

Introducción al Neutrino



EXCELENCIA
SEVERO
OCHOA

IFIC
INSTITUT DE FÍSICA
CORPUSCULAR

Clase II: Oscilaciones y neutrinos masivos

Lo que sabemos

- Neutrinos existen.
- Solo interactuan vía la fuerza débil.
- Por ellos sabemos que hay 3 familias de fermiones.
- Todo el mundo asumía que no tenían masa.

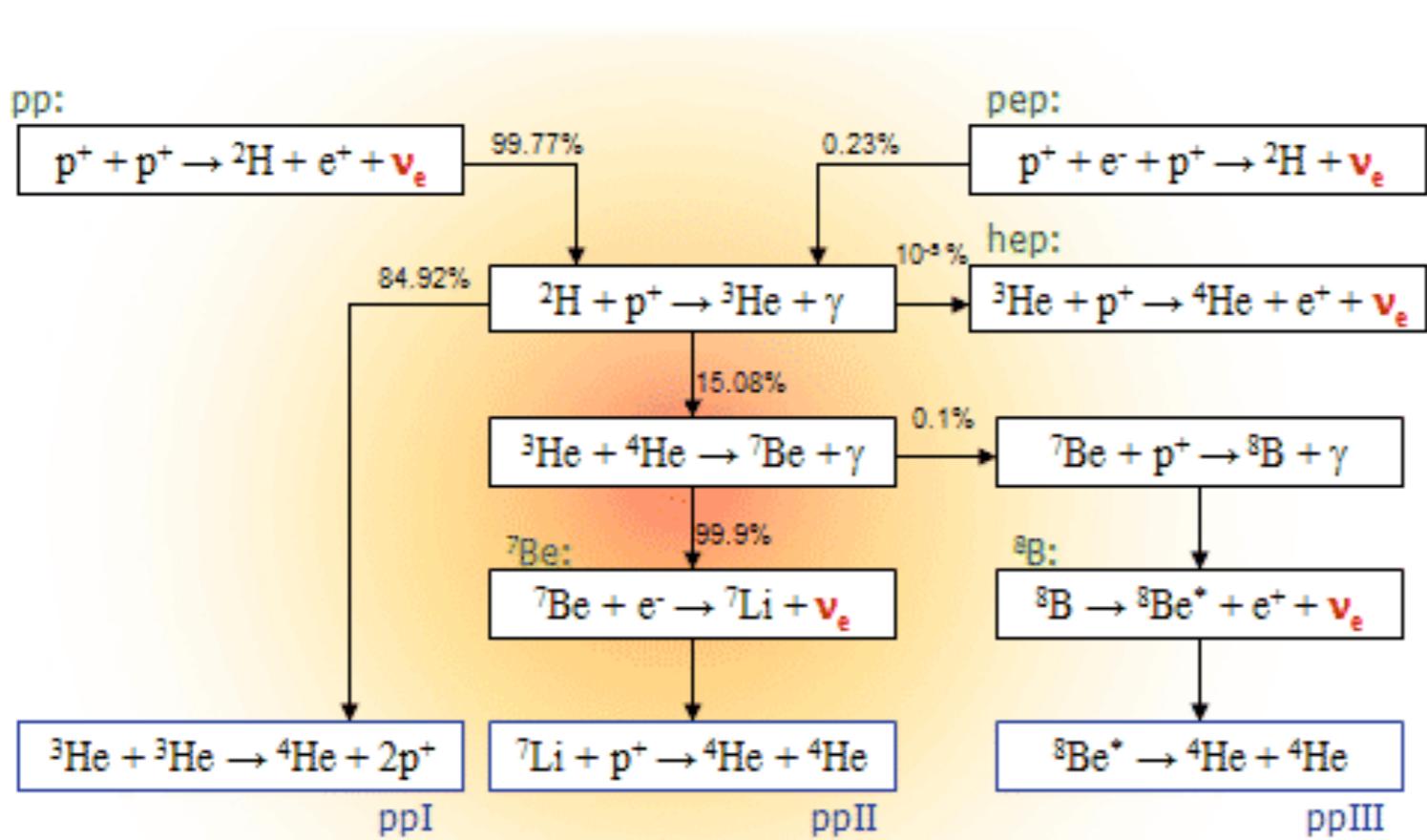
El sol y sus neutrinos

1939 Bethe

Establishes the theory of stellar nucleosynthesis



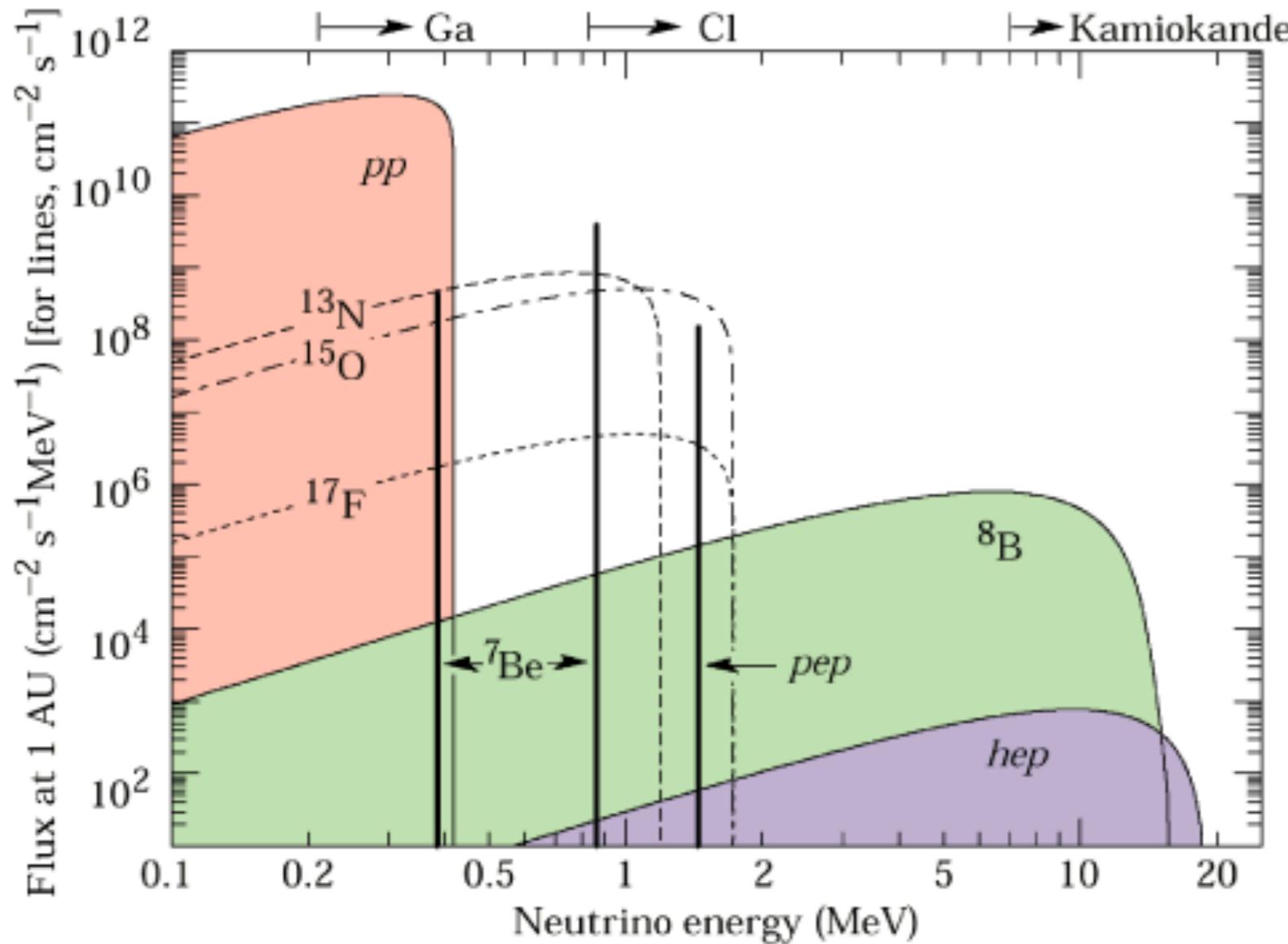
Nobel 1967



El sol se mantiene estable por las reacciones nucleares en su core.

Tienen que producir neutrinos

El sol y sus neutrinos 2



Bahcall

**El modelo del sol o ‘standard solar model’ (SSM)
predice los flujos**

¿Cómo podemos detectarlos?

En 1966 detectamos por primera vez neutrinos solares. Usando espectroscopia contaron el número de átomos de argón después de exponer un fluido rico en cloro durante meses a los neutrinos del sol



R. Davis
Nobel 2002

Detectaron ~40% de los que esperaban



¿Qué falta en nuestro conocimiento? ¿Hay algo mal en el detector?
¿Qué más tenemos que entender para salir de dudas?

¿Cómo lo vamos a solucionar?

¿Los neutrinos vienen del sol?

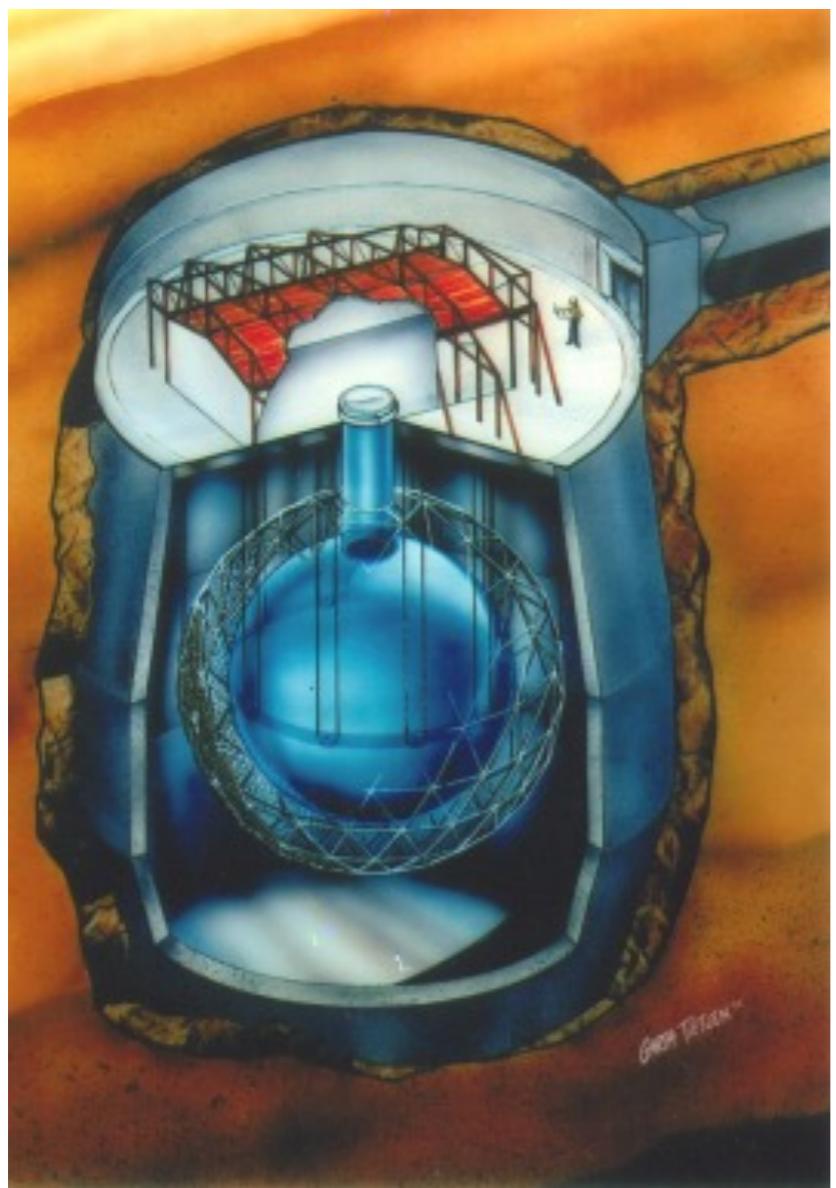
¿Los cálculos de Bahcall son correctos?

¿Hay algo raro con los neutrinos?

¿Los neutrinos hacen algo que no tenemos en cuenta?

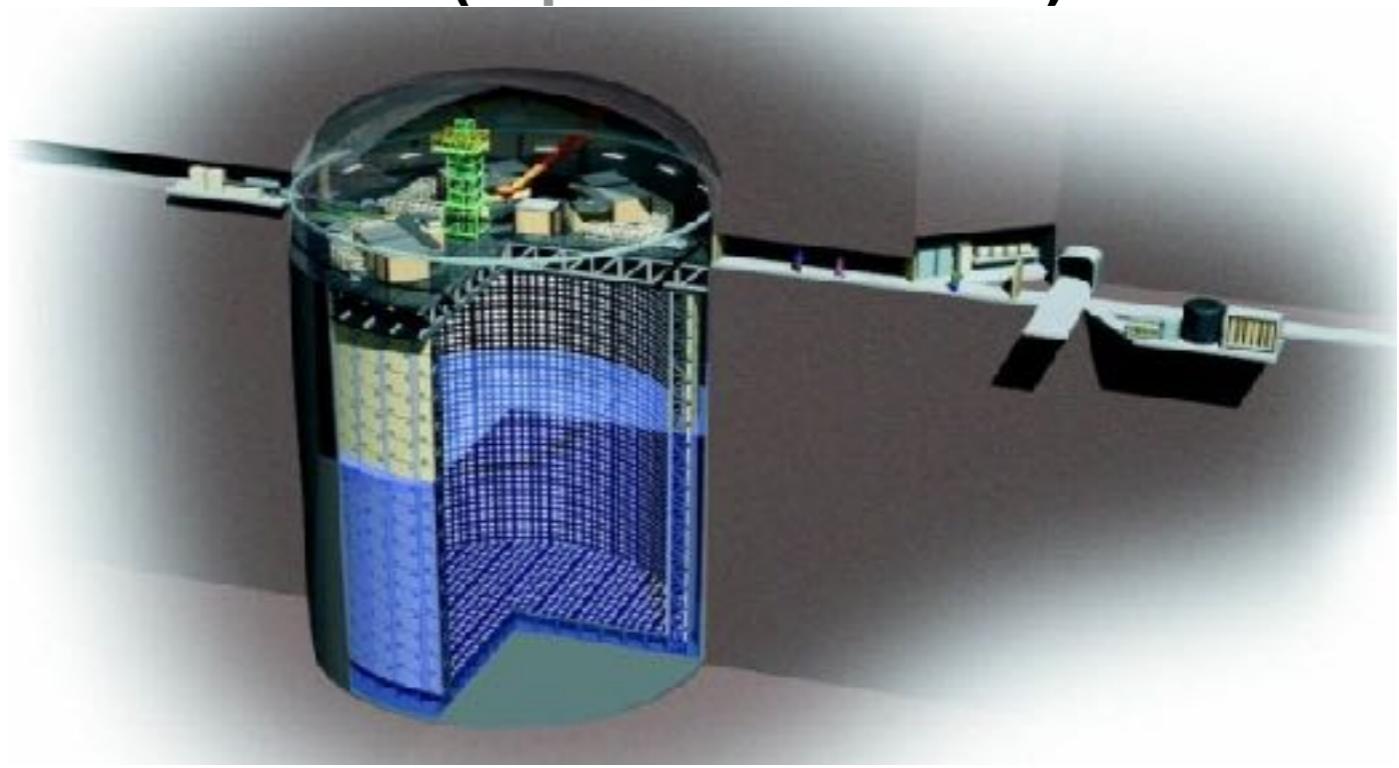
Dos o tres experimentos para saberlo todo

Sudbury Neutrino Observatory (SNO)



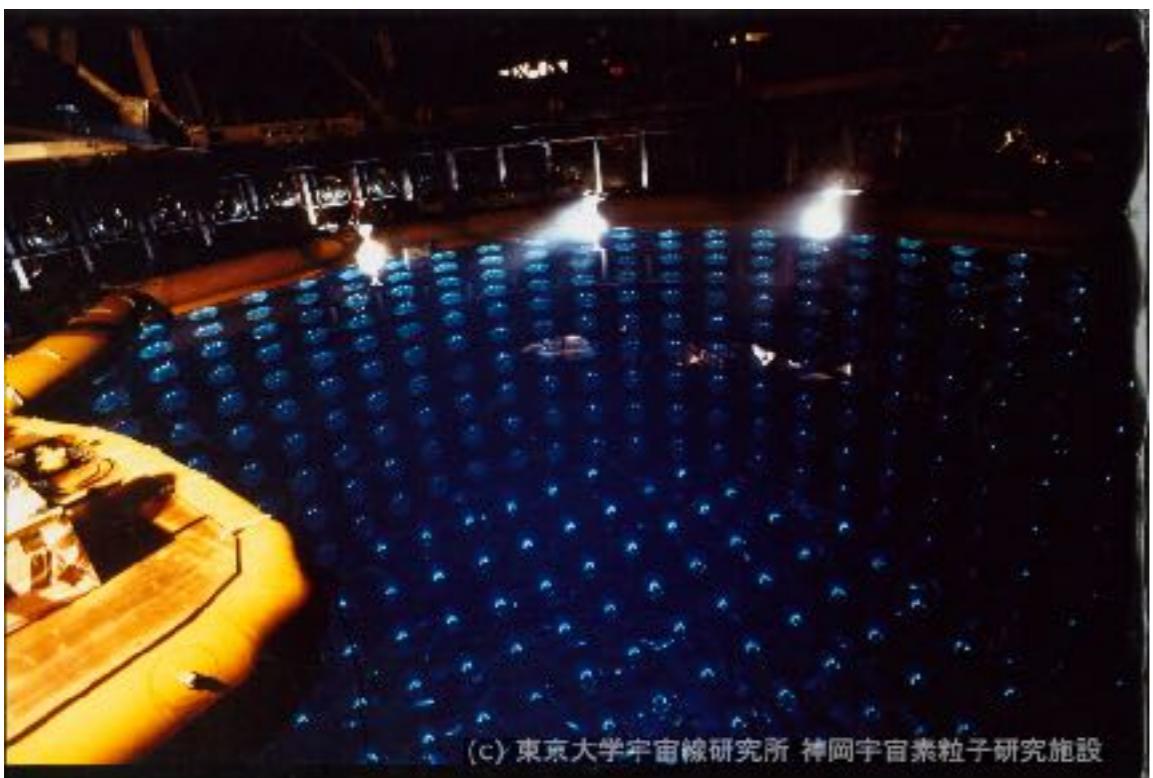
Agua pesada, PMTs

Kamioka Nucleon Decay Experiment
(superKamiokaNDE)



Agua, radiación Cherenkov, electrónica rápida

KamiokaNDE:

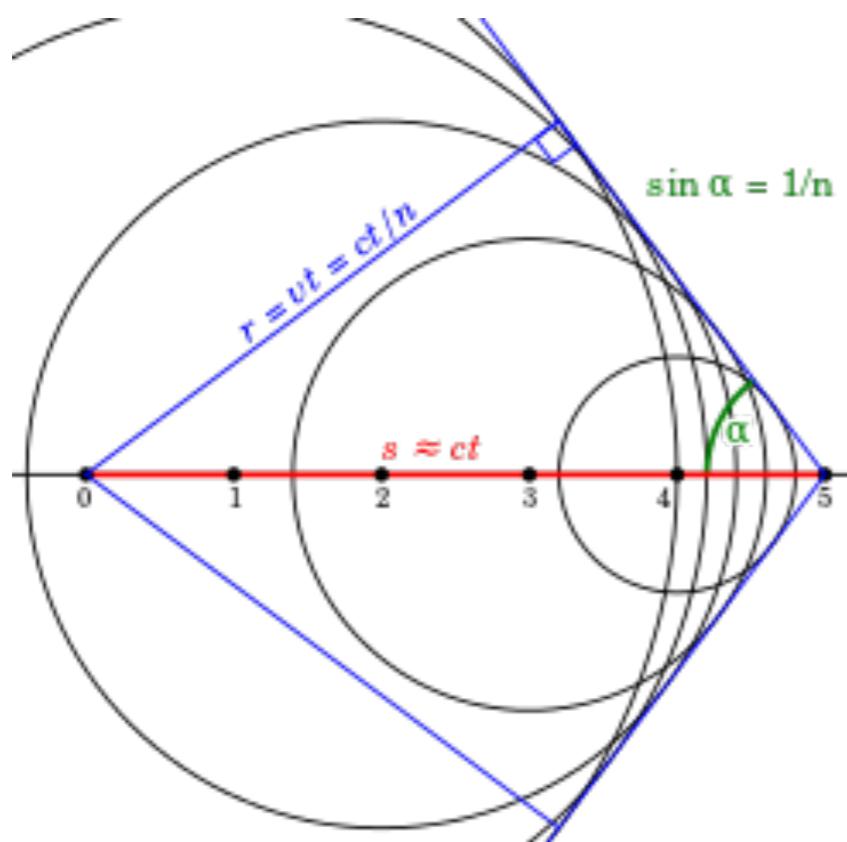


KamiokaNDE y su sucesor superKamiokaNDE buscaron, entre otras cosas, determinar la dirección de donde venían los neutrinos ‘solares’

Detección ‘online’ de la luz cherénkov

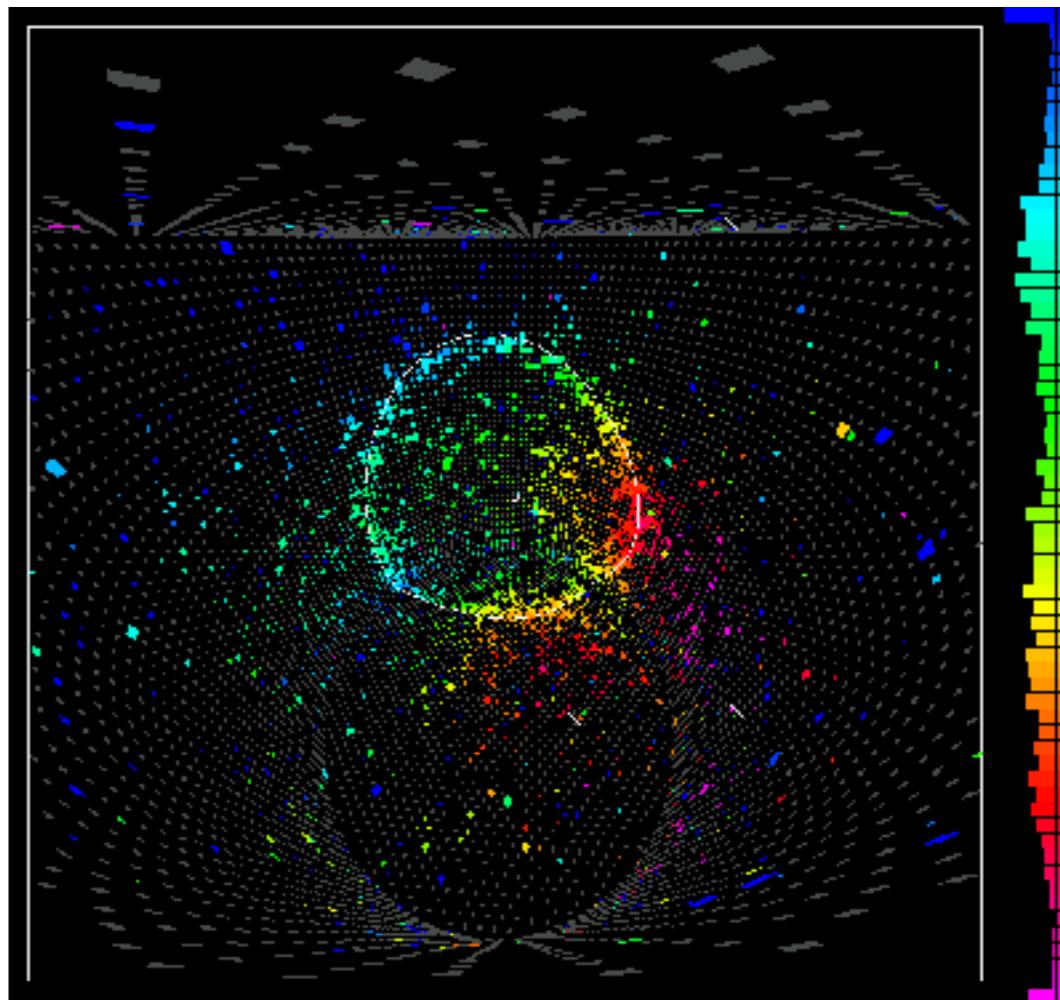
Cherenkov

La velocidad de la luz cambia según el índice de refracción del material

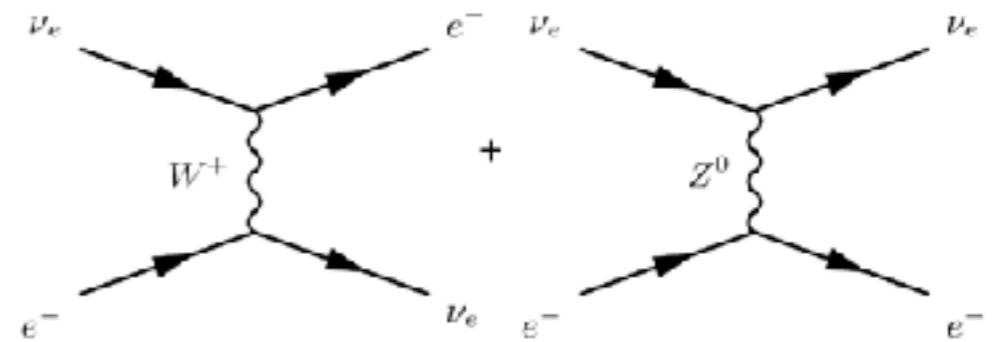
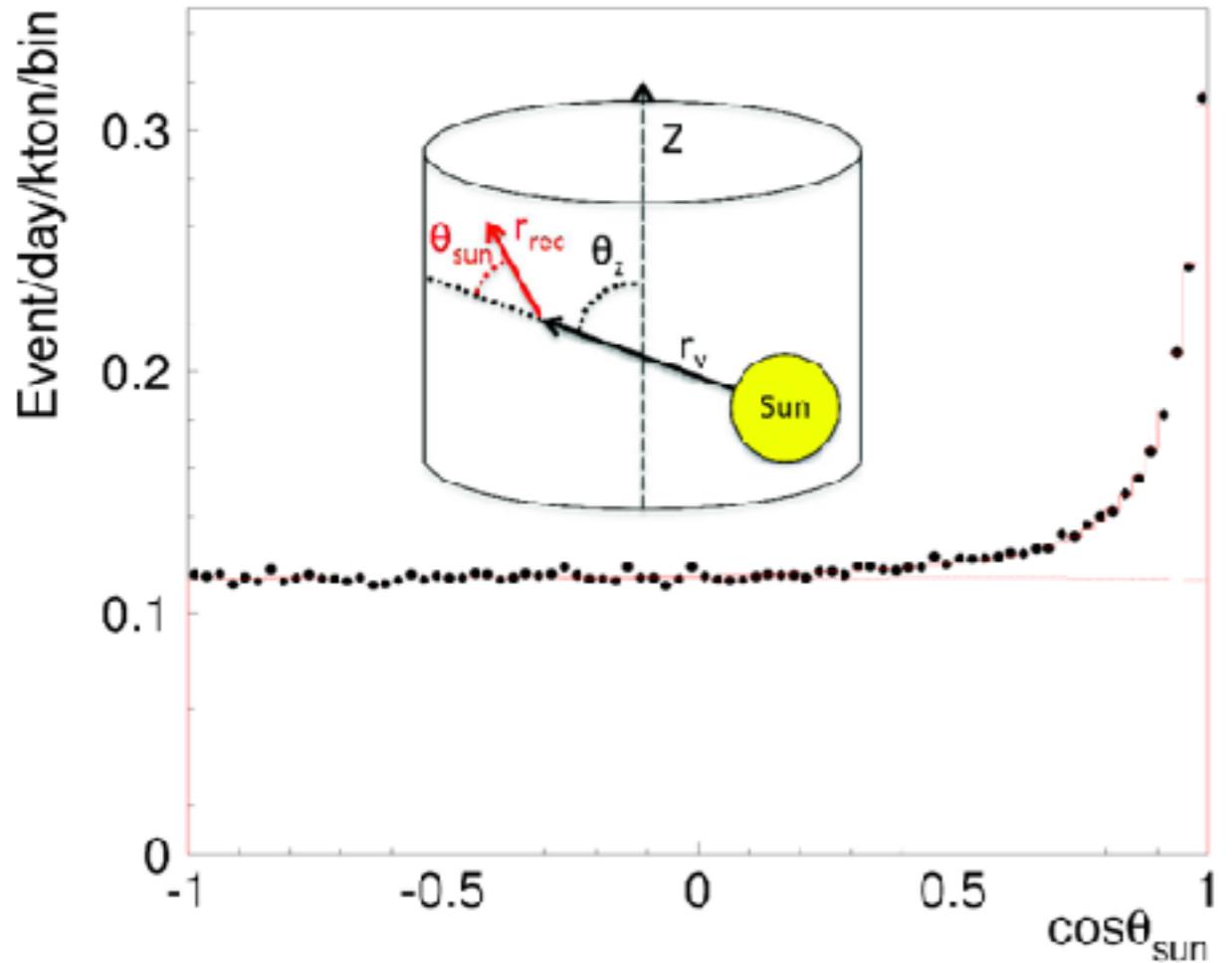


De ser suficientemente relativista, producen luz azul que se puede detectar. El umbral energético depende de la masa de la partícula.

Al producirse en una interacción CC o ser expulsado en una interacción NC los electrones son relativistas.



Origen de los neutrinos ‘solares’



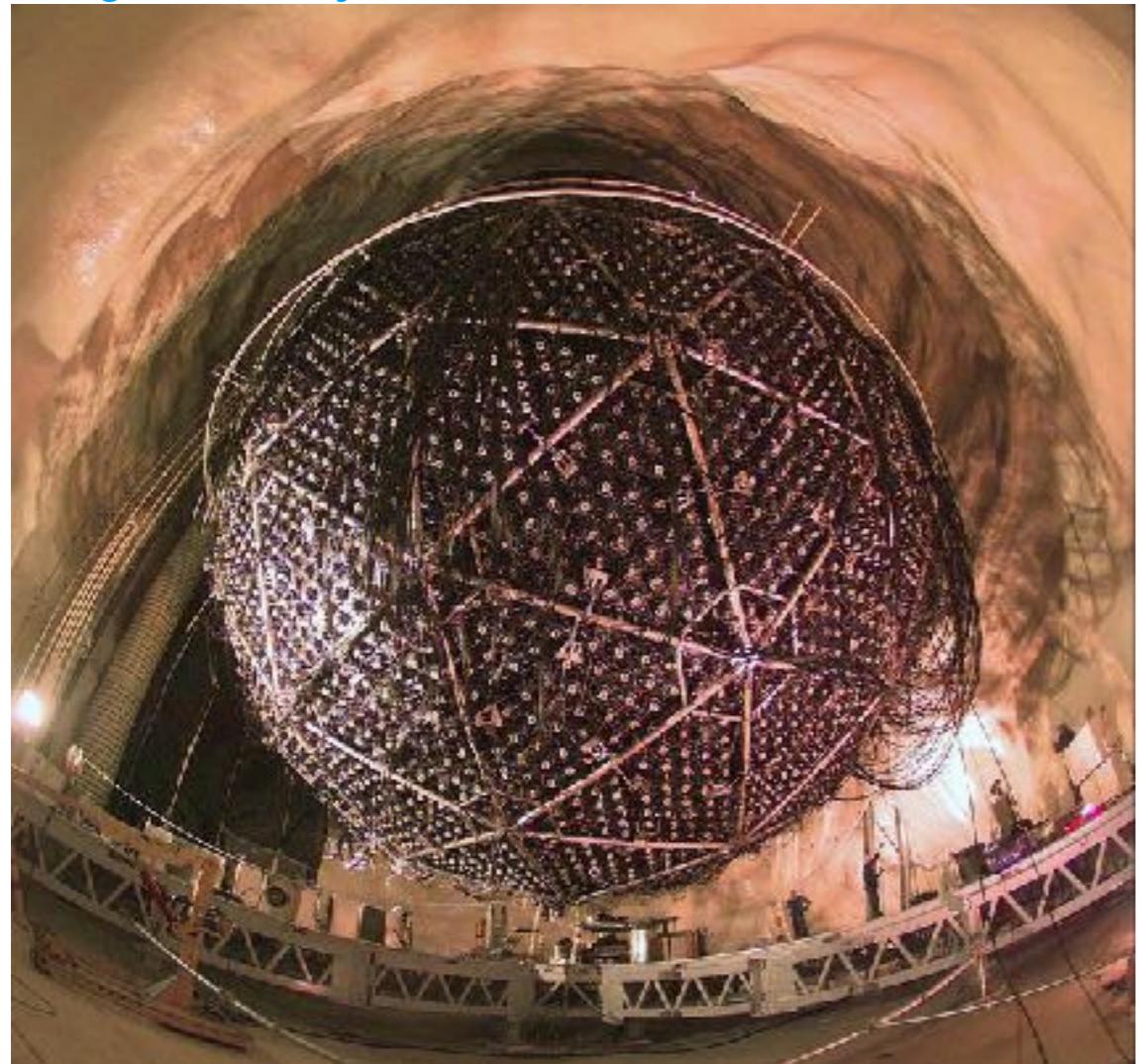
La interacción con un electron resulta en un electron moviéndose en la misma dirección que el neutrino

Midiendo el ángulo con respecto al sol vieron un correlación obvia

Volveremos a este importantísimo experimento más tarde

SNO: contando todos los neutrinos solares

Images courtesy of SNOLab



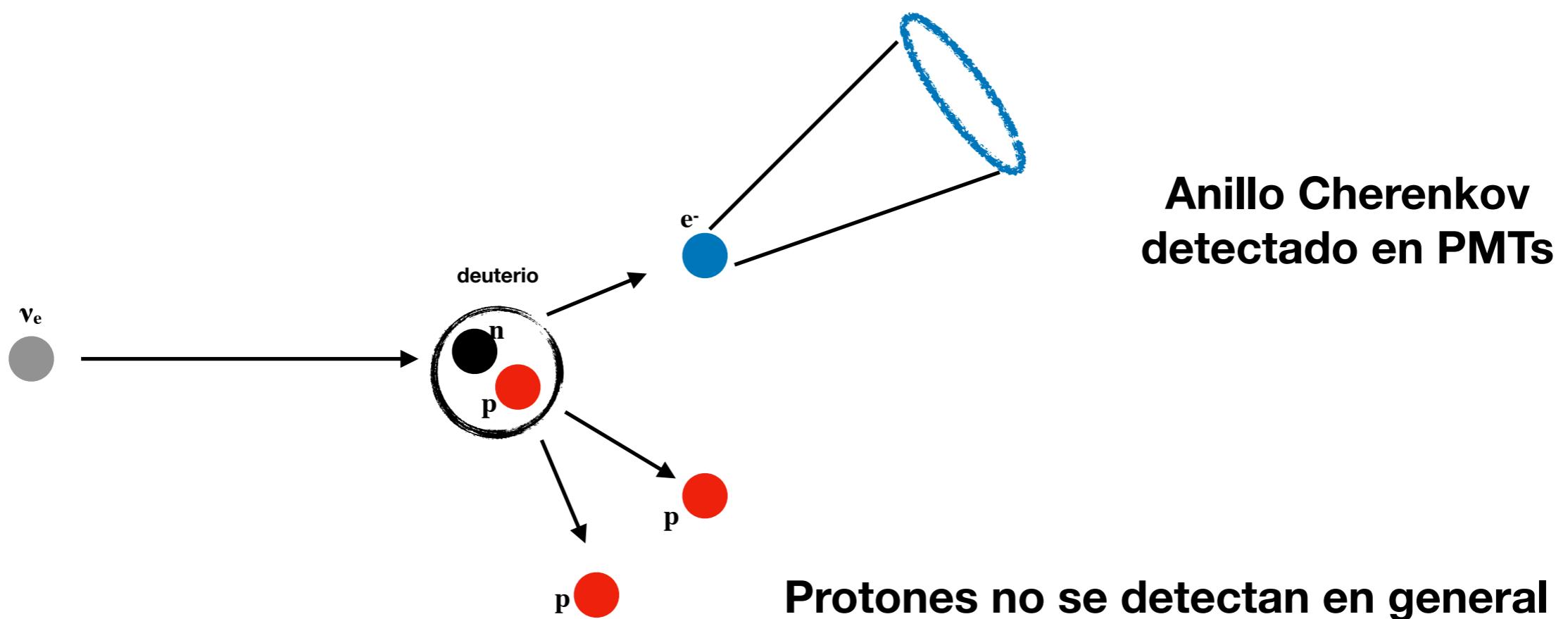
D₂O + sales, instrumentado con PMTs



Capaz de detectar el flujo total debido a su sensibilidad a las interacciones NC

CC: contando ν_e

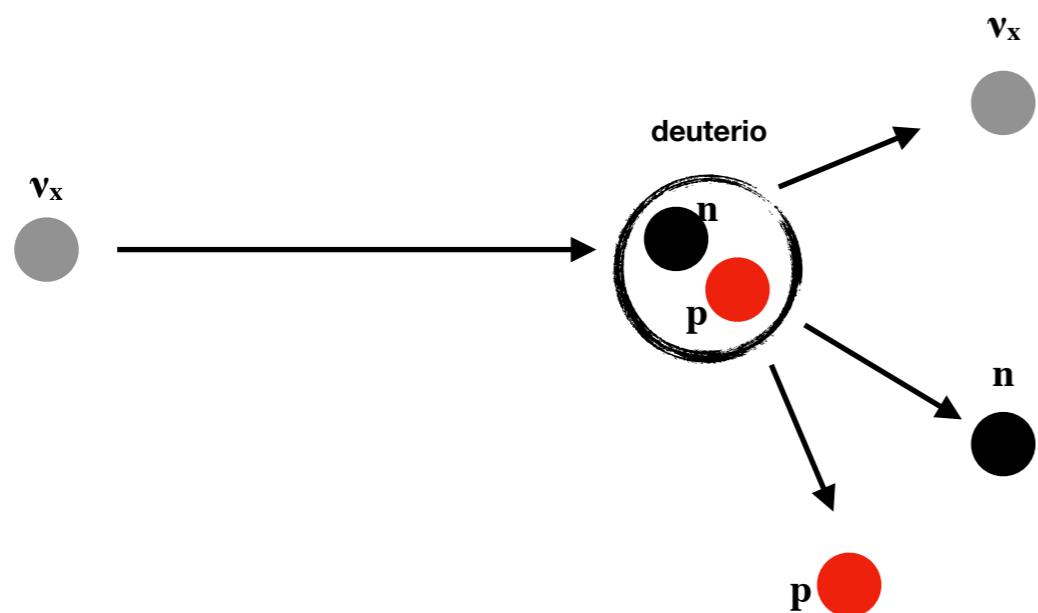
Interacciones CC con neutrones del deuterio producen:



Dependencia clara entre energía del electrón y del neutrino

NC: contando todos los v

La cross-section tanto como el resultado de interacciones NC es igual para todos los sabores

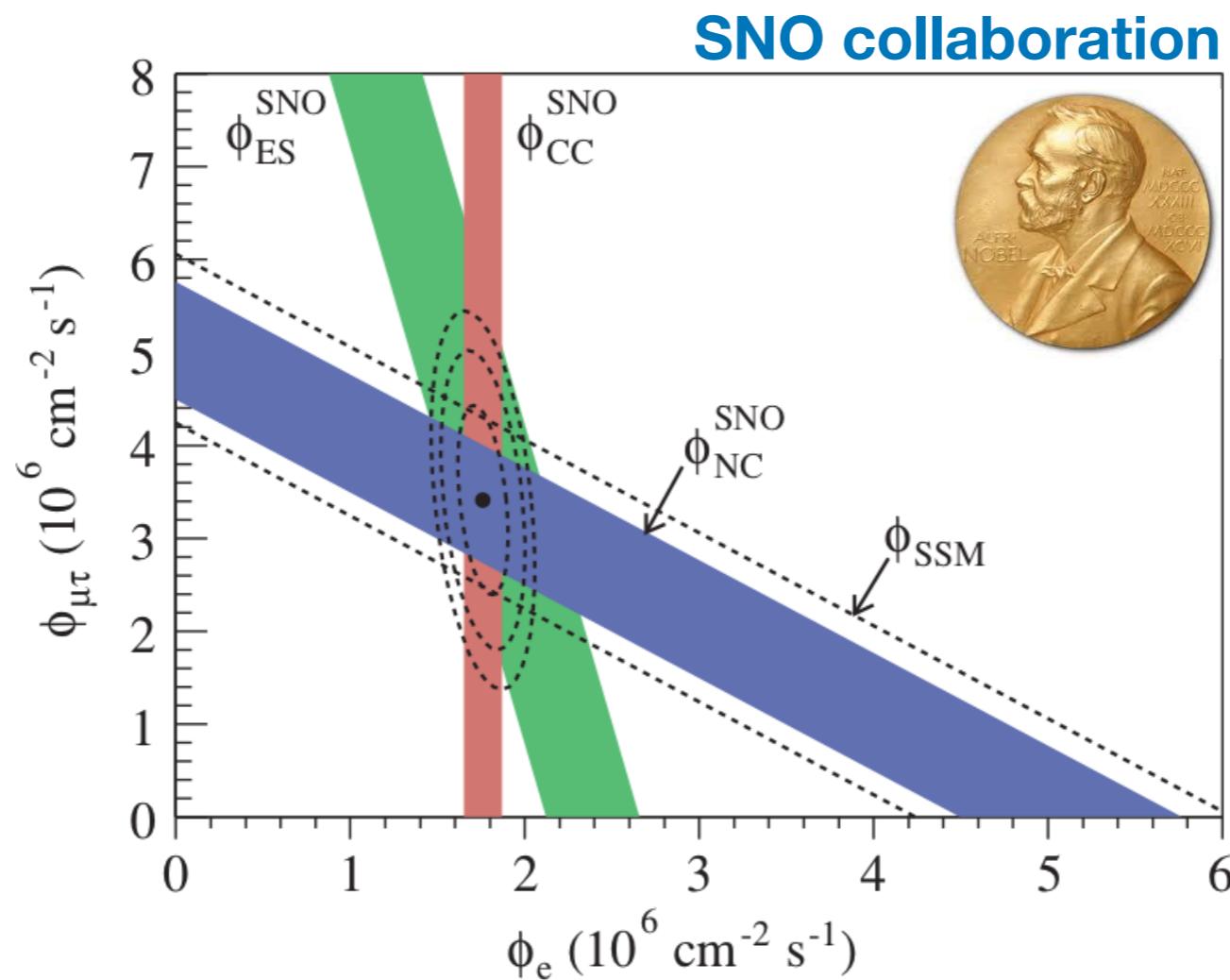


Experimento en 3 fases:

- I: Captura de neutrones en deuterio
- II: Captura en Cl
- III: Captura en ^3He en tubos

El deuterio como blanco da la posibilidad de contar el número total de neutrinos con una señal basada en la captura del neutrón

Resultados



Las observaciones de SNO demostraron que el flujo de neutrinos del sol es el que predice el SSM solo que solo un tercio del flujo interactúan como ν_e

El no tan problema de los neutrinos solares

- Los neutrinos sí vienen del sol.
- Flujo calculado con las NC consistente con los cálculos de Bahcall.
- Todos los experimentos de acuerdo: el flujo de ν_e a ~40% lo esperado.
- Son los neutrinos mismos otra vez ¿Cómo vamos a estudiar lo que les pasa?

Oscilación

La matriz de Pontecorvo-Maki-Nakagawa-Sakata (PMNS)

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U_{e1} & U_{e2} & U_{e3} \\ U_{\mu 1} & U_{\mu 2} & U_{\mu 3} \\ U_{\tau 1} & U_{\tau 2} & U_{\tau 3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix} \quad |\nu_\alpha\rangle = \sum_{i=1}^3 U_{\alpha i}^* |\nu_i\rangle, \quad \alpha = e, \mu, \tau$$

$$P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta)(L) \simeq \sum_{i,j} \bar{e}^{i \frac{\Delta m_{ji}^2 L}{2E}} U_{\beta i} U_{\alpha i}^* U_{\beta j}^* U_{\alpha j}$$

¿Masa?

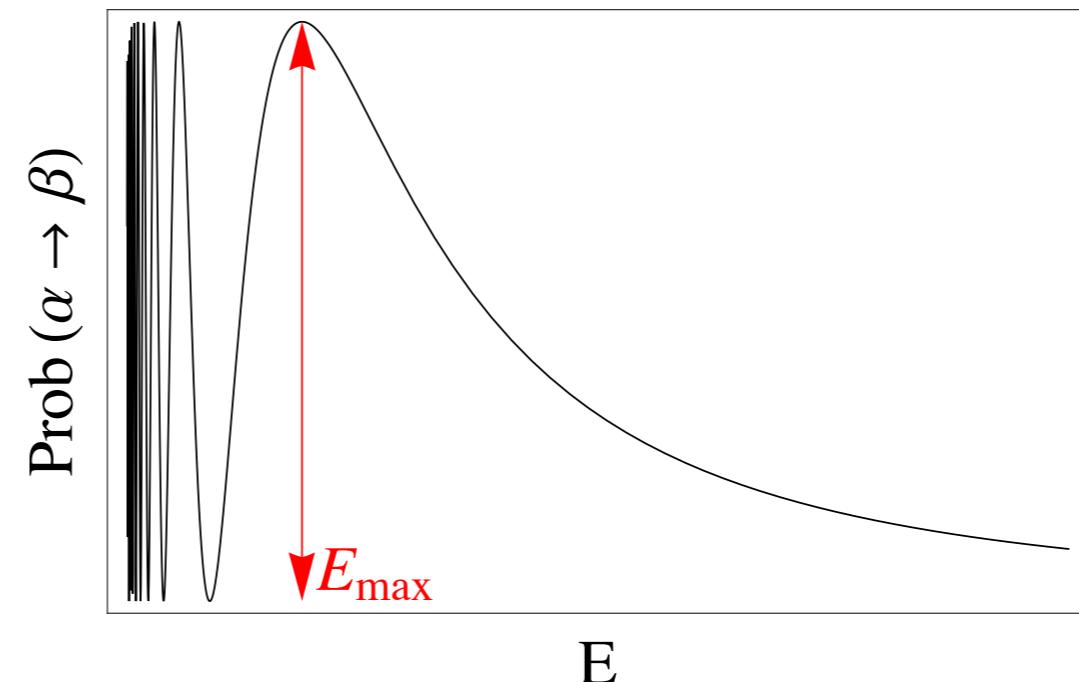
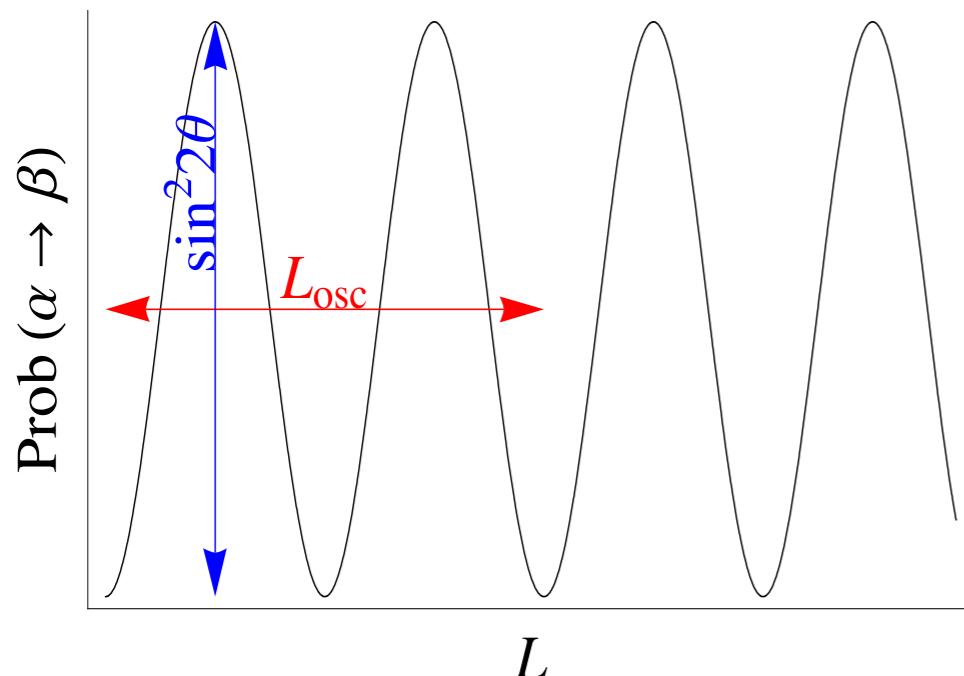
El número total de neutrinos no puede reducir ni aumentar por oscilaciones con lo cual el número de neutrinos alpha tiene que reducir.

Parametrización

$$U_{PMNS} = \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13}e^{i\delta_{CP}} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13}e^{-i\delta_{CP}} & 0 & c_{13} \end{pmatrix} \\ \times \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & e^{i\phi_2} & 0 \\ 0 & 0 & e^{i\phi_3} \end{pmatrix}$$

Solemos pensar en los elementos de la matriz PMNS como ángulos y fases

Los ángulos afectan a la amplitud. La diferencia de masas afecta la fase



El efecto MSW

**En general entre la fuente y nuestro detector hay material.
Esta material puede introducir un efecto adicional en las probabilidades.**

**ve tiene un cross-section más grande para interacciones coherentes lo
cual introduce una masa efectiva en la materia**

$$M_\nu^2 \longrightarrow \pm 2V_m E + M_\nu^2$$

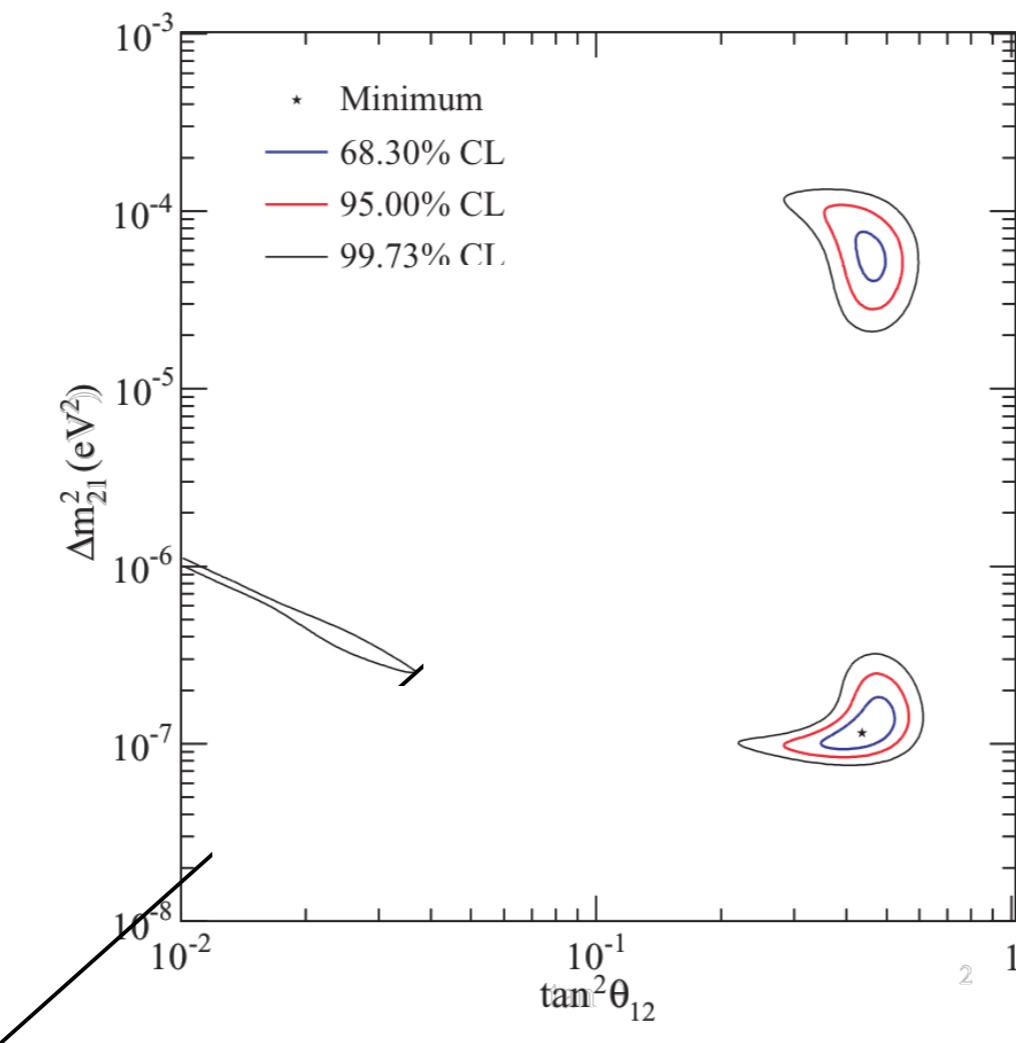
+: neutrinos, -: antineutrinos

**Cambia la forma de las oscilaciones introduciendo diferencias entre neutrinos y
antineutrinos.**

Oscilaciones solares

SNO y superKamiokaNDE midieron las oscilaciones de los neutrinos solares.

SNO, con su medida de NC, pudo normalizar ‘online’



Confirmaron la única descripción consistente con los datos era que había oscilaciones

aparición vs. desaparición

Oscilaciones nos dan la probabilidad de ser detectado en el mismo estado en que se creó, **desaparición**, o en otro, **aparición**

Transiciones (o canales) distintas tienen sensibilidades distintas y sus propios dificultades de detección.

$P(\nu_e \rightarrow \nu_e)$ la probabilidad de detectar ν_e habiéndose producido como ν_e

$P(\nu_e \rightarrow \nu_\mu)$ la probabilidad de detectar ν_μ habiéndose producido como ν_e

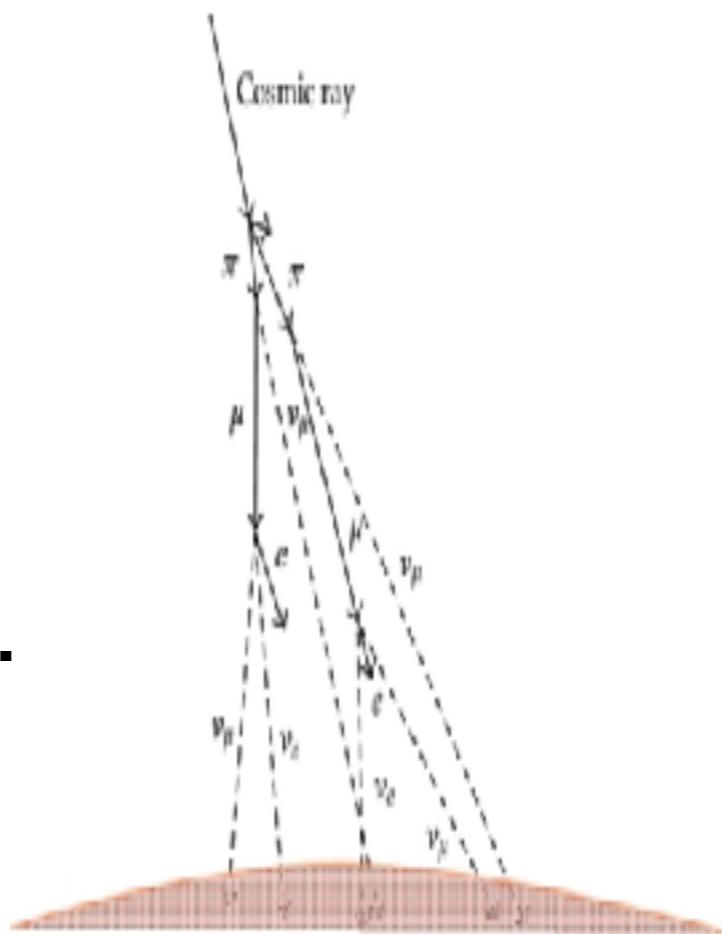
...

Según la energía de la fuente y la distancia entre fuente y detector podemos tener más o menos sensibilidad a ciertos parámetros.

Otras fuentes (también)



Desde el atmósfera



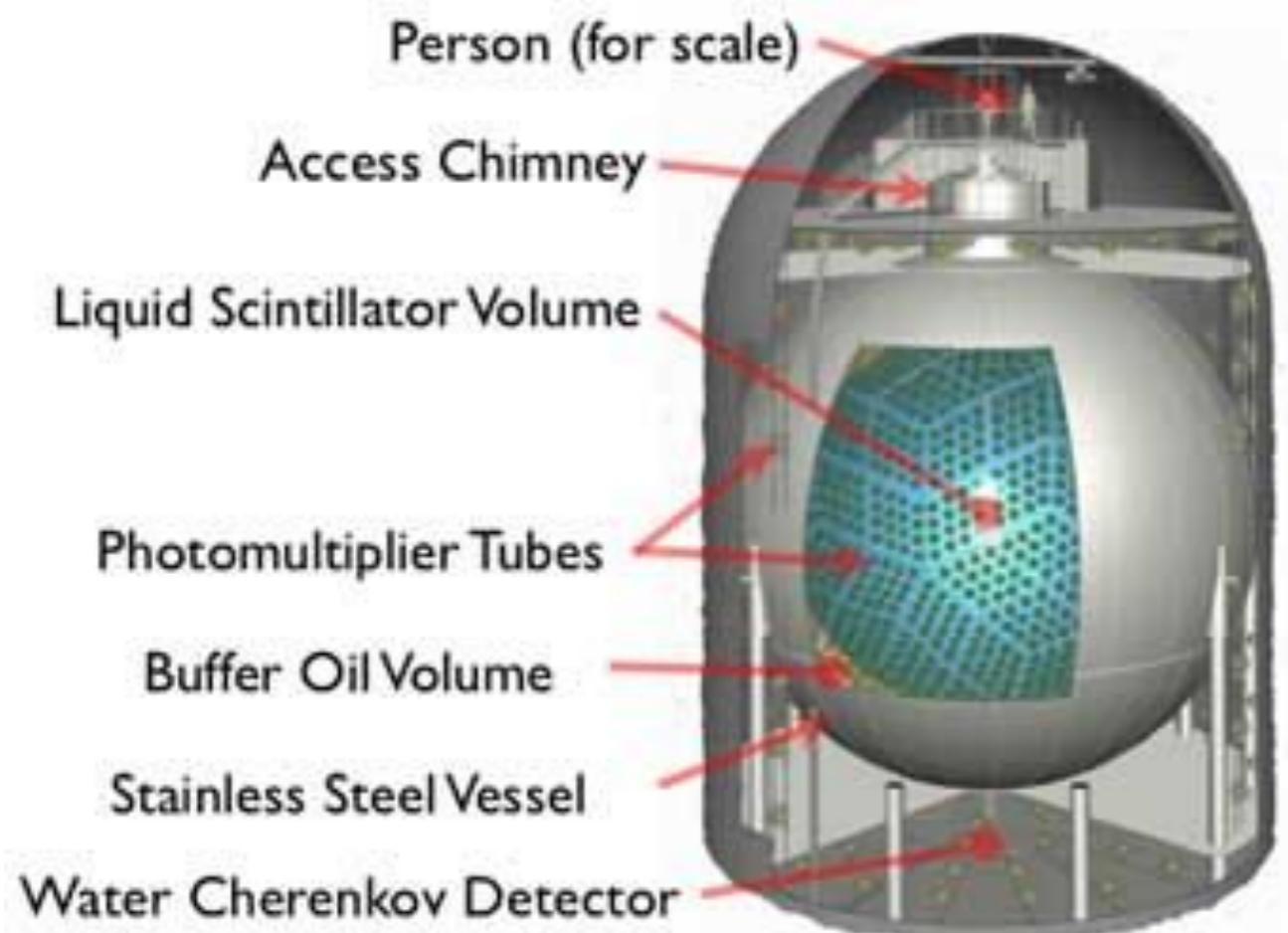
Espectro ancho, muchas distancias



De aceleradores

Control de energía, medir espectro cerca del origen

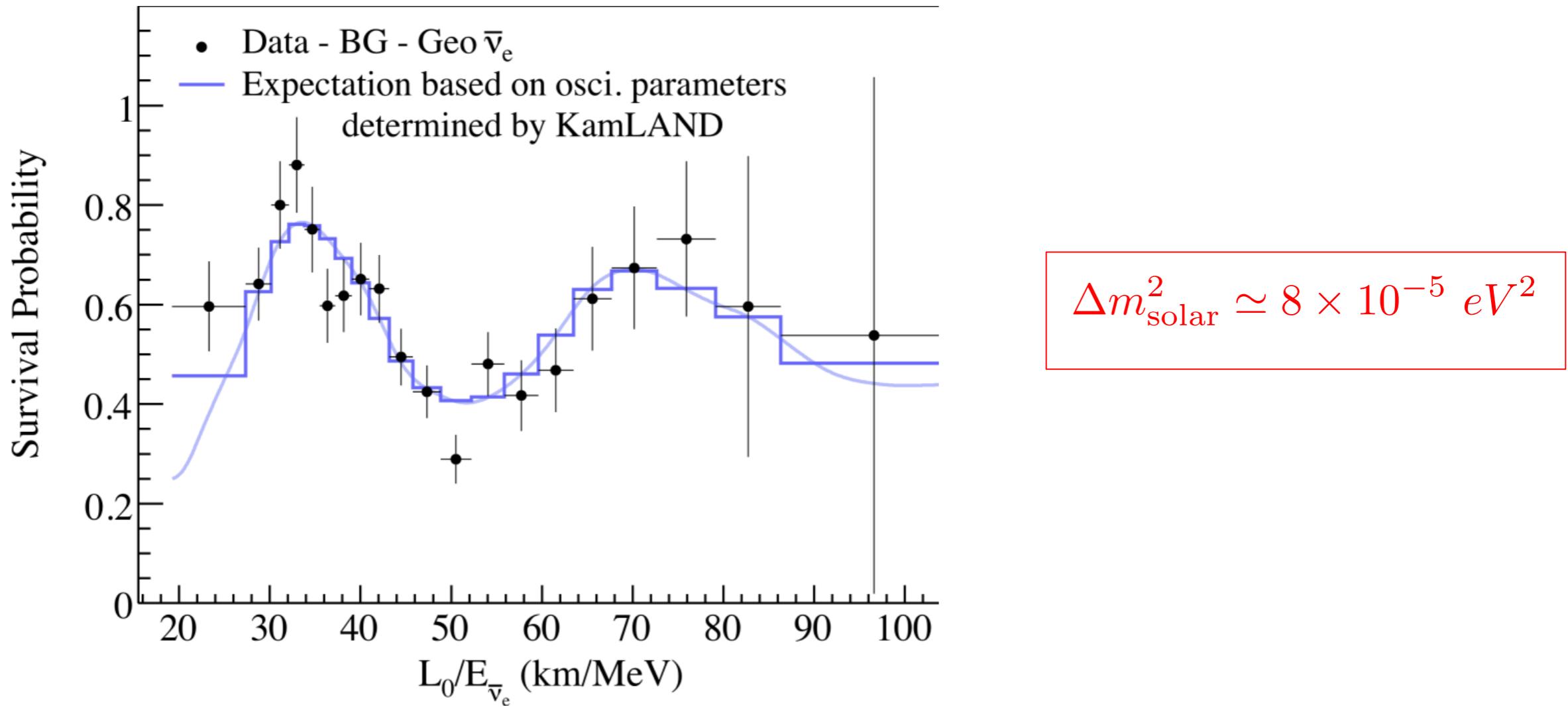
KamLAND



Experimento con neutrinos de varios reactores.

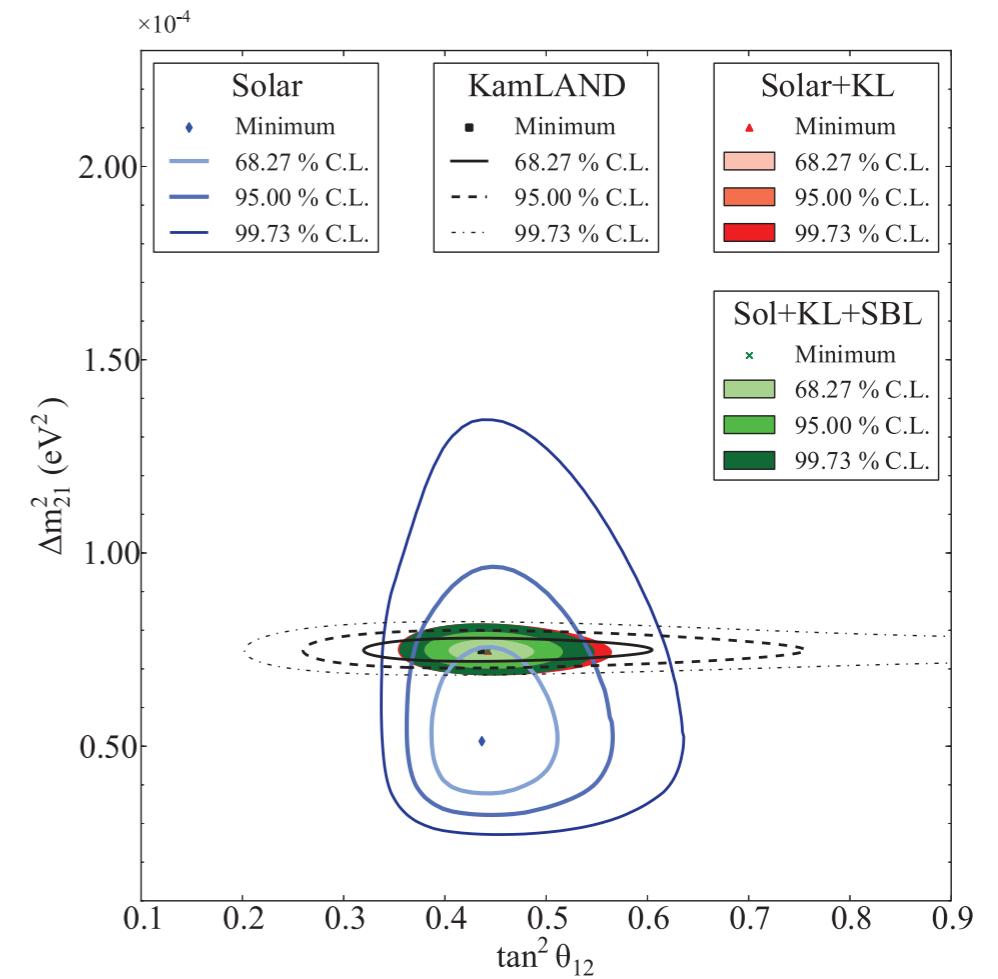
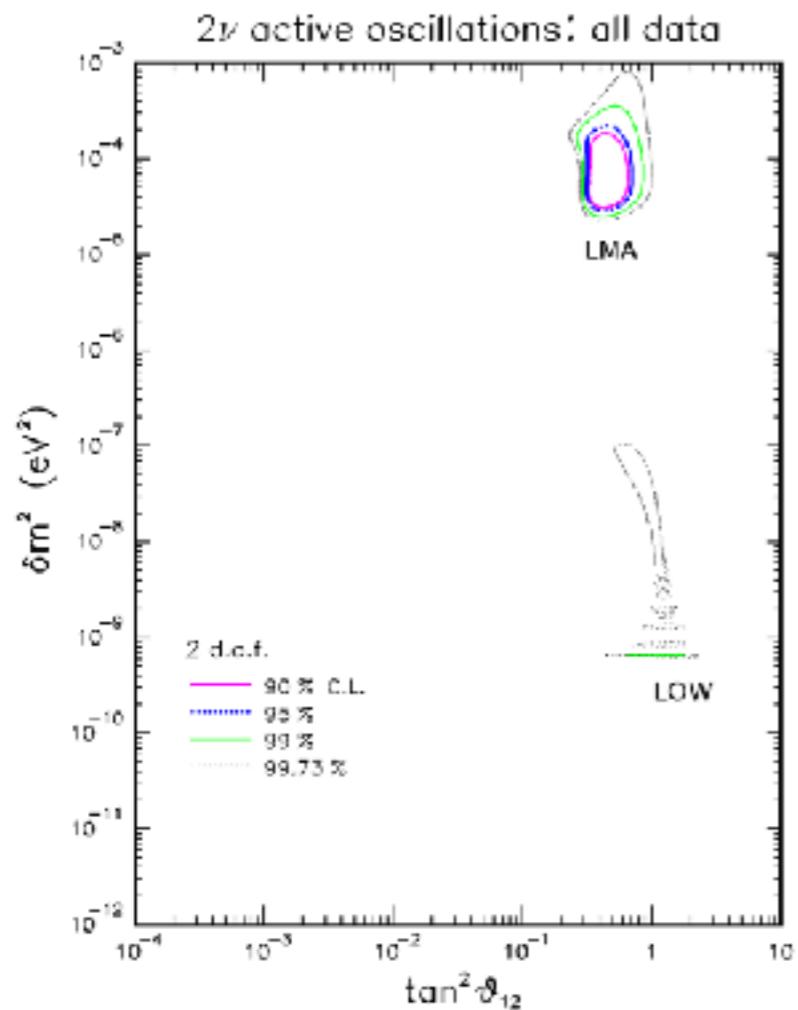
**Midió el flujo de ve a varias energías
chequeo terrestre y en antineutrinos
de los resultados con neutrinos solares**

Confirmación de oscilaciones



Forma oscilatoria clara. Solución consistente con las medidas de SNO y SK con neutrinos solares

Resultados solar+KamLAND



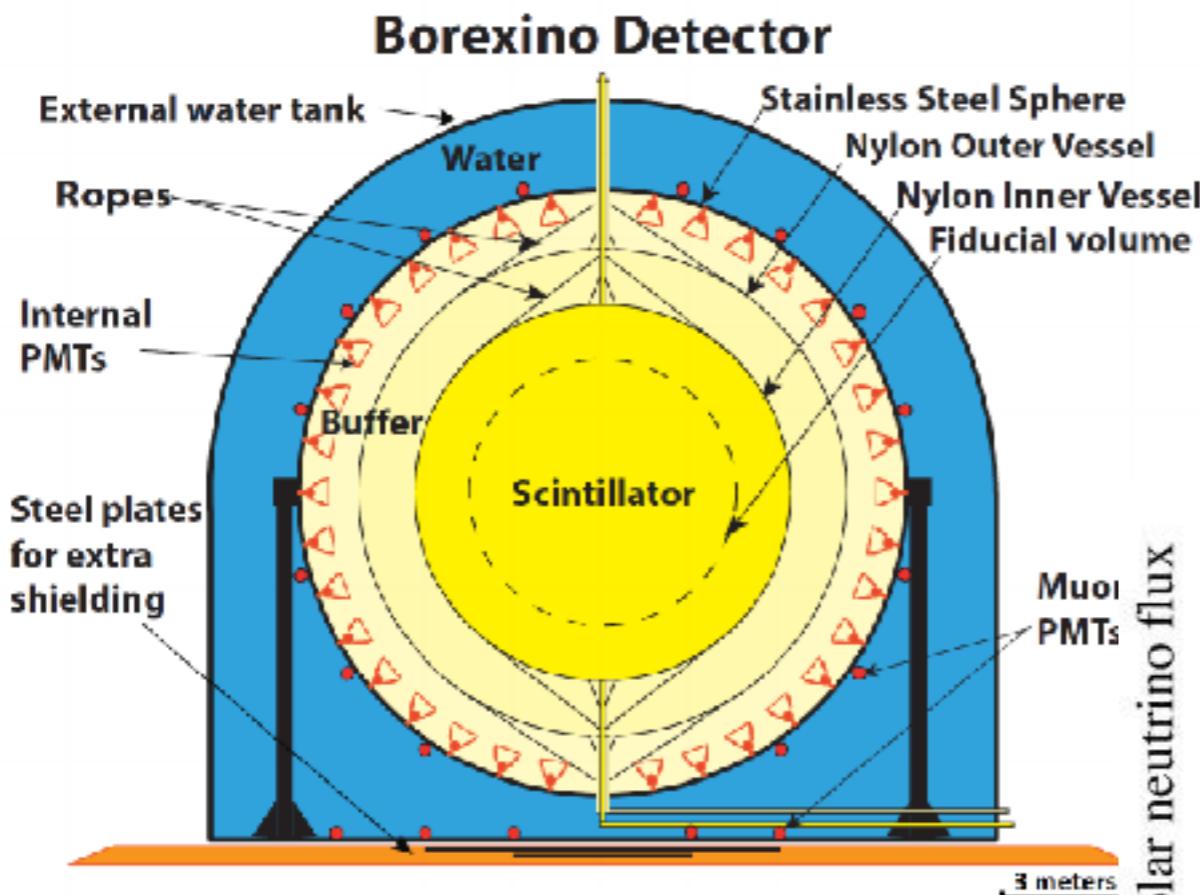
Oscilaciones son la única forma de describir bien la falta de ve en el flujo de neutrinos desde el sol.

Los antineutrinos procedentes de reactores confirman esta conclusión de forma consistente

Resumen

- Había una falta de neutrinos solares comparado con lo que esperábamos.
- Varios experimentos fueron capaces de confirmar que fueron los neutrinos mismos que cambiaban de sabor.
- Confirmaron que los neutrinos tienen masa.
- ¿Qué más podemos aprender de los neutrinos?

Geo-neutrinos and low energy solar



Addition of extra

Extreme radiopurity (materials selected) and low energy thresholds using scintillators

