

# Introducción al Neutrino



# Lo que sabemos

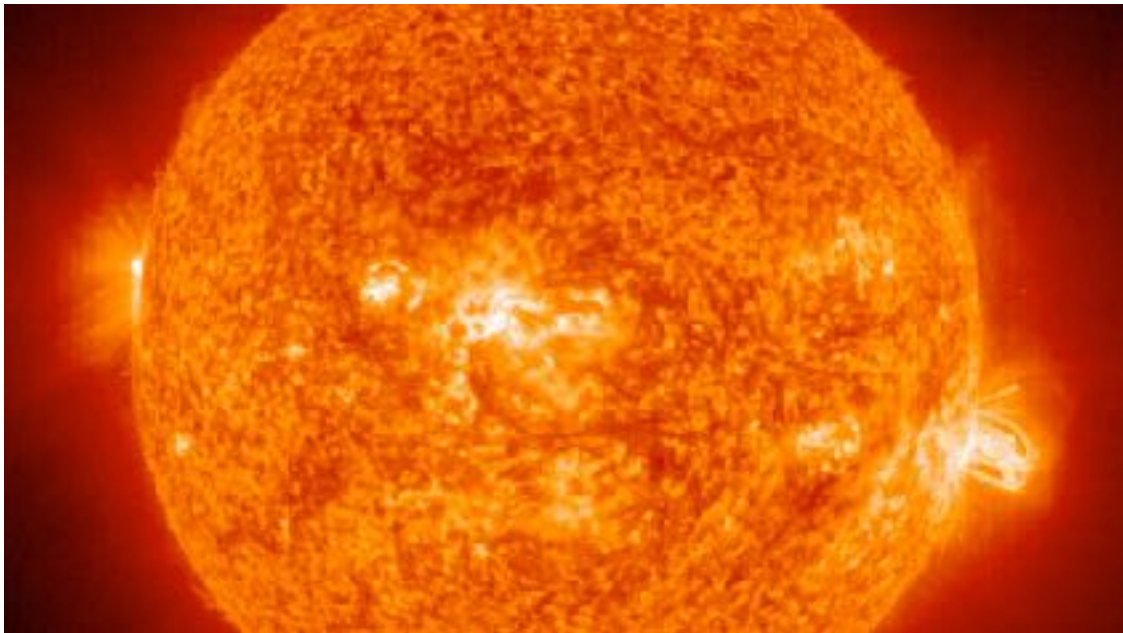
- Neutrinos existen.
- Solo interactúan via la fuerza débil.
- Por ellos sabemos que hay 3 familias de fermiones.
- Oscilan y sabemos que tienen masa.

# **Clase III: Midiendo la masa**

# ¿Qué nos dicen las oscilaciones?

La diferencia de las masas cuadradas entra en la probabilidad,  
¿A priori, qué nos dice de las tres masas?

Mediante ciertos canales podemos saber la diferencia de las masas cuadradas



Con neutrinos solares y de reactores medimos la diferencia solar.

# Sensibilidad

Experimentos que miden interacciones de neutrinos solares miden reducciones en el flujo de  $\nu_e$ , o sea, la probabilidad de que un  $\nu_e$  se detecte como  $\nu_e$ .

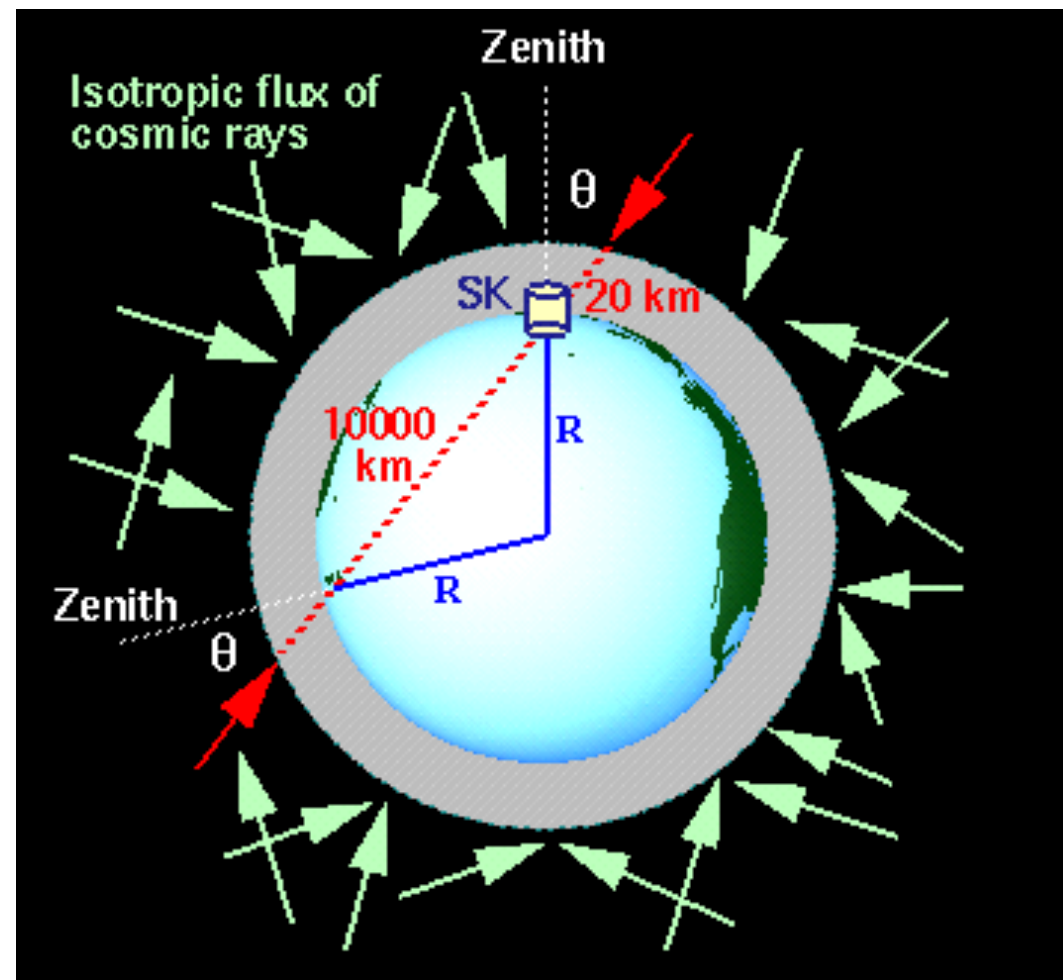
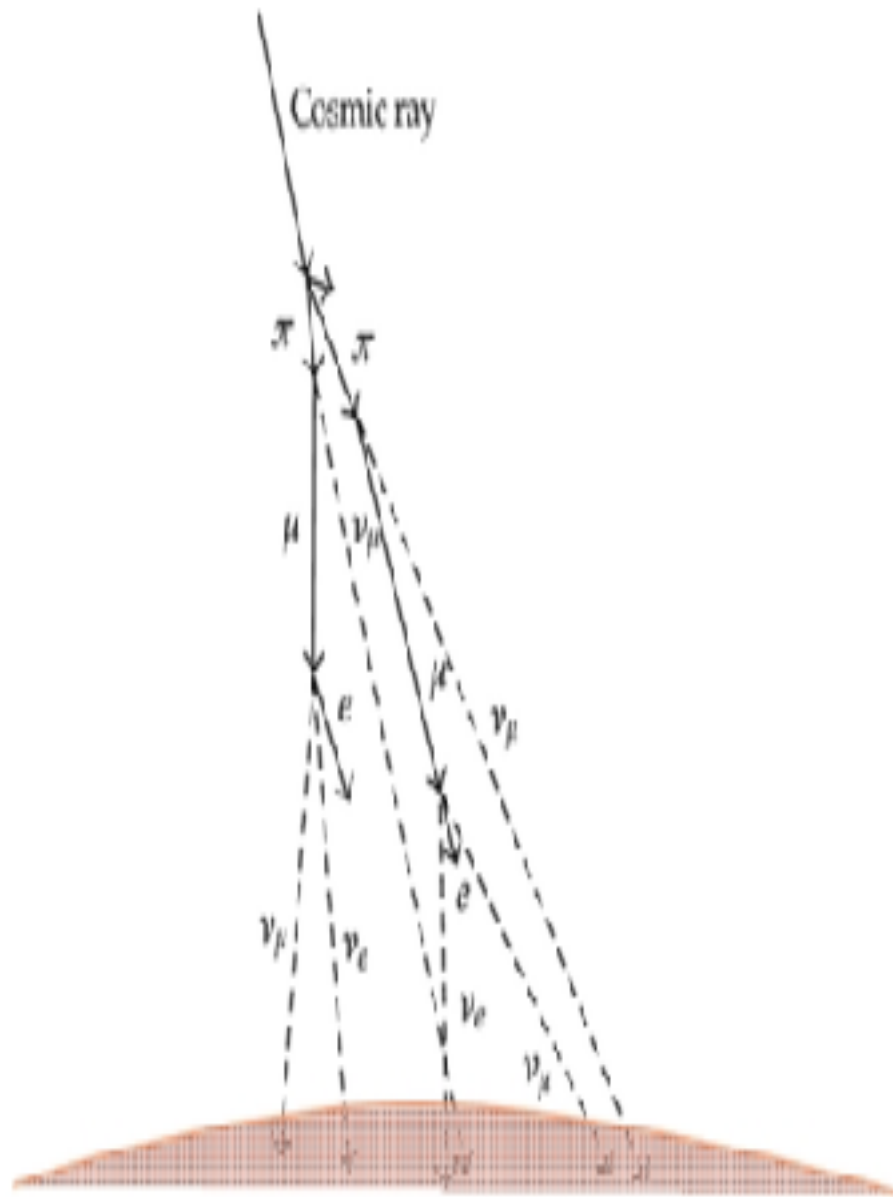
$$E_\nu/L \sim \Delta m_{12}^2 \ll \Delta m_{23}^2$$

$$P(\nu_e \rightarrow \nu_e) = P(\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e) \simeq c_{13}^4 \left( 1 - \sin^2 2\theta_{12} \sin^2 \left( \frac{\Delta m_{12}^2}{4E} L \right) \right) + s_{13}^4$$

$$P(\nu_e \rightarrow \nu_e) = P(\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e) \simeq 1 - \sin^2 2\theta_{12} \sin^2 \left( \frac{\Delta m_{12}^2}{4E} L \right)$$

Muy sensible a la primera diferencia de masas y el ángulo  $\theta_{12}$  pero según longitud de experimento también sensible a  $\theta_{13}$

# Neutrinos atmosféricos



**Rayos cósmicos chocan con el atmósfera y producen partículas que desintegran produciendo neutrinos. Experimento más famoso: SuperKamiokaNDE**

# ¿Qué medimos con esta fuente?

Distancias de entre 10 y 10000 km

$$E_\nu / L \sim \Delta m_{23}^2 \gg \Delta m_{12}^2$$

$$P(\nu_e \rightarrow \nu_\mu) = 0$$

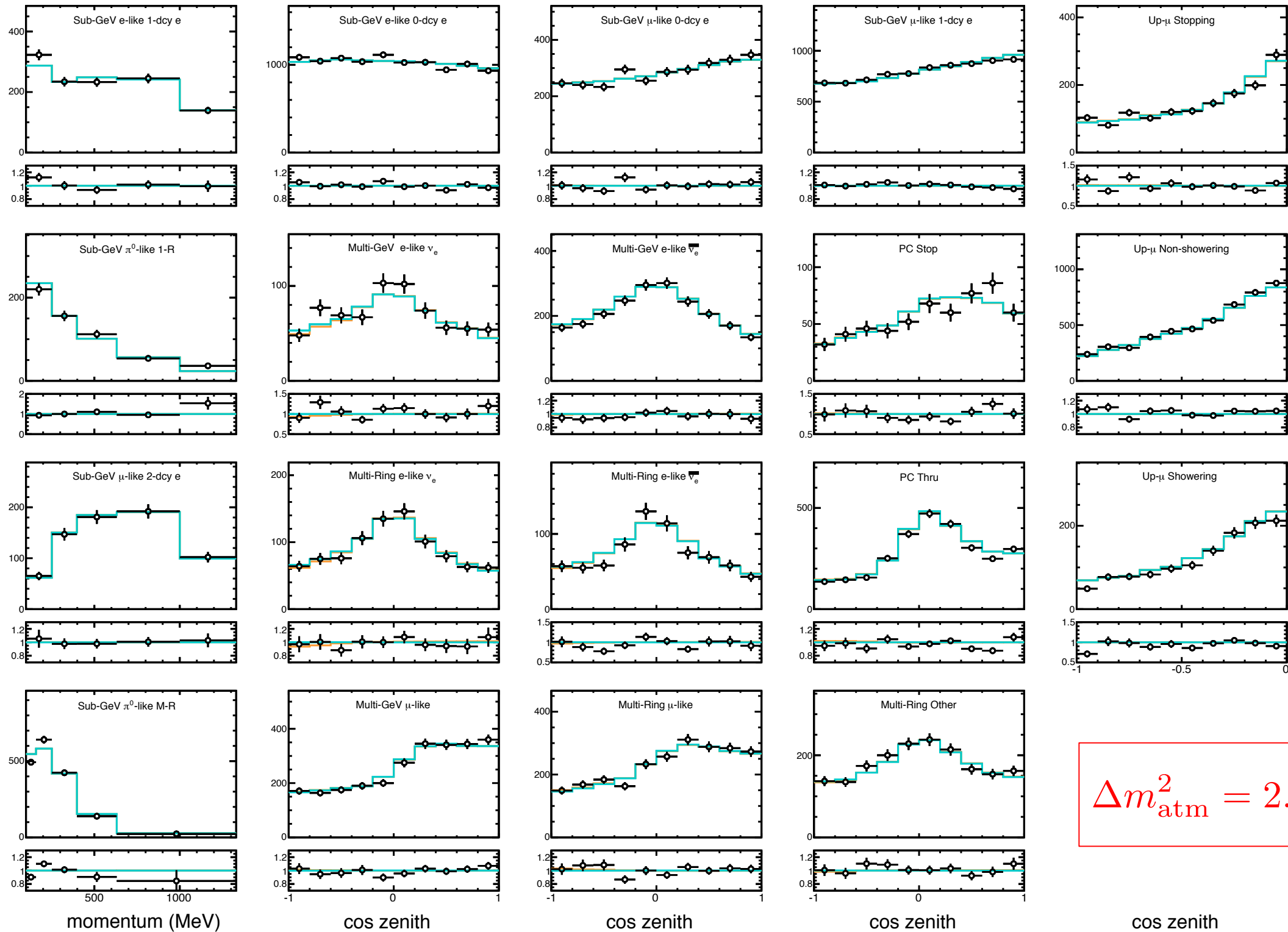
$$P(\nu_e \rightarrow \nu_\tau) = 0$$

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

$$P(\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e) = 1$$

Sobre todo hay sensibilidad a  $\Delta m_{23}^2$  y  $\theta_{23}$

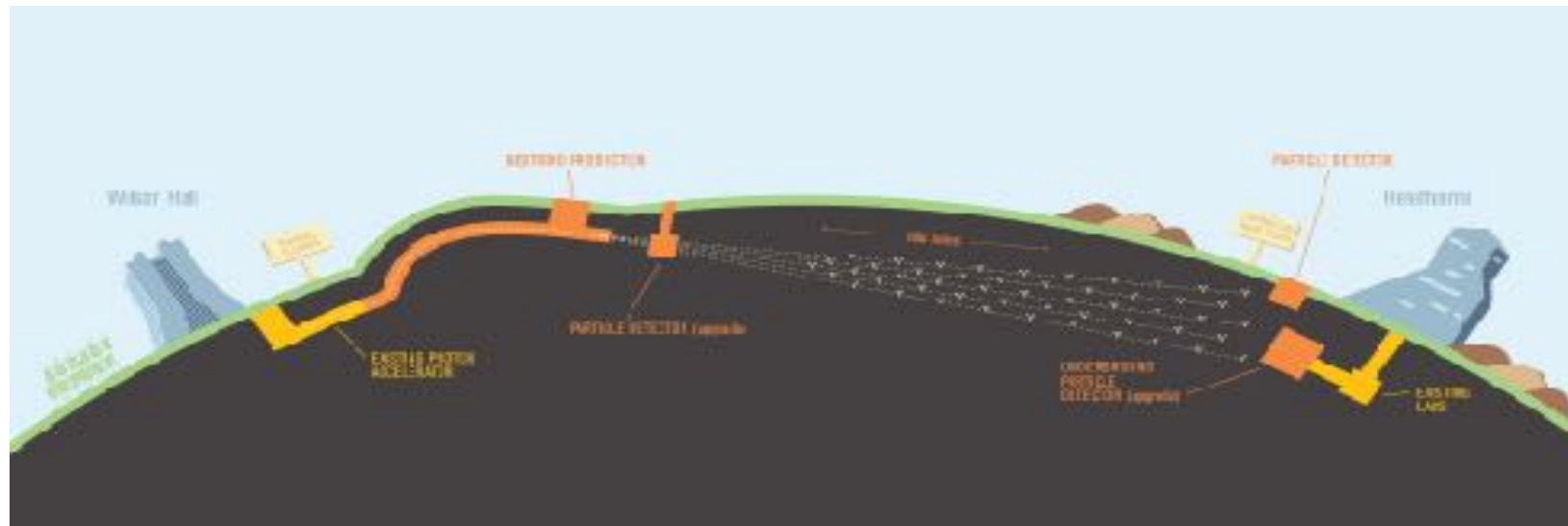
# SuperKamioKaNDE



From Phys.Rev. D97 (2018) no.7, 072001



# Neutrinos de aceleradores

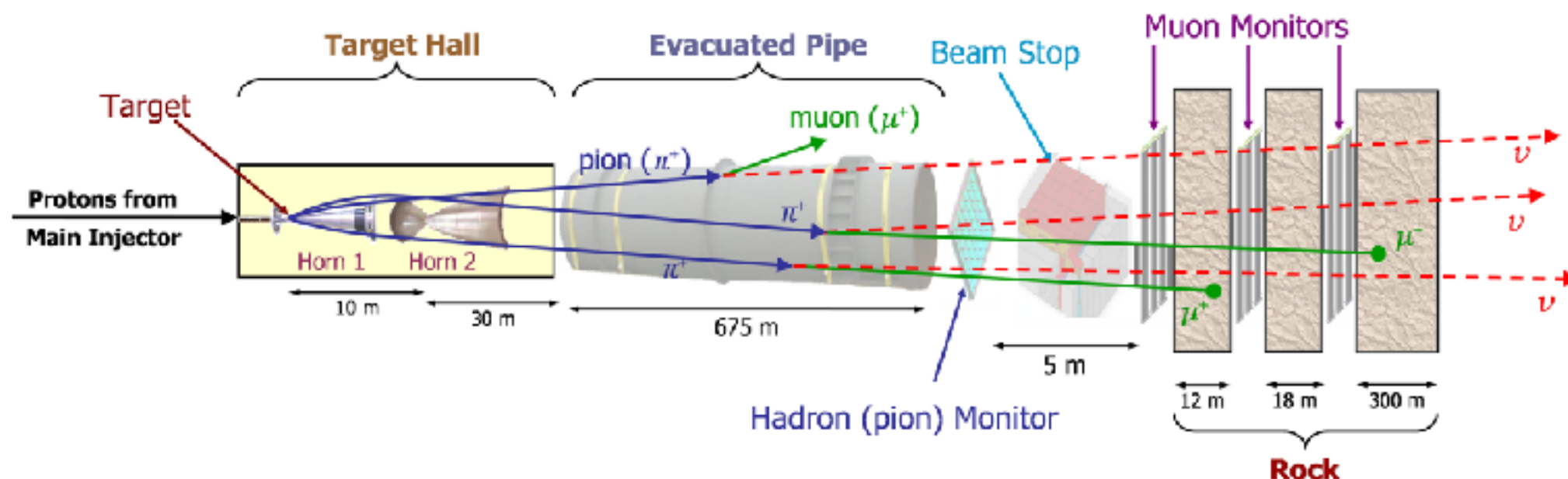


Producción de neutrinos usando piones producidos por un haz de protones

Produce, sobre todo,  $\pi^+$  y  $\pi^-$

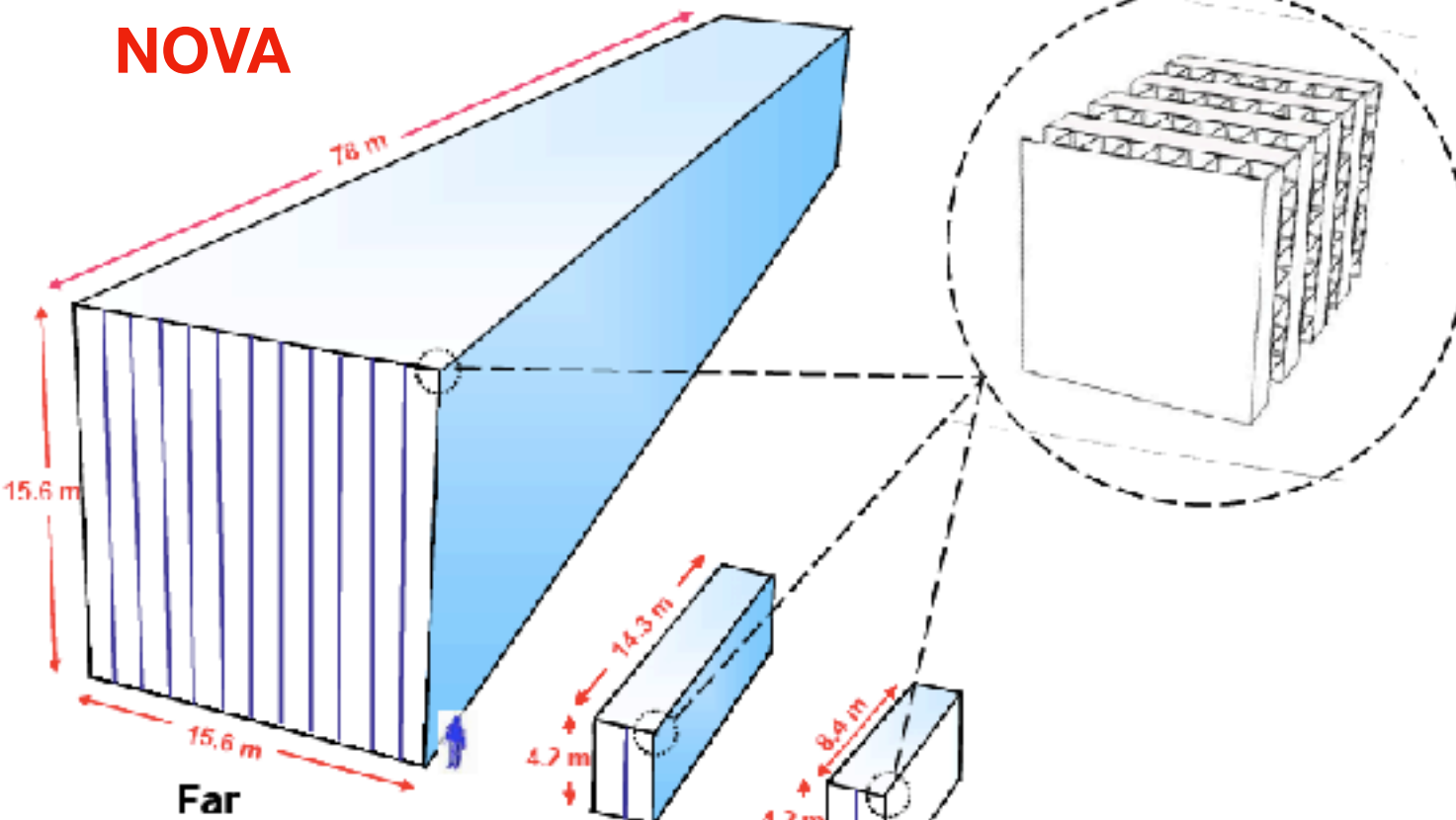
Selección de especie con imanes

Energía y tipo de neutrino tuneable, multiples detectores posible



# Unos ejemplos

**NOVA**



**Tokai-to-Kamioka (T2K)**



**Super-Kamiokande**  
(ICRR, Univ. Tokyo)



6 GeV  $\nu_\mu$  over 295km  
 $\nu_e$  appearance  $\rightarrow \theta_{13}$

**J-PARC Main Ring**  
(KEK-JAEA, Tokai)



$\nu_\mu$  disappearance  $\rightarrow \theta_{23}$

**Muchos experimentos han  
utilizado neutrinos  
procedentes de aceleradores**

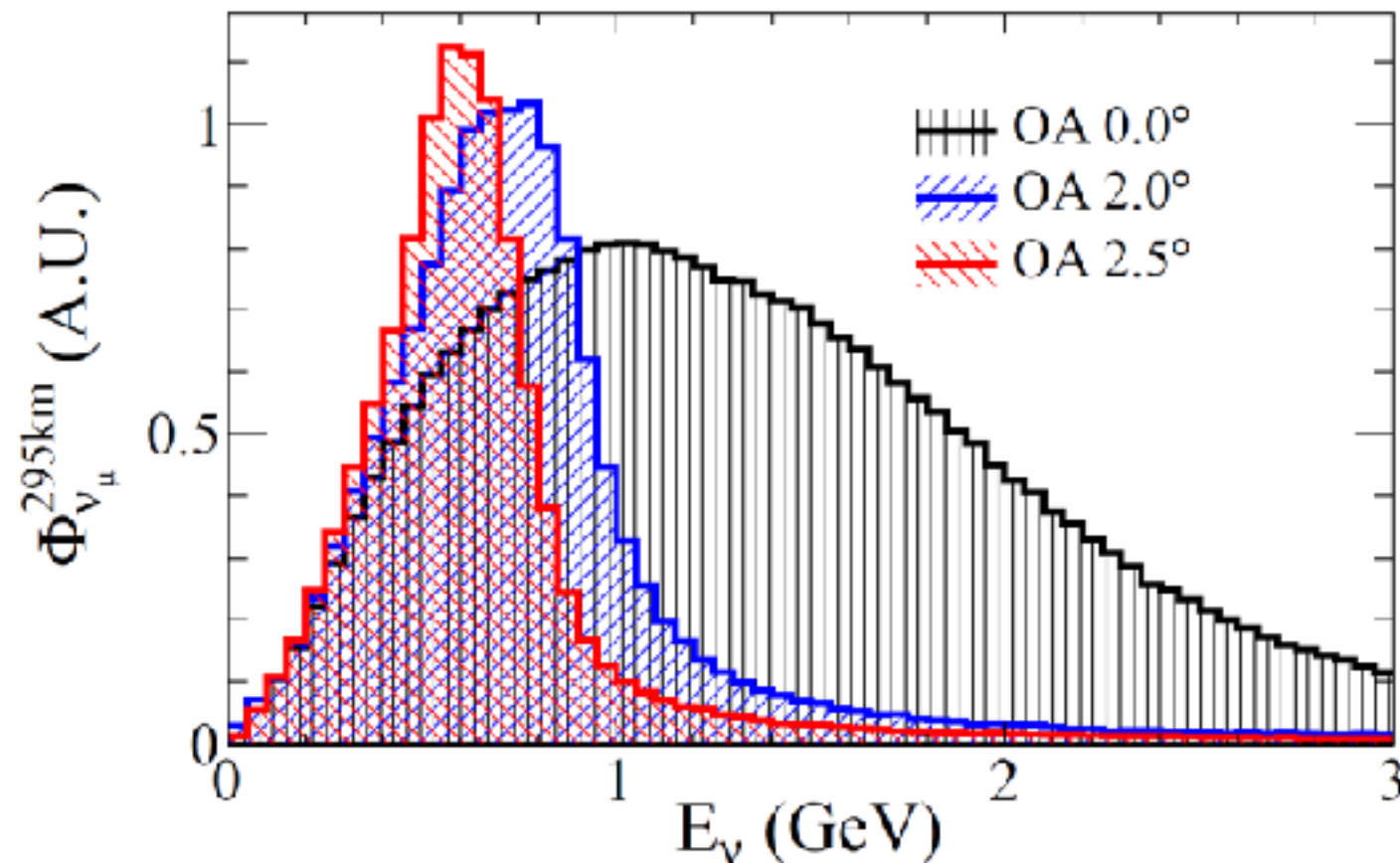


# Canales

$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu)$  es el canal más estudiado

$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e)$  también estudiado, mejor sensibilidad a  $\theta_{13}$  y posible medir  $\delta_{CP}$

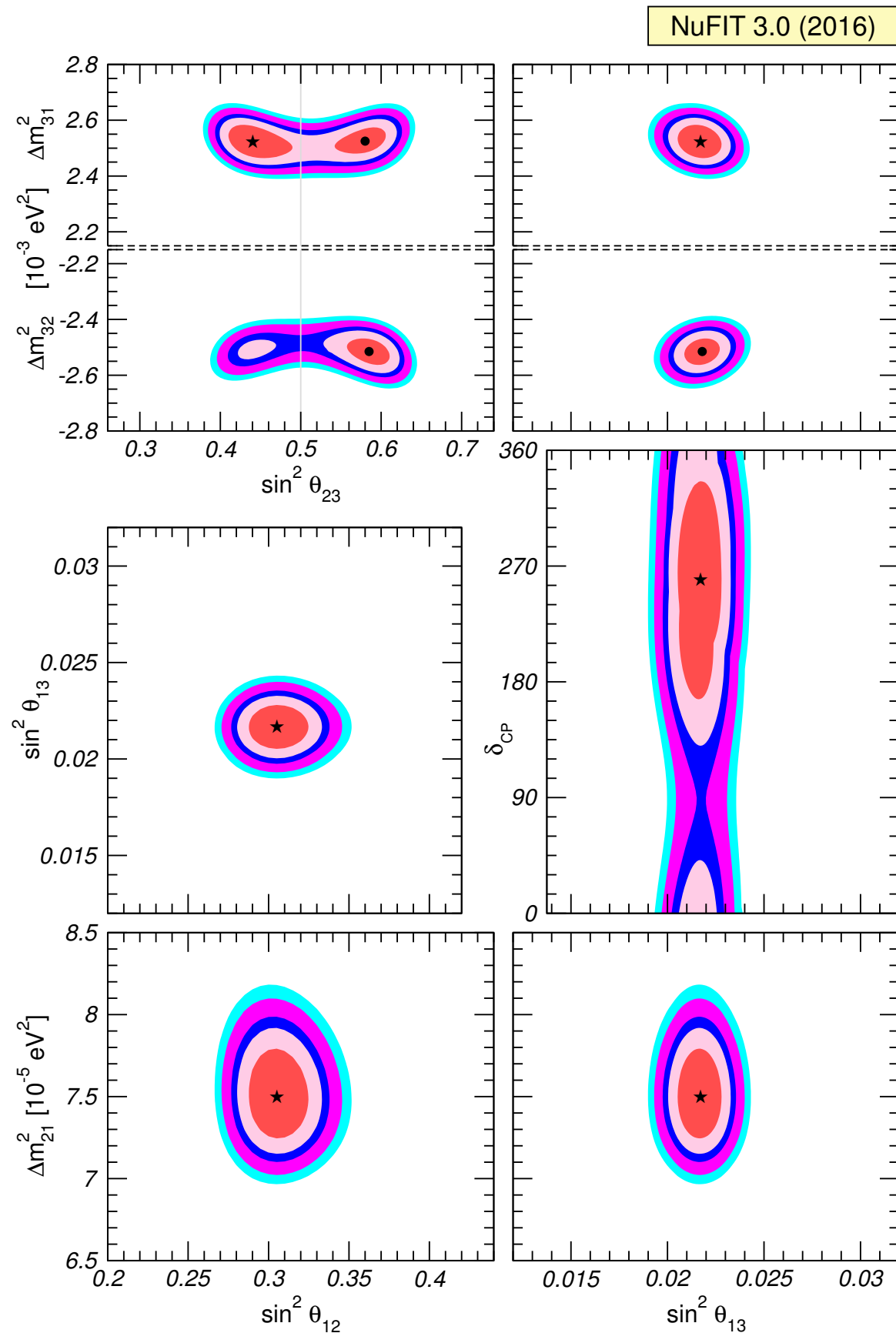
$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau)$  1 experimento, dificultado por naturaleza del  $\tau$



Es posible seleccionar la energía con ángulo también.

Posible repetir el mismo experimento con neutrinos y antineutrinos

# Límites globales actuales



	Normal Ordering (best fit)		Inverted Ordering ( $\Delta\chi^2 = 0.83$ )	
	bfp $\pm 1\sigma$	$3\sigma$ range	bfp $\pm 1\sigma$	$3\sigma$ range
$\sin^2 \theta_{12}$	$0.306^{+0.012}_{-0.012}$	$0.271 \rightarrow 0.345$	$0.306^{+0.012}_{-0.012}$	$0.271 \rightarrow 0.345$
$\theta_{12}/^\circ$	$33.56^{+0.77}_{-0.75}$	$31.38 \rightarrow 35.99$	$33.56^{+0.77}_{-0.75}$	$31.38 \rightarrow 35.99$
$\sin^2 \theta_{23}$	$0.441^{+0.027}_{-0.021}$	$0.385 \rightarrow 0.635$	$0.587^{+0.020}_{-0.024}$	$0.393 \rightarrow 0.640$
$\theta_{23}/^\circ$	$41.6^{+1.5}_{-1.2}$	$38.4 \rightarrow 52.8$	$50.0^{+1.1}_{-1.4}$	$38.8 \rightarrow 53.1$
$\sin^2 \theta_{13}$	$0.02166^{+0.00075}_{-0.00075}$	$0.01934 \rightarrow 0.02392$	$0.02179^{+0.00076}_{-0.00076}$	$0.01953 \rightarrow 0.02408$
$\theta_{13}/^\circ$	$8.46^{+0.15}_{-0.15}$	$7.99 \rightarrow 8.90$	$8.49^{+0.15}_{-0.15}$	$8.03 \rightarrow 8.93$
$\delta_{\text{CP}}/^\circ$	$261^{+51}_{-59}$	$0 \rightarrow 360$	$277^{+40}_{-46}$	$145 \rightarrow 391$
$\frac{\Delta m_{21}^2}{10^{-5} \text{ eV}^2}$	$7.50^{+0.19}_{-0.17}$	$7.03 \rightarrow 8.09$	$7.50^{+0.19}_{-0.17}$	$7.03 \rightarrow 8.09$
$\frac{\Delta m_{3\ell}^2}{10^{-3} \text{ eV}^2}$	$+2.524^{+0.039}_{-0.040}$	$+2.407 \rightarrow +2.643$	$-2.514^{+0.038}_{-0.041}$	$-2.635 \rightarrow -2.399$

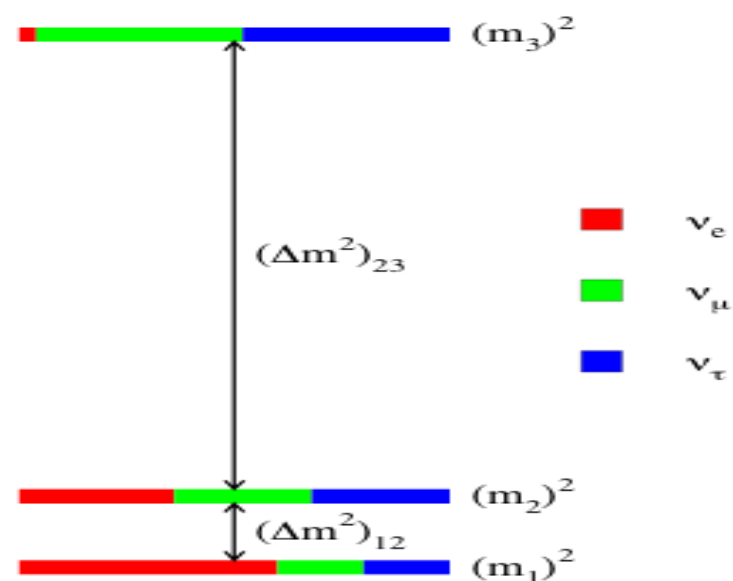
**From JHEP 1701 (2017) 087**

**Combination of all experimental data  
available in 2017**

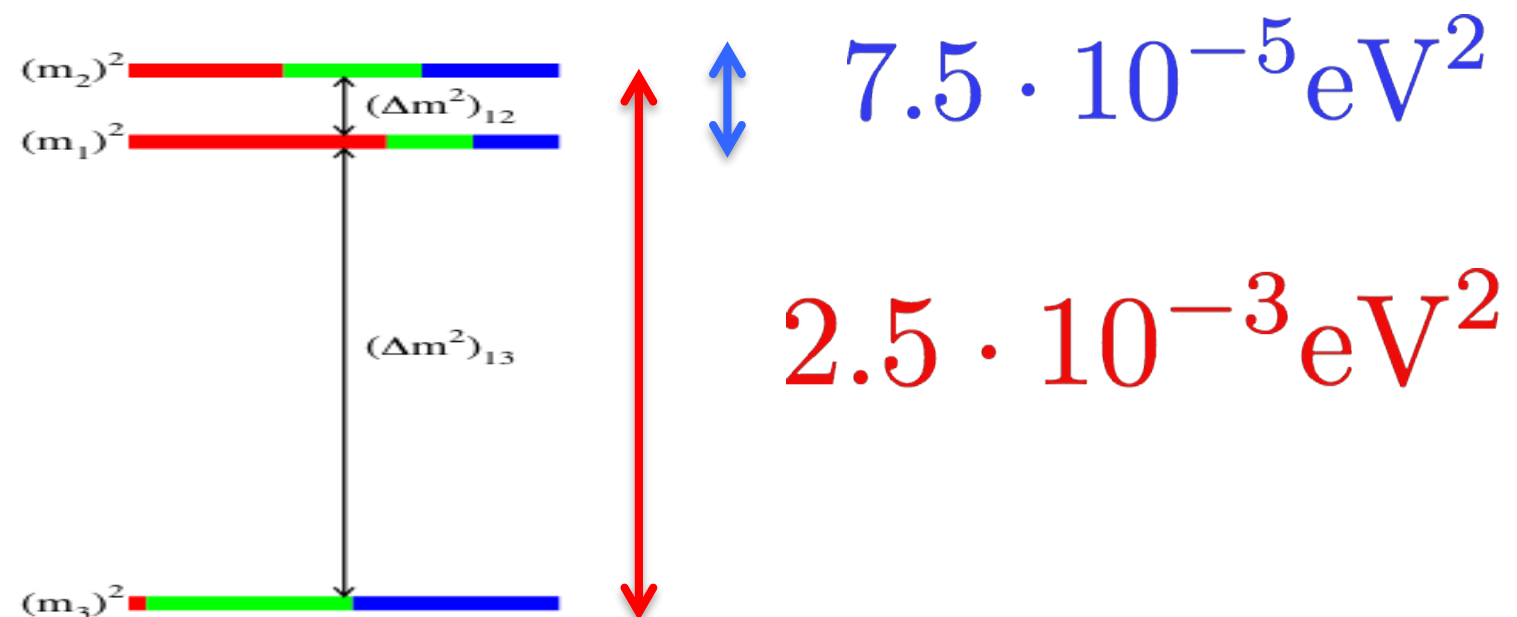
# Jerarquía:

Quedan dos posibilidades:  
Normal (pusimos bien los números) y Invertido

normal hierarchy



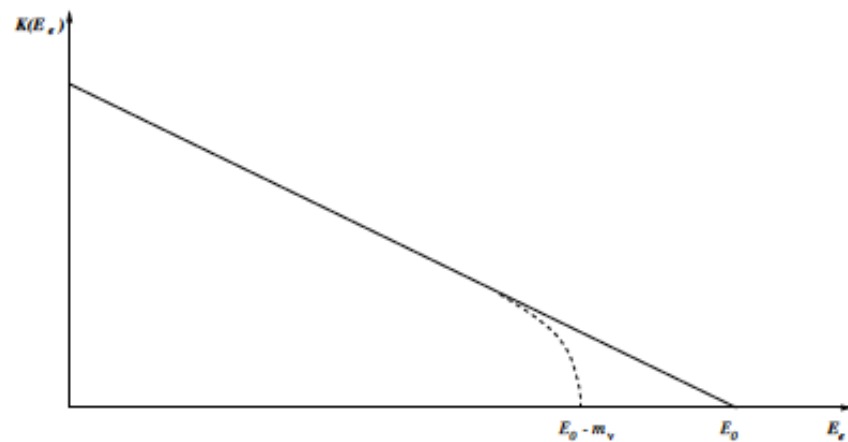
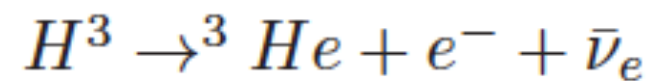
inverted hierarchy



Sabemos que el 2 pesa más que el 1 pero la masa del 3 queda incierto.  
El menos pesado podría pesar lo que quieras, la escala absoluta da igual para las oscilaciones pero sí que hay que determinar la jerarquía para medir todas las masas.

# ¿Cómo medir la masa?

Hay varias posibilidades que miden masas



**Interacciones débiles  
deberían tener un efecto  
dinámico debido a la masa**

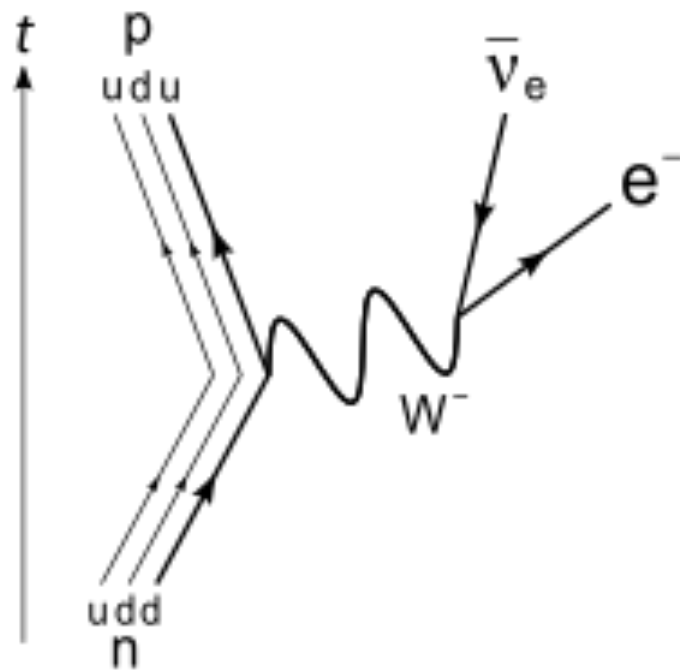
**¿Puede ayudarnos la teoría del  
big bang?**



**La evolución de estructuras tiene un  
efecto debido a la masa de los  
neutrinos**

# ¿Qué medimos?

Es importante saber lo que puede medir un experimento y su relación con lo que queremos saber



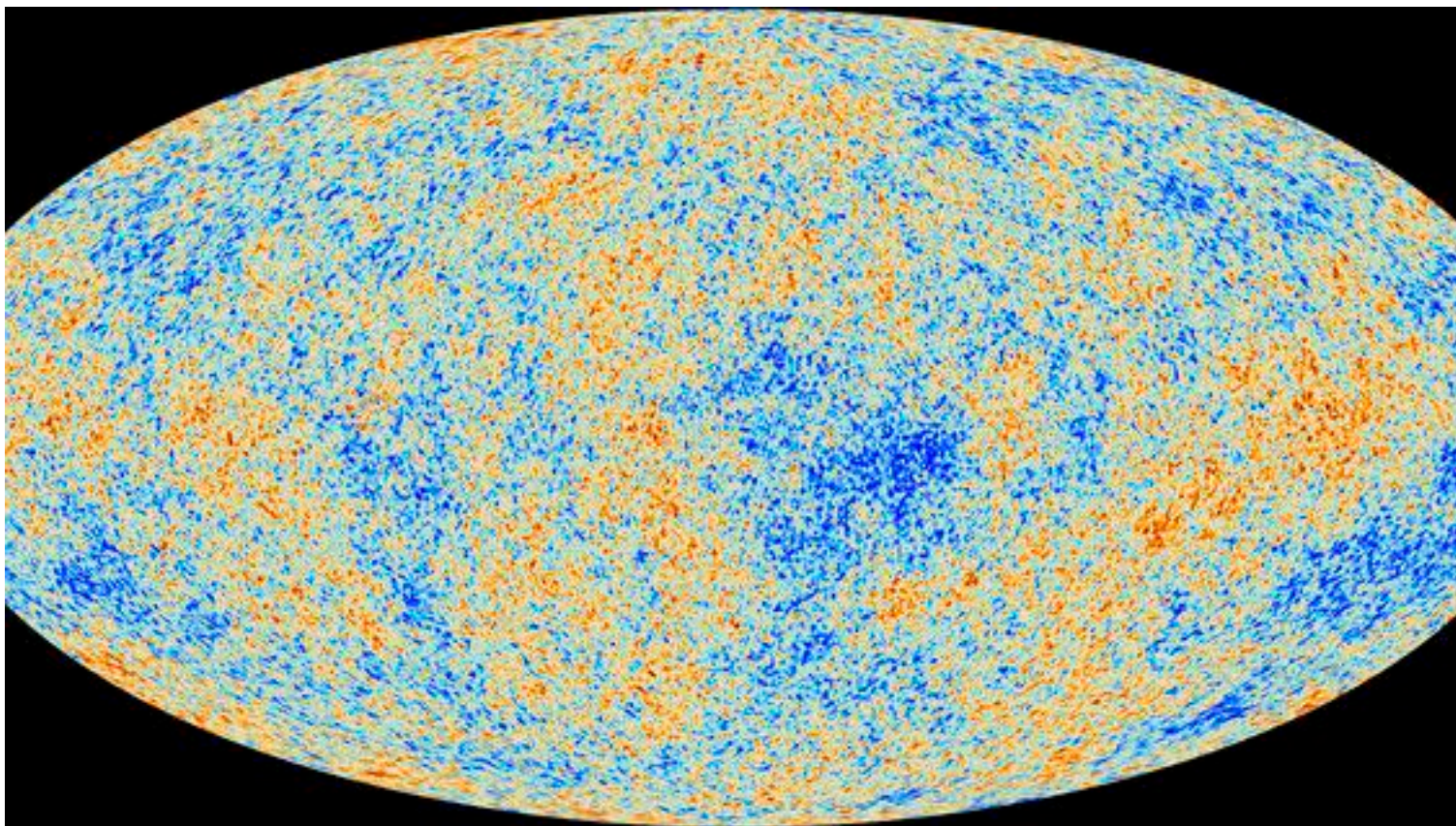
En desintegración beta el estado propio de la interacción es  $\nu_e$ . No podemos saber en que estado de masa se produce el antineutrino.

Los cálculos cosmológicos miden la suma de las masas. Tenemos que saber la jerarquía también.



# Indicaciones cosmológicas

**Después de los fotones, el big bang predice que los neutrinos son la segunda partícula más abundante en el universo.**



**La estructura a grandes escalas nos puede dar indicaciones de la masa máxima que pueden tener.**

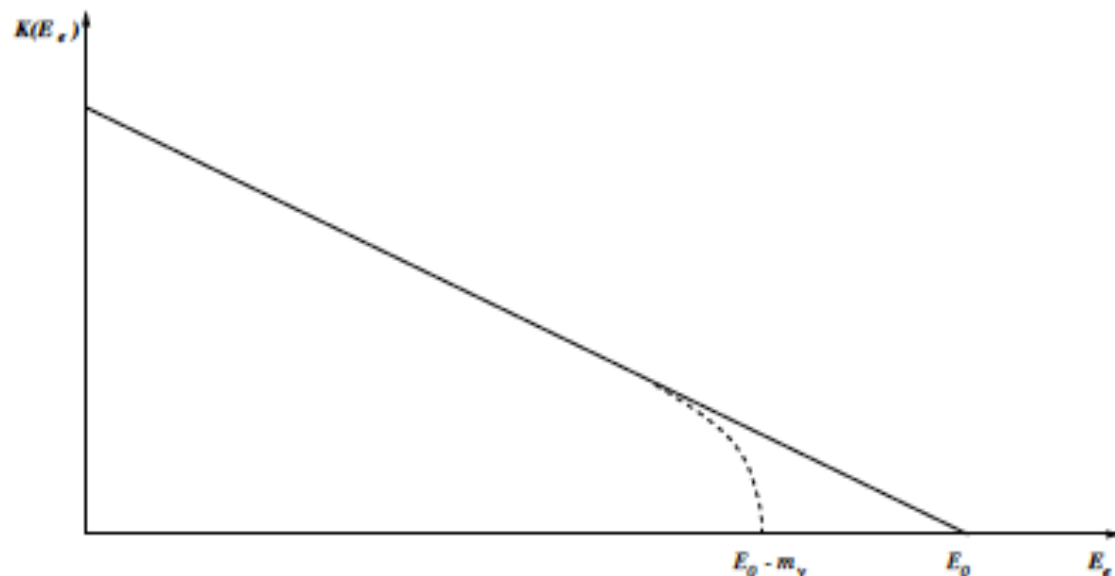
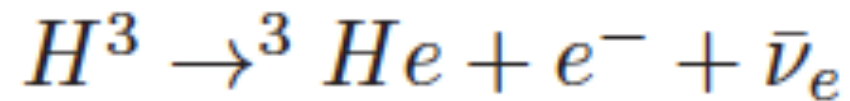
**Material oscura forma pozos de gravedad que atraen materia, la material bariónica cae pero rebota debido a la presión electromagnética.**

**Los rebotes se ven en el CMB, entre otros observables, como picos. Los neutrinos pasan por las estructuras de forma que depende de su masa, por eso la masa afecta a la forma del espectro**

$$\Sigma m_\nu < 0.23 \text{ eV}$$



# ¿Qué sabemos de desintegración beta?



$$m_{\nu_e} < 2.2\text{eV (Mainz-Troitsk)}$$

$$m_{\nu_\mu} < 170\text{keV (PSI: } \pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu)$$

$$m_{\nu_\tau} < 18.2\text{MeV (LEP: } \tau^- \rightarrow 5\pi \nu_\tau)$$

¿Por qué tritio?

# Calorimetría precisa

El experimento Katrin



# KATRIN

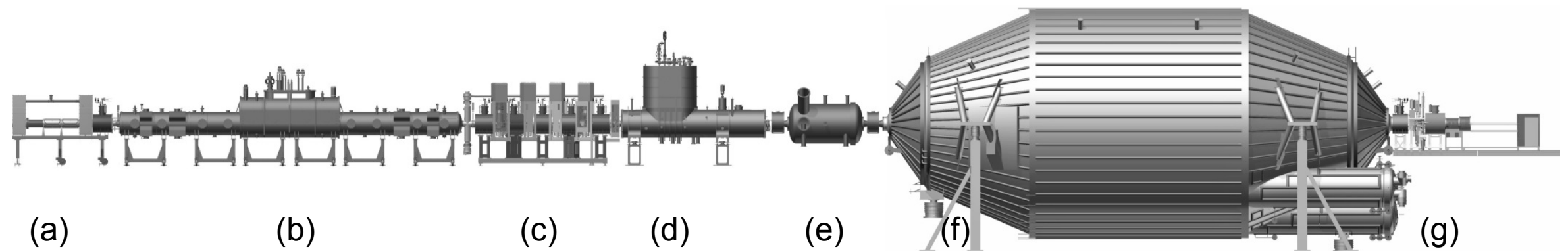


Figure 1: Overview of the KATRIN set-up: (a) calibration and monitoring system, (b) windowless gaseous tritium source, (c) differential and (d) cryogenic pumping sections, (e) pre-spectrometer, (f) main spectrometer, (g) detector system.

**Utiliza colimación magnética adiabática para seleccionar electrones y medir su energía.**

**Hay que entender la fuente muy bien.**

**Sensibilidad a la masa efectiva hasta  $\sim 200$  meV**

# Resumen

- Los experimentos de oscilaciones miden las diferencias entre las masas cuadradas
- Todavía no sabemos la jerarquía pero hay experimentos tomando datos con algo de sensibilidad.
- Cosmología mide un máximo para la suma de las masas
- Nuevos experimentos intentan medir la masa efectiva de el  $\nu_e$ .