

The image shows the interior of a large, spherical detector, likely the Super-Kamiokande. The walls are covered in a dense grid of photomultiplier tubes (PMTs), which are used to detect neutrinos. The perspective is from the center of the sphere, looking outwards. A small platform with some equipment is visible in the lower-left quadrant. The overall lighting is warm and golden, highlighting the metallic surfaces of the PMTs.

NEUTRINOS Y EL UNIVERSO INVISIBLE

P. HERNÁNDEZ

(U. VALENCIA & IFIC-CSIC & IFT-UAM)

Neutrinos



Los neutrinos son las partículas más **elusivas** del Modelo Estándar

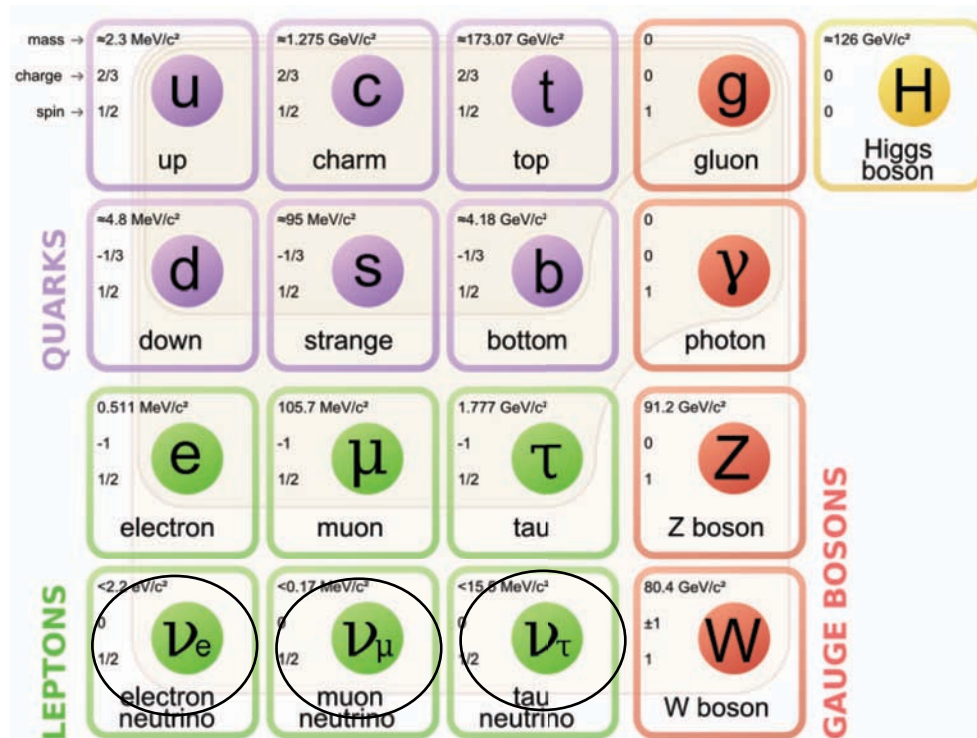
Mantienen la **coherencia cuántica** a distancias $>1000\text{km}$

Pueden ser **su propia antipartícula** y la primera ventana a la **nueva física** ?

Pueden ser la explicación de **porqué estamos aquí** ?

Son las rélicas del Big Bang que **nos llegan desde un Universo más remoto...**

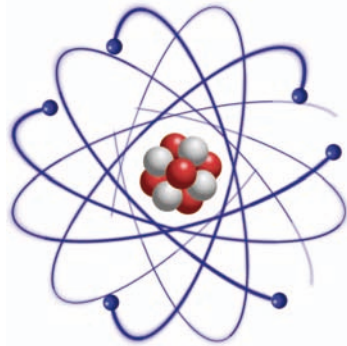
La historia de los neutrinos está estrechamente ligada a la del Modelo Estándar de partículas elementales



Neutrinos

El Modelo Estándar "visible"

Materia ordinaria:



- electrón(-)
- protón (+)
- neutrón

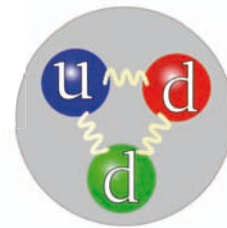
QUARKS

mass →	$\approx 2.3 \text{ MeV}/c^2$	u
charge →	$2/3$	
spin →	$1/2$	
		up
	$\approx 4.8 \text{ MeV}/c^2$	d
	$-1/3$	
	$1/2$	
		down
	$0.511 \text{ MeV}/c^2$	e
	-1	
	$1/2$	
		electron

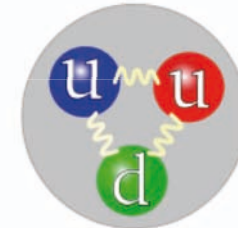
0	g
0	
1	
	gluon
0	γ
0	
1	
	photon

Interacción fuerte

Interacción electromagnética



Neutrón



Protón

El Modelo Estándar “invisible”

Dos recetas para la “invisibilidad”

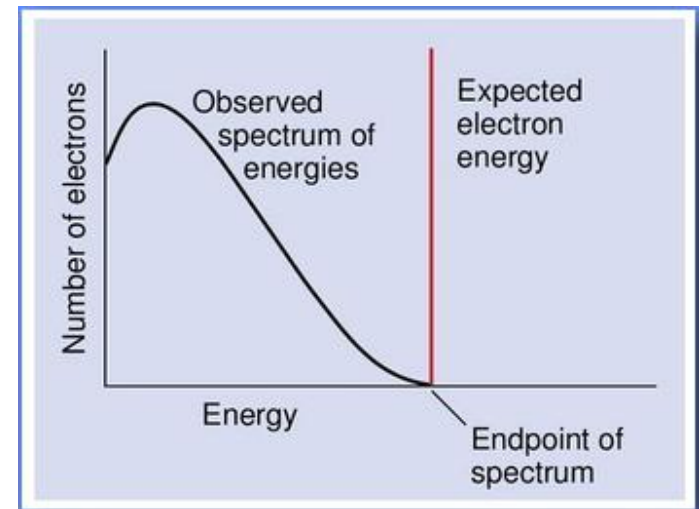
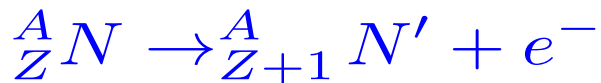
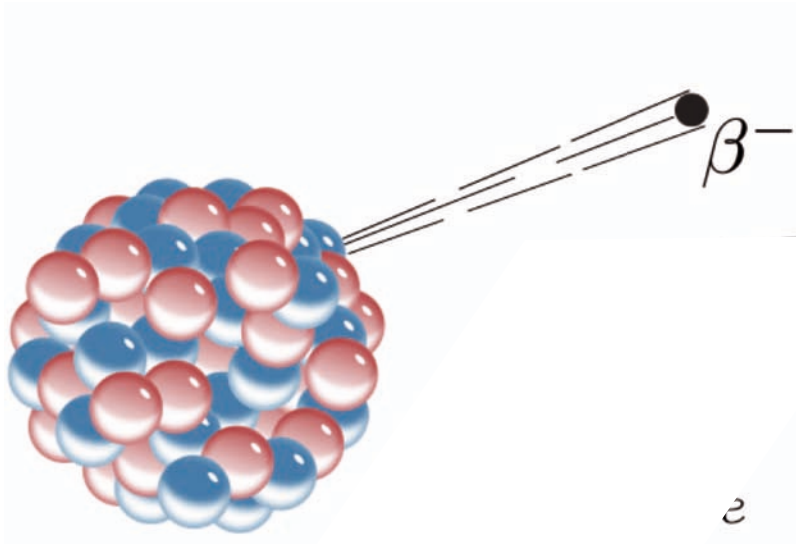


Neutrino: la partícula invisible

1900 Becquerel, M & P Curie, Rutherford....

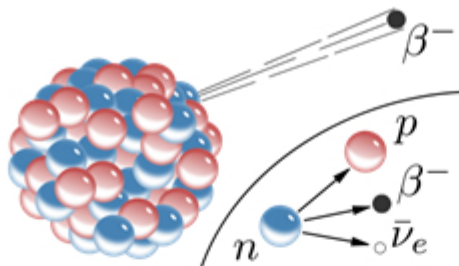
Radioactividad beta:

$$E_{\text{electron}} \simeq (M_N - M_{N'})c^2 = Q = \text{constante}$$



¿ La energía no se conserva o hay algo más que no vemos ?

1930



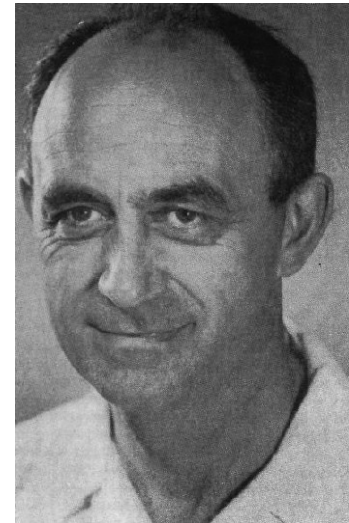
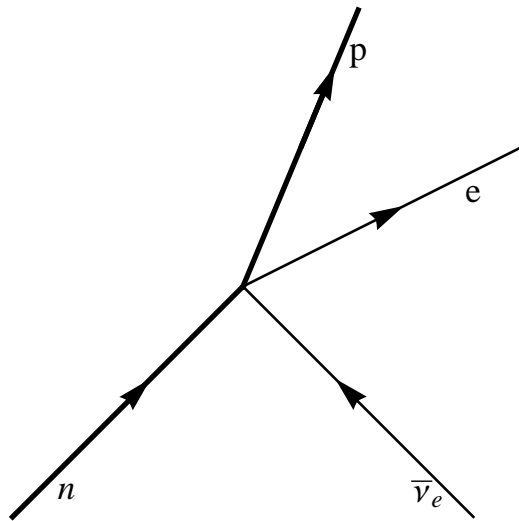
Dear Radioactive Ladies and Gentlemen,

Pauli (Nobel 1945)

*As the bearer of these lines, to whom I graciously ask you to listen, will explain to you in more detail, how because of the "wrong" statistics of the N and Li^6 nuclei and the continuous beta spectrum, I have hit upon a desperate remedy to save the "exchange theorem" of statistics and the law of conservation of energy. Namely, the possibility that there could exist in the nuclei electrically neutral particles, that I wish to call **neutrons**, which have spin 1/2 and obey the exclusion principle, and which further differ from light quanta in that they do not travel with the velocity of light. The mass of the neutrons should be of the same order of magnitude as the electron mass and in any event not larger than 0.01 proton masses. The continuous beta spectrum would then become understandable by the assumption that in beta decay a neutron is emitted in addition to the electron such that the sum of the energies of the neutron and the electron is constant...*

Unfortunately, I cannot personally appear in Tübingen since I am indispensable here in Zürich because of a ball on the night from December 6 to 7....

1934: Teoría de la desintegración beta



E. Fermi
(Nobel 1938)

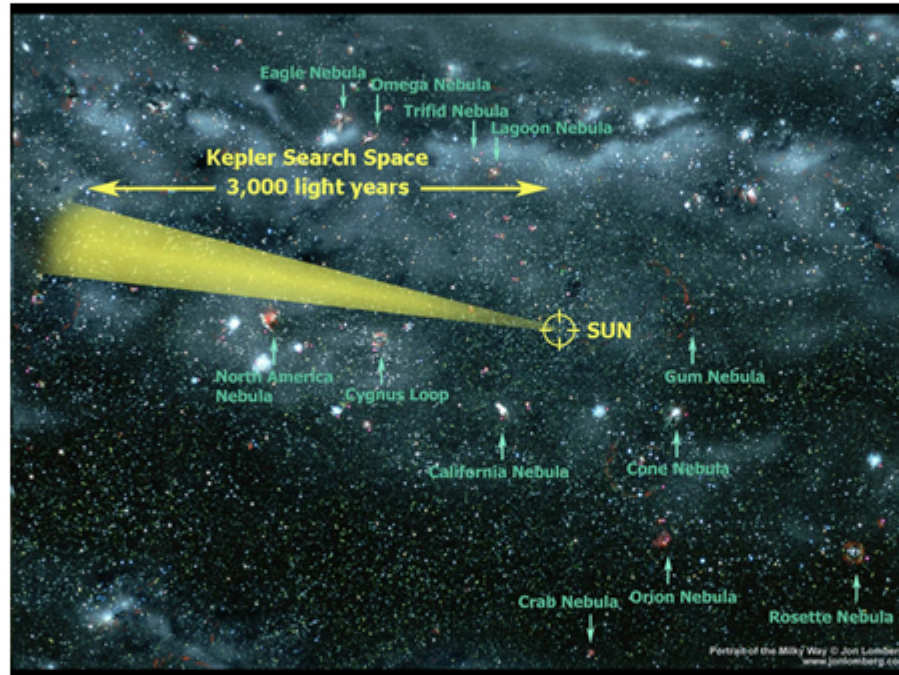
Nature no publicó el artículo: “contained speculations too remote from reality to be of interest to the reader...”

Bethe-Peierls (1934): Calculan la probabilidad de este proceso y declaran

“no hay una forma práctica de detectar un neutrino”

¿ Cómo los detectamos ?

Tamaño de una piscina de agua para parar un neutrino



“I have done a terrible thing. I have postulated a particle that cannot be detected” W. Pauli

La teoría de Pauli entraba en la categoría de las teorías “ni siquiera falsas”

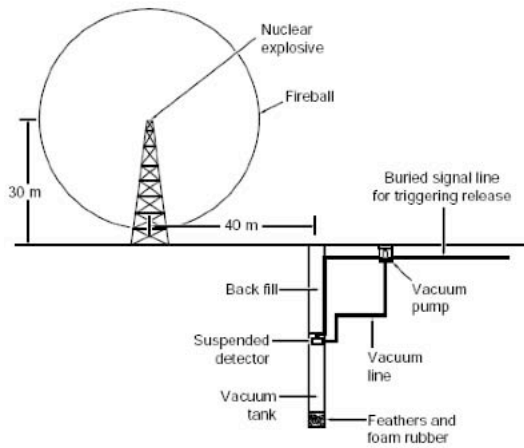
Detección de primer neutrino (1956)

Proyecto Poltergeist

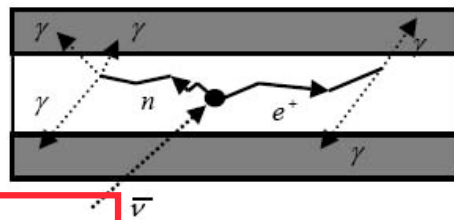
(Primera idea: poner el detector cerca de una explosión nuclear!)



Reines Nobel 95 Cowan (died 74)



Reactor nuclear: 10^{20} neutrinos/segundo!



Scintillator

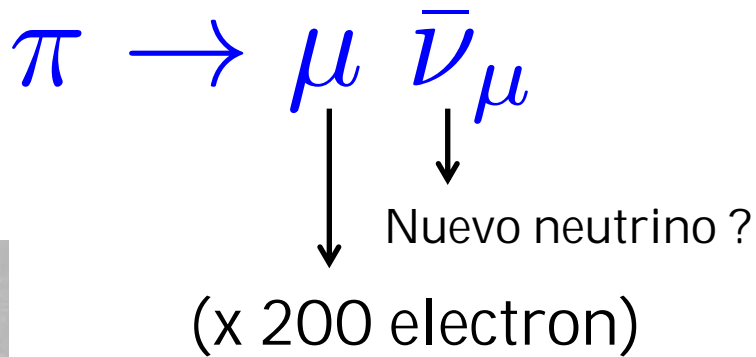
$H_2O + CdCl_2$

Scintillator

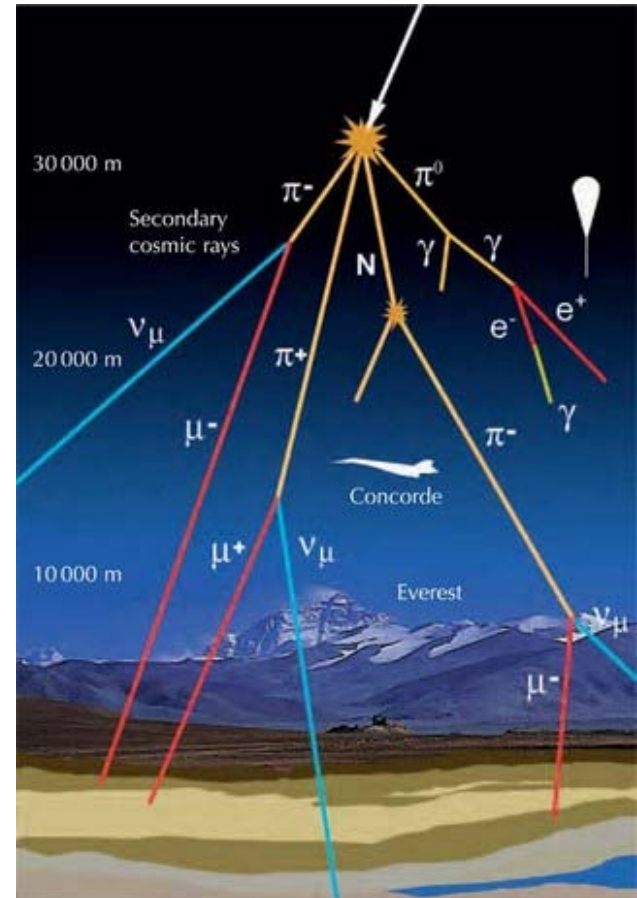
El Modelo Estándar "invisible"

Un desfile de extrañas partículas apareció en detectores de partículas en globos:

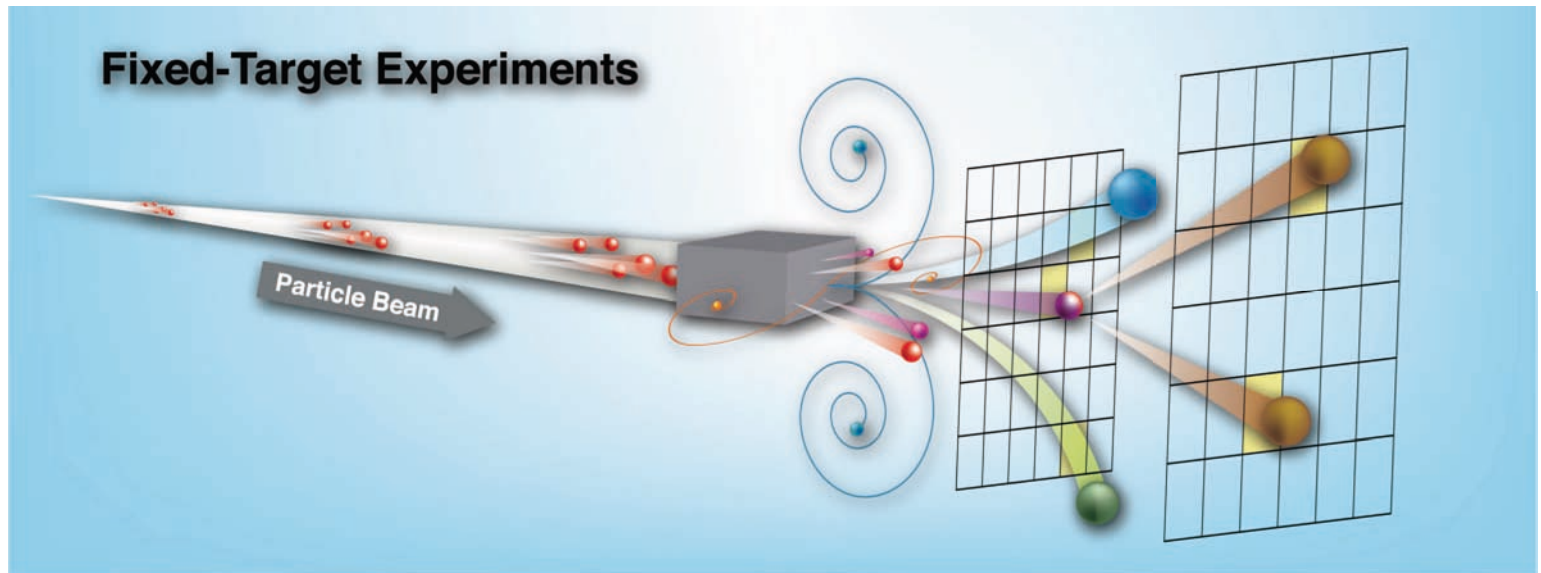
Gemelos gigantes de las partículas conocidas, otras diferentes a todo lo hasta entonces conocido...



Who ordered that ?
Isaac Rabi



Cascadas en Aceleradores



El sabor de los neutrinos

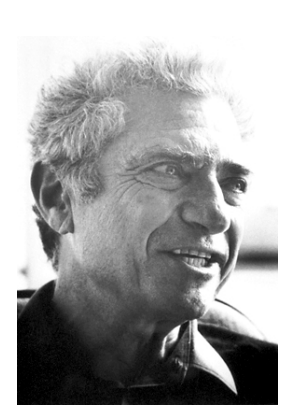
$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu \end{pmatrix}$$



Lederman

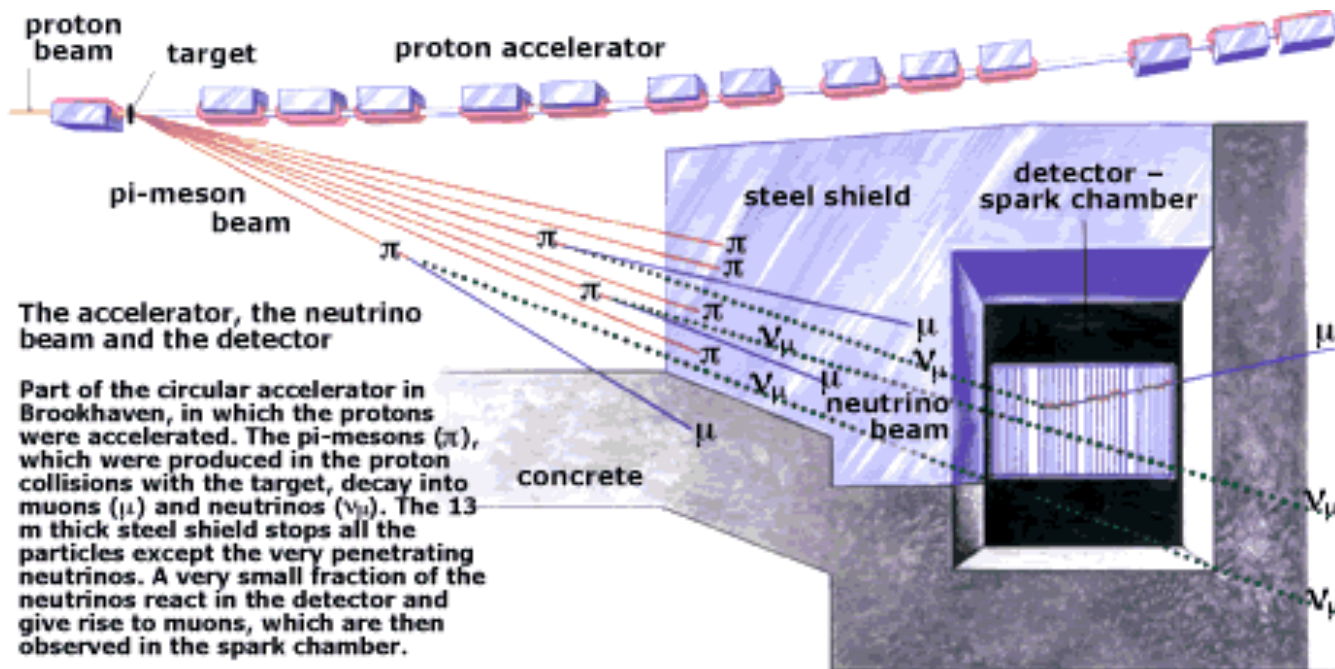


Schwartz



Steinberger

Nobel 1988

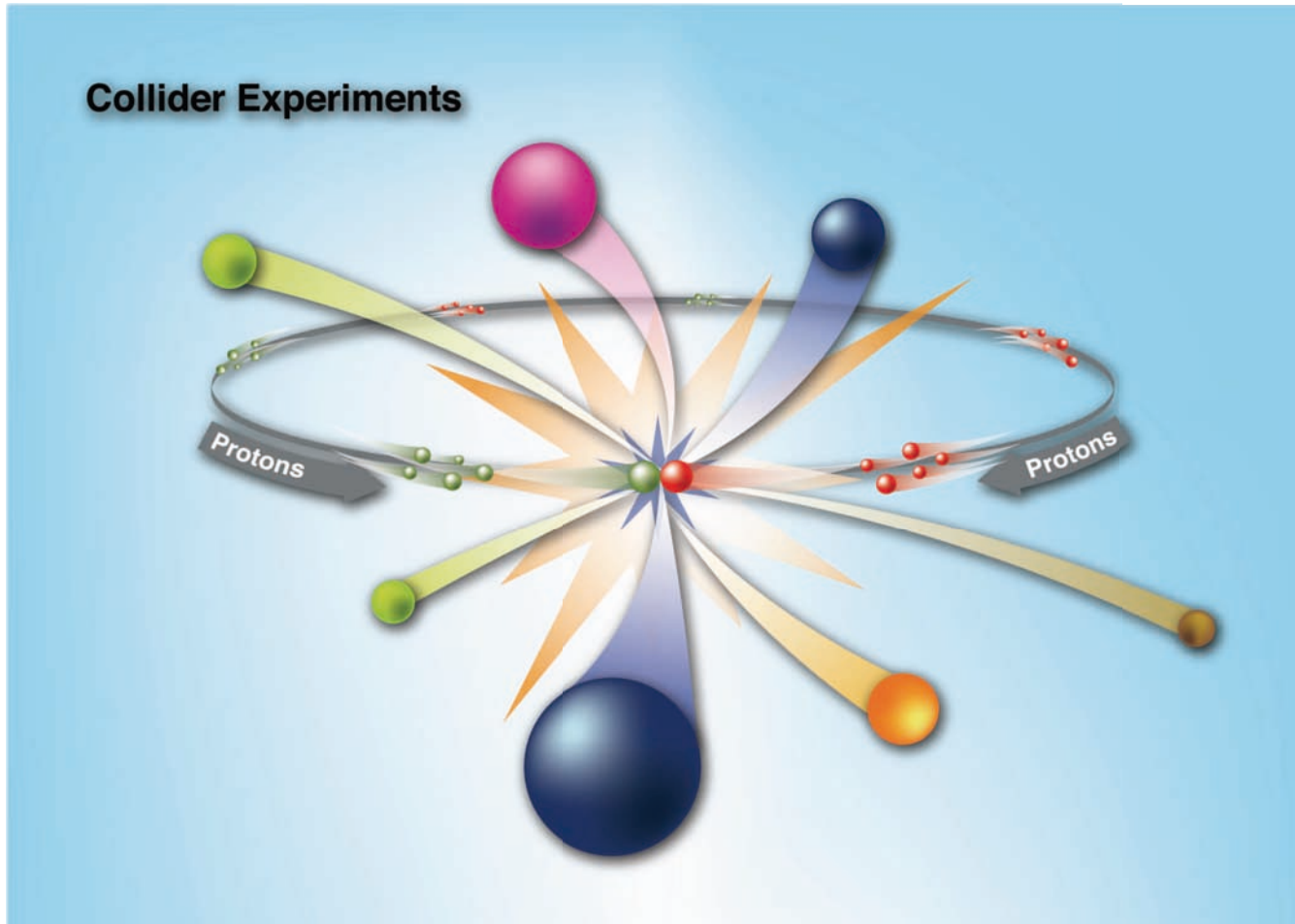


The accelerator, the neutrino beam and the detector

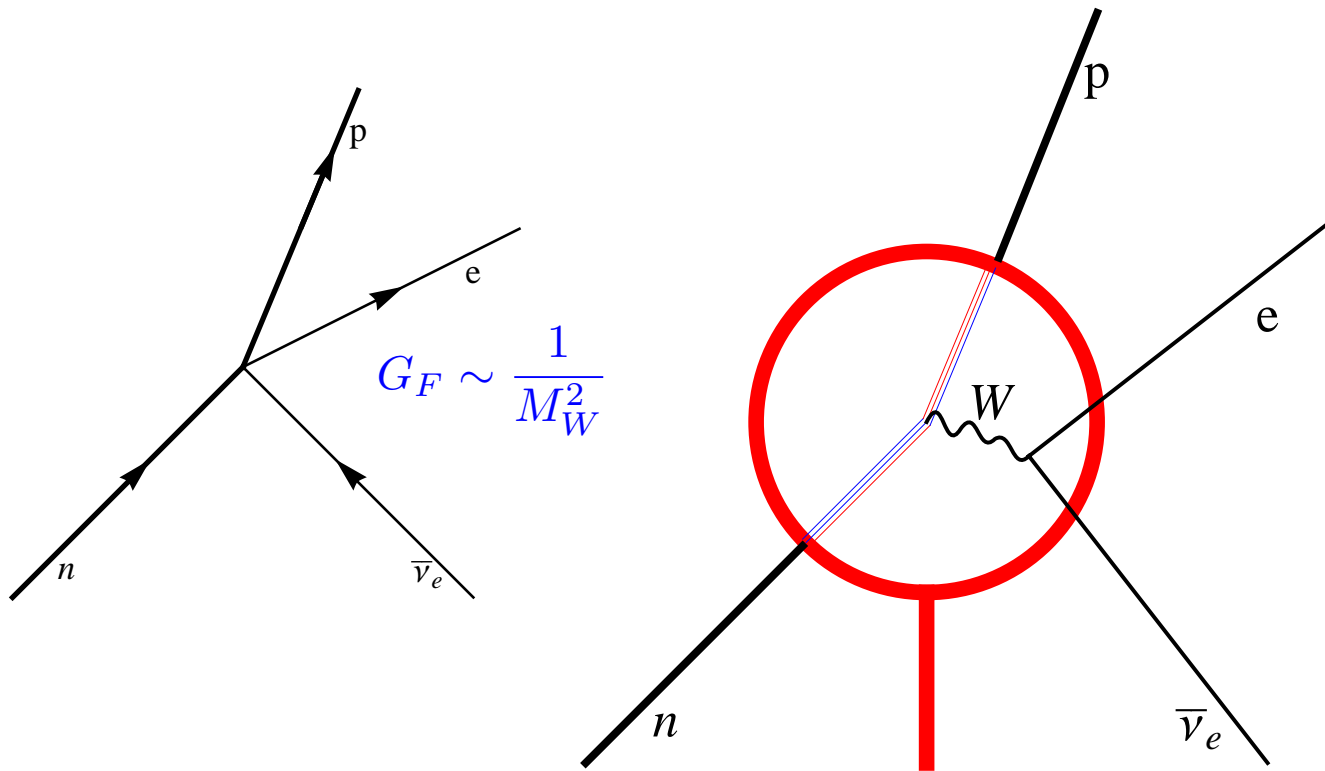
Part of the circular accelerator in Brookhaven, in which the protons were accelerated. The pi-mesons (π), which were produced in the proton collisions with the target, decay into muons (μ) and neutrinos (ν_μ). The 13 m thick steel shield stops all the particles except the very penetrating neutrinos. A very small fraction of the neutrinos react in the detector and give rise to muons, which are then observed in the spark chamber.

Based on a drawing in Scientific American, March 1963.

De balas a colisionadores...



Interacciones débiles



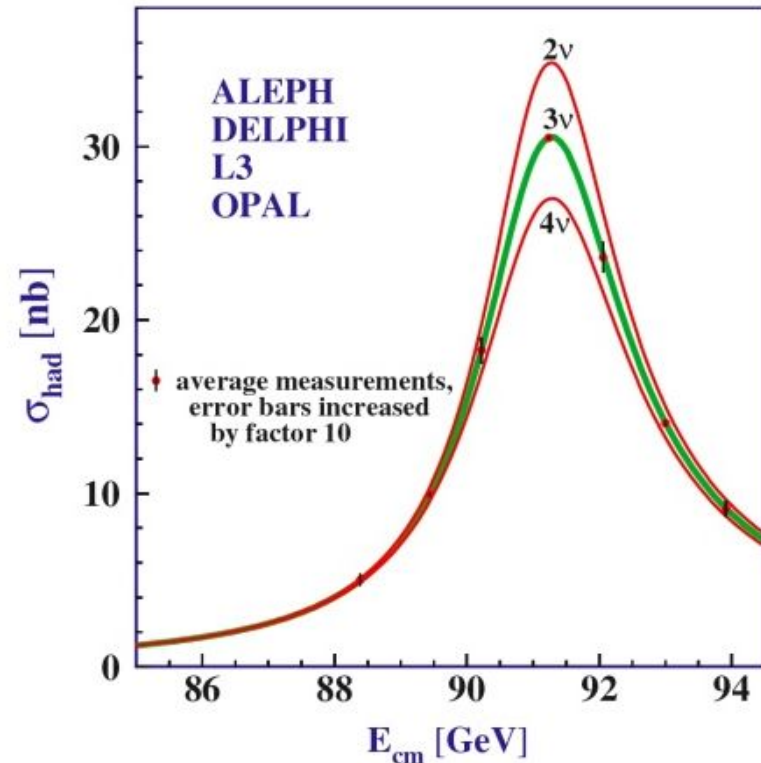
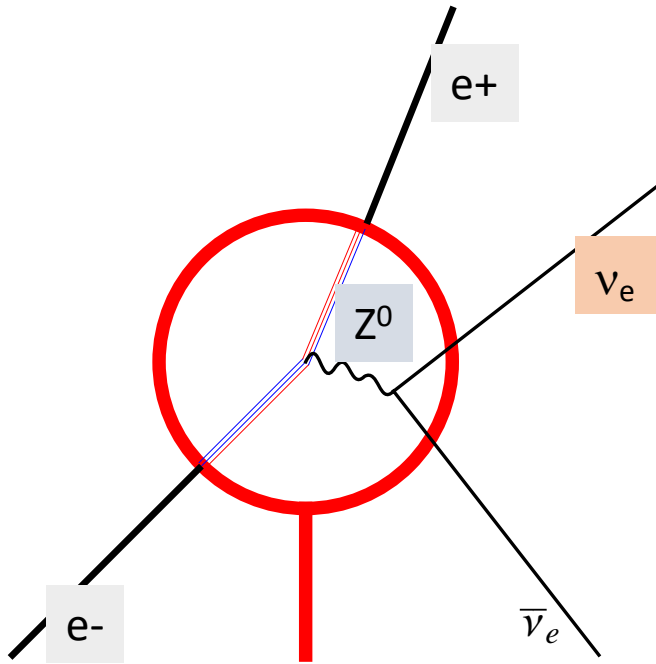
Interacciones débiles lo son porque involucran el intercambio de un bosón masivo

A altas energías: interacciones electromagnéticas y débiles se unifican en la teoría electrodébil

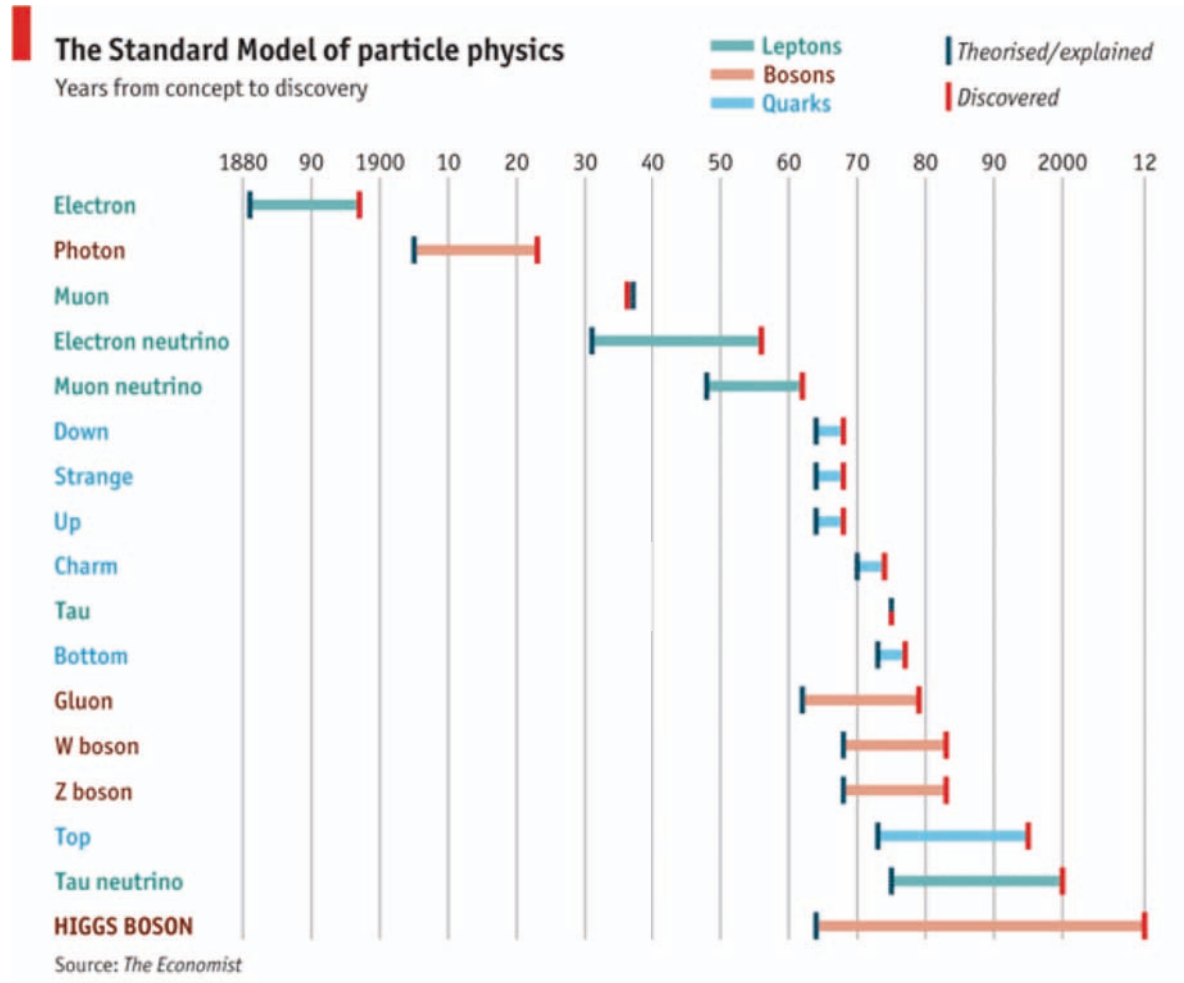
¿ Por qué no más familias ?

$$e^+e^- \rightarrow Z^0 \rightarrow f\bar{f}$$

Only three neutrinos -> three SM families!




Después de más de un siglo de trabajo....

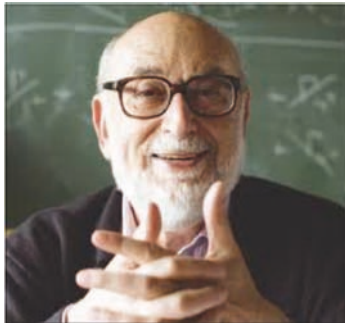


The Higgs particle

2013 NOBEL PRIZE IN PHYSICS
François Englert
Peter W. Higgs



© The Nobel Foundation. Photo: Lovisa Engblom



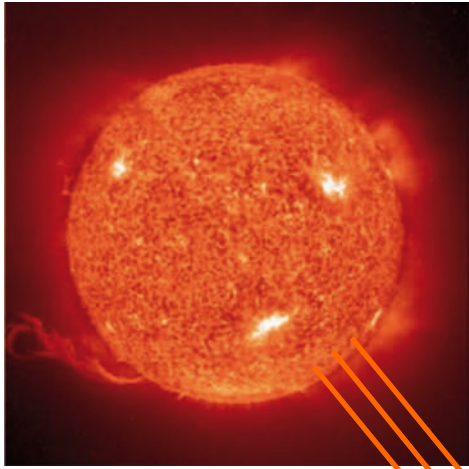
	mass → $\approx 2.3 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.275 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.07 \text{ GeV}/c^2$	0	$\approx 126 \text{ GeV}/c^2$
	charge → $2/3$	$2/3$	$2/3$	0	0
	spin → $1/2$	$1/2$	$1/2$	1	1
	u up	c charm	t top	g gluon	H Higgs boson
QUARKS	$\approx 4.8 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 95 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$	0	
	$-1/3$	$-1/3$	$-1/3$	0	
	$1/2$	$1/2$	$1/2$	1	
	d down	s strange	b bottom	γ photon	
	$0.511 \text{ MeV}/c^2$	$105.7 \text{ MeV}/c^2$	$1.777 \text{ GeV}/c^2$	$91.2 \text{ GeV}/c^2$	
	-1	-1	-1	0	
	$1/2$	$1/2$	$1/2$	1	
	e electron	μ muon	τ tau	Z Z boson	
LEPTONS	$< 2.2 \text{ eV}/c^2$	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$	$< 15.5 \text{ MeV}/c^2$	$80.4 \text{ GeV}/c^2$	
	0	0	0	± 1	
	$1/2$	$1/2$	$1/2$	1	
	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	W W boson	
					GAUGE BOSONS

Pensamos que esto no puede ser el fin de la historia y ...

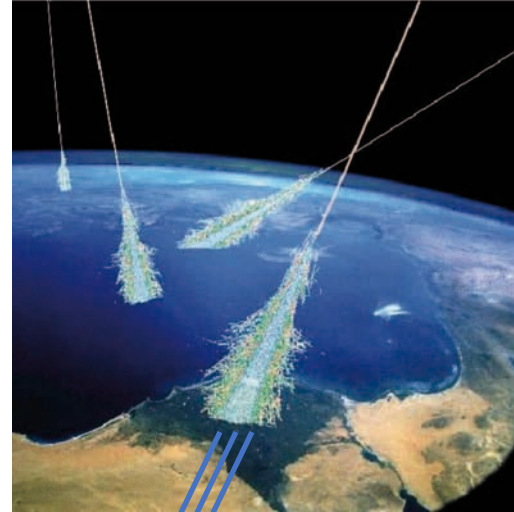
los neutrinos son los primeros que se han salido del guión !!

Ubicuos Neutrinos

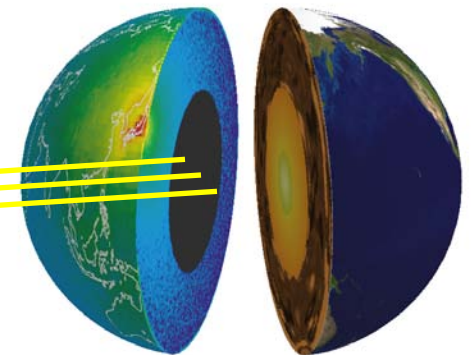
Están en todas partes...



Sol: 5×10^{12} /segundo

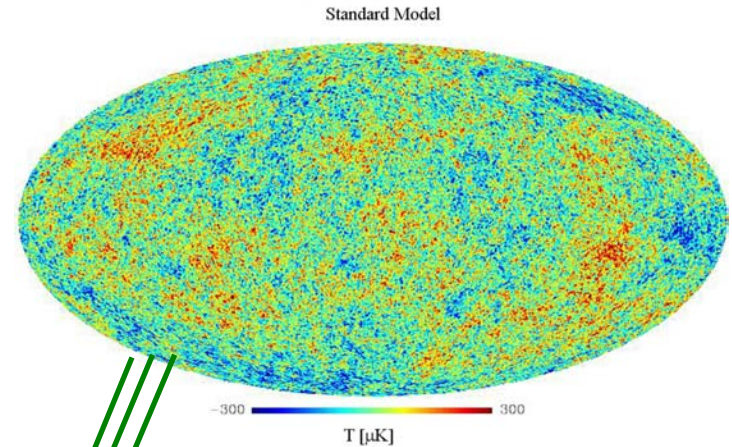


Atmósfera: ~ 20 /segundo



Tierra: $\sim 10^9$ /segundo

Ubicuos Neutrinos



Simulation showing the distribution on the sky of temperature fluctuations in the Cosmic Microwave Background with neutrinos as in the Standard Model.

Big Bang: $\sim 2 \times 10^{12}$ /segundo

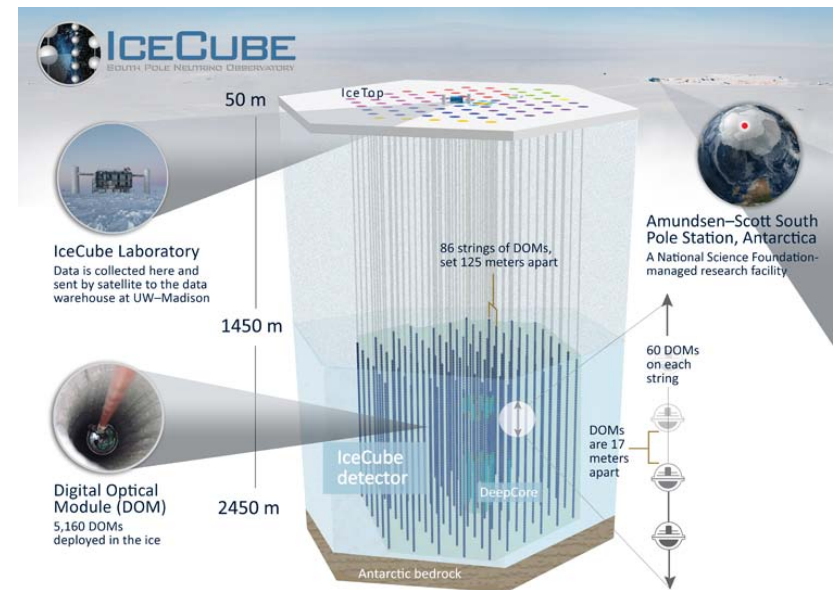
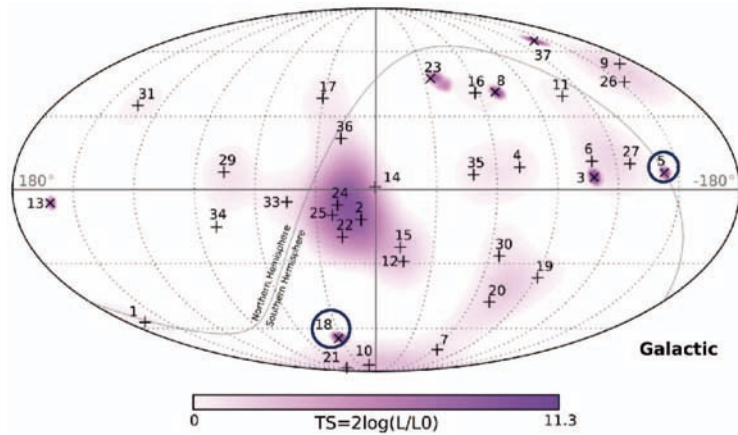
Supernova 1987: $\sim 10^{12}$ /segundo

@168000 años luz !
(10^8 x más lejos que el sol)



Ubicuos Neutrinos

PeV neutrinos de origen desconocido...

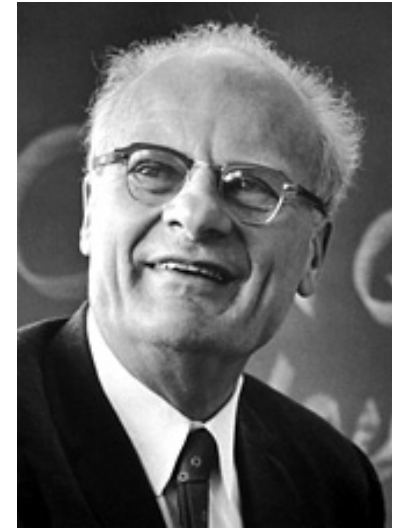
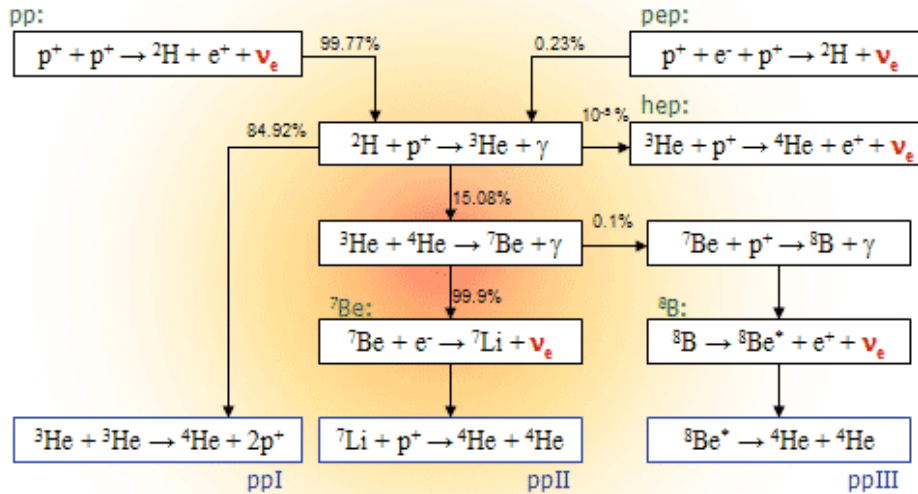


Astronomía con fuentes múltiples

Las estrellas brillan neutrinos

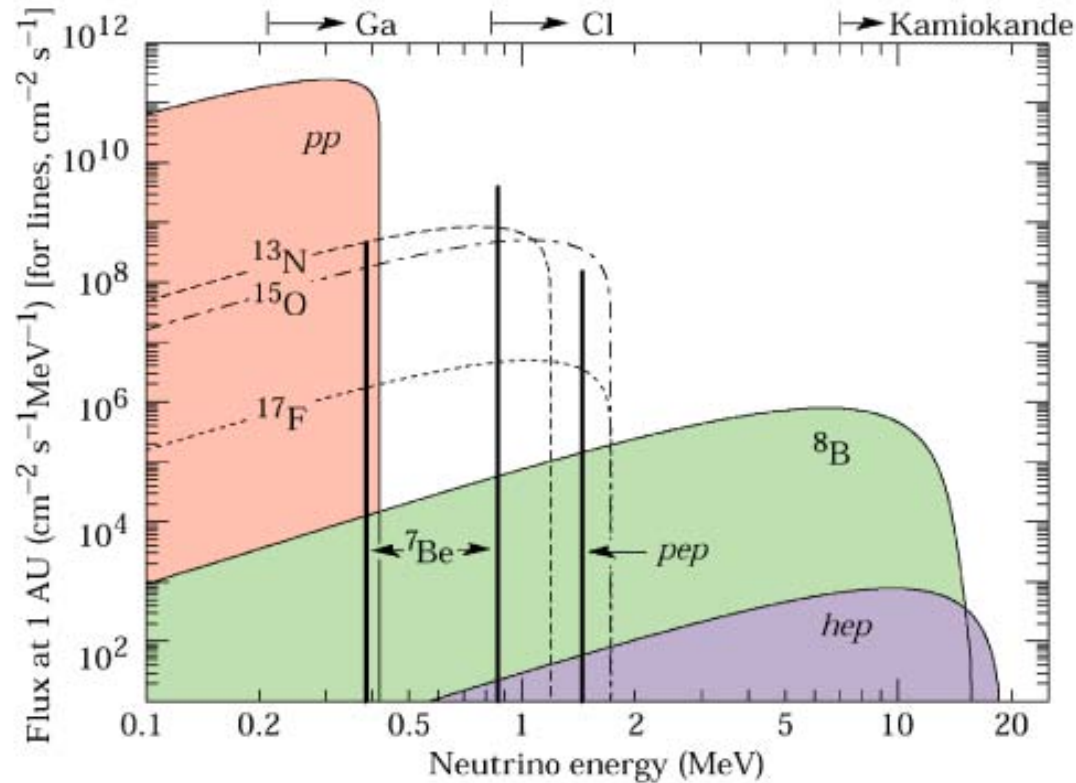
1939 Bethe

Establece la teoría de la nucleosíntesis estelar



Nobel 1967

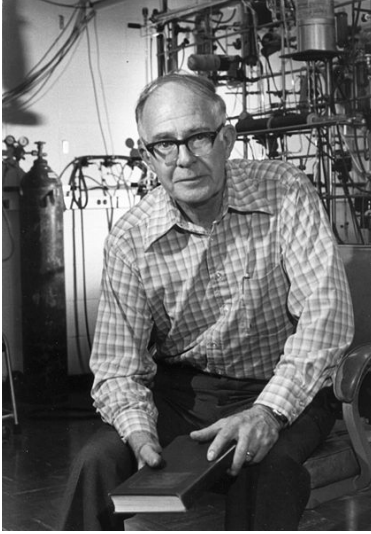
¿Cuántos neutrinos ?



Bahcall (died 2005)

1 ν cada día en una piscina (400000 litros de cloro)...

El héroe de las cavernas



Raymond Davies
Nobel 2002

1966 por primera vez detecta los neutrinos solares una piscina clorada de 400000 litros enterrada 1478 metros en la mina Homestake

Pero no convenció a nadie, porque vio el 30% de los que esperaba...



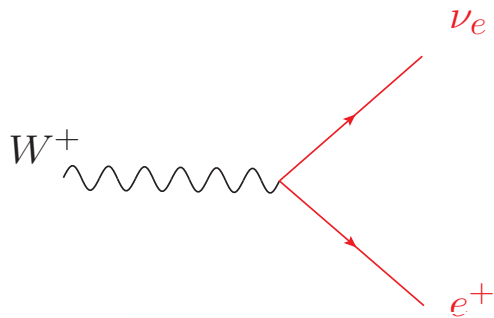
Problema en el detector ? En el modelo solar ? En los neutrinos ?

Oscilaciones de Neutrinos

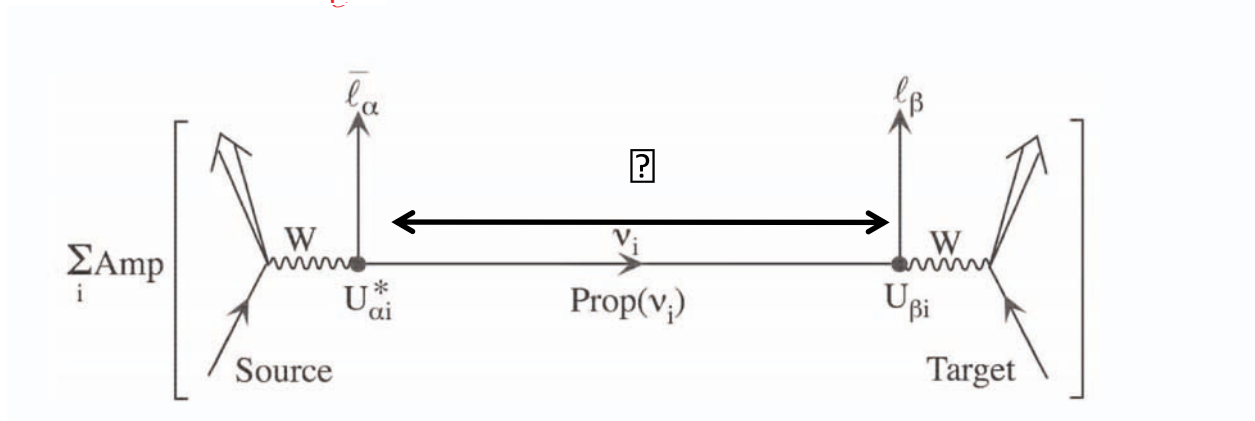
El neutrino de sabor "electron" (ie. se produce en combinación con un electron) es una superposición de los tres neutrinos masivos: los neutrinos están mezclados



Бруно Понтекорво



$$|\nu_\alpha\rangle = \sum_{i=1}^3 U_{\alpha i}^* |\nu_i\rangle, \quad \alpha = e, \mu, \tau$$



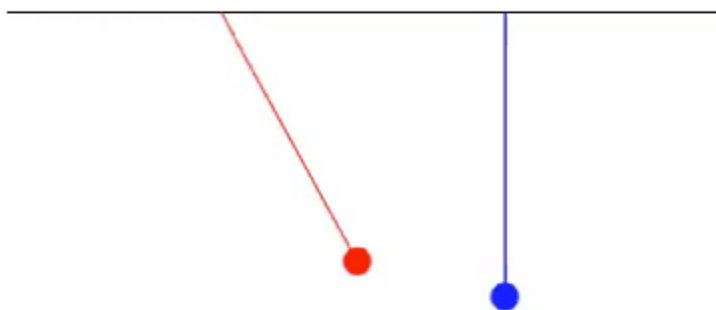
Hay una probabilidad no nula de que si se mide el sabor a una cierta distancia de la fuente, este haya cambiado

Oscilaciones de neutrinos: mecánica cuántica a distancias macroscópicas

- Dualidad cuántica onda-partícula: cada neutrino masivo se propaga como una onda monocromática
- Interaccionan tan poco que pueden mantener la coherencia cuántica a distancias enormes
- La interferencia de las ondas de cada neutrino masivo da lugar al cambio de sabor

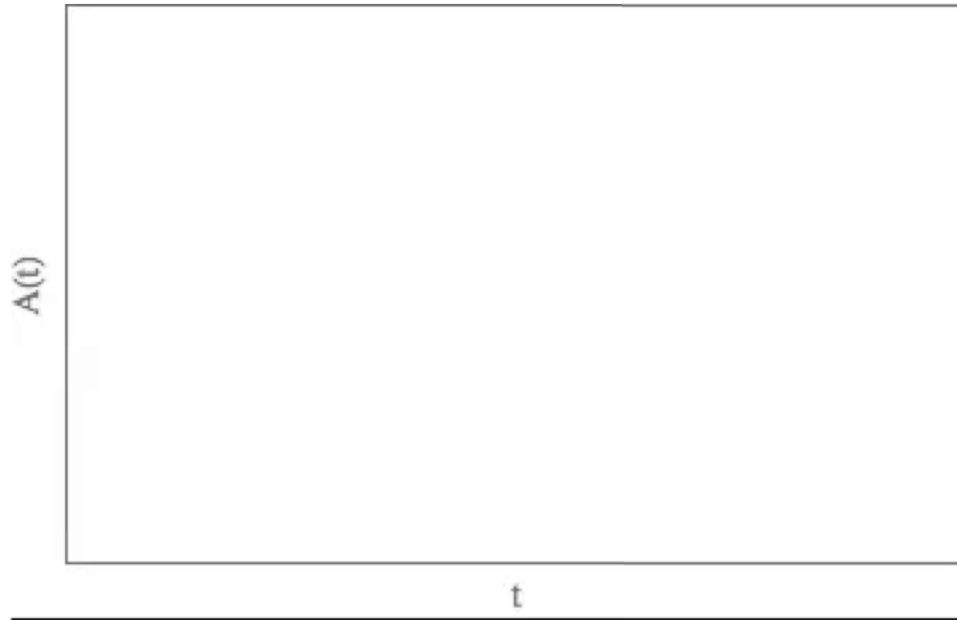
Analogía clásica: péndulo

A V_e se mantiene como V_e ...



V_e

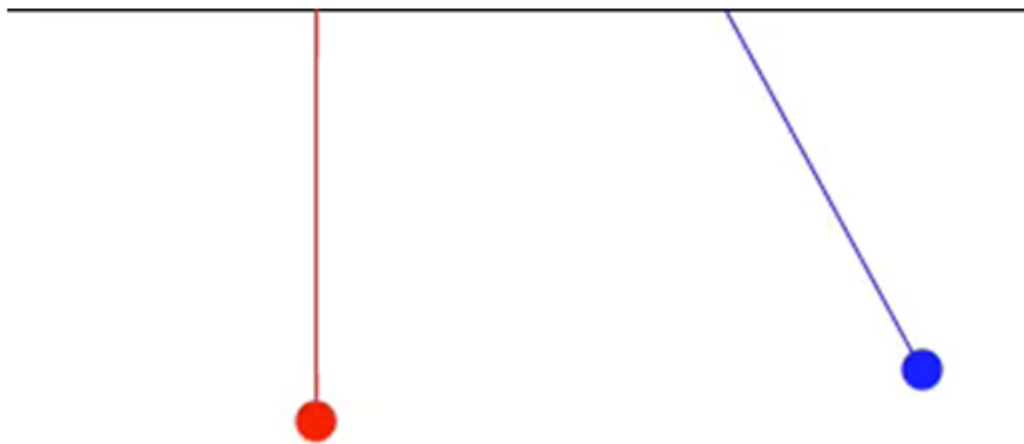
$$\text{Prob}(\langle \hat{x} \rangle(t)) = |\text{Amplitude}(t)|^2, \quad \text{Prob}(\langle \hat{x} \rangle(t_0)) = 1$$



The probability to find a V_{μ} at any time is the same, but the probability to find a V_{μ} is zero.

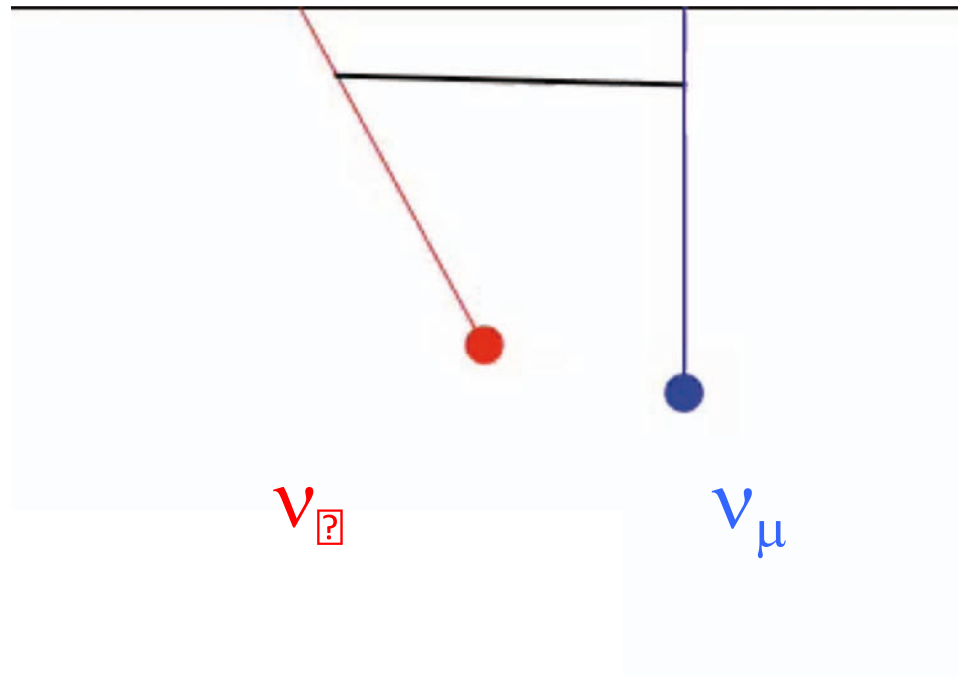
A V_μ se mantiene como

$V_\mu \dots$



V_μ

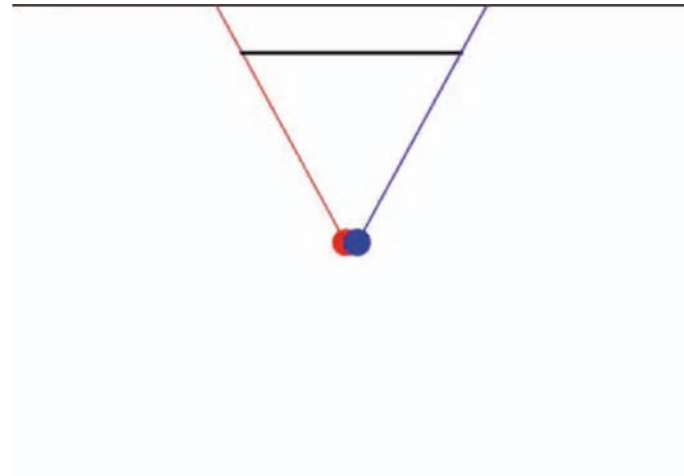
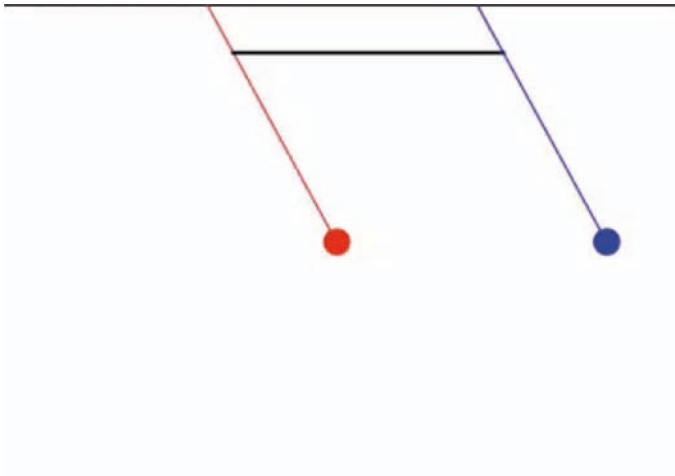
Analogía clásica: péndulo acoplado





La probabilidad de tener V_{μ} oscila con el tiempo y lo mismo la de tener V_{μ}

Estados masivos=modos normales

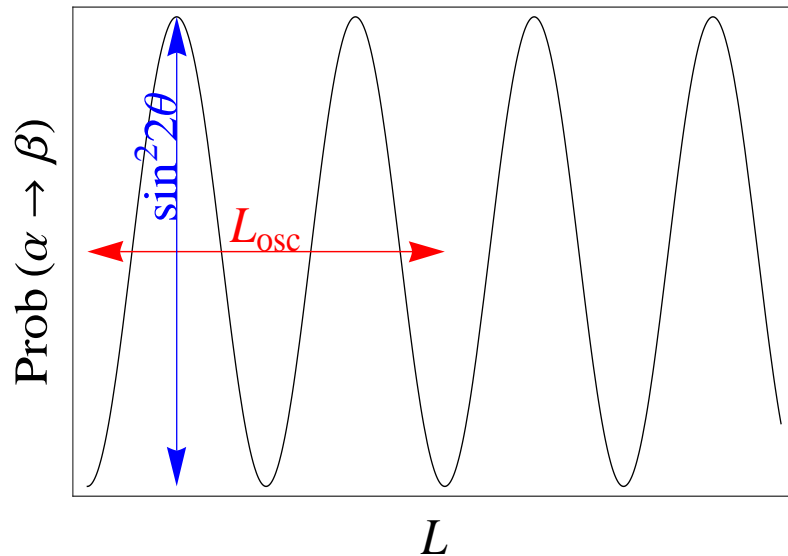




The probability to find a v_{μ} or v_{μ} does not change with time

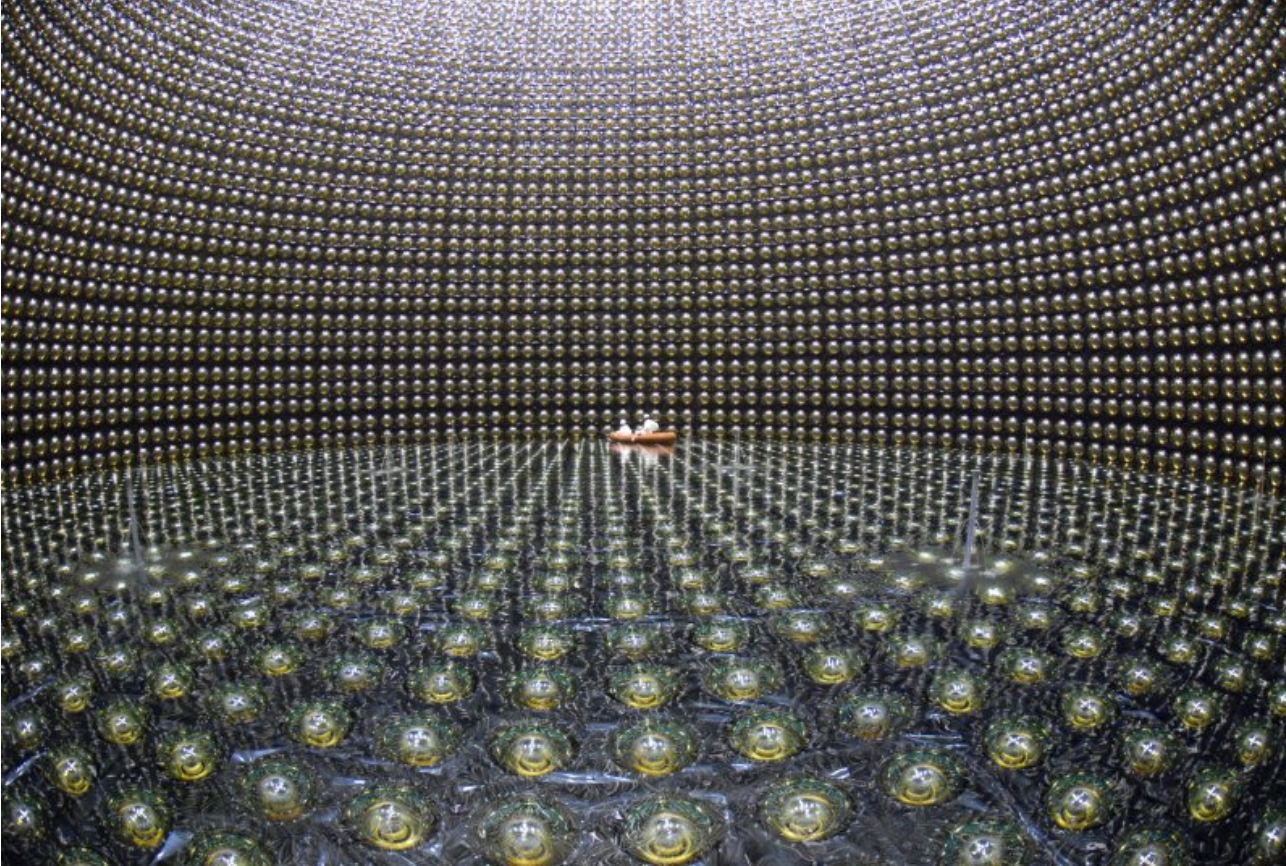
Oscilación de 2ν

$$\nu_e = \cos \theta \nu_1 + \sin \theta \nu_2$$



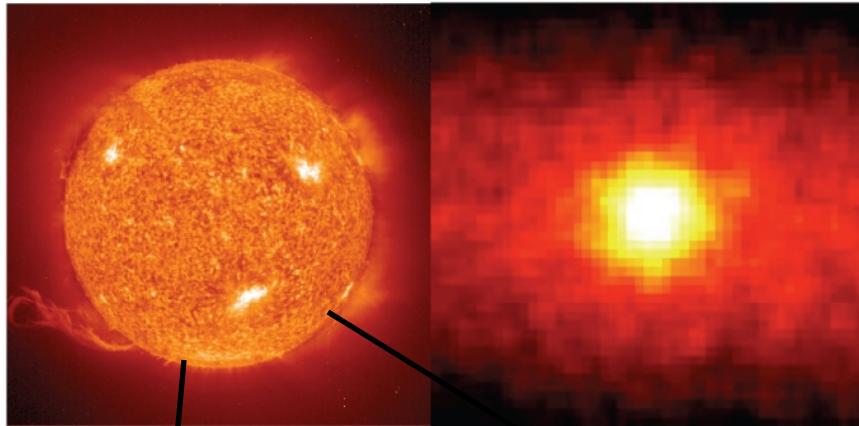
$$L_{\text{osc}}(\text{km}) = \frac{\pi}{1.27} \frac{E(\text{GeV})}{\Delta m^2(\text{eV}^2)}$$

Catedrales de luz subterráneas



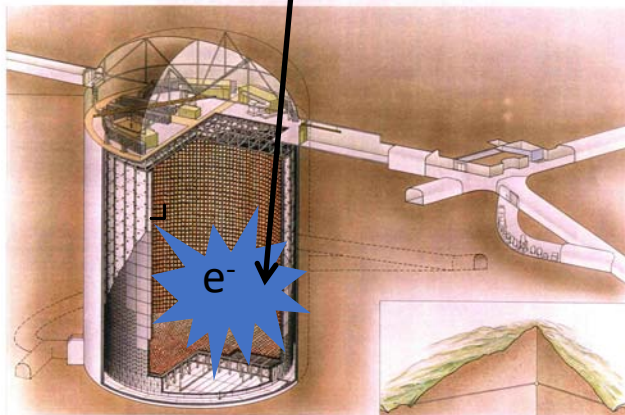
Koshiba
Nobel 2002

Solar Neutrinos



Neutrinoografía del sol!

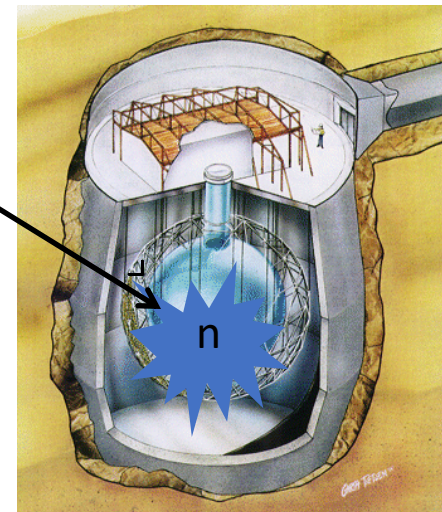
SuperKamiokande (22.5 kton!)



SUPERKAMIOKANDE INSTITUTE FOR COSMIC RAY RESEARCH UNIVERSITY OF TOKYO (c) Kamioka Observatory, ICRR [Institute for Cosmic Ray Research], The University of Tokyo

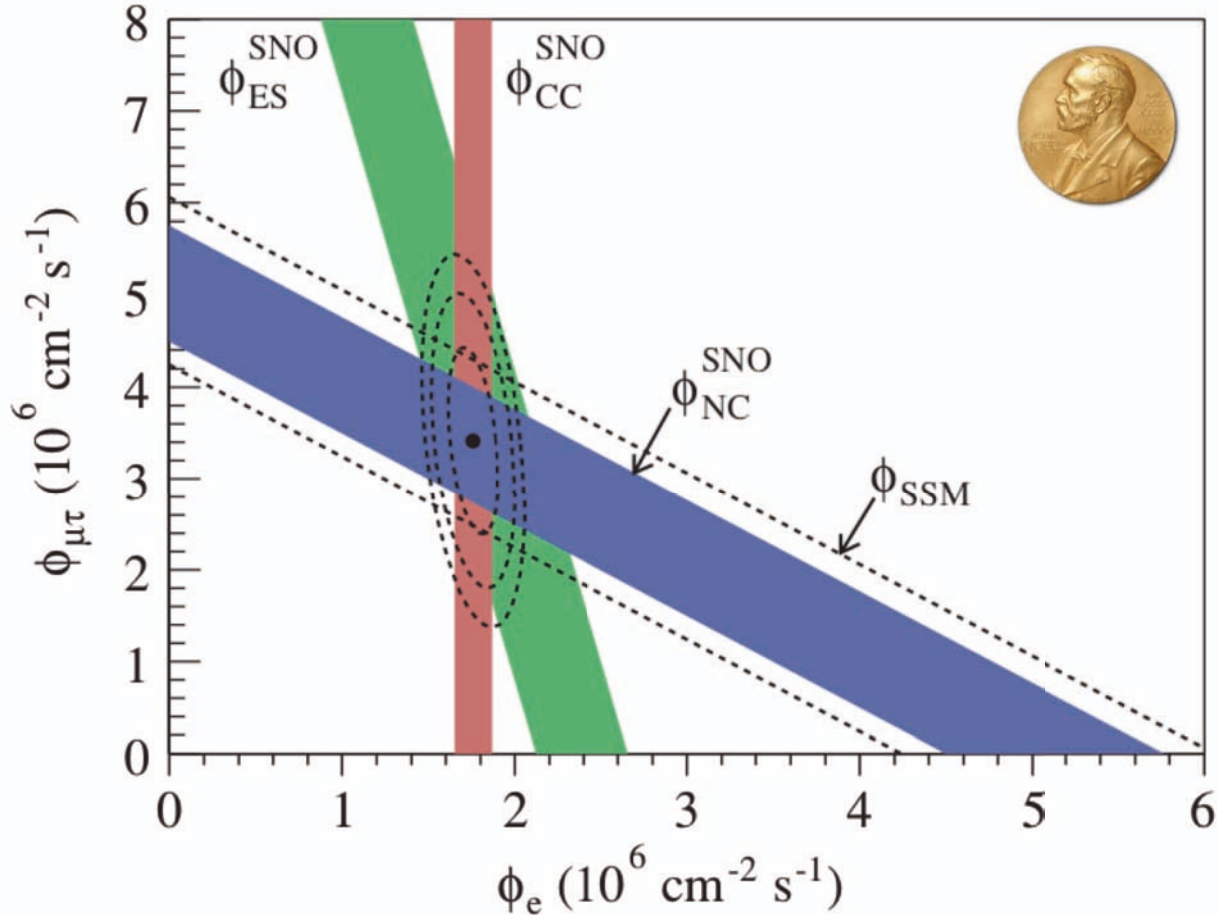
Sensible a los ν_e

SNO



Sensible a los ν_e, ν_μ, ν_τ

El sabor de los neutrinos del sol



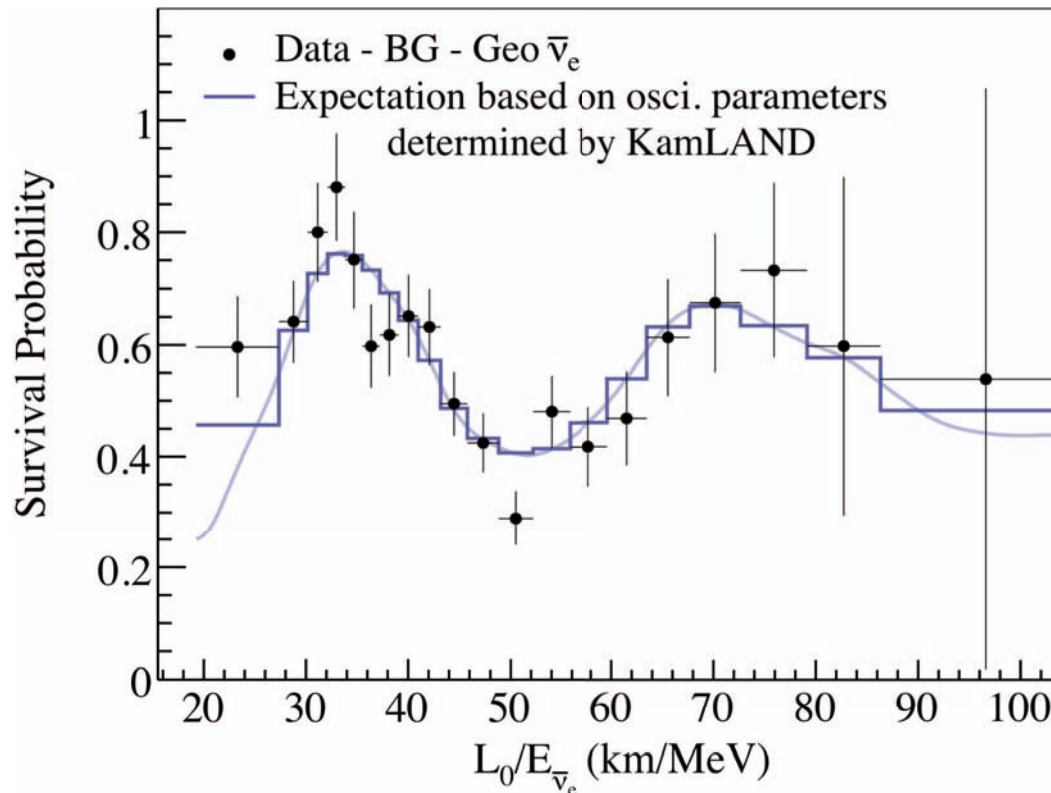
$$|\Delta m^2| \stackrel{\text{[1]}}{\sim} \frac{O(100 \text{ Km})}{O(\text{MeV})}$$

Se debería poder ver enviando neutrinos de reactores a 100km !

KamLAND: la oscilación solar en la tierra

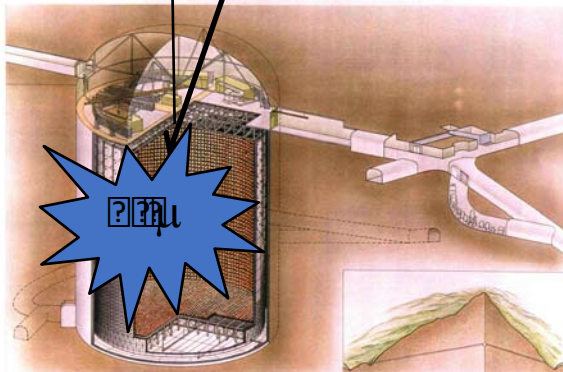
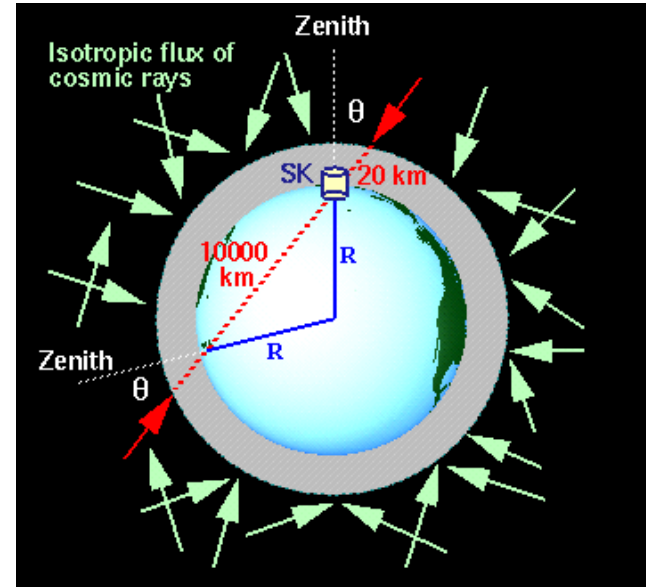
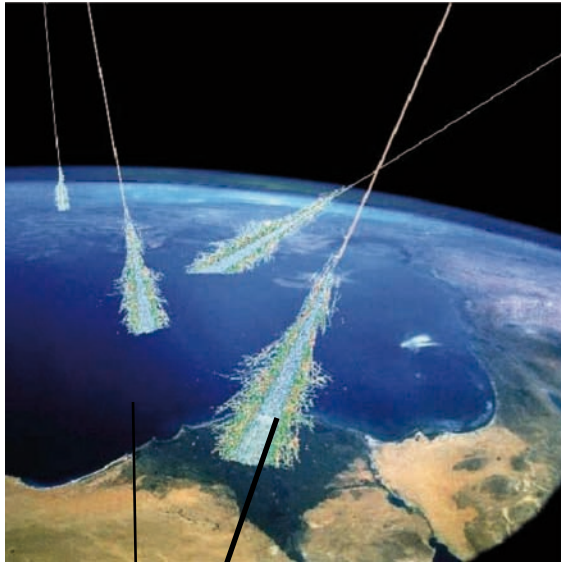
Reines&Cowan experiment medio siglo más tarde,
a 170 km de los reactores Japoneses antes del gran
terremoto

$$\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e$$



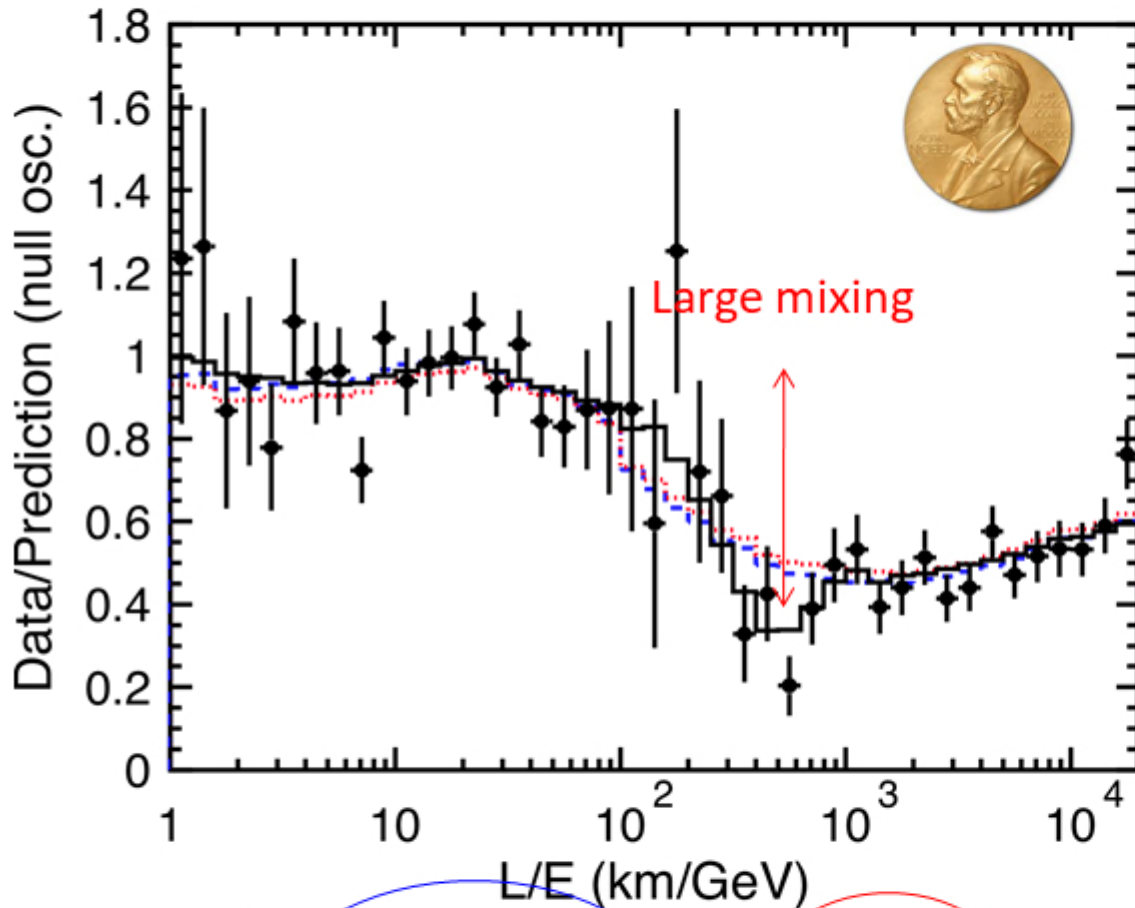
$$\sqrt{\Delta m_{solar}^2} \simeq 0.000000000001 \times m_{\text{proton}}$$

Neutrinos de la atmósfera



$$L = 10 - 10^4 \text{ Km}$$

Oscilación atmosférica



$$\sqrt{\Delta m_{atmos}^2} \simeq 0.00000000005 \times m_{proton}$$

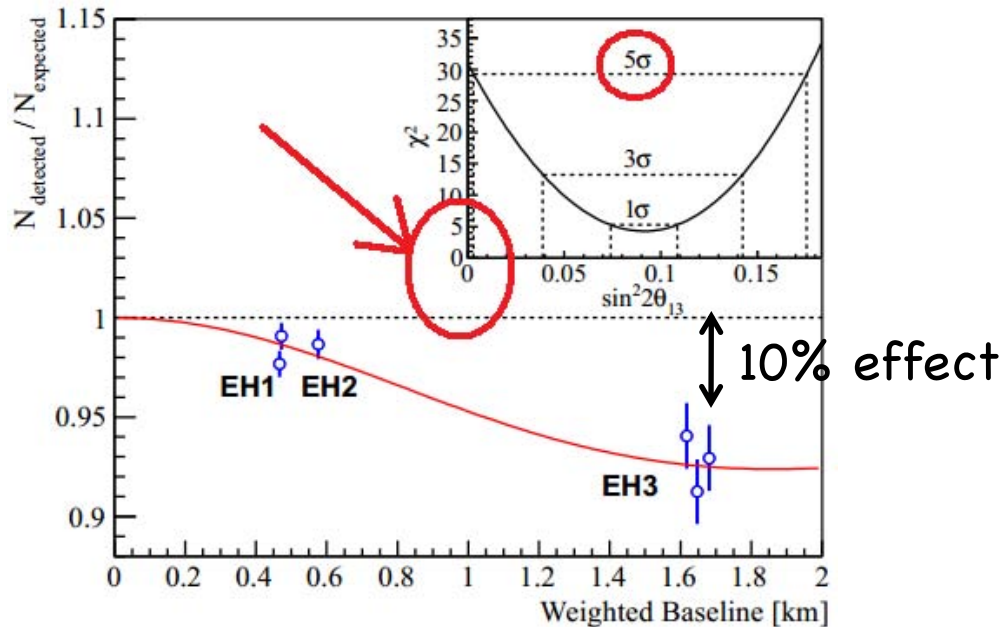
$$|\Delta m^2|^{-1} \sim \frac{O(1000 Km)}{O(GeV)} \sim \frac{O(1km)}{O(MeV)}$$

Experimento de Reines&Cowan a 1km!

Experimento de Lederman&co a 1000km!

Neutrinos de reactores también oscilan con la longitud de onda atmosférica

Double Chooz, Daya Bay, RENO



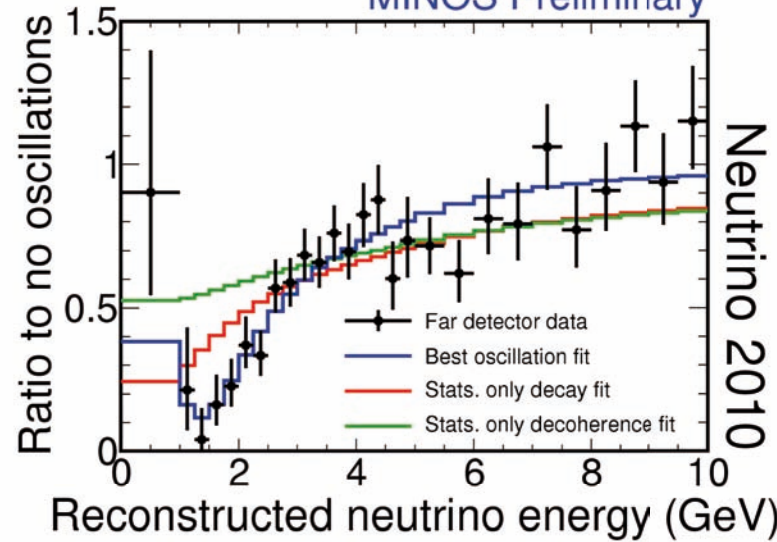
$$\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e$$

Neutrinos de accelerators también

Haces de neutrinos pulsados a distancias de 700 km

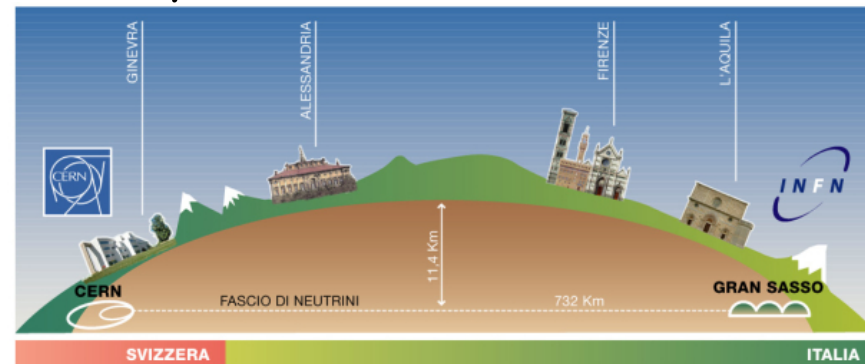
$$\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{\mu}$$

MINOS Preliminary

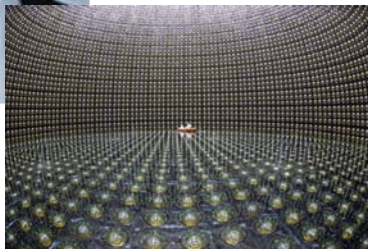
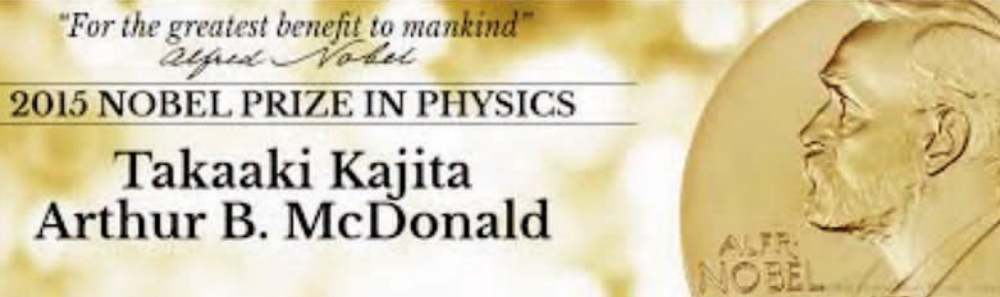


$$\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{\tau}$$

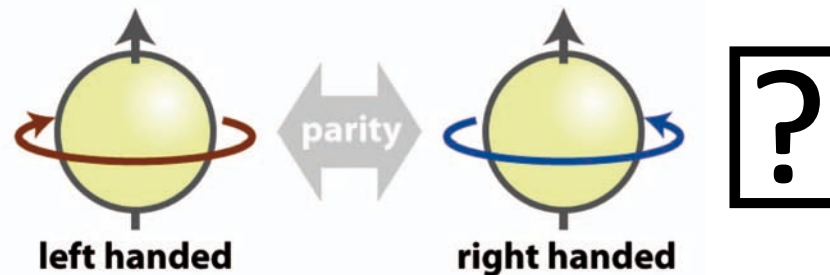
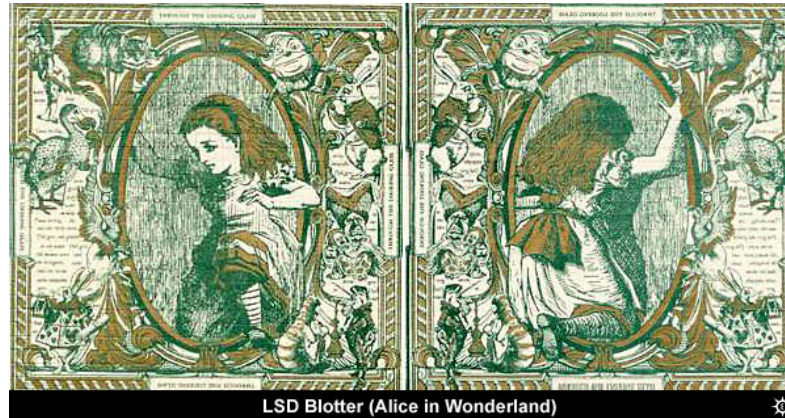
?????



“For the discovery of **neutrino oscillations**,
which shows that **neutrinos have mass**”



¿? Qué es un neutrino masivo en el espejo ?



Dirac

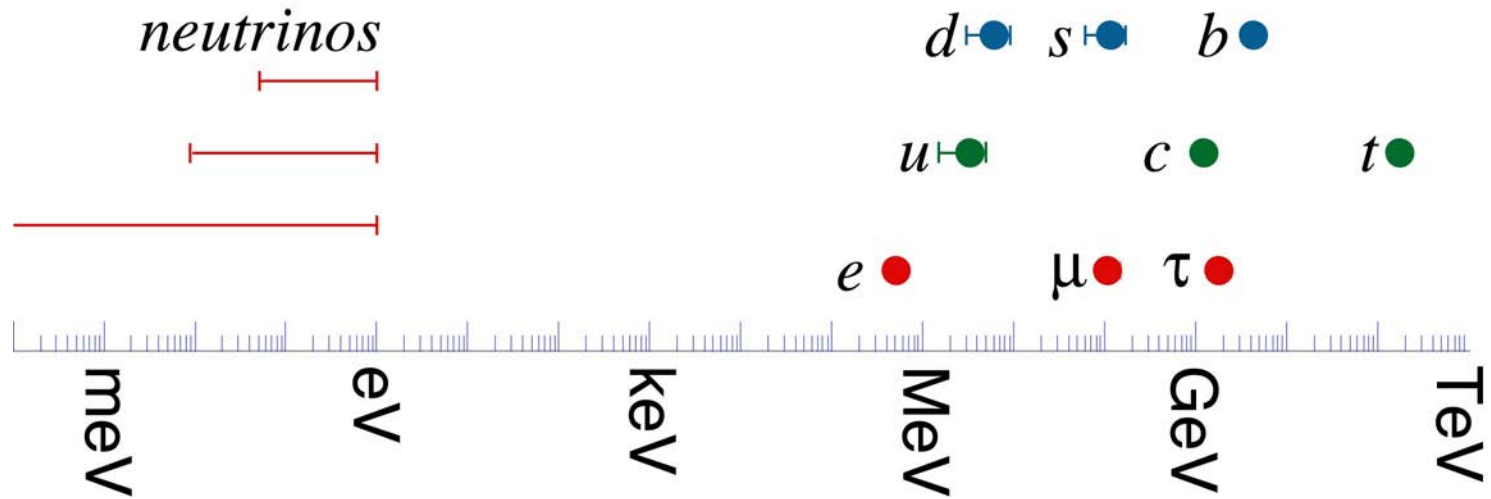
Otra partícula sin carga



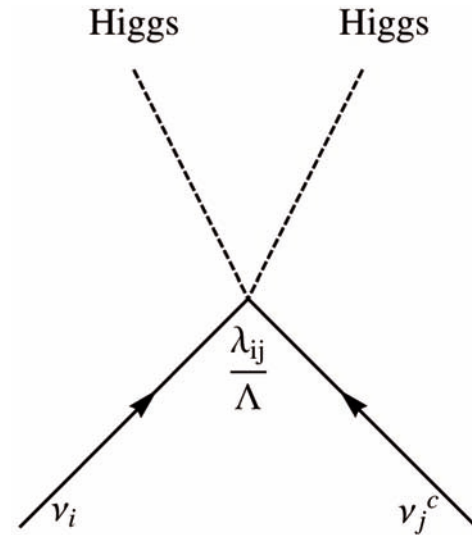
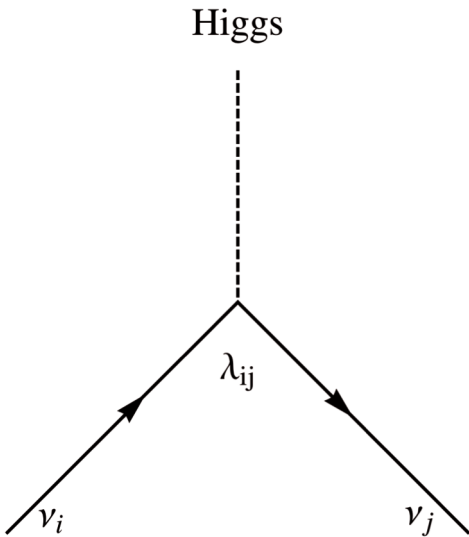
Majorana

Su propia antipartícula !

¿ Por qué los neutrinos son tan ligeros ?



Por qué los neutrinos son tan ligeros ?

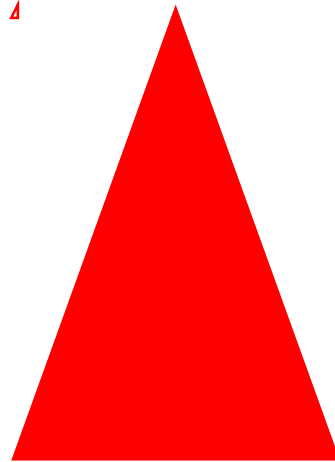


Mecanismo del balancín...

m_v

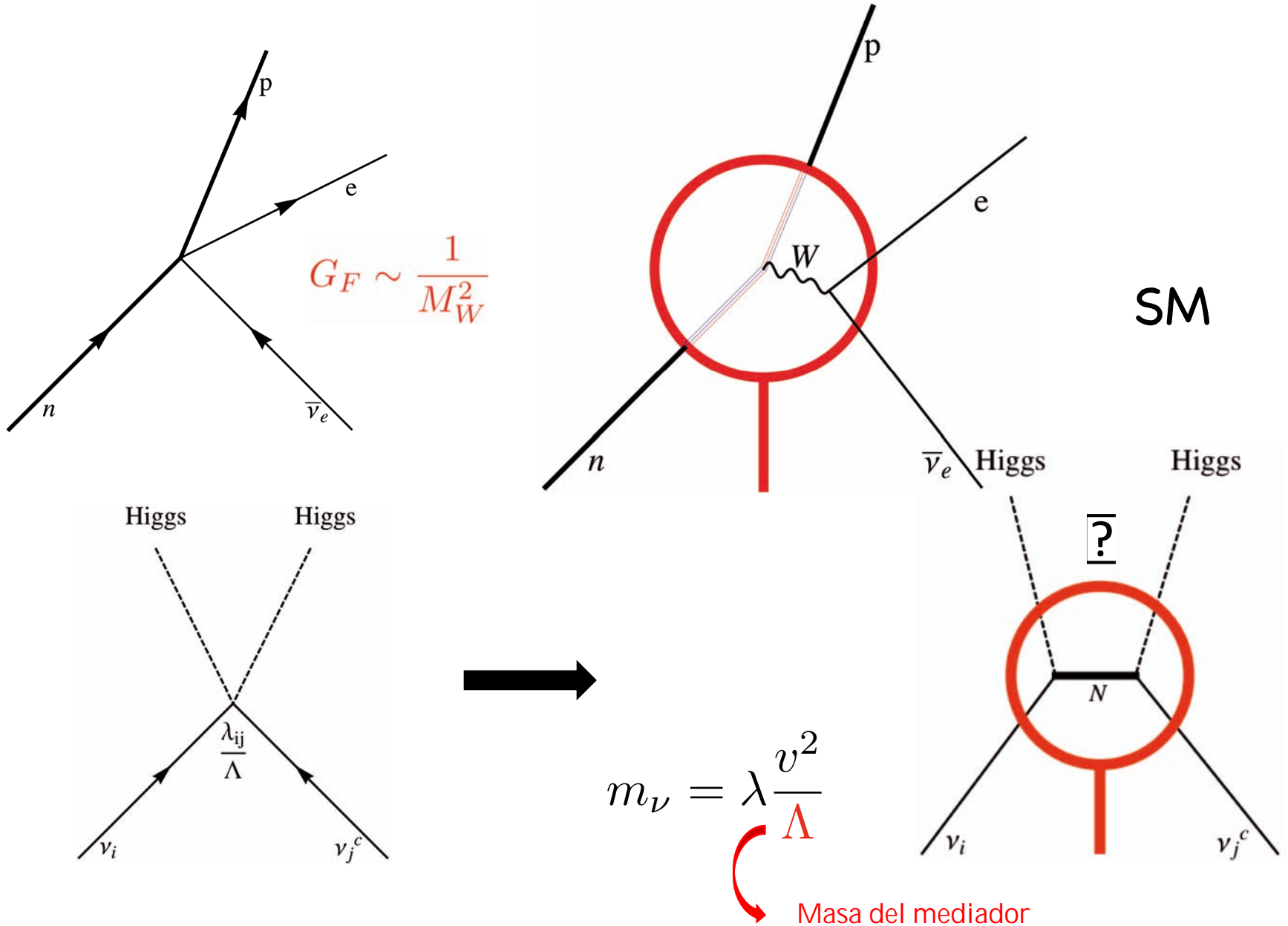
Δ

Λ

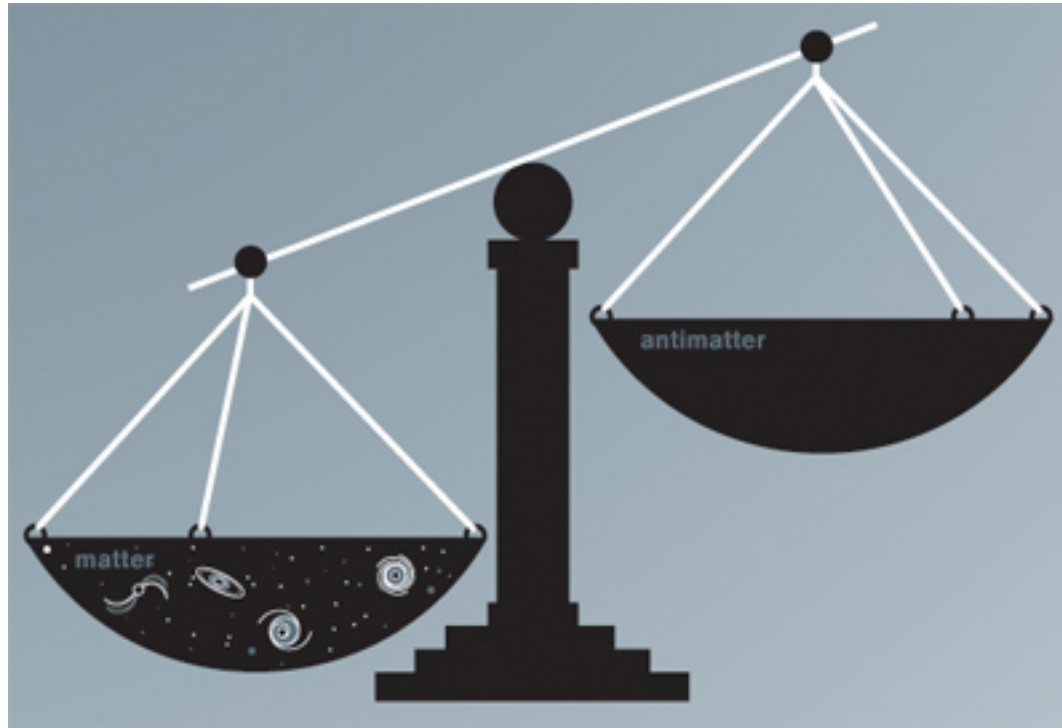


$$\frac{m_v}{m_e} \propto \frac{v}{\Lambda}$$

Neutrinos de Majorana -> nueva física

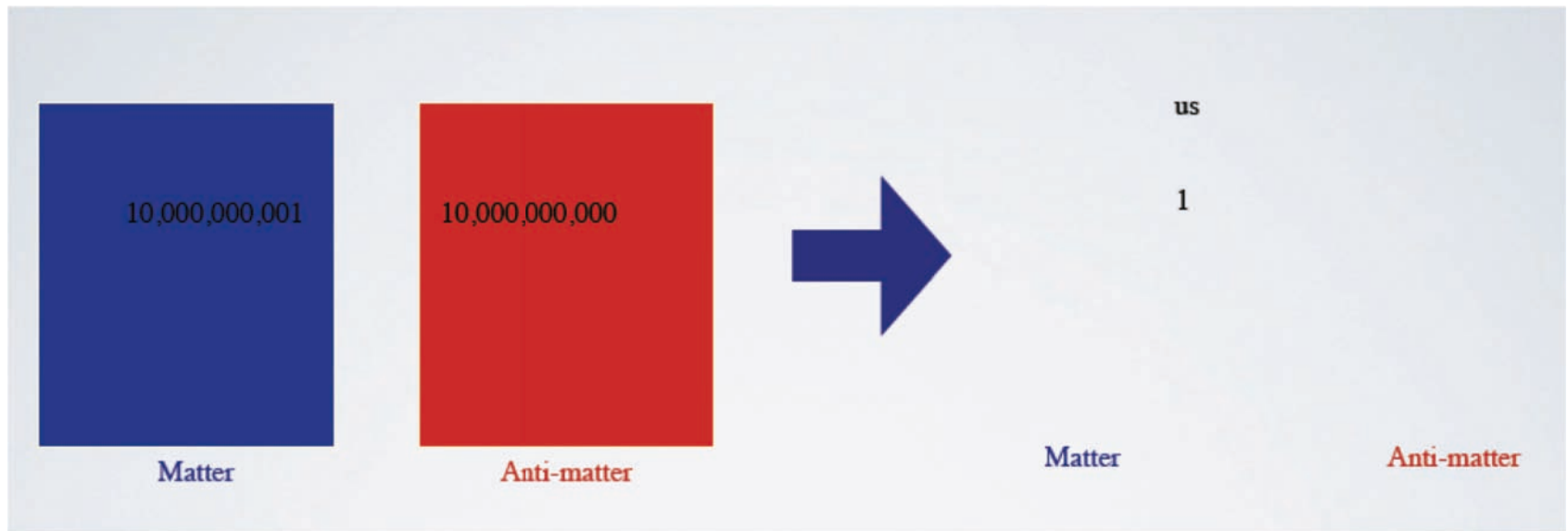


Por qué estamos aquí ? Por qué sólo hay materia en el Universo ?



La asimetría entre materia y antimateria

Cuando la temperatura en el Universo era de 10^{12} grados



Podría generarse dicha asimetría entre materia/antimateria dinámicamente ?

La génesis de los bariones: la receta

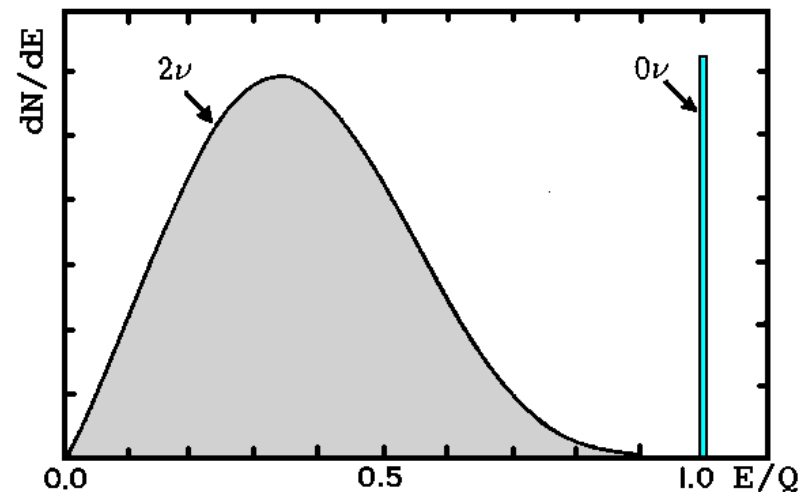
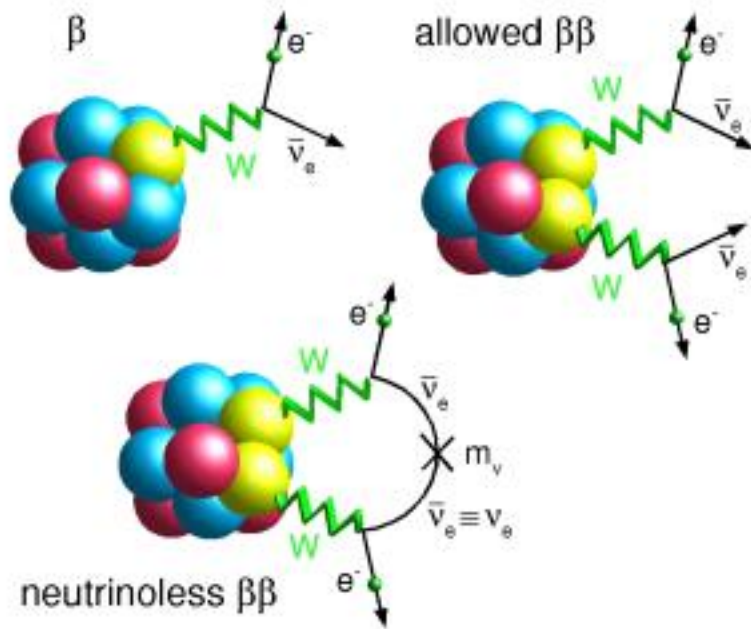


Un agente doble: **eg. neutrino de Majorana**

Sútil diferencia entre la dinámica en los dos mundos: **violación de CP**

Majorana y un nuevo tipo de radioactividad ?

Desintegración doble beta sin neutrinos



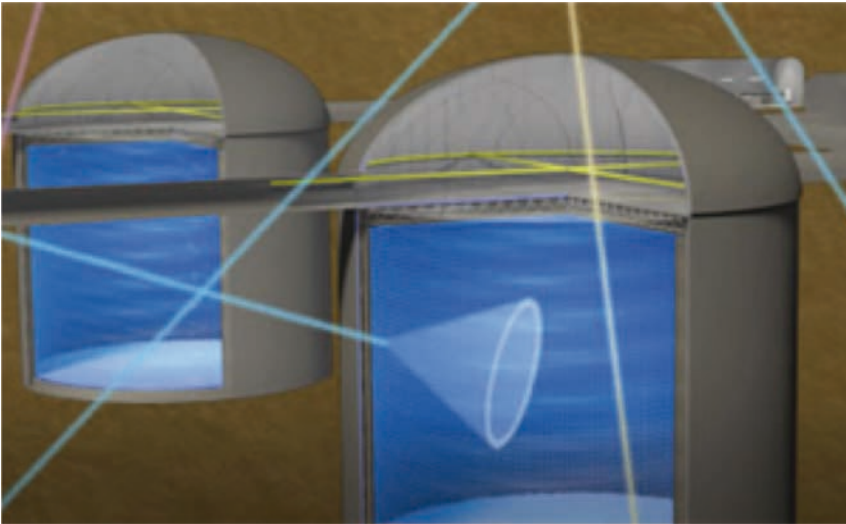
Un experimento bajo los pirineos (en el tunel de Canfranc) está intentado descubrir al agente doble...

El experimento NEXT@Canfranc



Violación de CP en oscilaciones de neutrinos: superbeams+superdetectores

Japan Hyper-Kamiokande: 230km

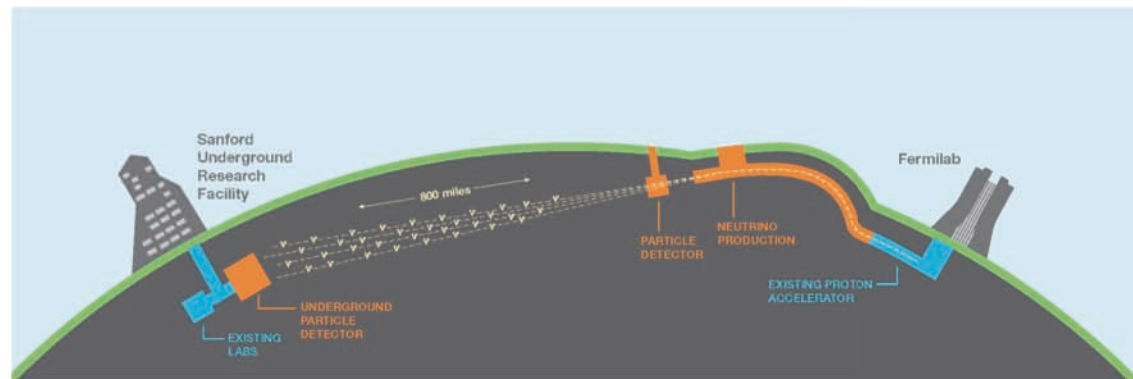


$$\nu_{\mu} \rightarrow \nu_e$$

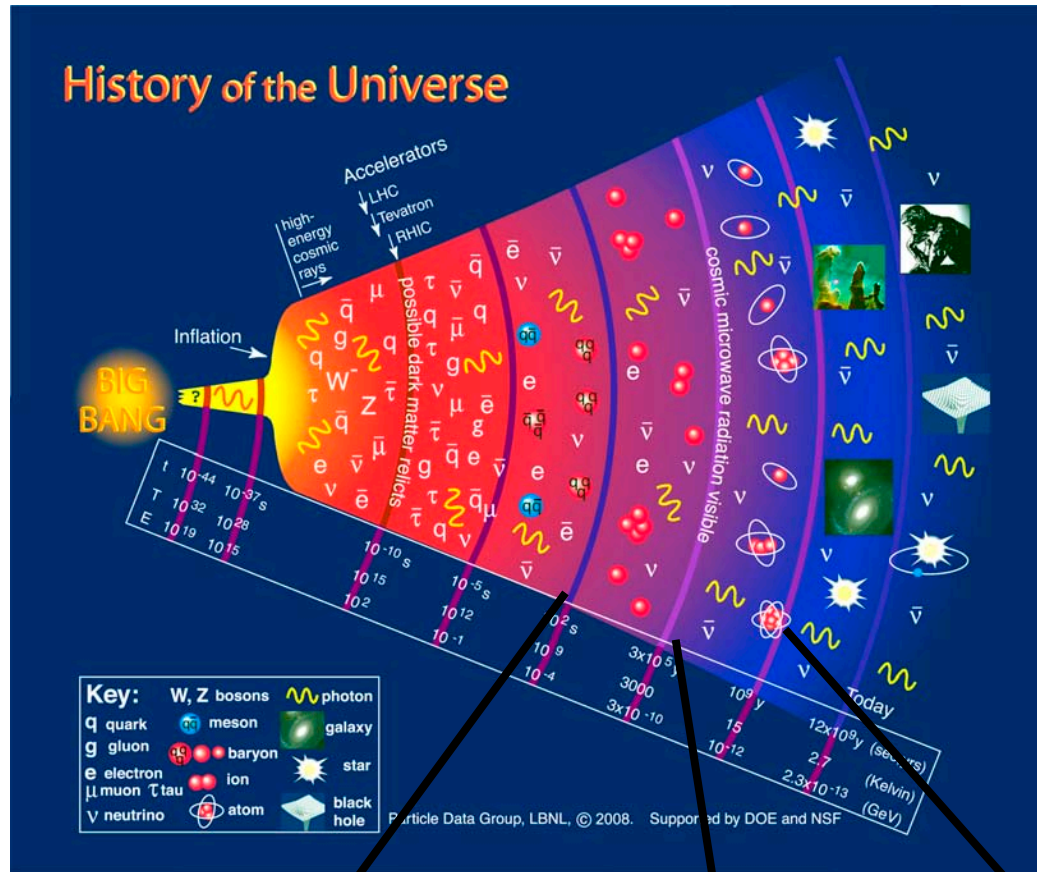
???

$$\bar{\nu}_{\mu} \rightarrow \bar{\nu}_e$$

USA DUNE: 1300km



Los neutrinos han dejado su impronta en la historia del Universo

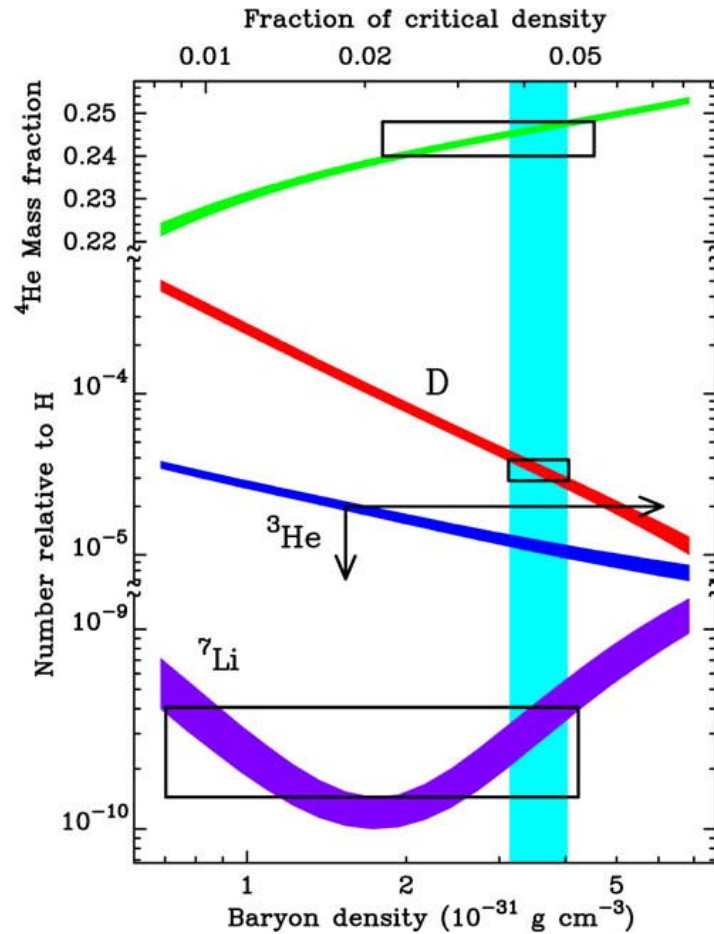


Síntesis de núcleos

La primera foto del Universo

Formación de galaxias

Los primeros 3' del Universo



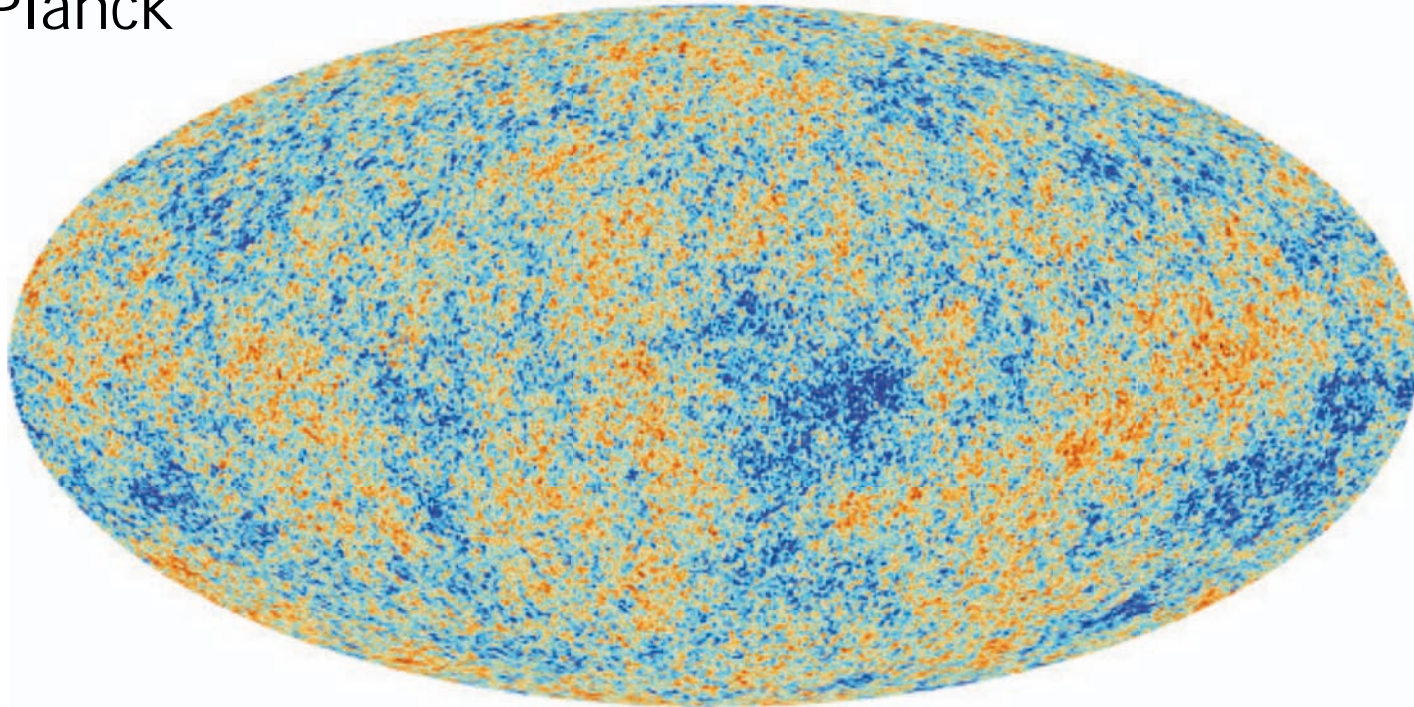
$T = 1000.000.000 \text{ K}$

La abundancia de los elementos ligeros (He, Li, etc) es muy sensible al número de neutrinos ligeros

La primera foto del Universo

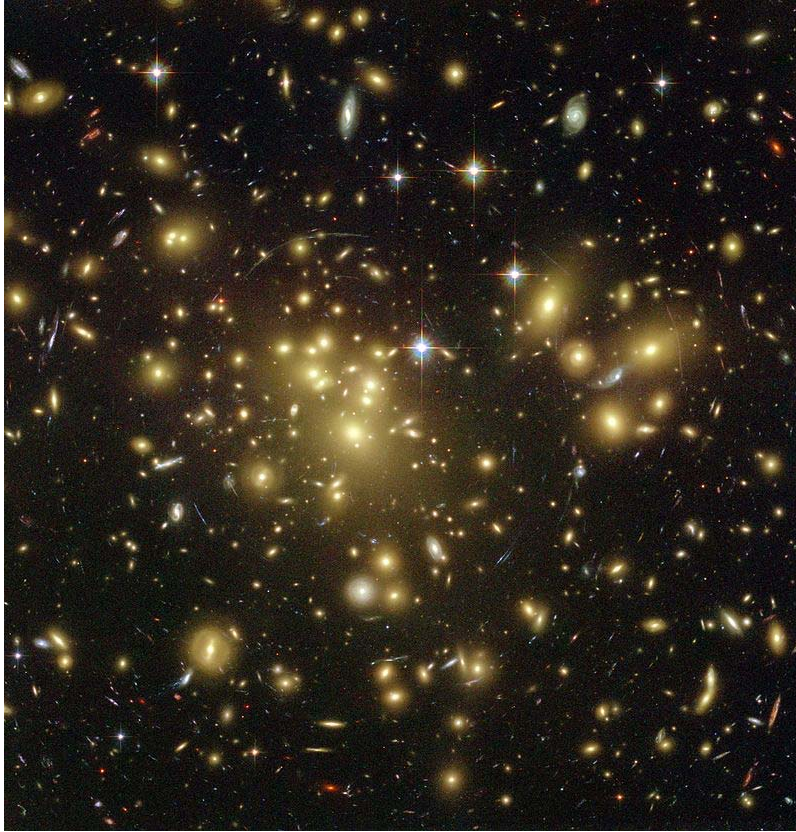
Ruido/olas en la radiación de microondas: es una foto de cuando el universo estaba a 3000K

Planck



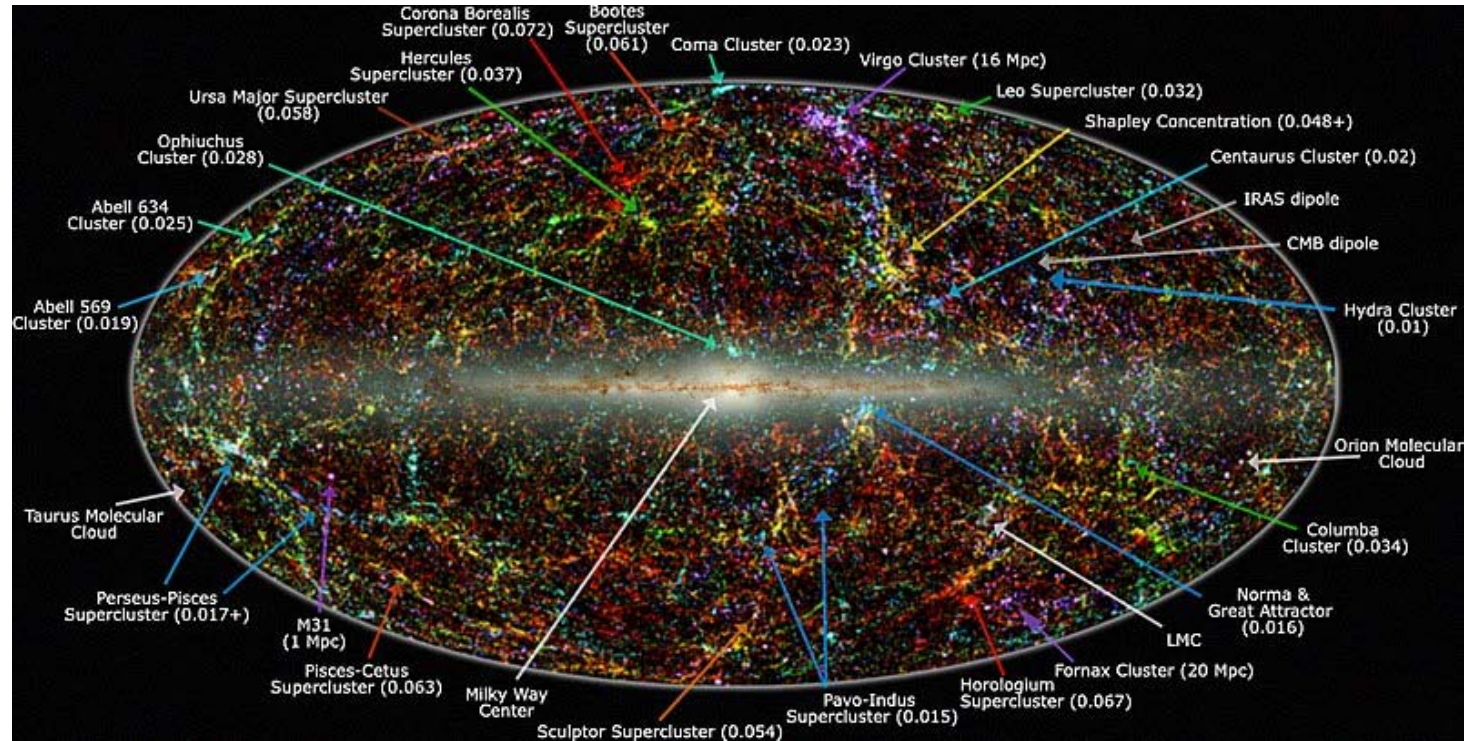
Cuantos protones/neutrones, cuantos neutrinos, cuanta materia total...
la materia ordinaria no es suficiente: **materia oscura**

Materia oscura



Distorsiona la luz que la cruza (lente gravitacional)

La estructura a gran escala

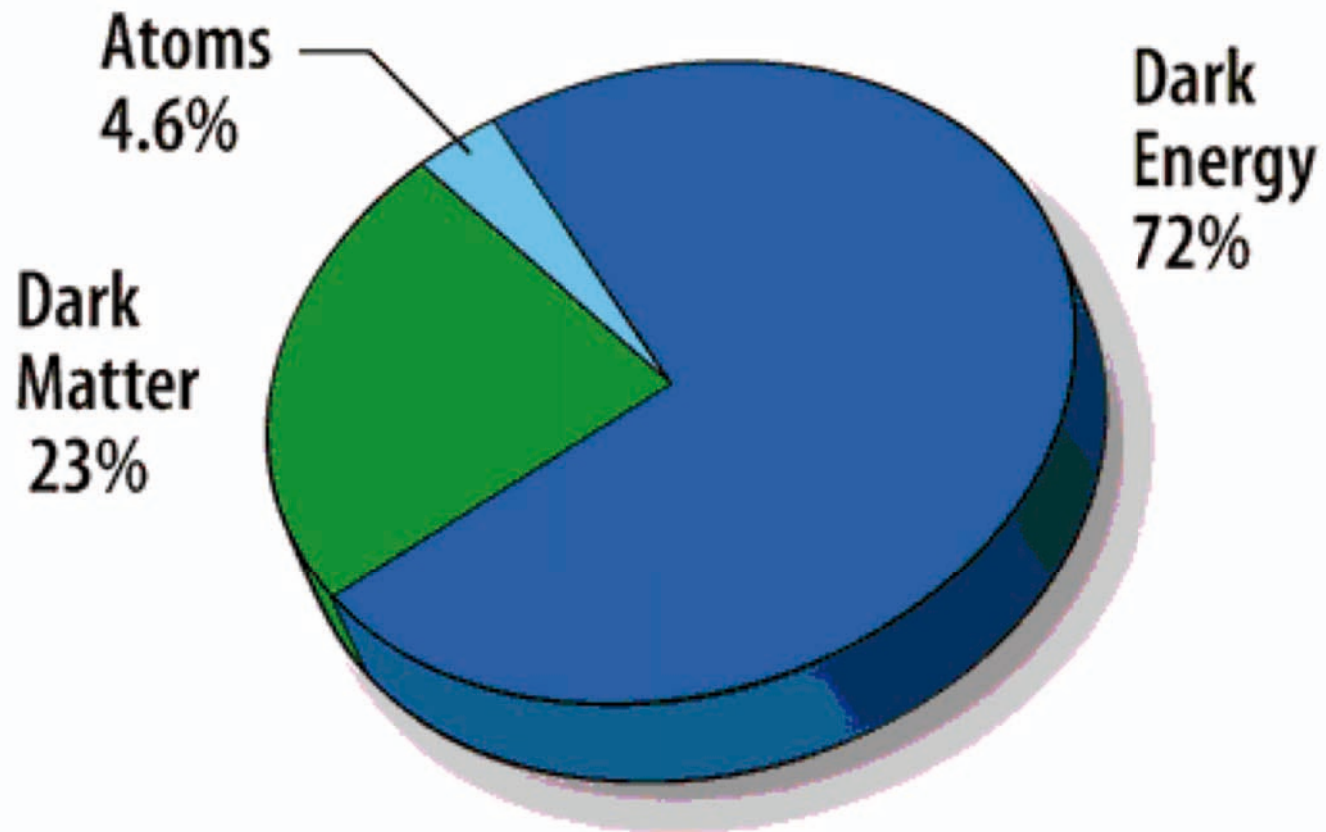


El ruido del universo primitivo acabó convirtiéndose en los cumulos de galaxias que vemos hoy (el universo está a 2.7K)

Y la expansión del Universo se está acelerando: **energía oscura**

El Universo invisible

No vemos el 95% de la energía del universo, pero no entendemos nada de lo que vemos !

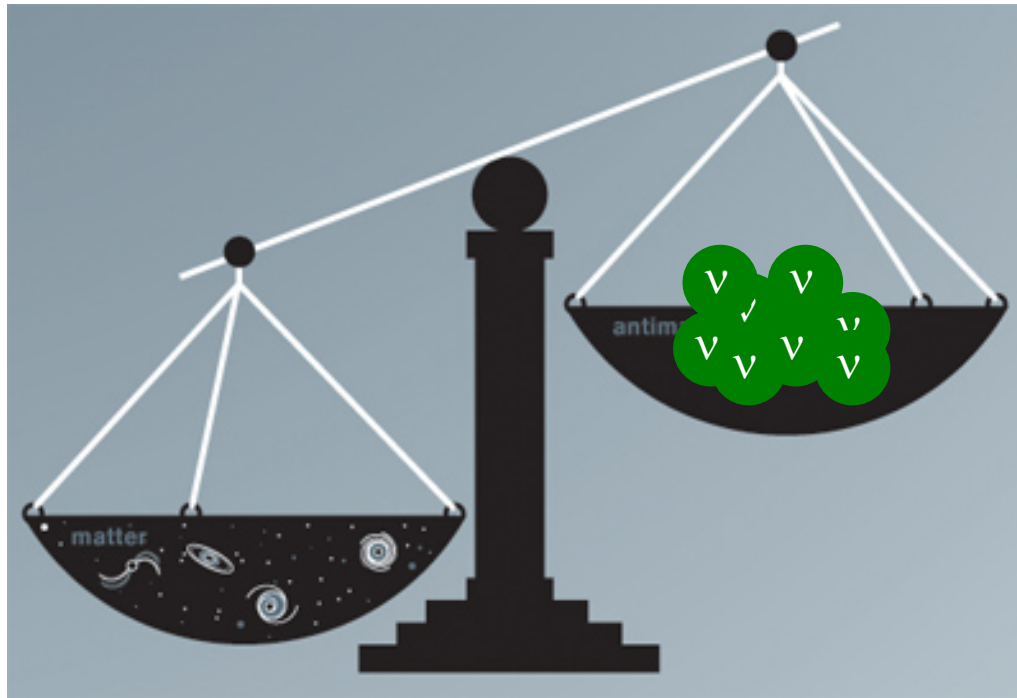


TODAY

La materia oscura podría ser una partícula nueva, aún por descubrir: ej. el mediador de las masas de los neutrinos ?

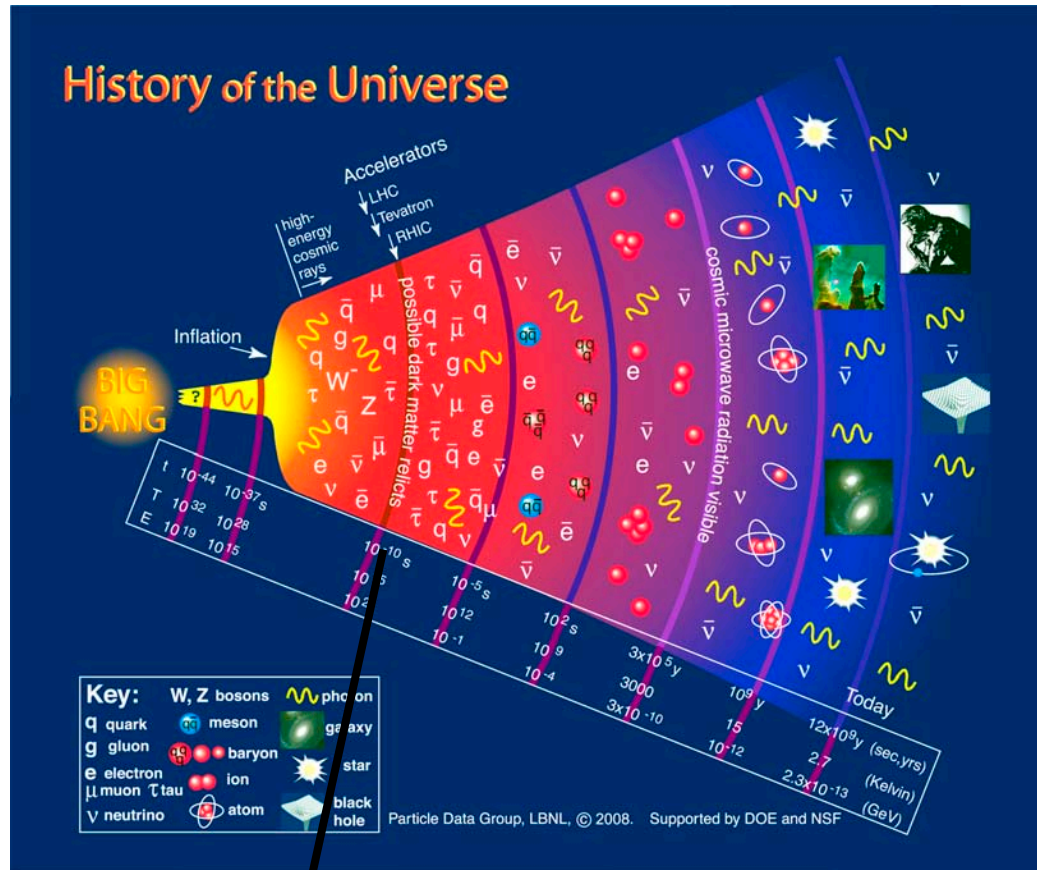
Absolute mass scale

Best constraints at present from cosmology



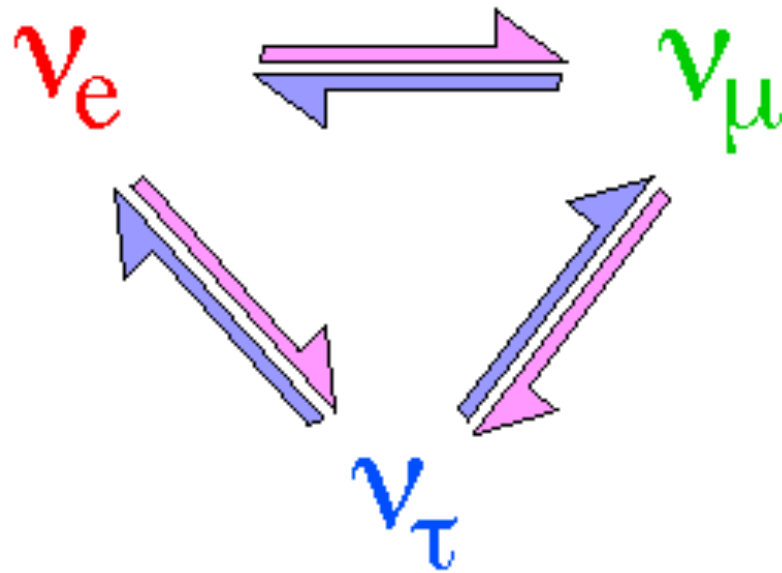
$$m_1 + m_2 + m_3 \leq 0.12 \text{ eV} \simeq 0.00000002 \times m_e$$

Deberes para el futuro...



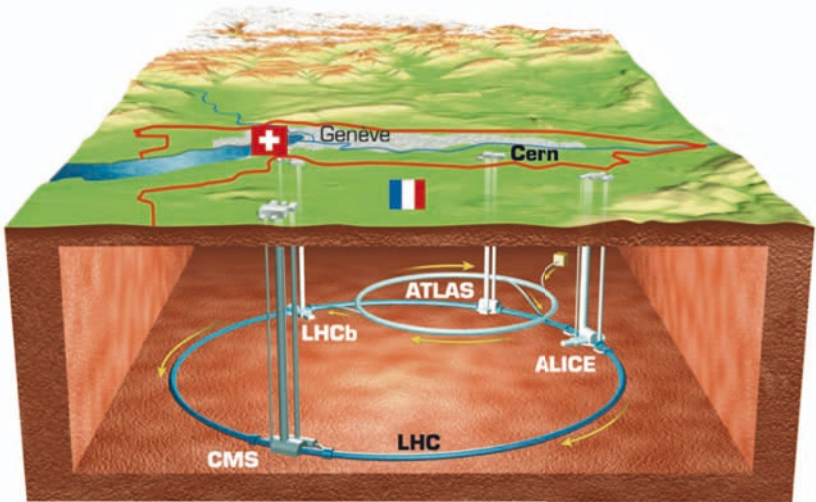
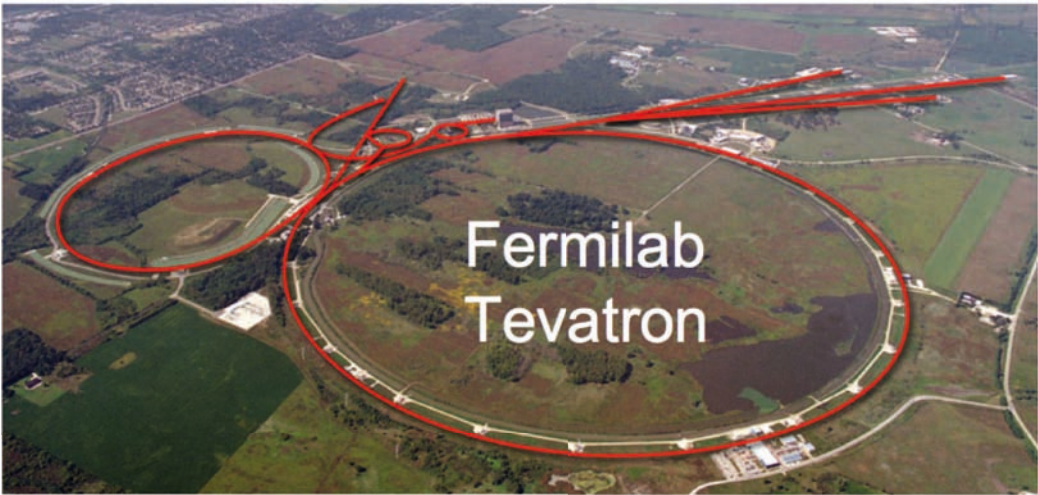
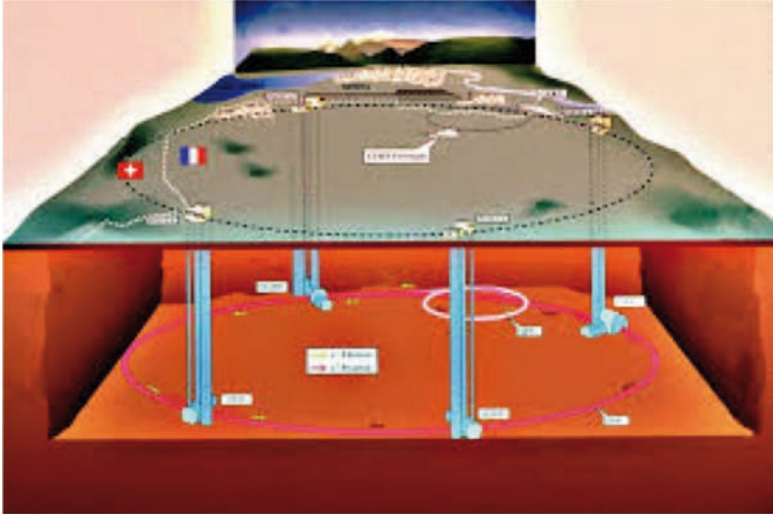
Si pudieramos medir los neutrinos cósmicos tendríamos una foto del universo mucho más primitivo

These elusive pieces of reality have brought many surprises, maybe they will continue with their tradition...



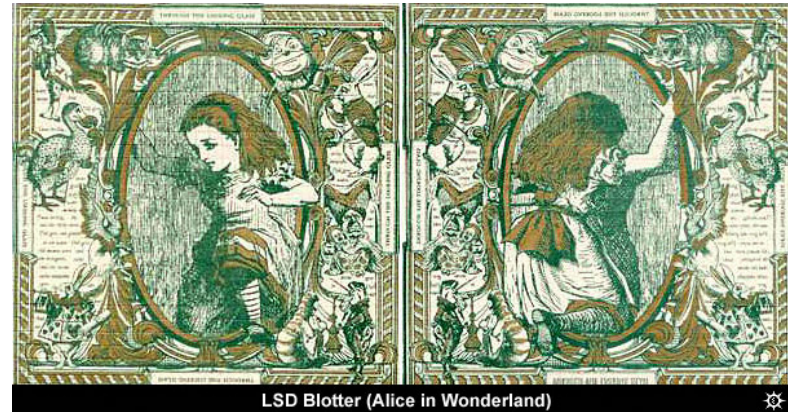
Era de los grandes colisionadores

????????



Dos características más intrigantes

asimetría de paridad



Un neutrino es algo diferente en un espejo!

repetición de estructuras: familias o sabores





Majorana (desaparecido 1938)

“Hay muchas categorías de científicos, gente de segunda o tercera fila, quienes hacen algo bueno, pero no van más allá. Hay también científicos de primera fila, quienes hacen grandiosos descubrimientos, fundamentales para el desarrollo de la ciencia. Pero después están los genios, como Galileo y Newton. Bueno, Ettore Majorana era uno de ellos.”

Fermi