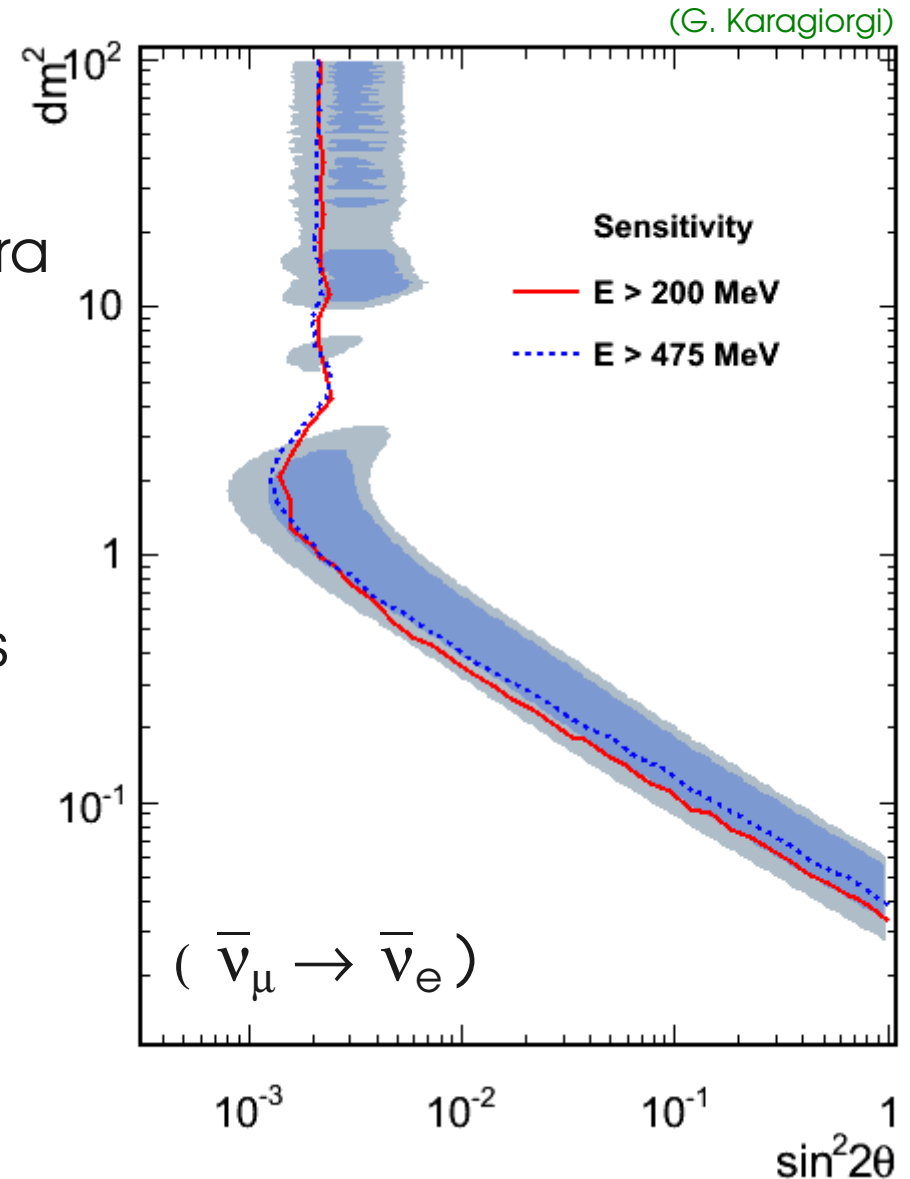
Sensibilidad (5.66×10^{20} POT)

MiniBooNE usa $E > 475$ MeV para ajustes de oscilaciones

Región de energía donde se espera una señal tipo-LSND.

Región $E < 475$:

- Grandes backgrounds
- Grandes errores sistemáticos
- Poca sensibilidad a la señal de oscilación de LSND.

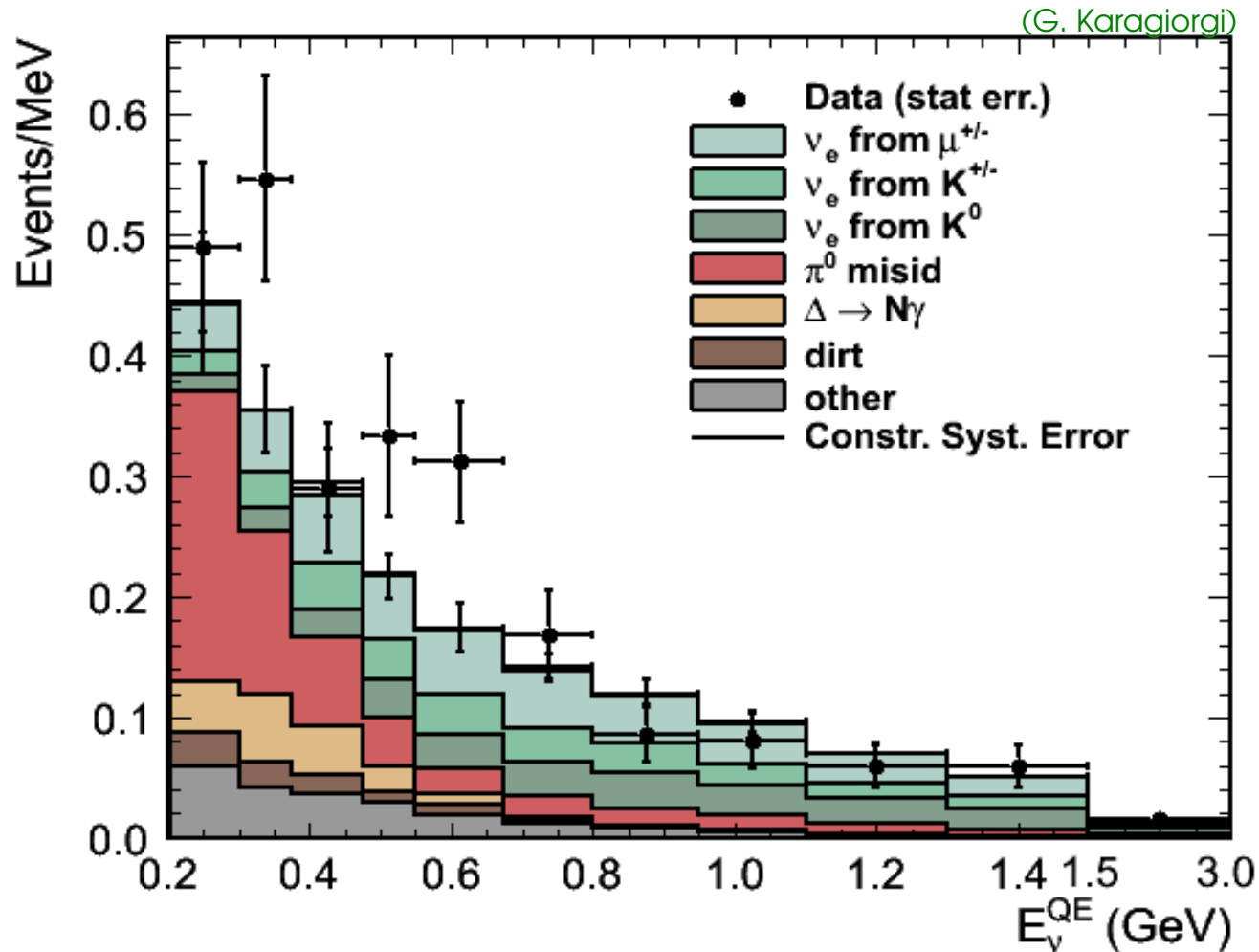


Recientes resultados con antineutrinos

Datos recientes de anti-neutrinos

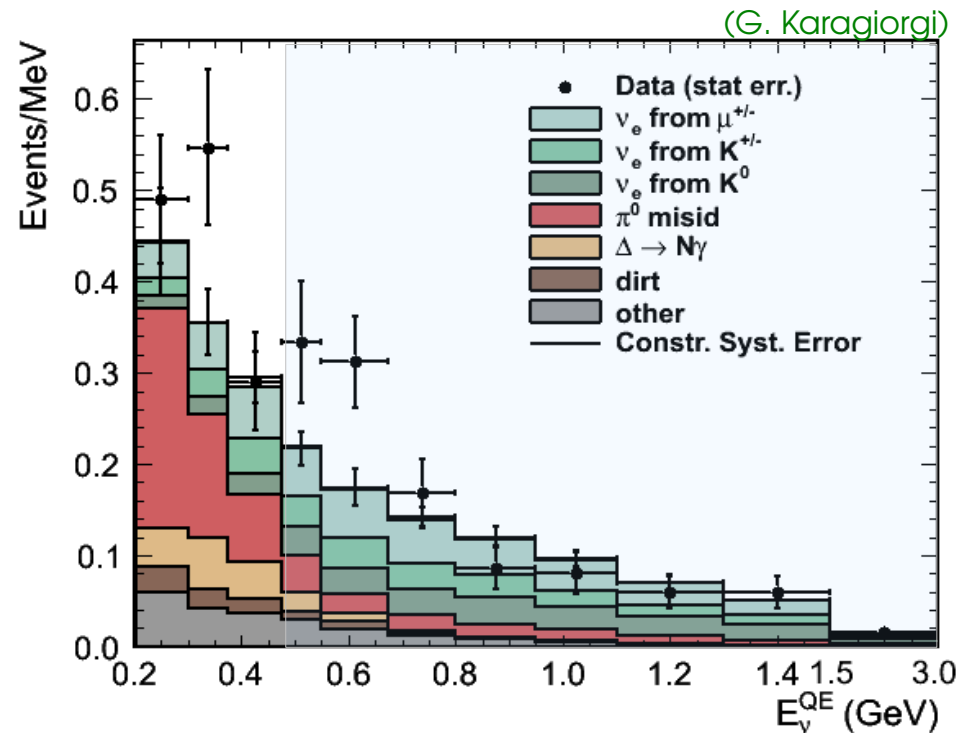
Phys. Rev. Lett. 105, 181801 (2010)

Usando 5.661×10^{20} POT



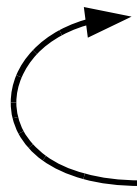
Datos recientes de anti-neutrinos

Usando 5.661×10^{20} POT
 Phys. Rev. Lett. 105, 181801 (2010)



Algunos números:

	200-475 MeV	475-1250 MeV	1250-3000 MeV
Datos	119	120	38
MC	100.48 ± 14.33	99.08 ± 13.98	34.2 ± 5.8
Exceso	18.52 ± 14.33	20.92 ± 13.98	3.8 ± 5.8
LSND Best Fit	7.6	22	3.5
ν exceso Baja-E	11.6	0	~ 0
LSND+Low E	19.2	22	3.5

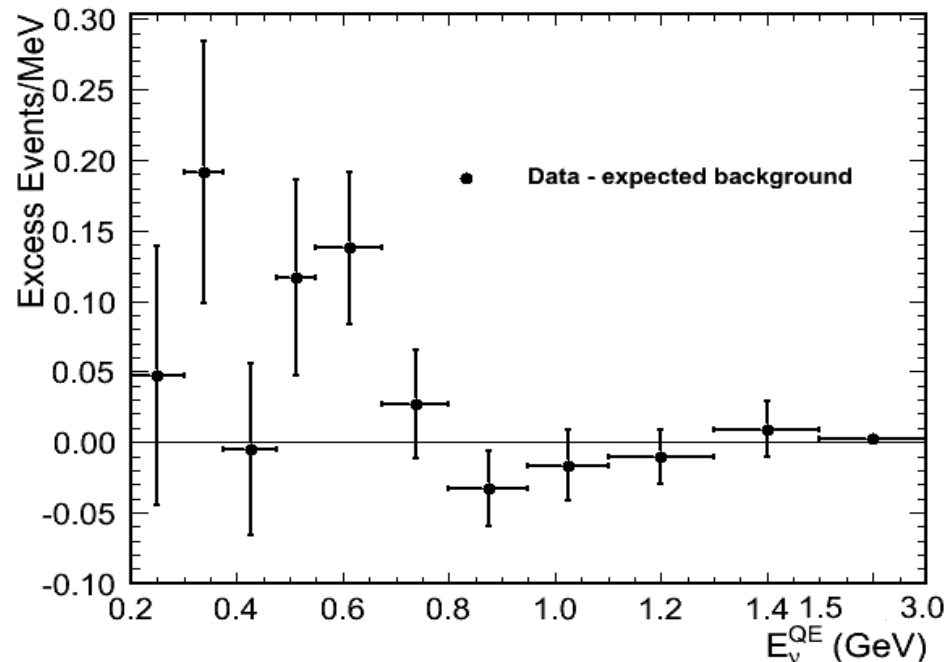


Supone que el exceso de ν_e está presente en los ν_μ "WS" del haz

Probabilidad de resultado Nulo

- Probabilidad de χ^2 para punto nulo (sólo bkgd) – mod. indep.
- Método frecuentista

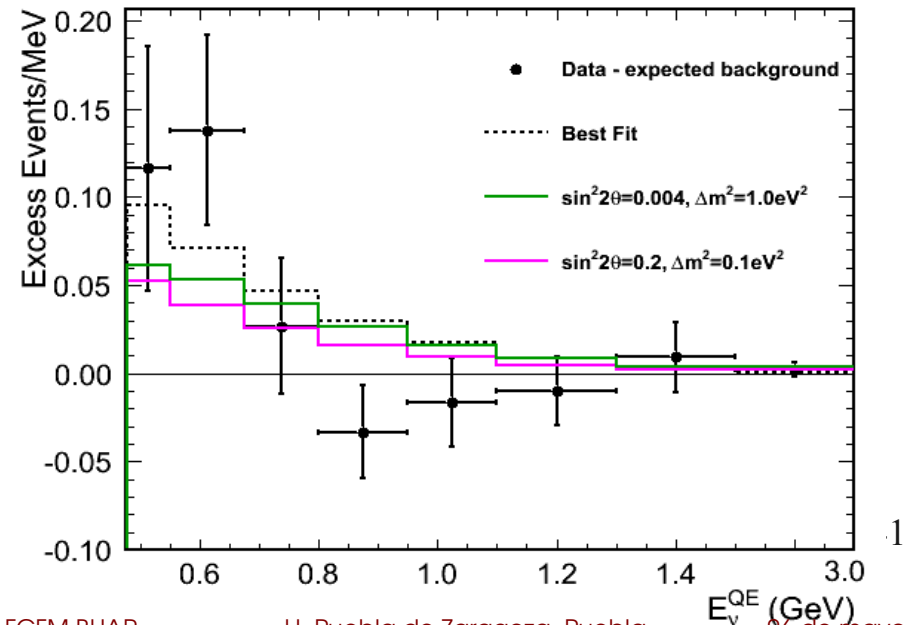
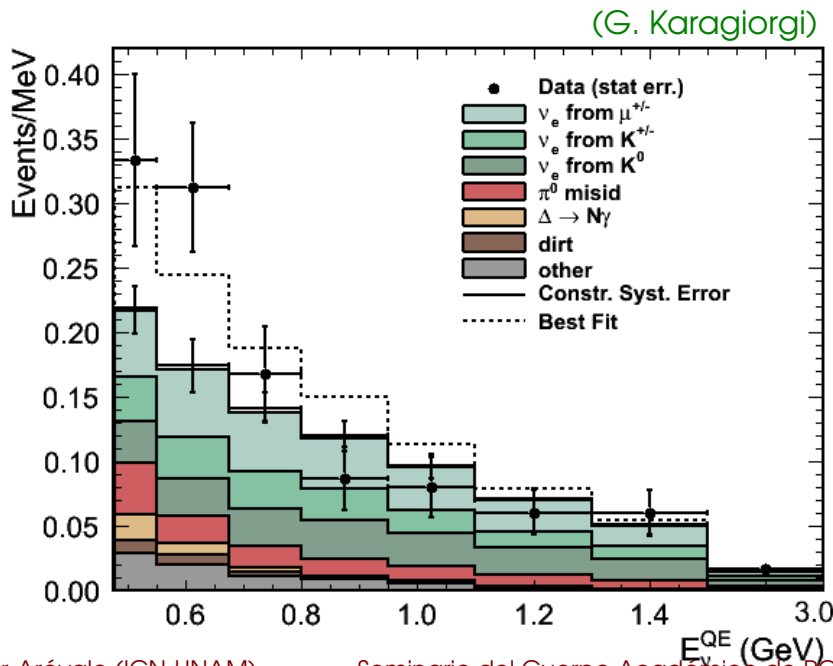
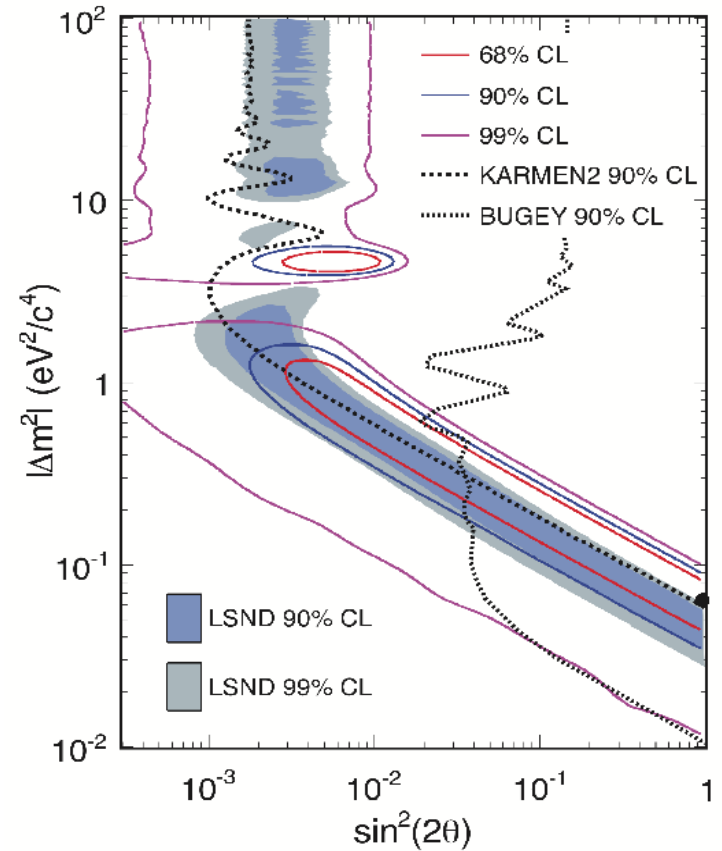
475-1250 MeV	chi2/NDF	probabilidad
$\nu_{\mu} \rightarrow \nu_e$	6.1/6	40%
$\bar{\nu}_{\mu} \rightarrow \bar{\nu}_e$	18.5/6	0.5%



Resultado muy diferente nulo!

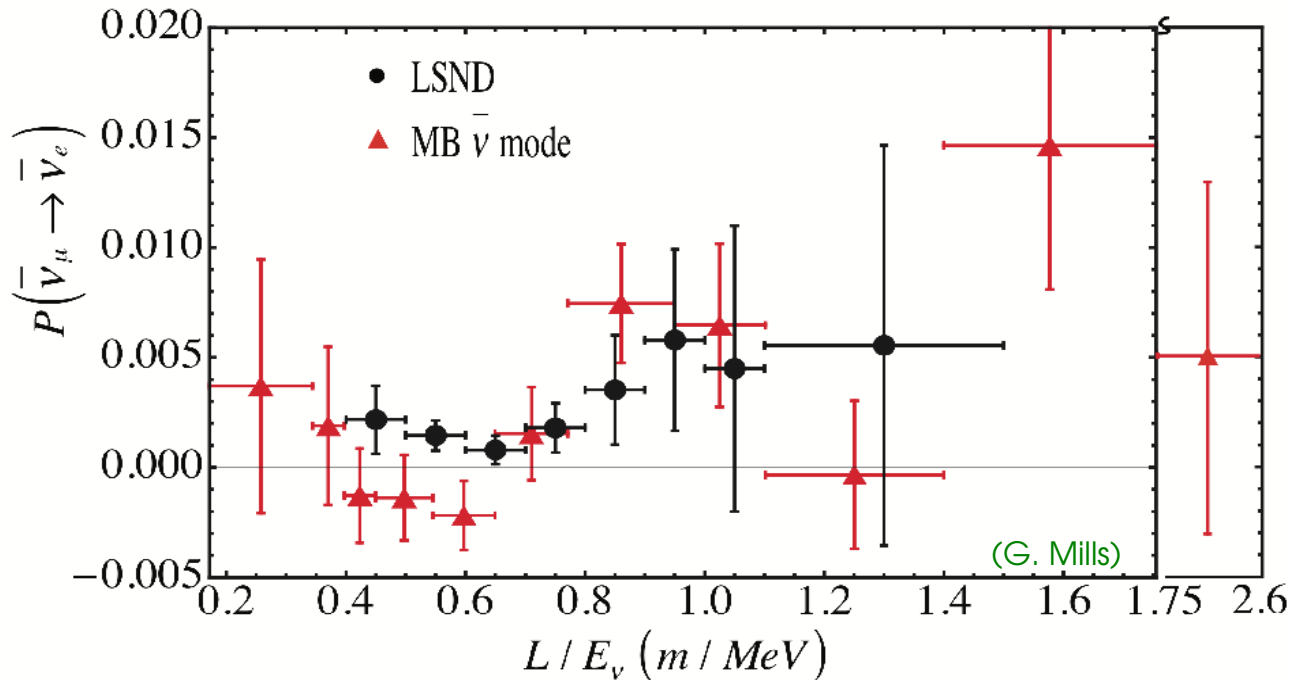
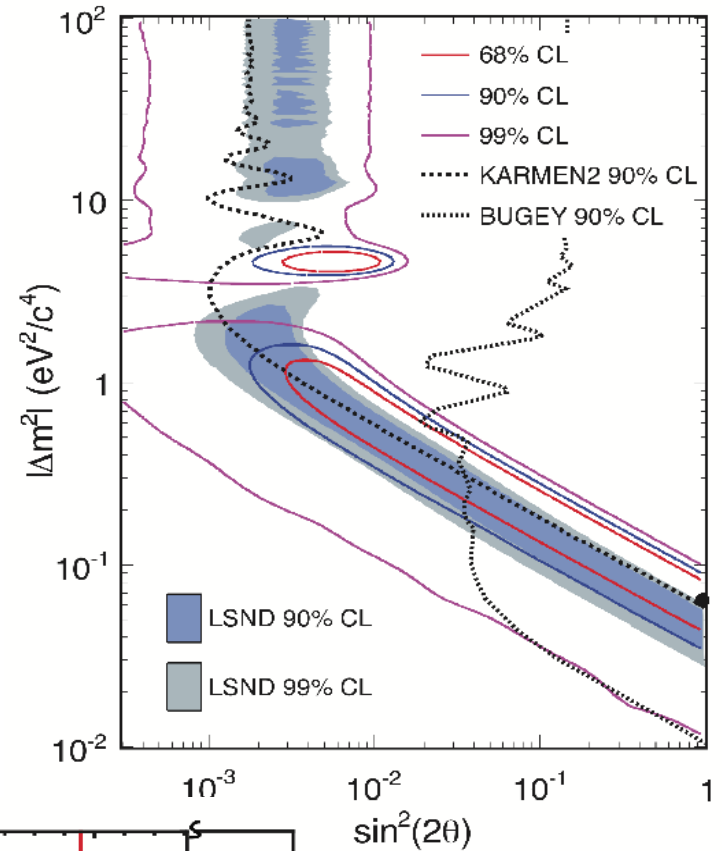
Fit $E > 475$ MeV

- 5.661E20 POT
- $E > 475$, región de señal para osc. tipo LSND.
- Oscilaciones favorecidas sobre hipótesis de sólo bkgd. al 99.4% C.L. (dep. del modelo)
- Mejor ajuste $(\sin^2 2\theta, \Delta m^2) = (0.9584, 0.064 \text{ eV}^2)$
 $\chi^2/\text{NDF} = 8/4$, Prob=8.7%
- **Datos consistentes con señal de LSND**



Fit $E > 475$ MeV

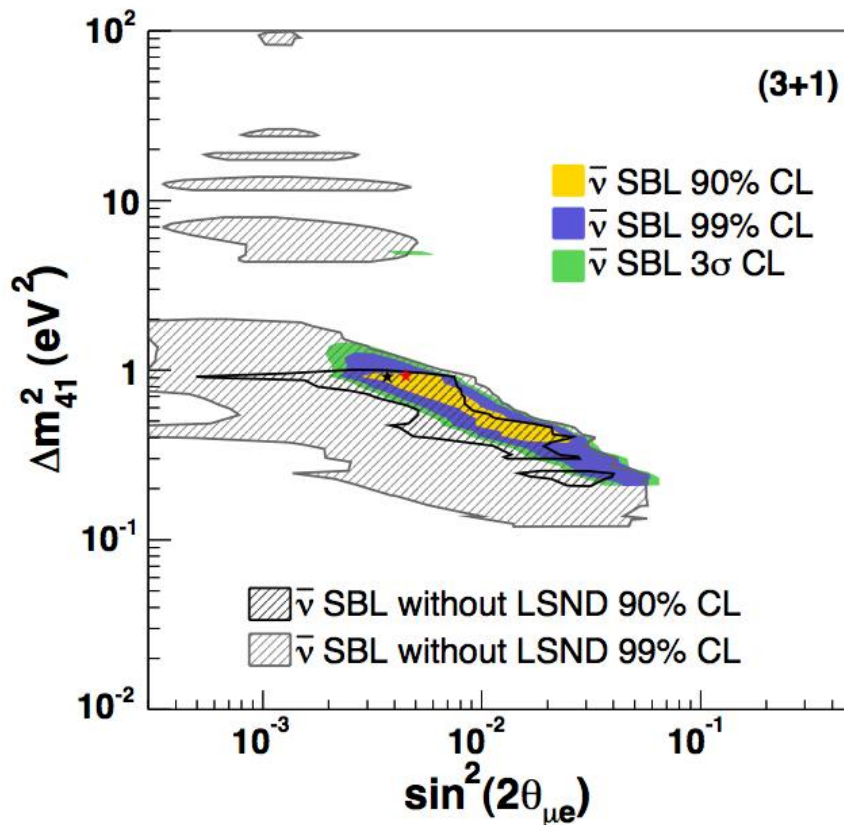
- 5.661E20 POT
- $E > 475$, región de señal para osc. tipo LSND.
- Oscilaciones favorecidas sobre hipótesis de sólo bkgd. al 99.4% C.L. (dep. del modelo)
- Mejor ajuste $(\sin^2 2\theta, \Delta m^2) = (0.9584, 0.064 \text{ eV}^2)$
 $\chi^2/\text{NDF} = 8/4$, Prob=8.7%
- **Datos consistentes con señal de LSND**



Oscilaciones con neutrinos estériles

Suponiendo un modelo (3+1) con neutrinos estériles ligeros:

Todos los resultados experimentales con antineutrinos, incluyendo aparición y desaparición, son compatibles al 20%.



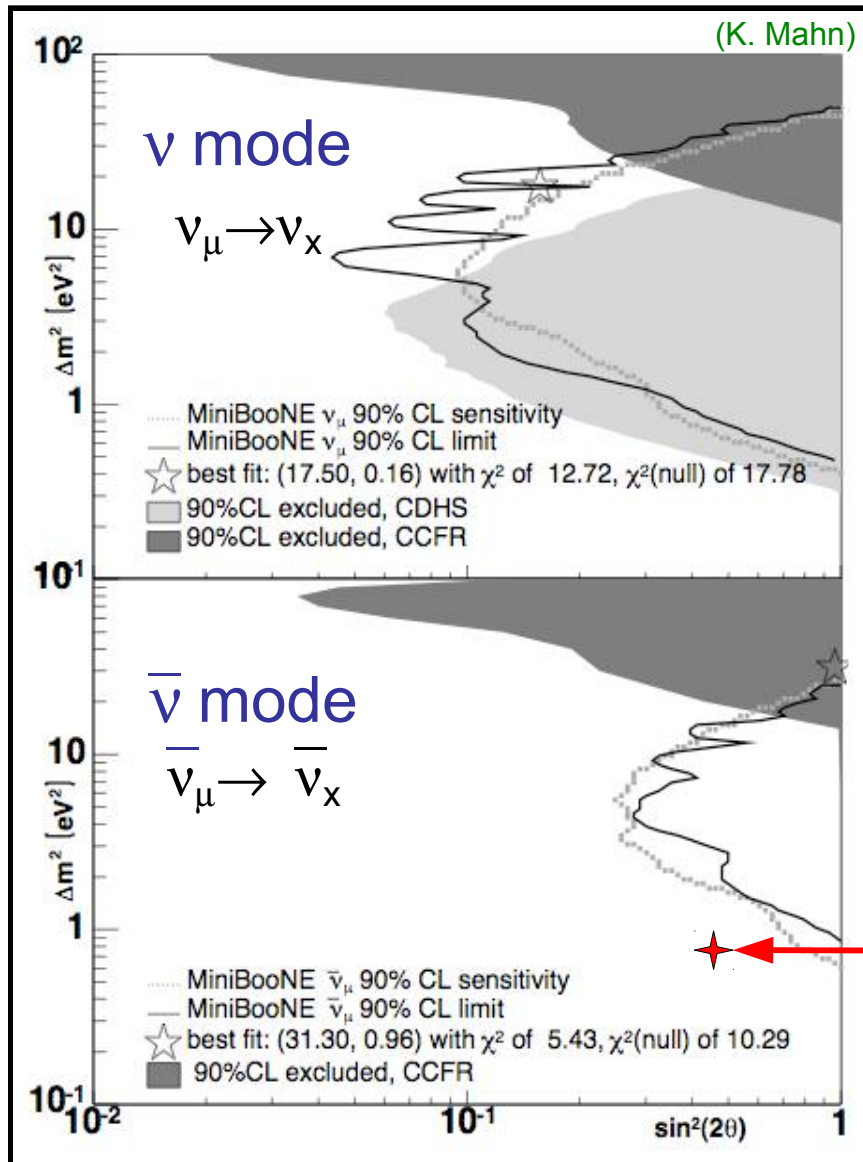
Un ajuste a todos los datos de experimentos short-baseline con antineutrinos excluye hipótesis de no oscilaciones con $>3\sigma$.

	χ^2/dof	Δm^2	$\sin^2 2\theta_{\mu e}$	$\sin^2 2\theta_{ee}$	$\sin^2 2\theta_{\mu\mu}$
Best Fit:	85.0/103	0.92	0.0045	0.043	0.37

Predice desaparición de $\bar{\nu}_\mu$ grande

G.Karagiorgi et al., Phys. Rev. D80, 073001 (2009), actualizado incluye recientes datos de antineutrinos de MiniBooNE.

MB: desaparición de ν_μ y $\bar{\nu}_\mu$



- MiniBooNE ha hecho búsquedas de desaparición de ν_μ y $\bar{\nu}_\mu$
- Explora nuevas regiones en el espacio de parámetros
- Límites mejorados desaparición de ν_μ de análisis conjunto MiniBooNE/SciBooNE (por ser publicados)

Ajuste global 3+1 (antineutrinos)

PRL 103:061802 (2009)

Oscilaciones con neutrinos estériles (II)

Suponiendo un modelo (3+1) con un neutrino estéril:

Combinando todos los resultados de exp. short-baseline de neutrinos y antineutrinos y resultados de neutrinos atmosféricos → compatibilidad = 0.04%

límites de exclusión combinados de desaparición de ν_μ atmosféricos y experimentos nulos:

Bugey, Chooz: $\bar{\nu}_e$ desaparición

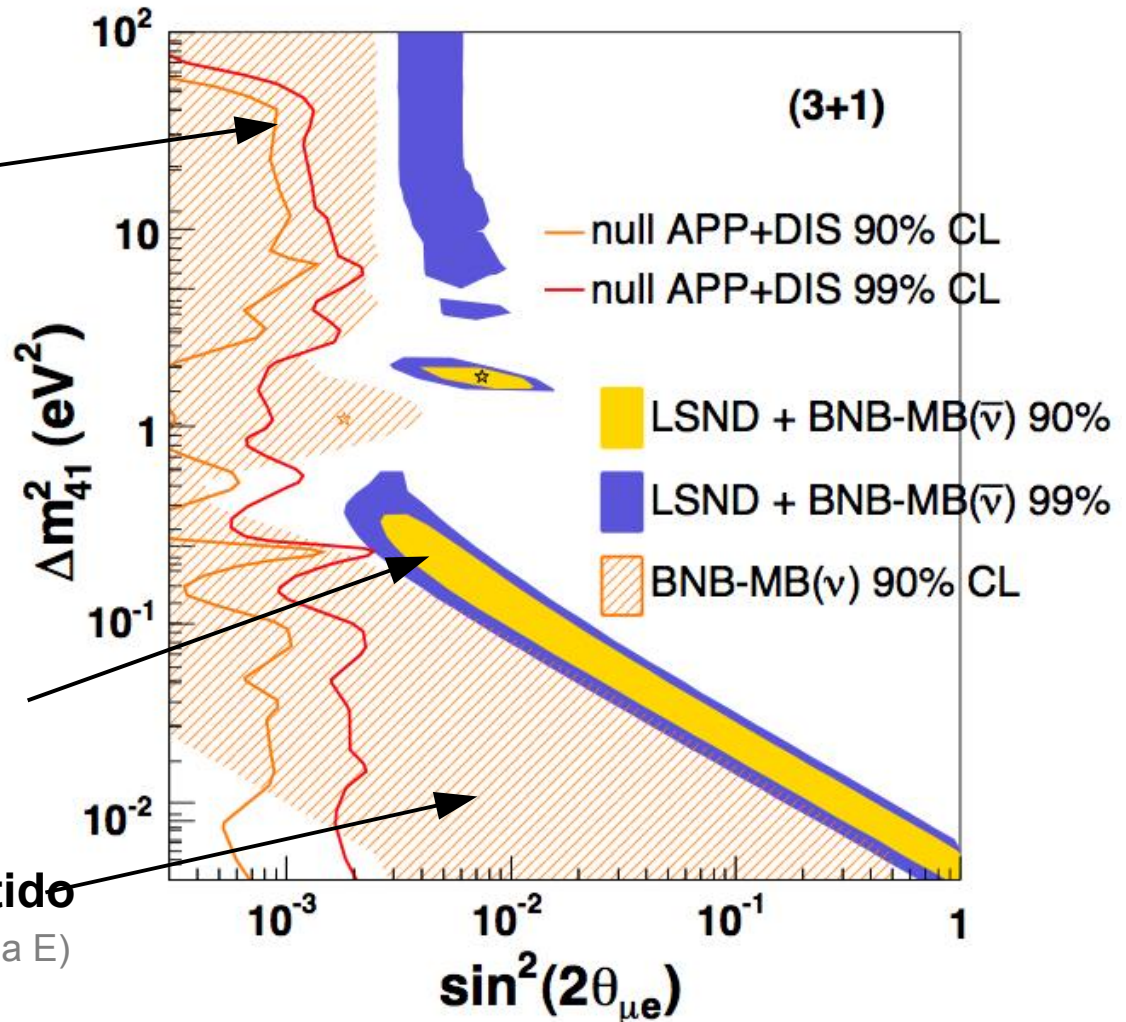
CCFR, CDHS: ν_μ desaparición

NOMAD, NuMI-MiniBooNE $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ aparición

KARMEN: $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$ aparición

LSND+MiniBooNE($\bar{\nu}$)* permitido
(compatible al 49%)

MiniBooNE(ν) permitido
(incluye región de baja E)

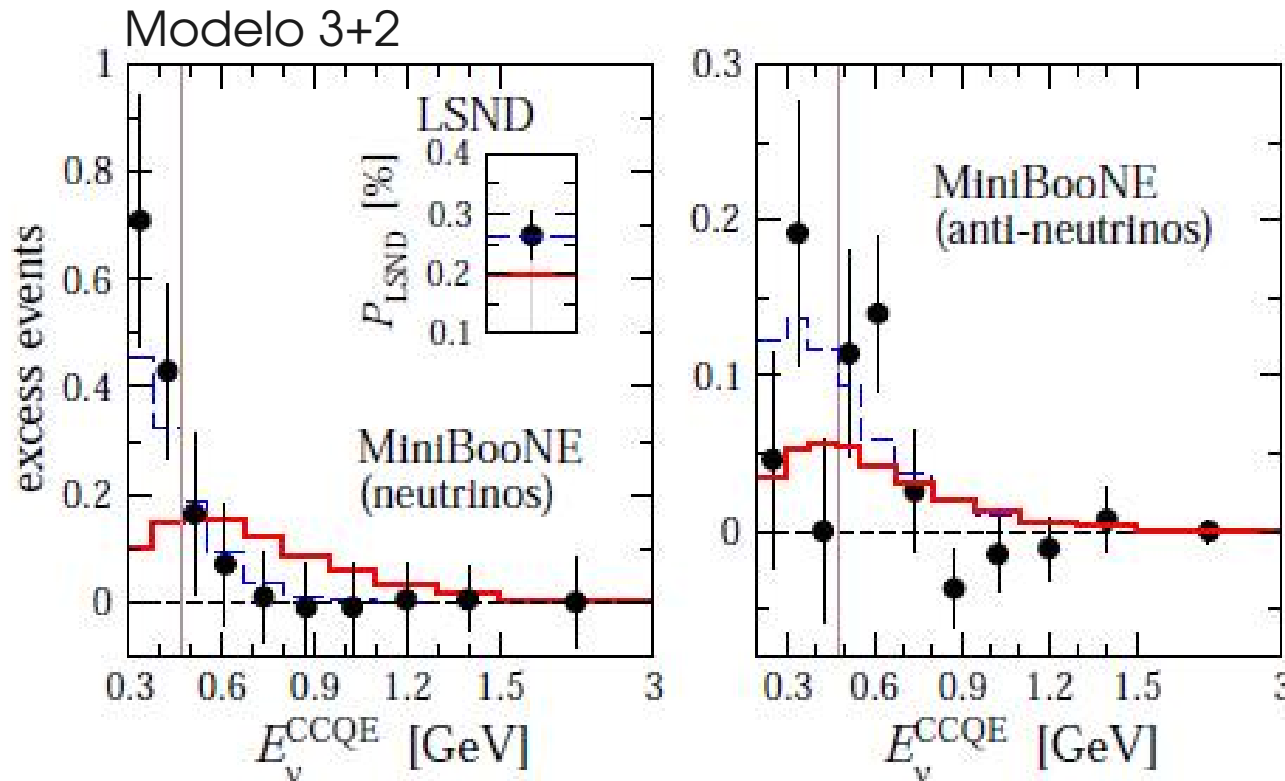


*corresponde a resultado previo (3.39e20 POT) de MiniBooNE con antineutrinos

G.Karagiorgi et al., Phys. Rev. D80, 073001 (2009)

Oscilaciones con neutrinos estériles (III)

Diferencia entre observación con ν y $\bar{\nu}$ en MiniBooNE puede explicarse en un esquema 3+2 con violación de CP.

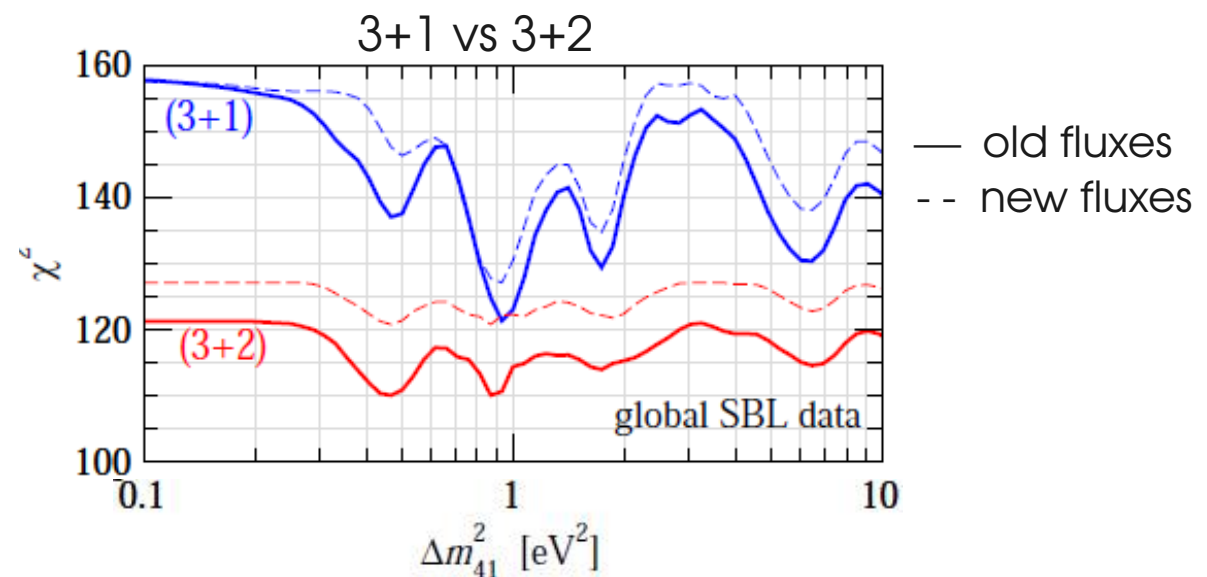
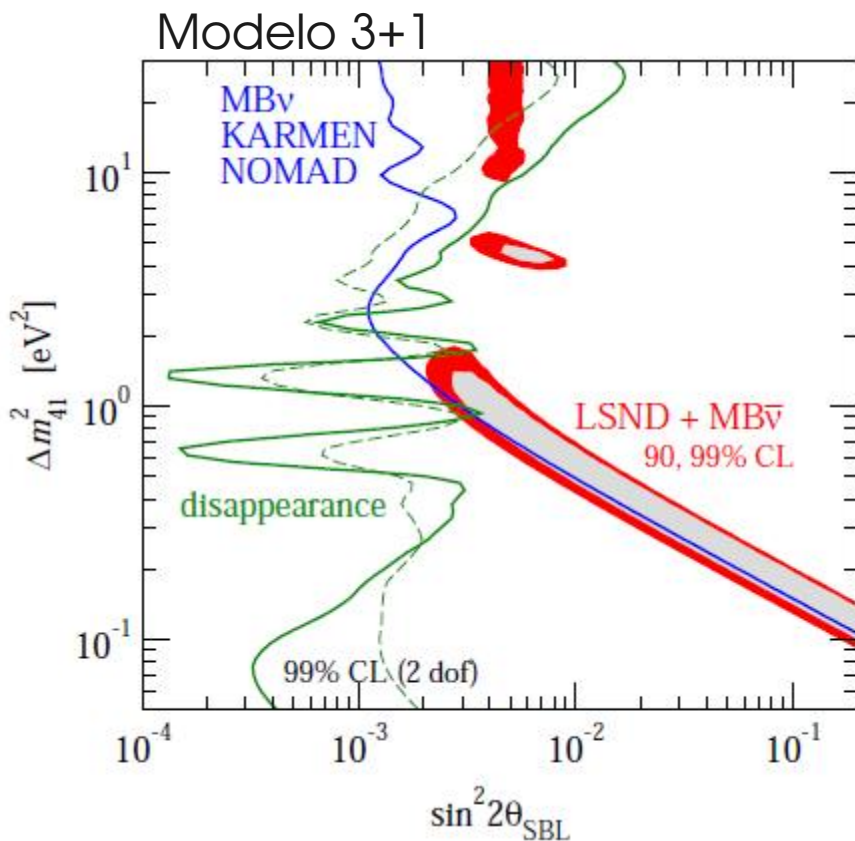


J.Kopp et al. ArXiv:1103.4570 (2011)

-- LSND, MB, KARMEN, NOMAD
 — global SBL (incl. desaparición)

Anomalía de reactores nucleares

- Reciente reevaluación del flujo de $\bar{\nu}_e$ en reactores (T.A. Mueller, arXiv:1101.2663)
- Nueva predicción es $\sim 3\%$ mayor a la anterior.
- Si se confirma \Rightarrow experimentos de oscilaciones con reactores consistentes con déficit de $\bar{\nu}_e$ en distancias cortas (10-100 m)



J.Kopp et al. ArXiv:1103.4570 (2011)

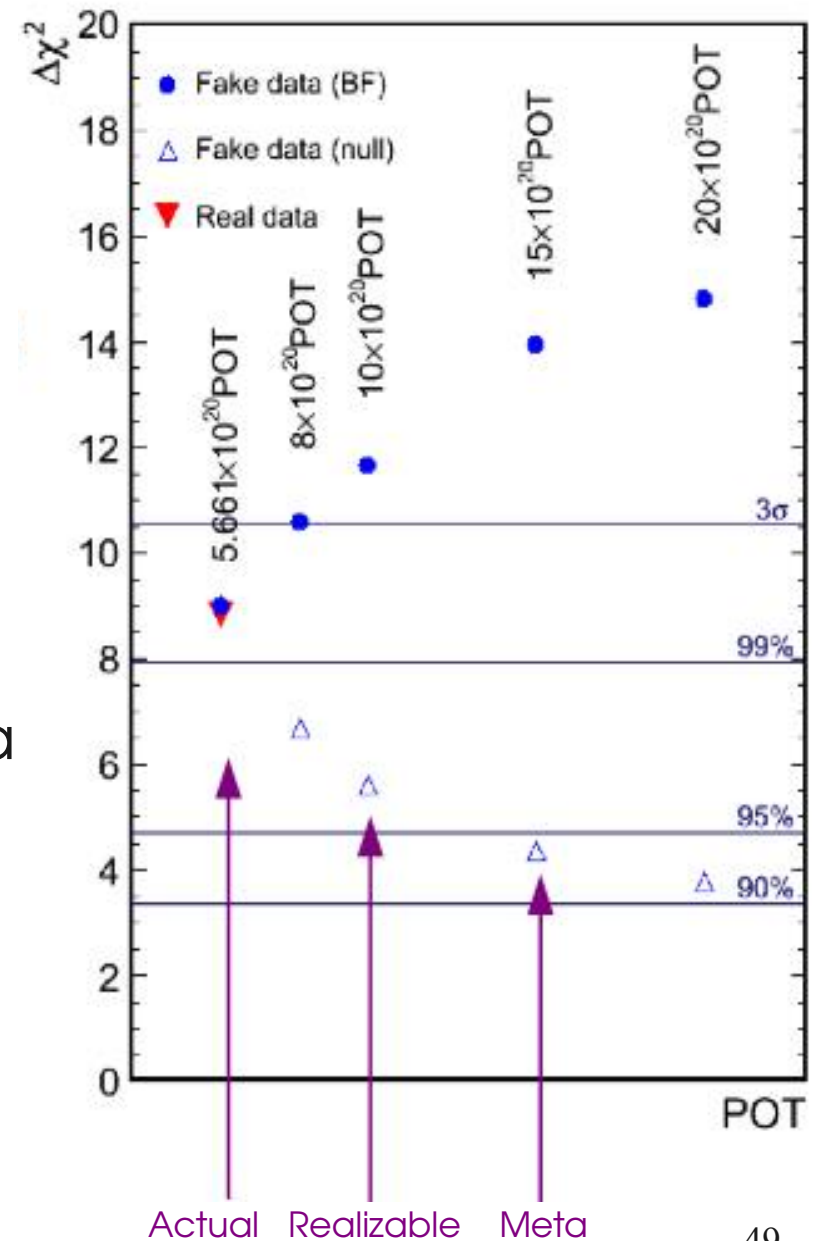
3+2 con nuevos flujos de reactores reduce tensión entre los datos de SBL ligeramente.

Posibilidades a Futuro

Mejoras en Sensibilidad

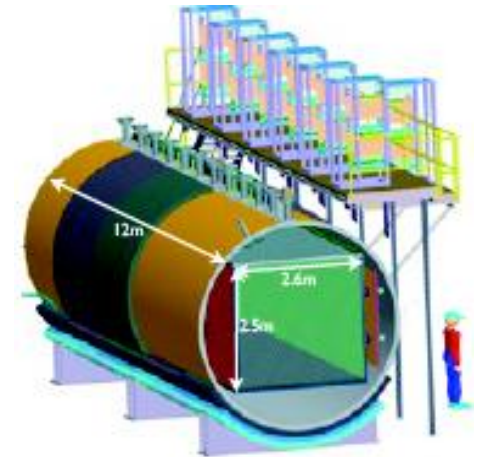
LSND $\bar{\nu}=3.8\sigma$, MB $\bar{\nu}=2.7\sigma$

- Resultado de MB en $\bar{\nu}$ está limitado por la estadística: *necesita más datos!*
- Aprobado por FNAL para continuar. Nuestra meta es 15e20 POT
- Con 15e20 POT significancia puede crecer a 3.4σ ... o caer a $\sim 95\%$ C.L.
- Análisis combinado de ν_e and $\bar{\nu}_e$ para incrementar sensibilidad, en proceso.



Experimentos en el futuro

- Más datos de $\bar{\nu}$ en MiniBooNE (esp. 15×10^{20} POT)
- MicroBooNE: (100 ton LArTPC)
 - Aprobación CD1 en FNAL
 - Explorará el exceso a bajas energías
- Algunas otras ideas en consideración:
 - Mover o construir réplica de MiniBooNE a 200m (LOI [arXiv:0910.2698](https://arxiv.org/abs/0910.2698)) → **BooNE**
 - Fuente de piones en reposo en ORNL (OscSNS, [arXiv:0810.3175v1](https://arxiv.org/abs/0810.3175v1)) o en “*project X*”
 - Nueva búsqueda de oscilaciones de neutrinos anómalas en el CERN-PS ([arxiv:0909.0355v3](https://arxiv.org/abs/0909.0355v3))



Conclusiones

Qué dice MiniBooNE?

- No exceso de ν_e en haz de ν_μ arriba de 475 MeV.
 - excluye señal CP-invariante de LSND, *i.e.* $P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) = P(\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e)$
- Exceso de 3σ de ν_e en haz de ν_μ debajo de 475 MeV.
 - No ajusta bien hipótesis de mezcla de sólo 2 ν . Origen desconocido.

- No exceso de $\bar{\nu}_e$ en haz de $\bar{\nu}_\mu$ debajo de 475 MeV.
 - Excluye algunas explicaciones del exceso de baja E en modo de ν
- Exceso de $\bar{\nu}_e$ en haz $\bar{\nu}_\mu$ arriba de 475 MeV.
 - Ajuste de 2 ν prefiere señal tipo-LSND al 99.4% C.L.

- Violación de CP con modelos 3+2 es una posibilidad, aunque hay tensión con datos de desaparición.
- Experimentos futuros (BooNE @ FNAL, ICARUS @ CERN, OscSNS @ ORNL) podrían verificar que los ν 's estériles existen!

Nota final

- MiniBooNE ha producido numerosos resultados sobre secciones eficaces de inreacciones de neutrinos (8 artículos en total)
 - "Measurement of Neutrino-Induced $CC\pi^+$ Production Cross Sections", PRD **83**, 052007 (2011)
 - "Measurement of ν_μ -induced $CC\pi^0$ production cross sections on mineral oil at $E_\nu \in 0.5-2$ GeV", PRD **83**, 052009 (2011)
 - "Measurement of the neutrino NC-Elastic differential cross section", PRD **82**, 092005 (2010)
 - "First Measurement of the ν_μ CCQE double differential cross section", PRD **81**, 092005 (2010)
 - "Measurement of ν_μ and $\bar{\nu}_\mu$ induced $NC\pi^0$ production cross sections in mineral oil at $E_\nu \sim O(1\text{GeV})$ ", PRD **81**, 013005 (2010)
 - "Measurement of the ν_μ $CC\pi^+$ to quasi-elastic cross section ratio in mineral oil in a 0.8 GeV ν beam", PRL **103**, 081801 (2009)
 - "First observation of coherent π^0 production in ν -Nucleus interactions with $E_\nu < 2\text{GeV}$ ", PL **B664**, 41 (2008)
 - "Measurement of ν_μ Quasi-Elastic Scattering on Carbon", PRL **100**, 032301 (2008)
- Muchos de éstos medidos por primera vez
- Beneficiará el programa de oscilaciones de neutrinos en general.

Gracias por su atención

Backup

Oscilaciones con 3 neutrinos (II)

Jerarquía de masas: $|\Delta m_{12}^2| \ll |\Delta m_{23}^2|$ - desacople de efectos

neutrinos de aceleradores y atmosféricos:

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau) \approx \cos^4 \theta_{13} \sin^2 \theta_{23} \sin^2 (1.27 \Delta m_{23}^2 L/E) \longrightarrow \text{Super-K, K2K, MINOS, OPERA}$$

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) \approx \sin^2 2\theta_{13} \sin^2 \theta_{23} \sin^2 (1.27 \Delta m_{23}^2 L/E)$$

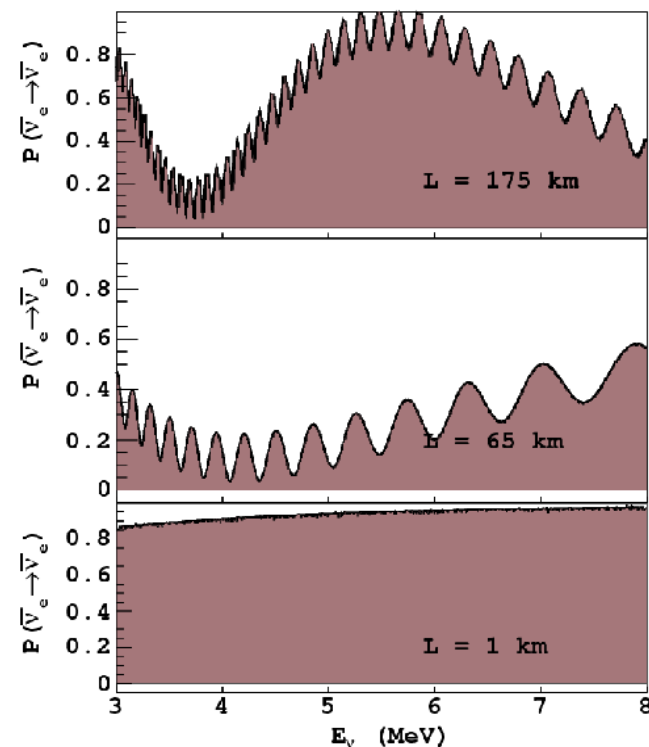
$$P(\nu_e \rightarrow \nu_\tau) \approx \sin^2 2\theta_{13} \cos^2 \theta_{23} \sin^2 (1.27 \Delta m_{23}^2 L/E) \longrightarrow \text{No observados aún } \theta_{13} = 0?$$

neutrinos de reactores nucleares:

$$P(\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e) \approx 1 - P1 - P2,$$

$$P1 = \cos^4 \theta_{13} \sin^2 2\theta_{12} \sin^2 (1.27 \Delta m_{12}^2 L/E) \longrightarrow \text{Kam-LAND}$$

$$P2 = \sin^2 2\theta_{13} \sin^2 (1.27 \Delta m_{23}^2 L/E) \longrightarrow \text{¿Double-Chooz, RENO, Daya-Bay?}$$



Neutrinos “estériles” (cont.)

En modelos 3+1, búsquedas de aparición y desaparición a distancias cortas (<1 km) relacionadas por los mismos parámetros

Por ejemplo:

Aparición de $\bar{\nu}_e$:

$$P^{SBL} (\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e) = 4|U_{e4}|^2|U_{\mu4}|^2 \sin^2(1.27 \Delta m_{41}^2 L/E)$$

Desaparición de $\bar{\nu}_\mu$:

$$P^{SBL} (\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_\mu) = 1 - 4|U_{\mu4}|^2(1 - |U_{\mu4}|^2) \sin^2(1.27 \Delta m_{41}^2 L/E)$$

Desaparición de $\bar{\nu}_e$: en reactores nucleares

$$P^{SBL} (\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e) = 1 - 4|U_{e4}|^2(1 - |U_{e4}|^2) \sin^2(1.27 \Delta m_{41}^2 L/E)$$

$$P (\bar{\nu}_\alpha \rightarrow \bar{\nu}_\beta) = P (\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta)$$

LSND $\bar{\nu}_e$ Background Estimates

Estimate	$\bar{\nu}_e / \bar{\nu}_\mu$	$\bar{\nu}_e$ Bkgd	LSND Excess
LSND Paper	0.086%	19.5+-3.9	87.9+-22.4+-6.0
Zhemchugov Poster1	0.071%	16.1+-3.2	91.3+-22.4+-5.6
Zhemchugov Poster2	0.092%	20.9+-4.2	86.5+-22.4+-6.2
Zhemchugov Seminar	0.119%	27.0+-5.4	80.4+-22.4+-7.1

All $\bar{\nu}_e$ bkg estimates assume a 20% error. Note that the $\bar{\nu}_e / \bar{\nu}_\mu$ ratio determines the $\bar{\nu}_e$ background!

LSND Paper: A. Aguilar *et al.*, Phys. Rev. D 64, 112007 (2001); (uses **MCNP**)

Zhemchugov Poster1: FLUKA $\bar{\nu}_e / \bar{\nu}_\mu$ ratio presented at the ICHEP 2010 Conference, Paris

Zhemchugov Poster2: GEANT4 $\bar{\nu}_e / \bar{\nu}_\mu$ ratio presented at the ICHEP 2010 Conference, Paris

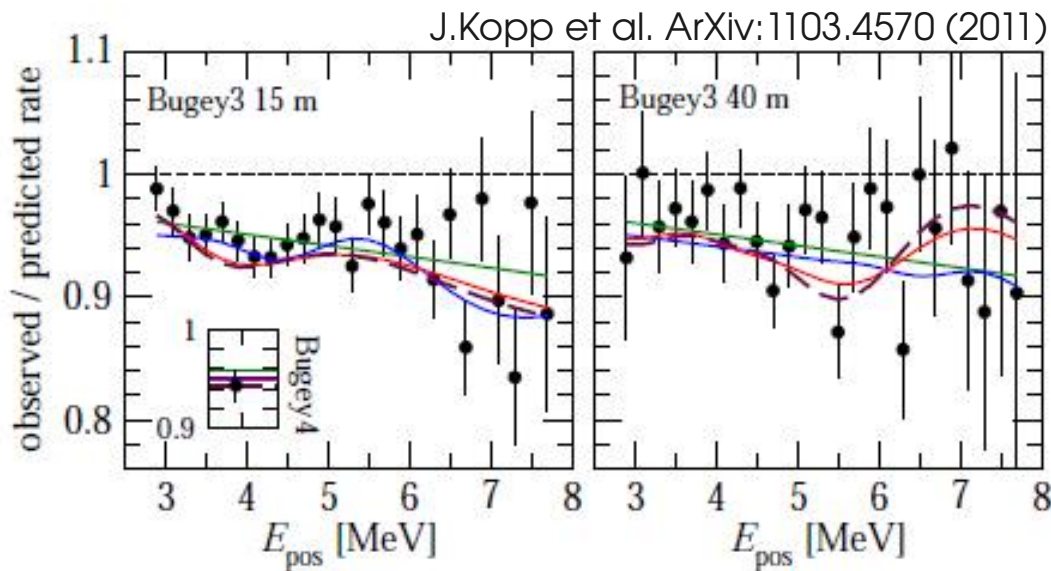
Zhemchugov Seminar: FLUKA $\bar{\nu}_e / \bar{\nu}_\mu$ ratio presented at CERN on September 14, 2010

Although the analysis of Zhemchugov *et al.* is not fully understood or endorsed, their $\bar{\nu}_e / \bar{\nu}_\mu$ ratios agree reasonably well with the published LSND results.

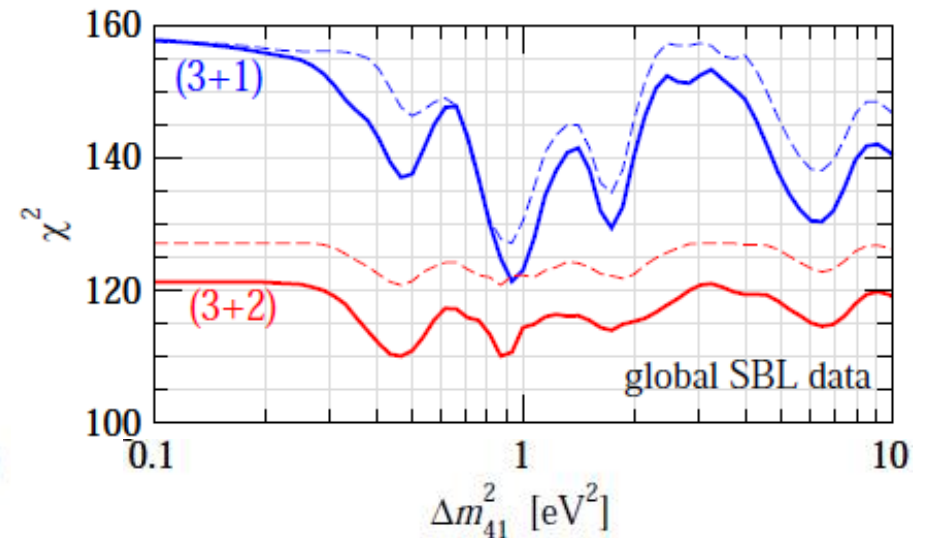
Note that LSND measures the correct rate of $\nu_\mu p \rightarrow \mu^+ n$ interactions, which confirms the π^- production and background estimates. Note also, that FLUKA & GEANT4 are not as reliable as MCNP at 800 MeV!

Anomalía de reactores nucleares

- Reciente reevaluación del flujo de $\bar{\nu}_e$ en reactores (T.A. Mueller, arXiv:1101.2663)
- Nueva predicción es $\sim 3\%$ mayor a la anterior.
- Si se confirma \Rightarrow experimentos de oscilaciones con reactores consistentes con déficit de $\bar{\nu}_e$ en distancias cortas (10-100 m)

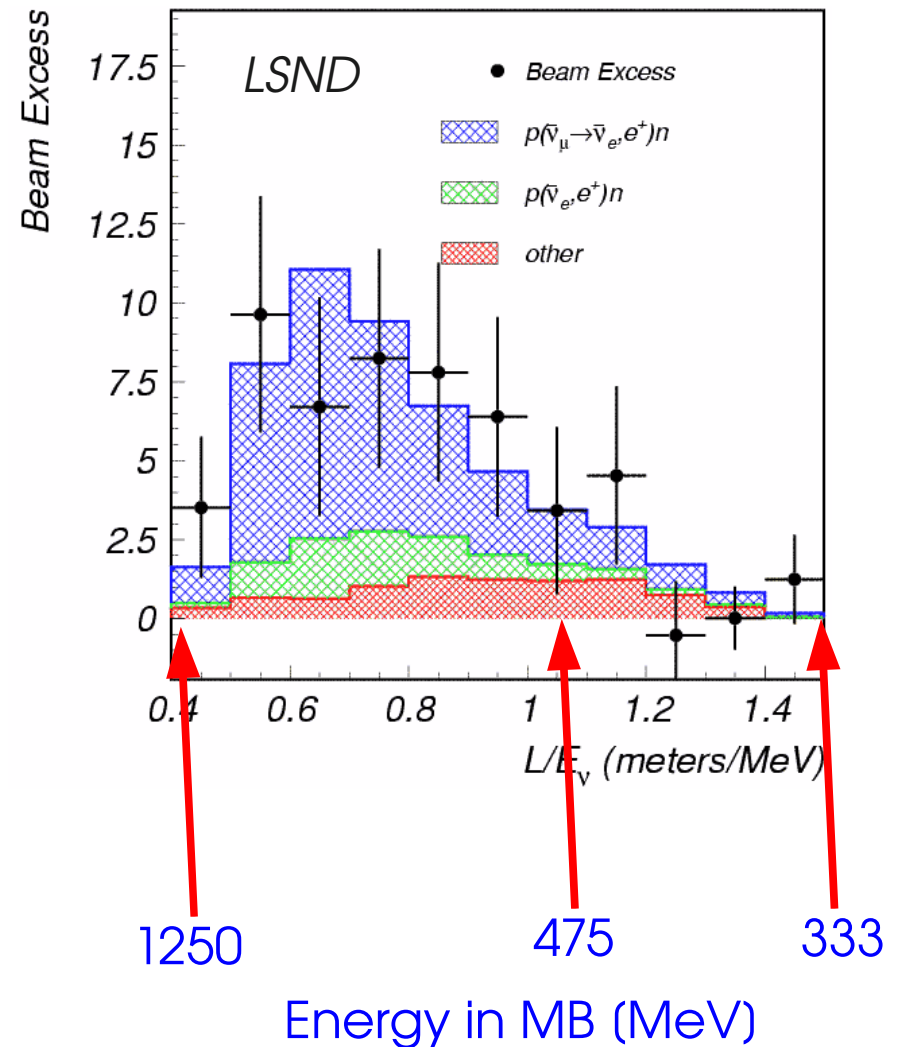
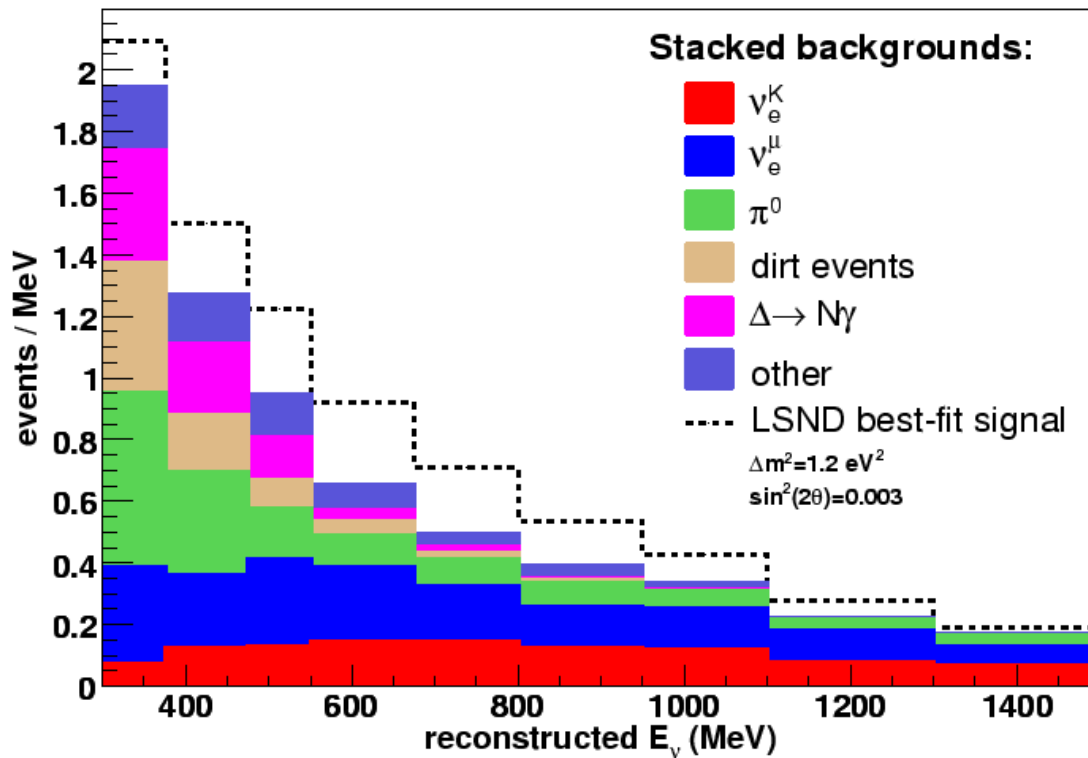


- no osc
- 3+1
- 3+2
- 3+2 SBL global fit



- solid: old fluxes
- dashed: new fluxes

Reminders of some pre-unblinding choices



Why is the 300-475 MeV region unimportant?

Large backgrounds from mis-ids reduce S/B

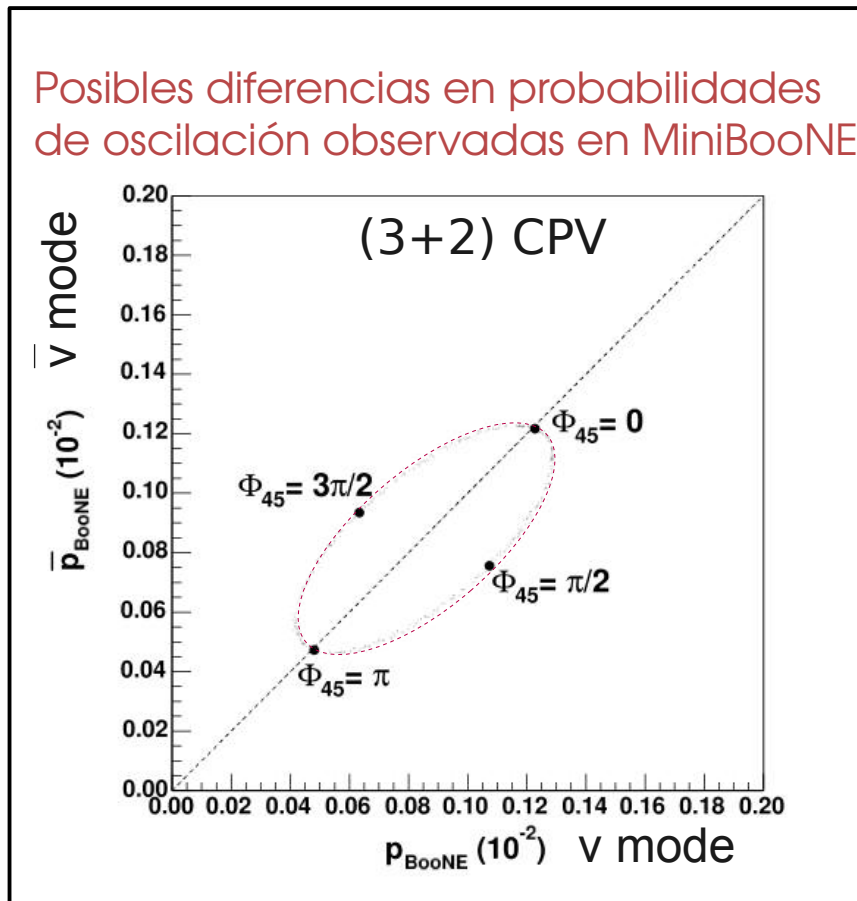
Many systematics grow at lower energies

Most importantly, not a region of L/E where LSND observed a significant signal!

Neutrinos “estériles” (cont.)

Oscilaciones con neutrinos estériles con violación de CP

3 activos + 2 estériles:



Phys. Rev. D 75, 013011 (2007)

Diferencia entre probabilidades de aparición entre ν y $\bar{\nu}$.
Proveniente de término de interferencia con fase ϕ_{45} .

modelo 3+2:

$$P(\bar{\nu}_{\mu} \rightarrow \bar{\nu}_{e}) =$$

$$4 |U_{e4}|^2 |U_{\mu4}|^2 \sin^2(1.27 \Delta m_{41}^2 L/E)$$

$$+ 4 |U_{e5}|^2 |U_{\mu5}|^2 \sin^2(1.27 \Delta m_{51}^2 L/E)$$

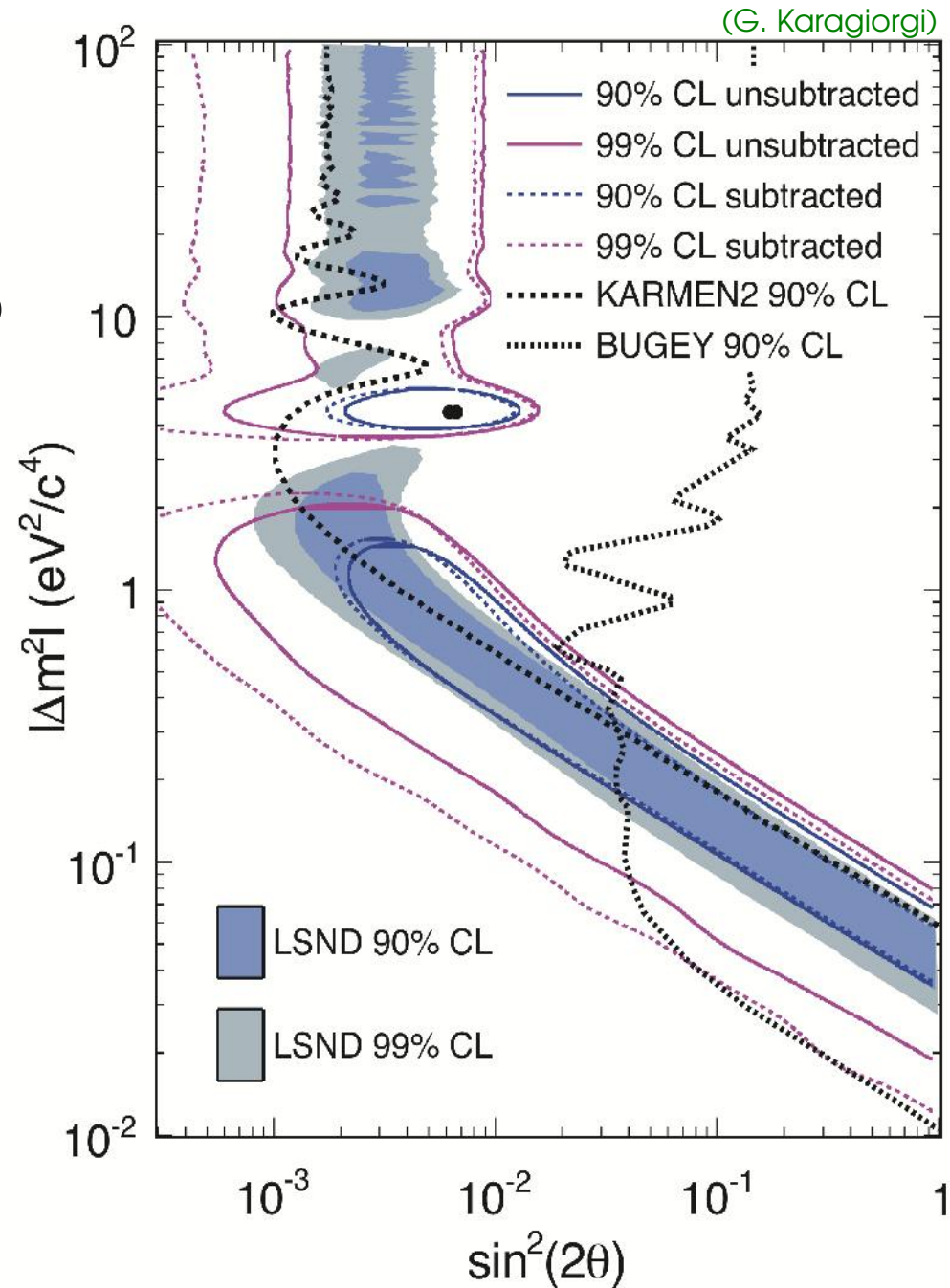
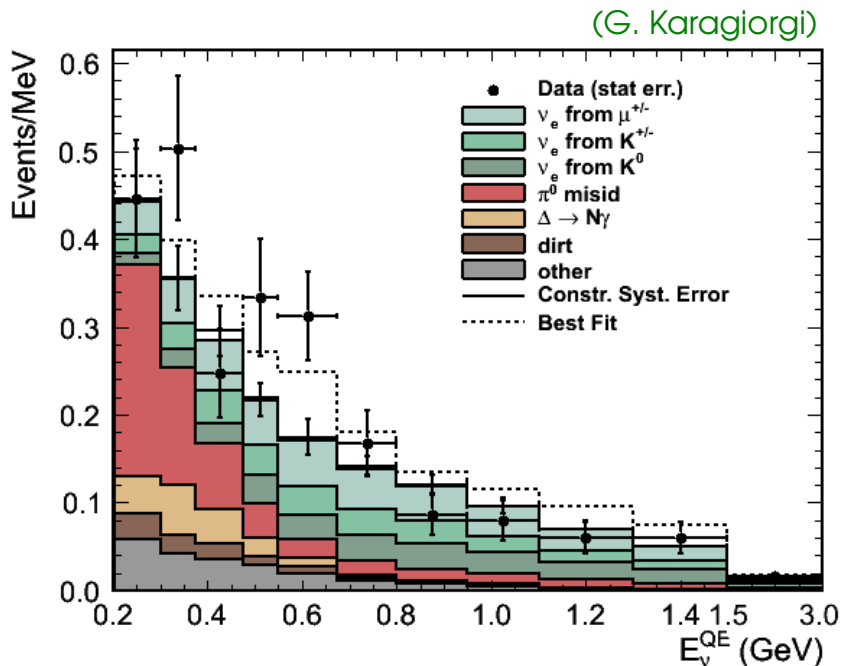
$$+ 4 |U_{e4}| |U_{\mu4}| |U_{e5}| |U_{\mu5}|$$

$$\sin(1.27 \Delta m_{41}^2 L/E) \sin(1.27 \Delta m_{51}^2 L/E)$$

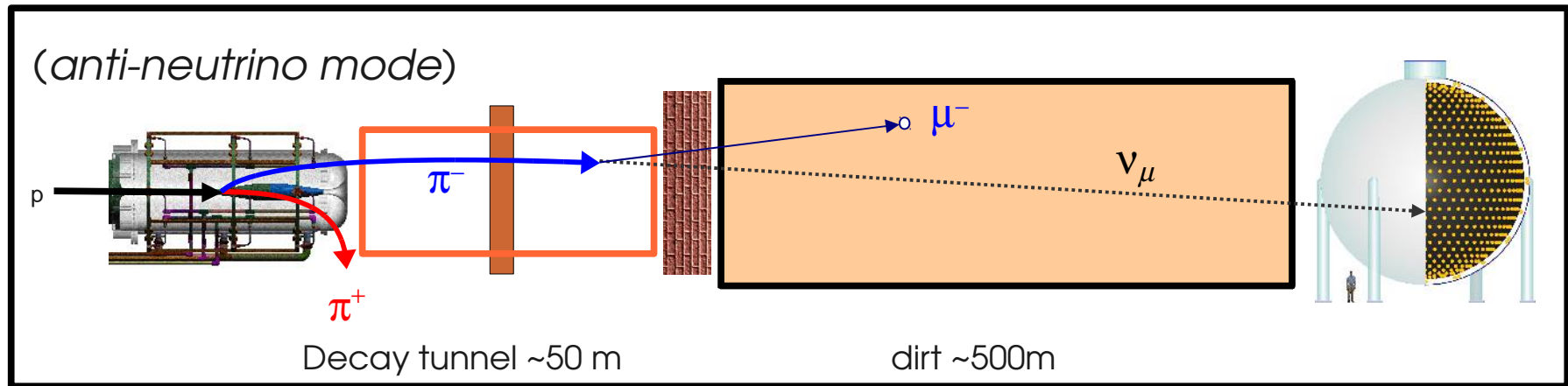
$$\cos(1.27 \Delta m_{54}^2 L/E \pm \phi_{45})$$

Fit $E > 200$ MeV

- Restar exceso debido a neutrinos in modo de antineutrinos (11.6 events)
- Best fit $(\sin^2 2\theta, \Delta m^2) = (0.0061, 4.42 \text{ eV}^2)$
- **Datos consistentes con señal de LSND**



25 m Absorber



Two periods running (in $\bar{\nu}$ mode) with 1 & 2 absorber plates

- 1 absorber plate: **0.569E20 POT**
- 2 absorber plates: **0.612E20 POT**

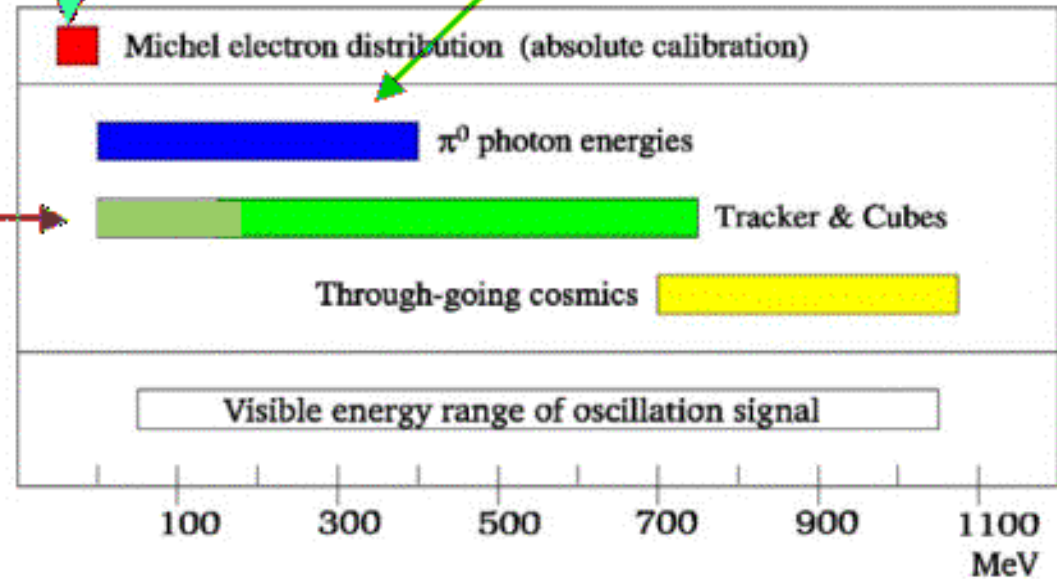
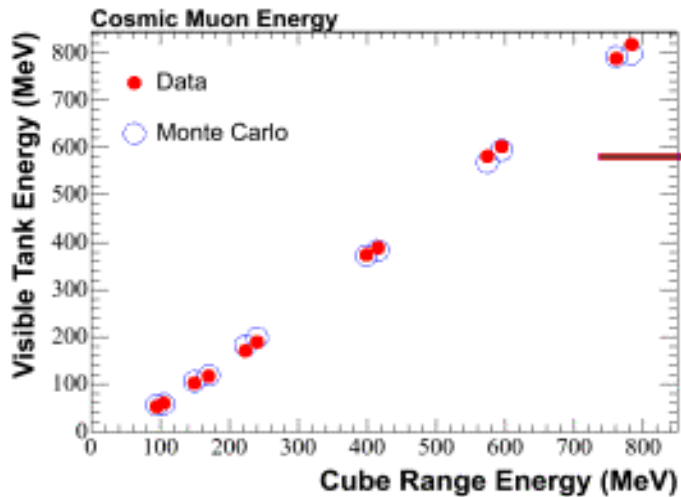
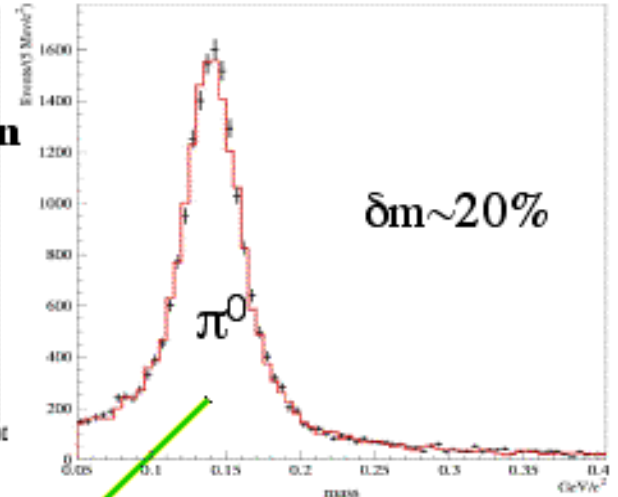
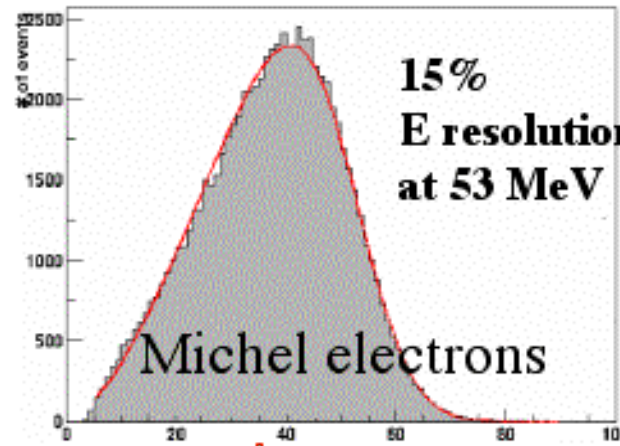
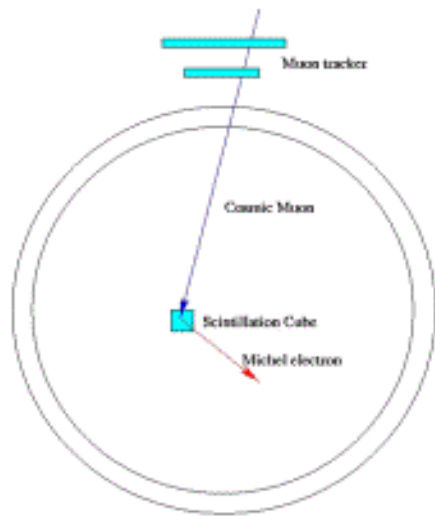
Good data/MC agreement in high statistics samples

(numu CCQE, NC pi0, ...)

Data included in latest (2010) analysis

Detector calibration

Tracker system



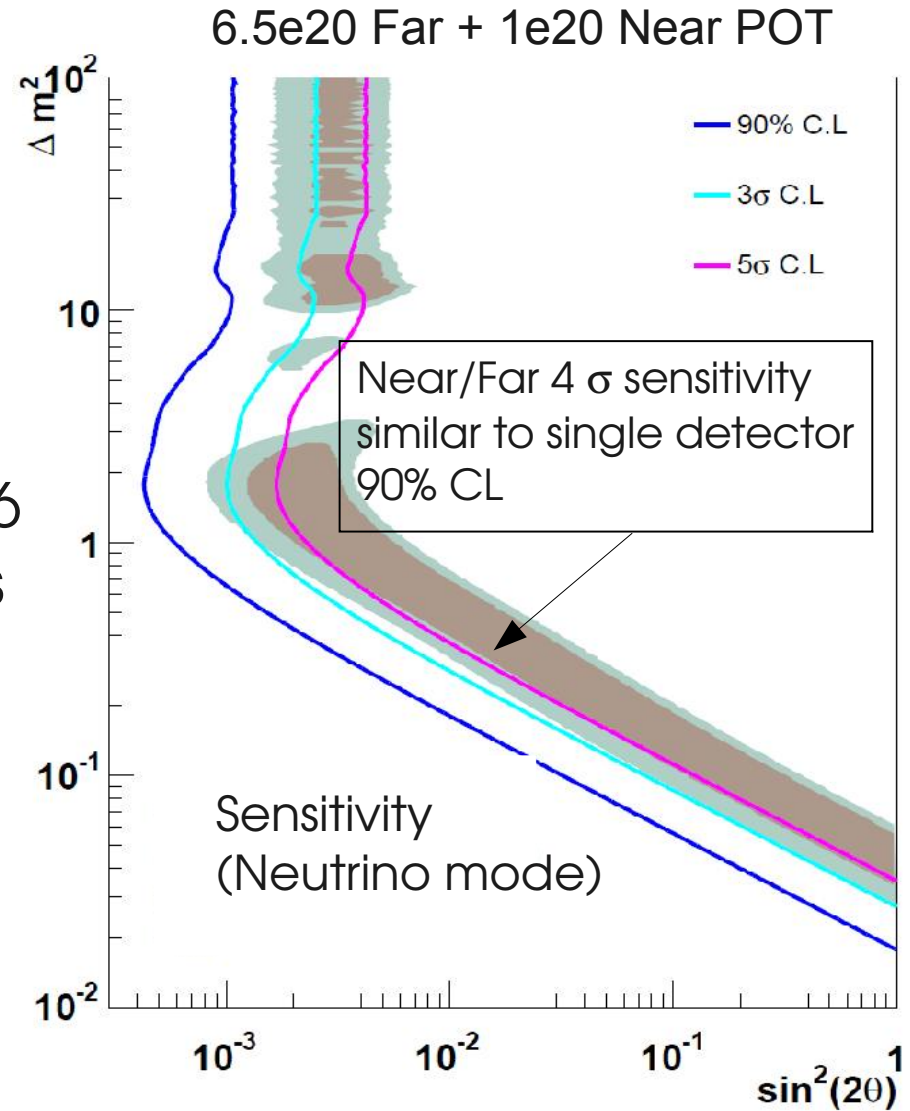
BooNE

MiniBooNE like detector at 200m

Flux, cross section and optical model errors cancel in 200m/500m ratio analysis

Present neutrino low energy excess is 6 sigma statistical; 3 σ when systematics are included

Gain statistics quickly, already have far detector data

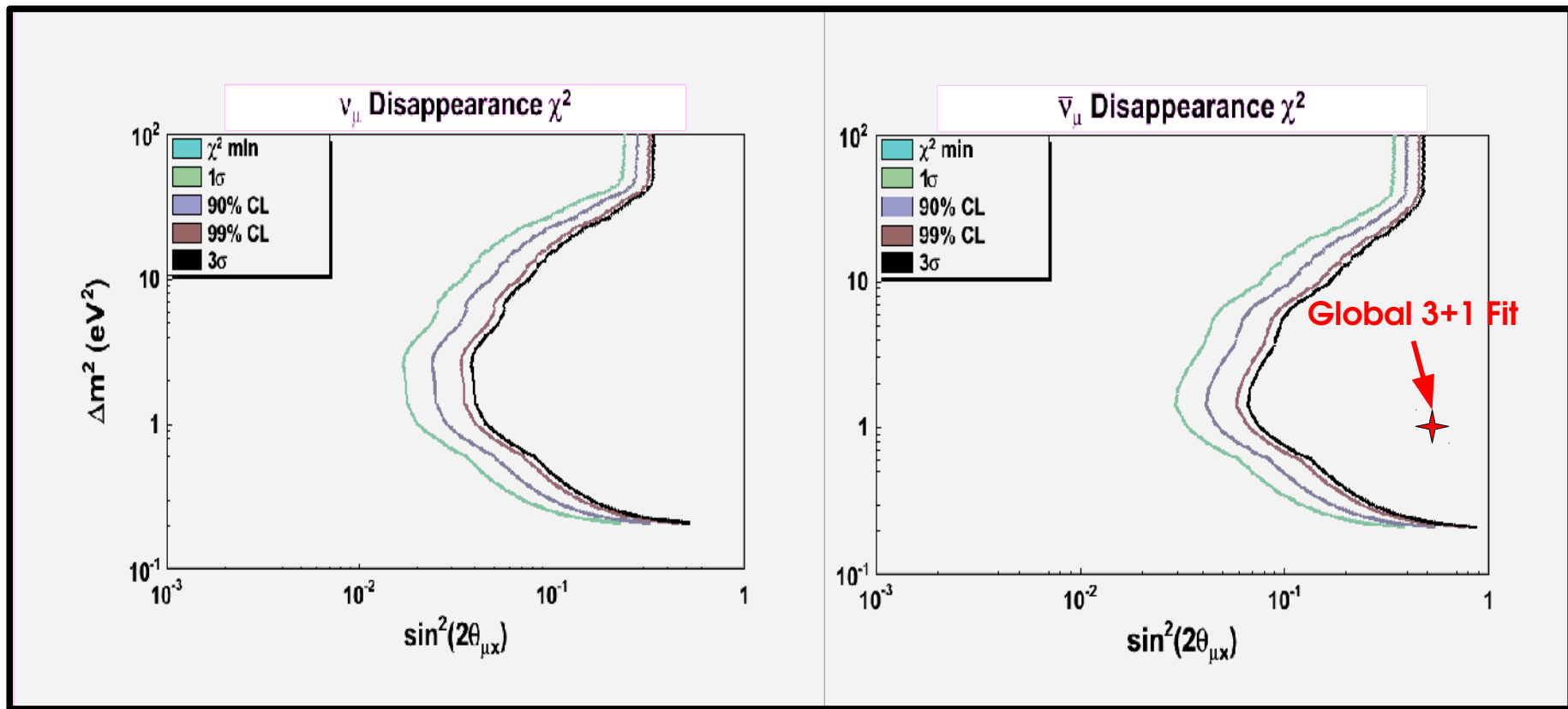


BooNE

Better sensitivity to ν_μ ($\bar{\nu}_\mu$) disappearance

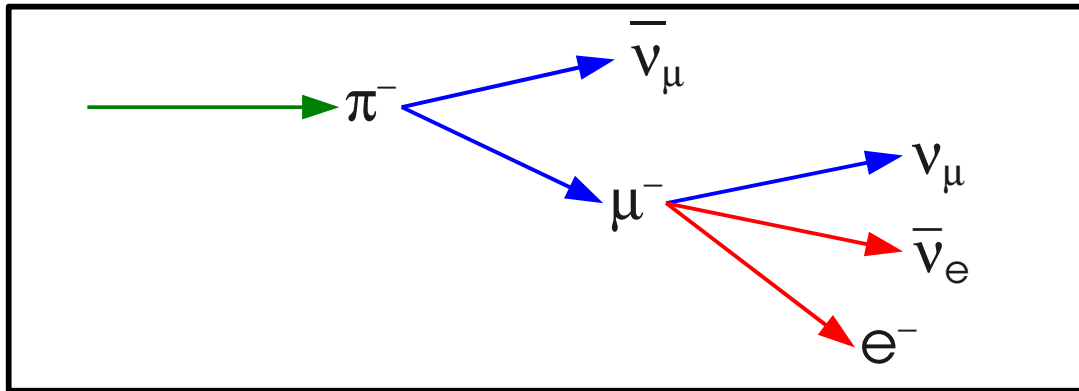
Look for CPT violation ($\nu_\mu \not\leftrightarrow \bar{\nu}_\mu \neq \bar{\nu}_\mu \not\leftrightarrow \nu_\mu$)

6.5e20 Far/1e20 Near POT 1e21 Far/1e20 Near POT



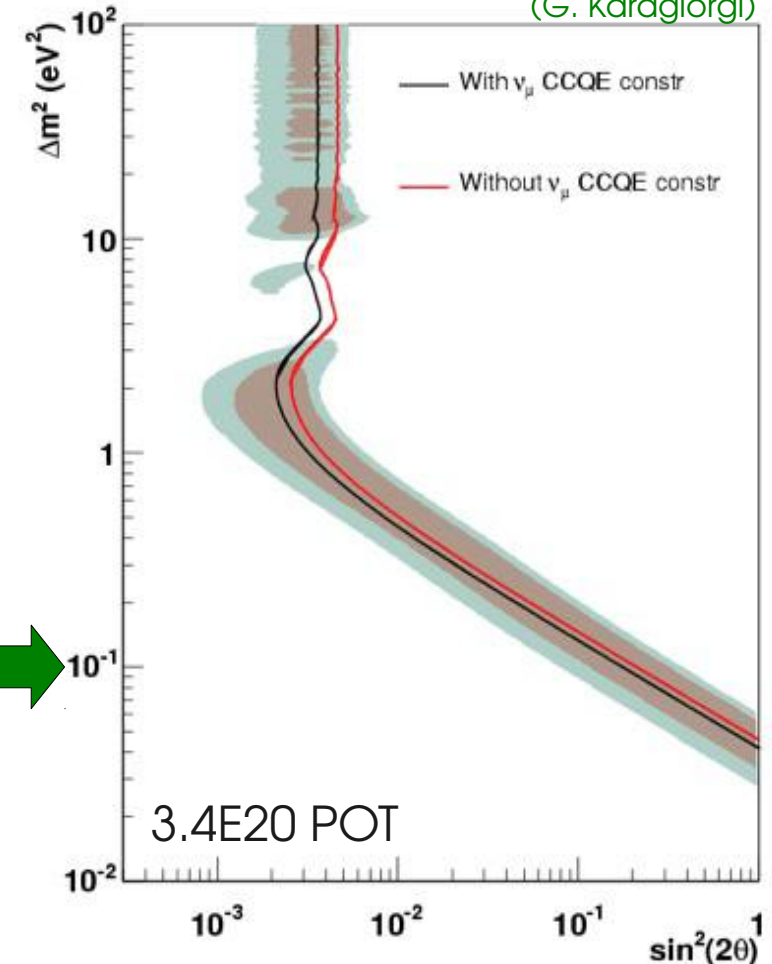
Fit method example

Strong correlations between $\bar{\nu}_e$ signal, background, and $\bar{\nu}_\mu$ CCQE samples

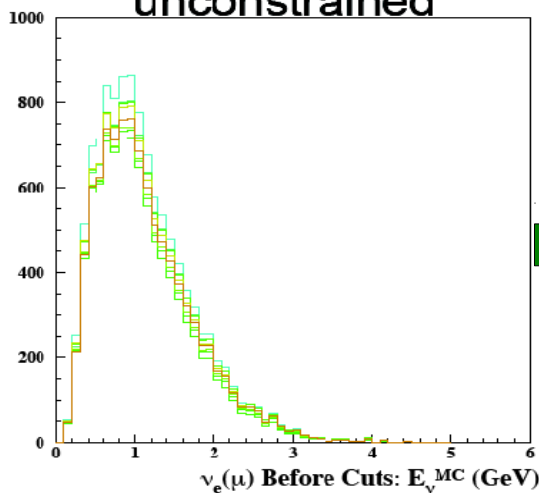


Improves sensitivity by constraining systematic uncertainties

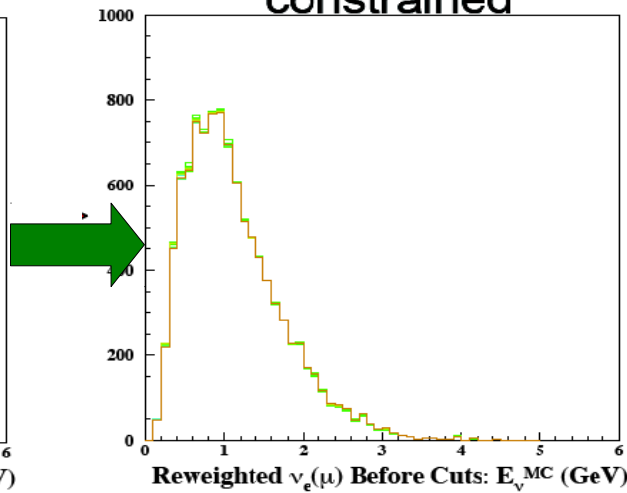
(G. Karagiorgi)



$\bar{\nu}_e$ from μ^- decay
unconstrained

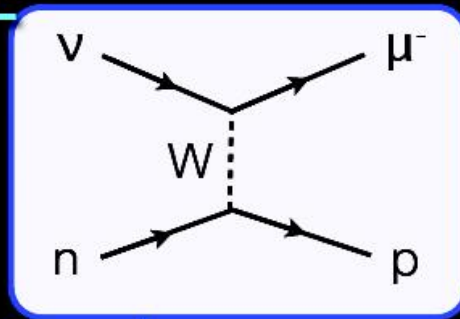


$\bar{\nu}_e$ from μ^- decay
constrained



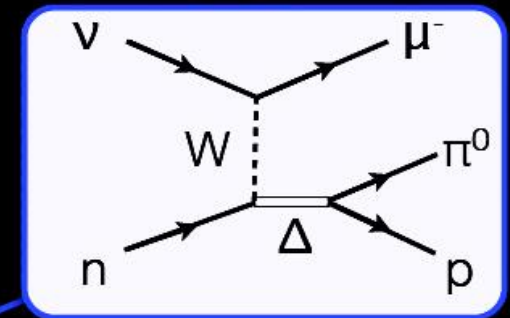
CCQE

- A total of 6.3×10^{20} p.o.t. equates to $\sim 1,000,000$ total neutrino interactions.
- MiniBooNE has measured 5 modes in detail.

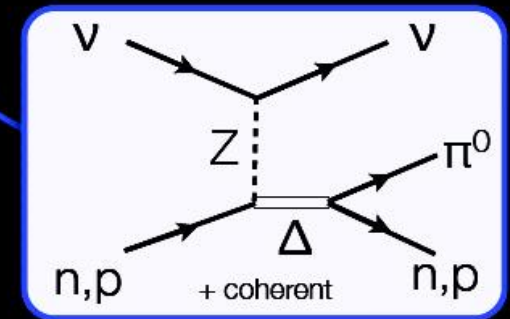
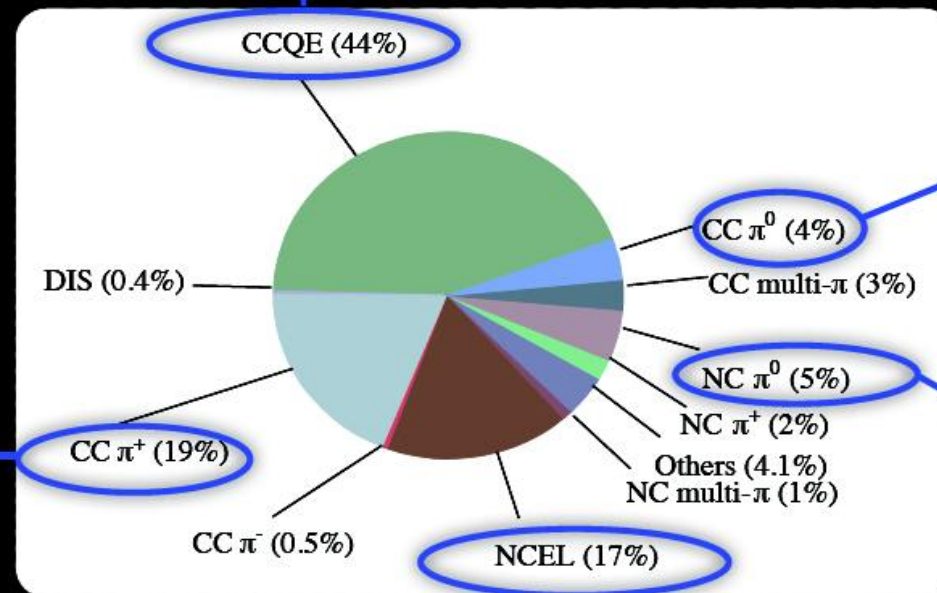
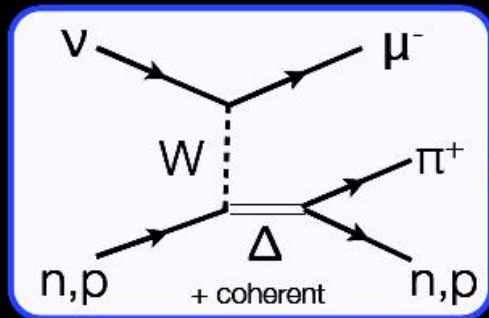


Predicted Event rates

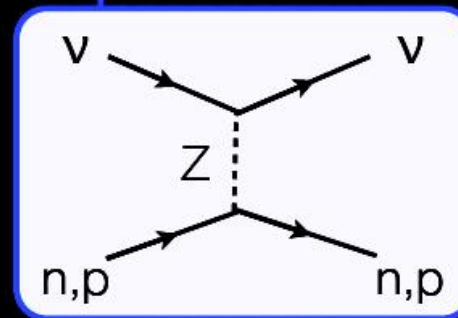
CCπ⁰



CCπ⁺



NCπ⁰

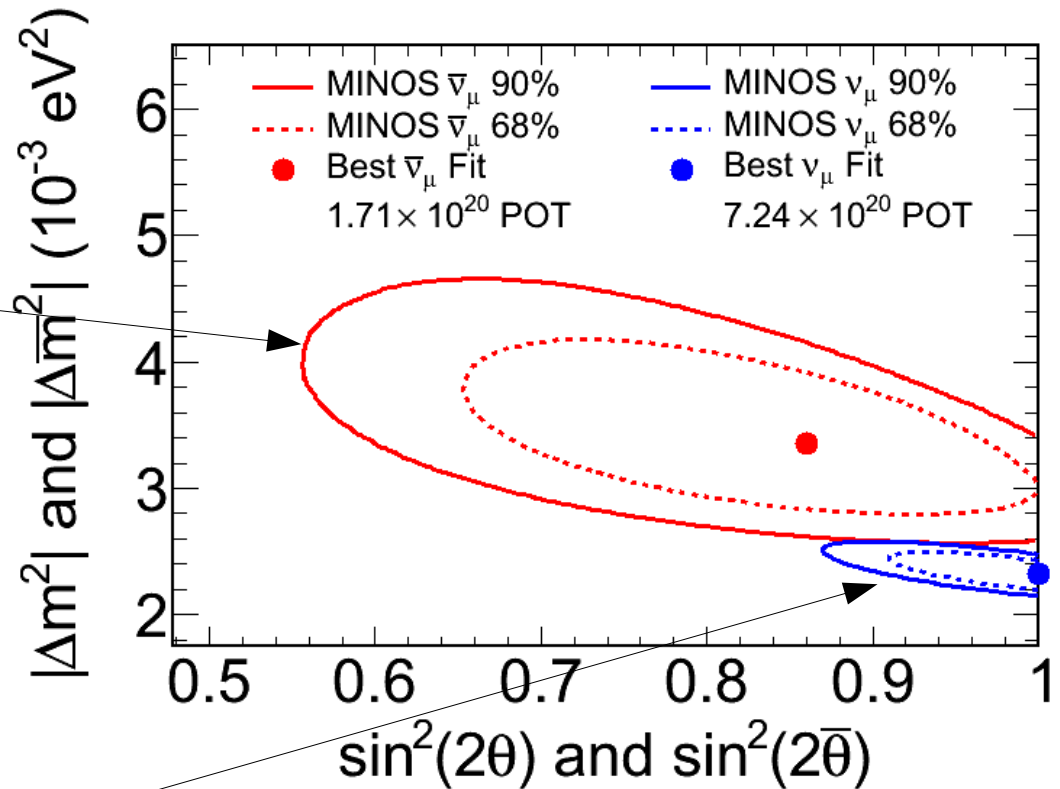
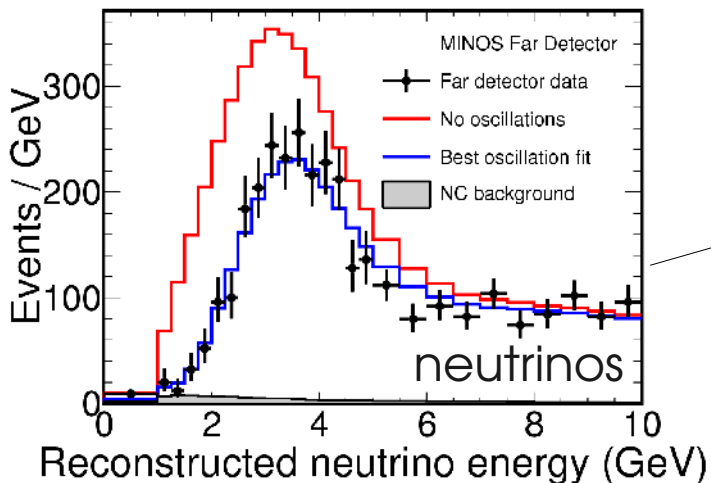
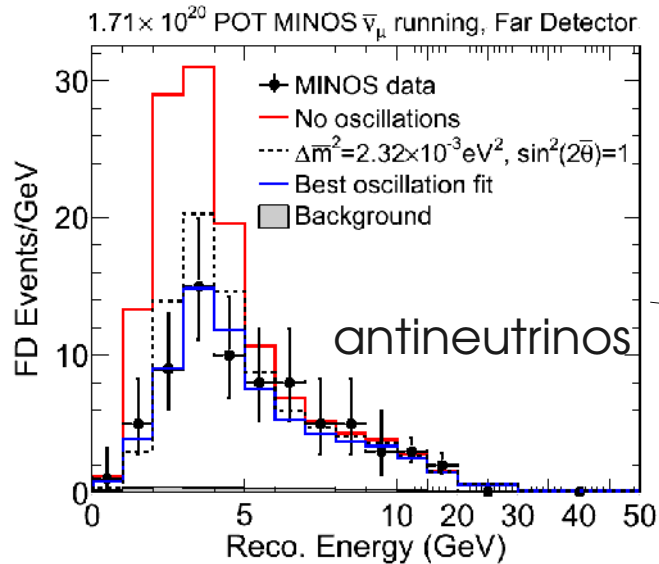


NCEL

- These 5 modes comprise **89%** of the total rate and **96%** of the CC modes.

Desaparición de ν_μ y $\bar{\nu}_\mu$ en MINOS

Hint de diferencia entre oscilaciones de neutrinos y antineutrinos en el experimento long-baseline (735 km) MINOS



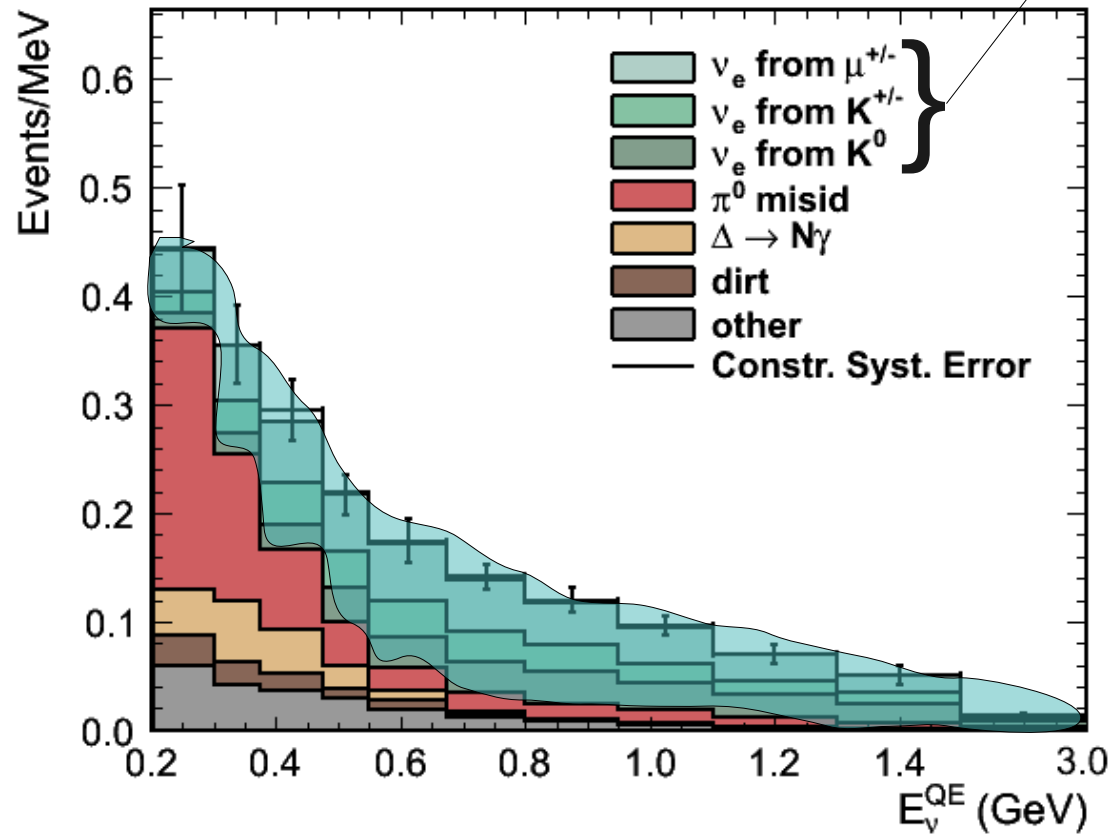
¿Indicaciones de diferencia fundamental entre neutrinos y antineutrinos?

Datos recientes de anti-neutrinos

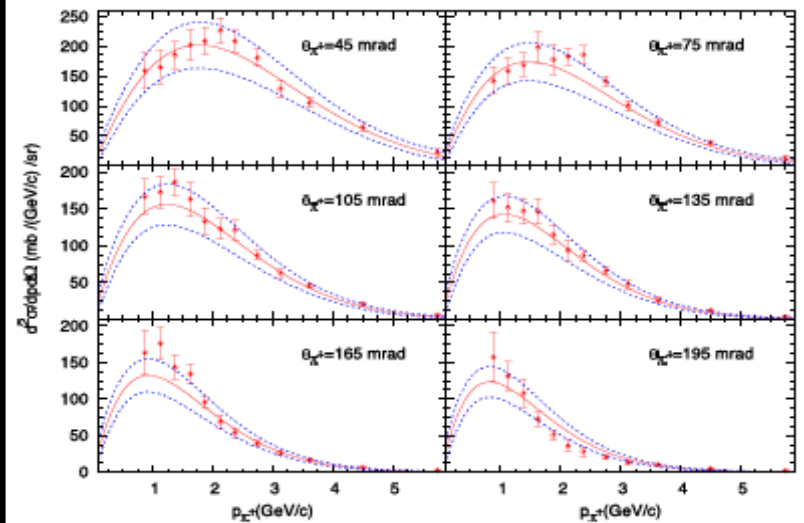
	200-475 MeV	475-1250 MeV	1250-3000 MeV
Datos	119	120	38
MC	100.48 ± 14.33	99.08 ± 13.98	34.2 ± 5.8
Exceso	18.52 ± 14.33	20.92 ± 13.98	3.8 ± 5.8
LSND Best Fit	7.6	22	3.5
ν exceso Baja-E	11.6	0	~ 0
LSND+Low E	19.2	22	3.5

Supone que el exceso de ν_e está presente en los ν_μ "WS" del haz

$\bar{\nu}_e$ background prediction



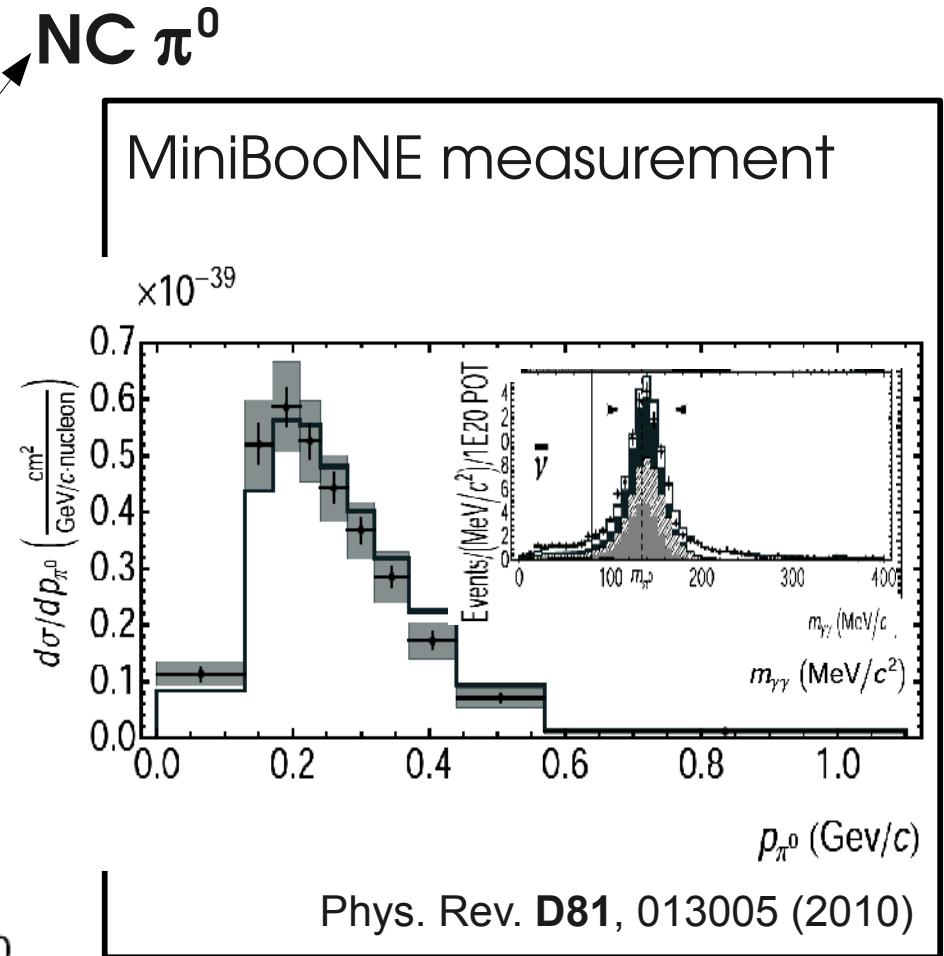
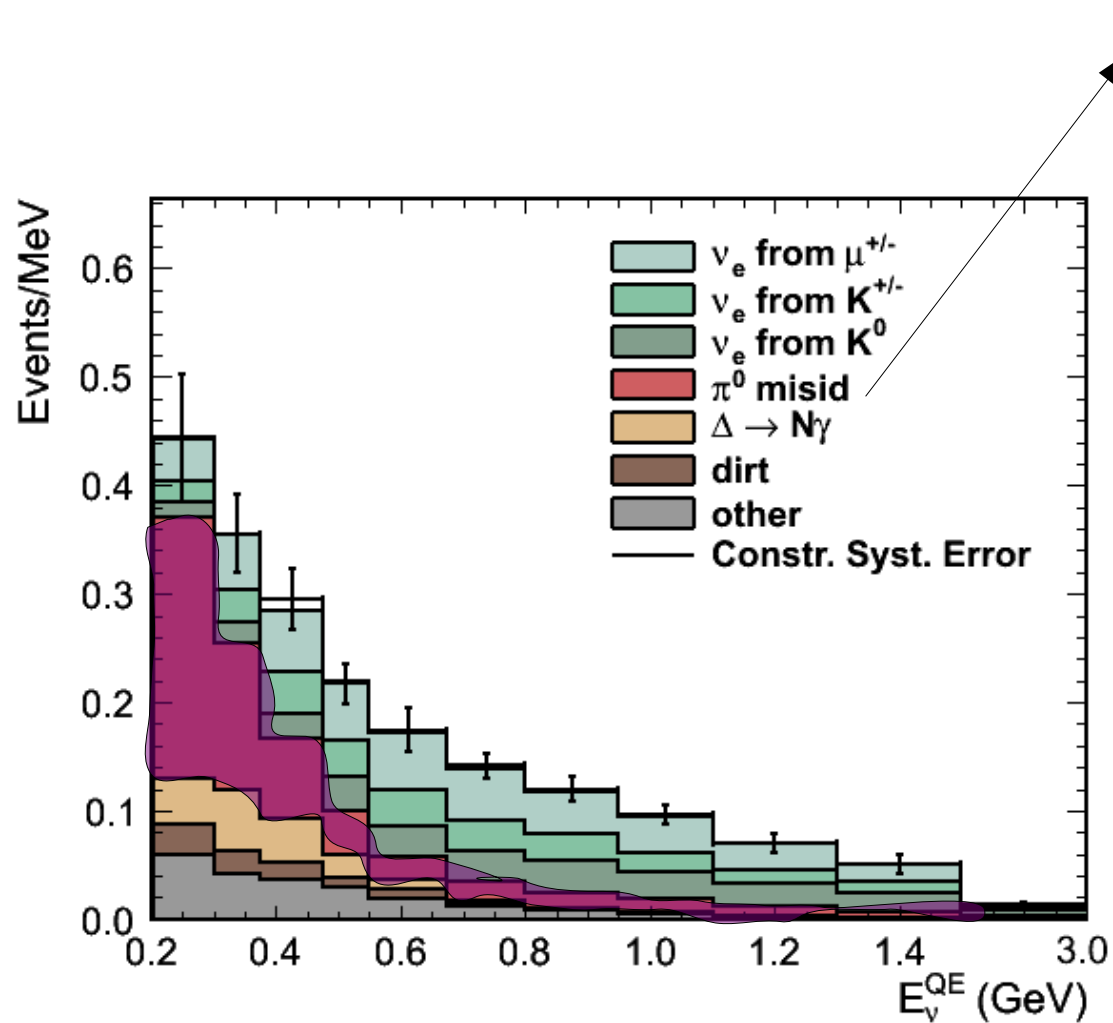
External measurements
- HARP p+Be for π^\pm



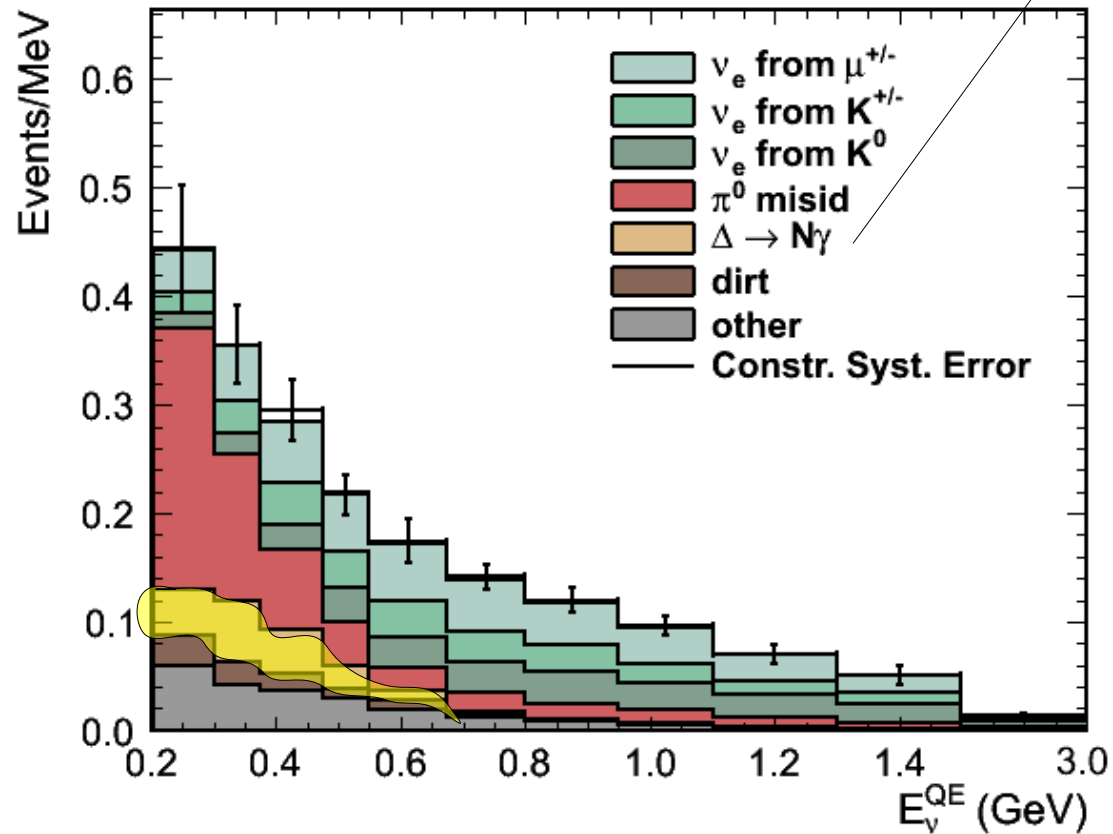
- Sanford-Wang fits to world K^\pm/K^0 data

MiniBooNE data constraints

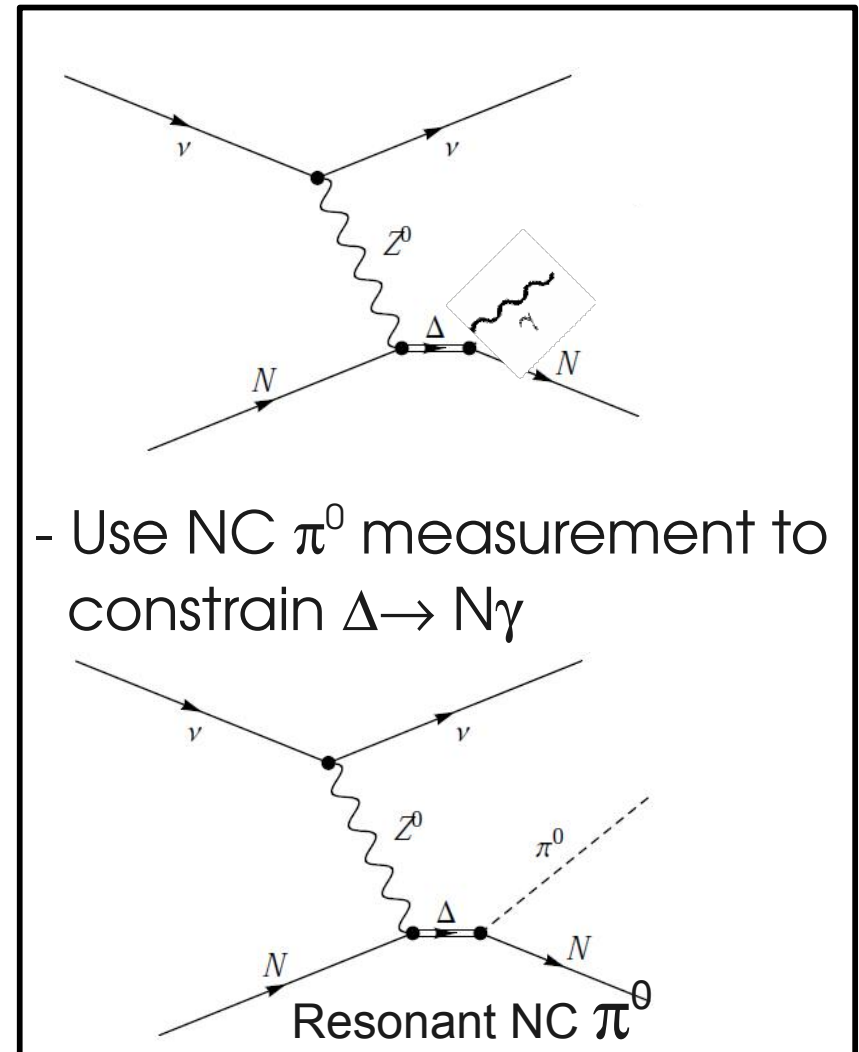
$\bar{\nu}_e$ background prediction



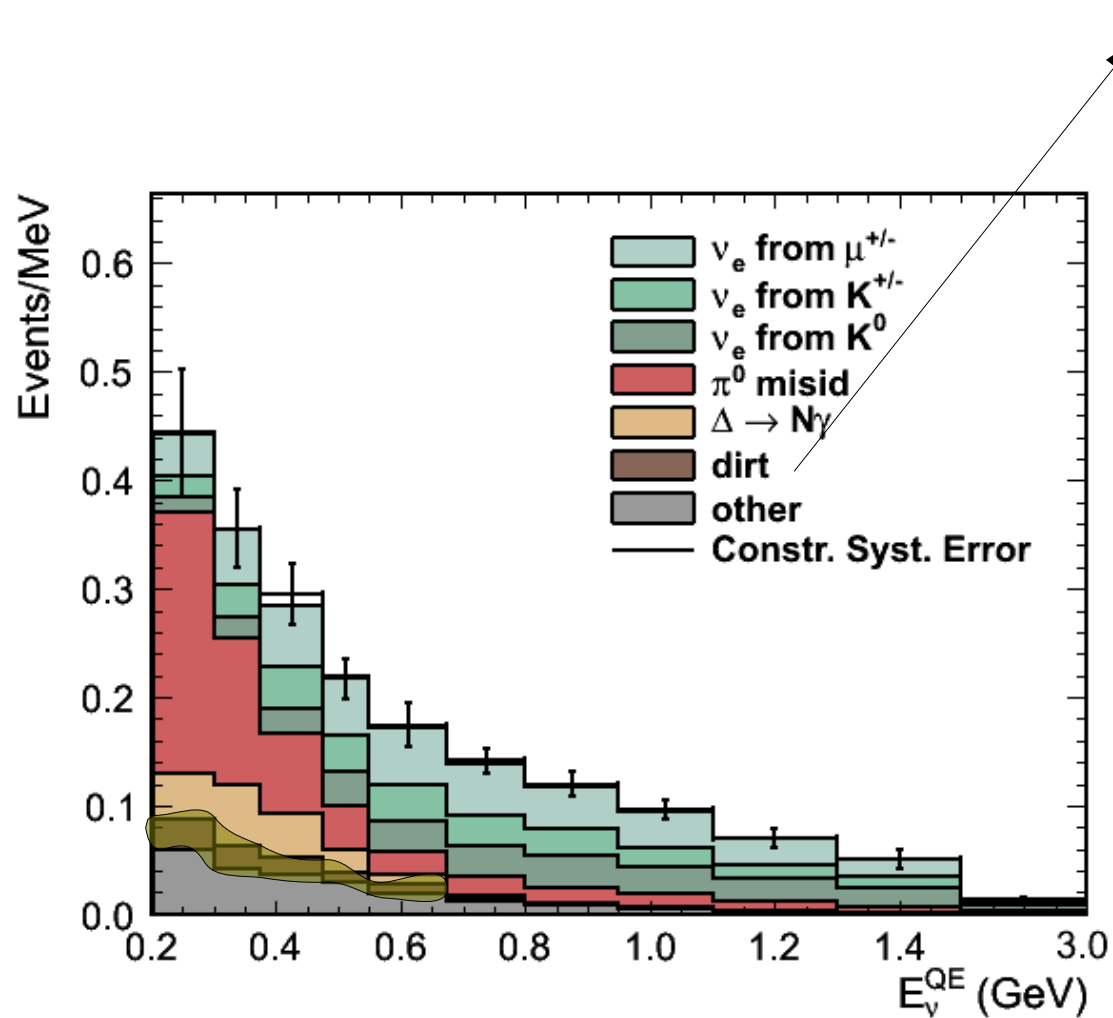
$\bar{\nu}_e$ background prediction



Radiative Δ decay



$\bar{\nu}_e$ background prediction



Dirt:

