



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE ECONOMÍA
Y COMPETITIVIDAD

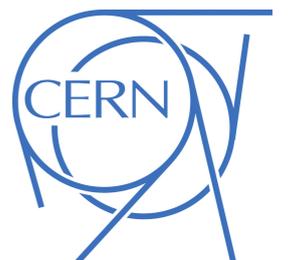
Ciemat

Centro de Investigaciones
Energéticas, Medioambientales
y Tecnológicas

Los neutrinos

Inés Gil Botella

Programa español para profesores
21-26 junio 2015



Contenido

1

2

3

4

5

Contenido

1

Los neutrinos en la Física de Partículas

- ▶ ¿De dónde vienen?
- ▶ ¿Qué tienen de especial?

2

3

4

5

Contenido

1

Los neutrinos en la Física de Partículas

▶ ¿De dónde vienen?

▶ ¿Qué tienen de especial?

2

¿Qué pinta tienen los neutrinos? ¿Cómo podemos detectarlos?

3

4

5

Contenido

1

Los neutrinos en la Física de Partículas

- ▶ ¿De dónde vienen?
- ▶ ¿Qué tienen de especial?

2

¿Qué pinta tienen los neutrinos? ¿Cómo podemos detectarlos?

3

¿Qué magnitudes físicas asociadas a los neutrinos podemos medir?

4

5

Contenido

1

Los neutrinos en la Física de Partículas

- ▶ ¿De dónde vienen?
- ▶ ¿Qué tienen de especial?

2

¿Qué pinta tienen los neutrinos? ¿Cómo podemos detectarlos?

3

¿Qué magnitudes físicas asociadas a los neutrinos podemos medir?

4

Grandes interrogantes por resolver

5

Contenido

1

Los neutrinos en la Física de Partículas

▶ ¿De dónde vienen?

▶ ¿Qué tienen de especial?

2

¿Qué pinta tienen los neutrinos? ¿Cómo podemos detectarlos?

3

¿Qué magnitudes físicas asociadas a los neutrinos podemos medir?

4

Grandes interrogantes por resolver

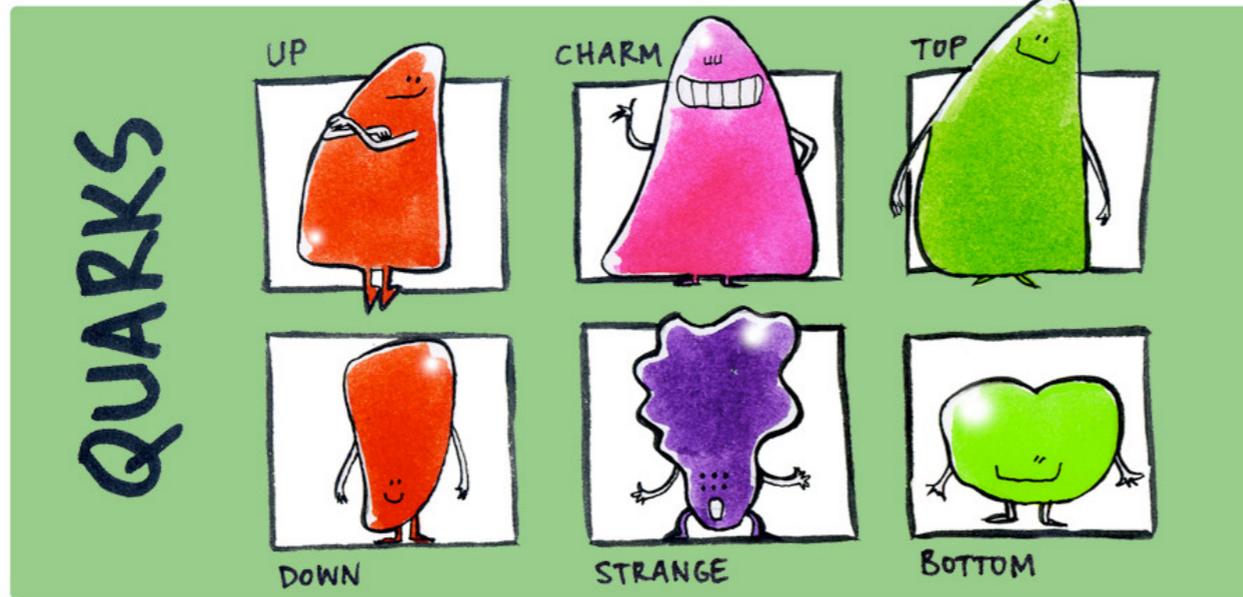
5

Los mensajeros del Cosmos

Bibliografía

- K. Zuber, “Neutrino Physics”, 2nd Edition, Series in High Energy Physics, Cosmology and Gravitation, CRC Press, 2010, ISBN: 9781420064711
- C. Giunti & C. W. Kim, “Fundamentals of Neutrino Physics and Astrophysics”, Oxford University Press, 2007, ISBN:9780198508717
- F. Suekane, “Neutrino oscillations”, Springer Japan 2015, ISBN: 9784431554622
- J. Lesgourgues, G. Mangano, G. Miele & S. Pastor, “Neutrino cosmology”, Cambridge University Press, 2013, ISBN: 9781139012874
- **En español:** S. Pastor, “Los neutrinos”, Ed. CSIC y Catarata, 2014, ISBN: 9788400098636

FERMIONES



Los neutrinos en la Física de Partículas

Modelo Estándar de Partículas

Modelo Estándar de Partículas

Particles

Leptons

Tau		Electric Charge -1	Tau Neutrino		Electric Charge 0
Muon		-1	Muon Neutrino		0
Electron		-1	Electron Neutrino		0

Quarks

Bottom		Electric Charge -1/3	Top		Electric Charge 2/3
Strange		-1/3	Charm		2/3
Down		-1/3	Up		2/3

each quark: ●R, ●B, ●G 3 colors

The particle drawings are simple artistic representations

Modelo Estándar de Partículas

Particles

Leptons

	Electric Charge		Electric Charge
Tau	-1	Tau Neutrino	0
Muon	-1	Muon Neutrino	0
Electron	-1	Electron Neutrino	0

Quarks

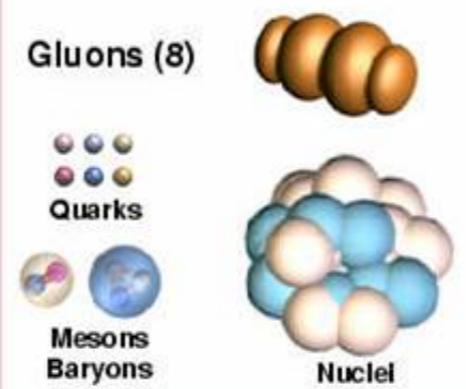
	Electric Charge		Electric Charge
Bottom	-1/3	Top	2/3
Strange	-1/3	Charm	2/3
Down	-1/3	Up	2/3

each quark: ●R, ●B, ●G 3 colors

Forces

Strong

Glueons (8)



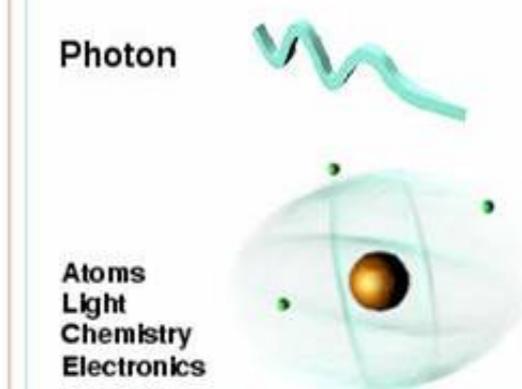
Quarks

Mesons Baryons

Nuclei

Electromagnetic

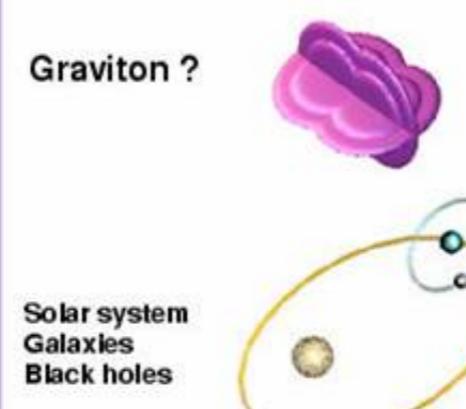
Photon



Atoms
Light
Chemistry
Electronics

Gravitational

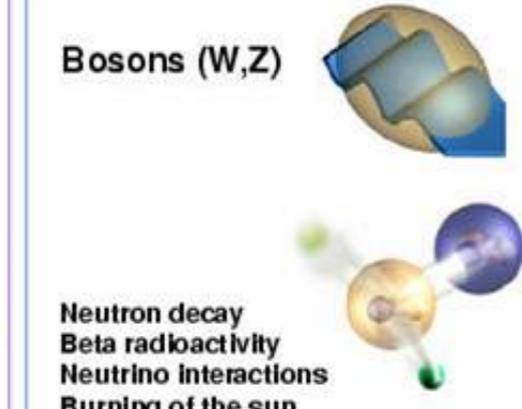
Graviton ?



Solar system
Galaxies
Black holes

Weak

Bosons (W,Z)



Neutron decay
Beta radioactivity
Neutrino Interactions
Burning of the sun

The particle drawings are simple artistic representations

Modelo Estándar de Partículas

Particles

Leptons

	Electric Charge		Electric Charge
Tau	-1	Tau Neutrino	0
Muon	-1	Muon Neutrino	0
Electron	-1	Electron Neutrino	0

Quarks

	Electric Charge		Electric Charge
Bottom	-1/3	Top	2/3
Strange	-1/3	Charm	2/3
Down	-1/3	Up	2/3

each quark: ●R, ●B, ●G 3 colors

Forces

Strong

Gluons (8)

Quarks

Mesons Baryons

Nuclei

Electromagnetic

Photon

Atoms
Light
Chemistry
Electronics

Gravitational

Graviton ?

Solar system
Galaxies
Black holes

Weak

Bosons (W,Z)

Neutron decay
Beta radioactivity
Neutrino Interactions
Burning of the sun

The particle drawings are simple artistic representations

Modelo Estándar de Partículas

Particles

Leptons

	Electric Charge		Electric Charge
Tau	-1	Tau Neutrino	0
Muon	-1	Muon Neutrino	0
Electron	-1	Electron Neutrino	0

Quarks

	Electric Charge		Electric Charge
Bottom	-1/3	Top	2/3
Strange	-1/3	Charm	2/3
Down	-1/3	Up	2/3

each quark: ●R, ●B, ●G 3 colors

Forces

Strong

Gluons (8)

Quarks

Mesons Baryons

Nuclei

Electromagnetic

Photon

Atoms Light Chemistry Electronics

Gravitational

Graviton ?

Solar system Galaxies Black holes

Weak

Bosons (W,Z)

Neutron decay Beta radioactivity Neutrino interactions Burning of the sun

The particle drawings are simple artistic representations

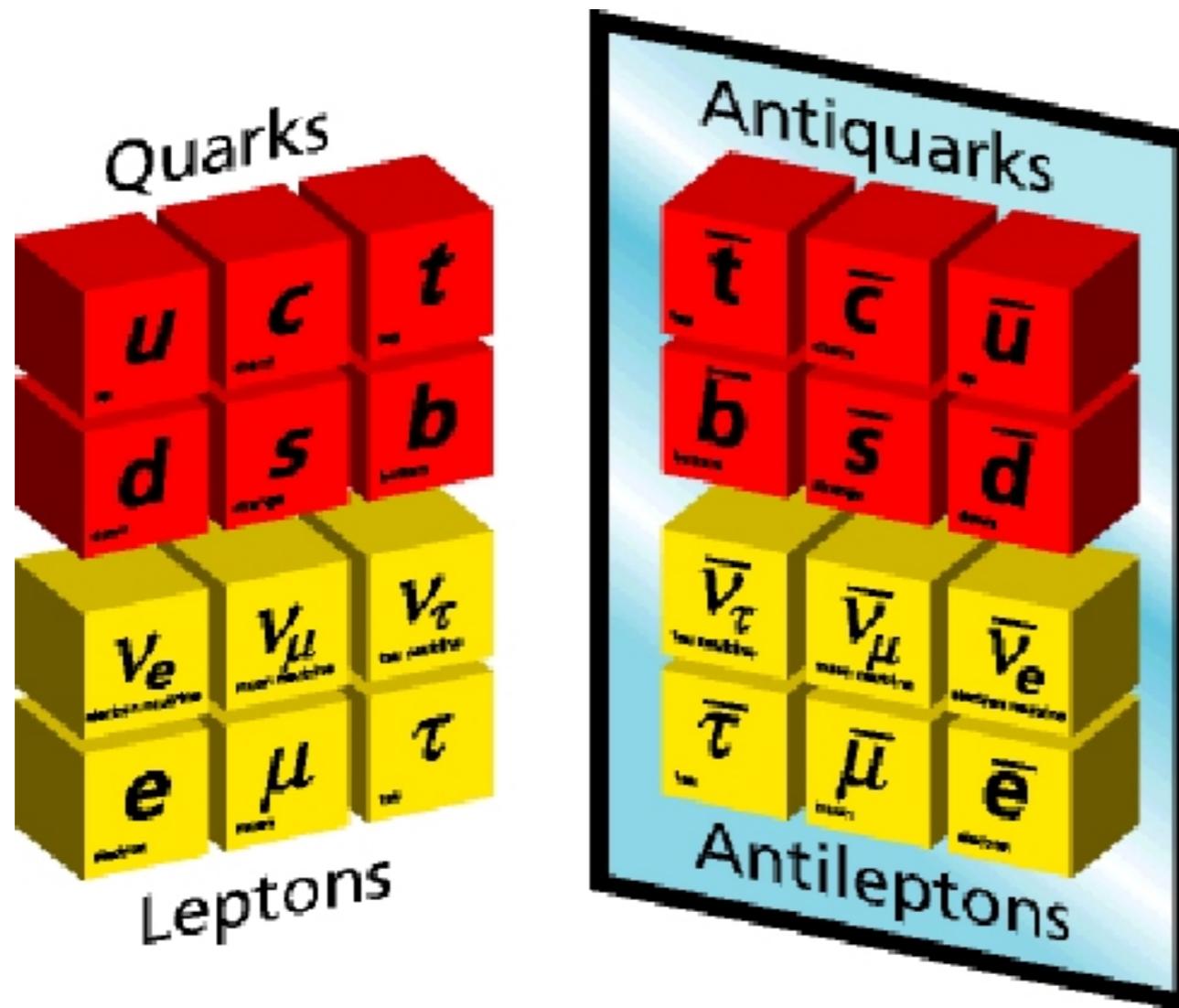
Modelo Estándar

Las tres generacioness de la
Materia (Fermiones)

	I	II	III	
masa →	3 MeV	1.24 GeV	172.5 GeV	0
carga →	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
spin →	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
nombre →	u up	c charm	t top	γ photon
Quarks	6 MeV	95 MeV	4.2 GeV	0
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	d down	s strange	b bottom	g gluon
neutrinos	<2 eV	<0.19 MeV	<18.2 MeV	90.2 GeV
	0	0	0	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	Z⁰ fuerza débil
Leptones	0.511 MeV	106 MeV	1.78 GeV	80.4 GeV
	-1	-1	-1	±1
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	e electron	μ muon	τ tau	W[±] fuerza débil
				Bosons (Fuerzas)

- **3 tipos** de neutrinos (aunque quizá haya un cuarto fuera del SM)
- Son eléctricamente **neutros**
- Mucho más **ligeros** que sus compañeros con carga eléctrica
- **Interaccionan muy débilmente** con la materia

Antipartículas

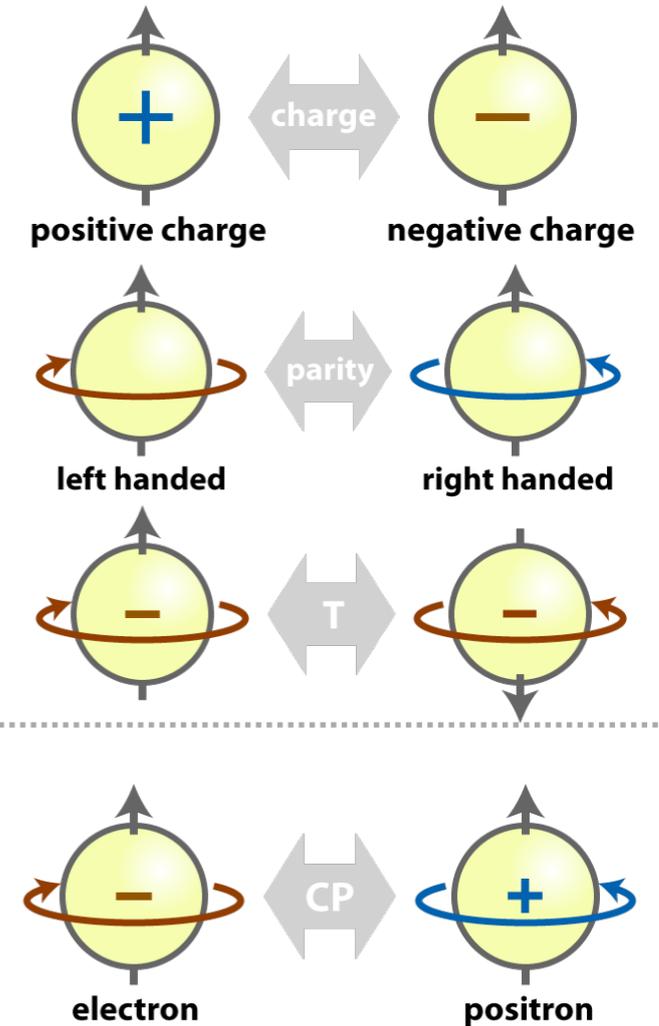


- Por cada partícula, existe una **antipartícula con la misma masa** pero **carga opuesta**
- Las antipartículas se producen en procesos naturales (como las desintegraciones radioactivas) y en aceleradores de partículas
- **Los neutrinos podrían ser sus propias antipartículas**
- El Big Bang creó igual número de partículas que de antipartículas
 - ¿Dónde han ido a parar las antipartículas?
 - ¿Por qué estamos hechos de materia?

- ▶ Neutrinos tipo **Dirac**: **partícula \neq antipartícula**
- ▶ Neutrinos tipo **Majorana**: **partícula = antipartícula**

Simetrías

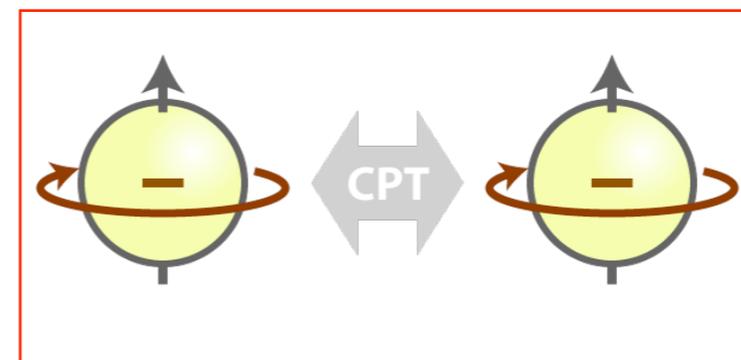
- **Conjugación de carga (C)**: transforma una partícula en su antipartícula
- **Paridad (P)**: transforma izquierda en derecha
- **Inversión temporal (T)**: se invierte el sentido del tiempo



- **Simetría CP**: Se pensaba que CP se conservaba pero se descubrió experimentalmente que **se viola** en desintegraciones de kaones

- ¿Podría violarse también en el caso de los neutrinos?

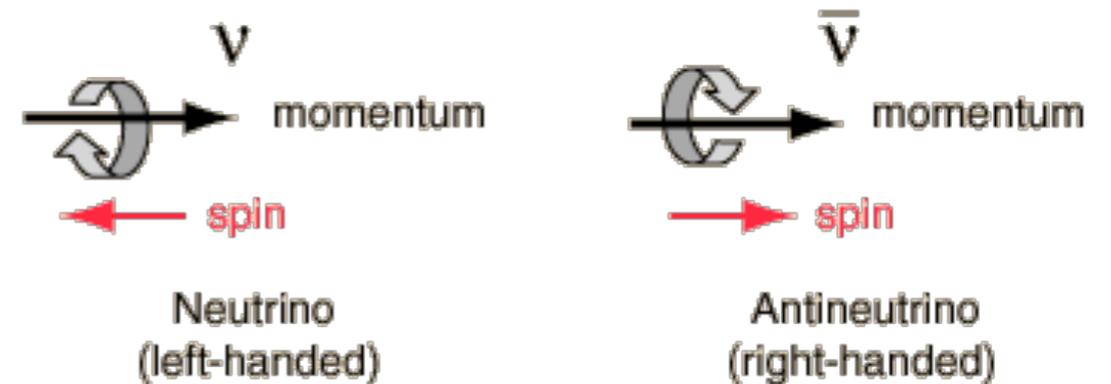
- **Simetría CPT**: se conserva en las transformaciones del MS



Neutrinos levógiros

- En el Modelo Estándar, los compañeros dextrógiros de los neutrinos (ν_R) **no existen**

- ▶ Los neutrinos son levógiros (ν_L)
- ▶ Los antineutrinos son dextrógiros ($\bar{\nu}_R$)



Three Generations of Matter (Fermions) spin 1/2

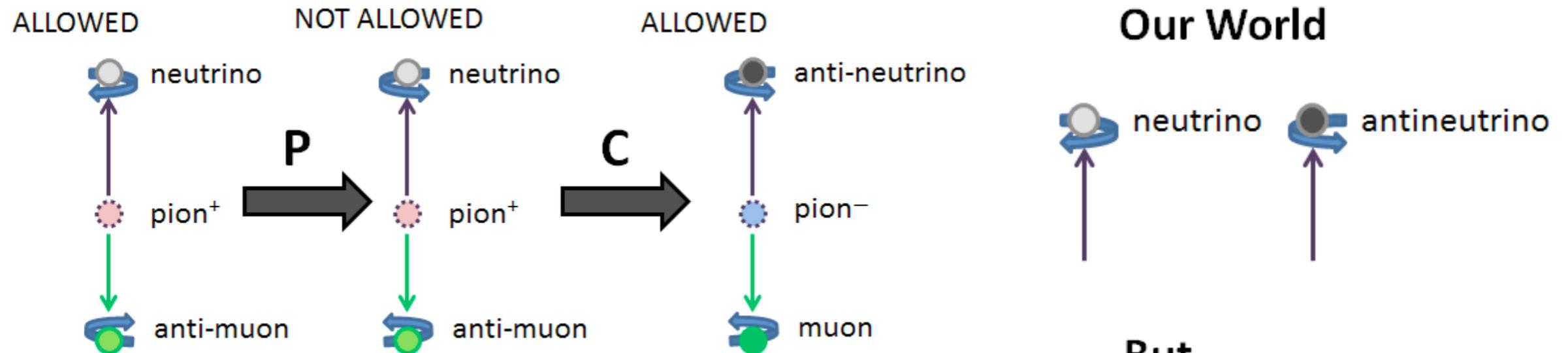
	I	II	III		
mass →	2.4 MeV	1.27 GeV	171.2 GeV	0	0
charge →	2/3	2/3	2/3	0	0
name →	u up	c charm	t top	g gluon	γ photon
	Left Right	Left Right	Left Right	0	0
	d down	s strange	b bottom	Z weak force	H Higgs boson
Quarks	Left Right	Left Right	Left Right	91.2 GeV	>114 GeV
	0 eV	0 eV	0 eV	0	0
	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	W[±] weak force	spin 0
	Left Right	Left Right	Left Right	80.4 GeV	
	0	0	0	±1	
Leptons	e electron	μ muon	τ tau		
	Left Right	Left Right	Left Right		
	0.511 MeV	105.7 MeV	1.777 GeV		
	-1	-1	-1		

M(H) ≈ 126 GeV

Los neutrinos tienen helicidad negativa

Helicidad: Dirección del espín respecto a la del momento espacial

Simetría CP en neutrinos



M. Strassler 2013

- En las interacciones débiles:
 - ▶ La simetría P no se conserva
 - ▶ La simetría C no se conserva
 - ▶ La simetría CP parece conservarse

- Puede que los ν_R y $\bar{\nu}_L$ no existan
- Puede que existan pero con masas mucho mayores
- Puede que no les afecte la fuerza nuclear débil

Interacción débil

- **Magnitud:**

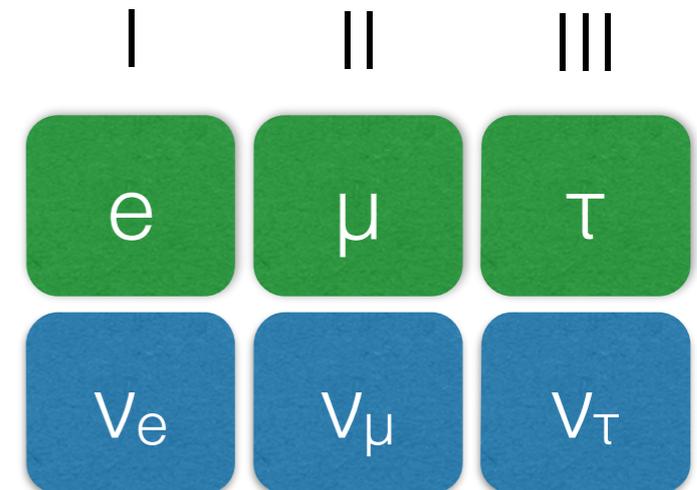
- Neutrinos producidos por el Sol (son de baja energía \sim MeV) y recorrerían (en media) **1.5×10^{16} m en hierro** antes de interactuar
- Neutrinos producidos en aceleradores (\sim 1000 veces más energéticos \sim GeV) recorrerían (en media) **1.5×10^{12} m en hierro** antes de interactuar

I	II	III
e	μ	τ
ν_e	ν_μ	ν_τ

Interacción débil

- **Magnitud:**

- Neutrinos producidos por el Sol (son de baja energía \sim MeV) y recorrerían (en media) **1.5×10^{16} m en hierro** antes de interactuar
- Neutrinos producidos en aceleradores (\sim 1000 veces más energéticos \sim GeV) recorrerían (en media) **1.5×10^{12} m en hierro** antes de interactuar

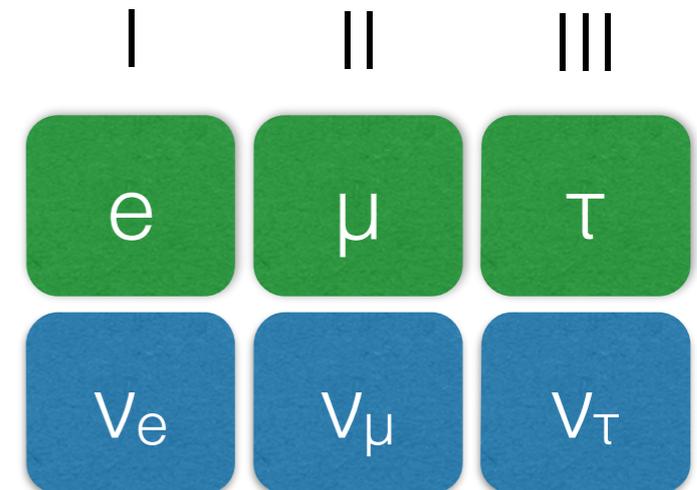


- Cuando un neutrino se produce o desaparece, siempre lo hace ***acompañado de alguien de “su propia familia”*** (electrón, muón o tau)

Interacción débil

- **Magnitud:**

- Neutrinos producidos por el Sol (son de baja energía \sim MeV) y recorrerían (en media) **1.5×10^{16} m en hierro** antes de interaccionar
- Neutrinos producidos en aceleradores (\sim 1000 veces más energéticos \sim GeV) recorrerían (en media) **1.5×10^{12} m en hierro** antes de interaccionar

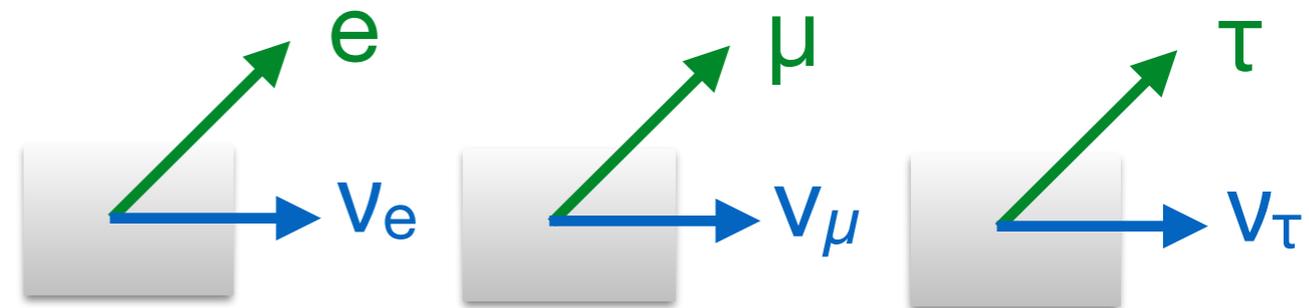
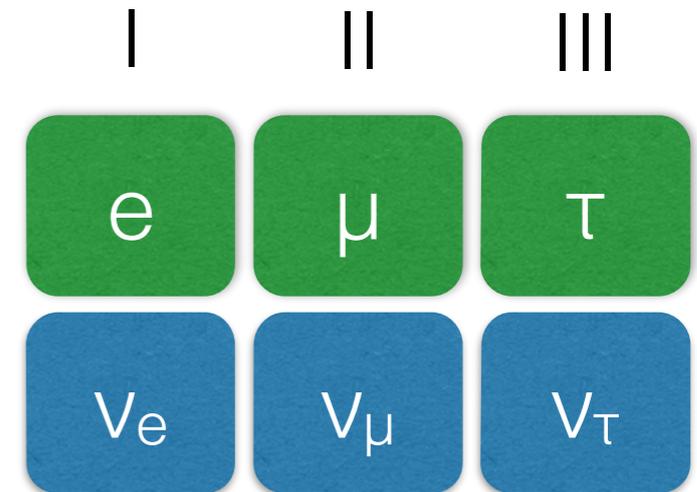


- Cuando un neutrino se produce o desaparece, siempre lo hace **acompañado de alguien de “su propia familia”** (electrón, muón o tau)
- Identificando la partícula cargada que lo acompaña, podemos saber de qué tipo es

Interacción débil

- **Magnitud:**

- Neutrinos producidos por el Sol (son de baja energía \sim MeV) y recorrerían (en media) **1.5×10^{16} m en hierro** antes de interactuar
- Neutrinos producidos en aceleradores (\sim 1000 veces más energéticos \sim GeV) recorrerían (en media) **1.5×10^{12} m en hierro** antes de interactuar



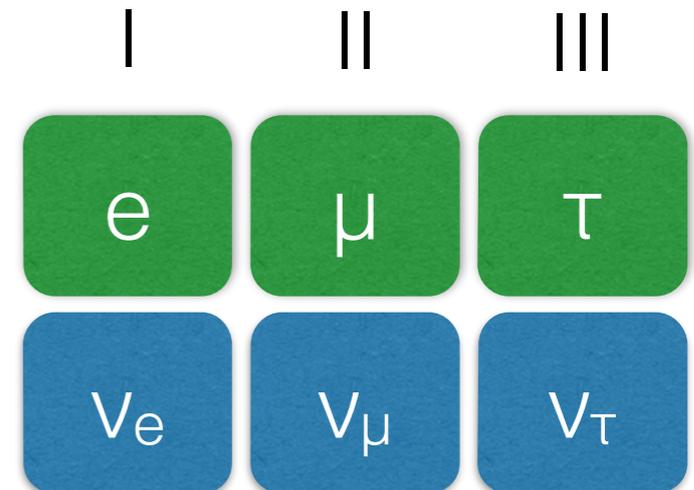
Creación del neutrino

- Cuando un neutrino se produce o desaparece, siempre lo hace **acompañado de alguien de “su propia familia”** (electrón, muón o tau)
- Identificando la partícula cargada que lo acompaña, podemos saber de qué tipo es

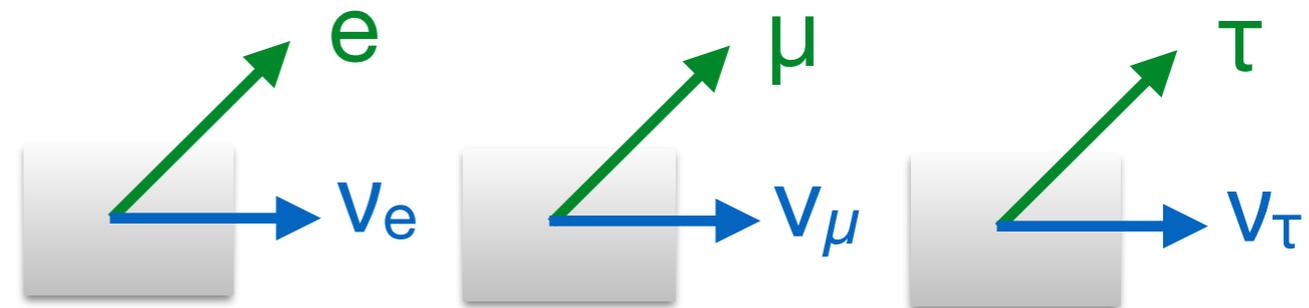
Interacción débil

- **Magnitud:**

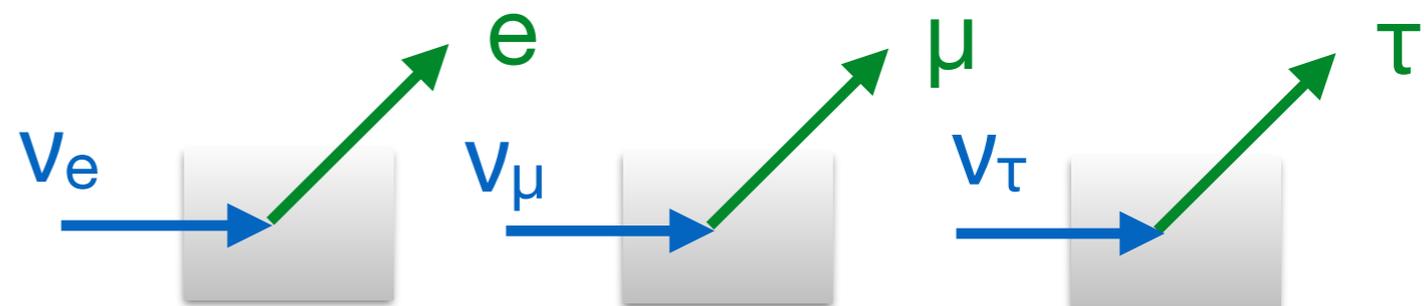
- Neutrinos producidos por el Sol (son de baja energía \sim MeV) y recorrerían (en media) **1.5×10^{16} m en hierro** antes de interactuar
- Neutrinos producidos en aceleradores (\sim 1000 veces más energéticos \sim GeV) recorrerían (en media) **1.5×10^{12} m en hierro** antes de interactuar



- Cuando un neutrino se produce o desaparece, siempre lo hace **acompañado de alguien de “su propia familia”** (electrón, muón o tau)
- Identificando la partícula cargada que lo acompaña, podemos saber de qué tipo es



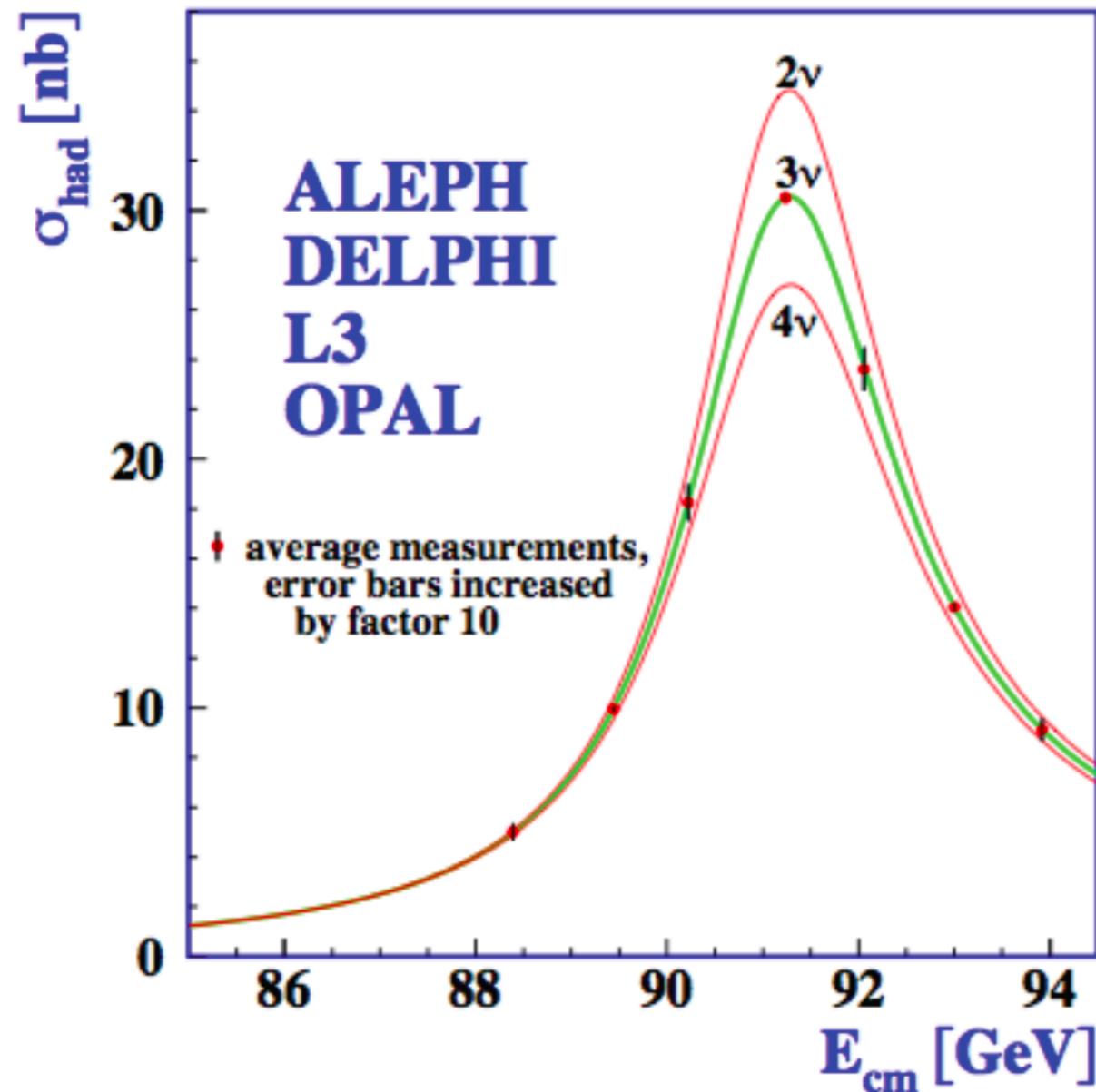
Creación del neutrino



Desaparición del neutrino

Número de neutrinos

- Hay **3 tipos de neutrinos (familias)** en el SM



$$\Gamma_{\text{inv}} = \Gamma_Z - \Gamma_{\text{had}} - 3\Gamma_l$$

$$\Gamma_{\text{inv}} = N_\nu \cdot \Gamma_\nu$$

K.A. Olive et al. (Particle Data Group), Chin. Phys. C, 38, 090001 (2014)

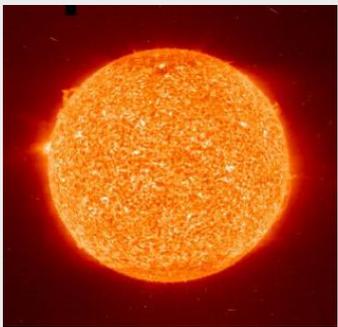
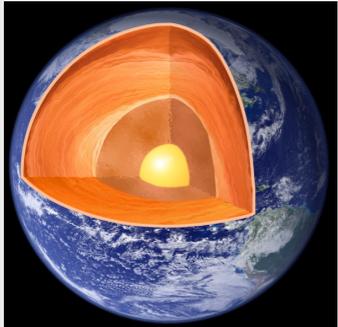
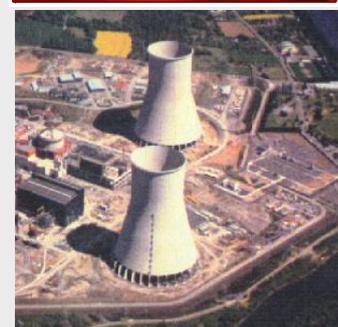
Number $N = 2.984 \pm 0.008$
(Standard Model fits to LEP data)

Number $N = 2.92 \pm 0.05$
(Direct measurement of invisible Z width)

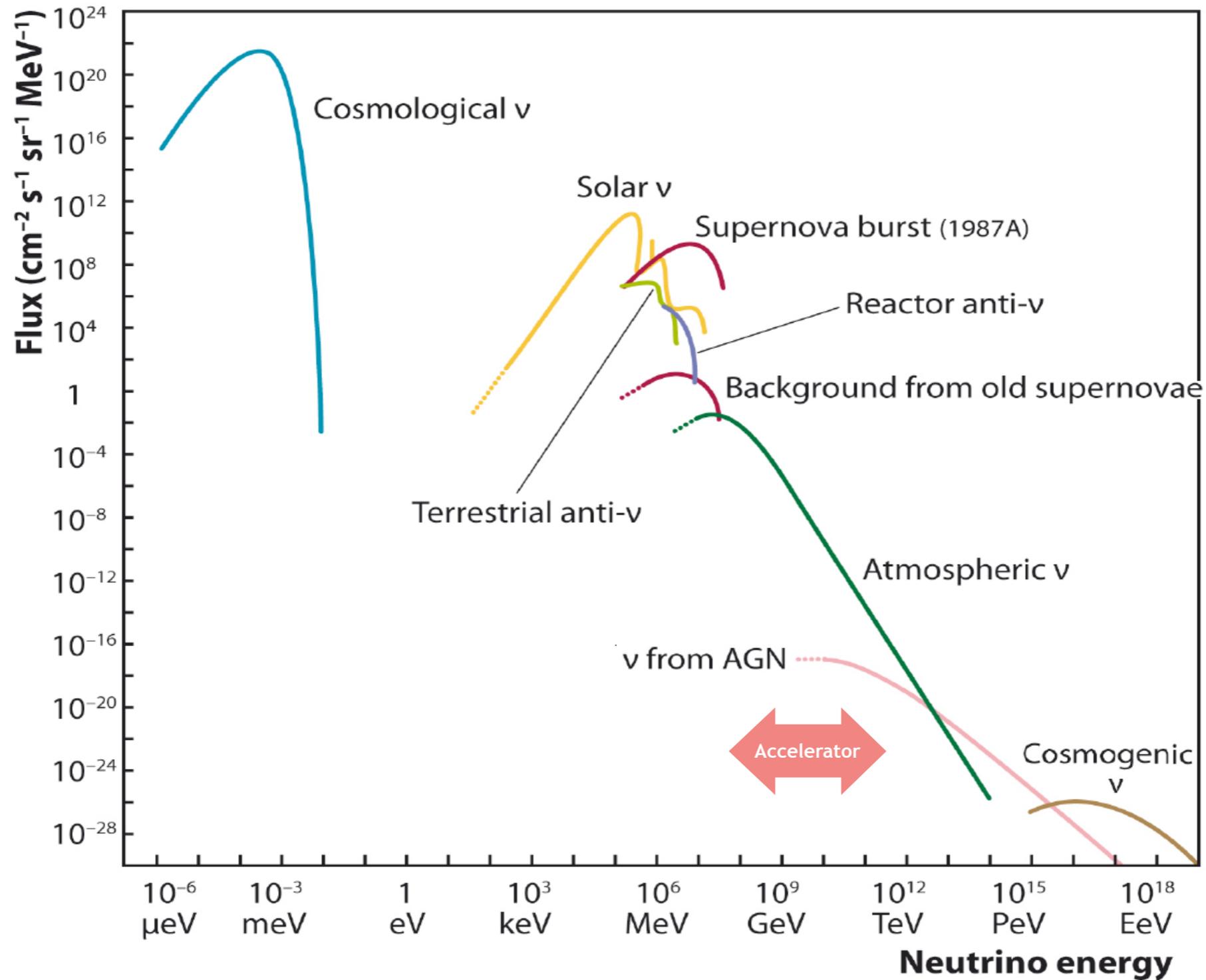
Fuentes de neutrinos

NATURALES

ARTIFICIALES

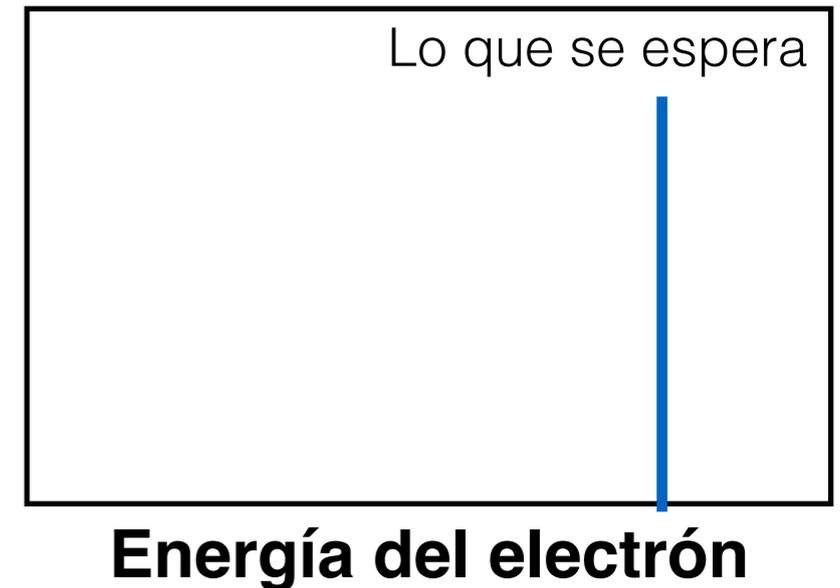
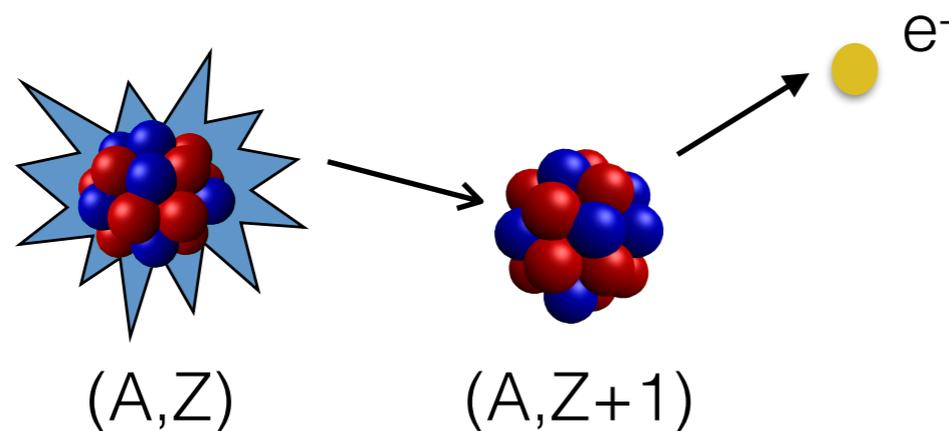
	<p>El Sol</p> <p>$E \sim \text{MeV}$</p> <p>$L \sim 10^8 \text{ km}$</p>		<p>La atmósfera</p> <p>$E \sim \text{GeV-TeV}$</p> <p>$L \sim 10 - 10^4 \text{ km}$</p>
	<p>La Tierra</p> <p>$E \sim \text{MeV}$</p> <p>$L \sim 10 - 10^3 \text{ km}$</p>		<p>Supernovas</p> <p>$E \sim \text{MeV}$</p> <p>$L \sim \text{kpc- Mpc}$</p>
	<p>Big Bang</p> <p>$E \approx \text{meV}$</p> <p>$L \sim \text{Mpc}$</p>		<p>Aceleradores astrofísicos</p> <p>$E \sim \text{TeV-PeV}$</p> <p>$L \sim \text{kpc- Mpc}$</p>
	<p>Reactores nucleares</p> <p>$E \sim \text{MeV}$</p> <p>$L \sim 1-100 \text{ km}$</p>		<p>Aceleradores de partículas</p> <p>$E \sim \text{GeV}$</p> <p>$L \sim 100-1000 \text{ km}$</p>

Energía de los neutrinos



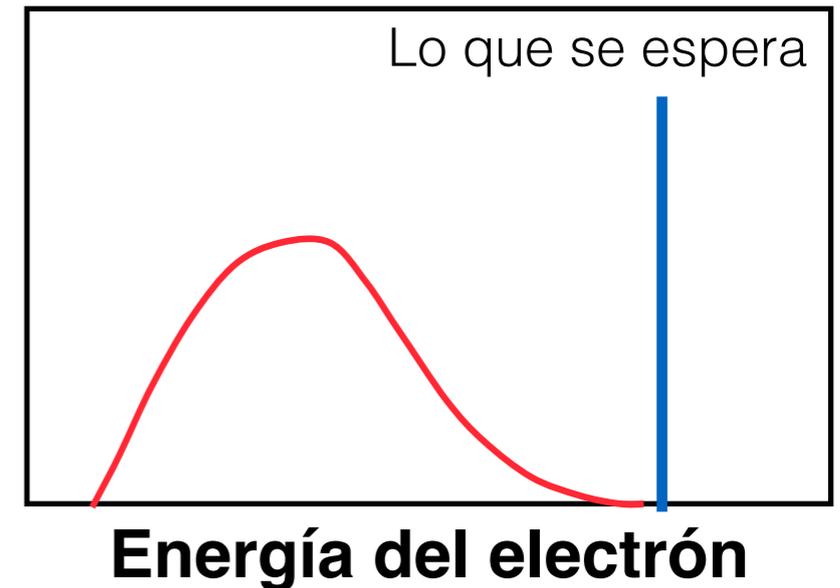
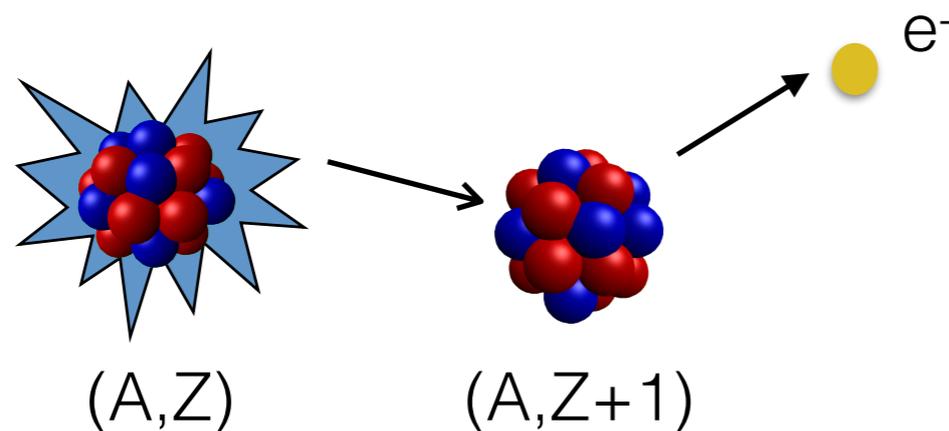
¿Cómo se descubrieron?

- Pauli propuso la existencia de los neutrinos en 1930 como una forma de resolver el problema de la radioactividad beta
- Si se emiten **dos cuerpos**, la **energía del electrón** tiene un **valor fijo** (por conservación de la energía)



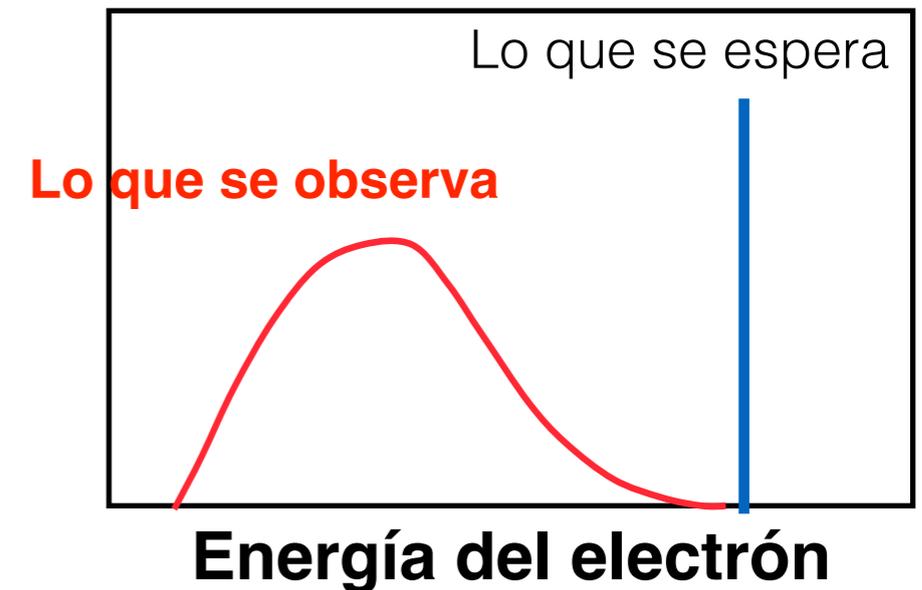
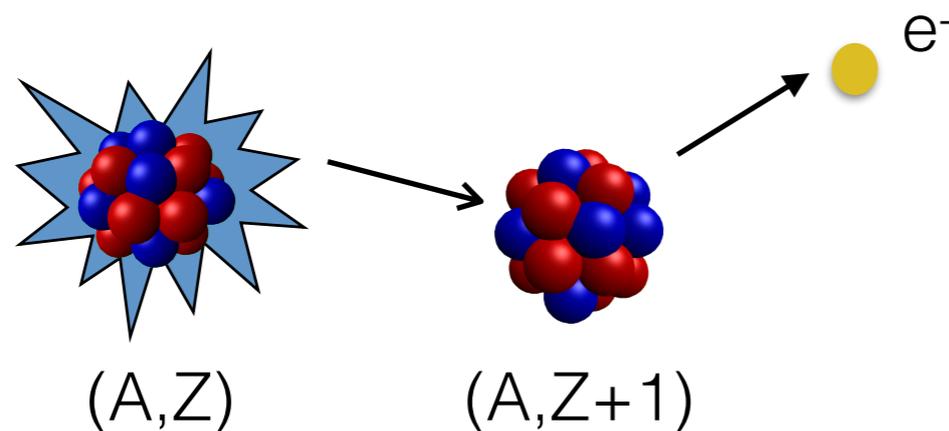
¿Cómo se descubrieron?

- Pauli propuso la existencia de los neutrinos en 1930 como una forma de resolver el problema de la radioactividad beta
- Si se emiten **dos cuerpos**, la **energía del electrón** tiene un **valor fijo** (por conservación de la energía)



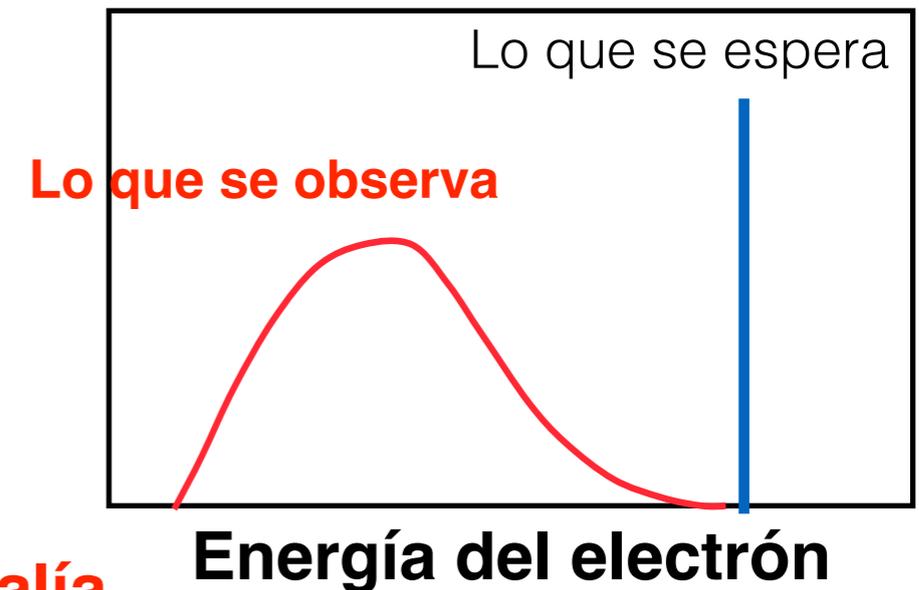
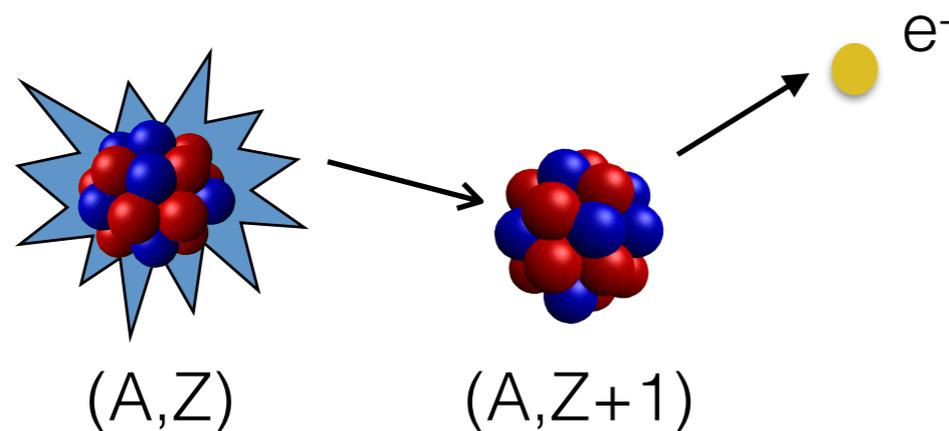
¿Cómo se descubrieron?

- Pauli propuso la existencia de los neutrinos en 1930 como una forma de resolver el problema de la radioactividad beta
- Si se emiten **dos cuerpos**, la **energía del electrón** tiene un **valor fijo** (por conservación de la energía)



¿Cómo se descubrieron?

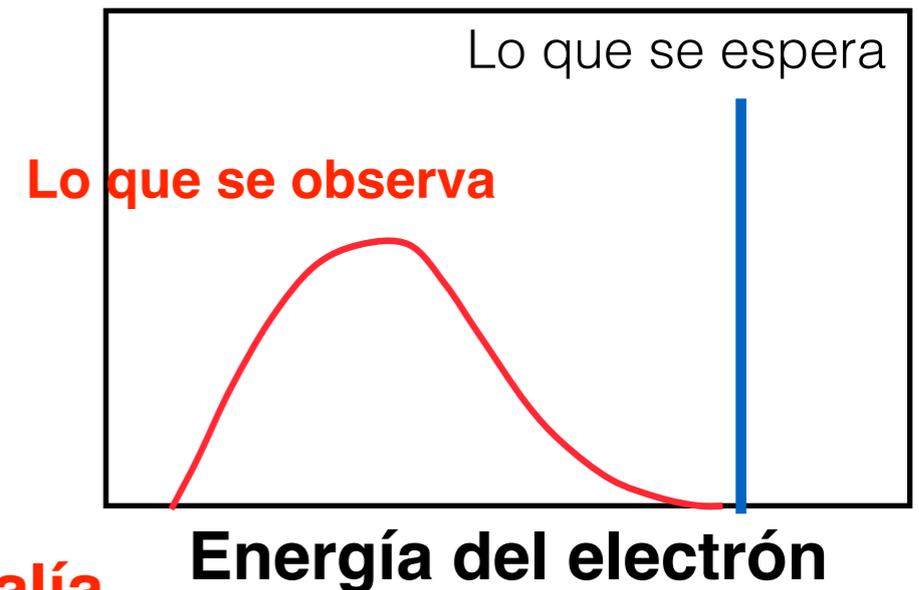
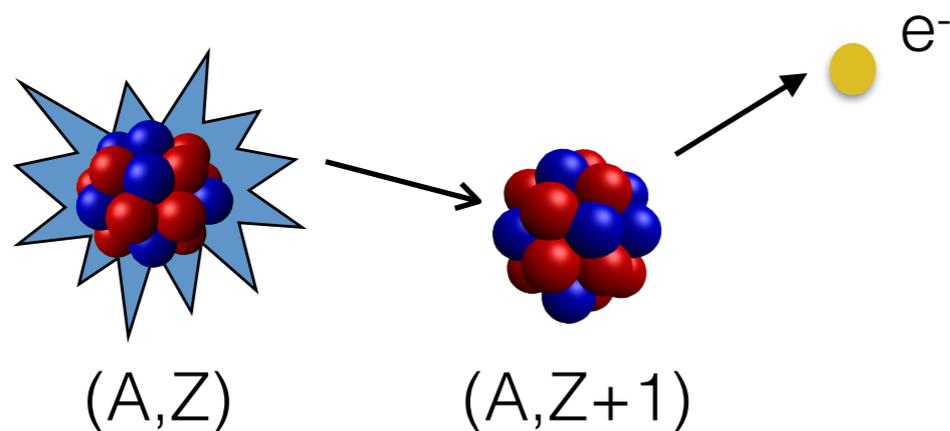
- Pauli propuso la existencia de los neutrinos en 1930 como una forma de resolver el problema de la radioactividad beta
- Si se emiten **dos cuerpos**, la **energía del electrón** tiene un **valor fijo** (por conservación de la energía)



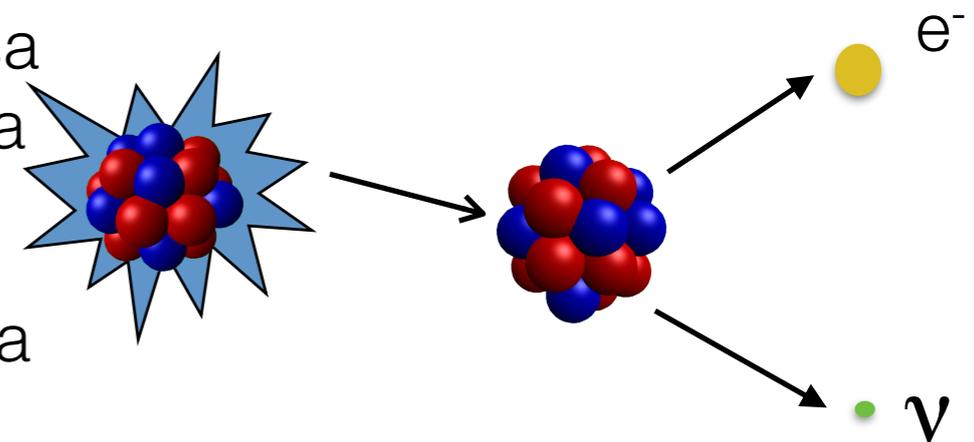
- La radioactividad beta presentaba una **anomalía**
- **Pauli**: “Existe una partícula neutra, que atraviesa todos los detectores sin dejar traza, que se lleva la energía que falta”
- En 1934 **Fermi** construye la teoría que explica la desintegración β y bautiza al “neutrino”

¿Cómo se descubrieron?

- Pauli propuso la existencia de los neutrinos en 1930 como una forma de resolver el problema de la radioactividad beta
- Si se emiten **dos cuerpos**, la **energía del electrón** tiene un **valor fijo** (por conservación de la energía)

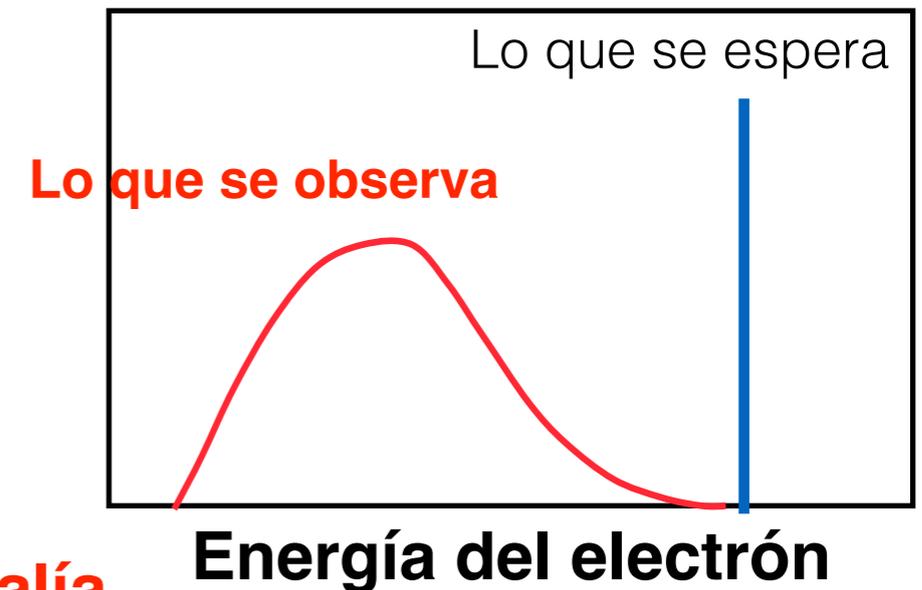
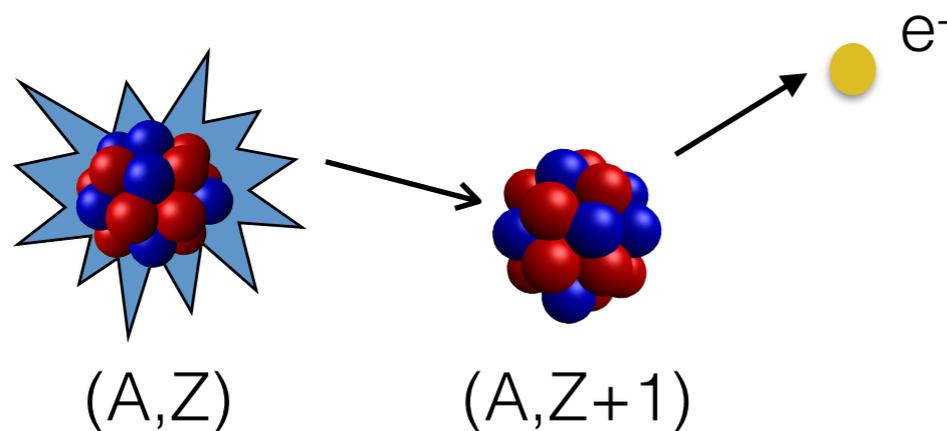


- La radioactividad beta presentaba una **anomalía**
- **Pauli**: “Existe una partícula neutra, que atraviesa todos los detectores sin dejar traza, que se lleva la energía que falta”
- En 1934 **Fermi** construye la teoría que explica la desintegración β y bautiza al “neutrino”

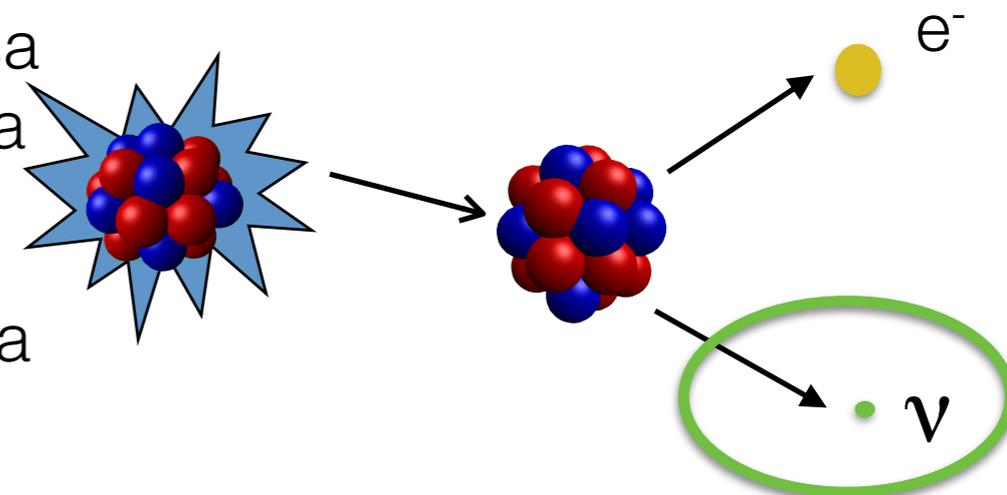


¿Cómo se descubrieron?

- Pauli propuso la existencia de los neutrinos en 1930 como una forma de resolver el problema de la radioactividad beta
- Si se emiten **dos cuerpos**, la **energía del electrón** tiene un **valor fijo** (por conservación de la energía)

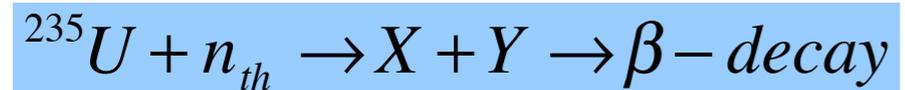


- La radioactividad beta presentaba una **anomalía**
- **Pauli**: "Existe una partícula neutra, que atraviesa todos los detectores sin dejar traza, que se lleva la energía que falta"
- En 1934 **Fermi** construye la teoría que explica la desintegración β y bautiza al "neutrino"



El descubrimiento del neutrino (1956)

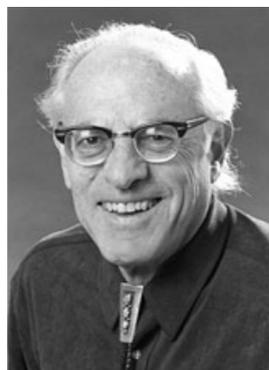
Reactor de Savannah River (EEUU)



Producción de los neutrinos en el núcleo del reactor nuclear

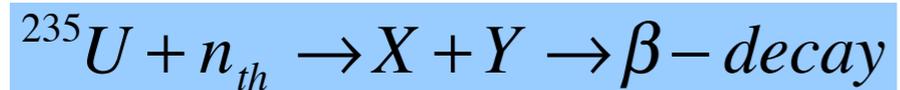
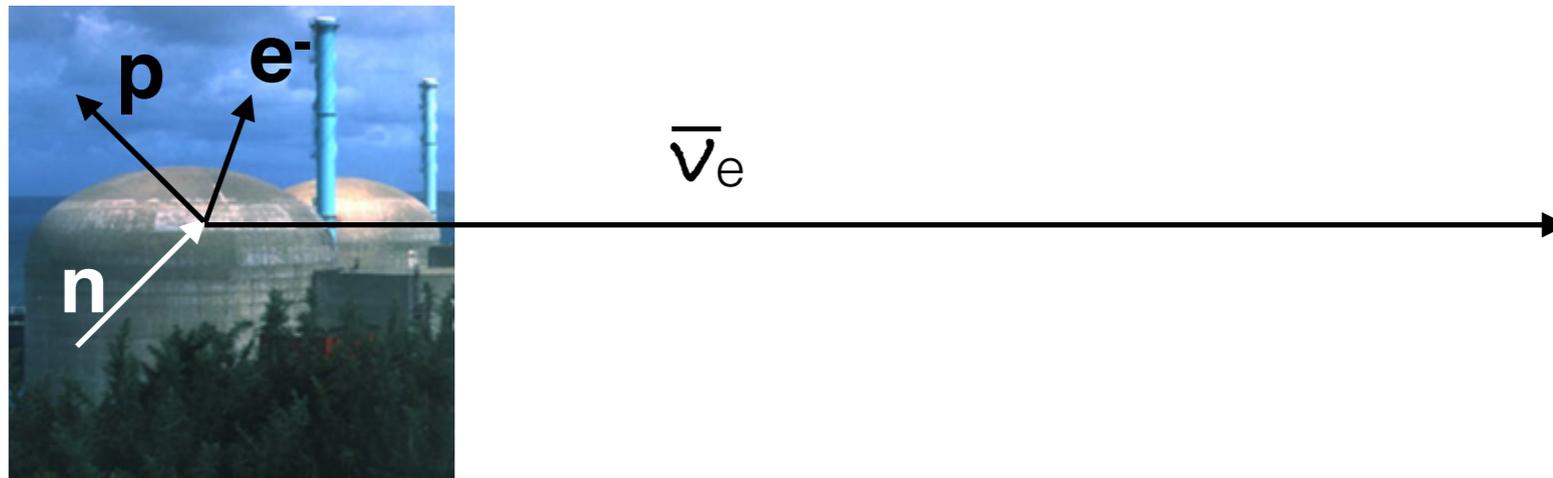
Cowan

Reines



El descubrimiento del neutrino (1956)

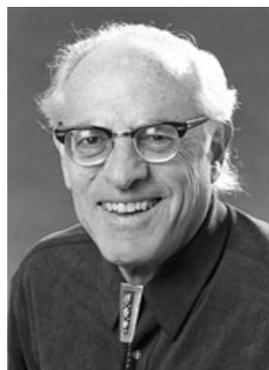
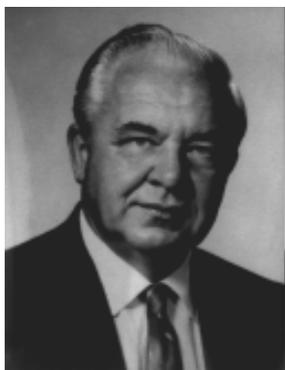
Reactor de Savannah River (EEUU)



Producción de los neutrinos en el núcleo del reactor nuclear

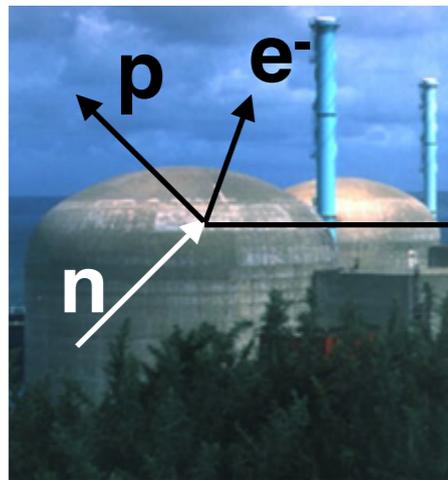
Cowan

Reines



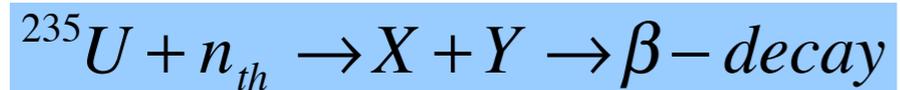
El descubrimiento del neutrino (1956)

Reactor de Savannah River (EEUU)



$\bar{\nu}_e$

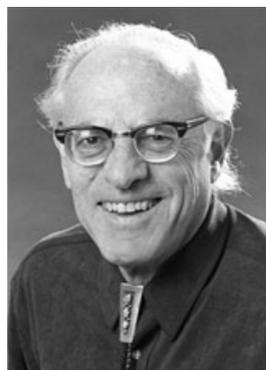
distancia recorrida = ~metros



Producción de los neutrinos en el núcleo del reactor nuclear

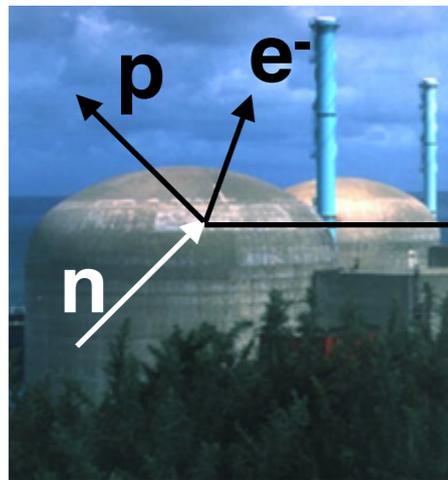
Cowan

Reines



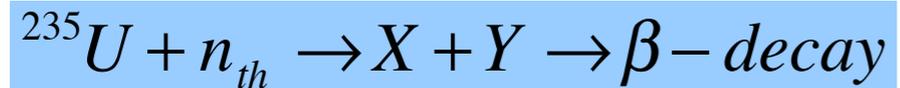
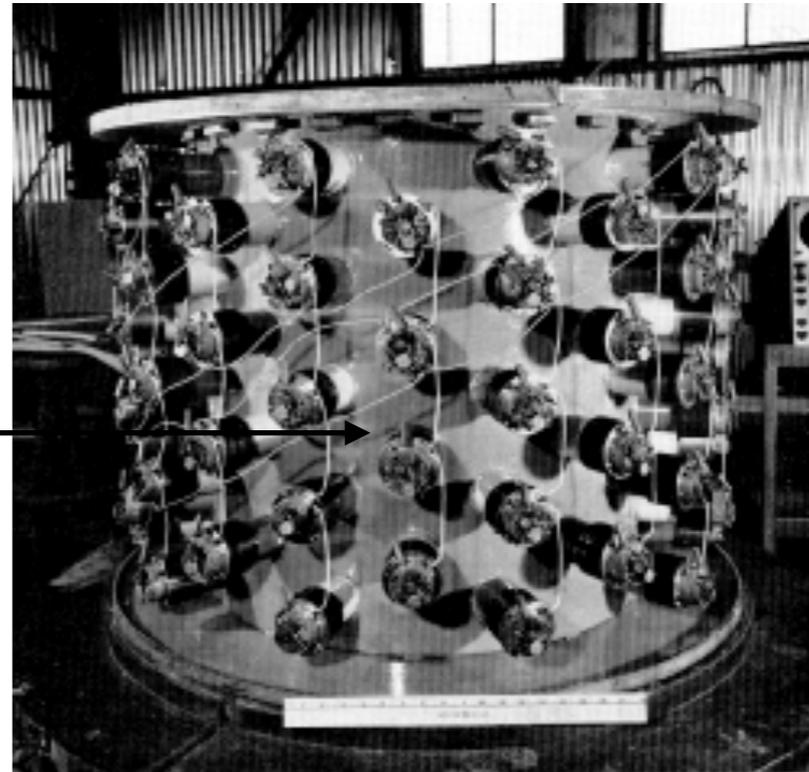
El descubrimiento del neutrino (1956)

Reactor de Savannah River (EEUU)



$\bar{\nu}_e$

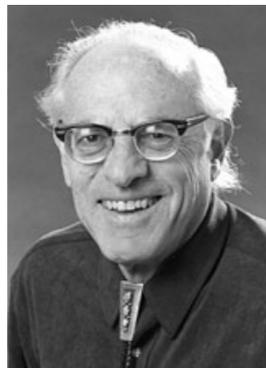
distancia recorrida = ~metros



Producción de los neutrinos en el núcleo del reactor nuclear

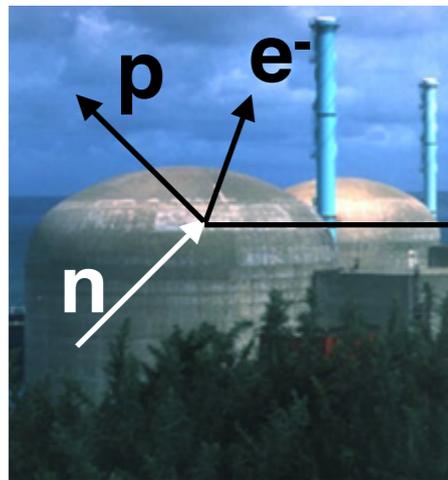
Cowan

Reines



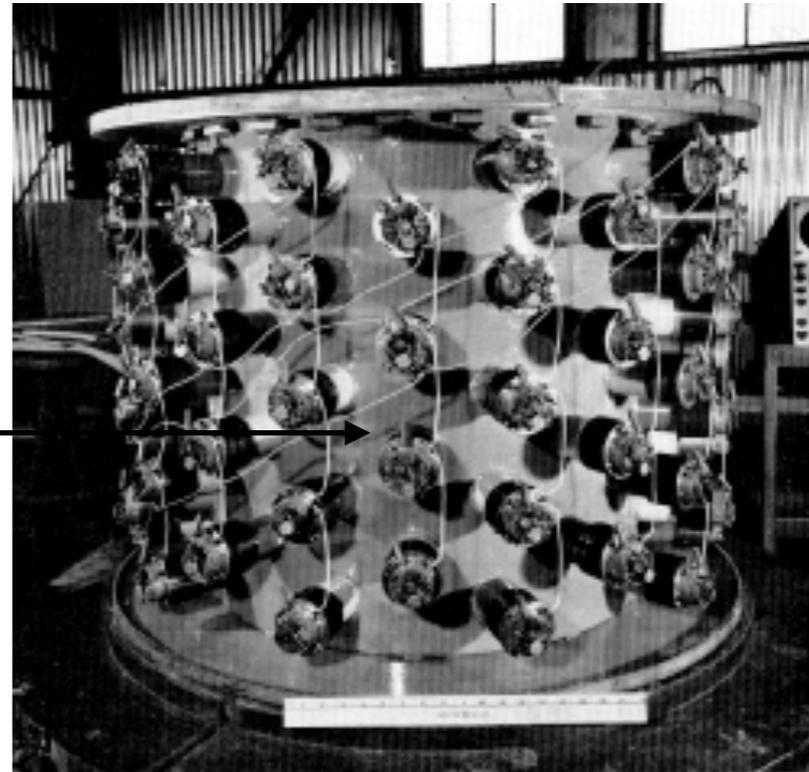
El descubrimiento del neutrino (1956)

Reactor de Savannah River (EEUU)

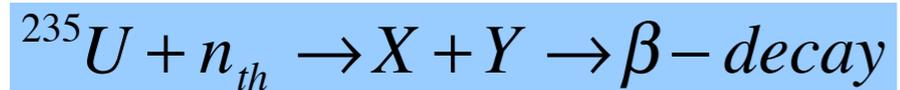


$\bar{\nu}_e$

distancia recorrida = ~metros



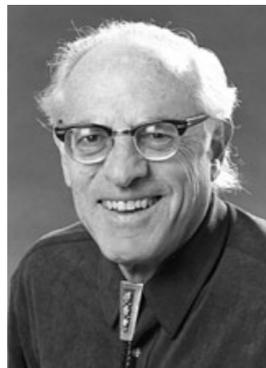
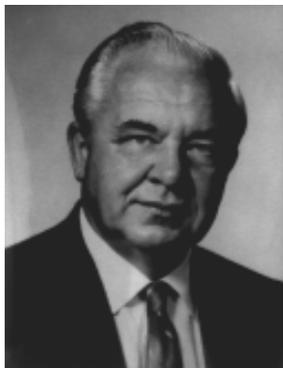
Detección de los neutrinos en 1 m³ de líquido centelleador (~3 v/h)



Producción de los neutrinos en el núcleo del reactor nuclear

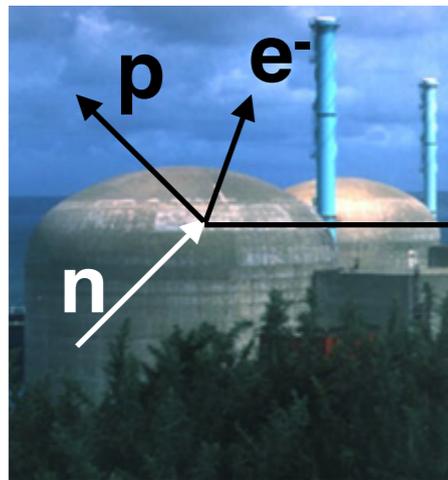
Cowan

Reines



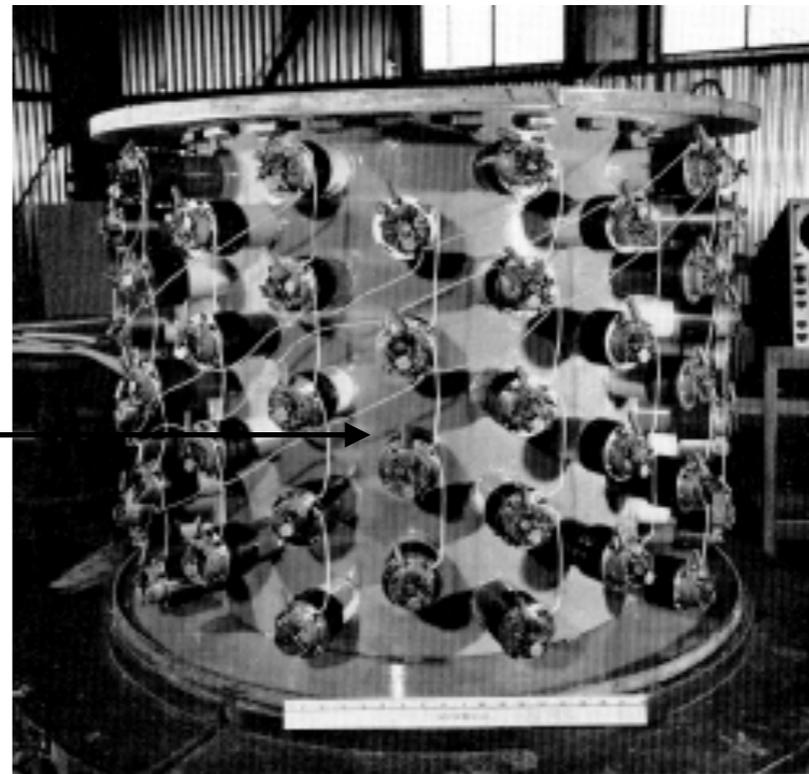
El descubrimiento del neutrino (1956)

Reactor de Savannah River (EEUU)

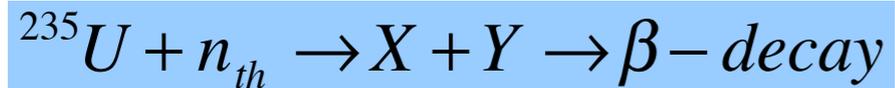


$\bar{\nu}_e$

distancia recorrida = ~metros



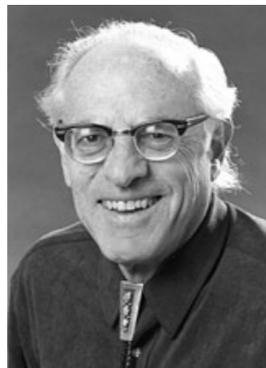
Detección de los neutrinos en 1 m³ de líquido centelleador (~3 v/h)



Producción de los neutrinos en el núcleo del reactor nuclear

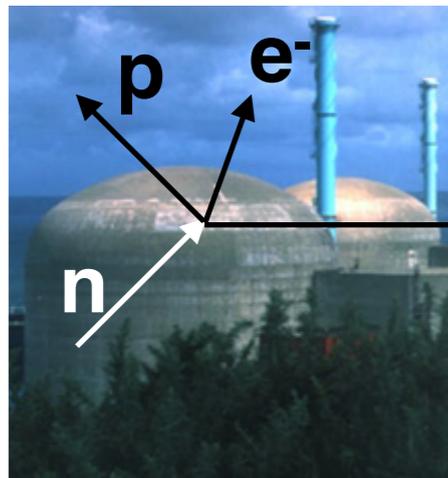
Cowan

Reines



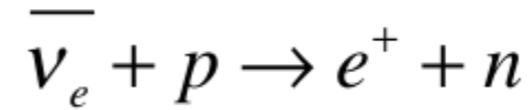
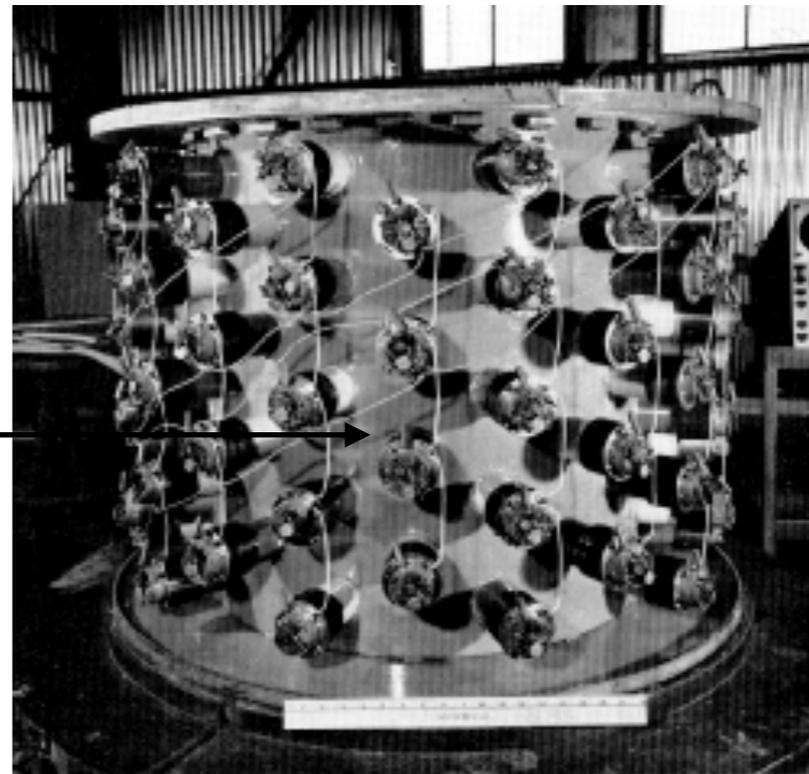
El descubrimiento del neutrino (1956)

Reactor de Savannah River (EEUU)

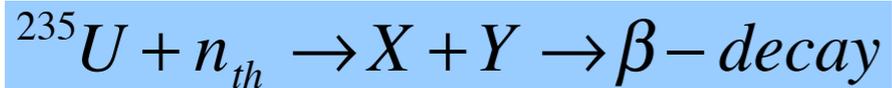


$\bar{\nu}_e$

distancia recorrida = ~metros



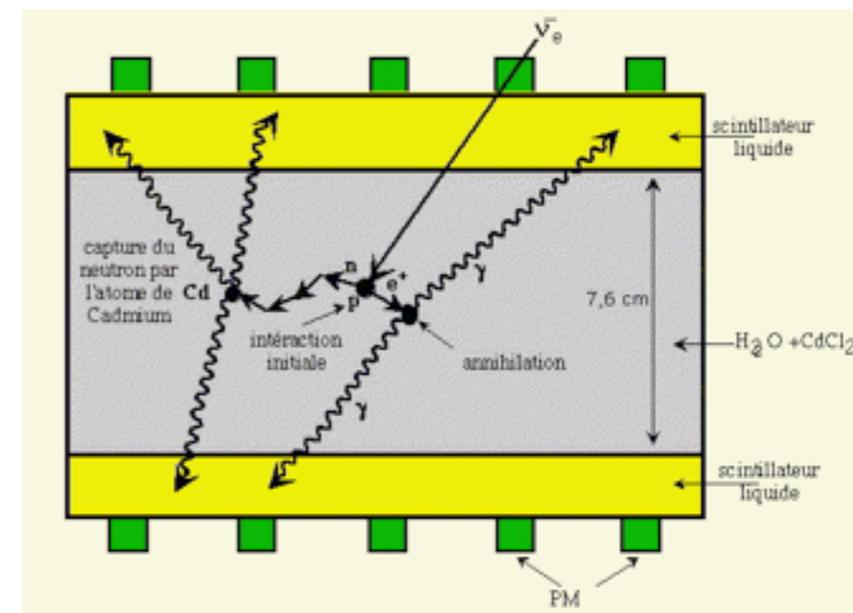
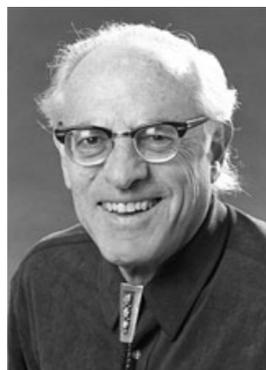
Detección de los neutrinos en 1 m³ de líquido centelleador (~3 v/h)



Producción de los neutrinos en el núcleo del reactor nuclear

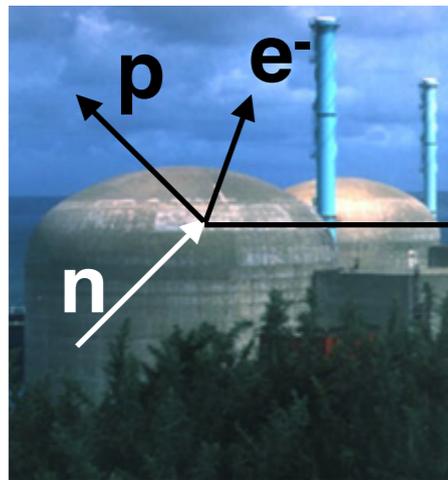
Cowan

Reines



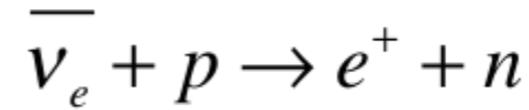
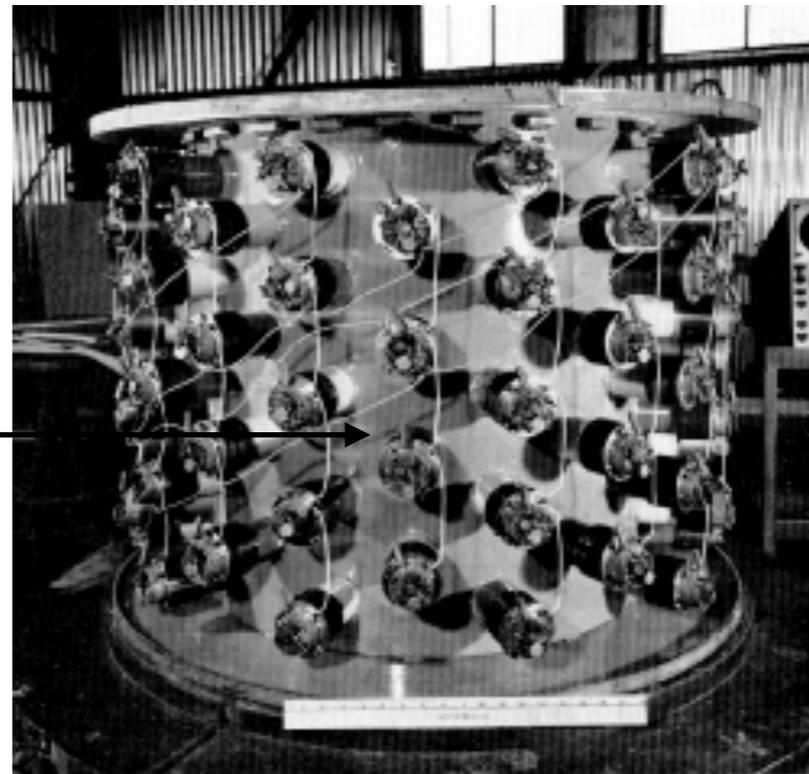
El descubrimiento del neutrino (1956)

Reactor de Savannah River (EEUU)

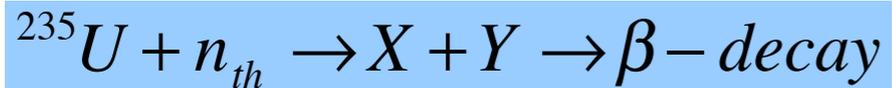


$\bar{\nu}_e$

distancia recorrida = ~metros



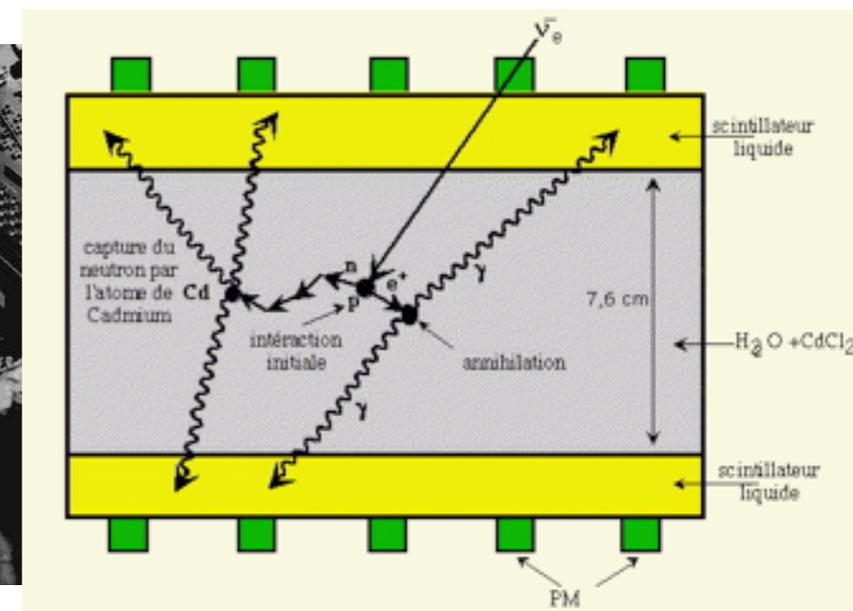
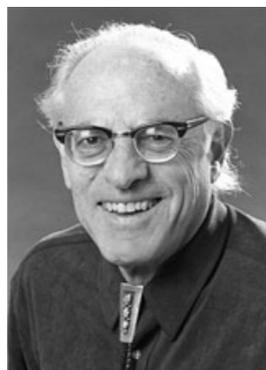
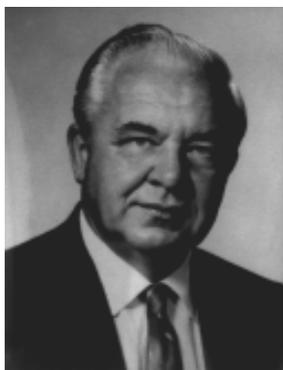
Detección de los neutrinos en 1 m³ de líquido centelleador (~3 v/h)



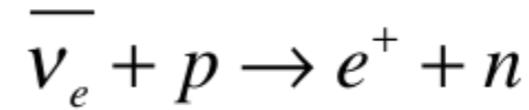
Producción de los neutrinos en el núcleo del reactor nuclear

Cowan

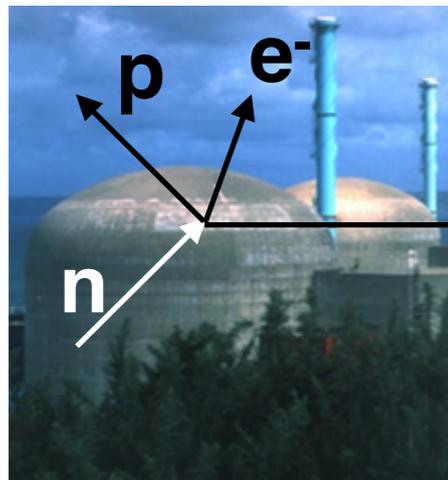
Reines



El descubrimiento del neutrino (1956)

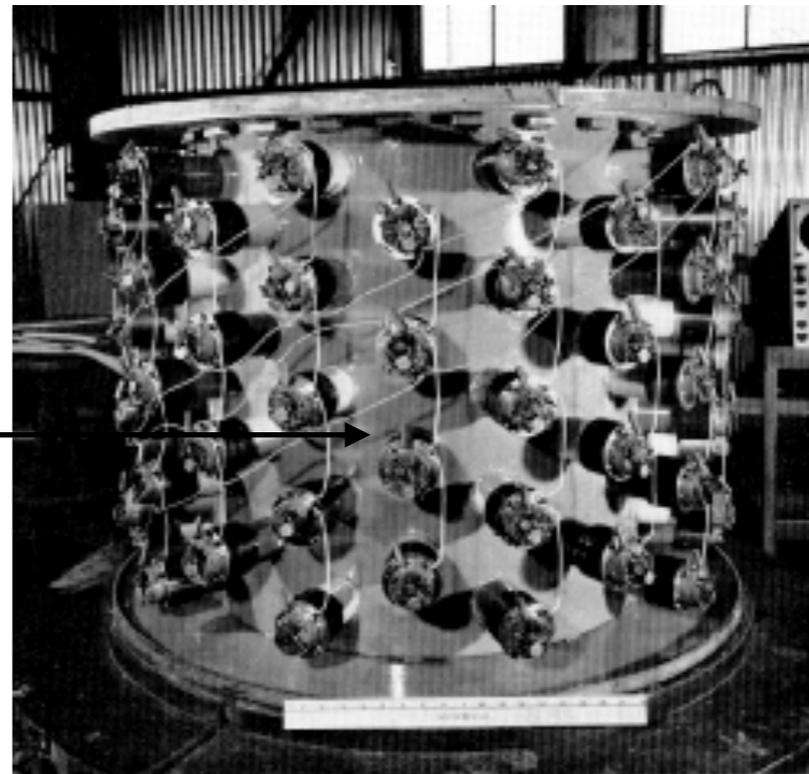


Reactor de Savannah River (EEUU)

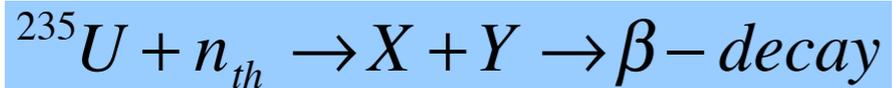


$\bar{\nu}_e$

distancia recorrida = ~metros



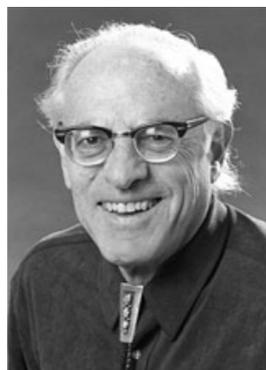
Detección de los neutrinos en 1 m³ de líquido centelleador (~3 v/h)



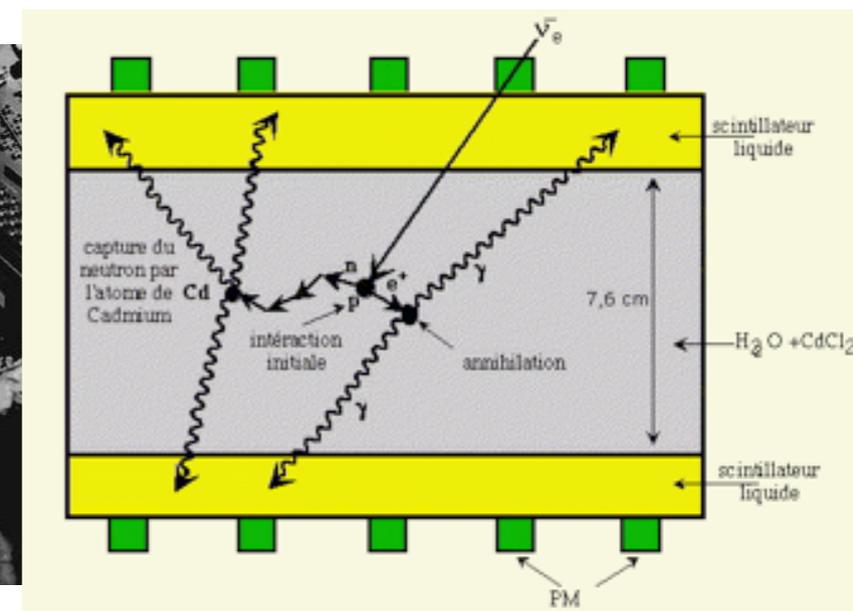
Producción de los neutrinos en el núcleo del reactor nuclear

Cowan

Reines



Premio Nobel de Física en 1995



Descubrimientos posteriores

- **1962: ν_μ fue observado en Brookhaven (EEUU)**
 - Primer experimento de neutrinos producidos en aceleradores
 - Descubrimiento de un *segundo tipo de neutrino* (del muón)

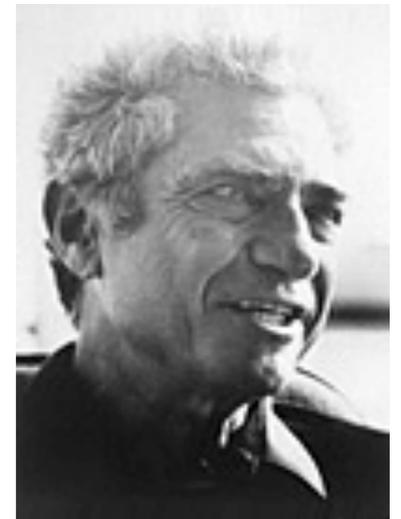
Lederman



Schwartz

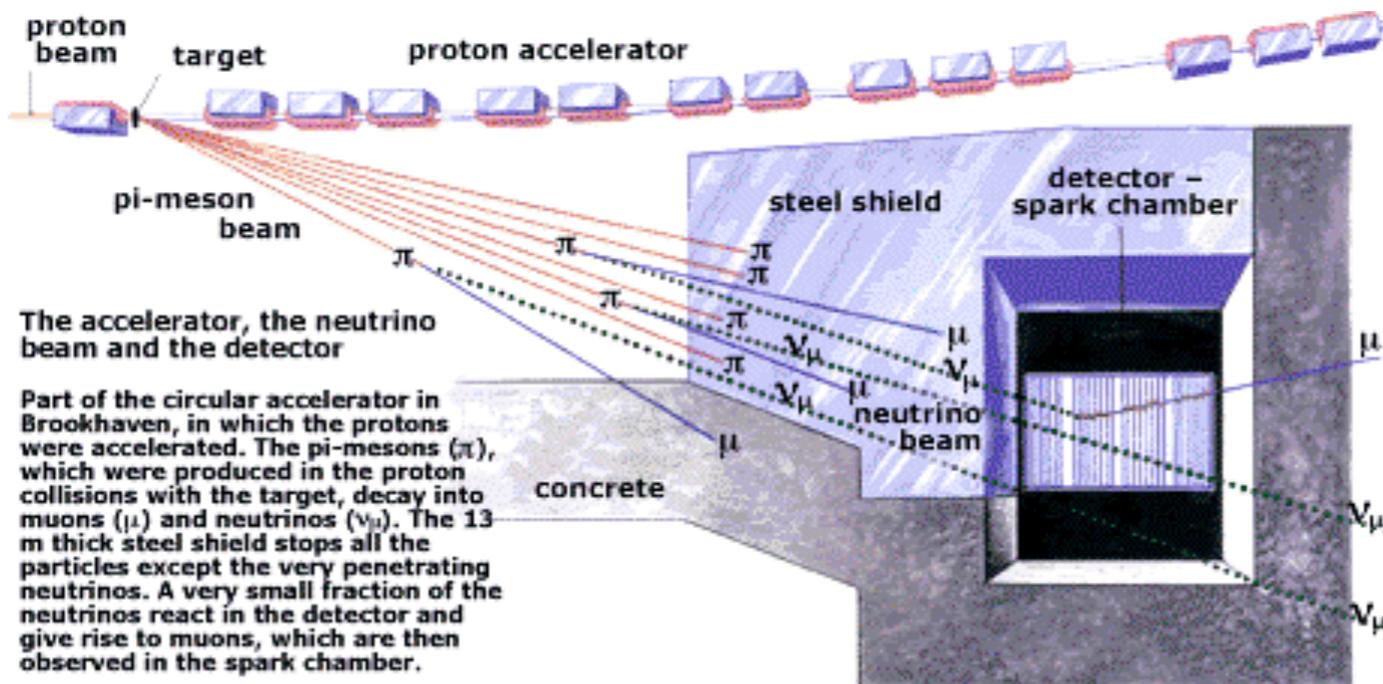


Steinberger



Descubrimientos posteriores

- **1962: ν_μ fue observado en Brookhaven (EEUU)**
 - Primer experimento de neutrinos producidos en aceleradores
 - Descubrimiento de un *segundo tipo de neutrino* (del muón)



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.

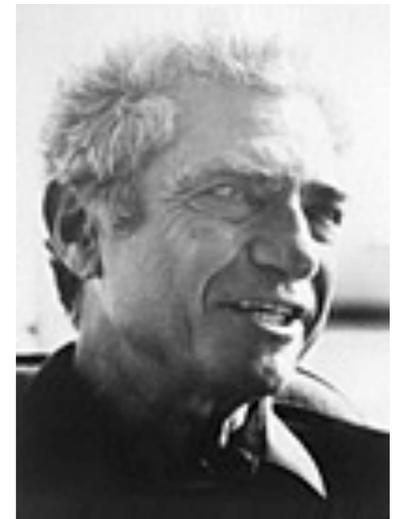
Lederman



Schwartz

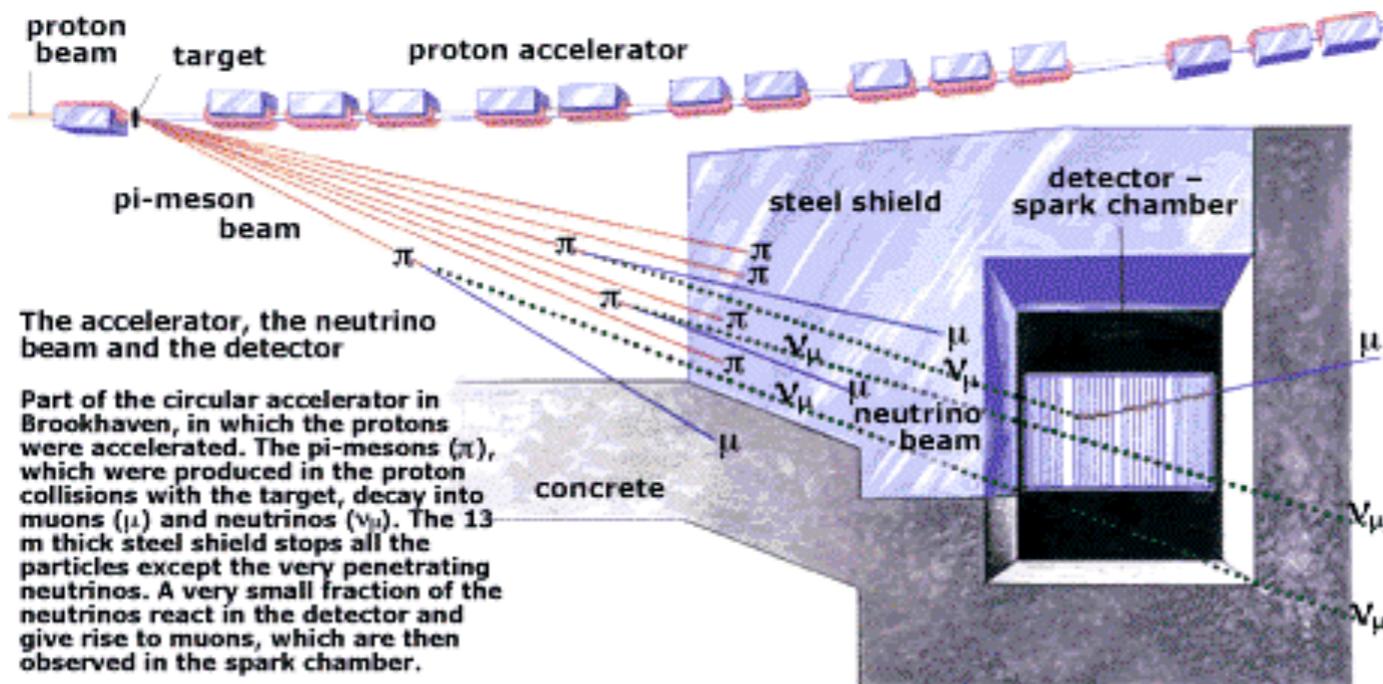


Steinberger



Descubrimientos posteriores

- **1962: ν_μ fue observado en Brookhaven (EEUU)**
 - Primer experimento de neutrinos producidos en aceleradores
 - Descubrimiento de un *segundo tipo de neutrino* (del muón)



Based on a drawing in Scientific American, March 1963.

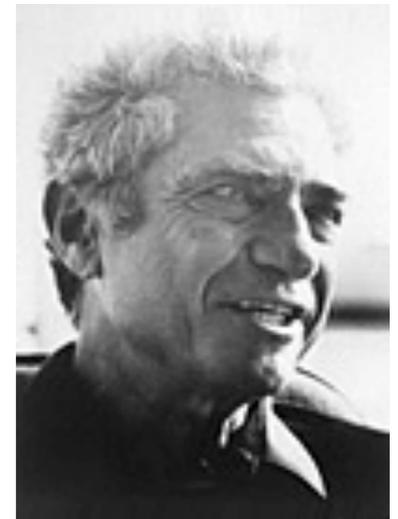
Lederman



Schwartz



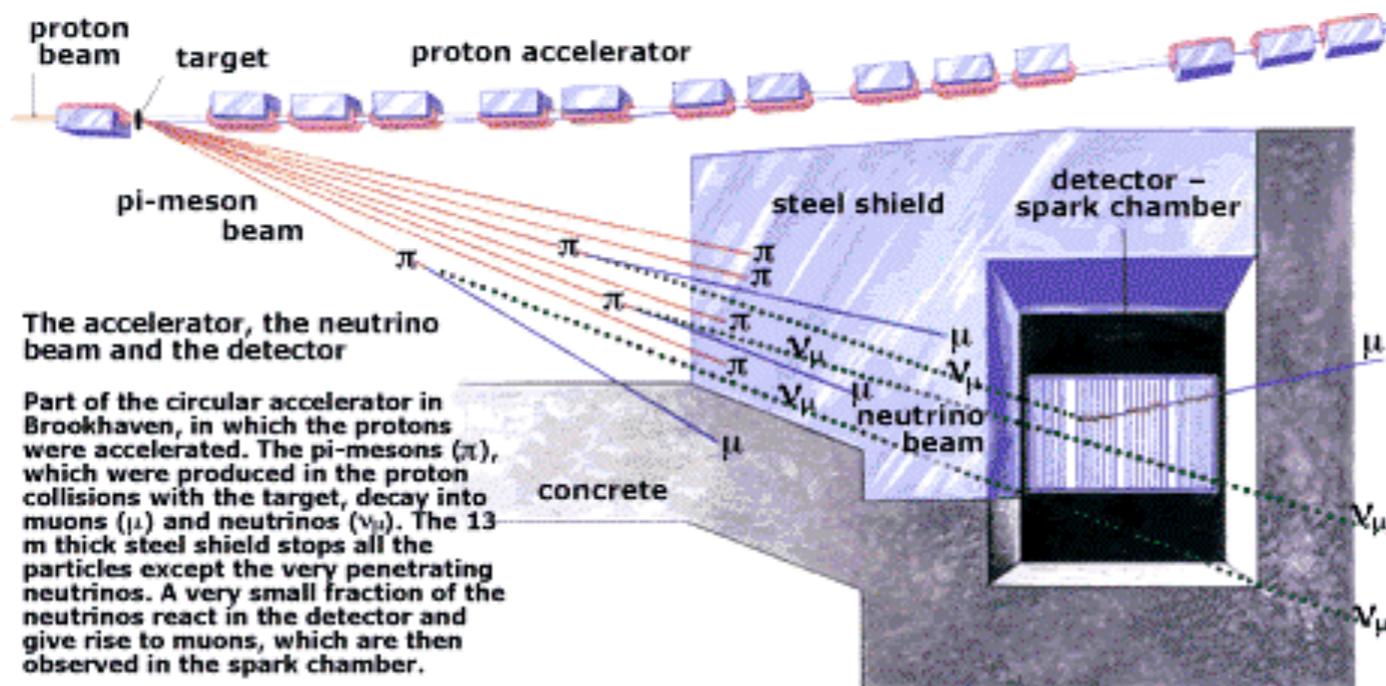
Steinberger



Premio Nobel de Física en 1988

Descubrimientos posteriores

- **1962: ν_μ fue observado en Brookhaven (EEUU)**
 - Primer experimento de neutrinos producidos en aceleradores
 - Descubrimiento de un *segundo tipo de neutrino* (del muón)



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.

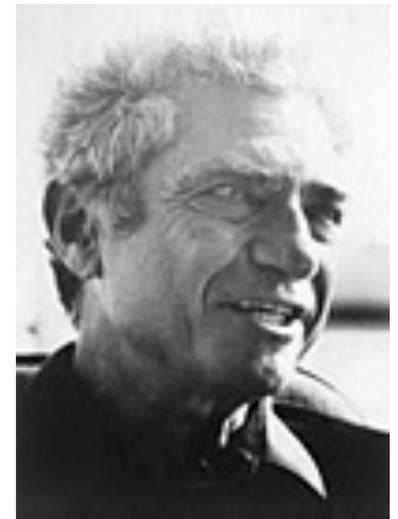
Lederman



Schwartz



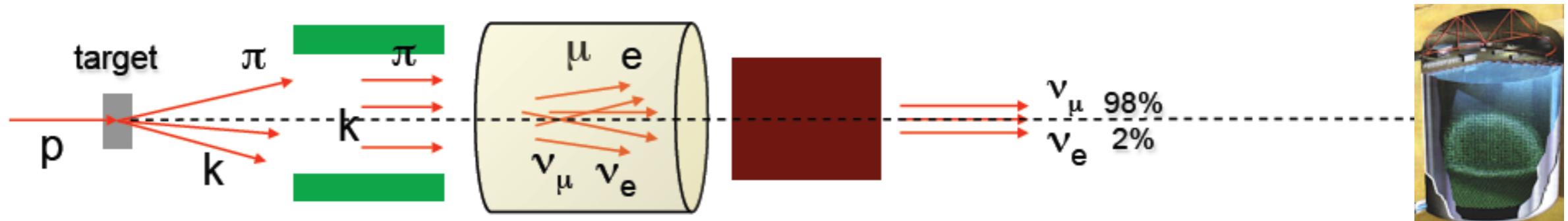
Steinberger



Premio Nobel de Física en 1988

- Mucho más tarde, en **2000**, fue descubierto el *tercer tipo de neutrino* ν_τ (del tau) en el experimento DONUT en Fermilab

Haces de neutrinos



- Es posible crear un **haz intenso de neutrinos** a partir de un **haz intenso de protones**

- **Ventajas:**

- se puede “enchufar y desenchufar” el haz y saber cuándo tengo neutrinos y cuándo no (señal frente a sucesos de fondo)
- se puede seleccionar la energía de los neutrinos (dentro de un rango)

- **Desventajas:**

- el haz de neutrinos no es puro (varios tipos de neutrinos son producidos)
- el flujo no es muy elevado
- es caro!

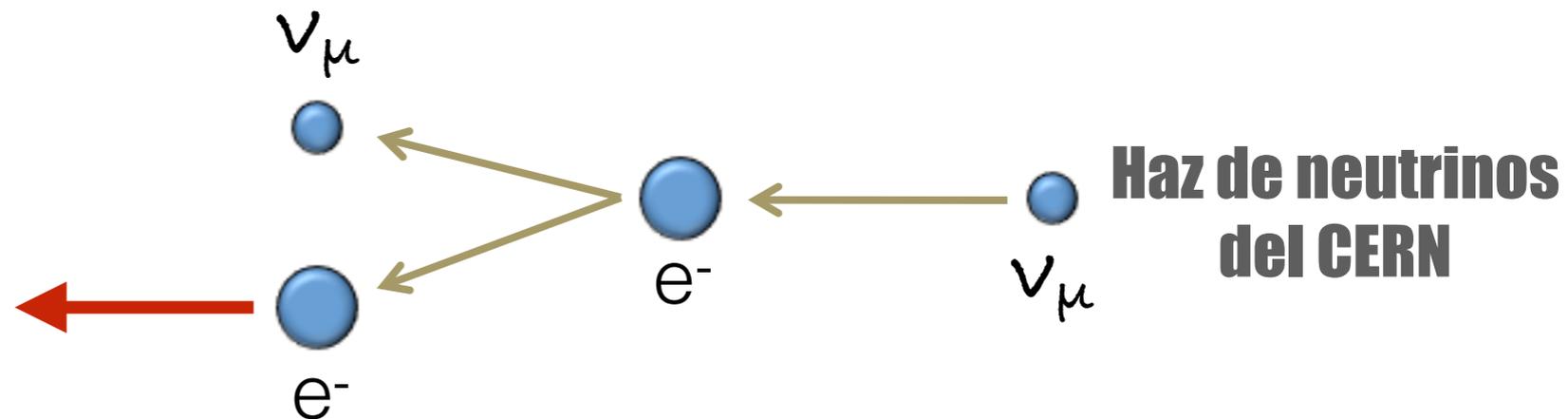
Descubrimiento de las corrientes neutras en el CERN

- **1973**: descubrimiento de las corrientes neutras en la cámara de burbujas Gargamelle en el CERN
- **NC leptónicas** (un neutrino interactúa con un electrón y escapa) y **NC hadrónicas** (interacción con un hadrón).
 - Paso importante hacia la unificación de las fuerzas electromagnética y débil (fuerza electrodébil) que posteriormente condujo al descubrimiento de los bosones W y Z en el CERN



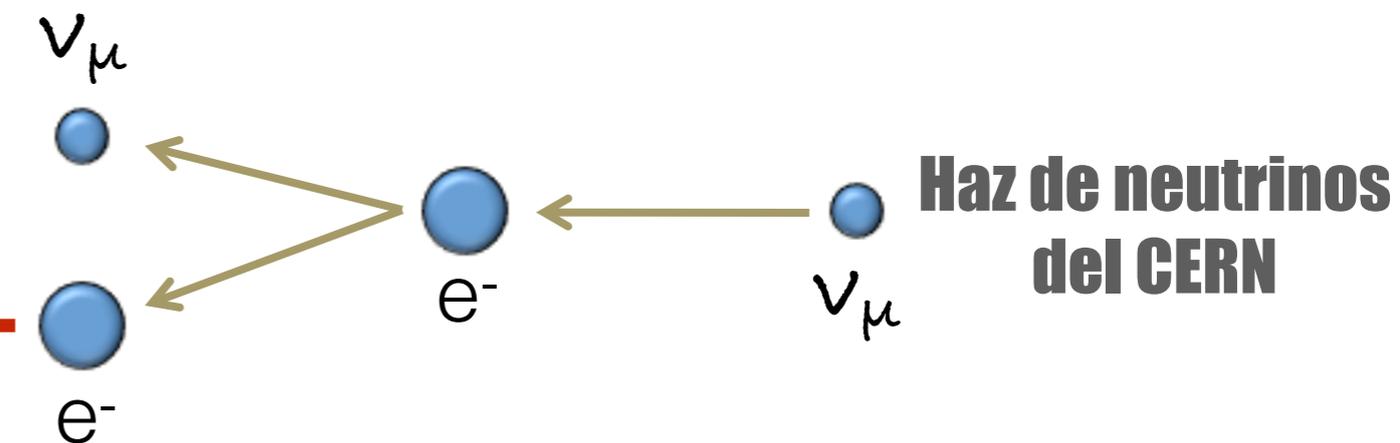
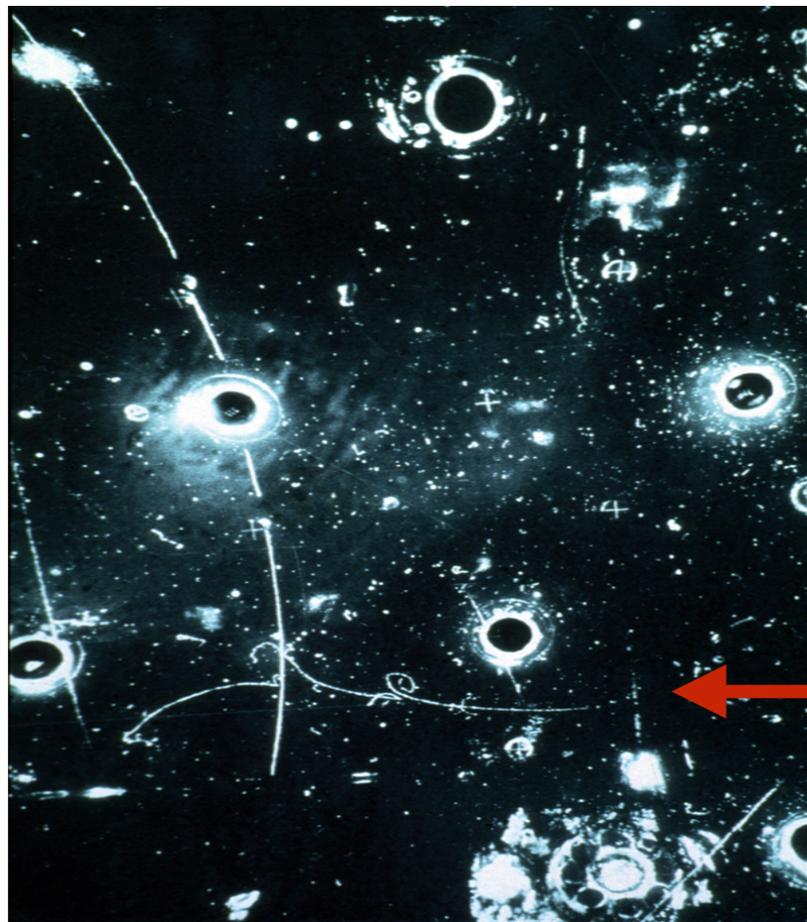
Descubrimiento de las corrientes neutras en el CERN

- **1973**: descubrimiento de las corrientes neutras en la cámara de burbujas Gargamelle en el CERN
- **NC leptónicas** (un neutrino interactúa con un electrón y escapa) y **NC hadrónicas** (interacción con un hadrón).
 - Paso importante hacia la unificación de las fuerzas electromagnética y débil (fuerza electrodébil) que posteriormente condujo al descubrimiento de los bosones W y Z en el CERN



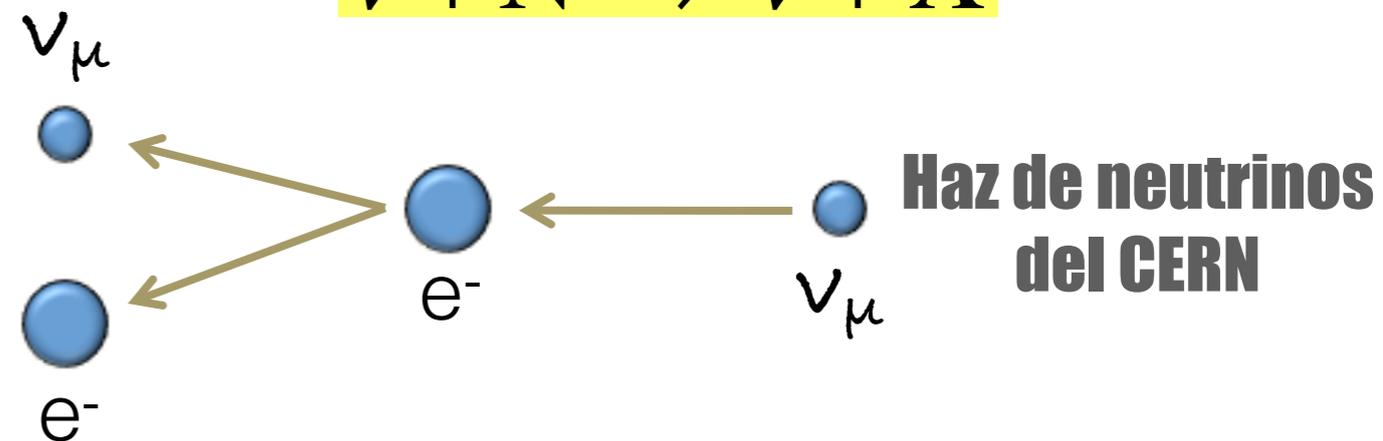
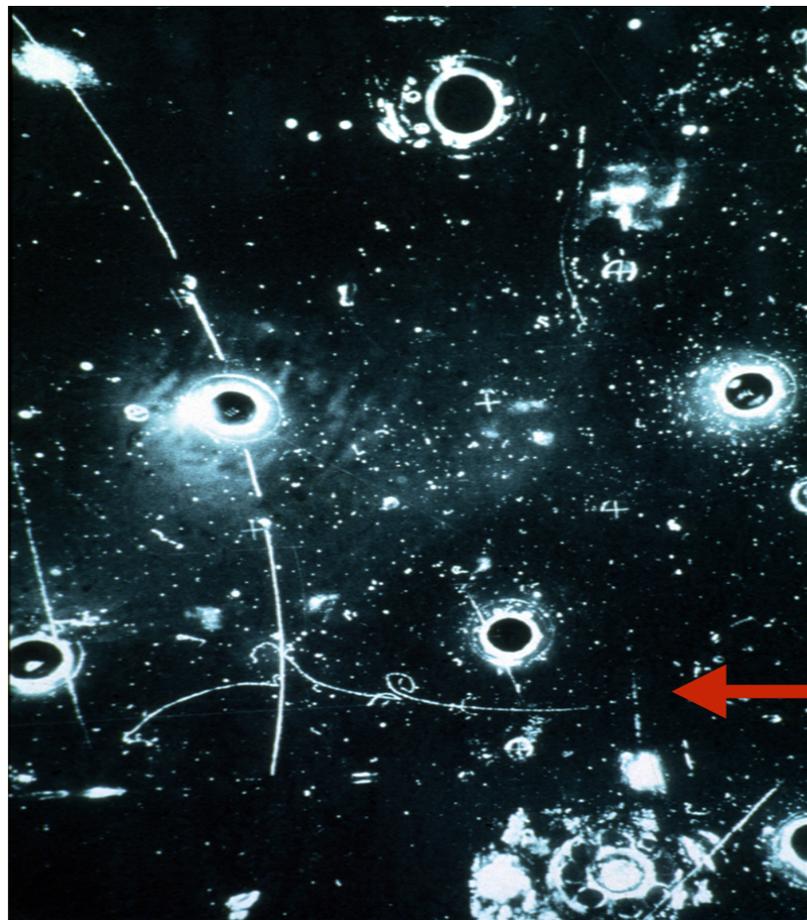
Descubrimiento de las corrientes neutras en el CERN

- **1973**: descubrimiento de las corrientes neutras en la cámara de burbujas Gargamelle en el CERN
- **NC leptónicas** (un neutrino interactúa con un electrón y escapa) y **NC hadrónicas** (interacción con un hadrón).
 - Paso importante hacia la unificación de las fuerzas electromagnética y débil (fuerza electrodébil) que posteriormente condujo al descubrimiento de los bosones W y Z en el CERN



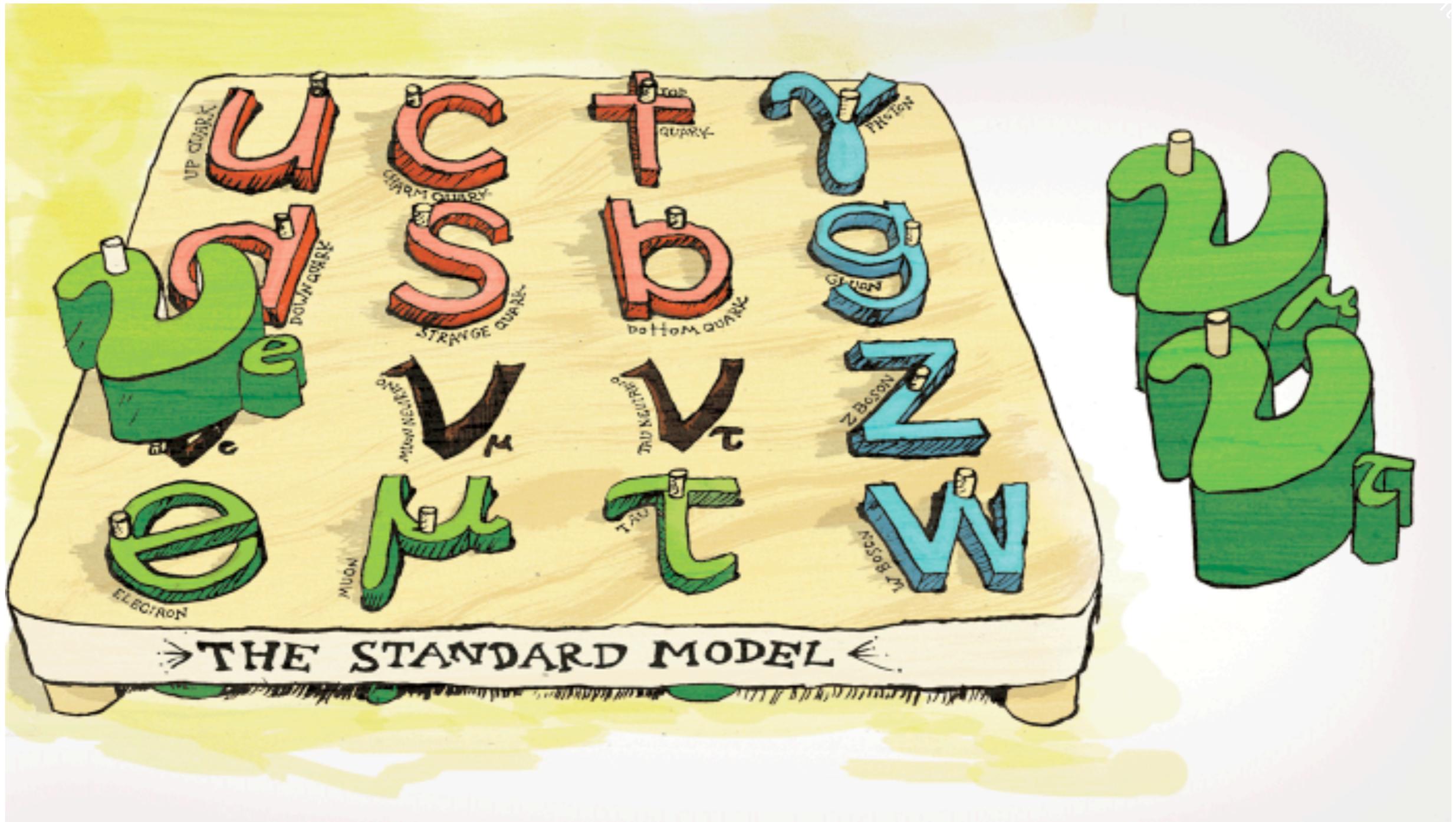
Descubrimiento de las corrientes neutras en el CERN

- **1973**: descubrimiento de las corrientes neutras en la cámara de burbujas Gargamelle en el CERN
- **NC leptónicas** (un neutrino interactúa con un electrón y escapa) y **NC hadrónicas** (interacción con un hadrón).
 - Paso importante hacia la unificación de las fuerzas electromagnética y débil (fuerza electrodébil) que posteriormente condujo al descubrimiento de los bosones W y Z en el CERN



¿Qué tienen de especial?

- Son los únicos fermiones **neutros**
- Su **masa**: (valor, origen) ¿Por qué es mucho menor que la del resto de partículas?
- Su **naturaleza**: (Dirac, Majorana)? Podrían ser sus propias antipartículas
- Sus sabores se mezclan (**oscilan**)
- Son muy **escurridizos** (interaccionan muy débilmente con la materia)
- Podrían **violar la simetría CP** (asimetría materia-antimateria en el Universo)
- Son extremadamente **abundantes** en el Universo
- Son **mensajeros** de los sucesos del Cosmos



En el Modelo Estándar los neutrinos no tienen masa...

... pero veremos que los neutrinos nos han dado sorpresas a lo largo de la historia...



2

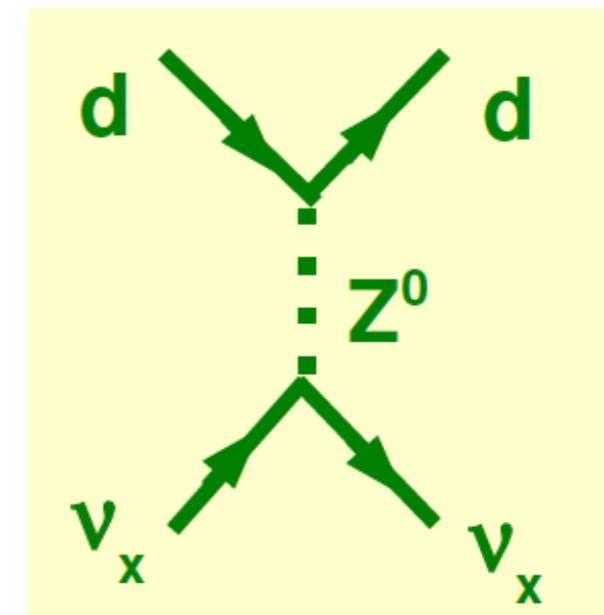
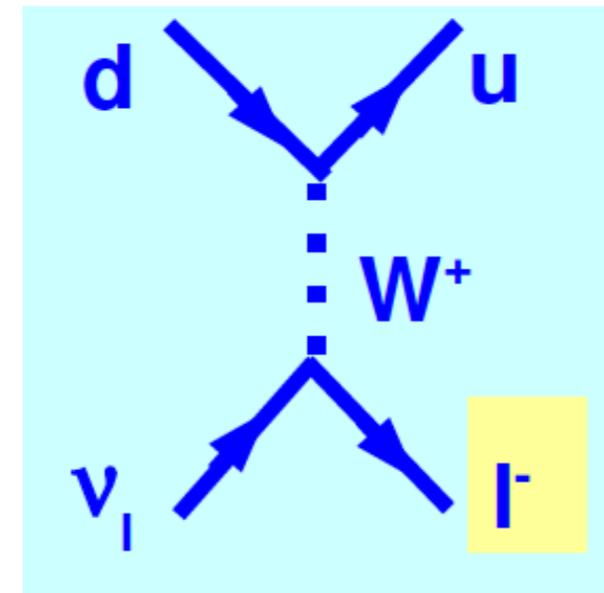
¿Qué pinta tienen los neutrinos?

Interacciones de neutrinos en el SM

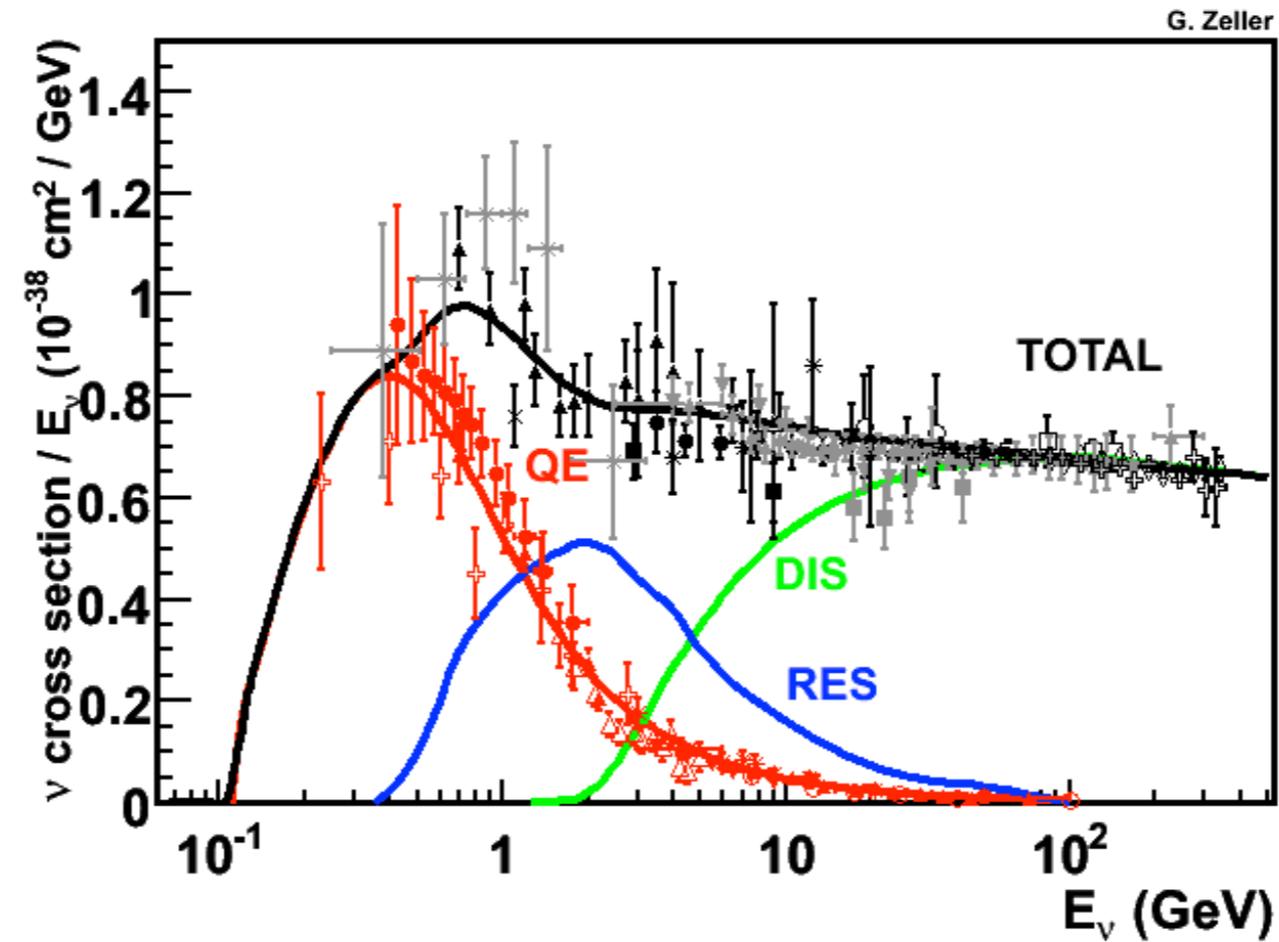
- **Interacciones de CC:** intercambio del W
 - El leptón en el estado final determina si es neutrino o antineutrino y su sabor
- **Interacciones de NC:** intercambio del Z^0
- Las interacciones débiles observadas **conservan el número leptónico:**

$$L = L_e + L_\mu + L_\tau$$

	L_e	L_μ	L_τ		L_e	L_μ	L_τ
(ν_e, e^-)	+1	0	0	(ν_e^c, e^+)	-1	0	0
(ν_μ, μ^-)	0	+1	0	(ν_μ^c, μ^+)	0	-1	0
(ν_τ, τ^-)	0	0	+1	(ν_τ^c, τ^+)	0	0	-1



Interacción de neutrinos

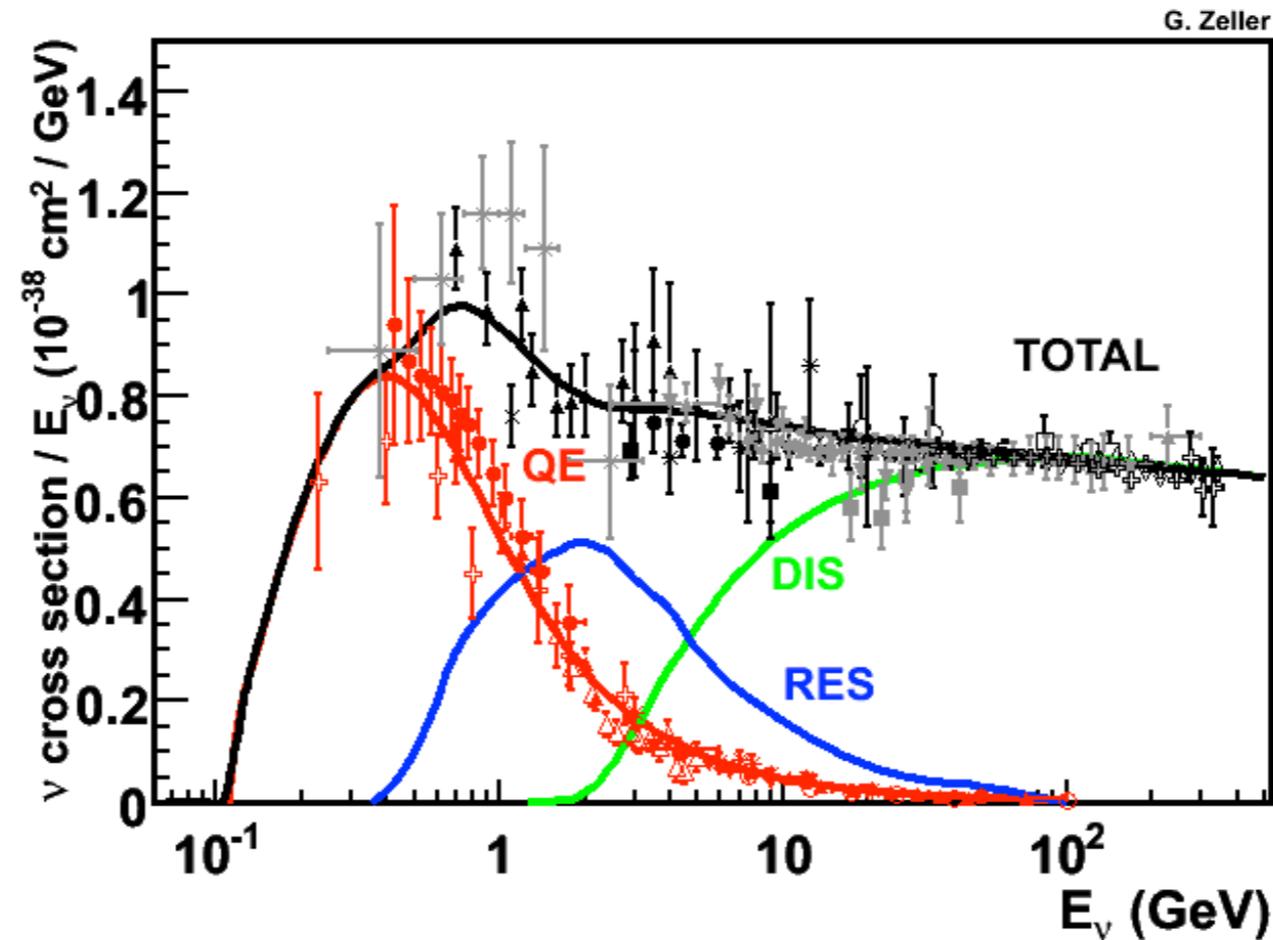


Interacción de neutrinos

$E_\nu < 100 \text{ MeV}$

Solar, SN, reactors

- Desintegración beta inversa
- Interacciones CC y NC con núcleos (deuterio, ^{12}C , ^{56}Fe , ^{71}Ga , ...)
- Scattering elástico
- σ bien conocida (1% o mejor)

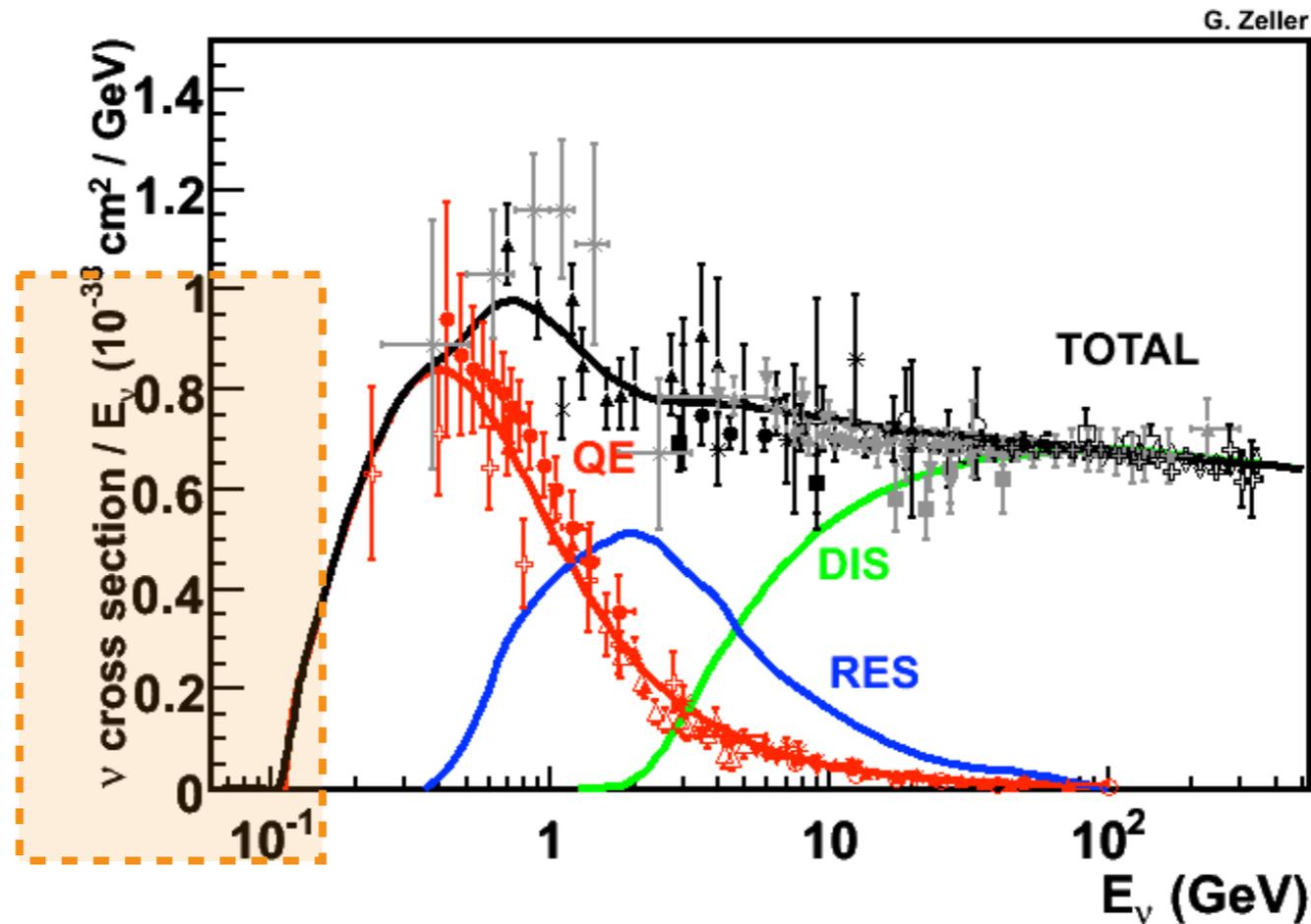


Interacción de neutrinos

$E_\nu < 100 \text{ MeV}$

Solar, SN, reactors

- Desintegración beta inversa
- Interacciones CC y NC con núcleos (deuterio, ^{12}C , ^{56}Fe , ^{71}Ga , ...)
- Scattering elástico
- σ bien conocida (1% o mejor)

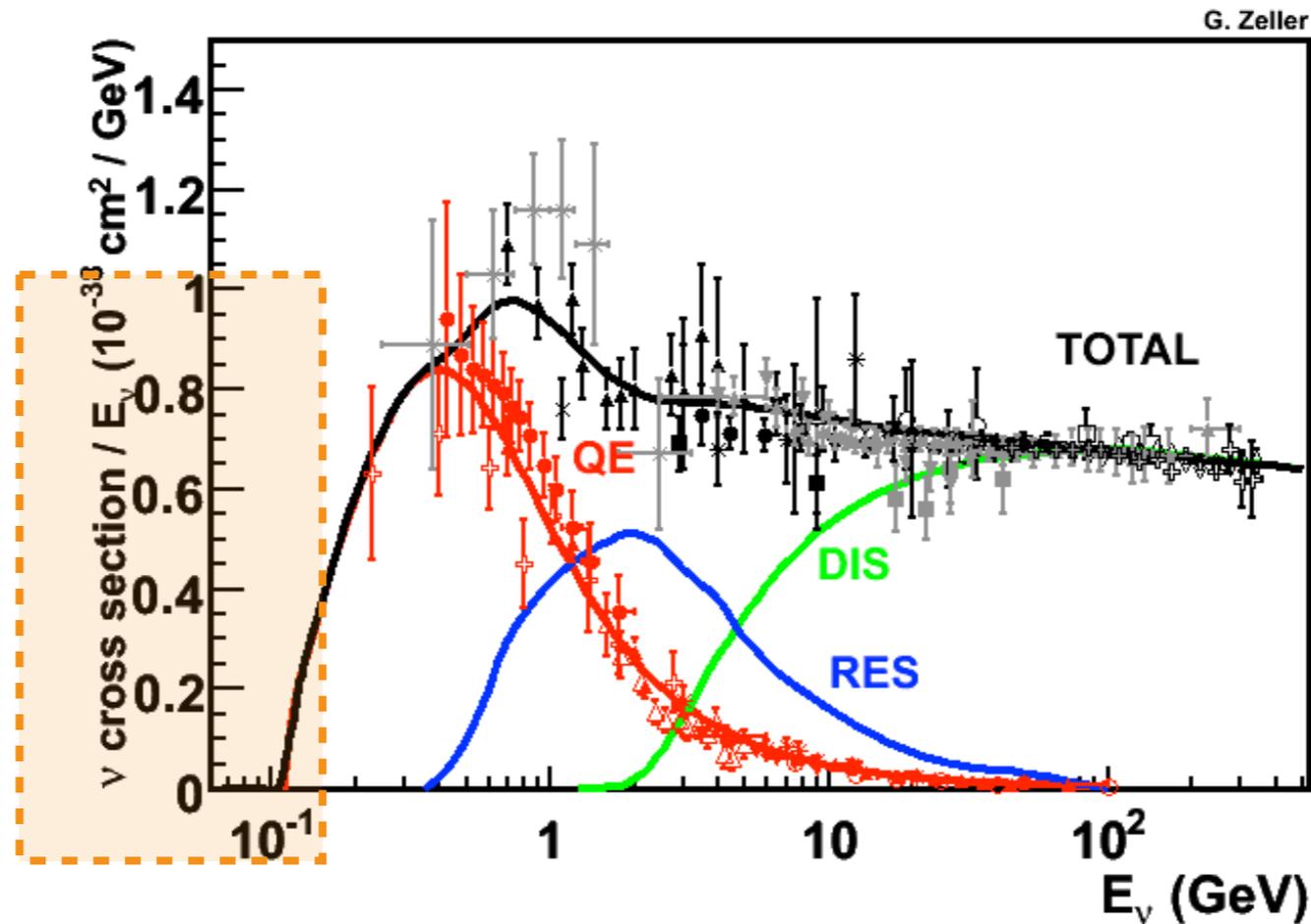


Interacción de neutrinos

$E_\nu < 100 \text{ MeV}$

Solar, SN, reactors

- Desintegración beta inversa
- Interacciones CC y NC con núcleos (deuterio, ^{12}C , ^{56}Fe , ^{71}Ga , ...)
- Scattering elástico
- σ bien conocida (1% o mejor)



$E_\nu > 100 \text{ GeV}$

Telescopios de ν 's

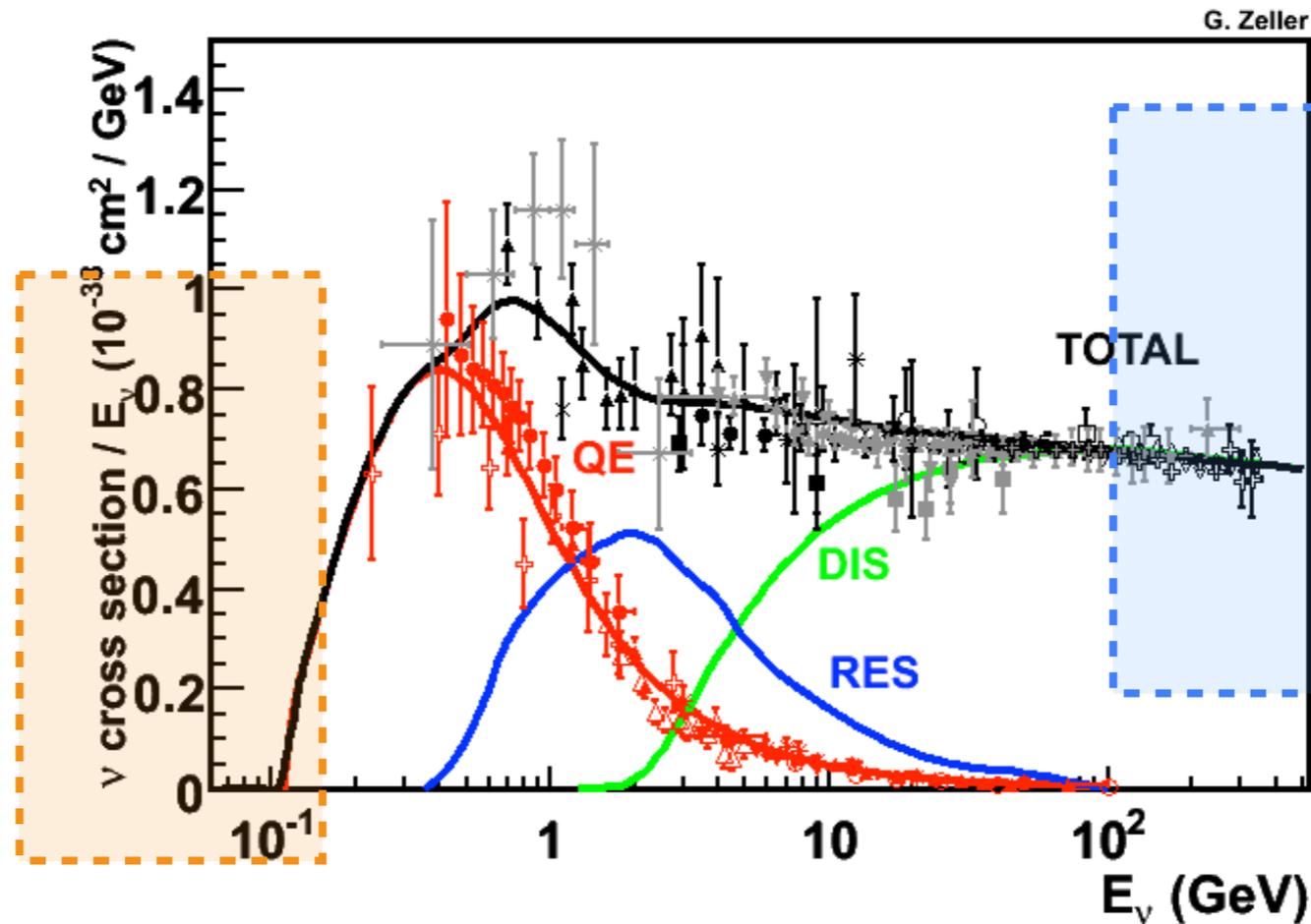
σ conocida con precisión (unos pocos %)

Interacción de neutrinos

$E_\nu < 100 \text{ MeV}$

Solar, SN, reactors

- Desintegración beta inversa
- Interacciones CC y NC con núcleos (deuterio, ^{12}C , ^{56}Fe , ^{71}Ga , ...)
- Scattering elástico
- σ bien conocida (1% o mejor)



$E_\nu > 100 \text{ GeV}$

Telescopios de ν 's

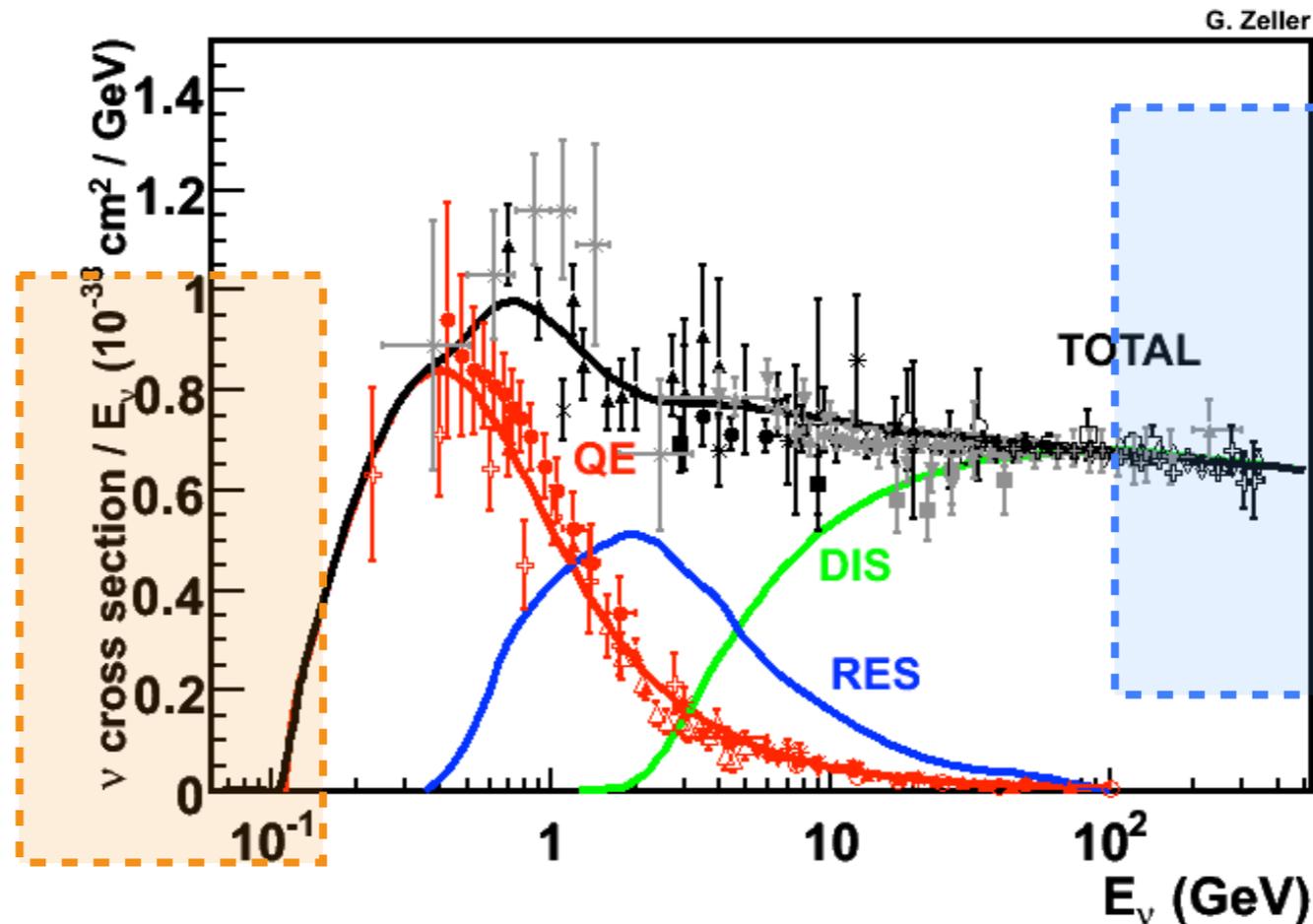
σ conocida con precisión (unos pocos %)

Interacción de neutrinos

$E_\nu < 100 \text{ MeV}$

Solar, SN, reactors

- Desintegración beta inversa
- Interacciones CC y NC con núcleos (deuterio, ^{12}C , ^{56}Fe , ^{71}Ga , ...)
- Scattering elástico
- σ bien conocida (1% o mejor)



$E_\nu \sim 1 \text{ GeV}$

Atmosféricos, aceleradores

σ poco conocida (20-40 %)

$E_\nu > 100 \text{ GeV}$

Telescopios de ν 's

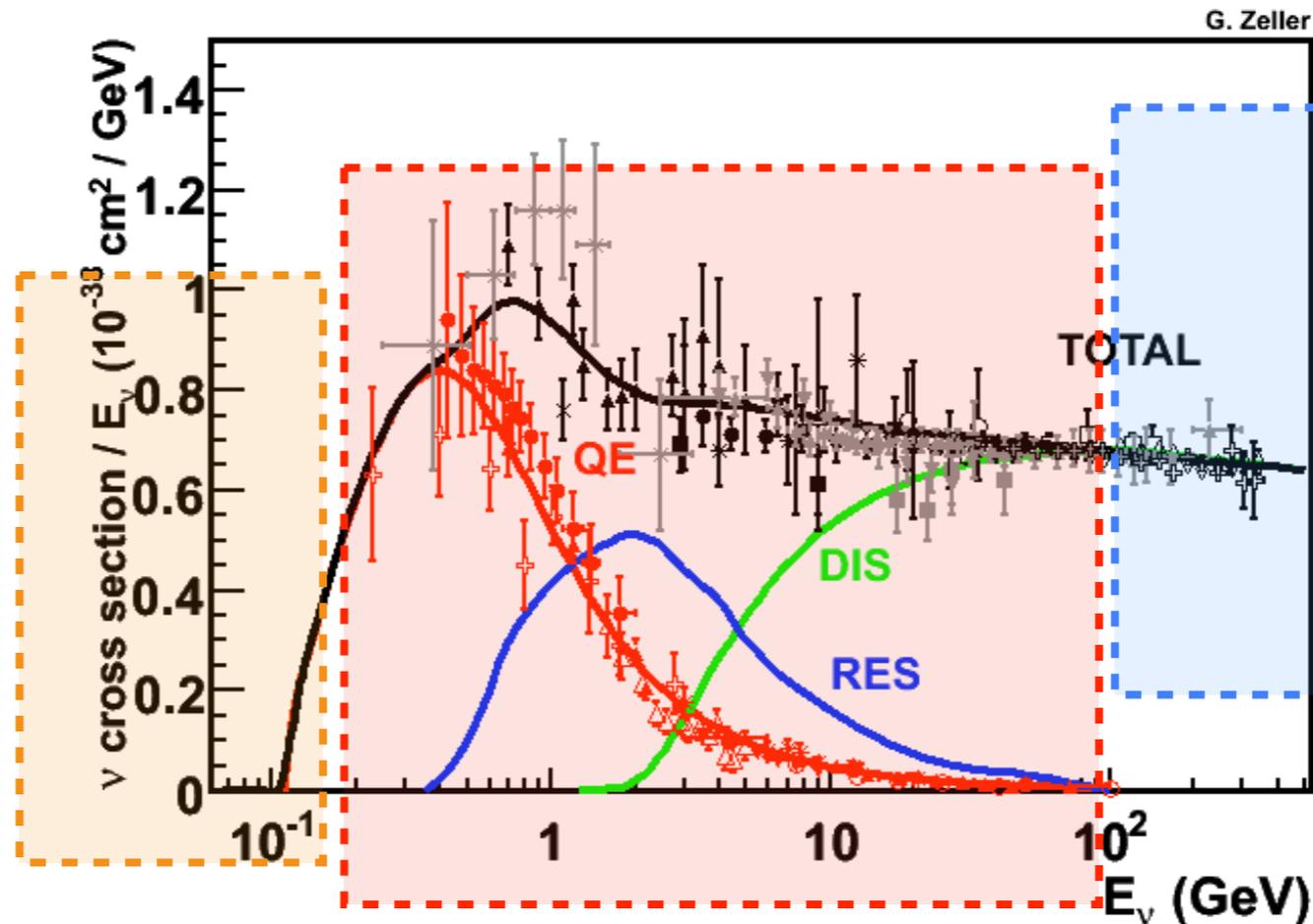
σ conocida con precisión (unos pocos %)

Interacción de neutrinos

$E_\nu < 100 \text{ MeV}$

Solar, SN, reactors

- Desintegración beta inversa
- Interacciones CC y NC con núcleos (deuterio, ^{12}C , ^{56}Fe , ^{71}Ga , ...)
- Scattering elástico
- σ bien conocida (1% o mejor)



$E_\nu \sim 1 \text{ GeV}$

Atmosféricos, aceleradores

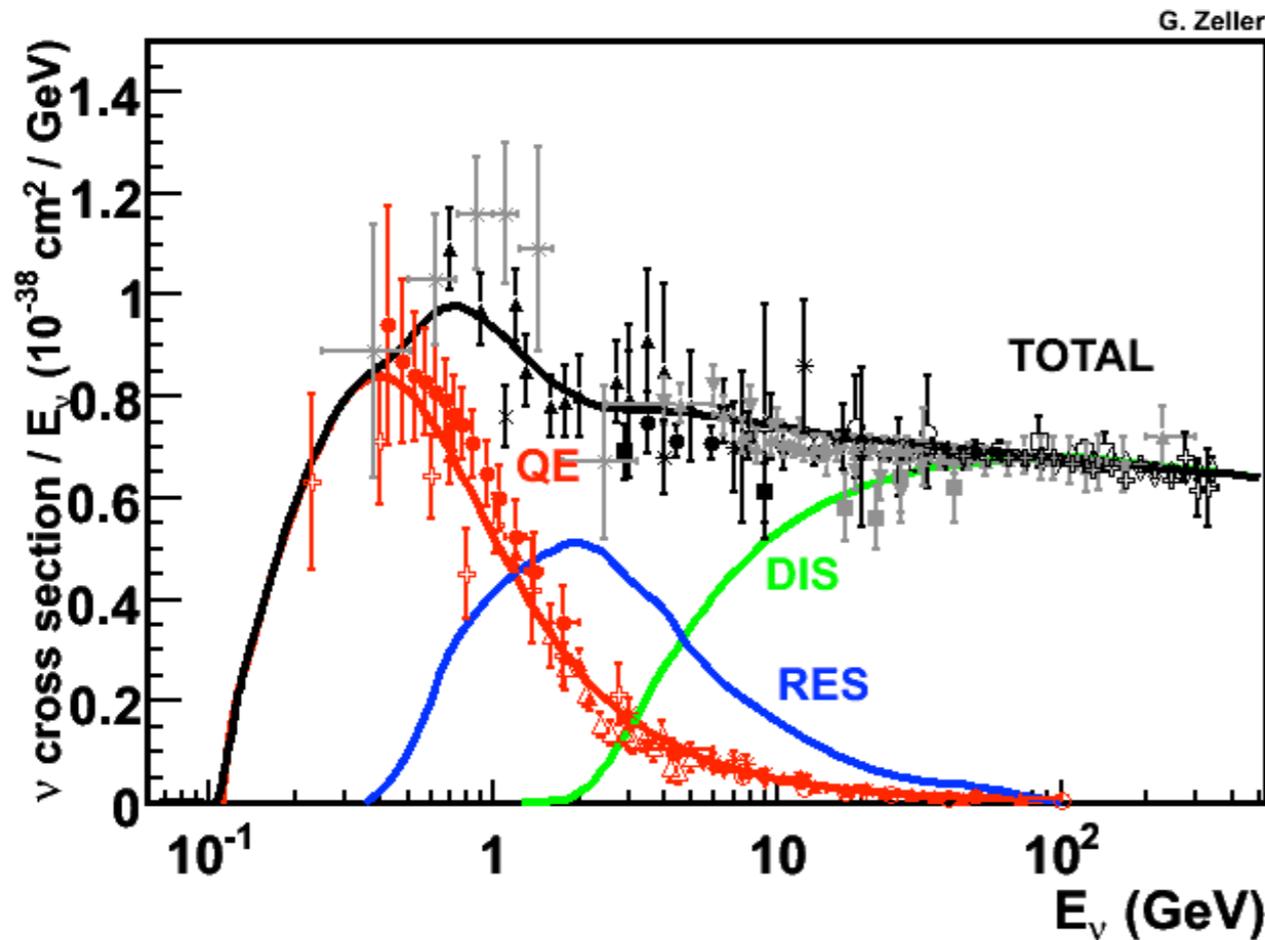
σ poco conocida (20-40 %)

$E_\nu > 100 \text{ GeV}$

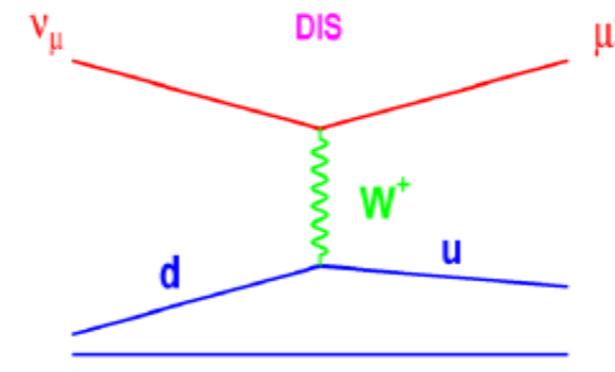
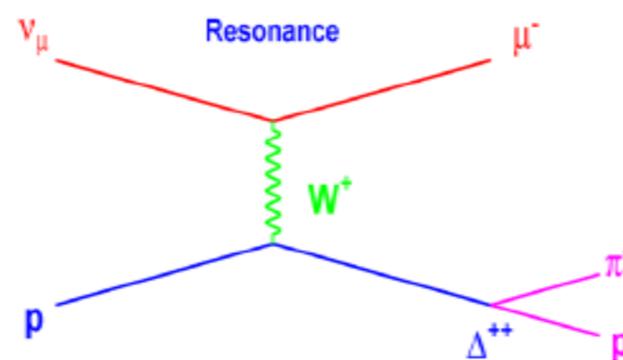
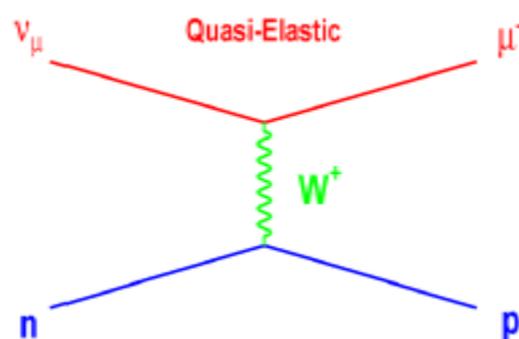
Telescopios de ν 's

σ conocida con precisión (unos pocos %)

Procesos a energías intermedias

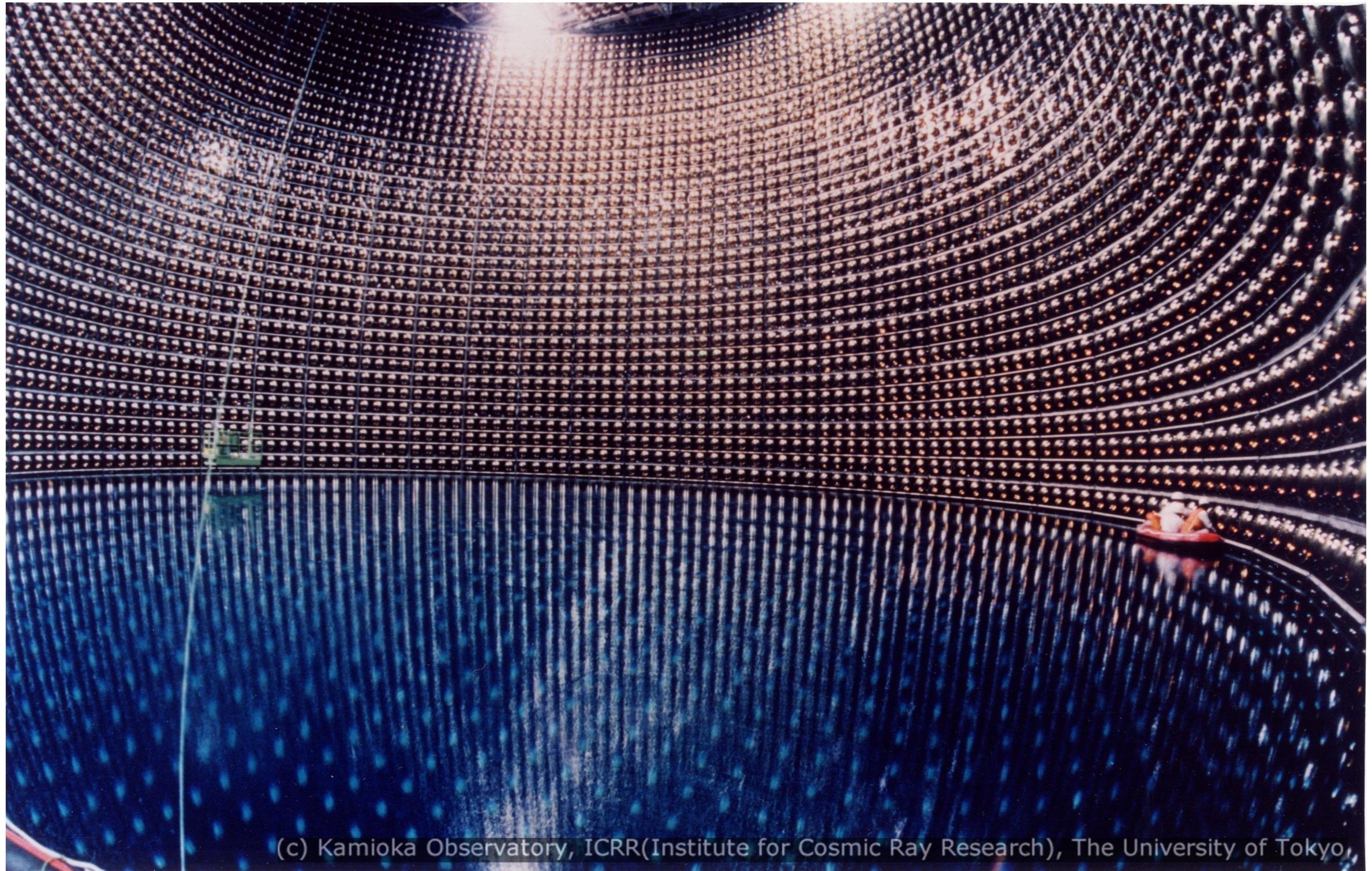


- quasi-elastic scattering (QE)
 $\nu_{\mu} n \rightarrow \mu p$
- single π production (RES)
 $\nu_{\mu} N \rightarrow \mu N' \pi$
- deep inelastic scattering (DIS)
 $\nu_{\mu} N \rightarrow \mu X$
- elastic ν -electron scattering
 $\nu_{\mu} e^{-} \rightarrow \nu_{\mu} e^{-}$ (not shown)



Trampas para neutrinos

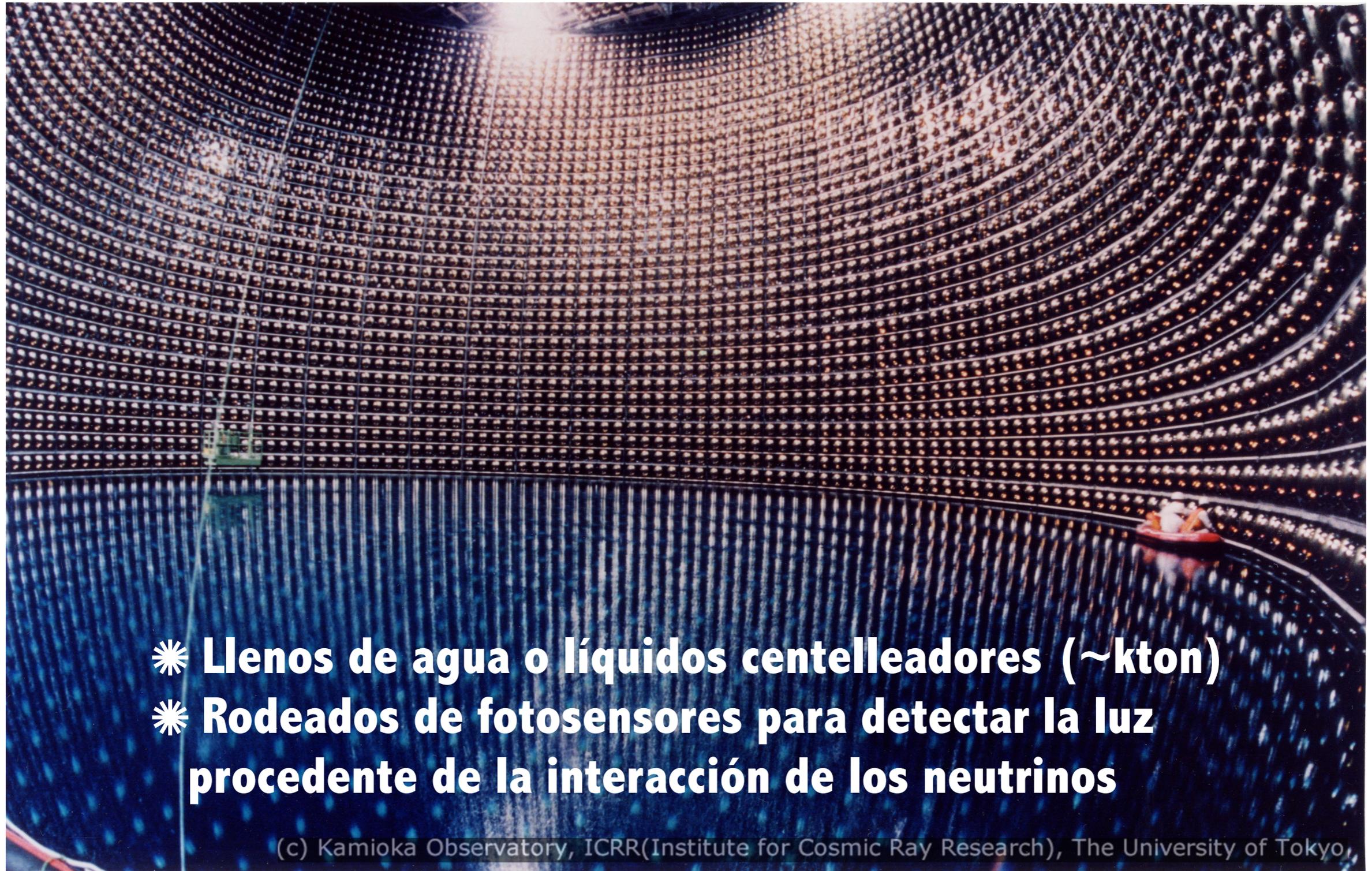
(I) Detectores gigantes



(c) Kamioka Observatory, ICRR(Institute for Cosmic Ray Research), The University of Tokyo,

Trampas para neutrinos

(I) Detectores gigantes



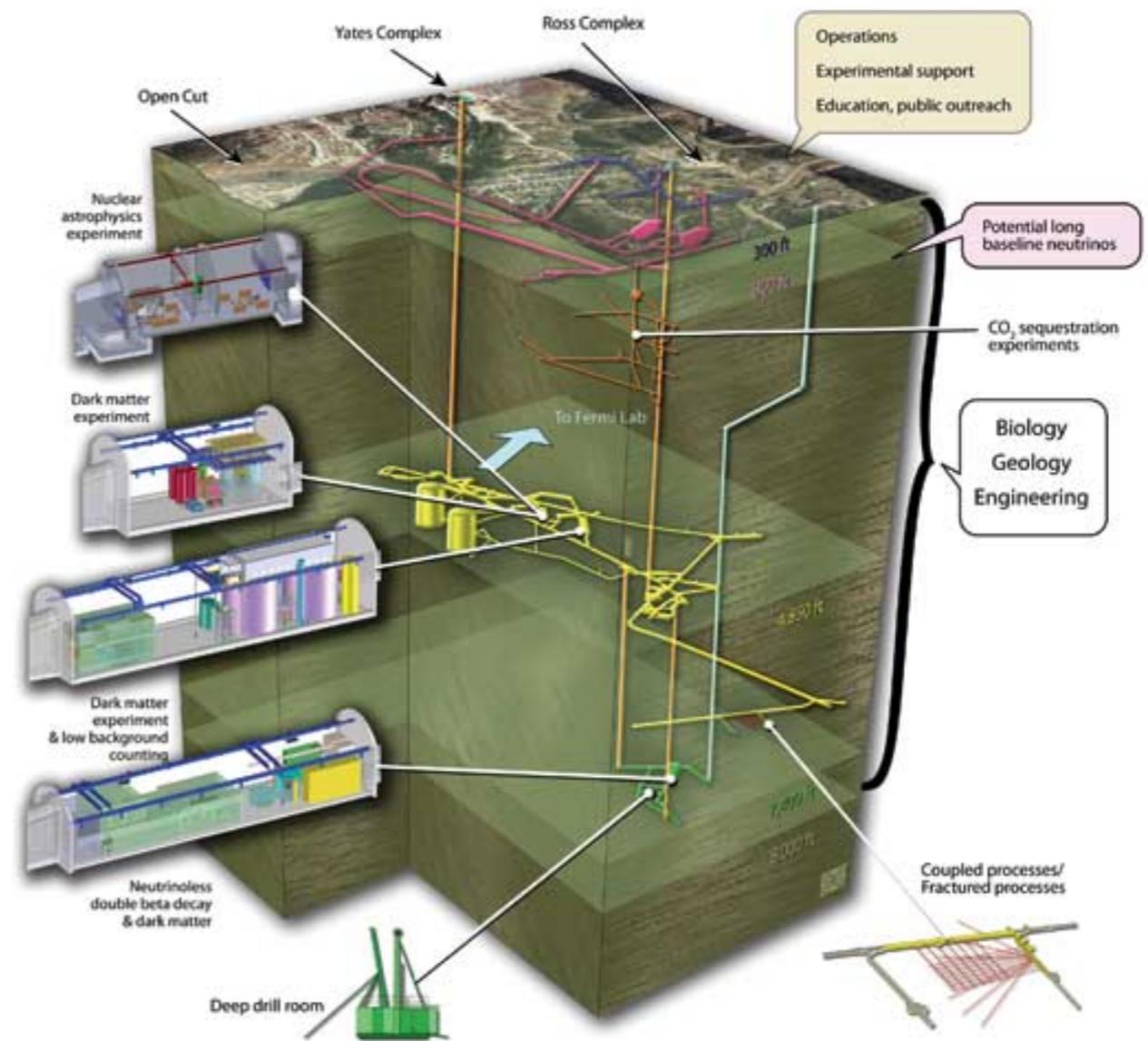
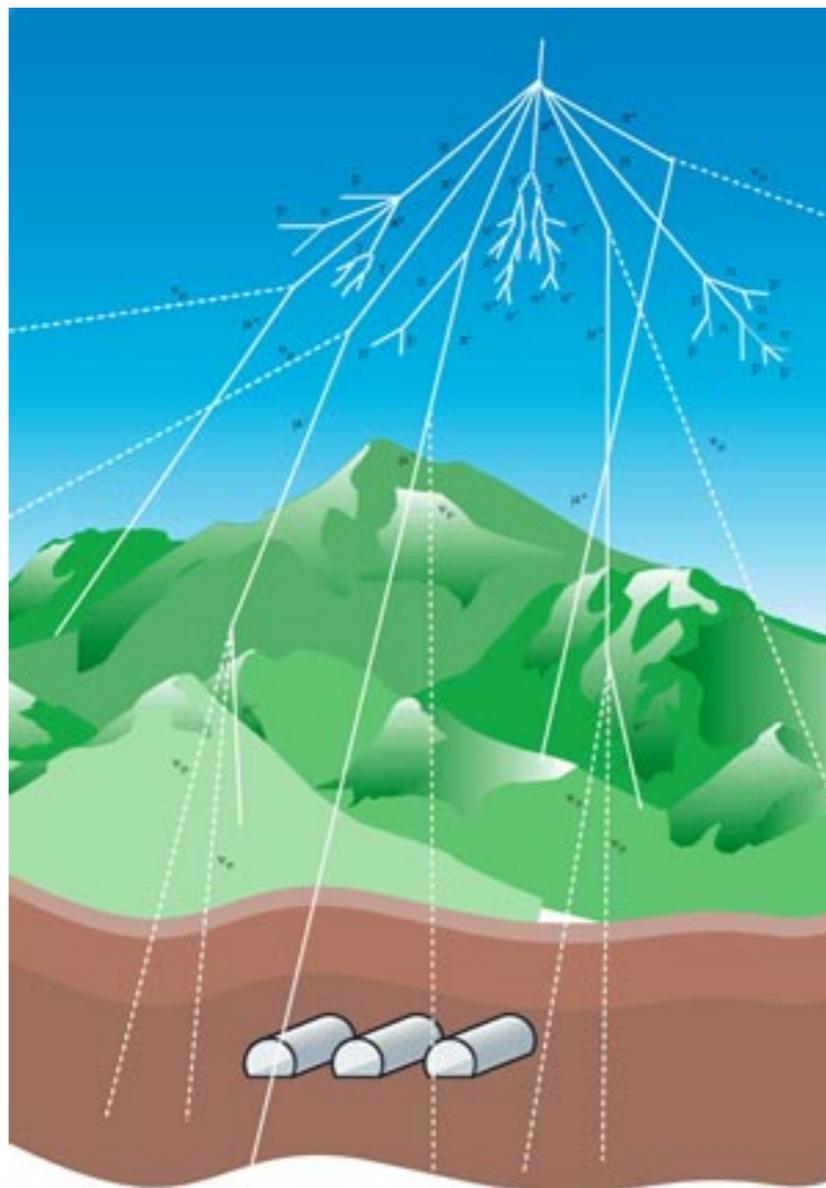
- ✱ Llenos de agua o líquidos centelleadores (~kton)
- ✱ Rodeados de fotosensores para detectar la luz procedente de la interacción de los neutrinos

(c) Kamioka Observatory, ICRR(Institute for Cosmic Ray Research), The University of Tokyo,

Trampas para neutrinos

(II) Laboratorios subterráneos

Detectores subterráneos en minas a la mayor profundidad posible para protegerse de los rayos cósmicos que continuamente nos atraviesan



Tecnologías de detectores de ν 's

- **Cámaras de burbujas y de chispas**
 - ▶ Primeras fotos de neutrinos
- **Experimentos radioquímicos** (Homestake, GALLEX, SAGE, ...)
 - ▶ No proporcionan sucesos en tiempo real
- **Detectores Cerenkov:**
 - ▶ Mejores para baja tasa, baja multiplicidad, energías por debajo del GeV (y del orden del TeV)
- **Calorímetros de trazas:**
 - ▶ Alta tasa y multiplicidad, energías en torno al GeV y superiores
- **Centelleadores no segmentados:**
 - ▶ Generan mucha luz para energías en torno al MeV
- **Emulsiones:**
 - ▶ Alta resolución espacial, detección directa del vértice primario
- **TPC de argón líquido:**
 - ▶ Alta granularidad con potencial para grandes masas

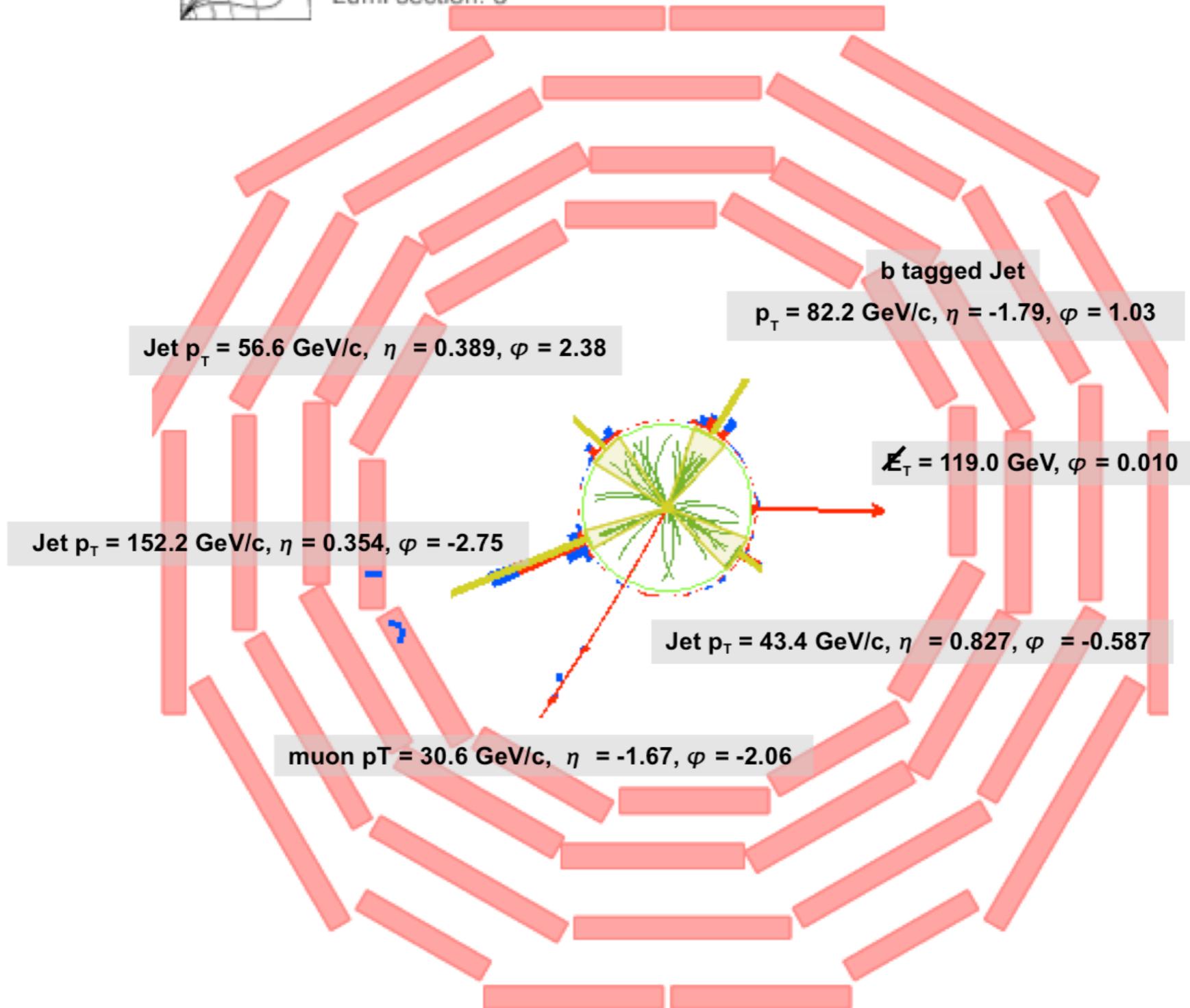
Fotos de neutrinos

- 1) Neutrinos en CMS
- 2) Corrientes neutras en el CERN
- 3) Anillos Cerenkov
- 4) PMTs tocados en centelleadores líquidos
- 5) Trazas en T2K, OPERA, ICARUS
- 6) Neutrinos ultraenergéticos

Neutrinos en CMS → INVISIBLES



CMS Experiment at LHC, CERN
Data recorded: Wed Jul 14 03:32:41 2010 CEST
Run/Event: 140124 / 1749068
Lumi section: 3

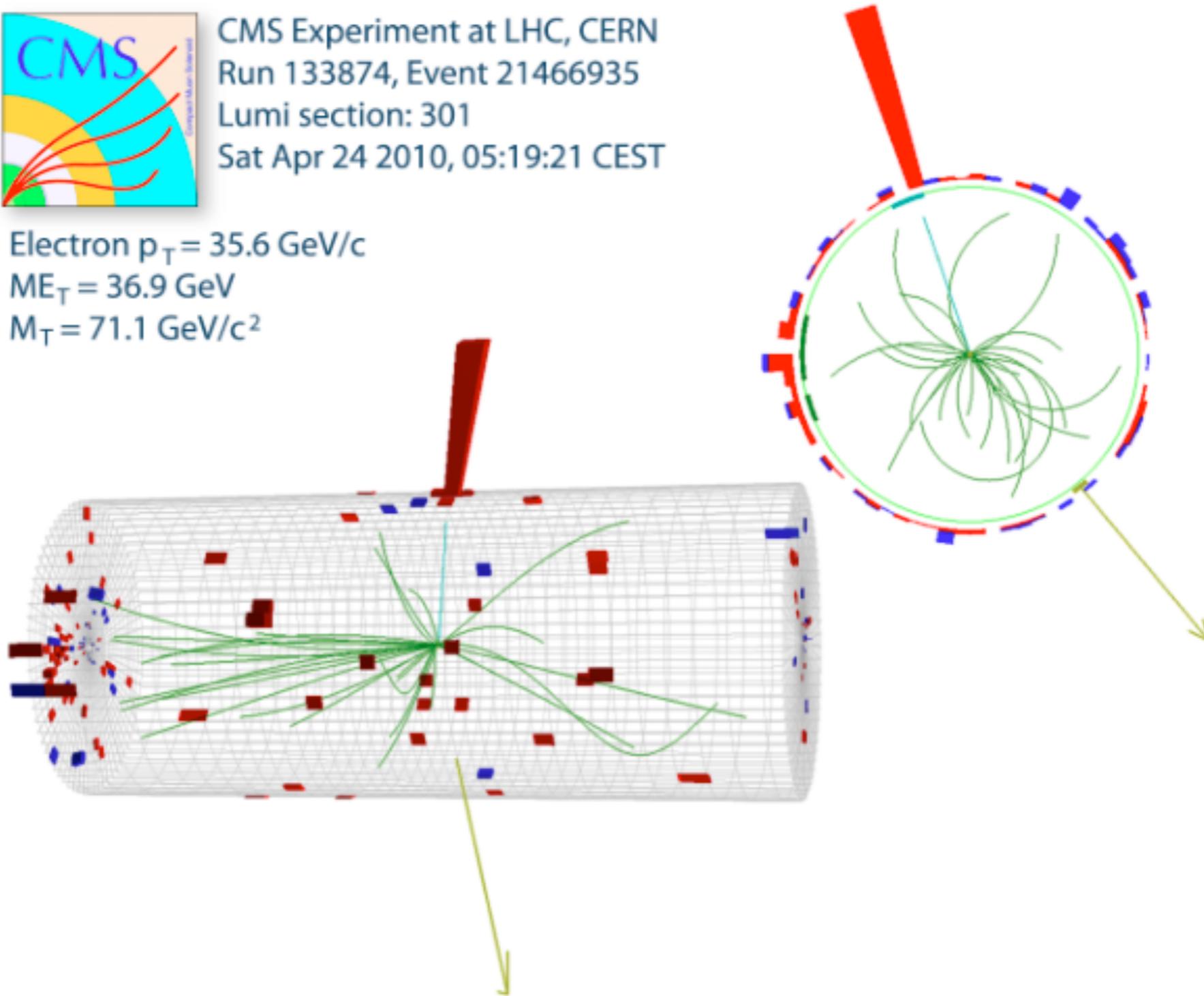


Neutrinos en CMS → INVISIBLES

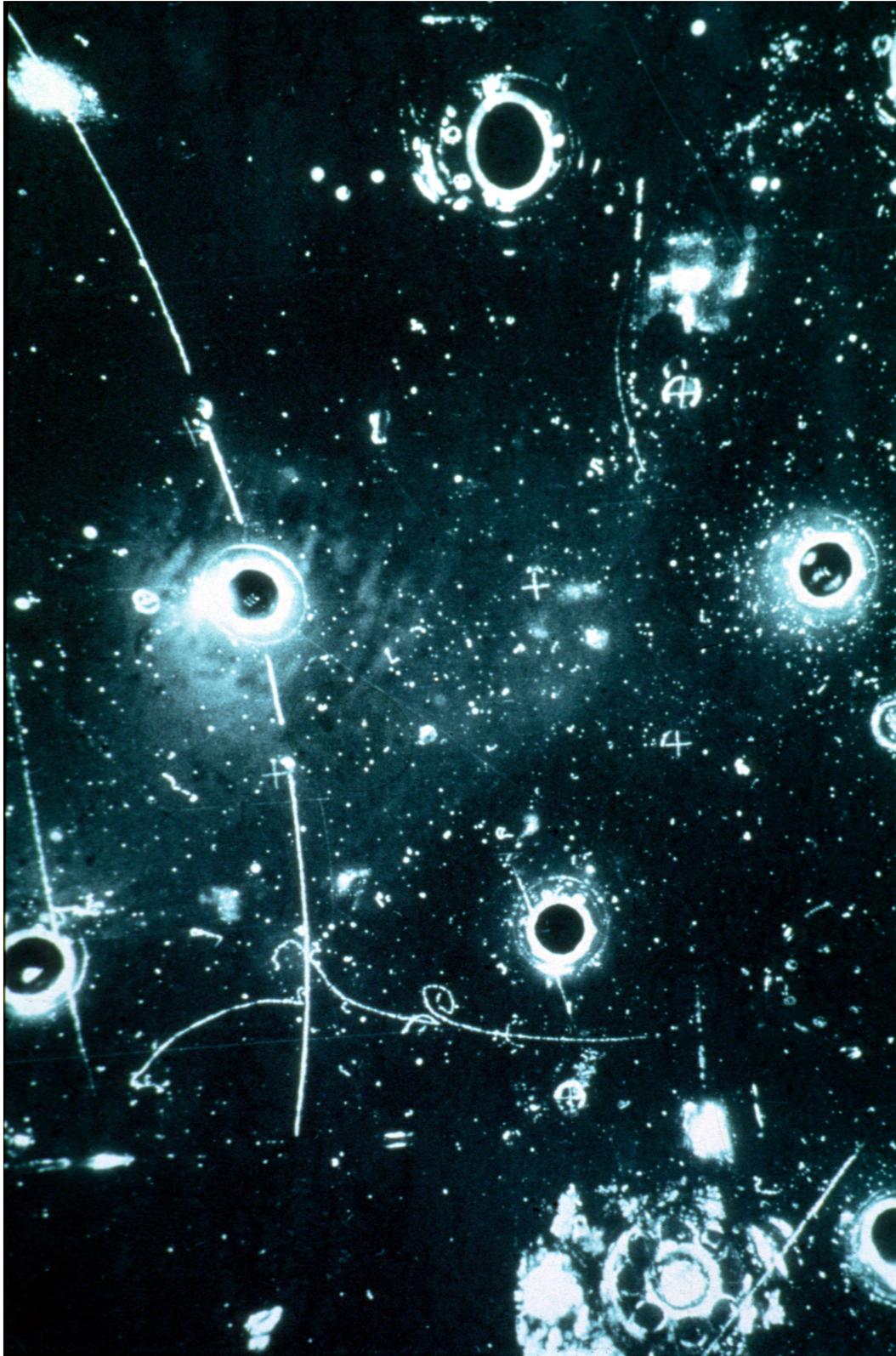


CMS Experiment at LHC, CERN
Run 133874, Event 21466935
Lumi section: 301
Sat Apr 24 2010, 05:19:21 CEST

Electron $p_T = 35.6$ GeV/c
 $ME_T = 36.9$ GeV
 $M_T = 71.1$ GeV/c²



Corrientes neutras

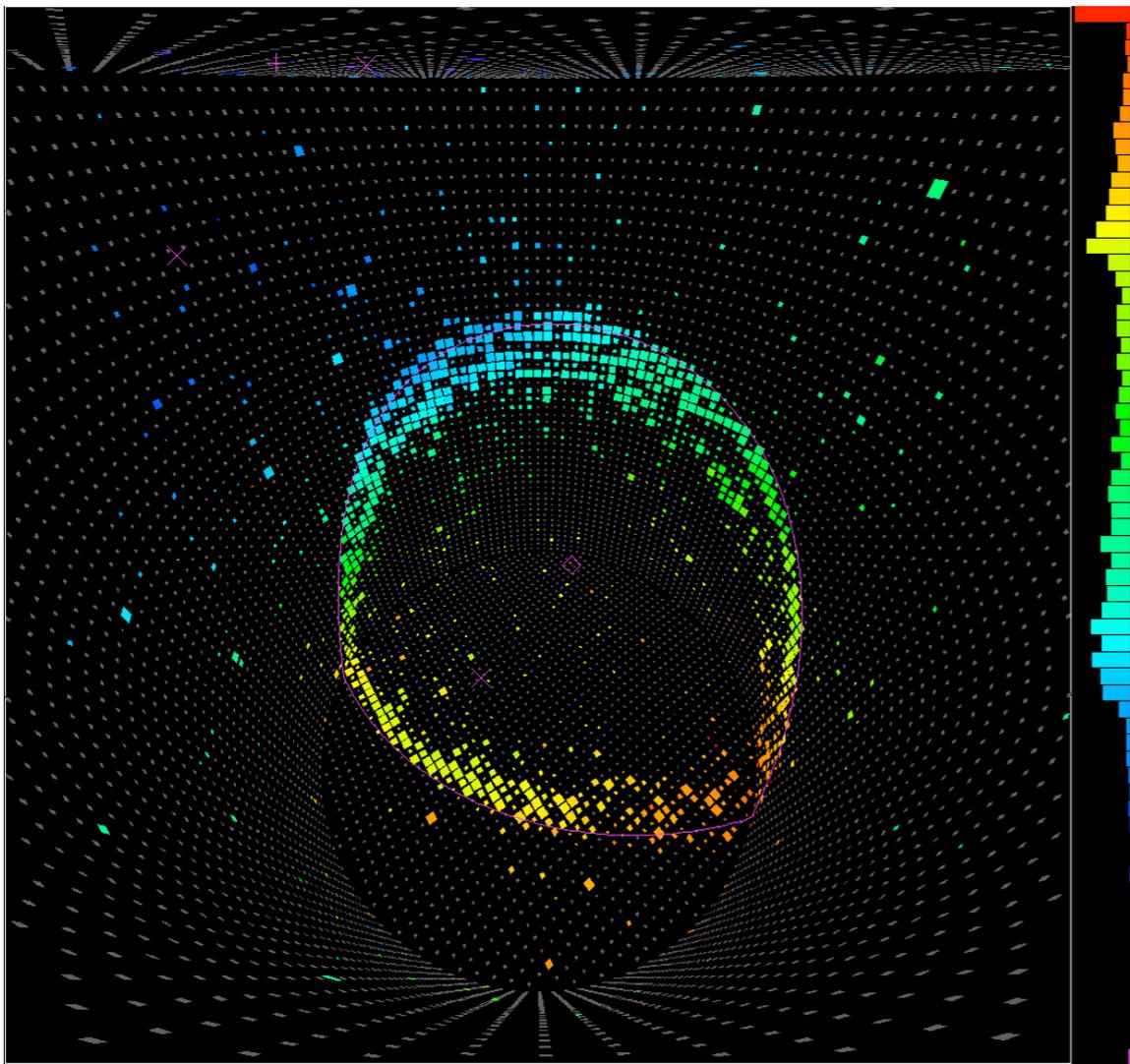


- Primer suceso candidato a corrientes neutras leptónicas del experimento Gargamelle del CERN (cámara de burbujas)

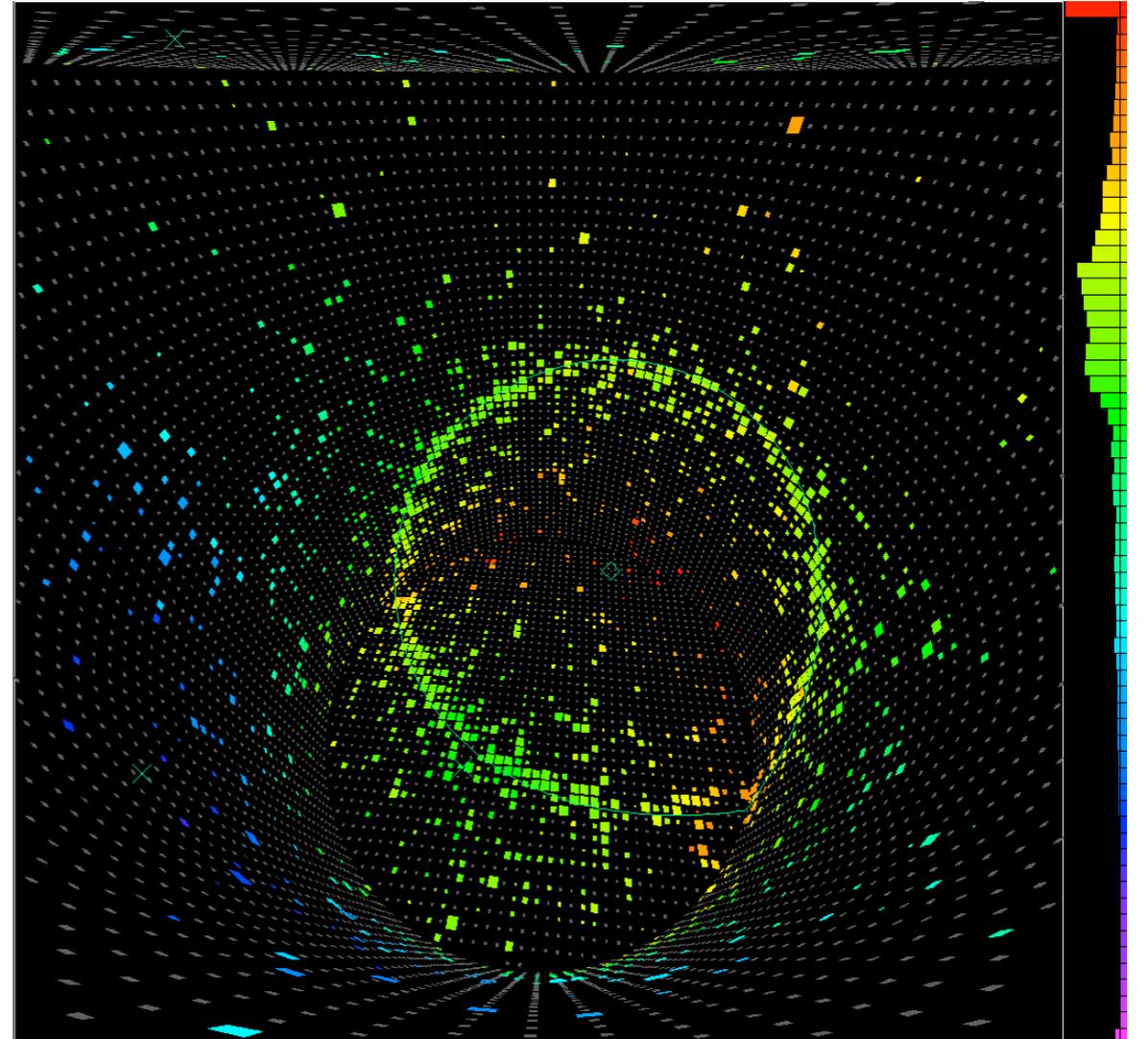
$$\nu_{\mu} e^{-} \rightarrow \nu_{\mu} e^{-}$$

- Gran avance en la comprensión de la fuerza electrodébil y de la estructura del Modelo Estándar

Anillos de Cerenkov

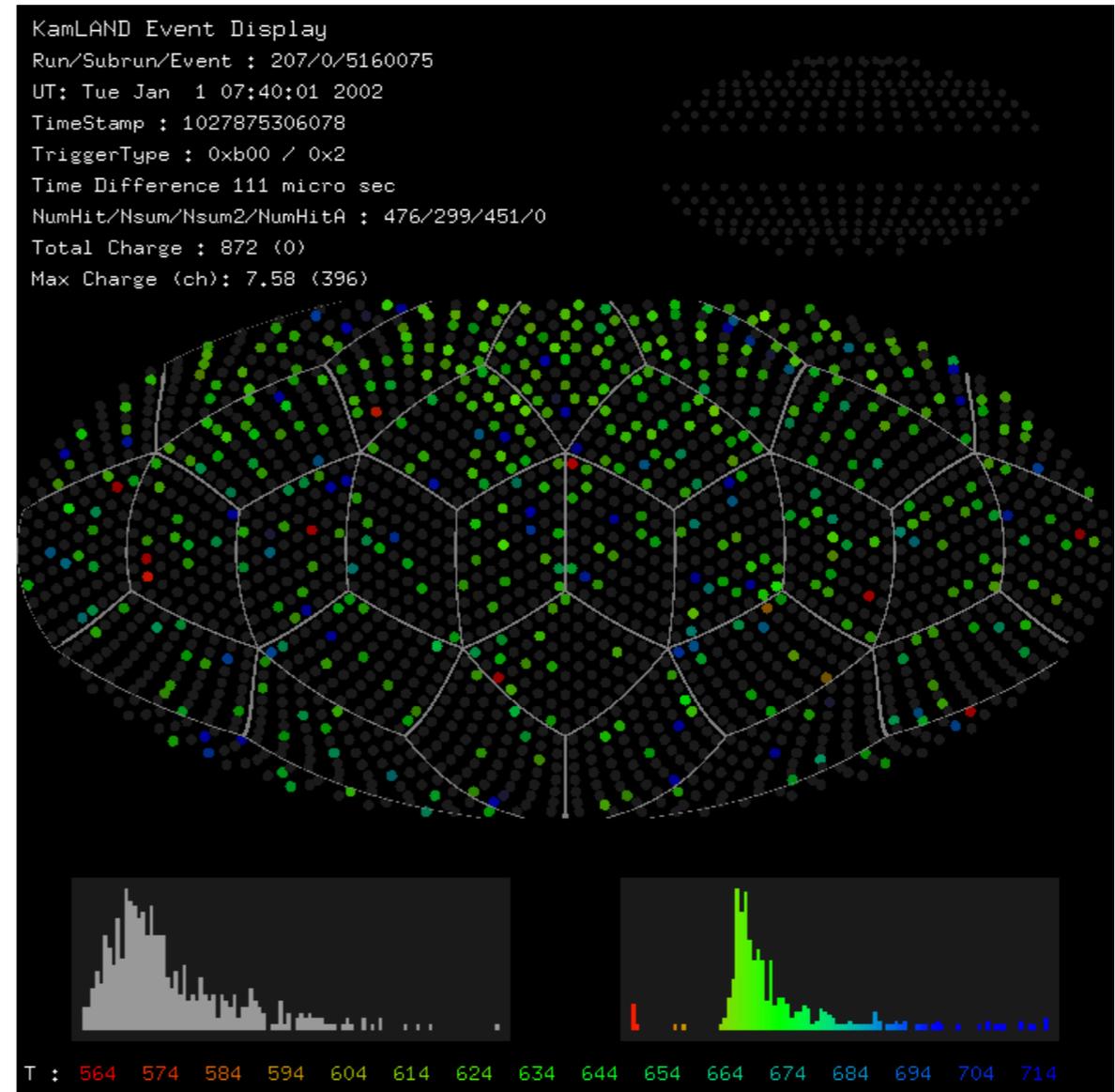
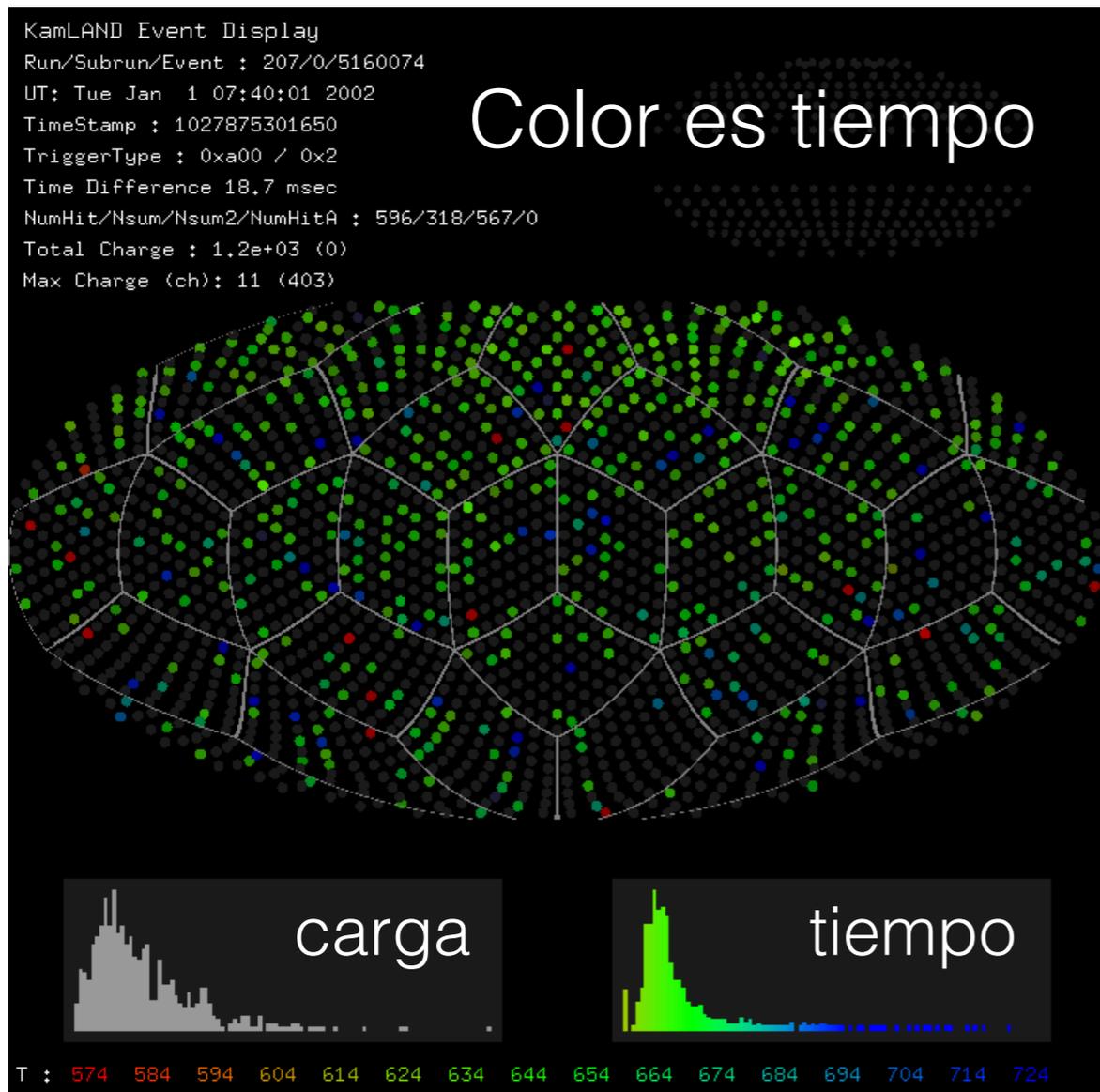


$$p_{\mu} = 603 \text{ MeV}$$



$$p_e = 492 \text{ MeV}$$

Neutrinos en centelleadores líquidos

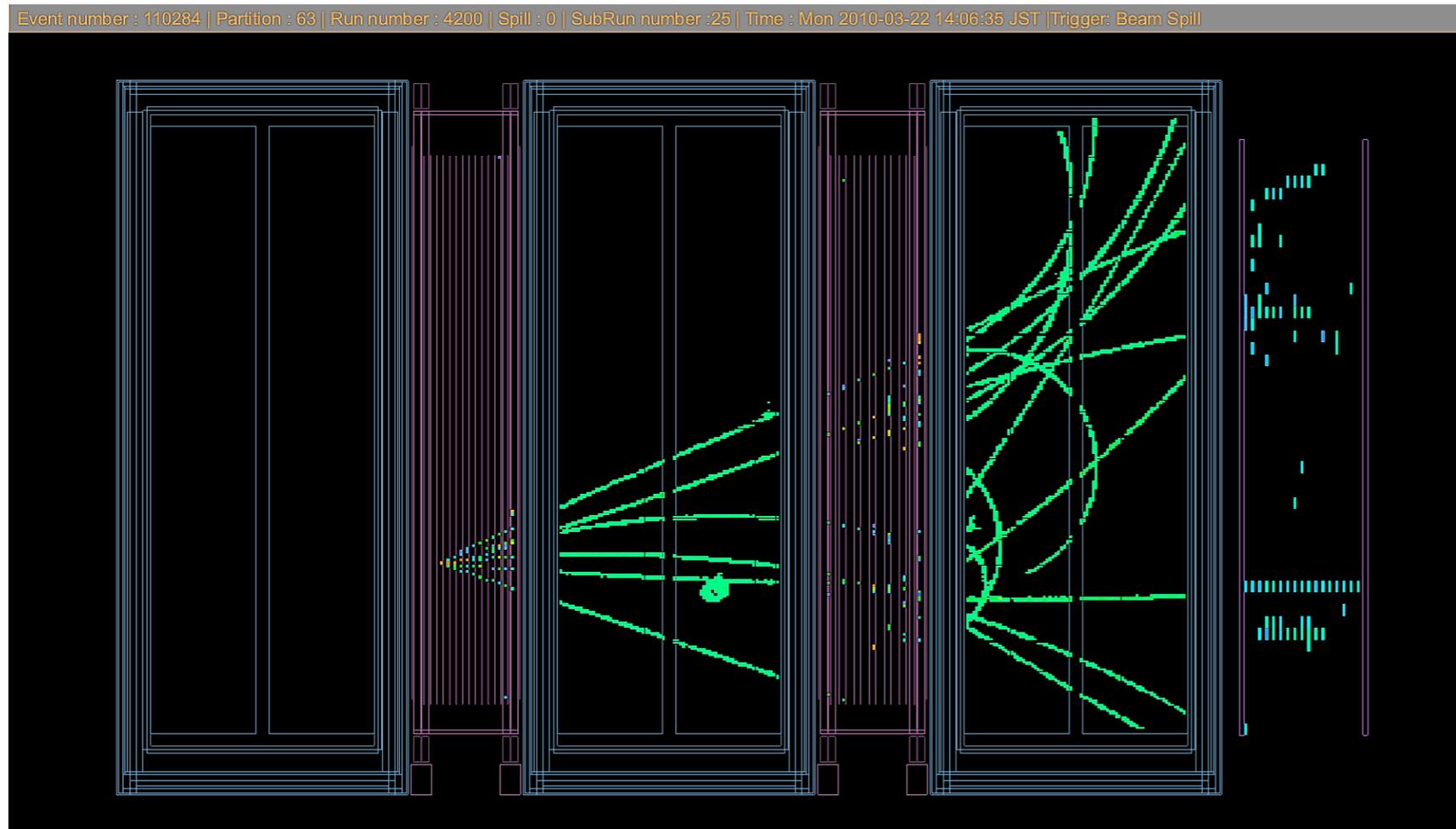


Señal rápida
 $E = 3.20 \text{ MeV}$

$$\Delta T = 111 \mu\text{s}$$
$$\Delta R = 34 \text{ cm}$$

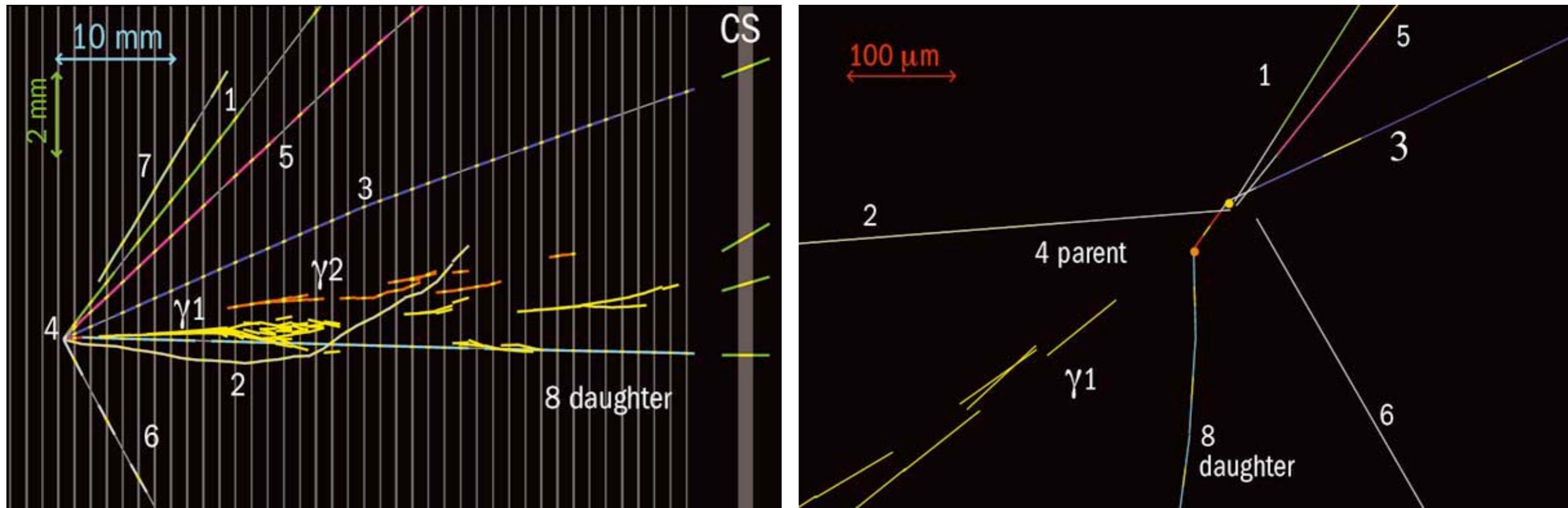
Señal lenta
 $E = 2.22 \text{ MeV}$

Neutrinos en T2K



- Trazas de las partículas cargadas producidas por la interacción de un neutrino en el detector cercano de T2K

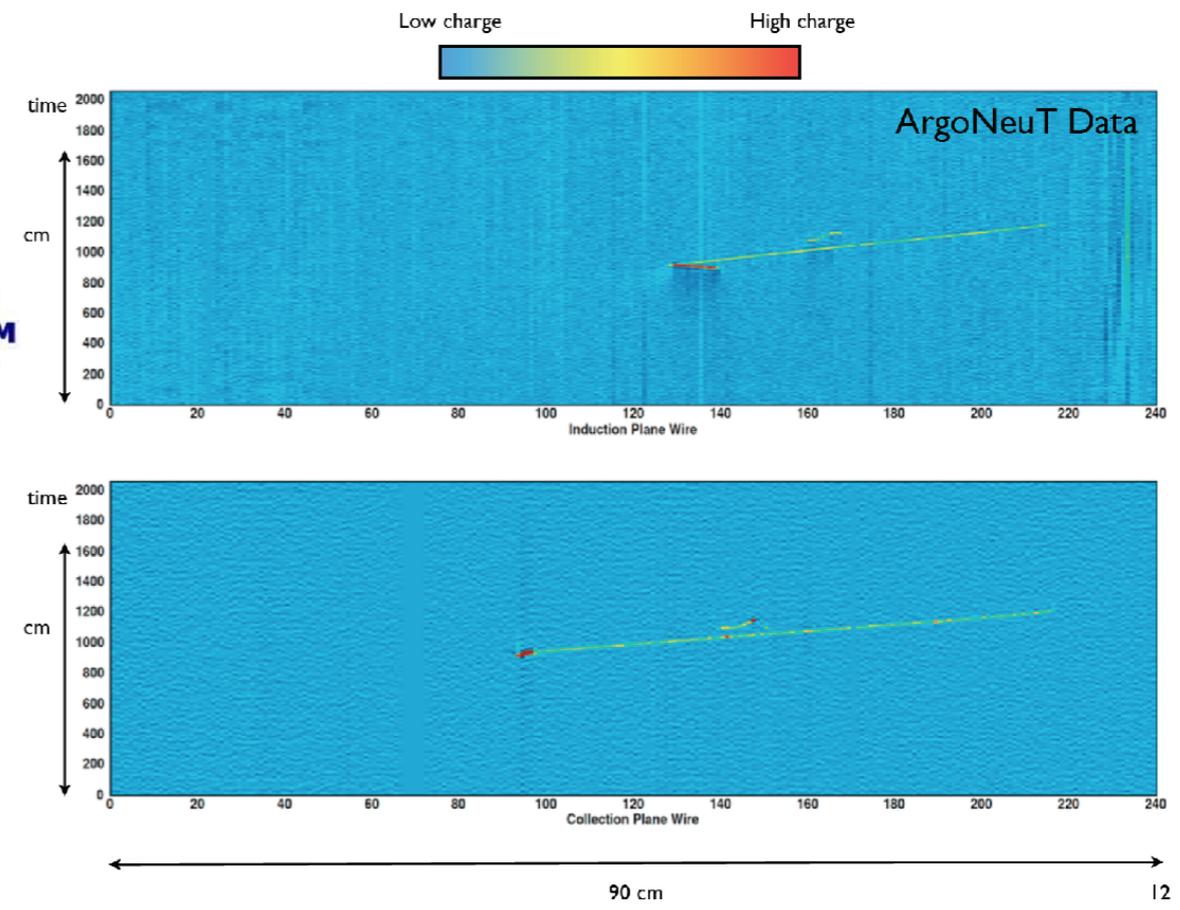
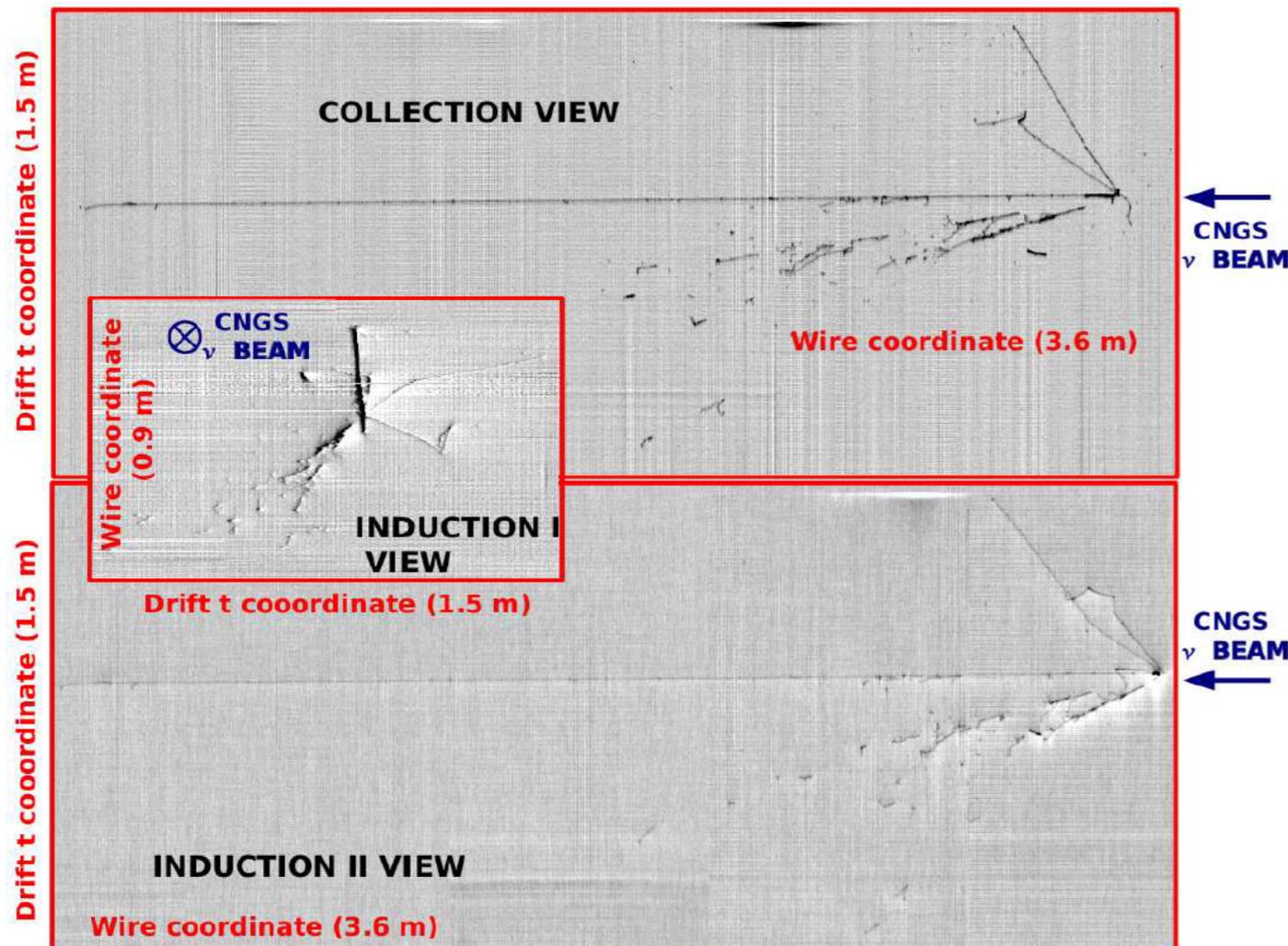
Neutrinos en OPERA



- Detector especialmente diseñado para detectar la interacción de los neutrinos del tau

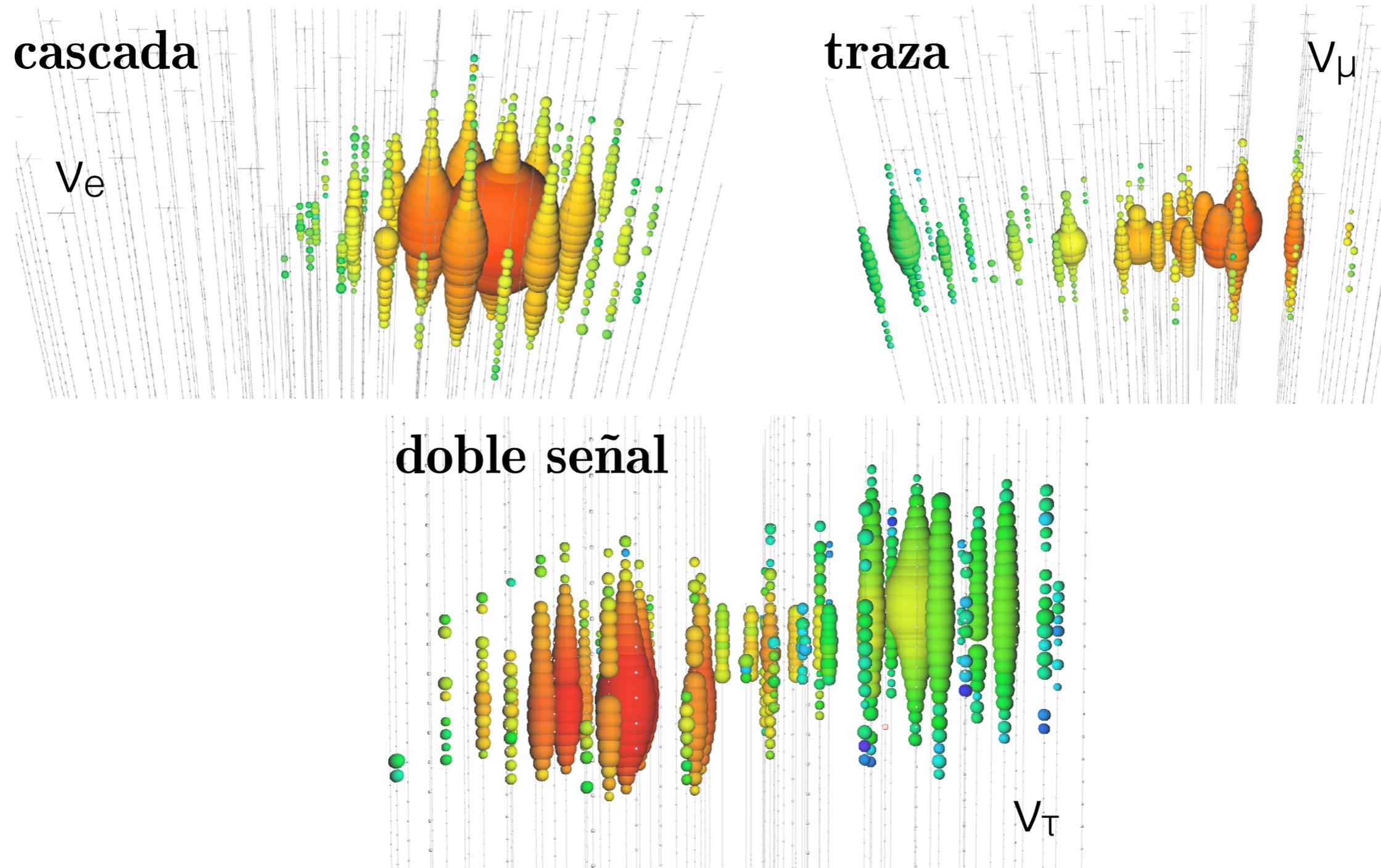
Neutrinos en detectores de LAr

ν_μ CC event detected by ICARUS from the CNGS beam



CCQE event: $\nu_\mu n \rightarrow \mu p$

Neutrinos de muy alta energía





3

Magnitudes físicas

Observables y cantidades fundamentales

❖ Masa: **casí nula**

- No se ha conseguido medir de manera directa. Sólo existen límites superiores de experimentos en el laboratorio y de observaciones cosmológicas
- Se sabe que es distinta de cero por la medida de las oscilaciones

❖ Carga: **nula**

- Límites experimentales derivados del momento magnético del neutrino ($< 10^{-12} q_e$ para ν_e ; $< 10^{-4} q_e$ para ν_τ)
- Límites experimentales derivados de medidas astrofísicas ($< 10^{-13} - 10^{-15} q_e$)

❖ Espín (momento angular intrínseco): **1/2**

- Medido con las distribuciones angulares en procesos de desintegración o scattering

PDG 2014

PDG K.A. Olive et al., Chin. Phys. C, 38, 090001 (2014)

Mass $m < 2$ eV (tritium decay)
Mean life/mass, $\tau/m > 300$ s/eV, CL = 90% (reactor)
Mean life/mass, $\tau/m > 7 \times 10^9$ s/eV (solar)
Mean life/mass, $\tau/m > 15.4$ s/eV, CL = 90% (accelerator)
Magnetic moment $\mu < 0.29 \times 10^{-10} \mu_B$, CL = 90% (reactor)

- **Mejores límites experimentales:**

- Masa del neutrino del electrón

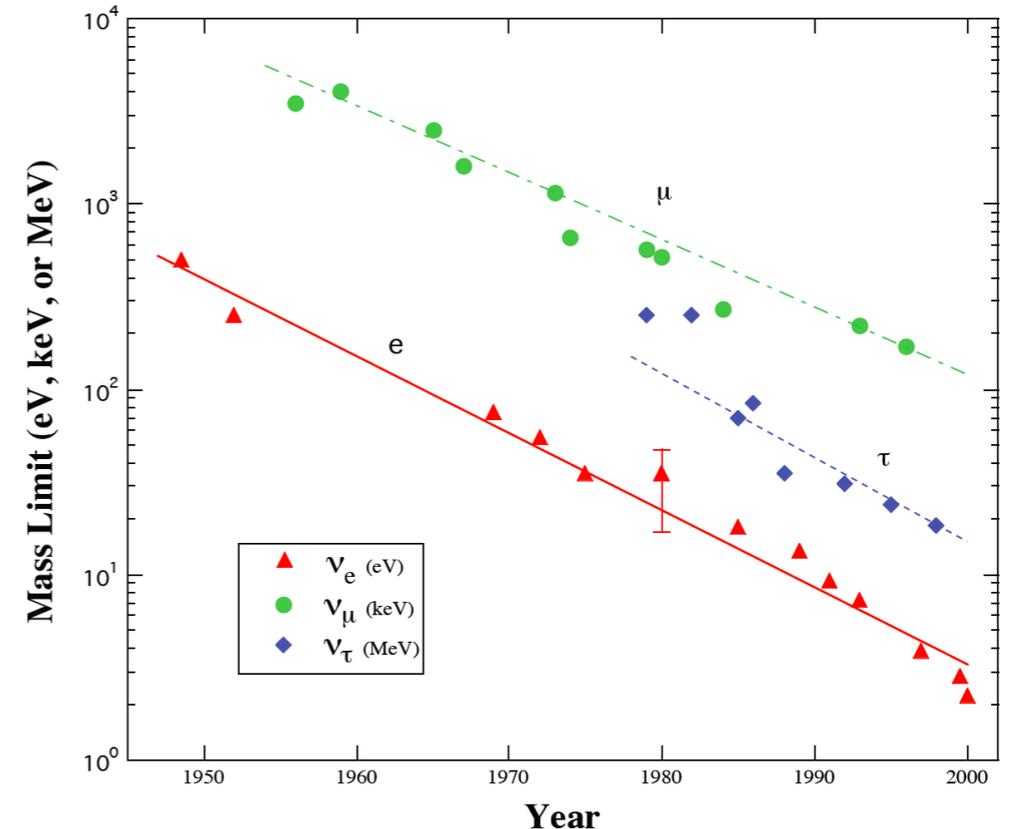
- ${}^3\text{H} \rightarrow {}^3\text{He} + e^- + \nu_e$ MAINZ $m(\nu_e) < 2.2$ eV

- Masa del neutrino del muón

- $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$ PSI $m(\nu_\mu) < 170$ keV

- Masa del neutrino del tau

- $\tau \rightarrow 5\pi \nu_\tau$ LEP $m(\nu_\tau) < 18.2$ MeV



Points without error bars are upper limits

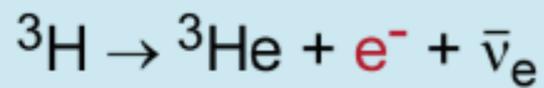
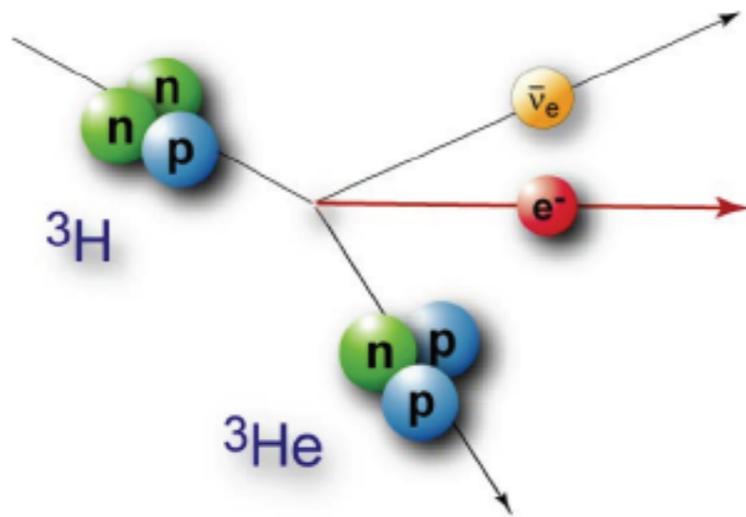
Medida de la masa

KATRIN: objetivo $m_\nu < 0.2$ eV (90% CL)

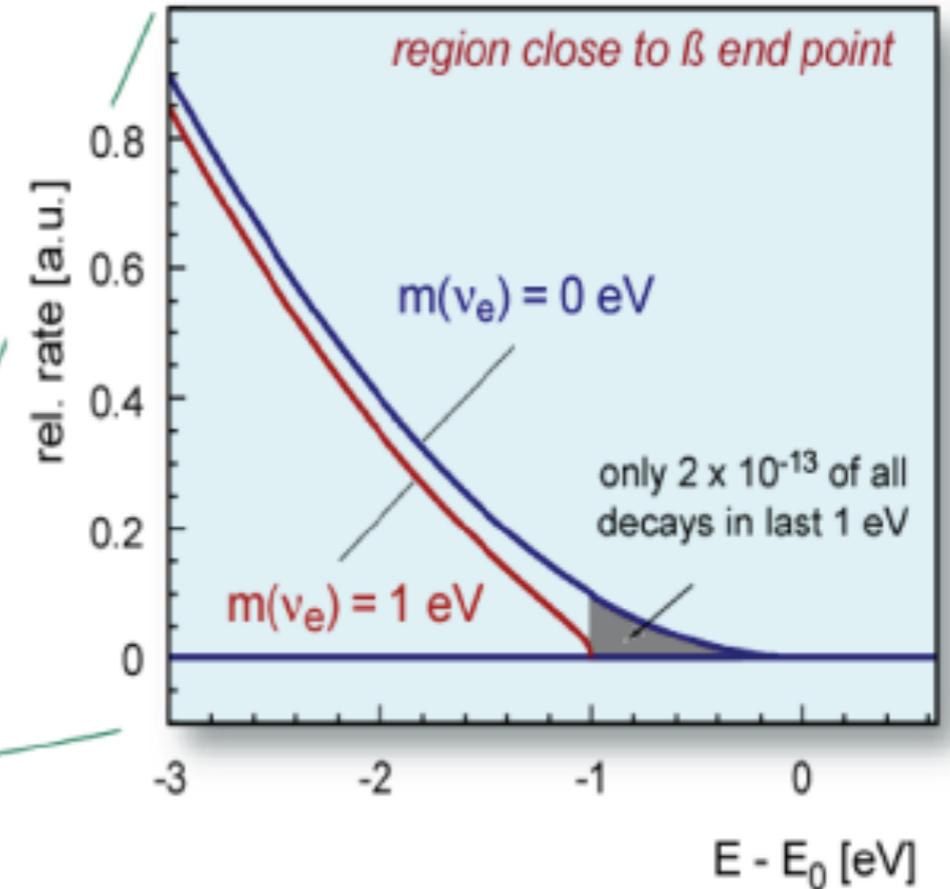
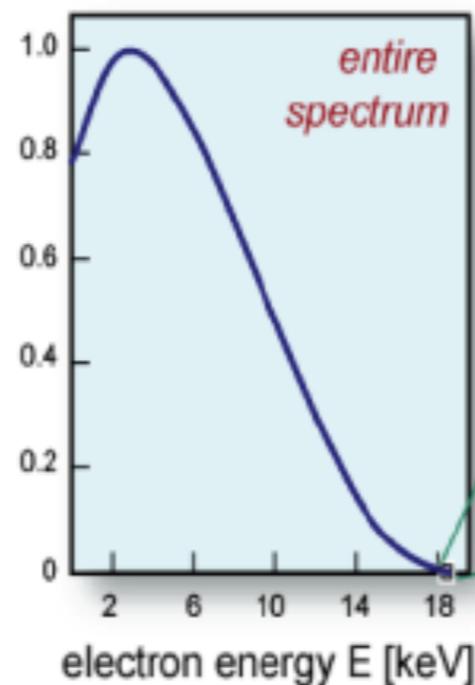


Búsqueda de una distorsión en la forma del espectro de la desintegración beta en la región cerca del punto final

$$N(E_e) \propto p_e E_e (E_0 - E_e) \sqrt{(E_0 - E_e)^2 - m_\nu^2 c^4}$$

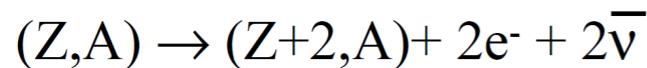
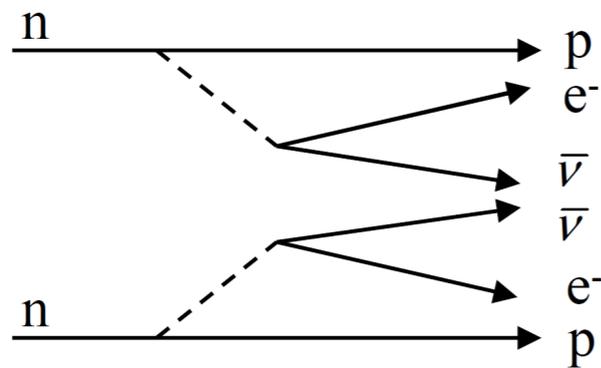


$$m_{\nu_e}^2 = \sum_i |U_{ei}|^2 \cdot m_{\nu_i}^2$$



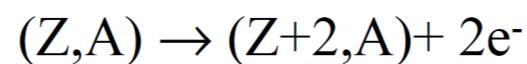
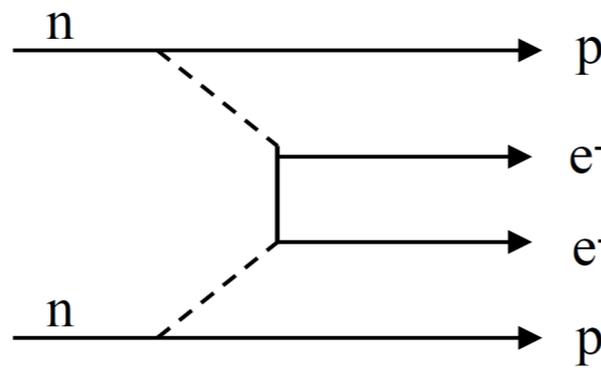
Experimentos de doble beta

$2\nu\beta\beta$ decay



$$T_{1/2} \sim 10^{21} \text{y}$$

$0\nu\beta\beta$ decay



$$T_{1/2} > 10^{25} \text{y}$$

$$\frac{1}{T_{1/2}} = G |M|^2 \langle m_{\beta\beta} \rangle^2$$

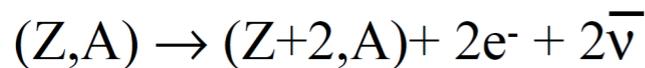
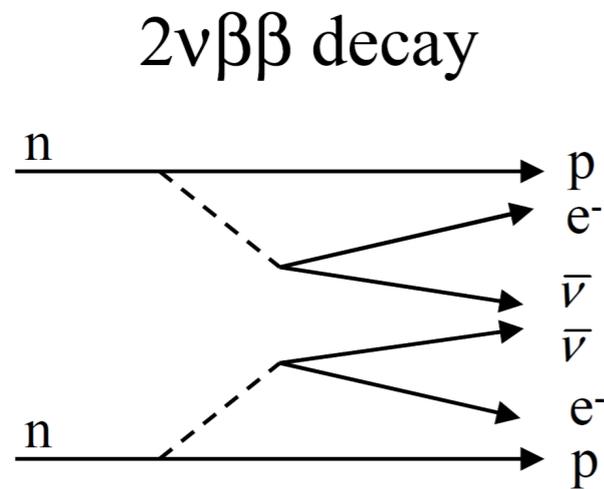
$$m_{\beta\beta} = \left| \sum_i U_{ei}^2 \cdot m_{\nu_i} \right|$$

- Desintegración **doble beta con neutrinos ($2\nu\beta\beta$)**
 - Observada en más de 10 isótopos
- Desintegración **doble beta sin neutrinos ($0\nu\beta\beta$)**
 - Viola la conservación del número leptónico
 - Sólo es posible si los neutrinos son de tipo Majorana
 - Se mide la masa efectiva del neutrino de Majorana $\langle m_{\beta\beta} \rangle$

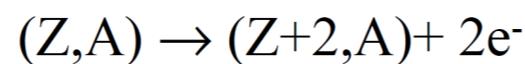
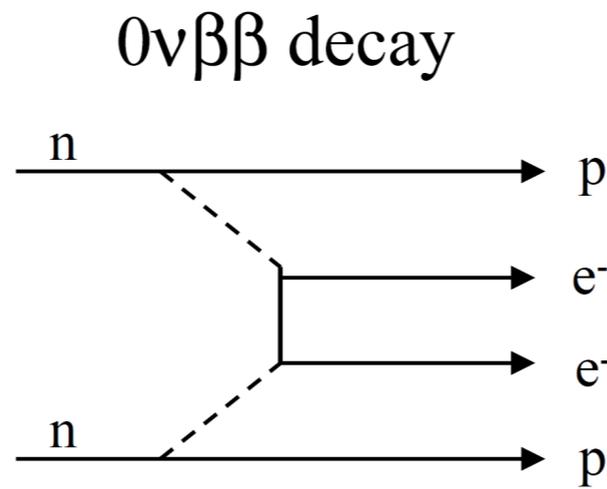


Maria Goeppert-Mayer

Experimentos de doble beta



$$T_{1/2} \sim 10^{21} \text{y}$$



$$T_{1/2} > 10^{25} \text{y}$$

$$\frac{1}{T_{1/2}} = G |M|^2 \langle m_{\beta\beta} \rangle^2$$

$$m_{\beta\beta} = \left| \sum_i U_{ei}^2 \cdot m_{\nu_i} \right|$$

- Desintegración **doble beta con neutrinos ($2\nu\beta\beta$)**
 - Observada en más de 10 isótopos
- Desintegración **doble beta sin neutrinos ($0\nu\beta\beta$)**
 - Viola la conservación del número leptónico
 - Sólo es posible si los neutrinos son de tipo Majorana
 - Se mide la masa efectiva del neutrino de Majorana $\langle m_{\beta\beta} \rangle$



Maria Goeppert-Mayer

Premio Nobel de Física en 1963

Límites actuales y futuros

- Límites inferiores en $T_{1/2}^{0\nu}$ y límites superiores en $m_{\beta\beta}$ (90% CL)

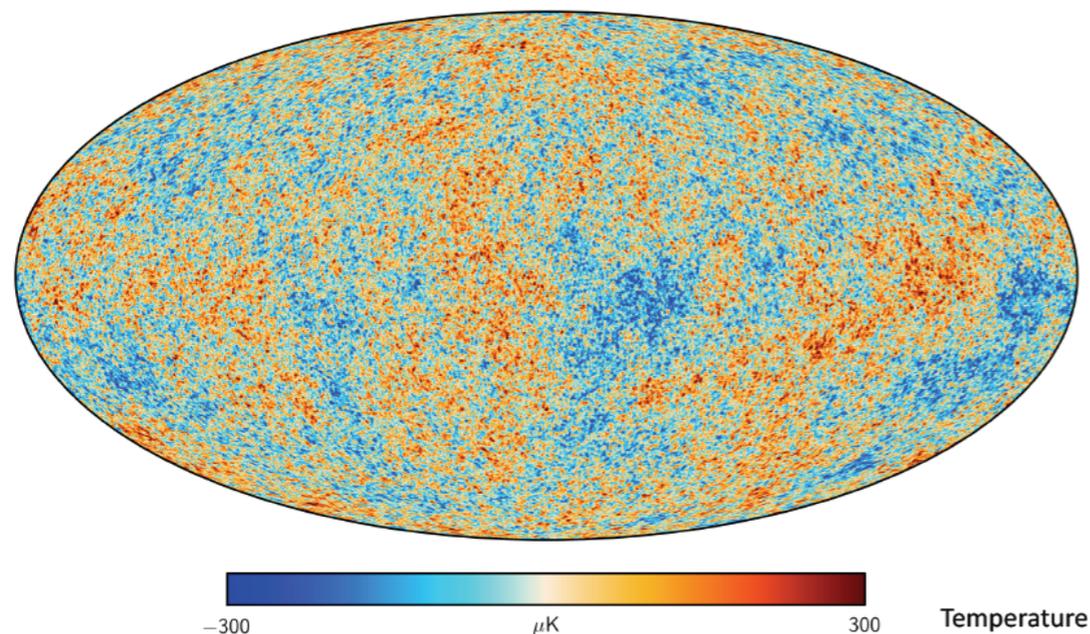
$\beta\beta^-$ decay	experiment	$T_{1/2}^{0\nu}$ [y]	$m_{\beta\beta}$ [eV]
${}^{48}_{20}\text{Ca} \rightarrow {}^{48}_{22}\text{Ti}$	ELEGANT-VI [119]	$> 1.4 \times 10^{22}$	$< 6.6 - 31$
${}^{76}_{32}\text{Ge} \rightarrow {}^{76}_{34}\text{Se}$	Heidelberg-Moscow [224]	$> 1.9 \times 10^{25}$	$< 0.23 - 0.67$
	IGEX [226]	$> 1.6 \times 10^{25}$	$< 0.25 - 0.73$
	GERDA [32]	$> 2.1 \times 10^{25}$	$< 0.22 - 0.64$
${}^{82}_{34}\text{Se} \rightarrow {}^{82}_{36}\text{Kr}$	NEMO-3 [120]	$> 1.0 \times 10^{23}$	$< 1.8 - 4.7$
${}^{100}_{42}\text{Mo} \rightarrow {}^{100}_{44}\text{Ru}$	NEMO-3 [121]	$> 2.1 \times 10^{25}$	$< 0.32 - 0.88$
${}^{116}_{48}\text{Cd} \rightarrow {}^{116}_{50}\text{Sn}$	Solotvina [234]	$> 1.7 \times 10^{23}$	$< 1.5 - 2.5$
${}^{128}_{52}\text{Te} \rightarrow {}^{128}_{54}\text{Xe}$	CUORICINO [235]	$> 1.1 \times 10^{23}$	$< 7.2 - 18$
${}^{130}_{52}\text{Te} \rightarrow {}^{130}_{54}\text{Xe}$	CUORICINO [236]	$> 2.8 \times 10^{24}$	$< 0.32 - 1.2$
${}^{136}_{54}\text{Xe} \rightarrow {}^{136}_{56}\text{Ba}$	EXO [239]	$> 1.1 \times 10^{25}$	$< 0.2 - 0.69$
	KamLAND-Zen [241]	$> 1.9 \times 10^{25}$	$< 0.15 - 0.52$
${}^{150}_{60}\text{Nd} \rightarrow {}^{150}_{62}\text{Sm}$	NEMO-3 [243]	$> 2.1 \times 10^{25}$	$< 2.6 - 10$

arXiv:1411.4791

- Próxima generación de experimentos entre 100 kg y 1 ton con diferentes isótopos y diferentes técnicas experimentales
- Objetivo: $\langle m_{\beta\beta} \rangle \sim 0.01 - 0.1 \text{ eV}$

Medida de la masa en cosmología

- Los neutrinos son muy abundantes. Su masa contribuye a la densidad de energía del Universo.
- La presencia e interacciones de los neutrinos en el Universo debe incorporarse a los modelos astrofísicos y cosmológicos.
- Las medidas de precisión cosmológicas nos proporcionan límites a la suma de la masa de todos los neutrinos activos (Σm_ν) y al número efectivo de neutrinos (N_{eff})



- Mejores límites con datos combinados:

$$\Sigma m_\nu \leq 0.23 \text{ eV (95\% CL)}$$

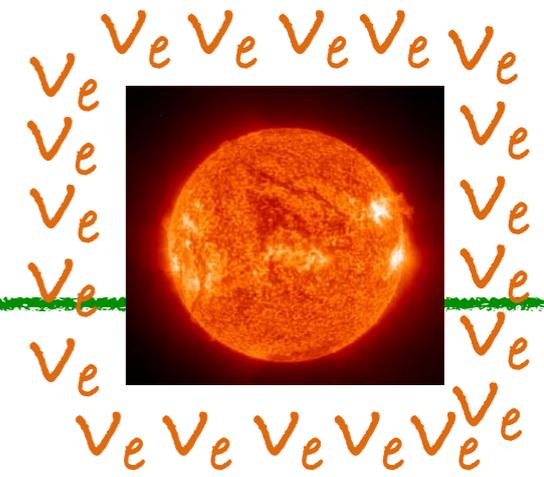
Planck TT + low P + lensing + ext (BAO + JLA + H_0)

$$N_{\text{eff}} = 3.04 \pm 0.18$$

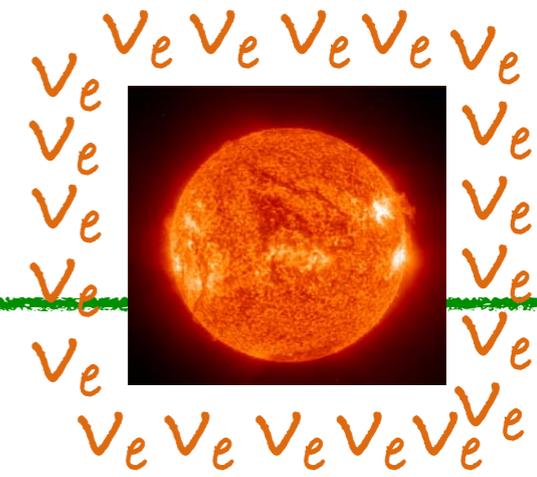
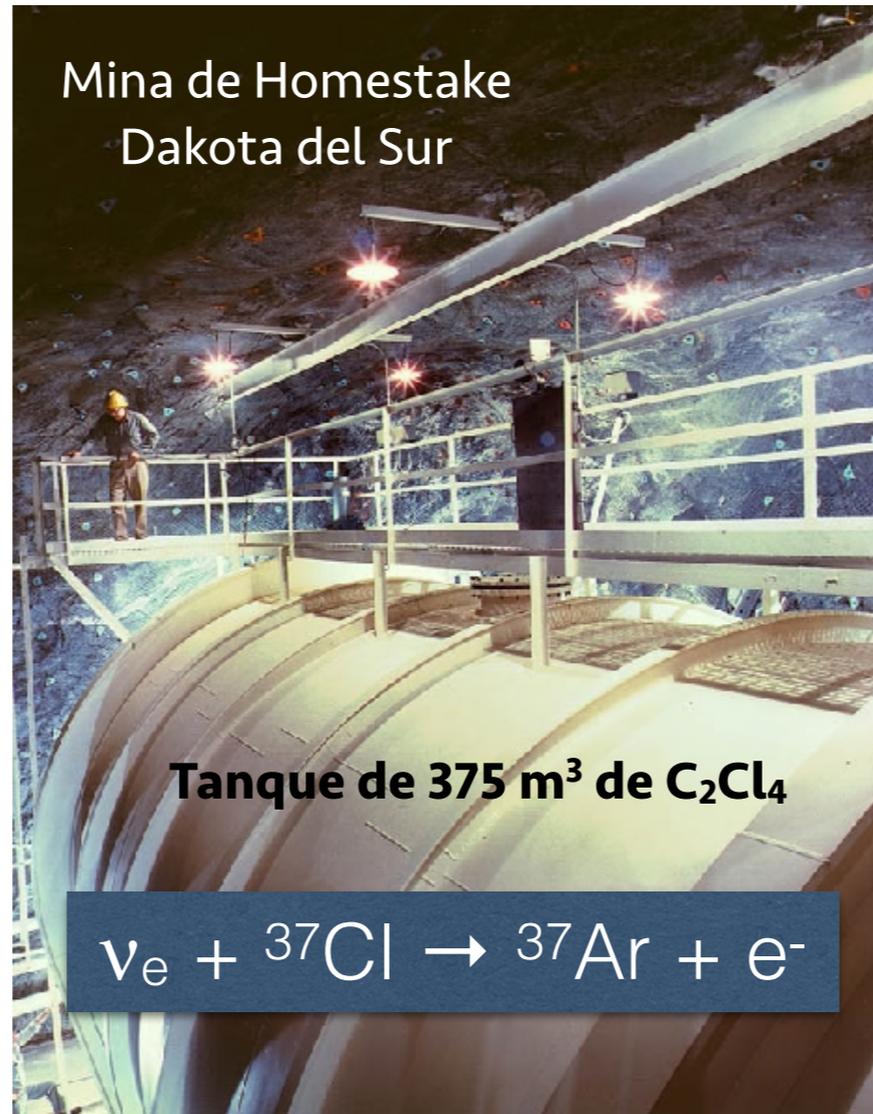
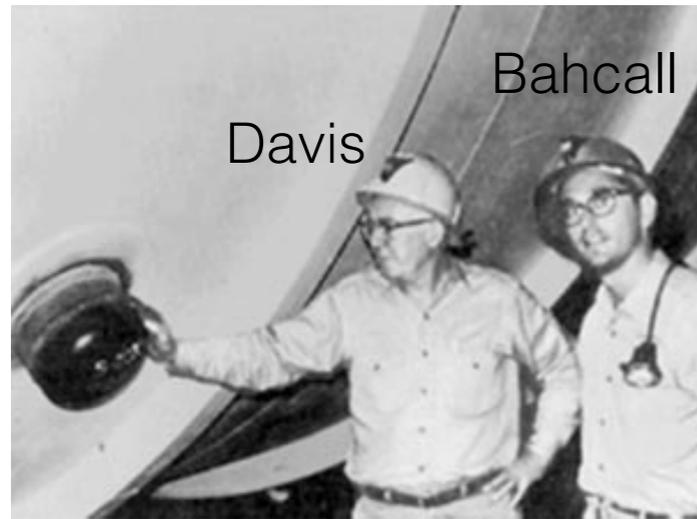
Planck TT, TE, EE + lowP+ BAO

arXiv:1502.01589

Los neutrinos solares

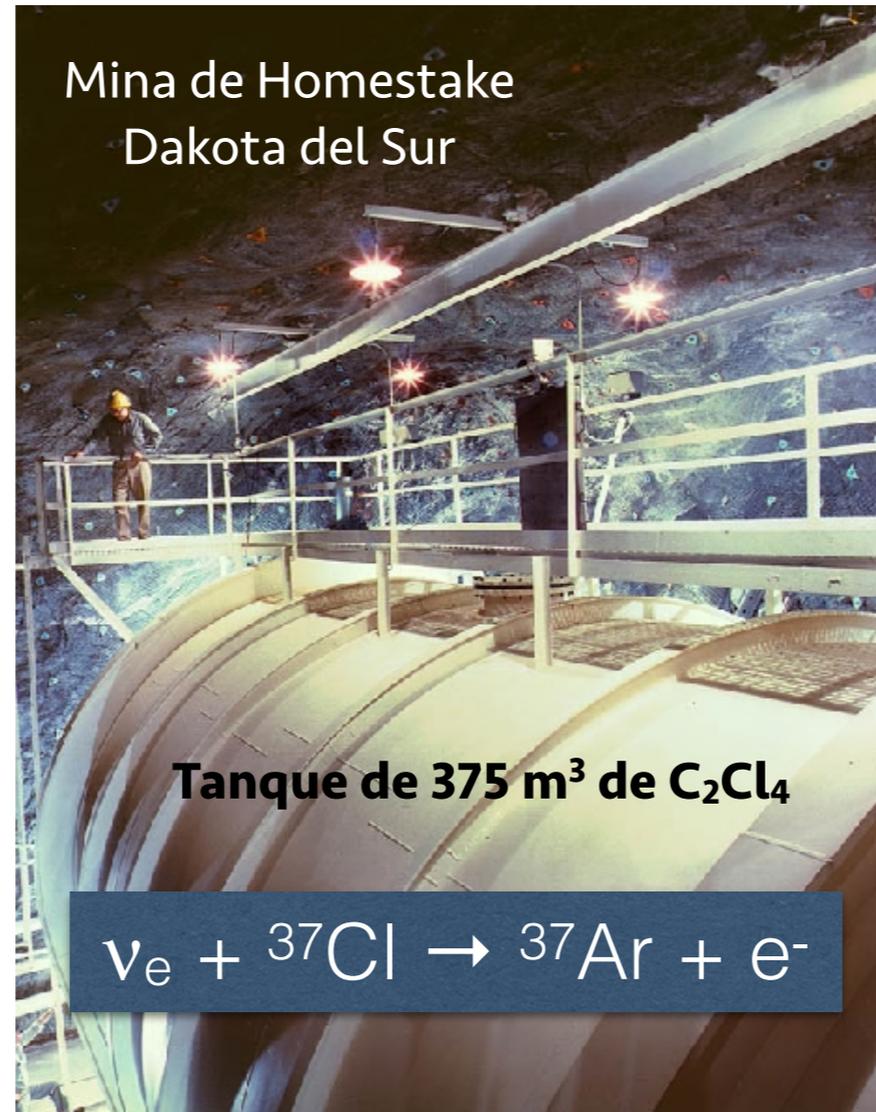
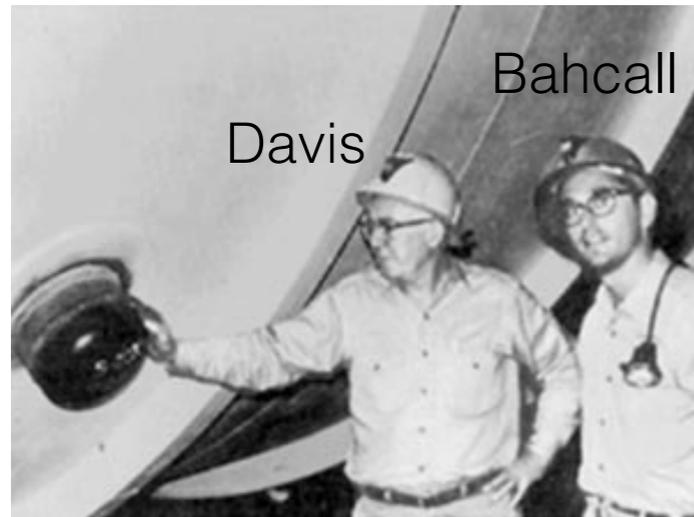
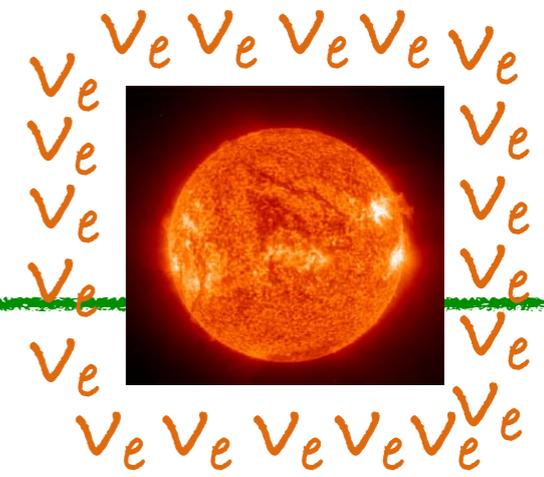


Los neutrinos solares



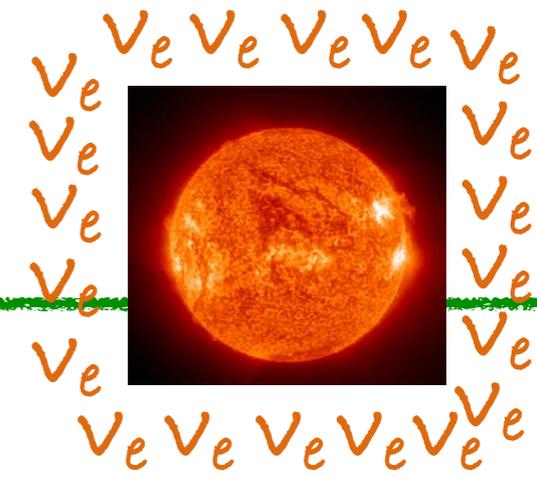
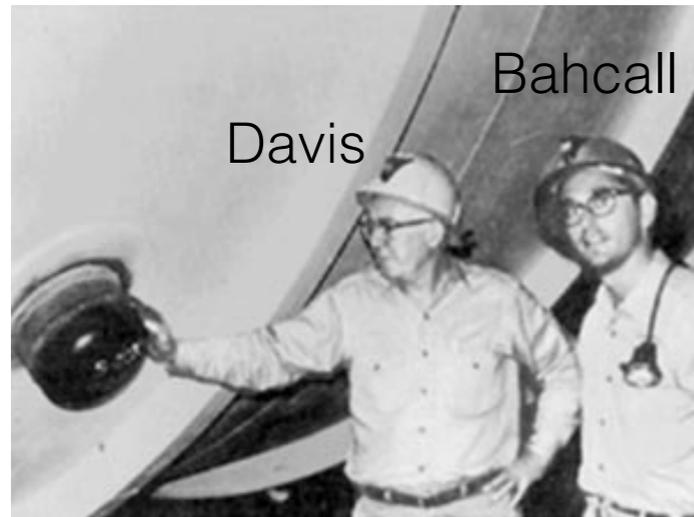
Predicción (J. Bahcall): 1 átomo de Ar por día

Los neutrinos solares



Predicción (J. Bahcall): 1 átomo de Ar por día
Medida (R. Davis): 1/3 de lo esperado!!

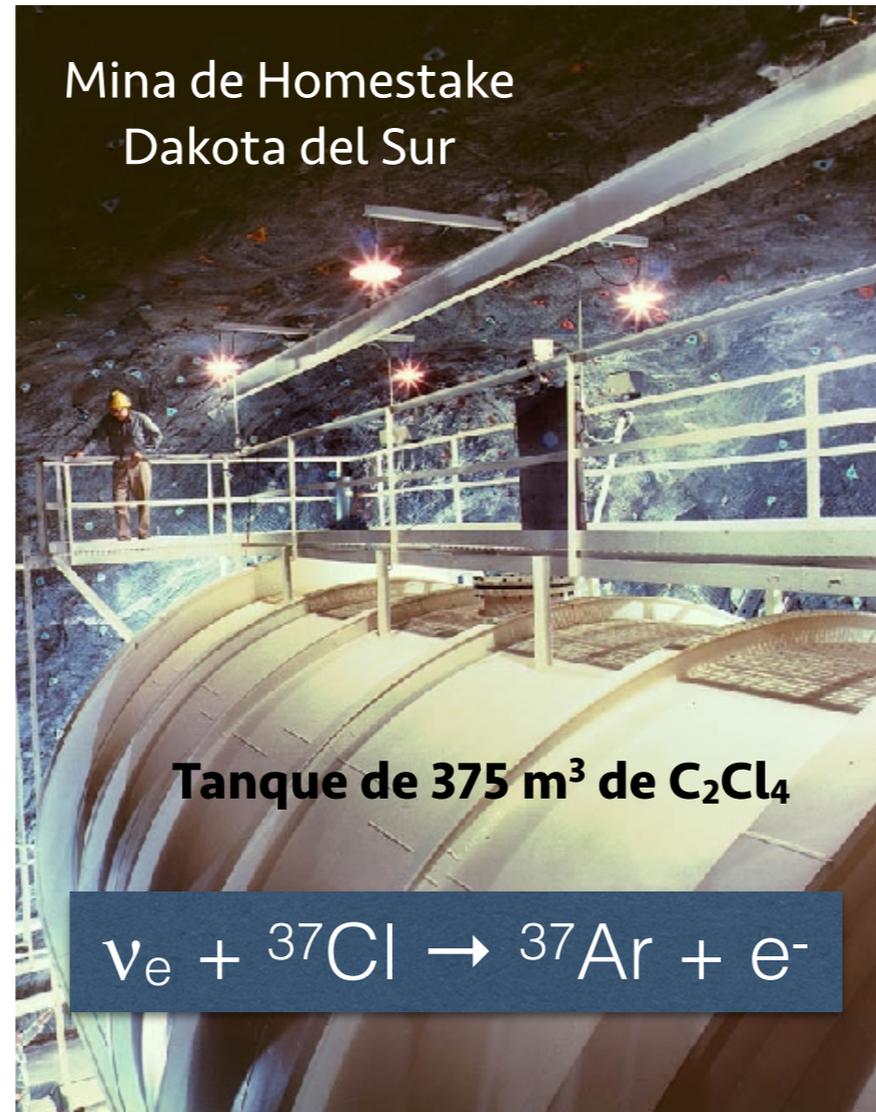
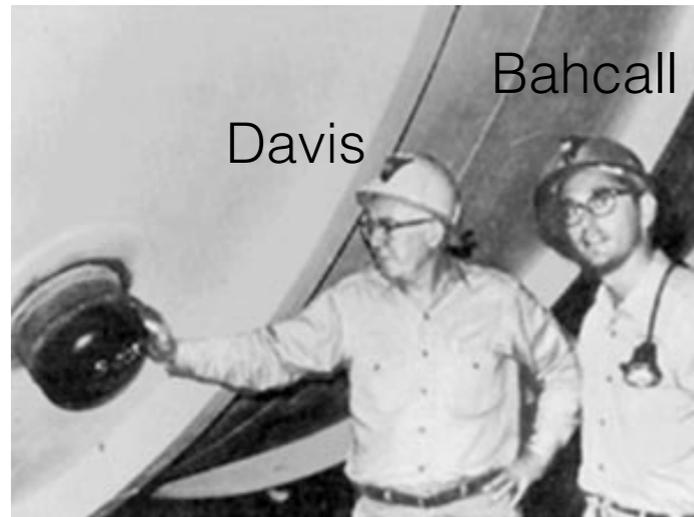
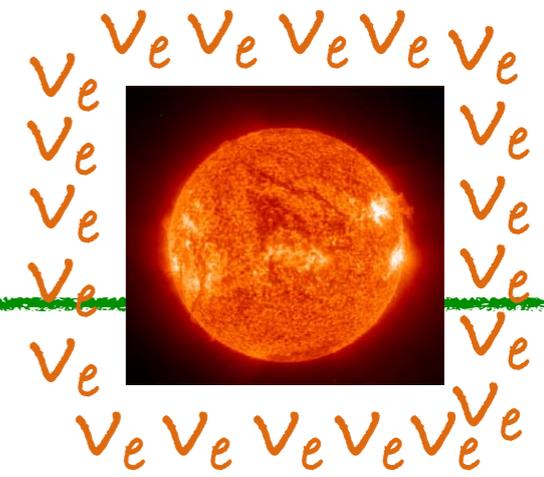
Los neutrinos solares



Predicción (J. Bahcall): 1 átomo de Ar por día
Medida (R. Davis): 1/3 de lo esperado!!

¡¡Faltan 2/3 de los neutrinos!!

Los neutrinos solares

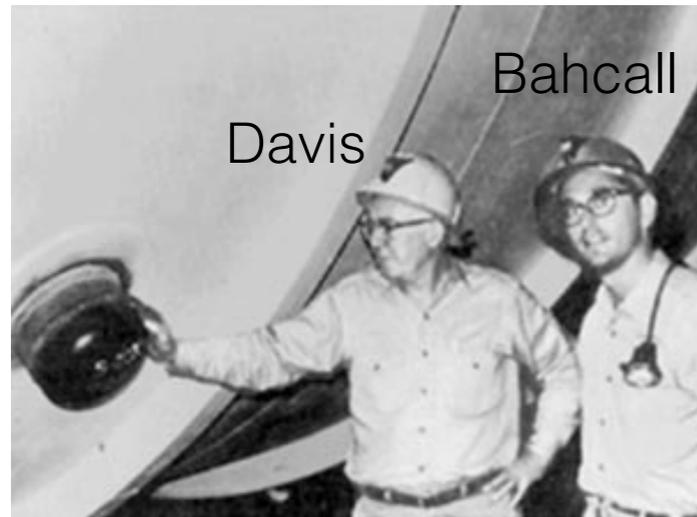


Predicción (J. Bahcall): 1 átomo de Ar por día
Medida (R. Davis): 1/3 de lo esperado!!

¡¡Faltan 2/3 de los neutrinos!!

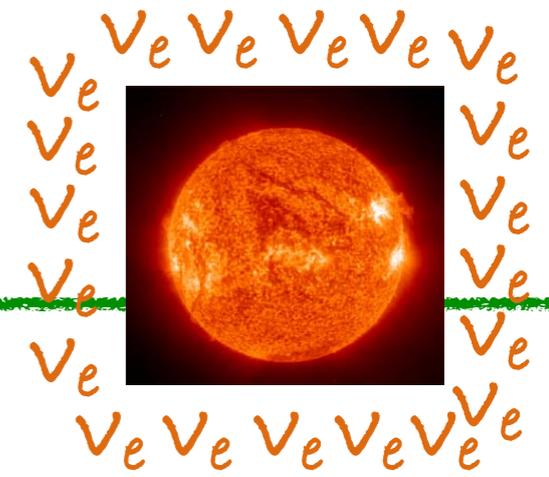
Discrepancia sin explicación durante 30 años

Los neutrinos solares



Mina de Homestake
Dakota del Sur

Tanque de 375 m³ de C₂Cl₄



Estación de extracción del Ar

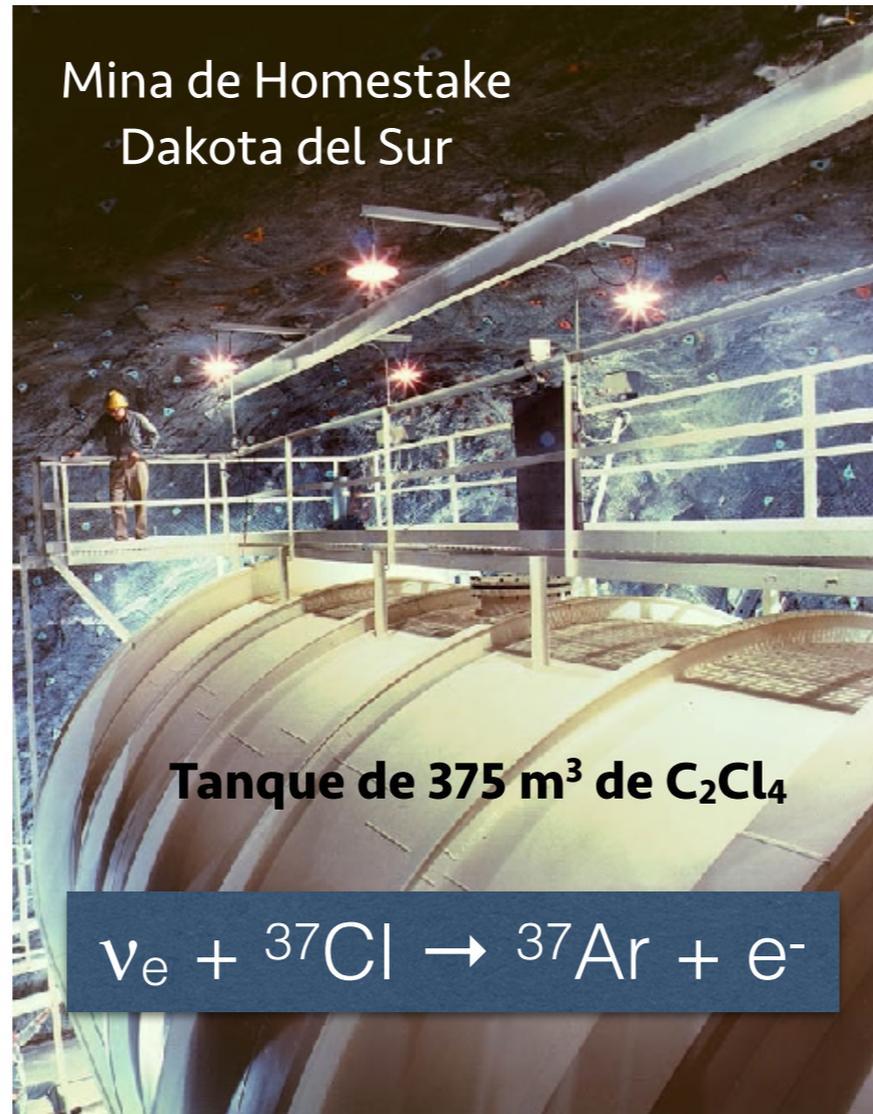
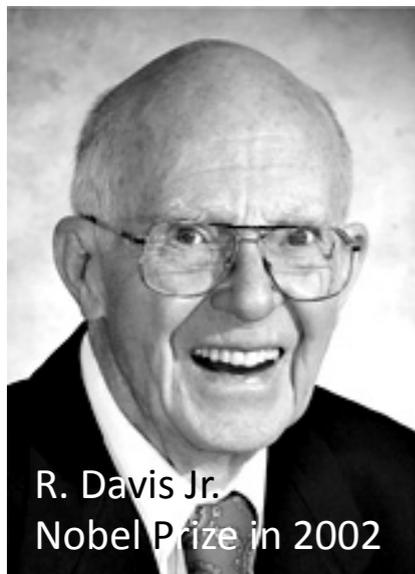
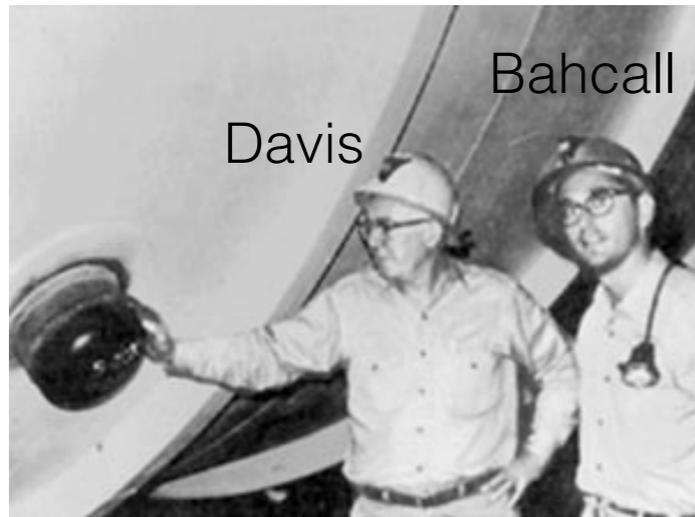
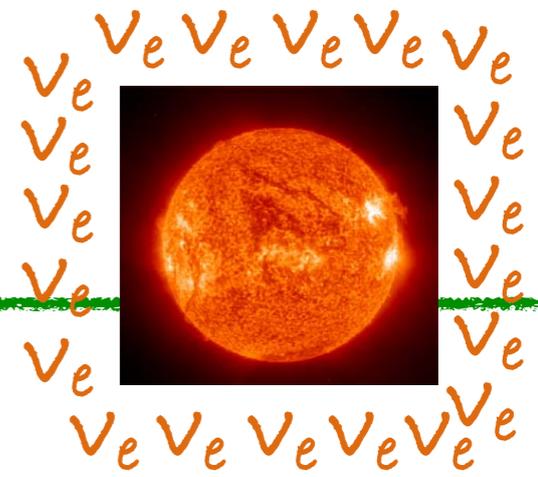
Predicción (J. Bahcall): 1 átomo de Ar por día
Medida (R. Davis): 1/3 de lo esperado!!

¡¡Faltan 2/3 de los neutrinos!!

**Discrepancia sin explicación
durante 30 años**

(1968-2001)

Los neutrinos solares



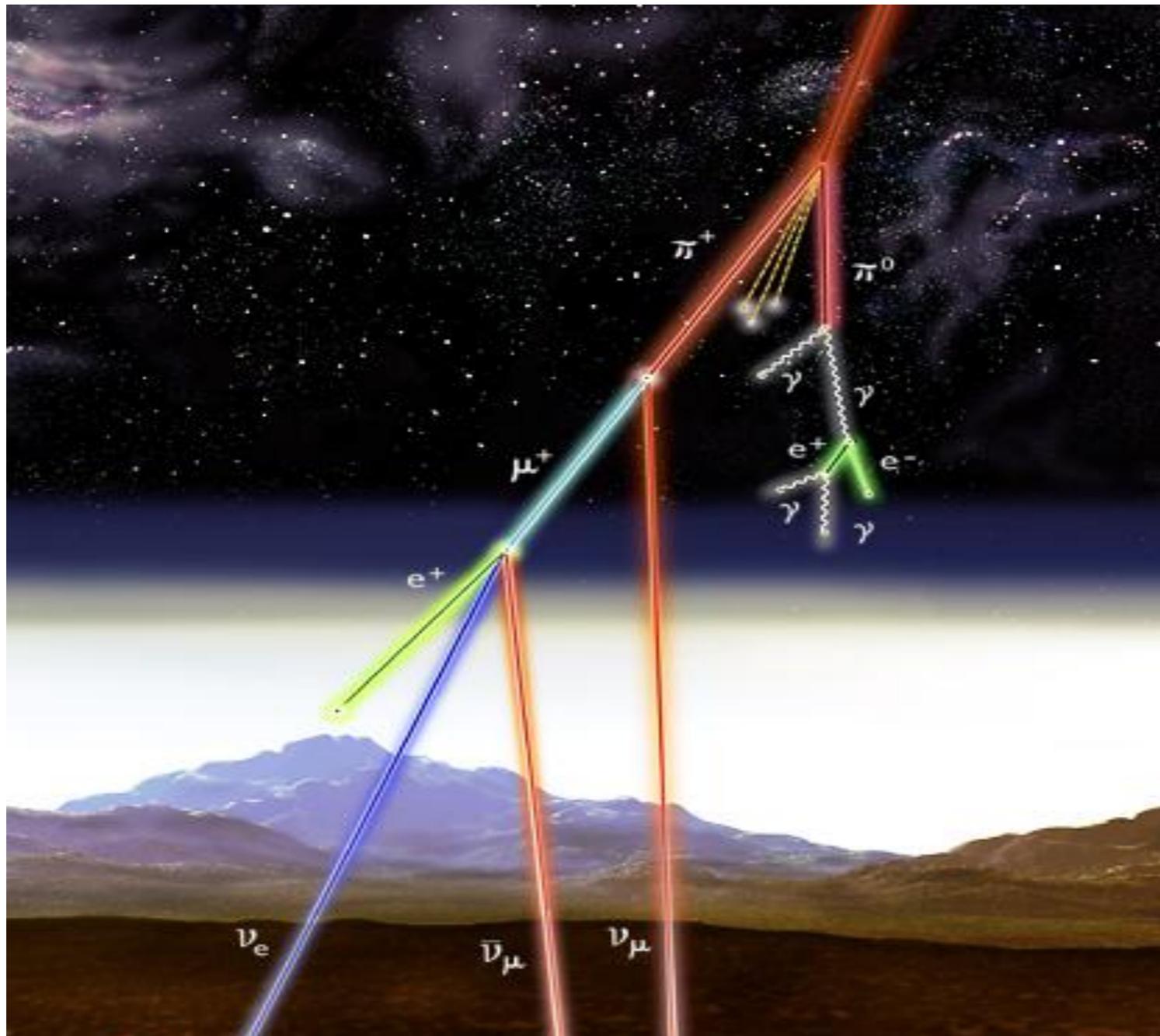
Predicción (J. Bahcall): 1 átomo de Ar por día
Medida (R. Davis): 1/3 de lo esperado!!

¡¡Faltan 2/3 de los neutrinos!!

**Discrepancia sin explicación
durante 30 años**
(1968-2001)

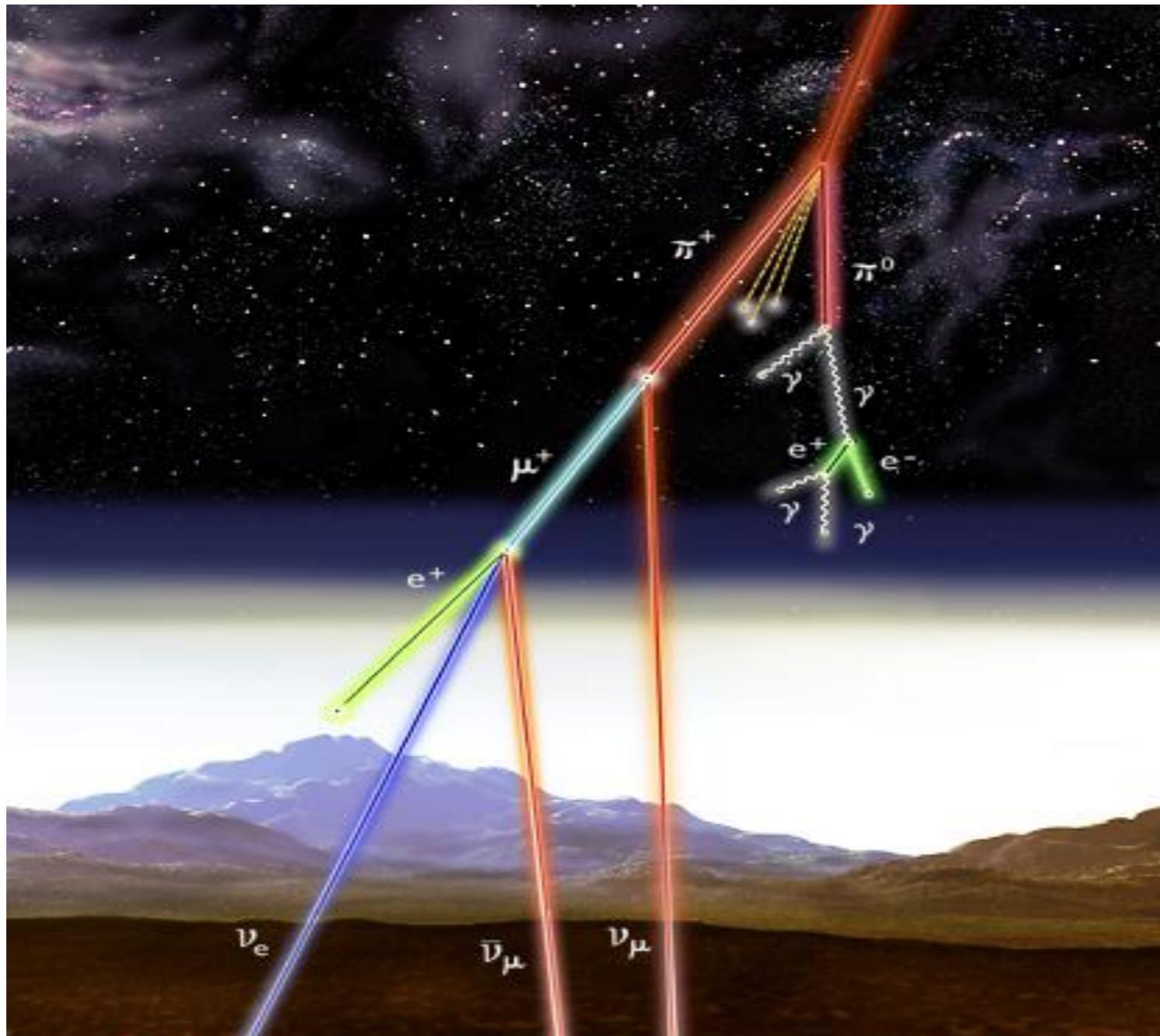
Los neutrinos atmosféricos

Kamiokande e IMB detectan los neutrinos atmosféricos en los 80's



Los neutrinos atmosféricos

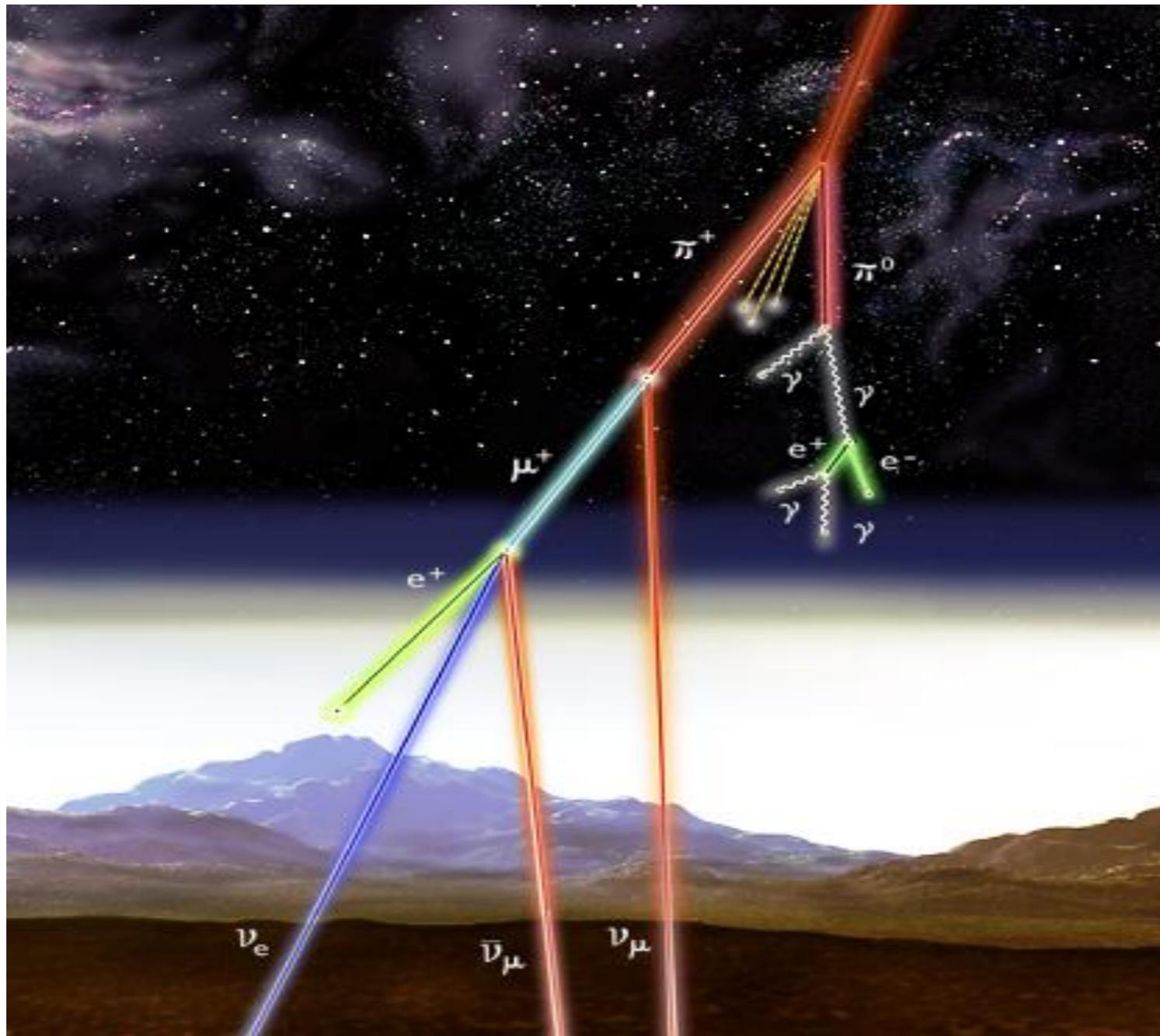
Kamiokande e IMB detectan los neutrinos atmosféricos en los 80's



- **Se espera** dos veces más ν_μ que ν_e

Los neutrinos atmosféricos

Kamiokande e IMB detectan los neutrinos atmosféricos en los 80's

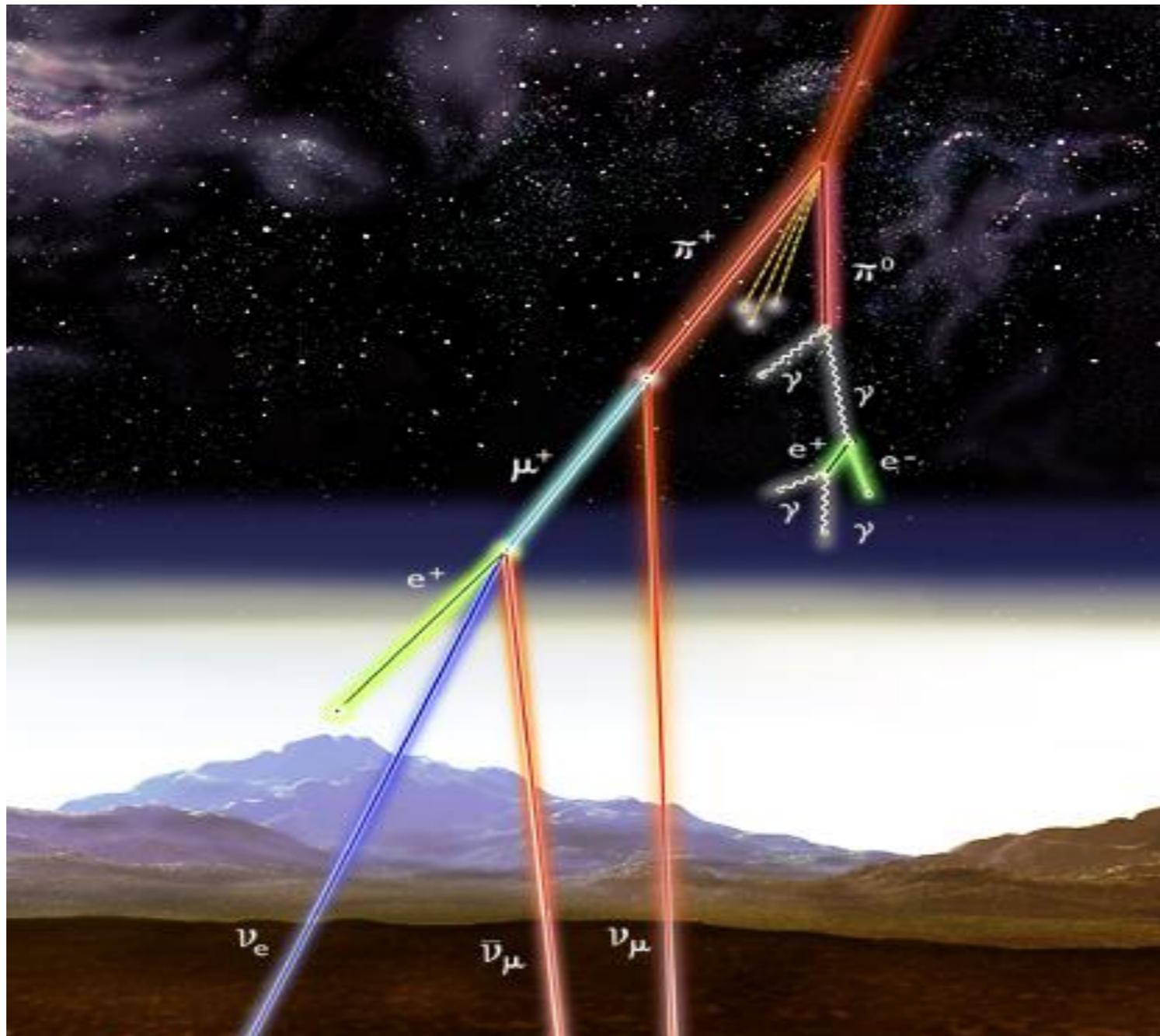


- **Se espera** dos veces más ν_μ que ν_e

$$2\nu_\mu \sim \nu_e$$

Los neutrinos atmosféricos

Kamiokande e IMB detectan los neutrinos atmosféricos en los 80's



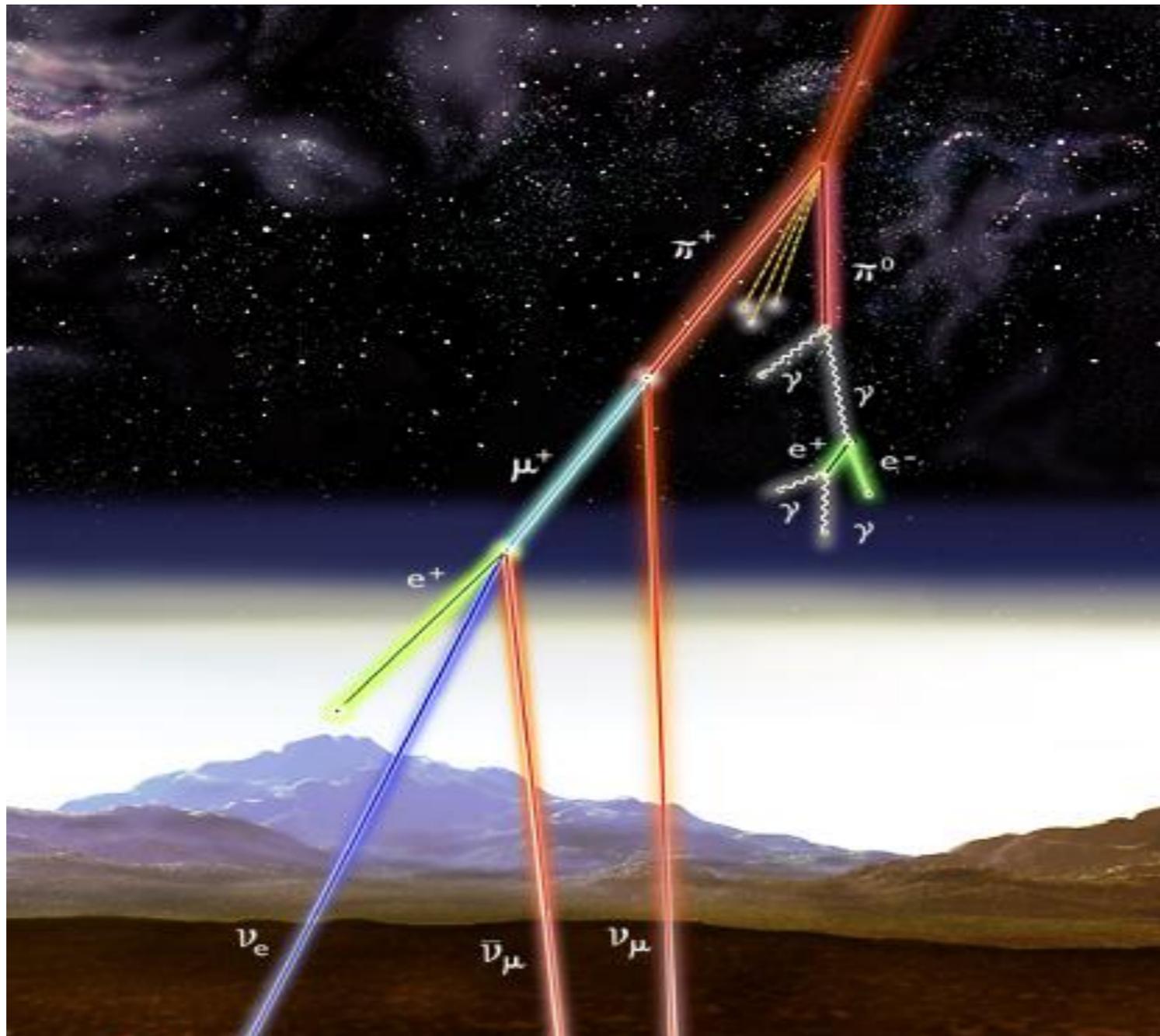
- **Se espera** dos veces más ν_μ que ν_e

$$2\nu_\mu \sim \nu_e$$

- **Se mide**

Los neutrinos atmosféricos

Kamiokande e IMB detectan los neutrinos atmosféricos en los 80's



- **Se espera** dos veces más ν_μ que ν_e

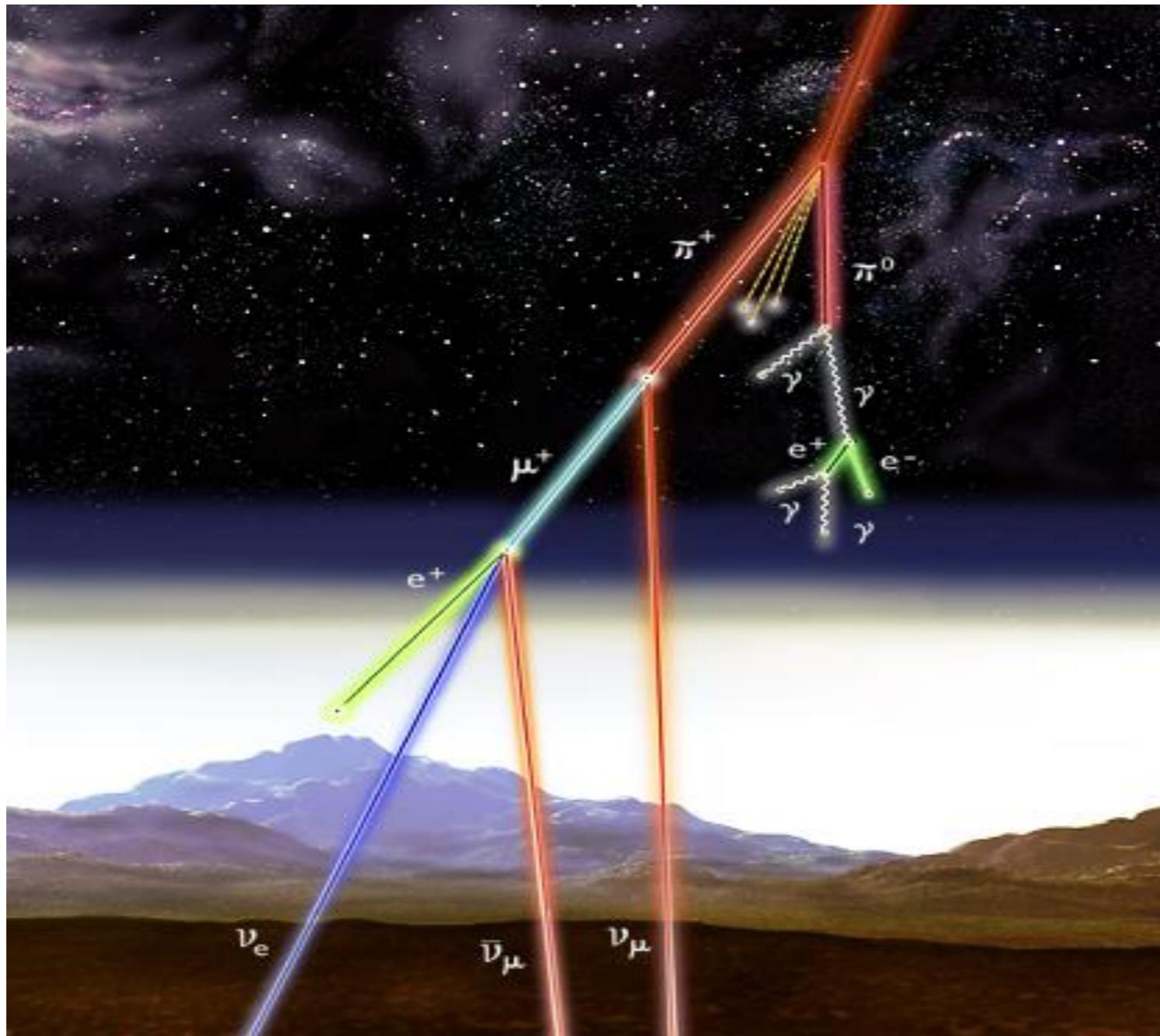
$$2\nu_\mu \sim \nu_e$$

- **Se mide**

$$\nu_\mu \sim \nu_e$$

Los neutrinos atmosféricos

Kamiokande e IMB detectan los neutrinos atmosféricos en los 80's



- **Se espera** dos veces más ν_μ que ν_e

$$2\nu_\mu \sim \nu_e$$

- **Se mide**

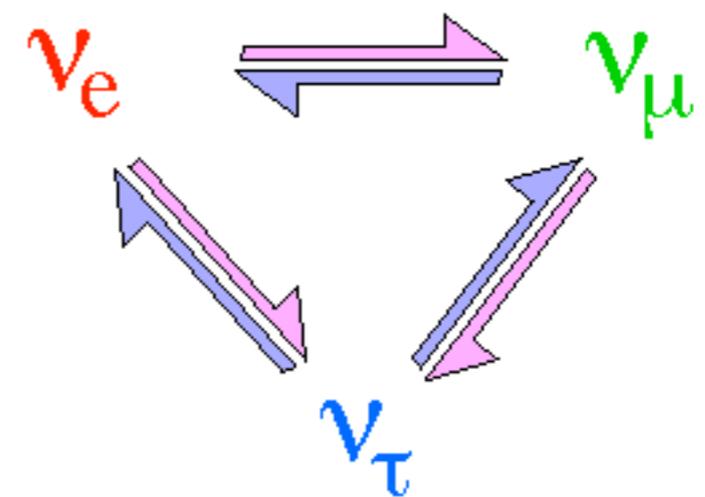
$$\nu_\mu \sim \nu_e$$

¡¡Faltan neutrinos de la atmósfera!!

Las oscilaciones

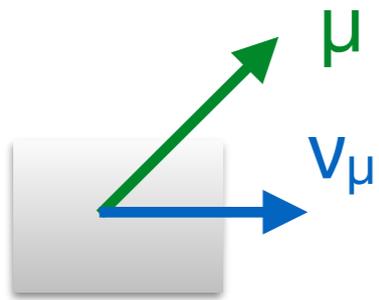
Fenómeno de interferencia cuántica por el cual un neutrino de un sabor dado se transforma en un neutrino de otro sabor

B. Pontecorvo (1957)

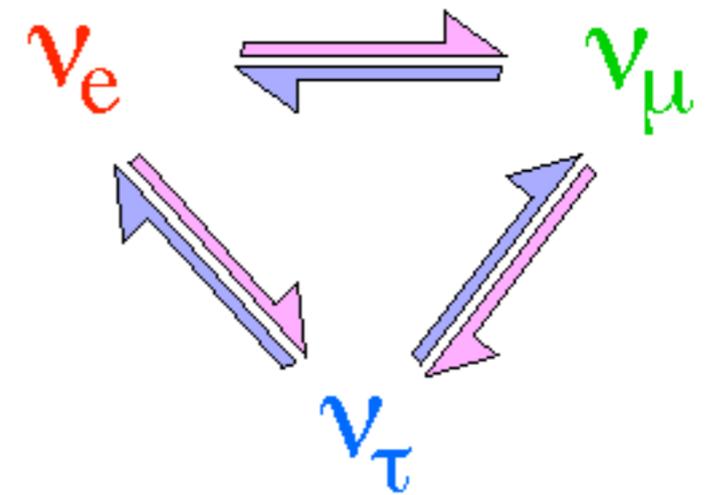


Las oscilaciones

Fenómeno de interferencia cuántica por el cual un neutrino de un sabor dado se transforma en un neutrino de otro sabor



B. Pontecorvo (1957)

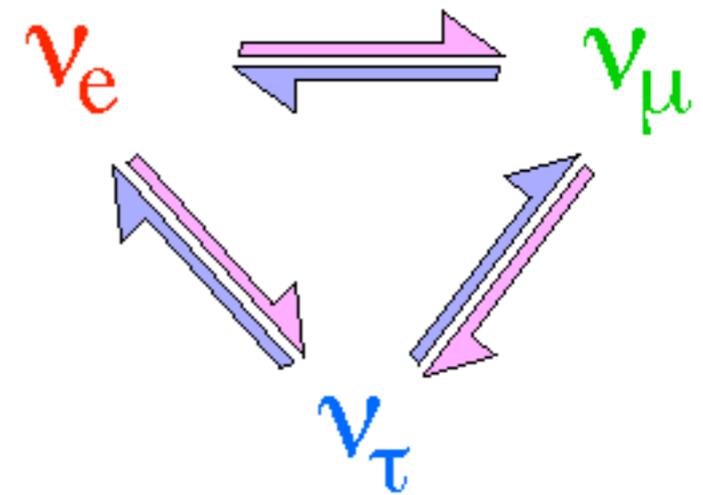


Las oscilaciones

Fenómeno de interferencia cuántica por el cual un neutrino de un sabor dado se transforma en un neutrino de otro sabor



B. Pontecorvo (1957)

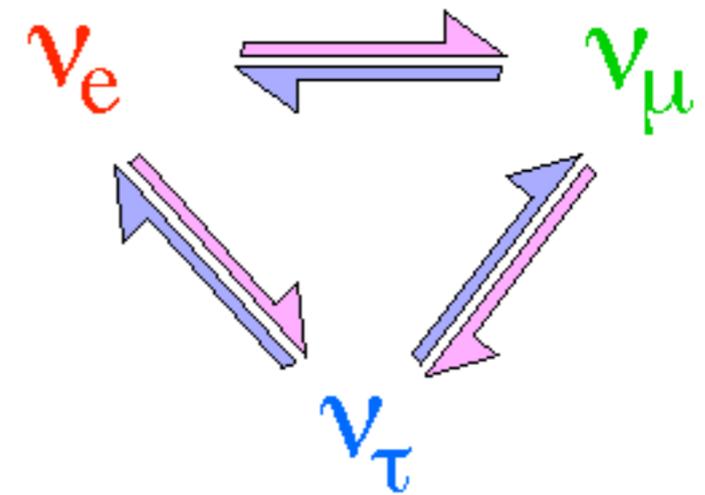


Las oscilaciones

Fenómeno de interferencia cuántica por el cual un neutrino de un sabor dado se transforma en un neutrino de otro sabor

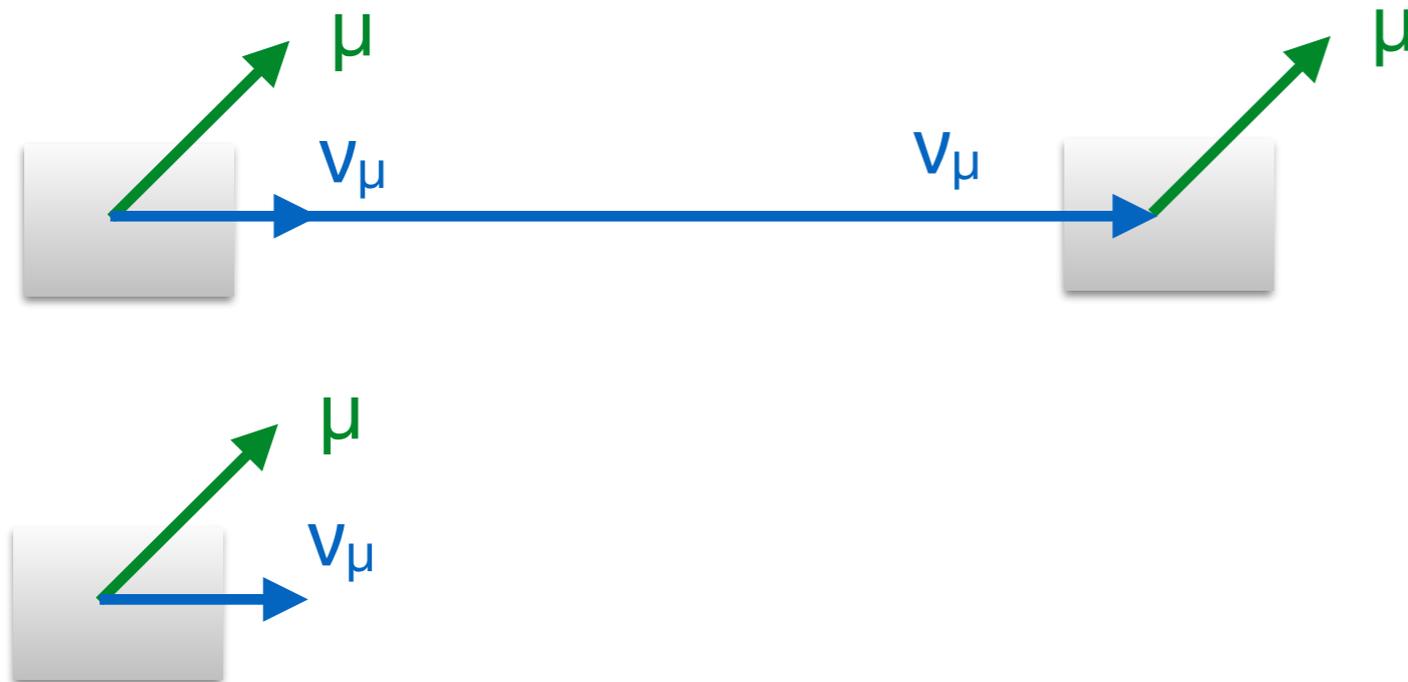


B. Pontecorvo (1957)

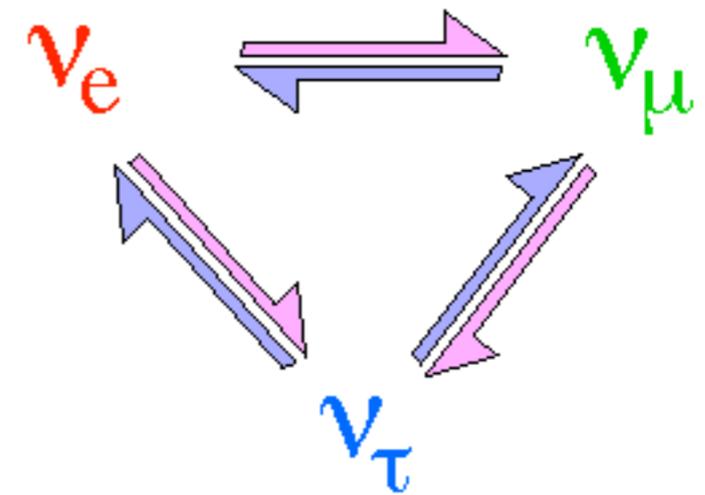


Las oscilaciones

Fenómeno de interferencia cuántica por el cual un neutrino de un sabor dado se transforma en un neutrino de otro sabor

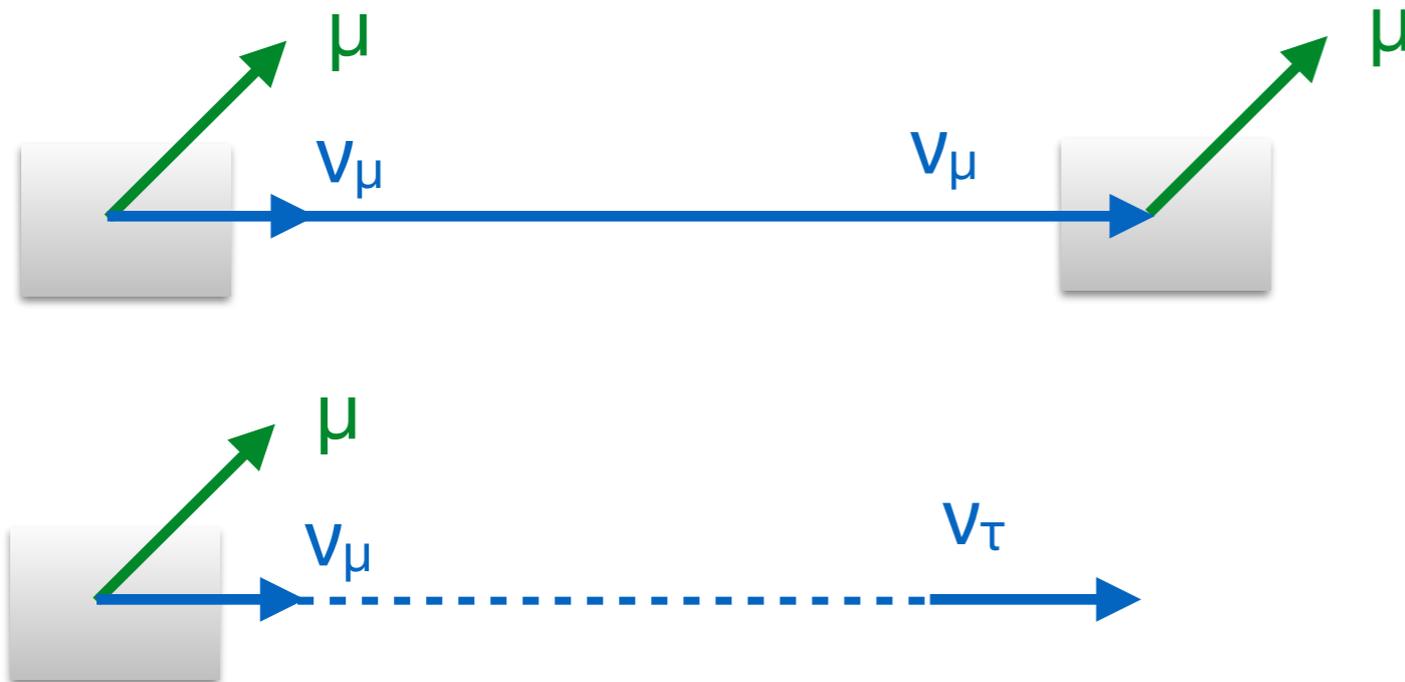


B. Pontecorvo (1957)

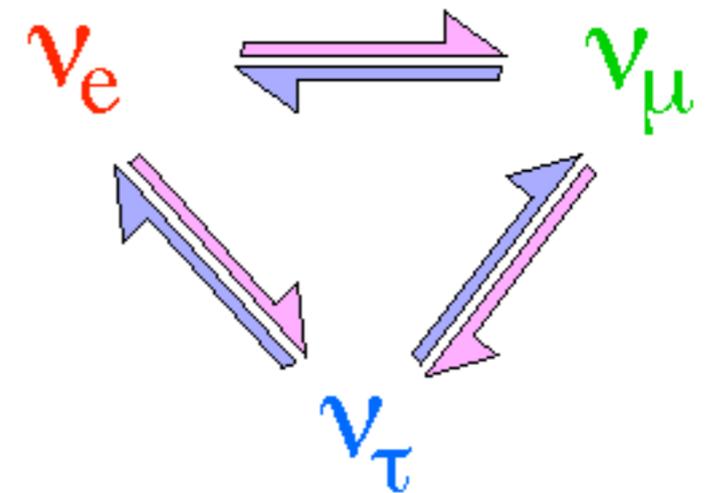


Las oscilaciones

Fenómeno de interferencia cuántica por el cual un neutrino de un sabor dado se transforma en un neutrino de otro sabor



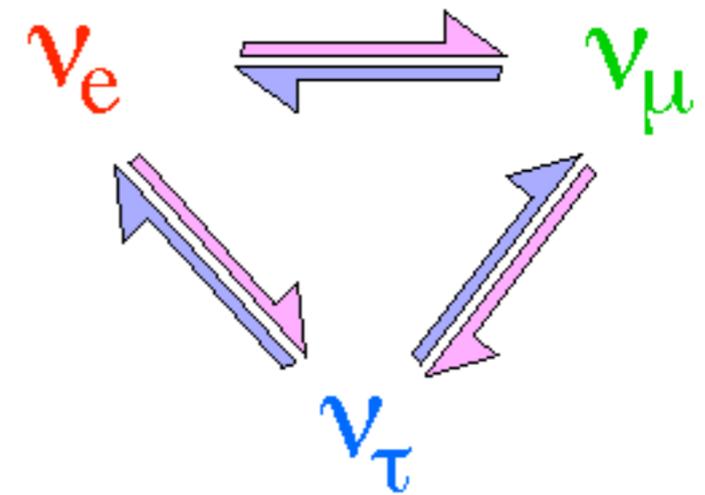
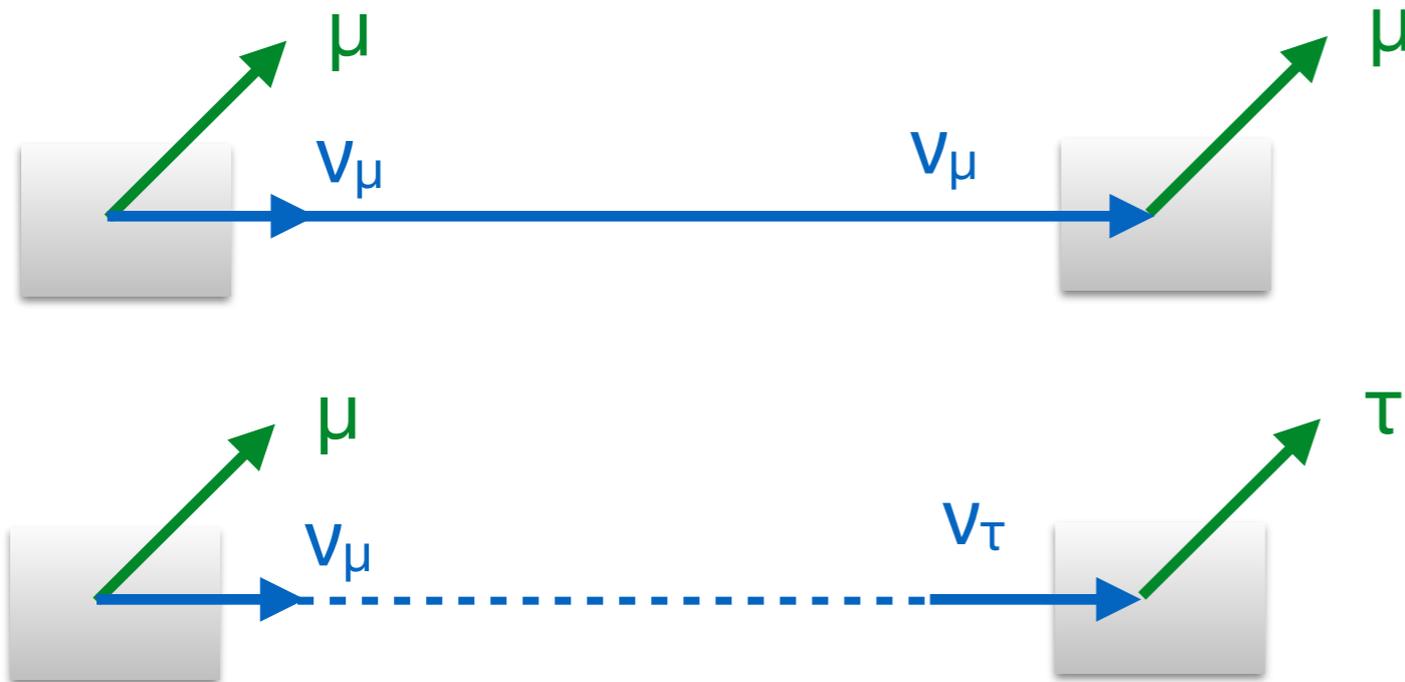
B. Pontecorvo (1957)



Las oscilaciones

Fenómeno de interferencia cuántica por el cual un neutrino de un sabor dado se transforma en un neutrino de otro sabor

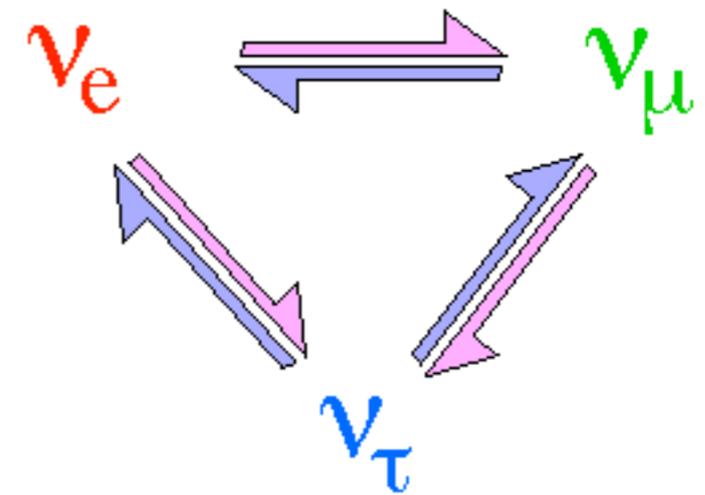
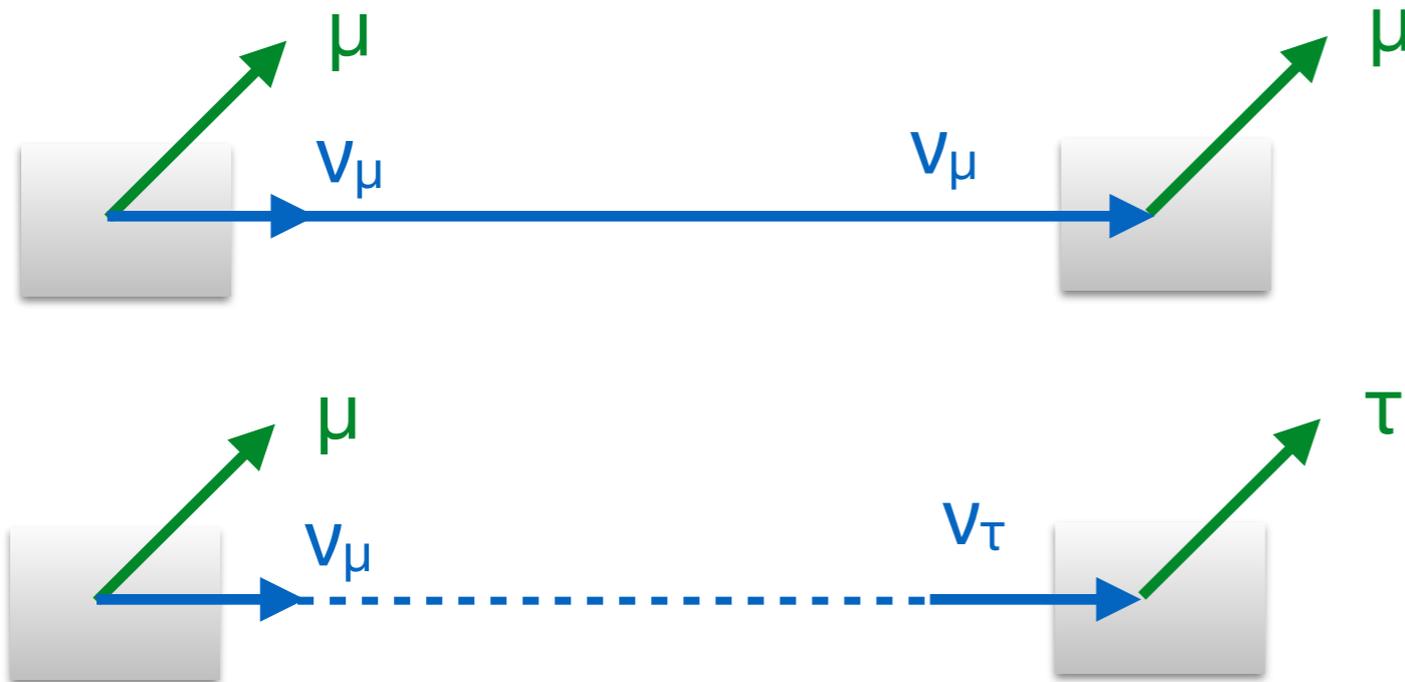
B. Pontecorvo (1957)



Las oscilaciones

Fenómeno de interferencia cuántica por el cual un neutrino de un sabor dado se transforma en un neutrino de otro sabor

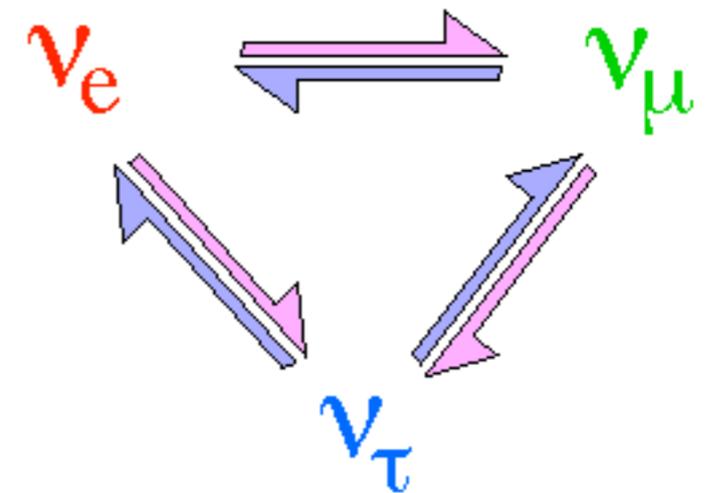
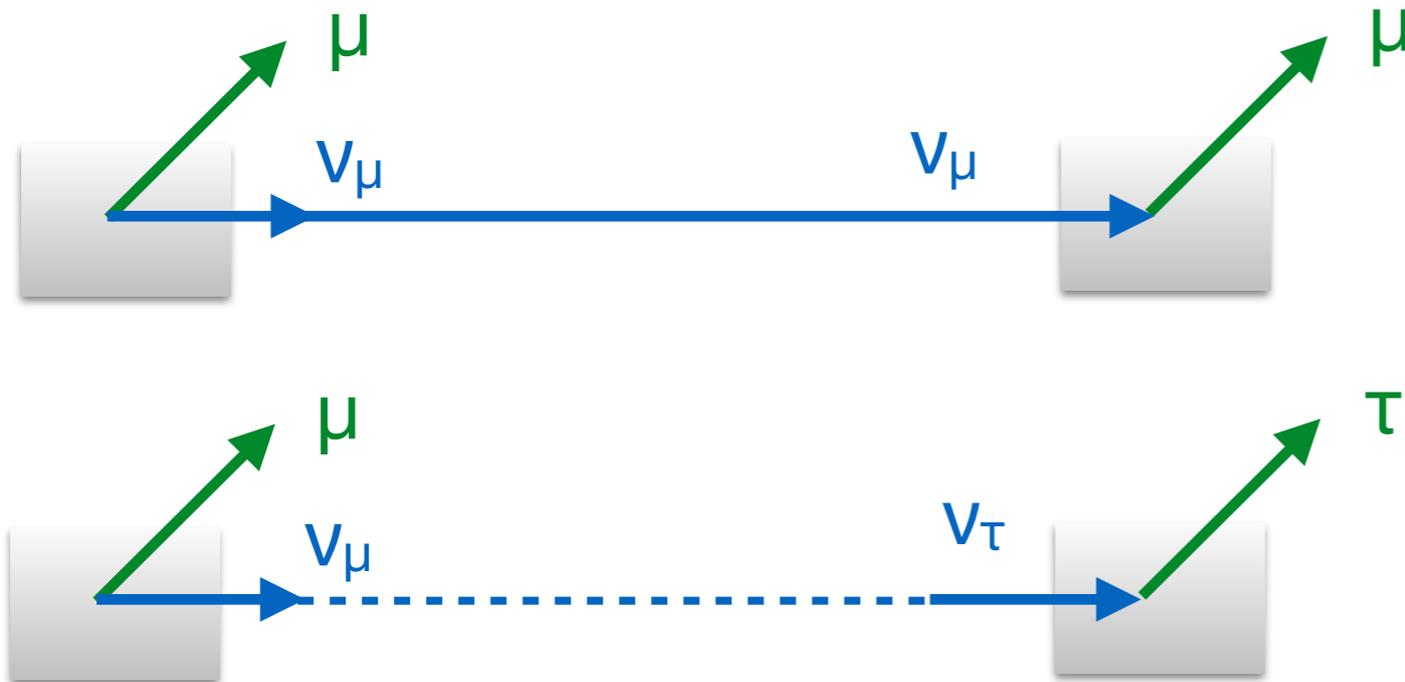
B. Pontecorvo (1957)



Las oscilaciones

Fenómeno de interferencia cuántica por el cual un neutrino de un sabor dado se transforma en un neutrino de otro sabor

B. Pontecorvo (1957)



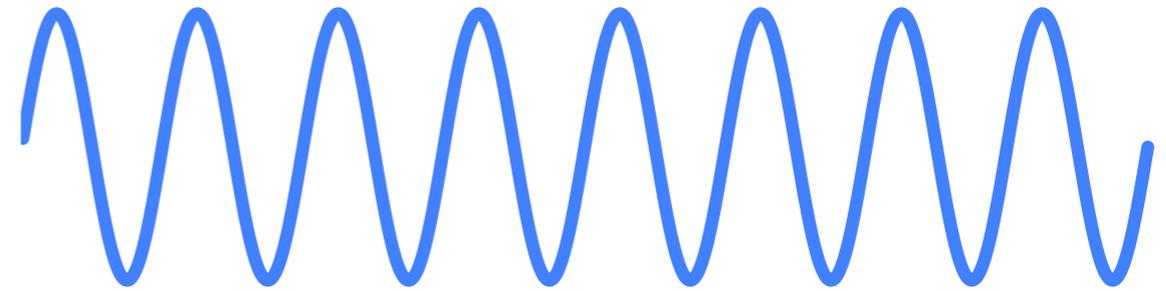
Este fenómeno sólo puede ocurrir si los neutrinos tienen masa

Movimiento ondulatorio

- Las **partículas** a veces se comportan como **ondas**
- Cuando las ondas viajan en la misma dirección, las ondas se **superponen**
- Cuando las ondas oscilan de manera parecida pero no igual, puede ocurrir un **fenómeno de interferencia durante su propagación**:
 - A veces las componentes se suman
 - A veces las componentes se cancelan

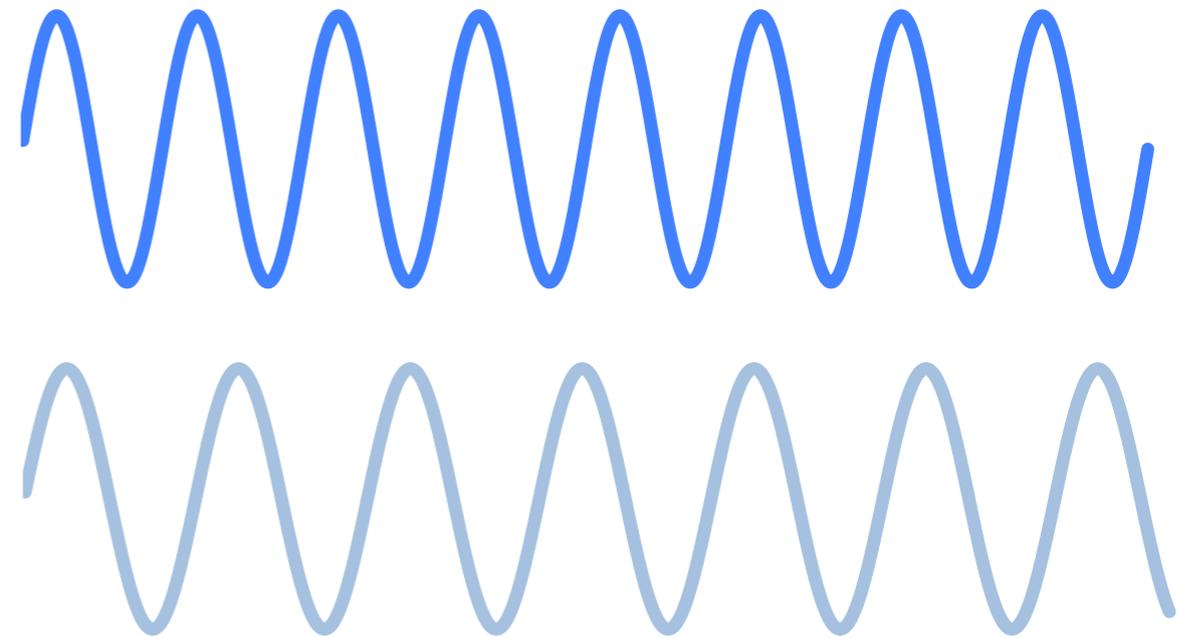
Movimiento ondulatorio

- Las **partículas** a veces se comportan como **ondas**
- Cuando las ondas viajan en la misma dirección, las ondas se **superponen**
- Cuando las ondas oscilan de manera parecida pero no igual, puede ocurrir un **fenómeno de interferencia durante su propagación:**
 - A veces las componentes se suman
 - A veces las componentes se cancelan



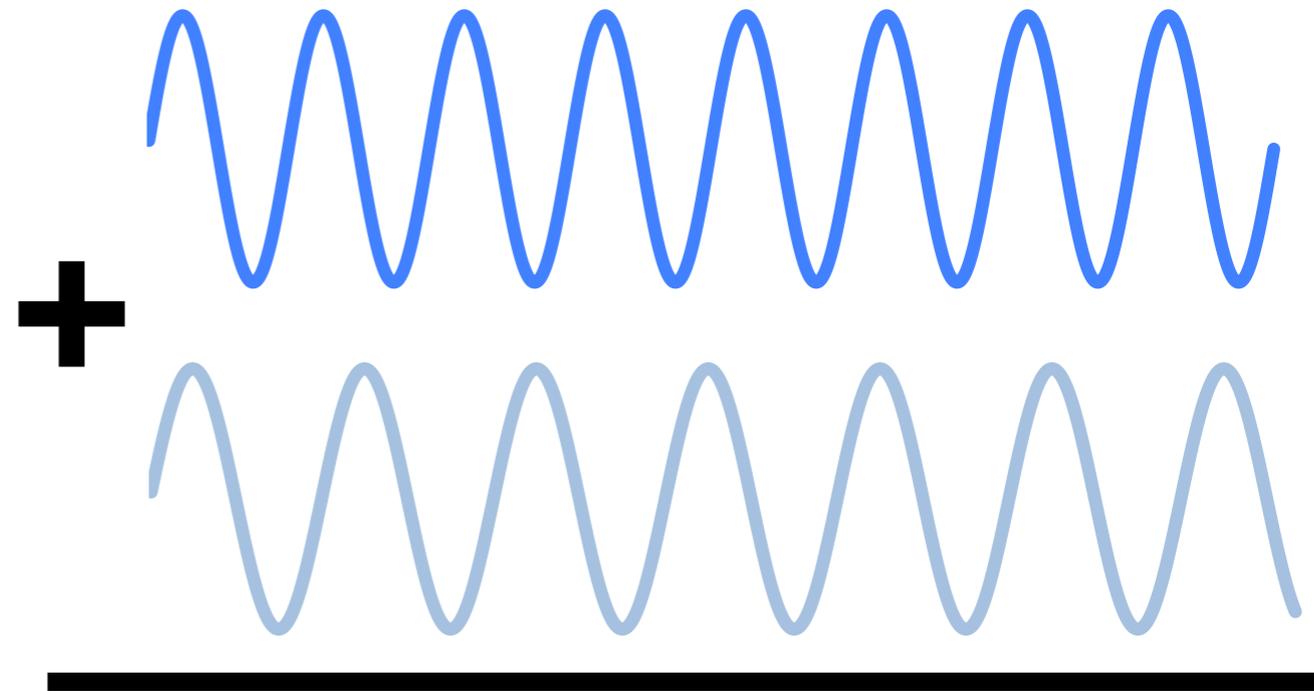
Movimiento ondulatorio

- Las **partículas** a veces se comportan como **ondas**
- Cuando las ondas viajan en la misma dirección, las ondas se **superponen**
- Cuando las ondas oscilan de manera parecida pero no igual, puede ocurrir un **fenómeno de interferencia durante su propagación**:
 - A veces las componentes se suman
 - A veces las componentes se cancelan



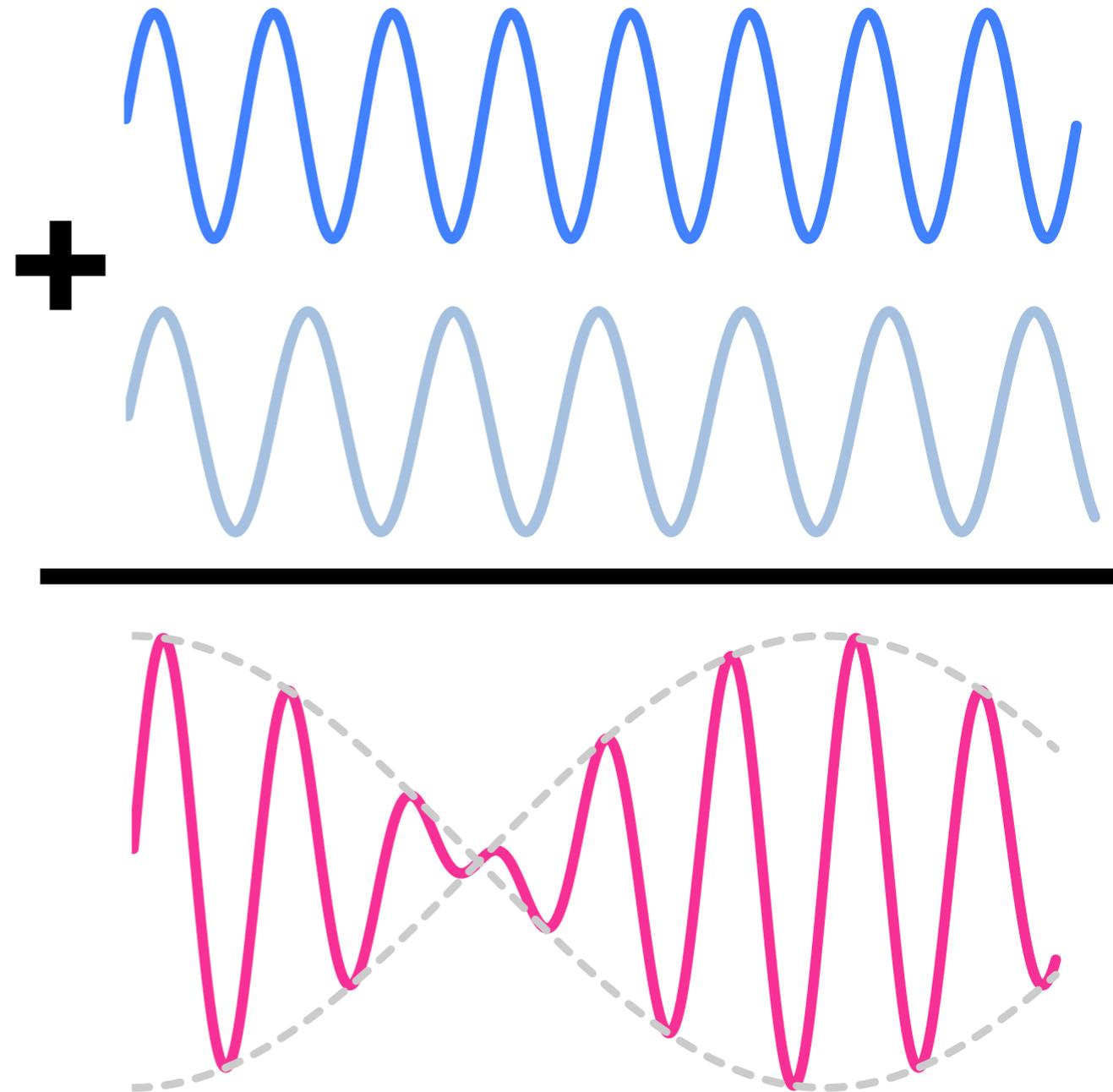
Movimiento ondulatorio

- Las **partículas** a veces se comportan como **ondas**
- Cuando las ondas viajan en la misma dirección, las ondas se **superponen**
- Cuando las ondas oscilan de manera parecida pero no igual, puede ocurrir un **fenómeno de interferencia durante su propagación**:
 - A veces las componentes se suman
 - A veces las componentes se cancelan



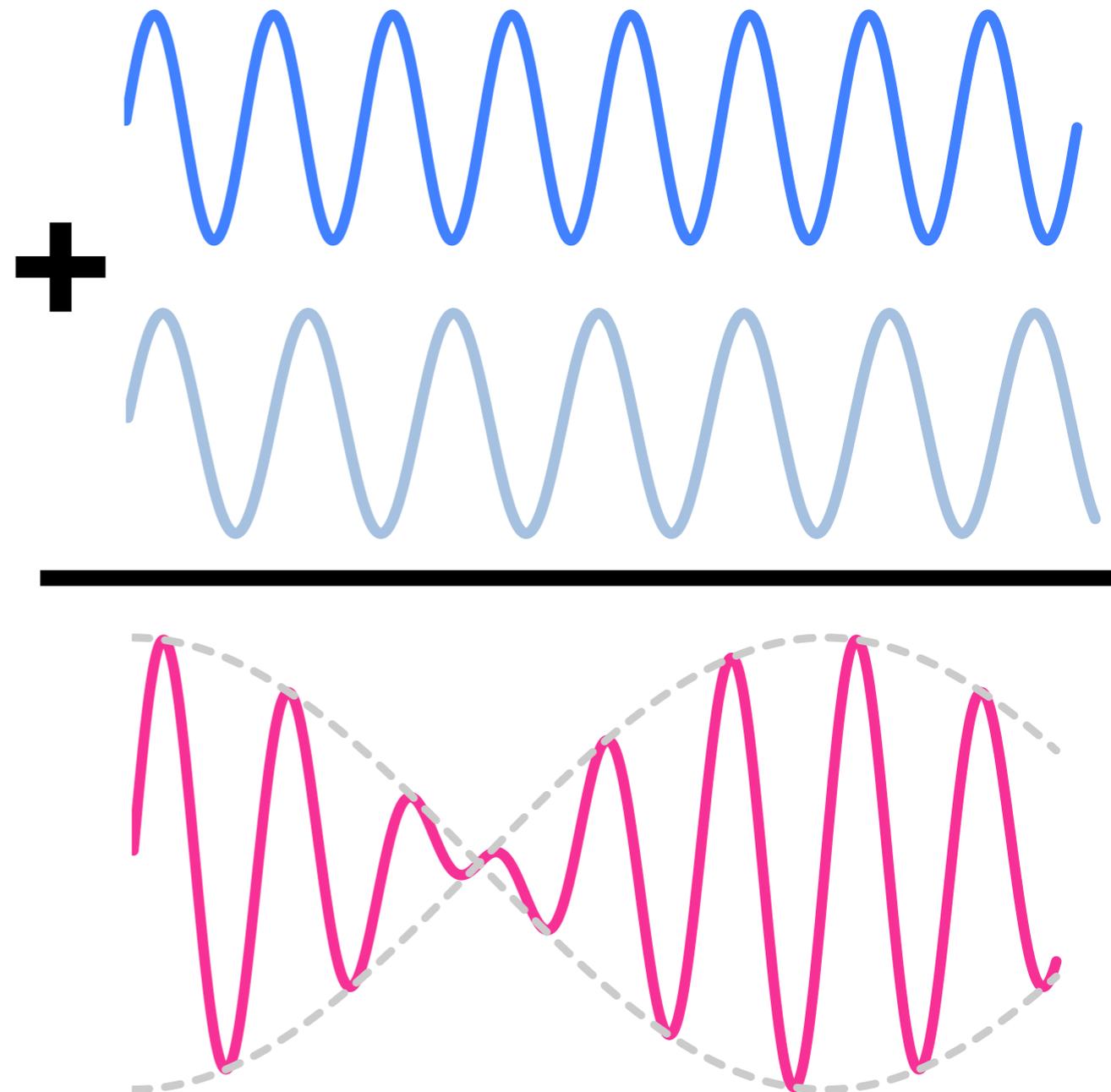
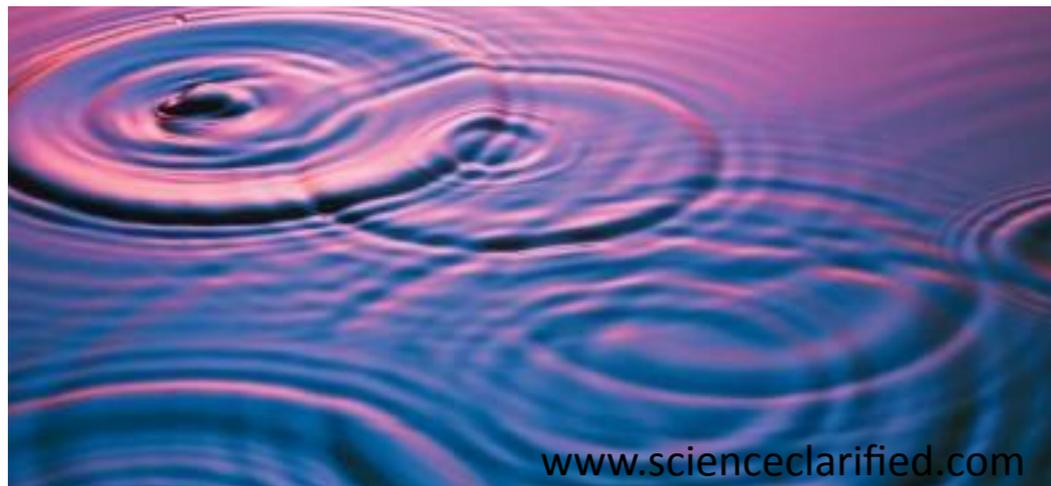
Movimiento ondulatorio

- Las **partículas** a veces se comportan como **ondas**
- Cuando las ondas viajan en la misma dirección, las ondas se **superponen**
- Cuando las ondas oscilan de manera parecida pero no igual, puede ocurrir un **fenómeno de interferencia durante su propagación:**
 - A veces las componentes se suman
 - A veces las componentes se cancelan

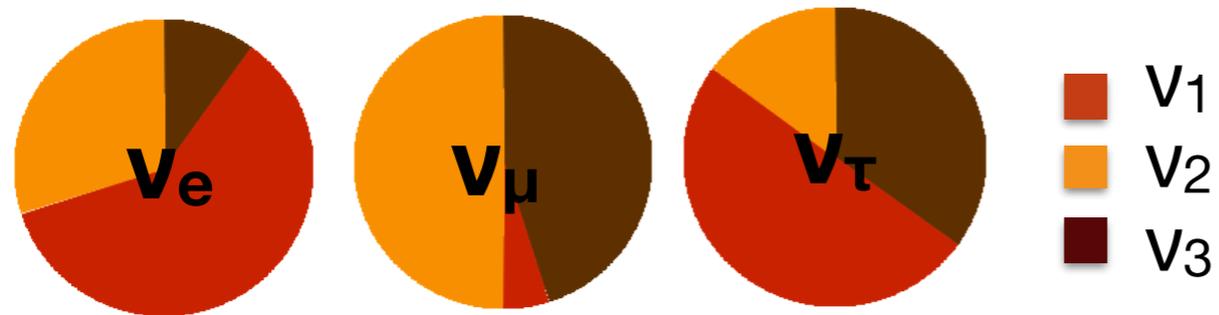


Movimiento ondulatorio

- Las **partículas** a veces se comportan como **ondas**
- Cuando las ondas viajan en la misma dirección, las ondas se **superponen**
- Cuando las ondas oscilan de manera parecida pero no igual, puede ocurrir un **fenómeno de interferencia durante su propagación**:
 - A veces las componentes se suman
 - A veces las componentes se cancelan



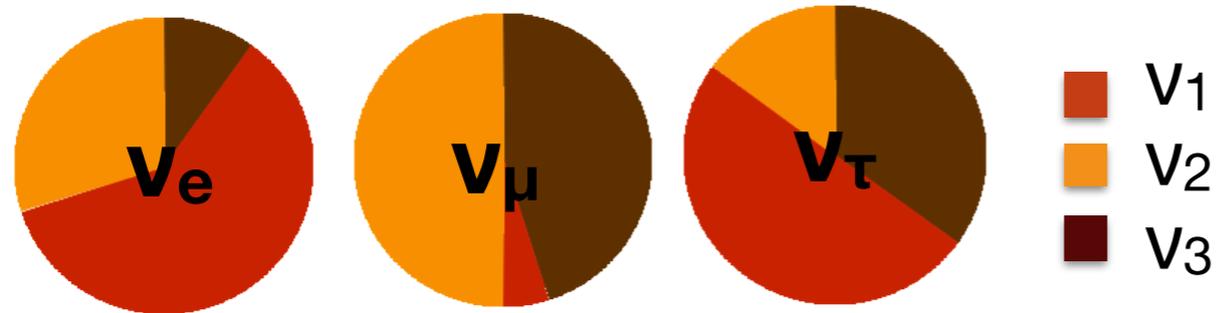
Combinación de 3 ondas



- En el Modelo Estándar los neutrinos son 3 partículas pero cuando se propagan son **combinaciones de 3 ondas diferentes (1,2,3)**
- Cuando los neutrinos se desplazan, las ondas se combinan de diferentes maneras dependiendo de la **distancia** recorrida por el neutrino y su **energía**

distancia →

Combinación de 3 ondas

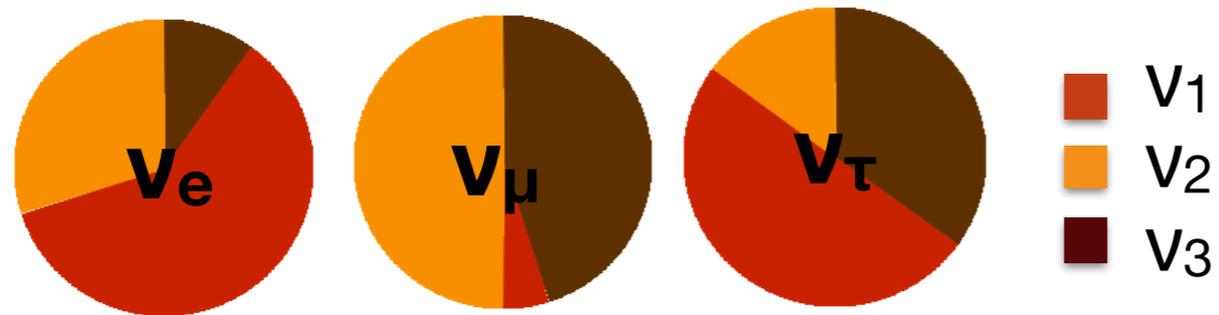


- En el Modelo Estándar los neutrinos son 3 partículas pero cuando se propagan son **combinaciones de 3 ondas diferentes (1,2,3)**
- Cuando los neutrinos se desplazan, las ondas se combinan de diferentes maneras dependiendo de la **distancia** recorrida por el neutrino y su **energía**

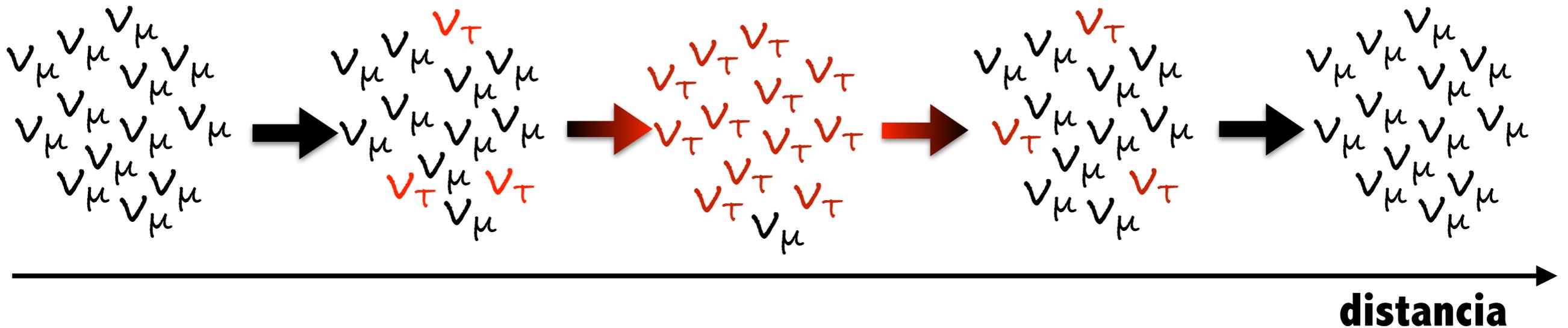
ν_μ ν_μ ν_μ
 ν_μ ν_μ ν_μ
 ν_μ ν_μ ν_μ
 ν_μ ν_μ ν_μ
 ν_μ ν_μ ν_μ

→ **distancia**

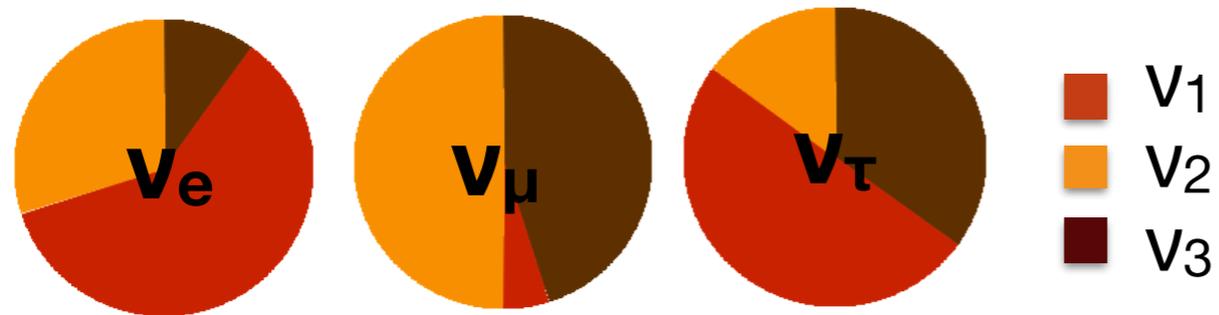
Combinación de 3 ondas



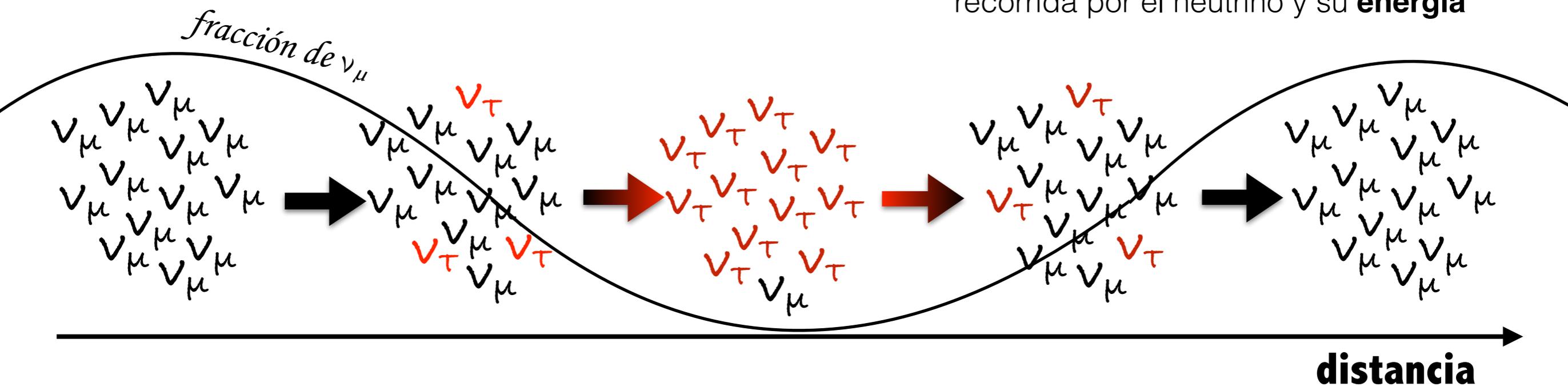
- En el Modelo Estándar los neutrinos son 3 partículas pero cuando se propagan son **combinaciones de 3 ondas diferentes (1,2,3)**
- Cuando los neutrinos se desplazan, las ondas se combinan de diferentes maneras dependiendo de la **distancia** recorrida por el neutrino y su **energía**



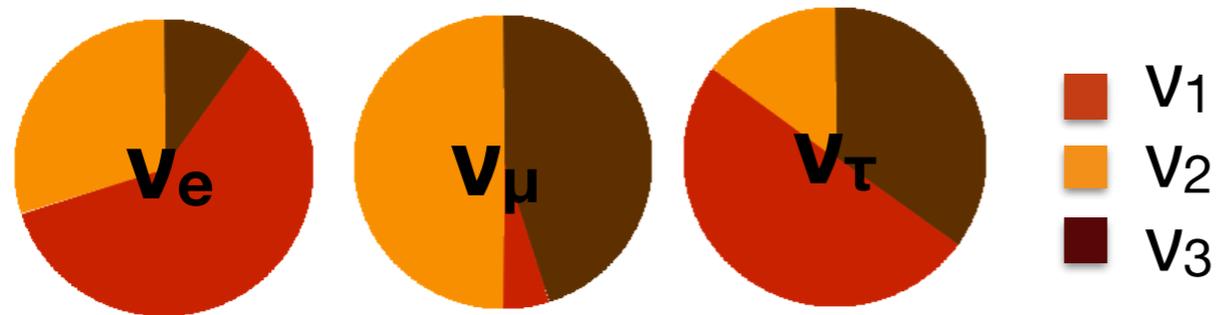
Combinación de 3 ondas



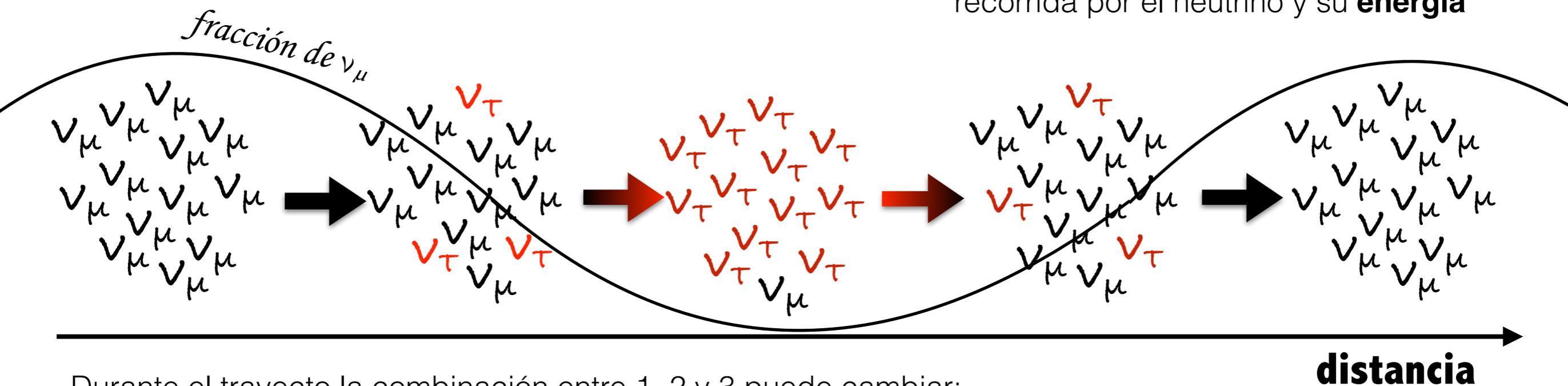
- En el Modelo Estándar los neutrinos son 3 partículas pero cuando se propagan son **combinaciones de 3 ondas diferentes (1,2,3)**
- Cuando los neutrinos se desplazan, las ondas se combinan de diferentes maneras dependiendo de la **distancia** recorrida por el neutrino y su **energía**



Combinación de 3 ondas



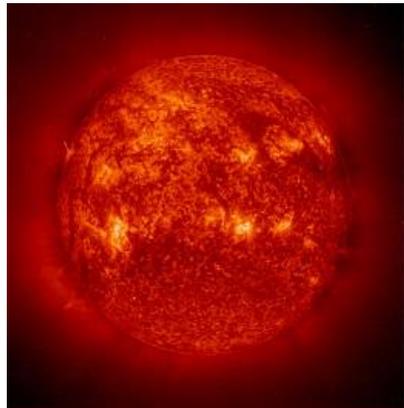
- En el Modelo Estándar los neutrinos son 3 partículas pero cuando se propagan son **combinaciones de 3 ondas diferentes (1,2,3)**
- Cuando los neutrinos se desplazan, las ondas se combinan de diferentes maneras dependiendo de la **distancia** recorrida por el neutrino y su **energía**



Durante el trayecto la combinación entre 1, 2 y 3 puede cambiar:

- En un punto puede parecerse a un ν_μ
- En otro punto las ondas se combinan como ν_τ

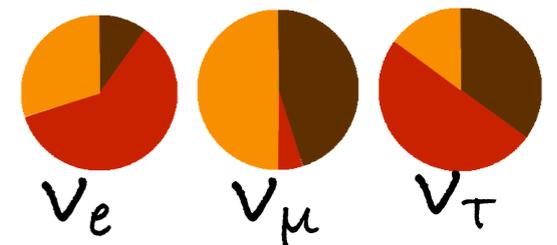
Detección de las oscilaciones



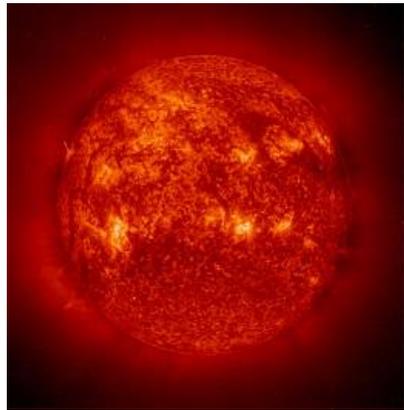
ν_e

E_ν

producción



Detección de las oscilaciones

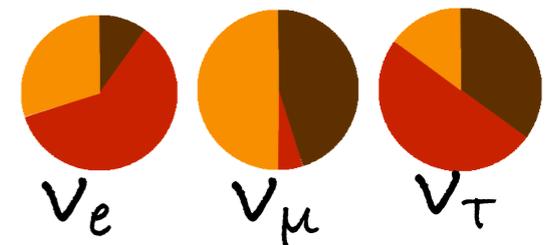


ν_e

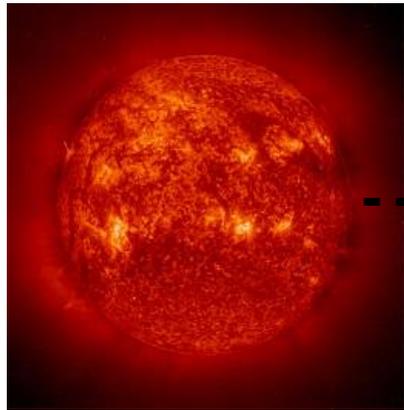
E_ν

producción

- Interacción débil: produce neutrinos de un determinado tipo
- Sabemos de qué tipo son midiendo su partícula asociada



Detección de las oscilaciones



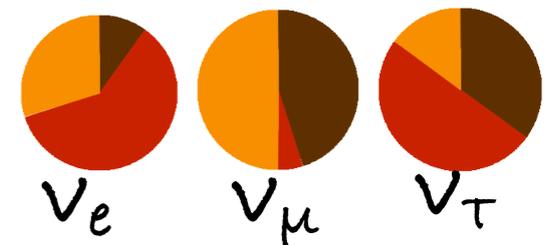
ν_e

E_ν

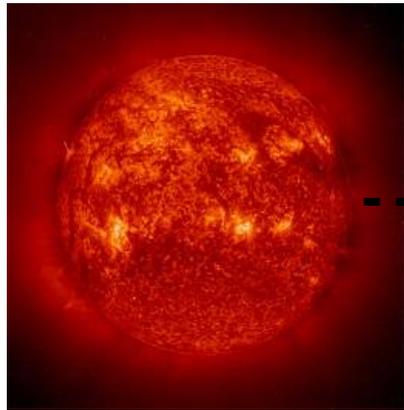


producción

- Interacción débil: produce neutrinos de un determinado tipo
- Sabemos de qué tipo son midiendo su partícula asociada



Detección de las oscilaciones



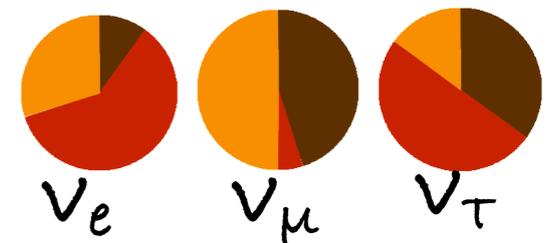
ν_e

E_ν

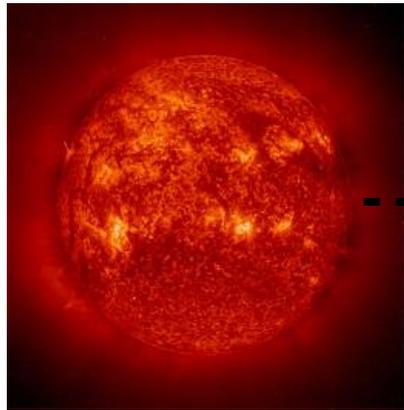
$L = \text{distancia}$

producción

- Interacción débil: produce neutrinos de un determinado tipo
- Sabemos de qué tipo son midiendo su partícula asociada



Detección de las oscilaciones



ν_e

E_ν

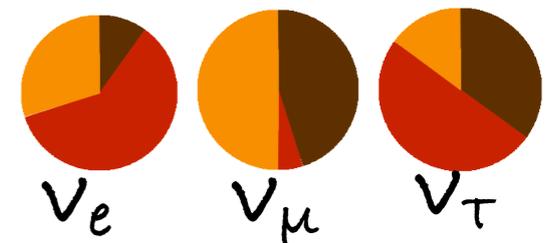


L = distancia

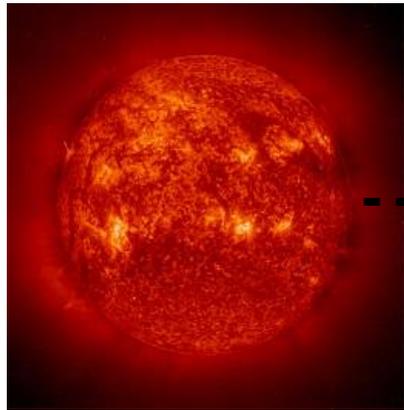
Los neutrinos recorren una distancia y se mezclan

producción

- Interacción débil: produce neutrinos de un determinado tipo
- Sabemos de qué tipo son midiendo su partícula asociada



Detección de las oscilaciones



ν_e

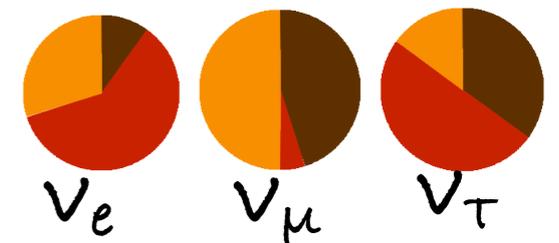
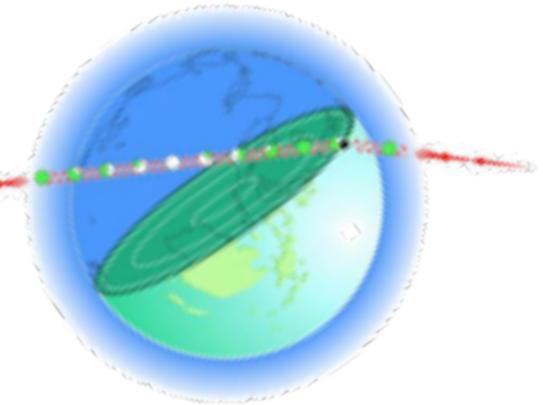
E_ν

producción

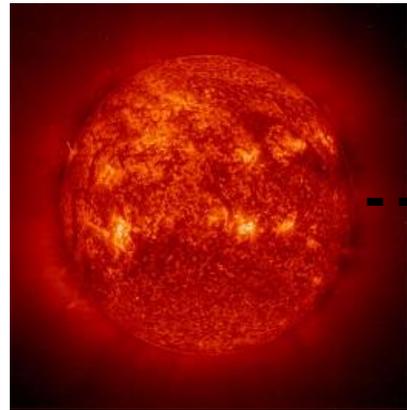
- Interacción débil: produce neutrinos de un determinado tipo
- Sabemos de qué tipo son midiendo su partícula asociada

L = distancia

Los neutrinos recorren una distancia y se mezclan



Detección de las oscilaciones



ν_e

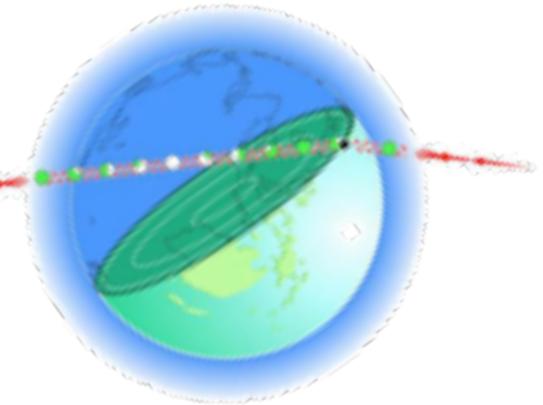
E_ν

producción

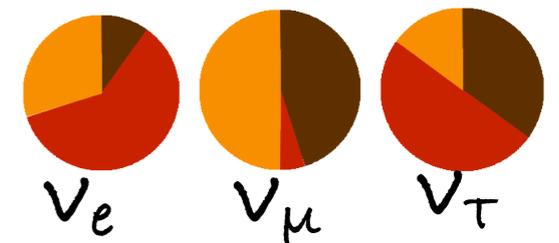
- Interacción débil: produce neutrinos de un determinado tipo
- Sabemos de qué tipo son midiendo su partícula asociada

L = distancia

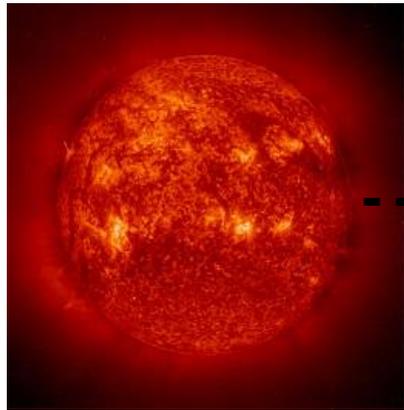
Los neutrinos recorren una distancia y se mezclan



detección



Detección de las oscilaciones



ν_e

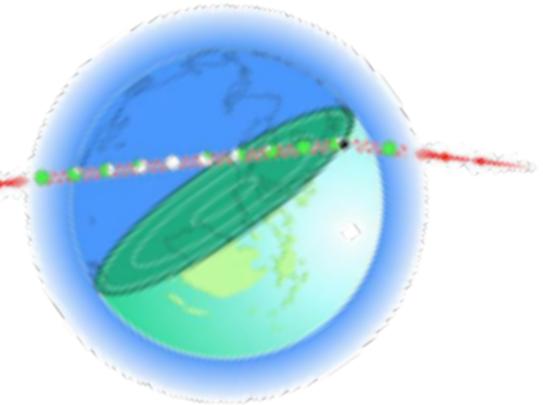
E_ν

producción

- Interacción débil: produce neutrinos de un determinado tipo
- Sabemos de qué tipo son midiendo su partícula asociada

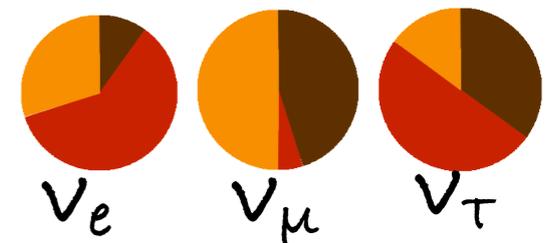
L = distancia

Los neutrinos recorren una distancia y se mezclan

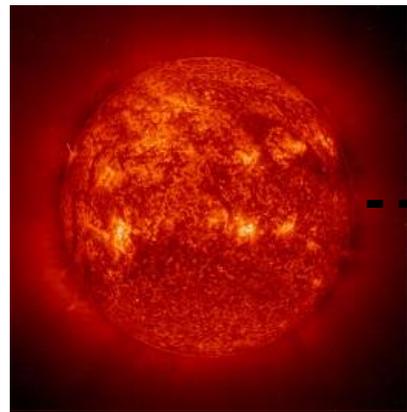


detección

- Los neutrinos interactúan en el detector
- Sabemos de qué tipo son detectando su partícula asociada
- Se compara lo medido con lo esperado (teoría) o con lo medido a cortas distancias (no osc.)



Detección de las oscilaciones



ν_e

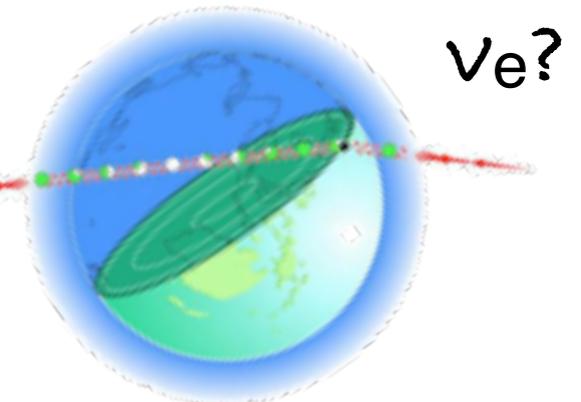
E_ν

producción

- Interacción débil: produce neutrinos de un determinado tipo
- Sabemos de qué tipo son midiendo su partícula asociada

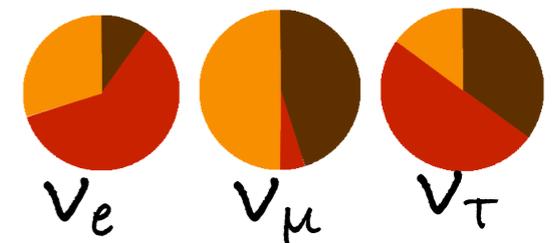
L = distancia

Los neutrinos recorren una distancia y se mezclan

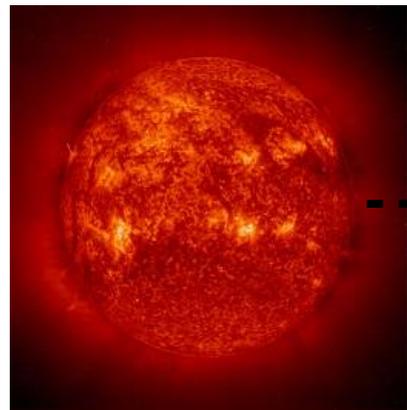


detección

- Los neutrinos interactúan en el detector
- Sabemos de qué tipo son detectando su partícula asociada
- Se compara lo medido con lo esperado (teoría) o con lo medido a cortas distancias (no osc.)



Detección de las oscilaciones



ν_e

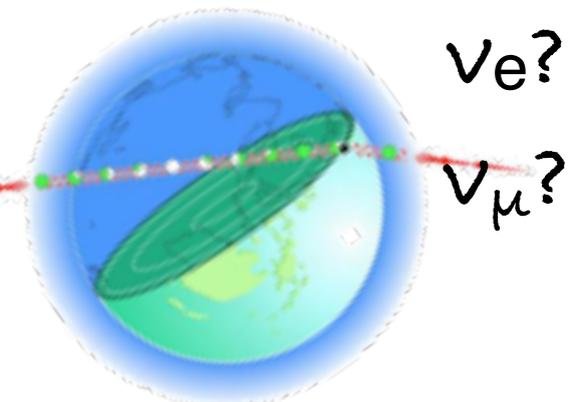
E_ν

producción

- Interacción débil: produce neutrinos de un determinado tipo
- Sabemos de qué tipo son midiendo su partícula asociada

L = distancia

Los neutrinos recorren una distancia y se mezclan

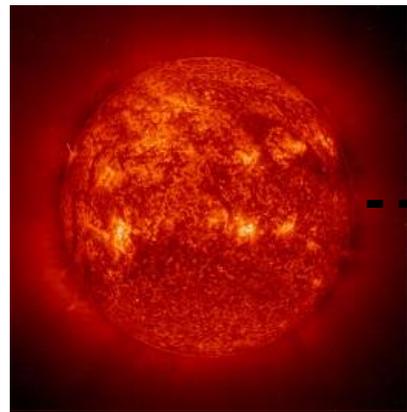


detección

- Los neutrinos interactúan en el detector
- Sabemos de qué tipo son detectando su partícula asociada
- Se compara lo medido con lo esperado (teoría) o con lo medido a cortas distancias (no osc.)



Detección de las oscilaciones



ν_e

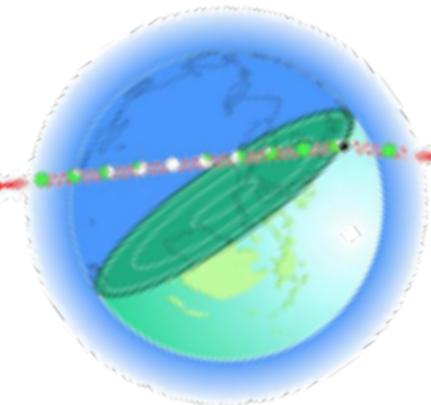
E_ν

producción

- Interacción débil: produce neutrinos de un determinado tipo
- Sabemos de qué tipo son midiendo su partícula asociada

L = distancia

Los neutrinos recorren una distancia y se mezclan



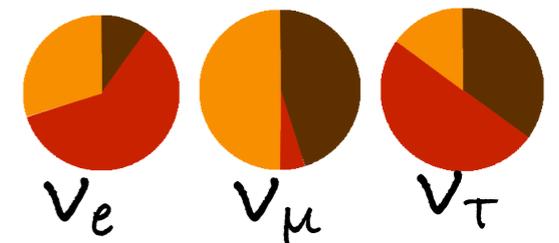
$\nu_e?$

$\nu_\mu?$

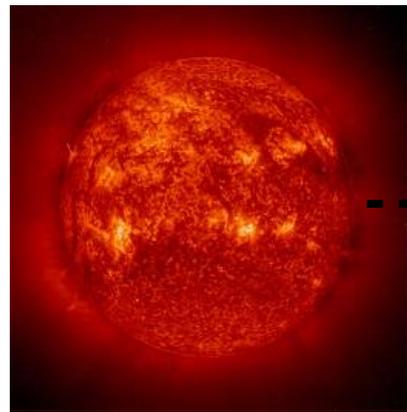
$\nu_\tau?$

detección

- Los neutrinos interactúan en el detector
- Sabemos de qué tipo son detectando su partícula asociada
- Se compara lo medido con lo esperado (teoría) o con lo medido a cortas distancias (no osc.)



Detección de las oscilaciones



ν_e

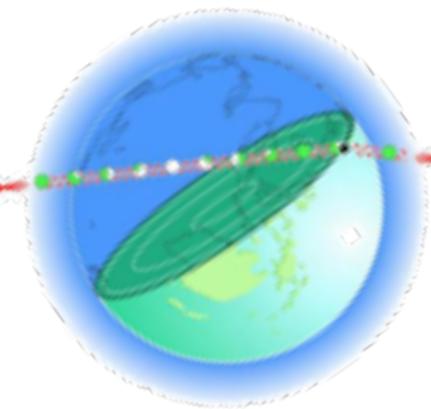
E_ν

producción

- Interacción débil: produce neutrinos de un determinado tipo
- Sabemos de qué tipo son midiendo su partícula asociada

L = distancia

Los neutrinos recorren una distancia y se mezclan



$\nu_e?$

$\nu_\mu?$

$\nu_\tau?$

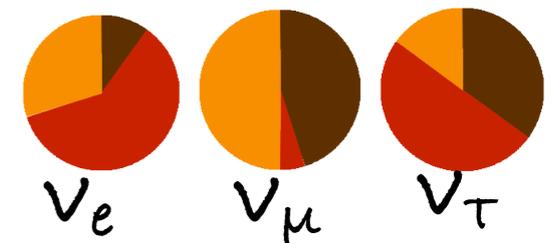
e

μ

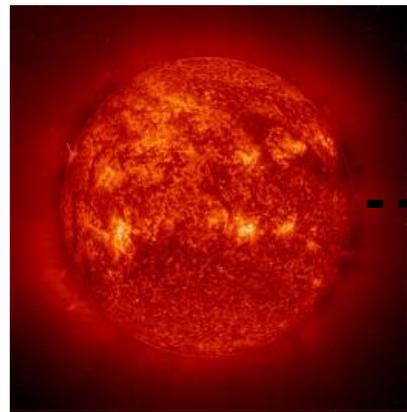
τ

detección

- Los neutrinos interactúan en el detector
- Sabemos de qué tipo son detectando su partícula asociada
- Se compara lo medido con lo esperado (teoría) o con lo medido a cortas distancias (no osc.)



Detección de las oscilaciones



ν_e

E_ν

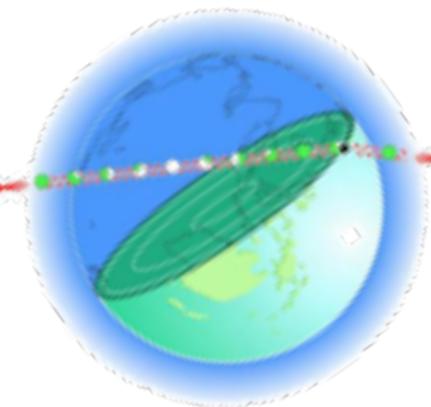
producción

- Interacción débil: produce neutrinos de un determinado tipo
- Sabemos de qué tipo son midiendo su partícula asociada

L = distancia

Los neutrinos recorren una distancia y se mezclan

$$P_{\alpha\beta} = \sin^2 2\theta \cdot \sin^2 \left(\frac{\Delta m^2 \cdot L}{4 \cdot E_\nu} \right)$$



$\nu_e?$

$\nu_\mu?$

$\nu_\tau?$

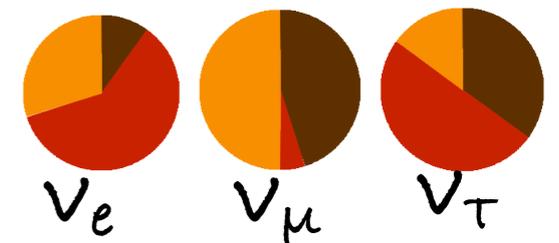
e

μ

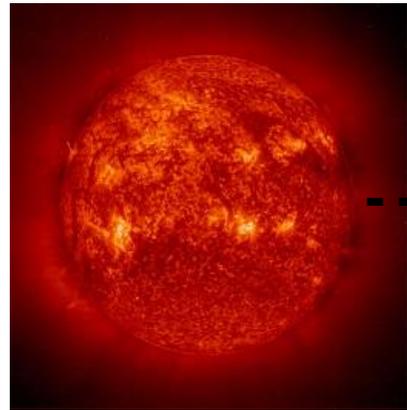
τ

detección

- Los neutrinos interactúan en el detector
- Sabemos de qué tipo son detectando su partícula asociada
- Se compara lo medido con lo esperado (teoría) o con lo medido a cortas distancias (no osc.)



Detección de las oscilaciones



ν_e

E_ν

producción

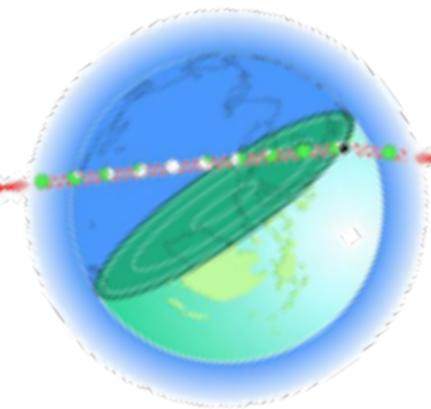
- Interacción débil: produce neutrinos de un determinado tipo
- Sabemos de qué tipo son midiendo su partícula asociada

L = distancia

Los neutrinos recorren una distancia y se mezclan

$$P_{\alpha\beta} = \sin^2 2\theta \cdot \sin^2 \left(\frac{\Delta m^2 \cdot L}{4 \cdot E_\nu} \right)$$

Probabilidad de oscilación



$\nu_e?$

$\nu_\mu?$

$\nu_\tau?$

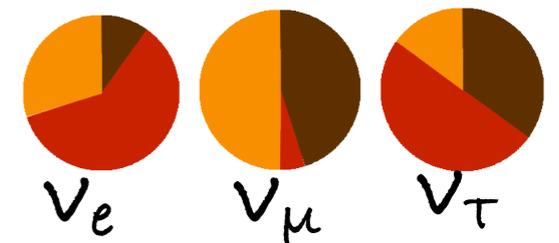
e

μ

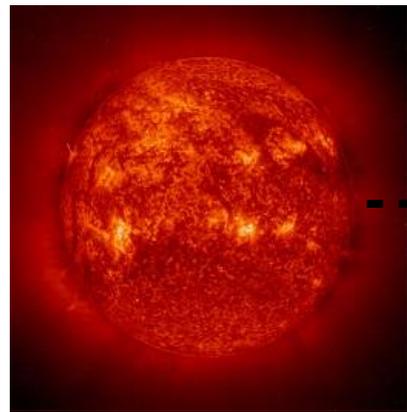
τ

detección

- Los neutrinos interactúan en el detector
- Sabemos de qué tipo son detectando su partícula asociada
- Se compara lo medido con lo esperado (teoría) o con lo medido a cortas distancias (no osc.)



Detección de las oscilaciones



ν_e

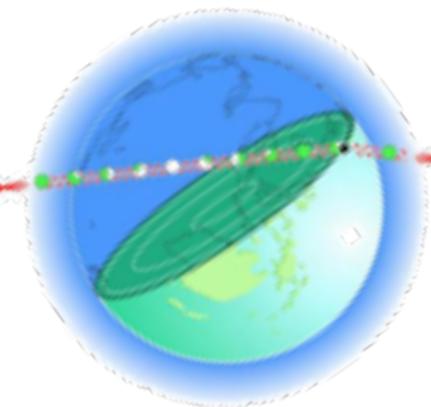
E_ν

producción

- Interacción débil: produce neutrinos de un determinado tipo
- Sabemos de qué tipo son midiendo su partícula asociada

L = distancia

Los neutrinos recorren una distancia y se mezclan



$\nu_e?$

$\nu_\mu?$

$\nu_\tau?$

e

μ

τ

detección

- Los neutrinos interactúan en el detector
- Sabemos de qué tipo son detectando su partícula asociada
- Se compara lo medido con lo esperado (teoría) o con lo medido a cortas distancias (no osc.)

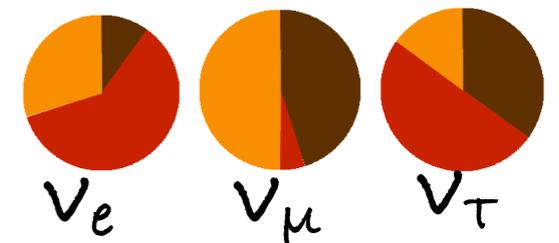
$$P_{\alpha\beta} = \sin^2 2\theta \cdot \sin^2 \left(\frac{\Delta m^2 \cdot L}{4 \cdot E_\nu} \right)$$

Probabilidad de oscilación

Para 3 neutrinos hay:

2 valores de Δm^2 (Δm^2_{21} , Δm^2_{32})

3 valores de θ (θ_{12} , θ_{23} , θ_{13})



Mezcla de sabores

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \underbrace{\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix}}_{\theta_{\text{atm}}} \underbrace{\begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13}e^{-i\delta} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13}e^{i\delta} & 0 & c_{13} \end{pmatrix}}_{\theta_{13}, \delta_{\text{CP}}} \underbrace{\begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}}_{\theta_{\text{solar}}} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

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

m_1
 m_2
 m_3

Δm^2_{21}
 Δm^2_{31}

Mezcla de sabores

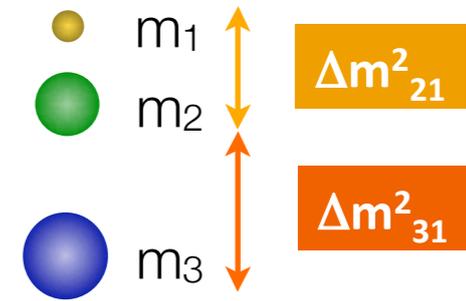
$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \underbrace{\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix}}_{\theta_{\text{atm}}} \underbrace{\begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13}e^{-i\delta} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13}e^{i\delta} & 0 & c_{13} \end{pmatrix}}_{\theta_{13}, \delta_{\text{CP}}} \underbrace{\begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}}_{\theta_{\text{solar}}} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

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

$$P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) = \sin^2 2\theta \cdot \sin^2 \left(\frac{\Delta m^2 \cdot L}{4 \cdot E_\nu} \right)$$

Mezcla de sabores

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13}e^{-i\delta} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13}e^{i\delta} & 0 & c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$



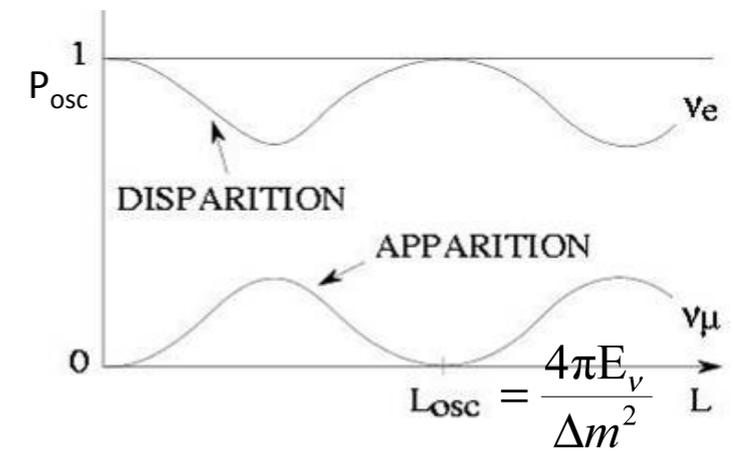
$$c_{ij} = \cos \theta_{ij} \\
 s_{ij} = \sin \theta_{ij}$$

θ_{atm}

θ_{13}, δ_{CP}

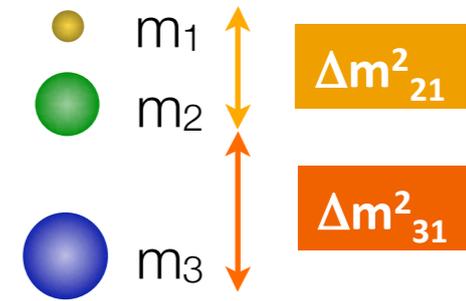
θ_{solar}

$$P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) = \sin^2 2\theta \cdot \sin^2 \left(\frac{\Delta m^2 \cdot L}{4 \cdot E_\nu} \right)$$



Mezcla de sabores

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13}e^{-i\delta} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13}e^{i\delta} & 0 & c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$



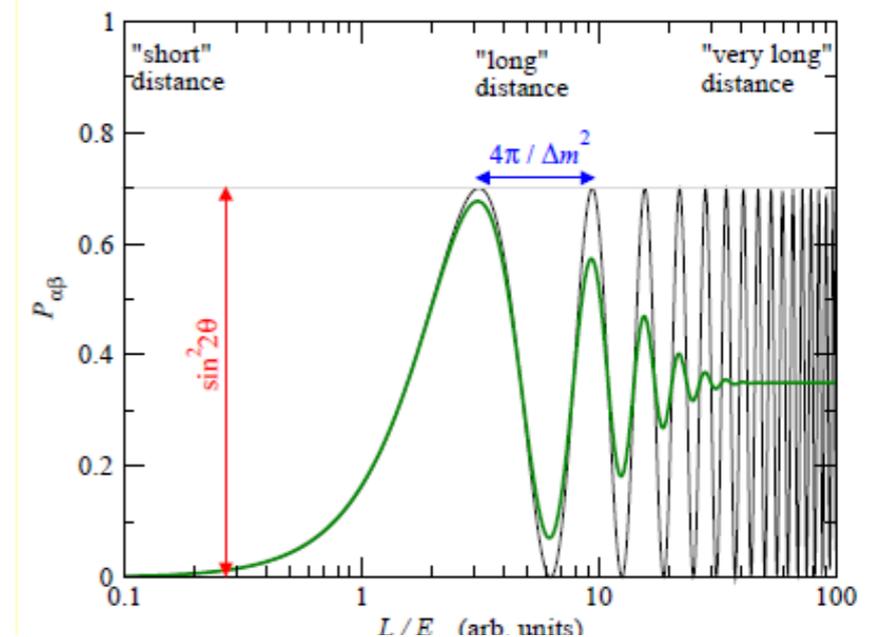
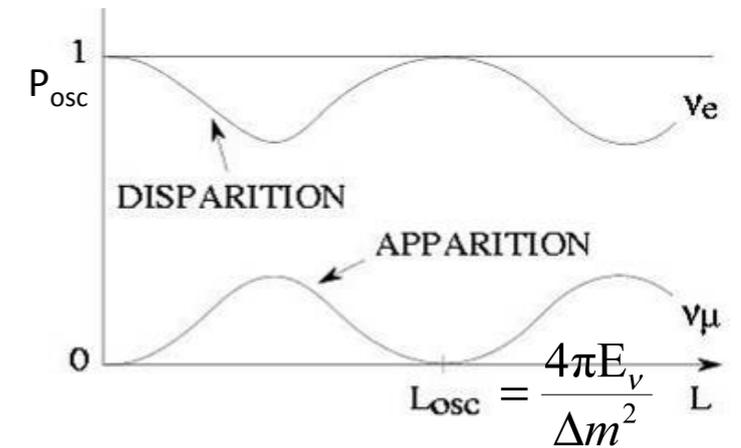
$c_{ij} = \cos \theta_{ij}$
 $s_{ij} = \sin \theta_{ij}$

θ_{atm}

θ_{13}, δ_{CP}

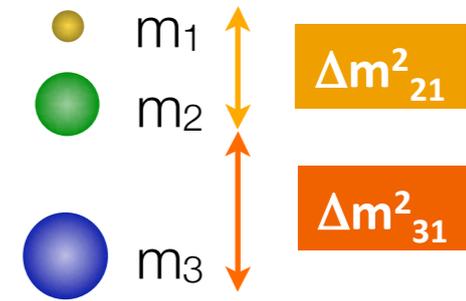
θ_{solar}

$$P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) = \sin^2 2\theta \cdot \sin^2 \left(\frac{\Delta m^2 \cdot L}{4 \cdot E_\nu} \right)$$



Mezcla de sabores

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13}e^{-i\delta} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13}e^{i\delta} & 0 & c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$



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

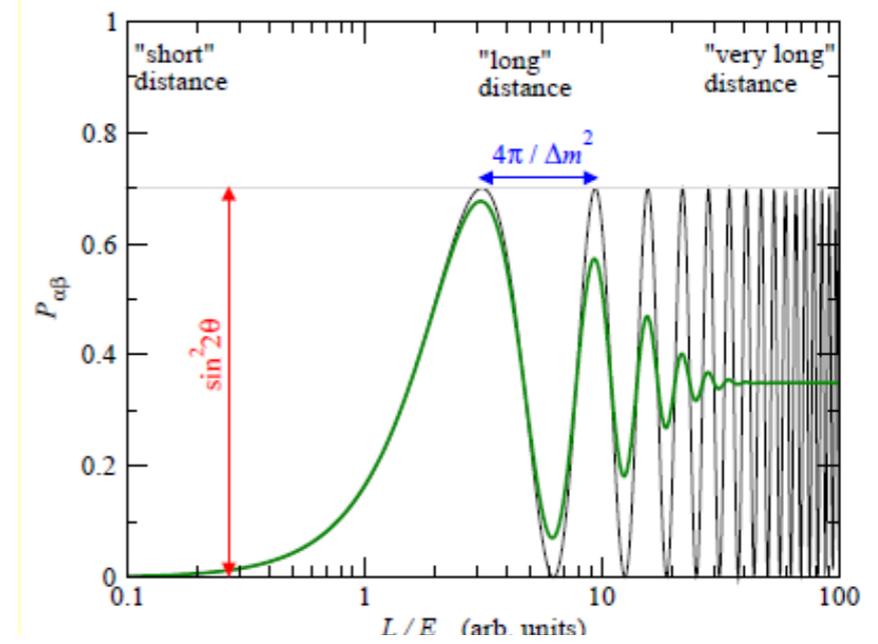
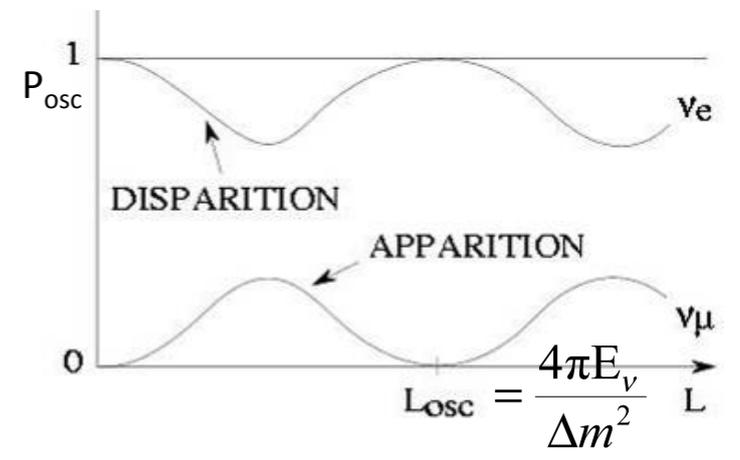
θ_{atm}

θ_{13}, δ_{CP}

θ_{solar}

amplitud

$$P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) = \sin^2 2\theta \cdot \sin^2 \left(\frac{\Delta m^2 \cdot L}{4 \cdot E_\nu} \right)$$



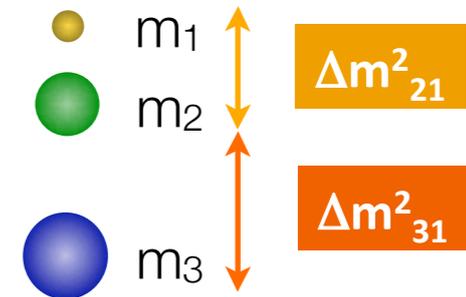
Mezcla de sabores

Atmosféricos + LBL

Reactores + LBL

Solares + KamLAND

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13}e^{-i\delta} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13}e^{i\delta} & 0 & c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$



$$c_{ij} = \cos \theta_{ij}$$

$$s_{ij} = \sin \theta_{ij}$$

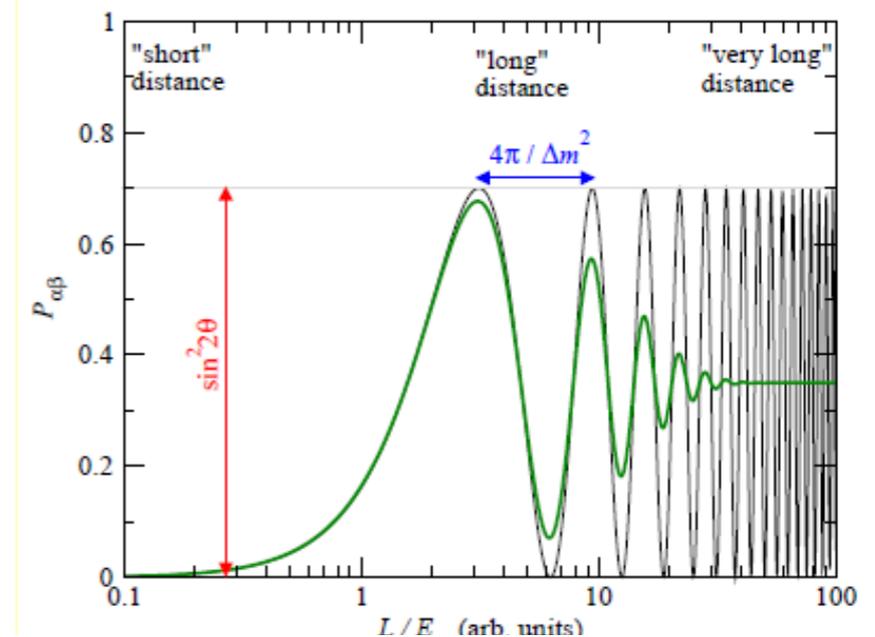
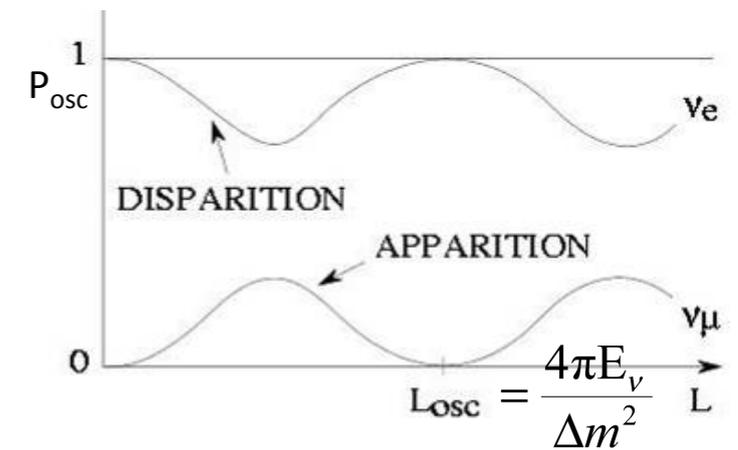
θ_{atm}

$\theta_{13}, \delta_{\text{CP}}$

θ_{solar}

amplitud

$$P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) = \sin^2 2\theta \cdot \sin^2 \left(\frac{\Delta m^2 \cdot L}{4 \cdot E_\nu} \right)$$



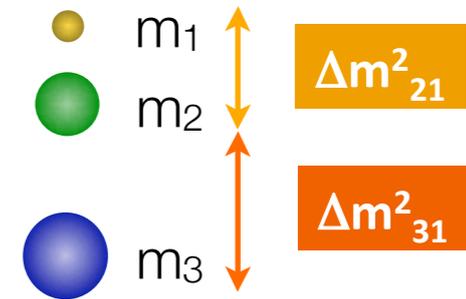
Mezcla de sabores

Atmosféricos + LBL

Reactores + LBL

Solares + KamLAND

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13}e^{-i\delta} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13}e^{i\delta} & 0 & c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$



$$c_{ij} = \cos \theta_{ij}$$

$$s_{ij} = \sin \theta_{ij}$$

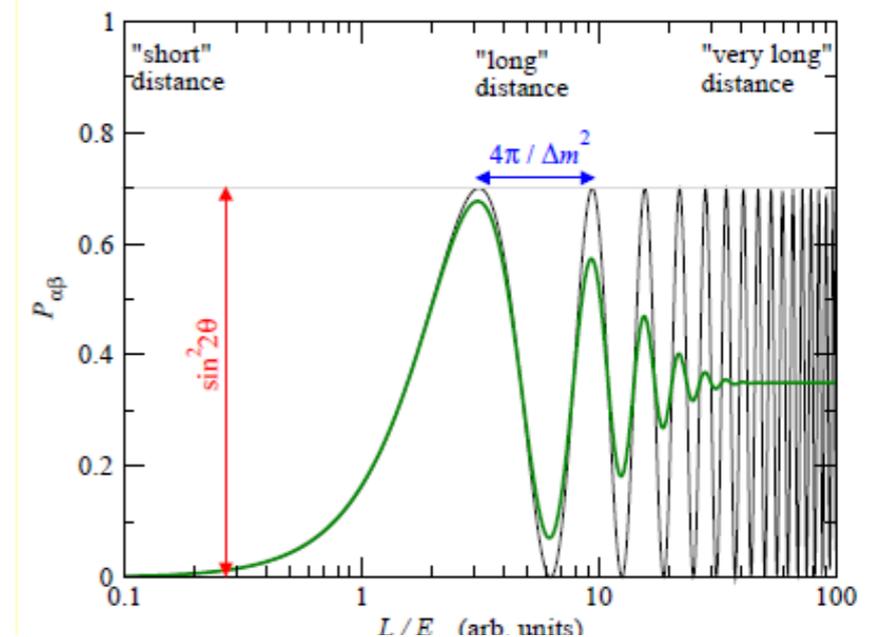
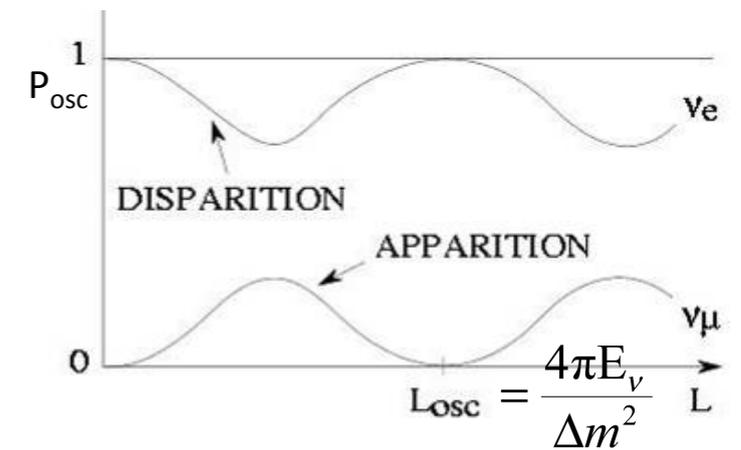
θ_{atm}

$\theta_{13}, \delta_{\text{CP}}$

θ_{solar}

amplitud

$$P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) = \sin^2 2\theta \cdot \sin^2 \left(\frac{\Delta m^2 \cdot L}{4 \cdot E_\nu} \right)$$



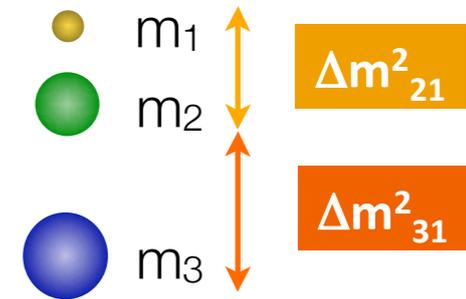
Mezcla de sabores

Atmosféricos + LBL

Reactores + LBL

Solares + KamLAND

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13}e^{-i\delta} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13}e^{i\delta} & 0 & c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$



$$c_{ij} = \cos \theta_{ij}$$

$$s_{ij} = \sin \theta_{ij}$$

θ_{atm}

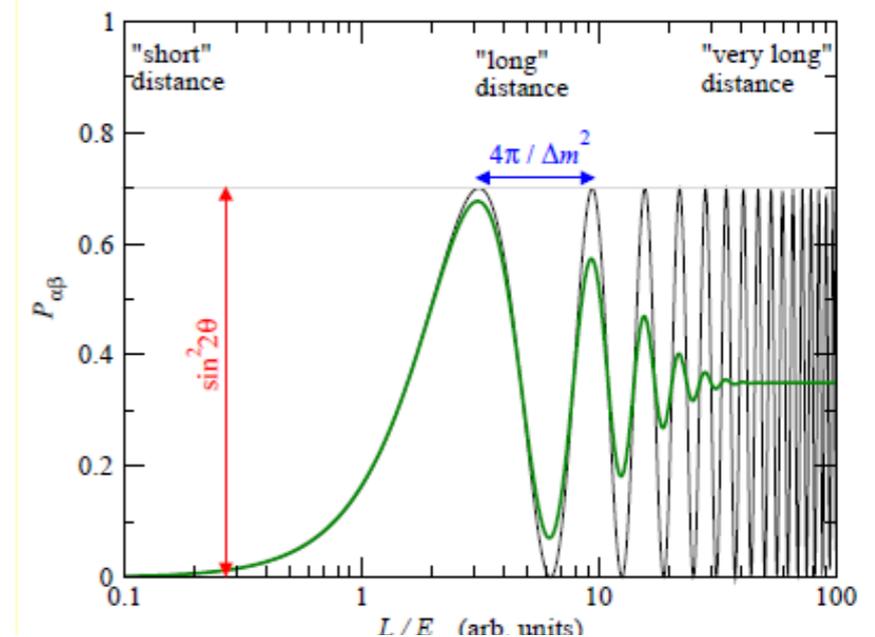
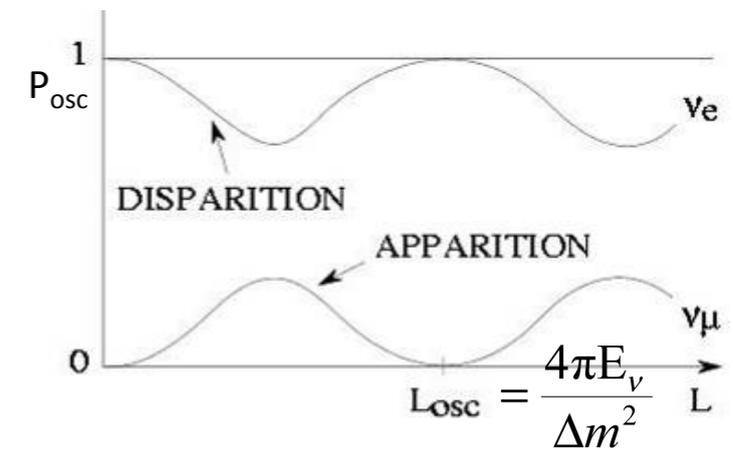
$\theta_{13}, \delta_{\text{CP}}$

θ_{solar}

amplitud

frecuencia

$$P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) = \sin^2 2\theta \cdot \sin^2 \left(\frac{\Delta m^2 \cdot L}{4 \cdot E_\nu} \right)$$



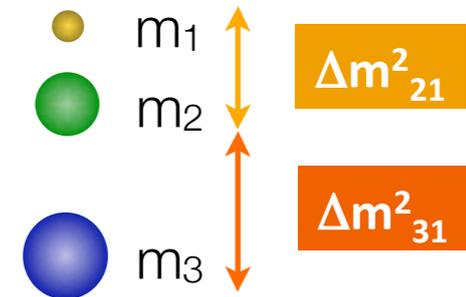
Mezcla de sabores

Atmosféricos + LBL

Reactores + LBL

Solares + KamLAND

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13}e^{-i\delta} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13}e^{i\delta} & 0 & c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$



$$c_{ij} = \cos \theta_{ij}$$

$$s_{ij} = \sin \theta_{ij}$$

θ_{atm}

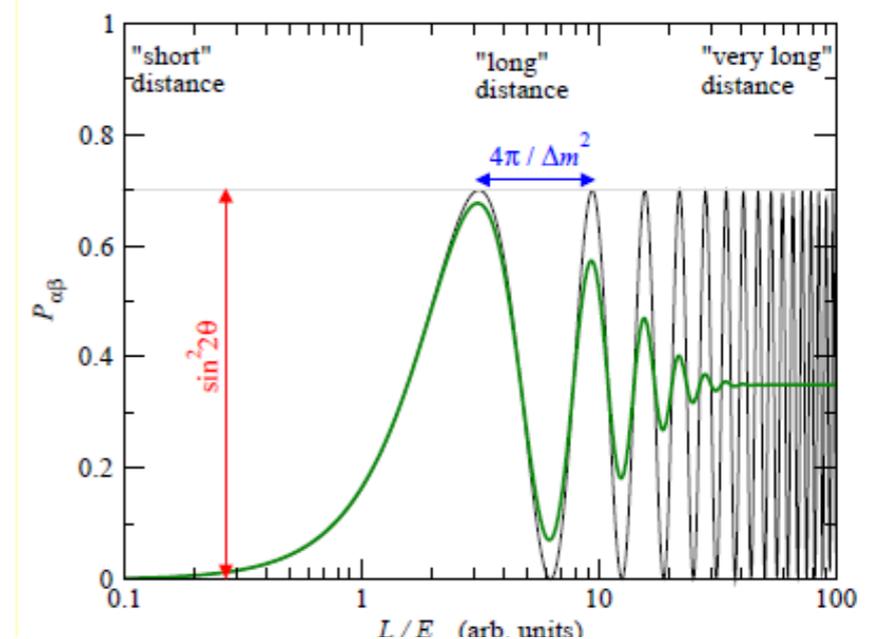
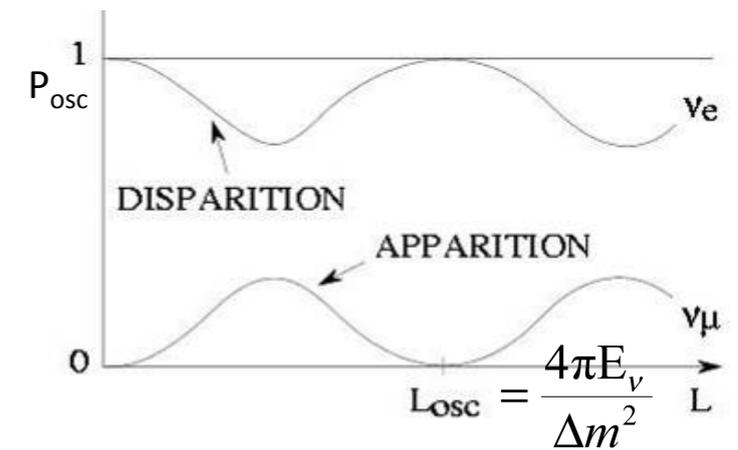
$\theta_{13}, \delta_{\text{CP}}$

θ_{solar}

amplitud

frecuencia

$$P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) = \sin^2 2\theta \cdot \sin^2 \left(\frac{\Delta m^2 \cdot L}{4 \cdot E_\nu} \right)$$



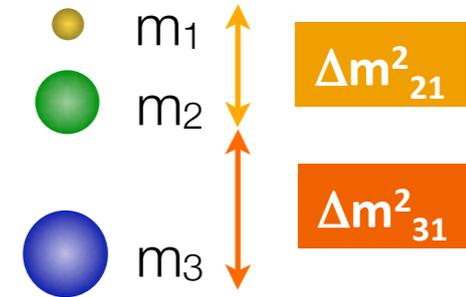
Mezcla de sabores

Atmosféricos + LBL

Reactores + LBL

Solares + KamLAND

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13}e^{-i\delta} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13}e^{i\delta} & 0 & c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$



$$c_{ij} = \cos \theta_{ij}$$

$$s_{ij} = \sin \theta_{ij}$$

θ_{atm}

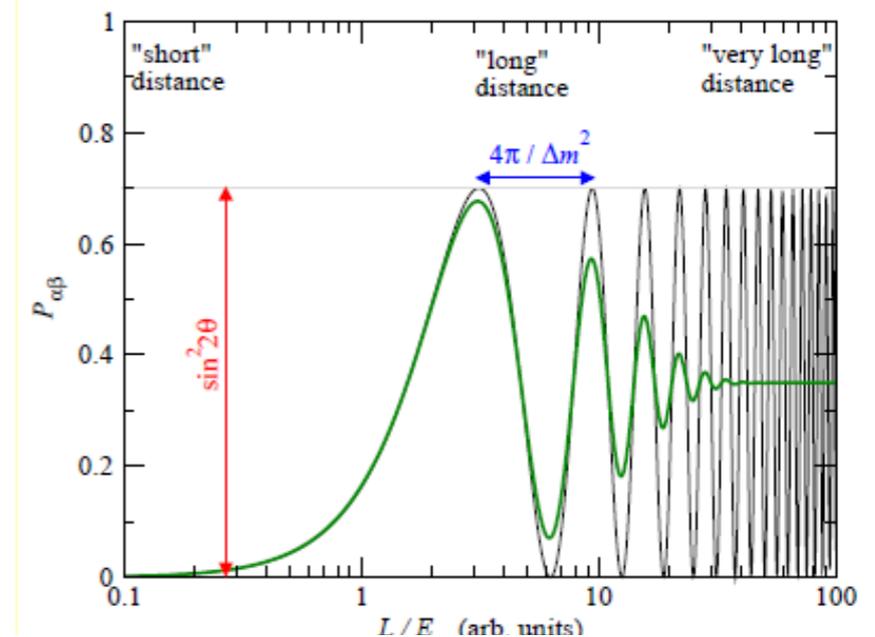
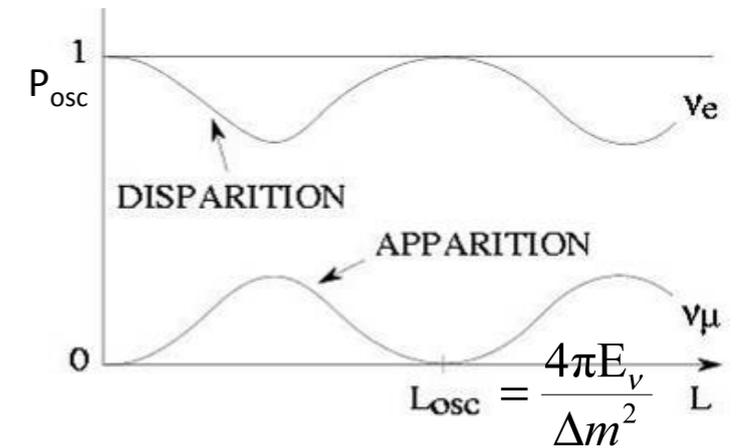
$\theta_{13}, \delta_{\text{CP}}$

θ_{solar}

amplitud

frecuencia

$$P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) = \sin^2 2\theta \cdot \sin^2 \left(\frac{\Delta m^2 \cdot L}{4 \cdot E_\nu} \right)$$



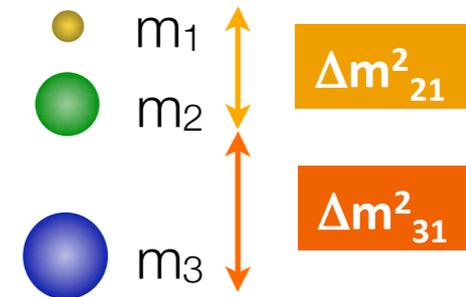
Mezcla de sabores

Atmosféricos + LBL

Reactores + LBL

Solares + KamLAND

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13}e^{-i\delta} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13}e^{i\delta} & 0 & c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$



$$c_{ij} = \cos \theta_{ij}$$

$$s_{ij} = \sin \theta_{ij}$$

θ_{atm}

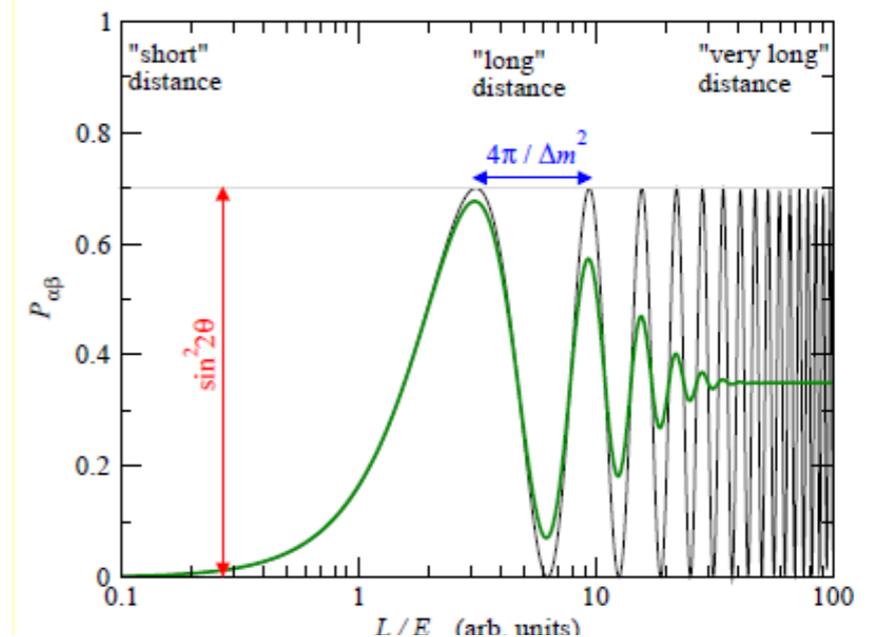
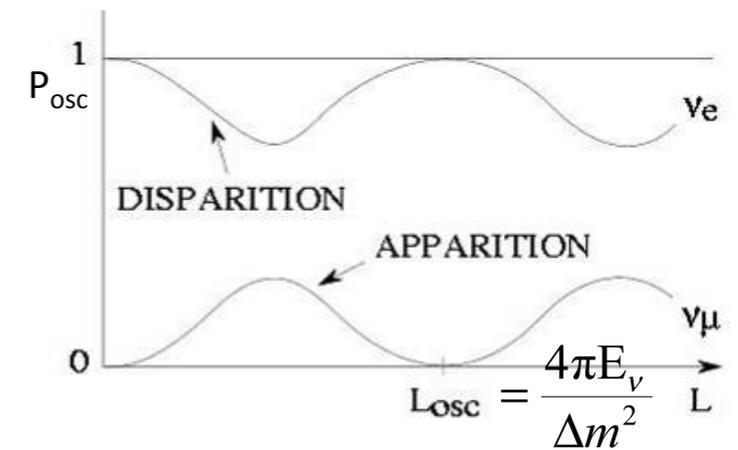
$\theta_{13}, \delta_{\text{CP}}$

θ_{solar}

amplitud

frecuencia

$$P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) = \sin^2 2\theta \cdot \sin^2 \left(\frac{\Delta m^2 \cdot L}{4 \cdot E_\nu} \right)$$



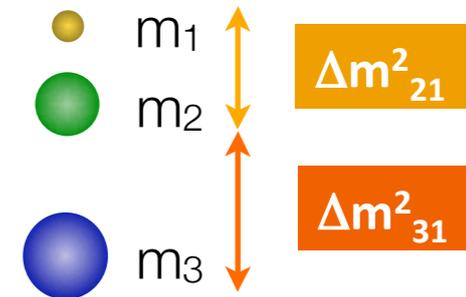
Mezcla de sabores

Atmosféricos + LBL

Reactores + LBL

Solares + KamLAND

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13}e^{-i\delta} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13}e^{i\delta} & 0 & c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$



$$c_{ij} = \cos \theta_{ij}$$

$$s_{ij} = \sin \theta_{ij}$$

θ_{atm}

$\theta_{13}, \delta_{\text{CP}}$

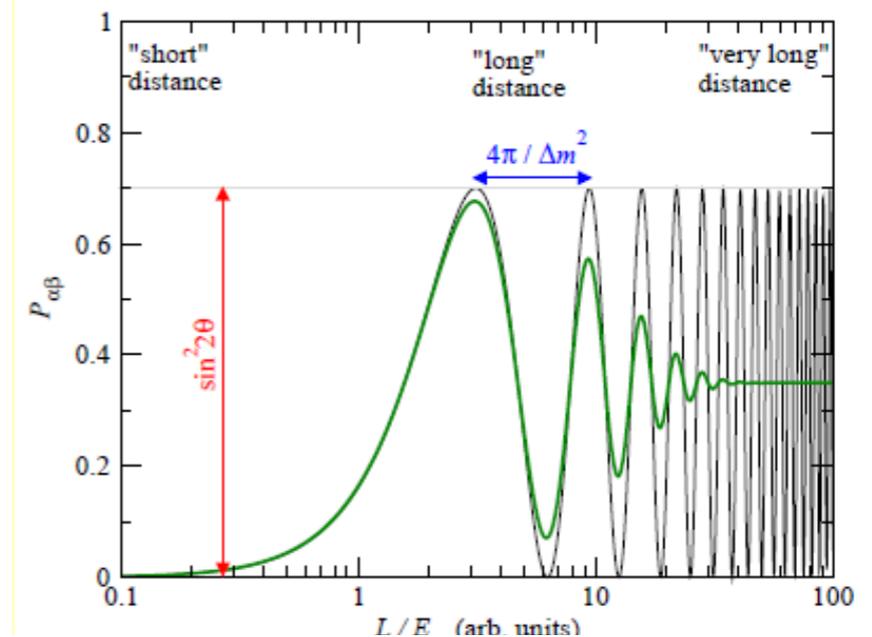
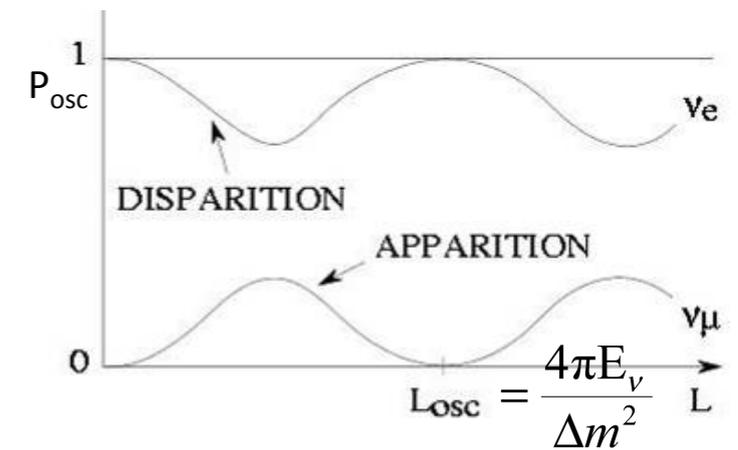
θ_{solar}

amplitud

frecuencia

$$P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) = \sin^2 2\theta \cdot \sin^2 \left(\frac{\Delta m^2 \cdot L}{4 \cdot E_\nu} \right)$$

parámetros experimentales



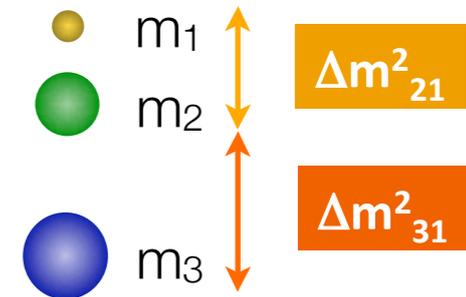
Mezcla de sabores

Atmosféricos + LBL

Reactores + LBL

Solares + KamLAND

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13}e^{-i\delta} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13}e^{i\delta} & 0 & c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$



$$c_{ij} = \cos \theta_{ij}$$

$$s_{ij} = \sin \theta_{ij}$$

θ_{atm}

$\theta_{13}, \delta_{\text{CP}}$

θ_{solar}

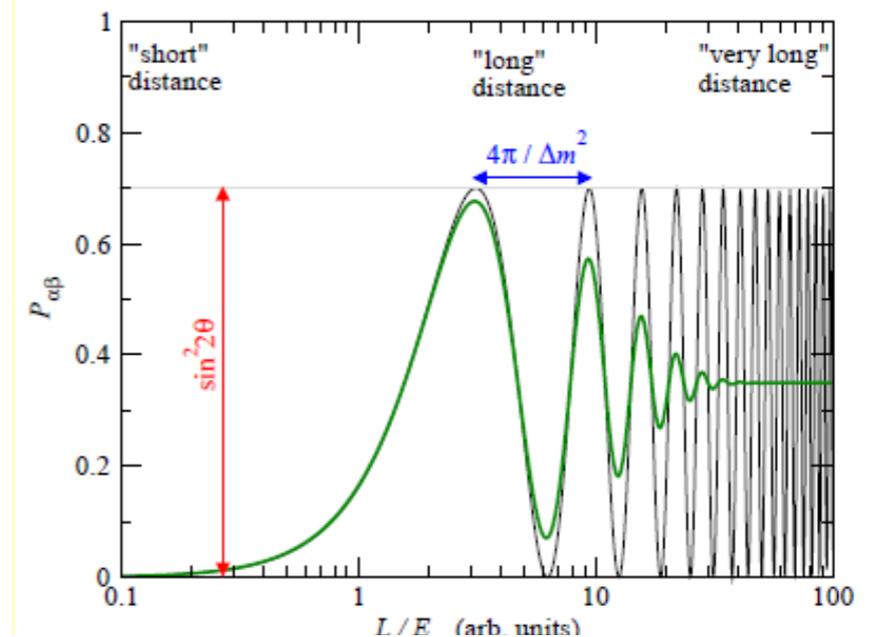
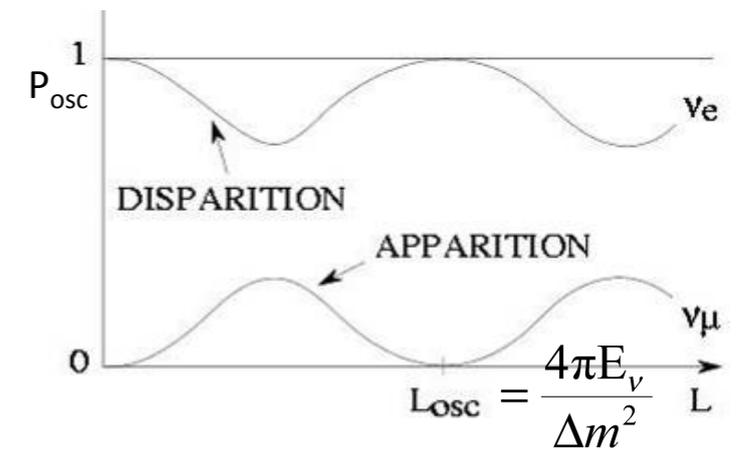
amplitud

frecuencia

$$P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) = \sin^2 2\theta \cdot \sin^2 \left(\frac{\Delta m^2 \cdot L}{4 \cdot E_\nu} \right)$$

Maximal oscillation:

parámetros experimentales



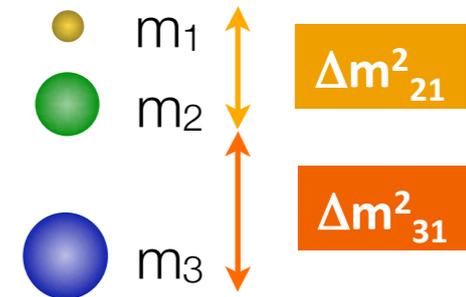
Mezcla de sabores

Atmosféricos + LBL

Reactores + LBL

Solares + KamLAND

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13}e^{-i\delta} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13}e^{i\delta} & 0 & c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$



$$c_{ij} = \cos \theta_{ij}$$

$$s_{ij} = \sin \theta_{ij}$$

θ_{atm}

$\theta_{13}, \delta_{\text{CP}}$

θ_{solar}

amplitud

frecuencia

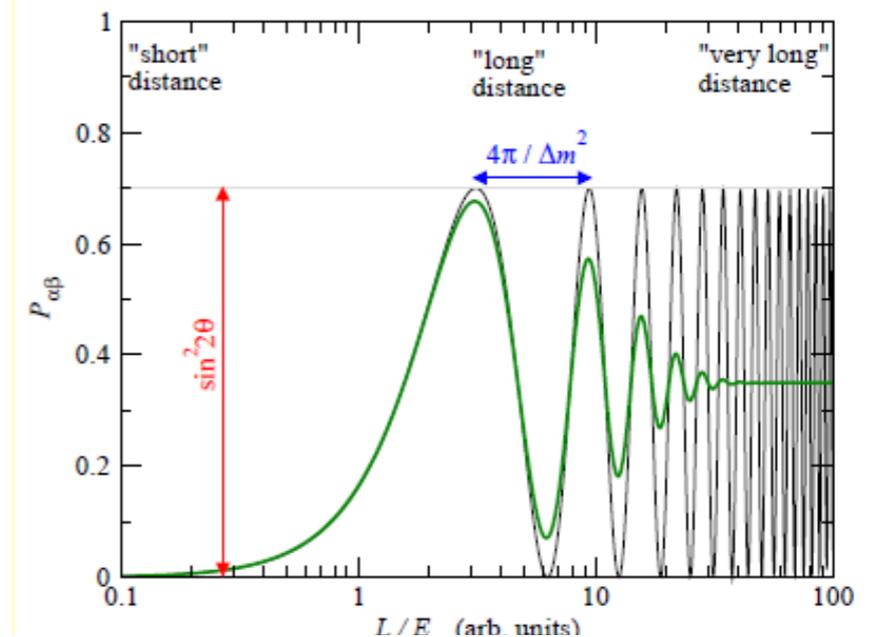
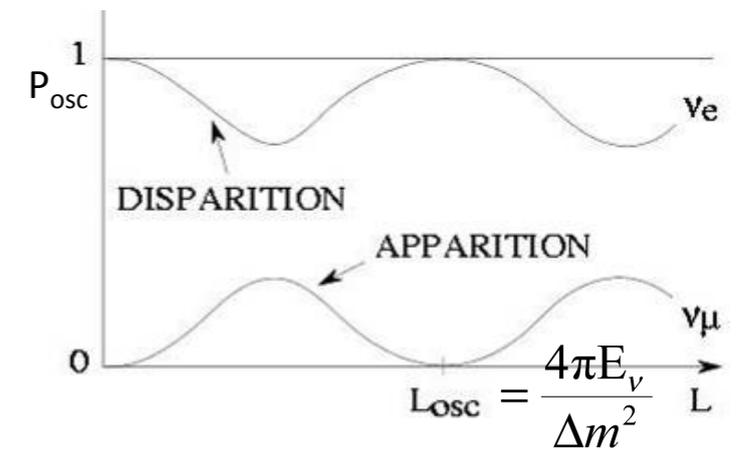
$$P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) = \sin^2 2\theta \cdot \sin^2 \left(\frac{\Delta m^2 \cdot L}{4 \cdot E_\nu} \right)$$

parámetros experimentales

Maximal oscillation:

$$\frac{L}{E} = \frac{2\pi}{\Delta m_{32}^2} \approx 500 \text{ km/GeV}$$

$$\frac{L}{E} = \frac{2\pi}{\Delta m_{21}^2} \approx 15000 \text{ km/GeV}$$



Intentos fallidos...

► Búsqueda $\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_\tau$ (desaparición)

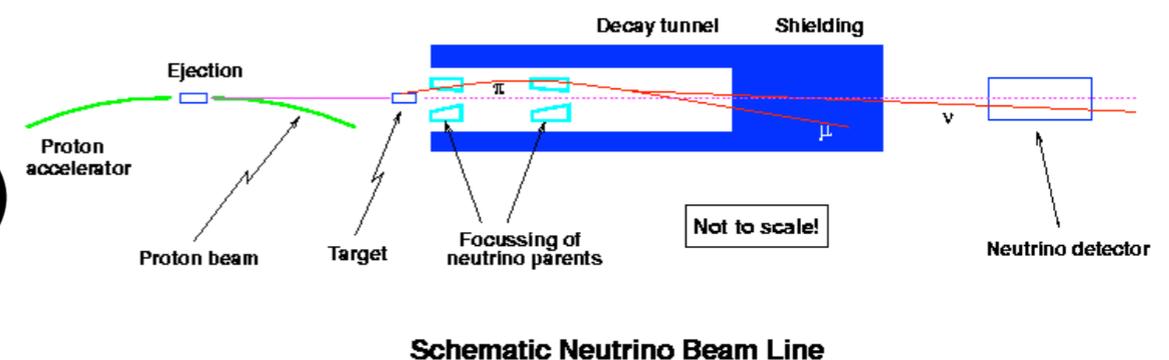
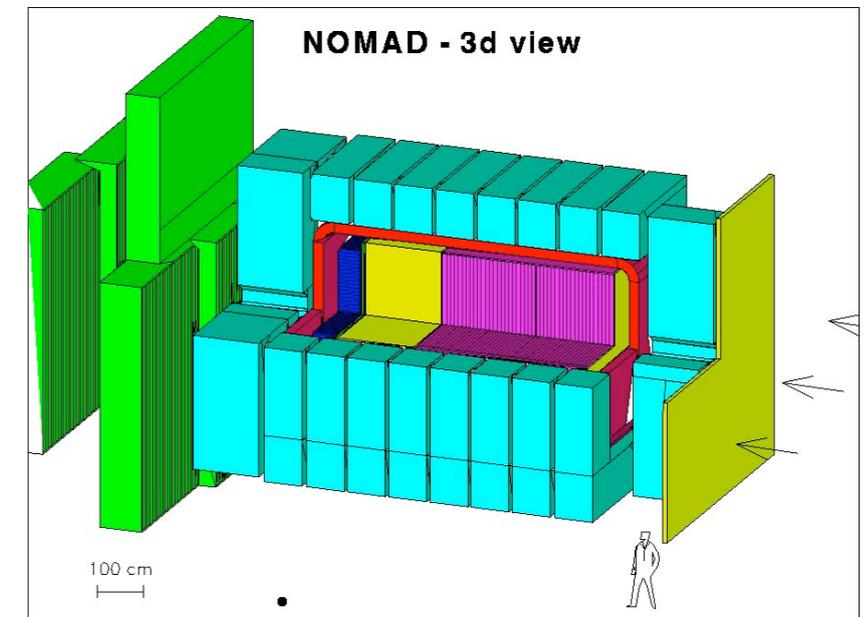
- ILL, Goesgen, Bugey, Palo Verde y CHOOZ en reactores

► Búsqueda $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ (aparición)

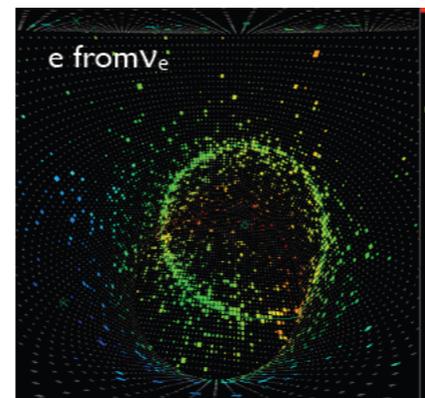
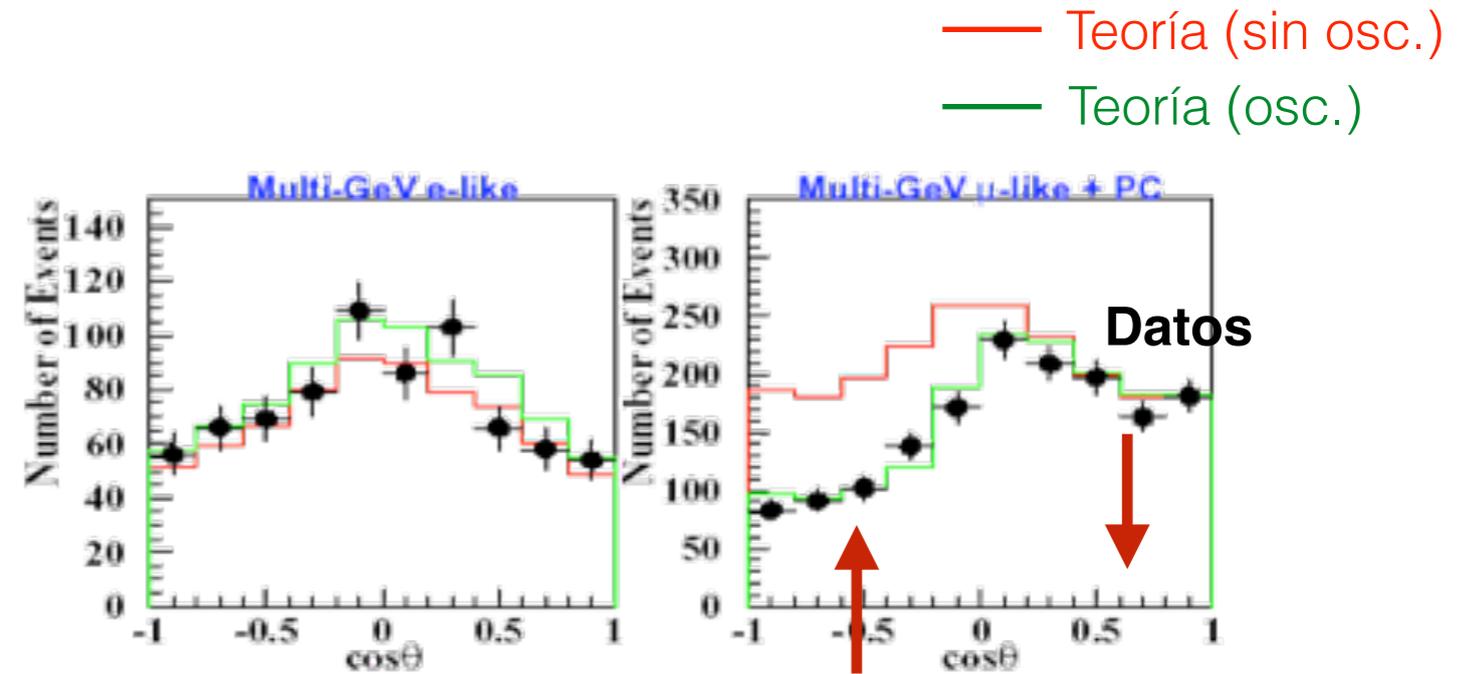
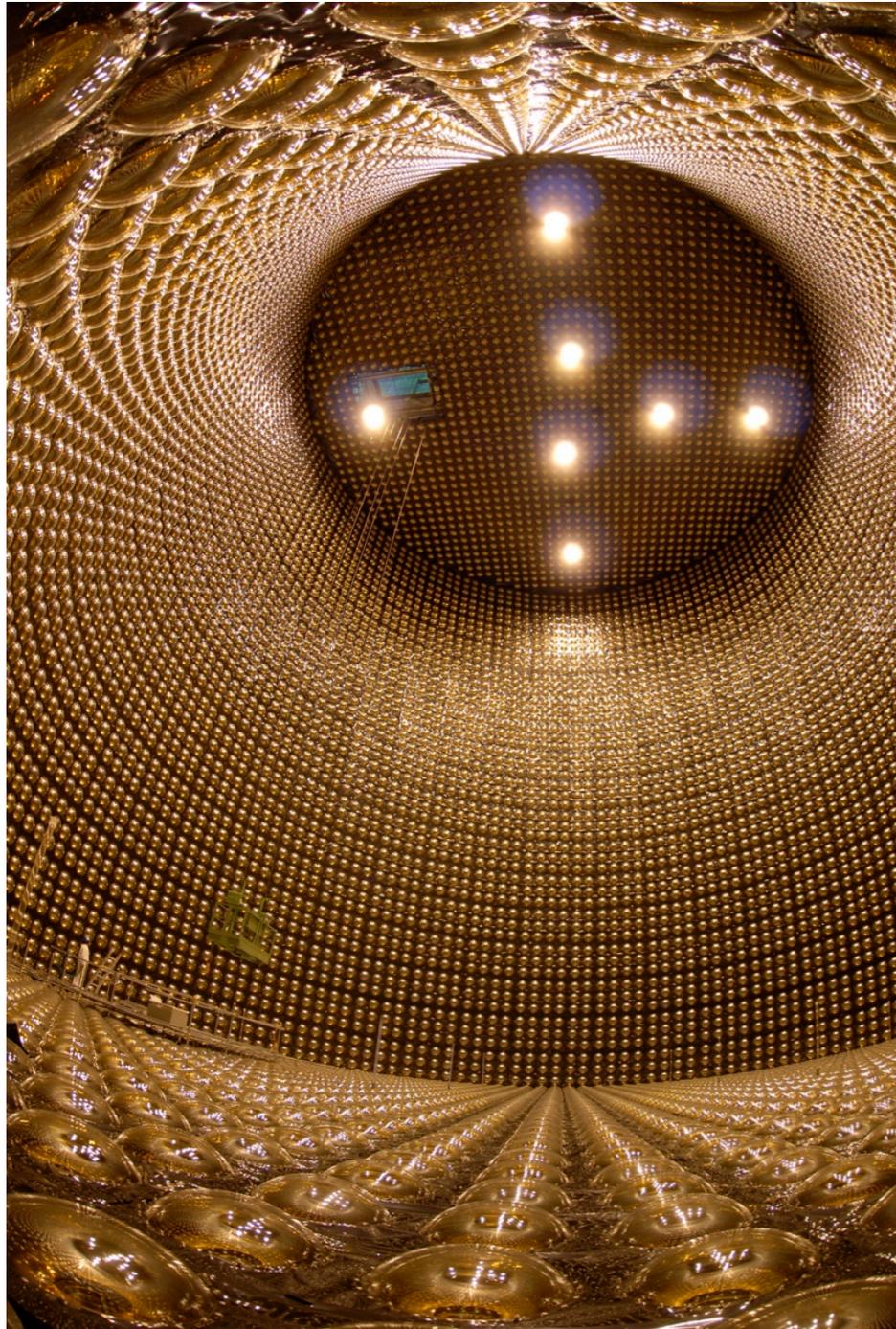
- CHORUS y NOMAD en el CERN (1995-1998)

► Búsqueda $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$ (aparición)

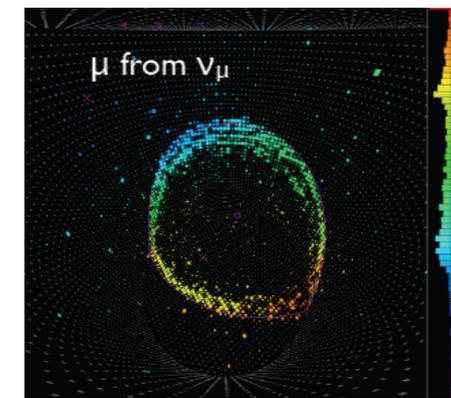
- KARMEN
- LSND / MiniBooNE (oscilación??)



Descubrimiento de las oscilaciones (1998)

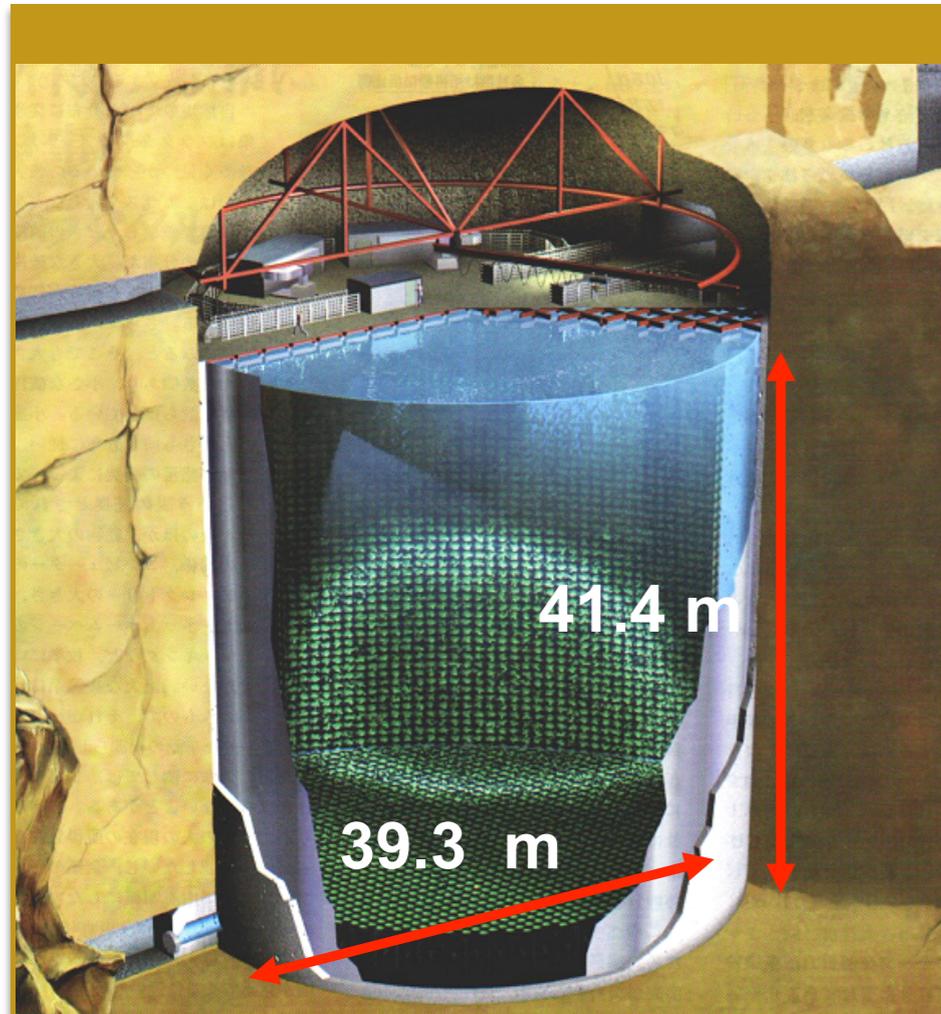


e^-

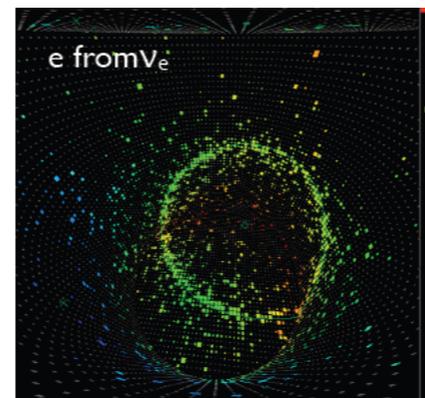
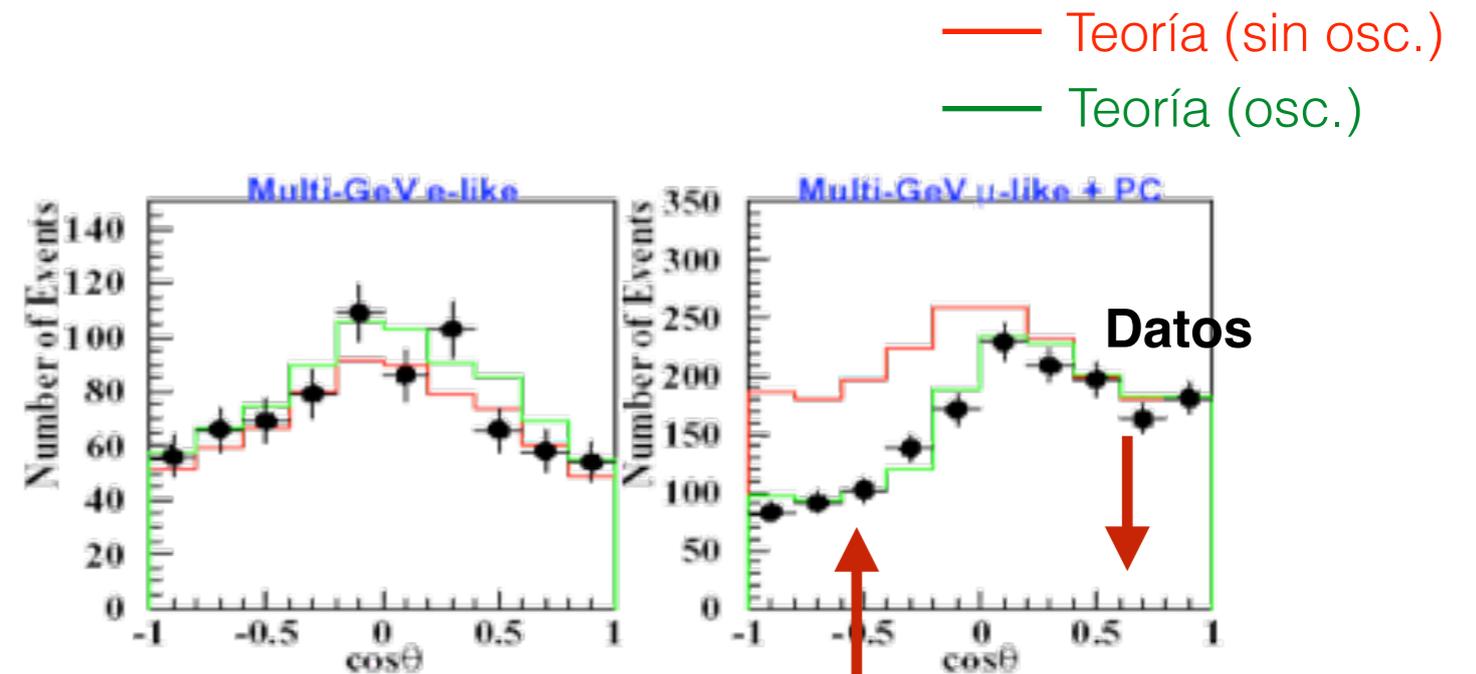


μ^-

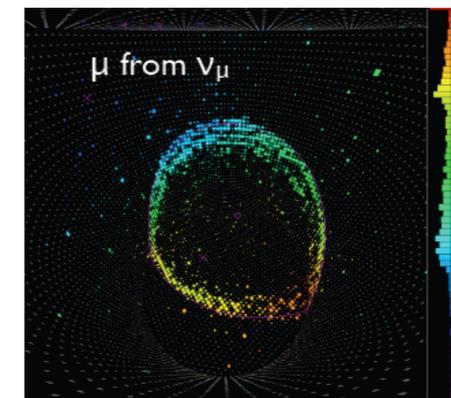
Descubrimiento de las oscilaciones (1998)



Detector Super-Kamiokande en la mina de Kamioka (Japón) (50 kton de agua, 11000 PMTs)

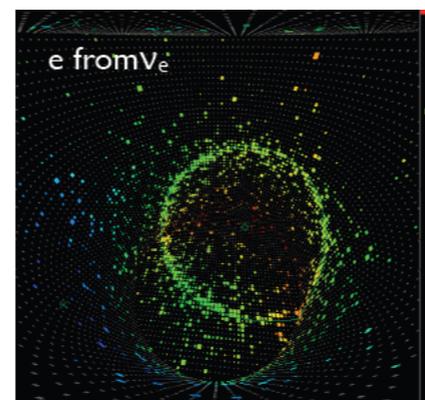
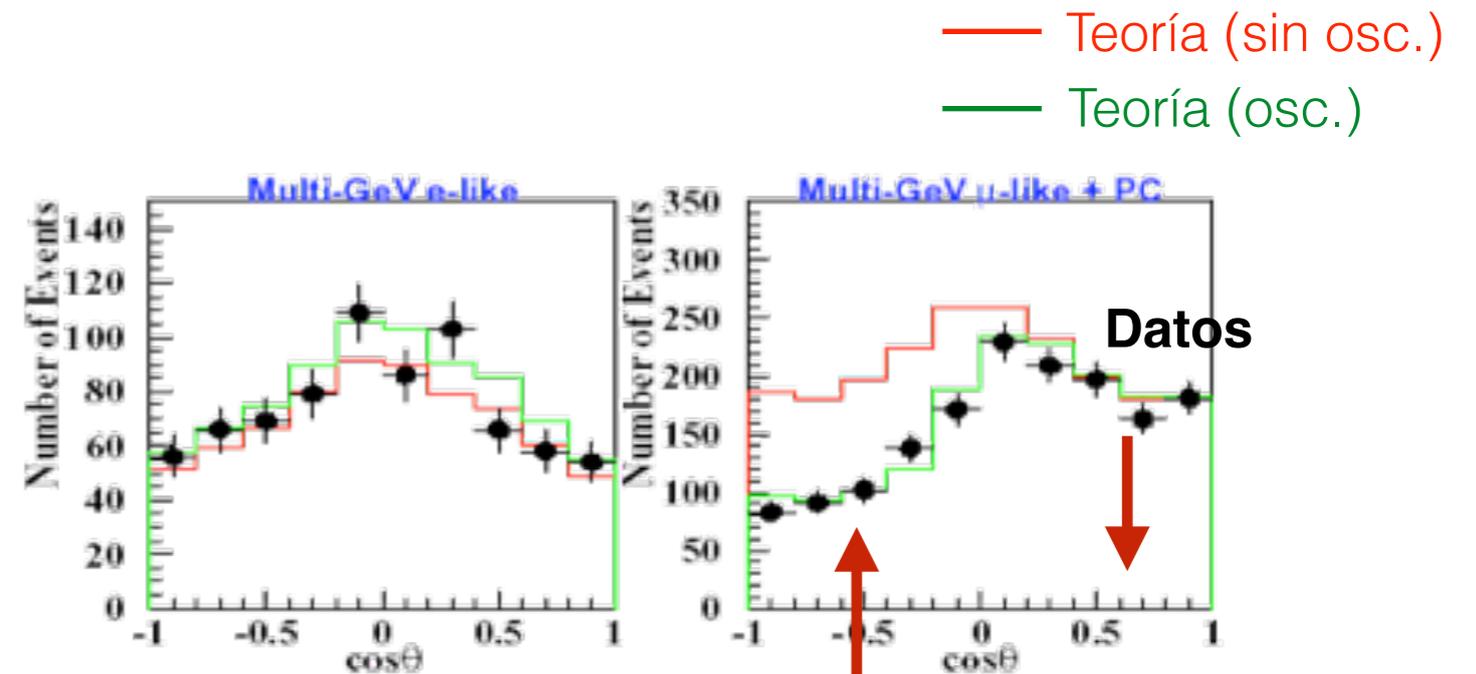
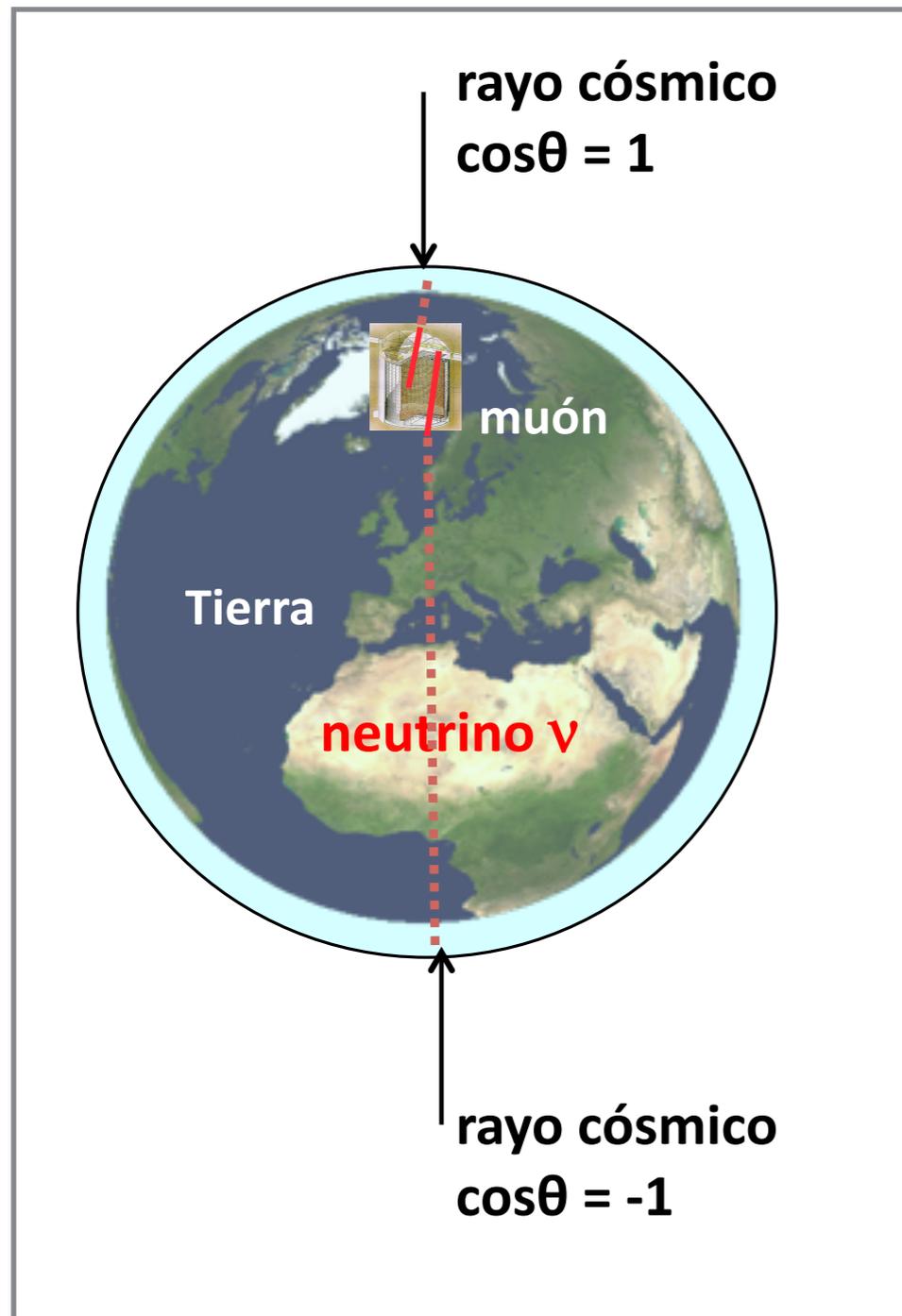


e^-

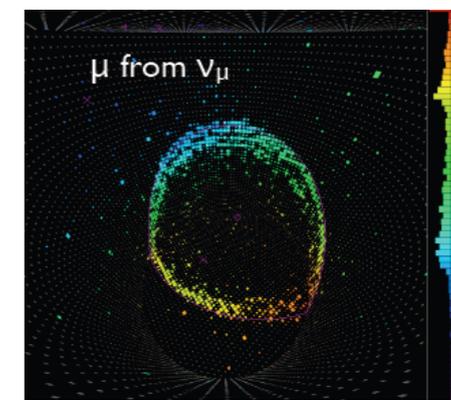


μ^-

Descubrimiento de las oscilaciones (1998)

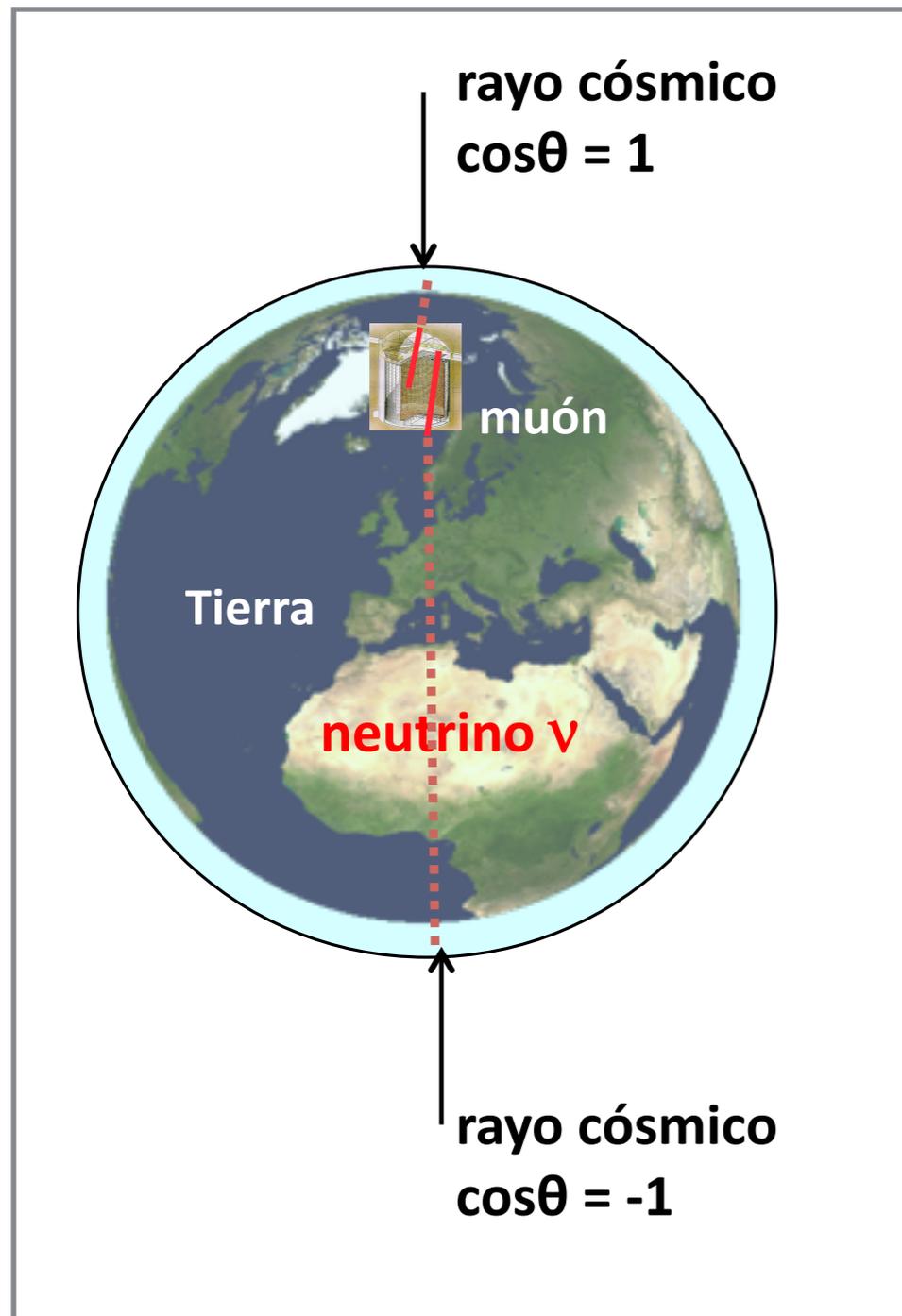


e^-



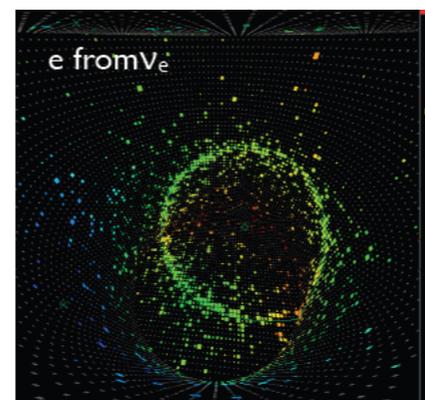
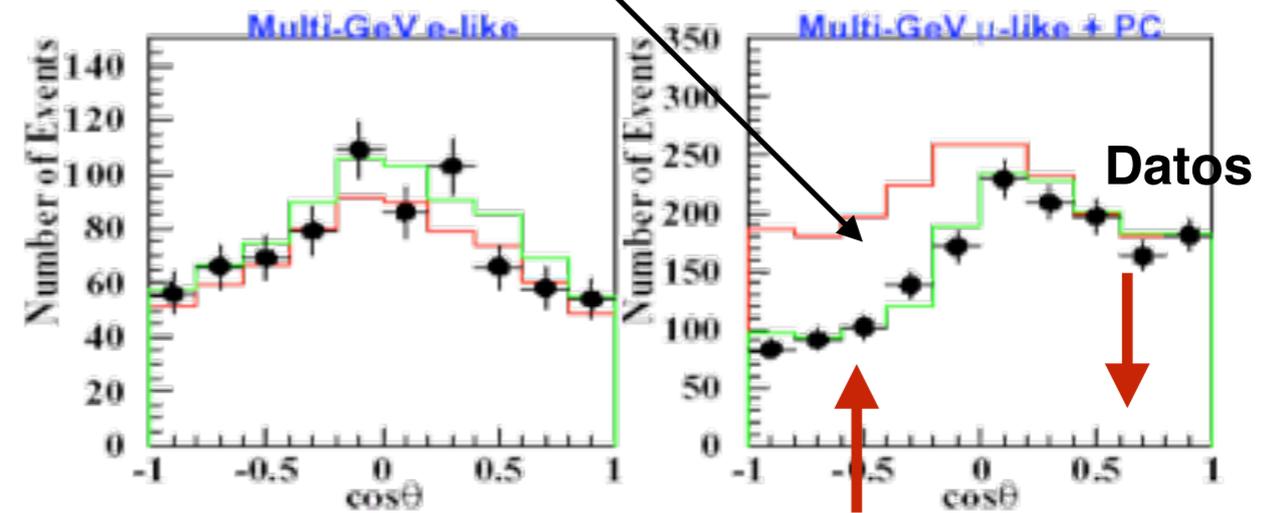
μ^-

Descubrimiento de las oscilaciones (1998)

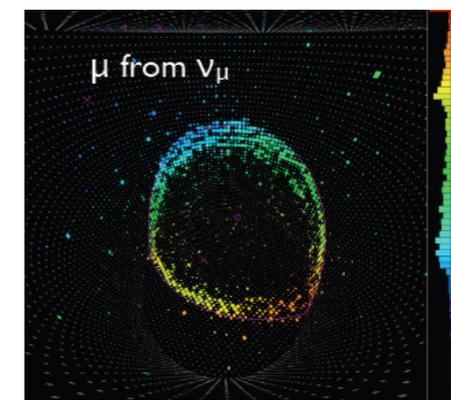


Claro déficit de ν_μ medido

— Teoría (sin osc.)
— Teoría (osc.)

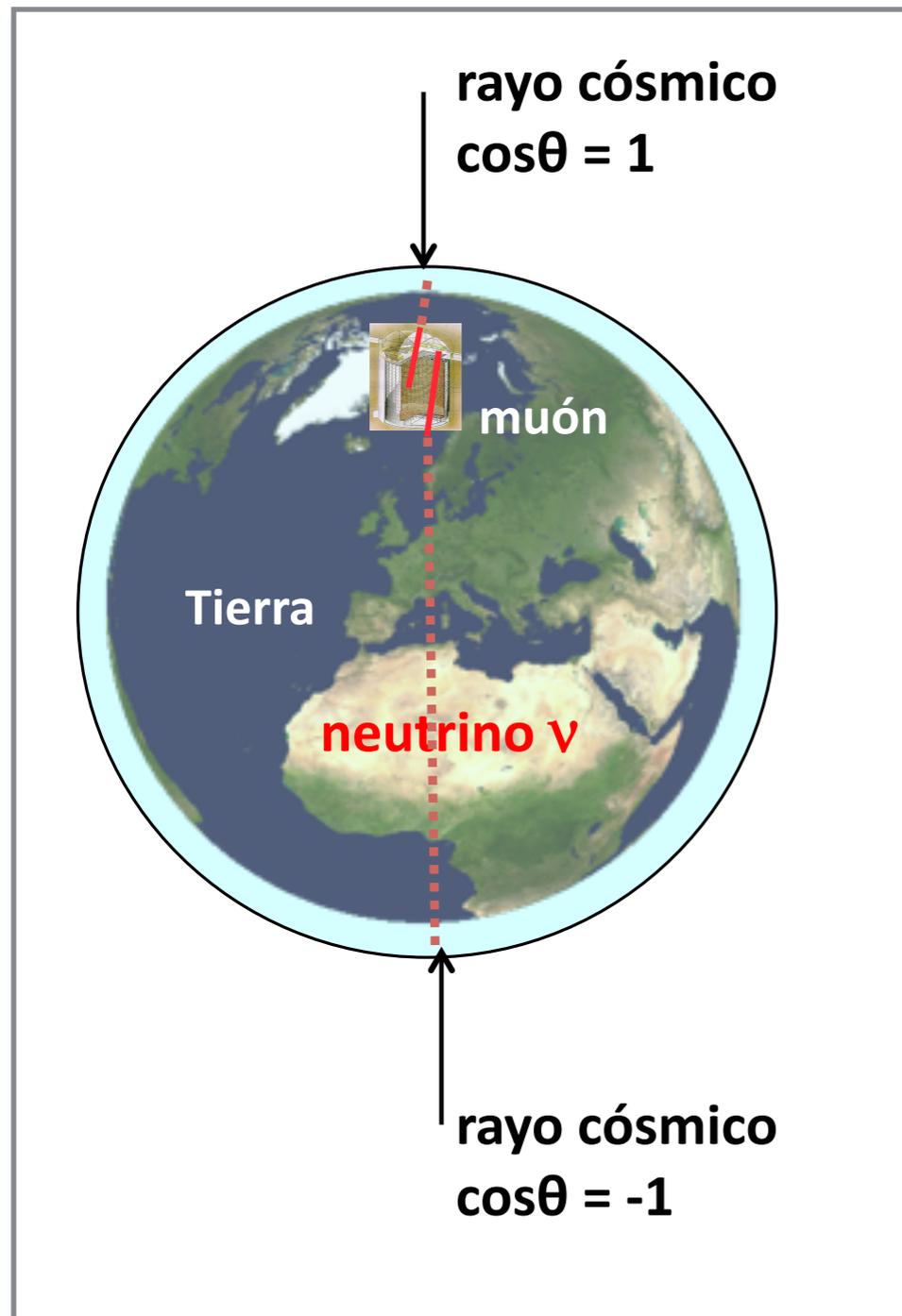


e^-



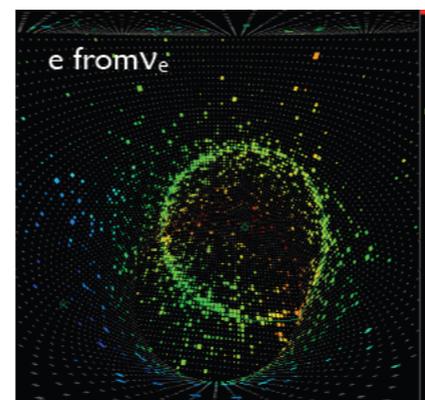
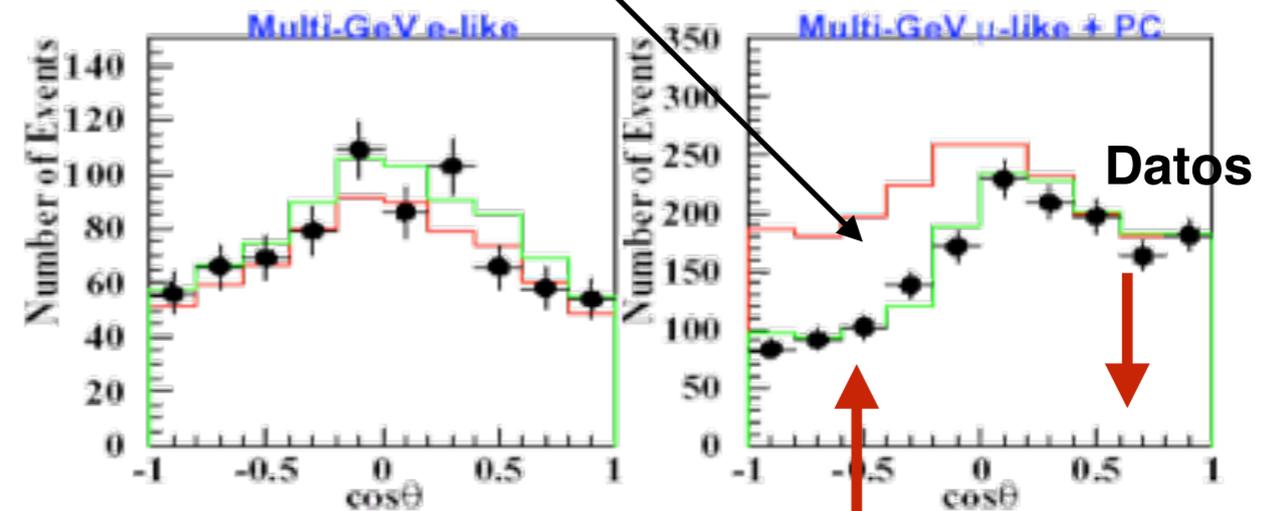
μ^-

Descubrimiento de las oscilaciones (1998)

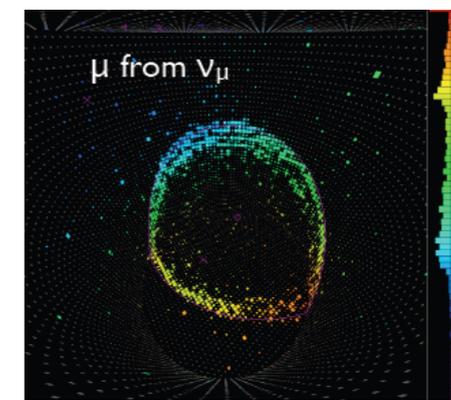


Claro déficit de ν_μ medido

— Teoría (sin osc.)
— Teoría (osc.)



e^-

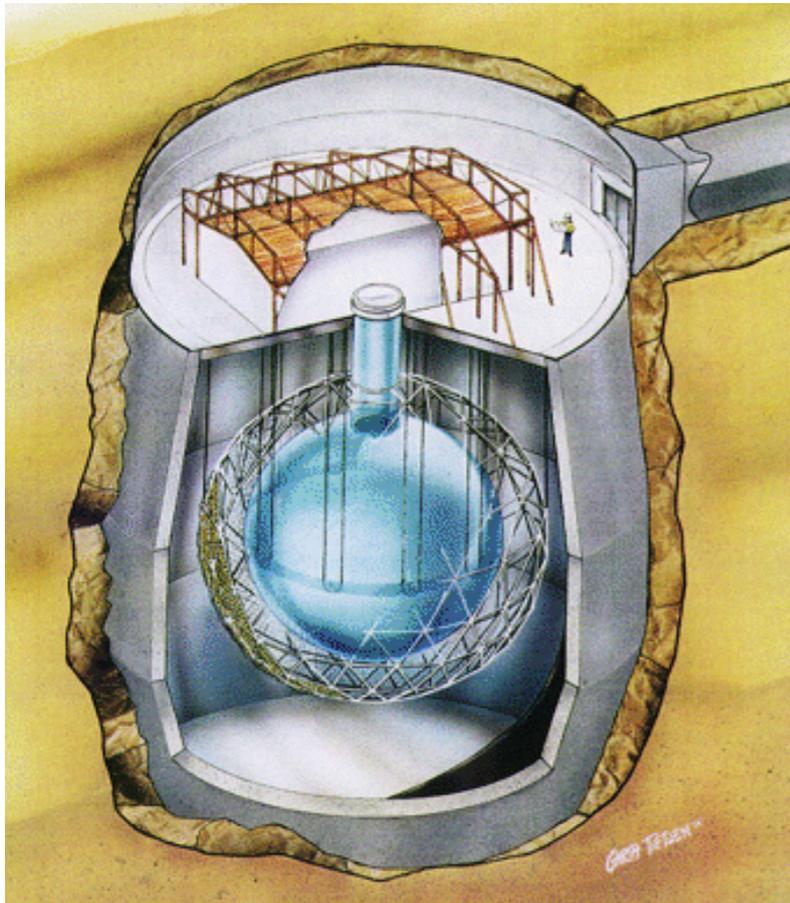


μ^-

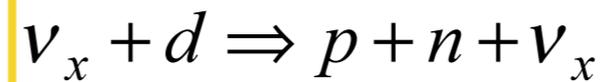
Oscilaciones de los neutrinos atmosféricos

$\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$

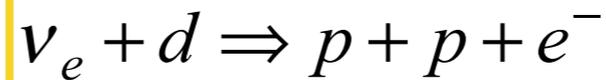
Aclarada la anomalía de los neutrinos solares (2001)



- **SNO**: detector de 1000 ton de agua pesada (D₂O) en la mina de Sudbury (Canadá)
- Midió *todos los tipos de neutrinos* procedentes del Sol
- Reacción sensible a todo tipo de neutrinos (NC)



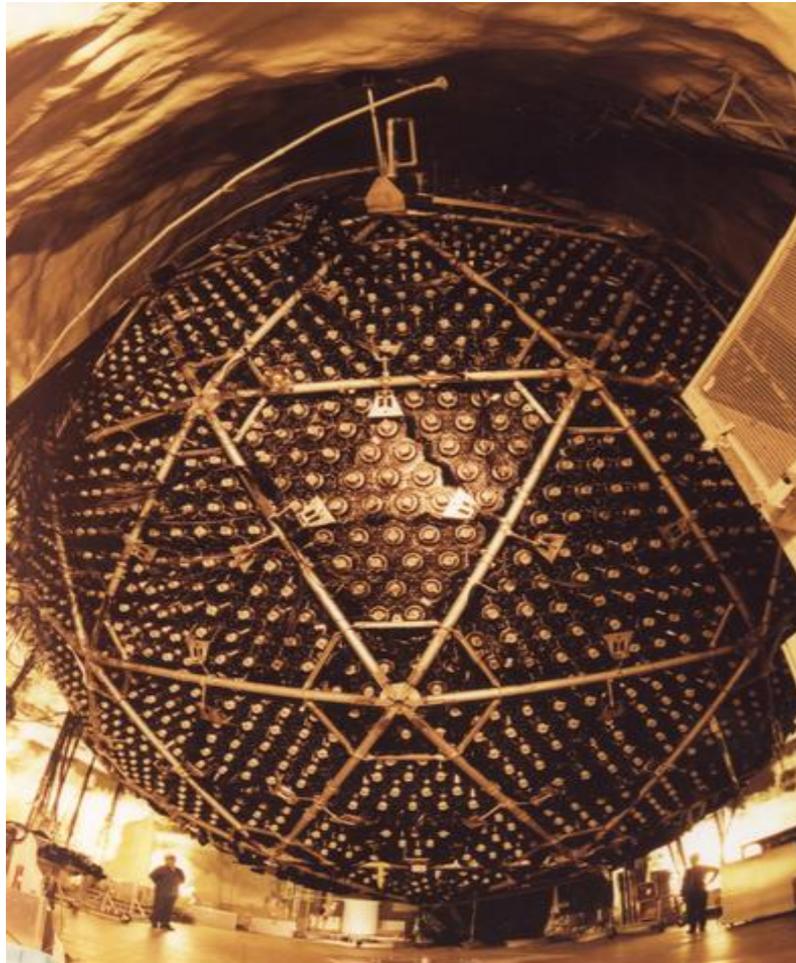
- Reacción sensible sólo a los neutrinos del electrón (CC)



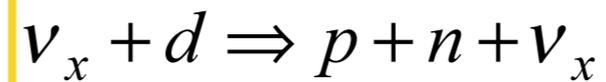
- Si no hay oscilaciones: $\Phi_{\text{NC}} = \Phi_{\text{CC}}$
- Si los neutrinos oscilan: $\Phi_{\text{NC}} \neq \Phi_{\text{C}}$

El Sol sólo emite ν_e por las reacciones de fusión

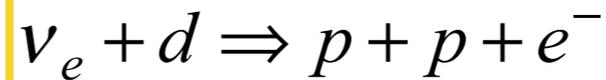
Aclarada la anomalía de los neutrinos solares (2001)



- **SNO**: detector de 1000 ton de agua pesada (D_2O) en la mina de Sudbury (Canadá)
- Midió *todos los tipos de neutrinos* procedentes del Sol
- Reacción sensible a todo tipo de neutrinos (NC)



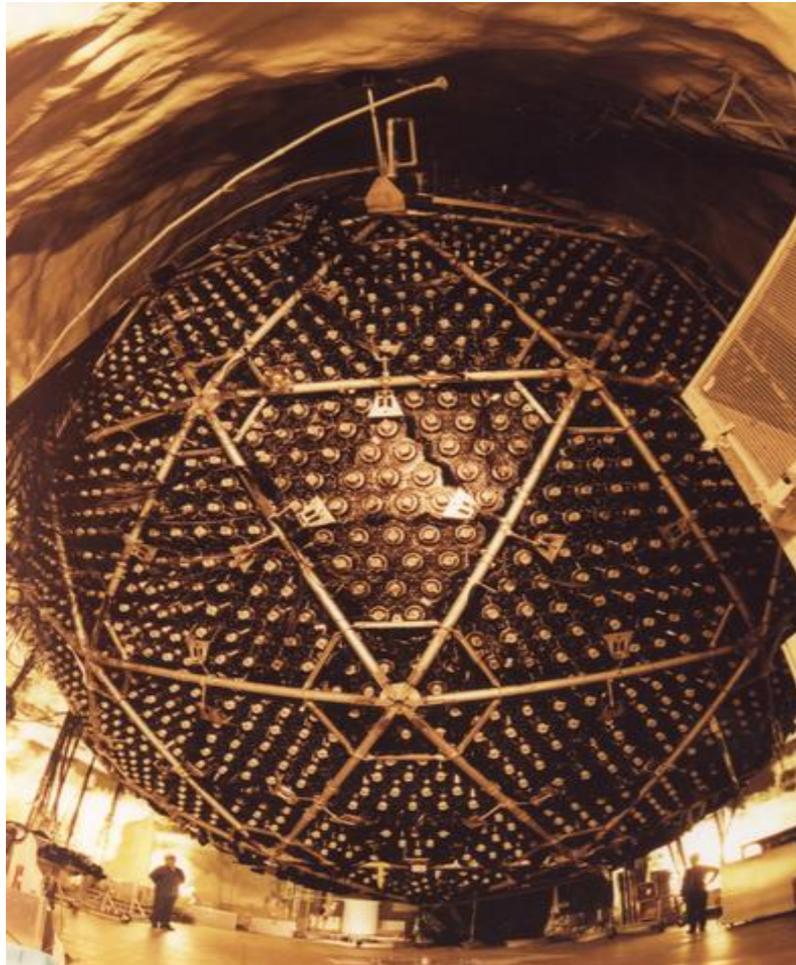
- Reacción sensible sólo a los neutrinos del electrón (CC)



- Si no hay oscilaciones: $\Phi_{NC} = \Phi_{CC}$
- Si los neutrinos oscilan: $\Phi_{NC} \neq \Phi_C$

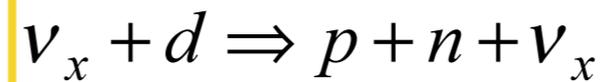
El Sol sólo emite ν_e por las reacciones de fusión

Aclarada la anomalía de los neutrinos solares (2001)

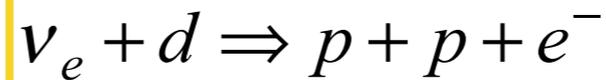


El Sol sólo emite ν_e por las reacciones de fusión

- **SNO**: detector de 1000 ton de agua pesada (D_2O) en la mina de Sudbury (Canadá)
- Midió *todos los tipos de neutrinos* procedentes del Sol
- Reacción sensible a todo tipo de neutrinos (NC)



- Reacción sensible sólo a los neutrinos del electrón (CC)



- Si no hay oscilaciones: $\Phi_{NC} = \Phi_{CC}$
- Si los neutrinos oscilan: $\Phi_{NC} \neq \Phi_C$

Resultado: $\Phi_{CC} / \Phi_{NC} = 0.301 \pm 0.033$

Φ_{NC} de acuerdo con el SSM

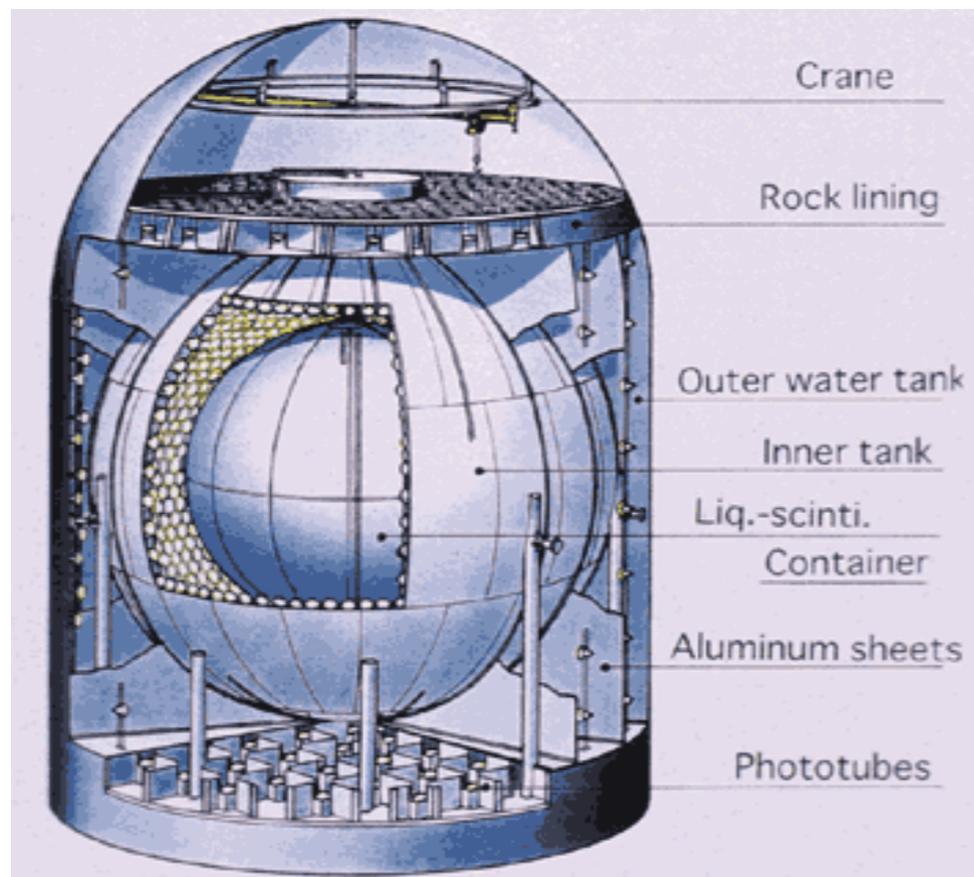
Una parte de los ν_e se convierten en ν_μ y/o ν_τ

Oscilaciones de neutrinos en reactores

KAMLAND (2002)

Viaje de larga distancia (~180 km)

- Confirmación de las oscilaciones de neutrinos solares
- Desaparición de $\bar{\nu}_e$



Oscilaciones de neutrinos en reactores

KAMLAND (2002)

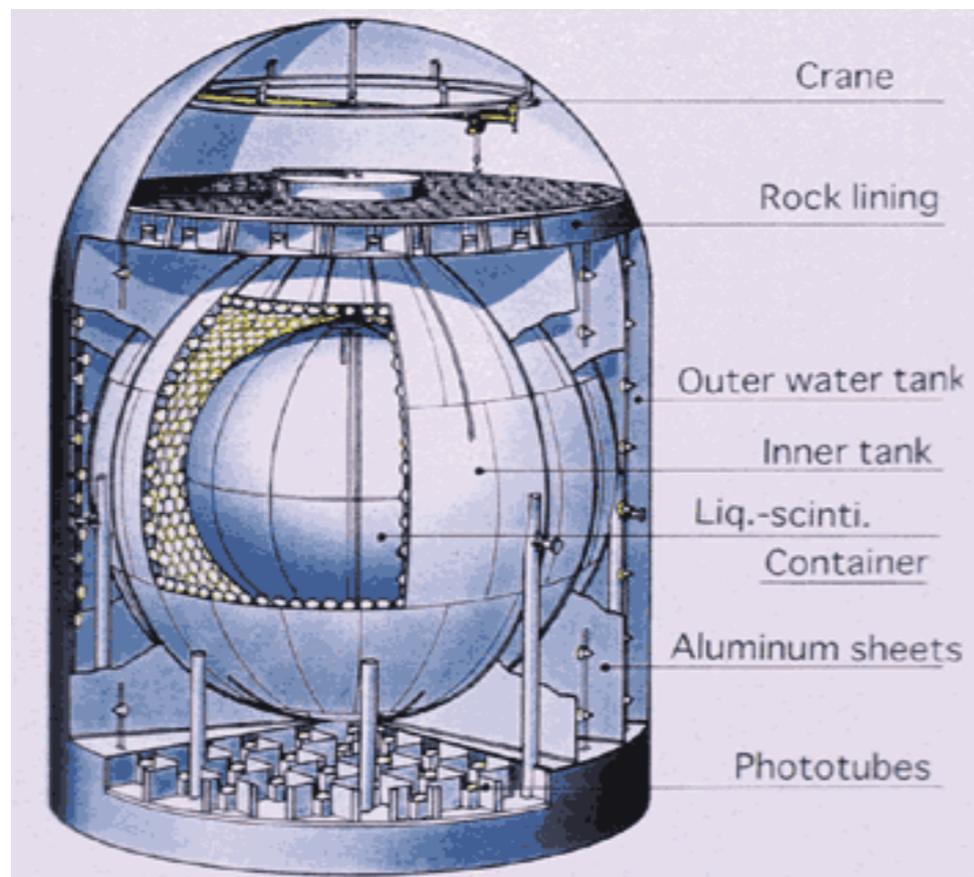
Viaje de larga distancia (~ 180 km)

- Confirmación de las oscilaciones de neutrinos solares
- Desaparición de $\bar{\nu}_e$

Double Chooz, Daya Bay, RENO (2011-)

Viaje de corta distancia (~ 1 km)

- Medida de un nuevo tipo de oscilación
- Desaparición de $\bar{\nu}_e$

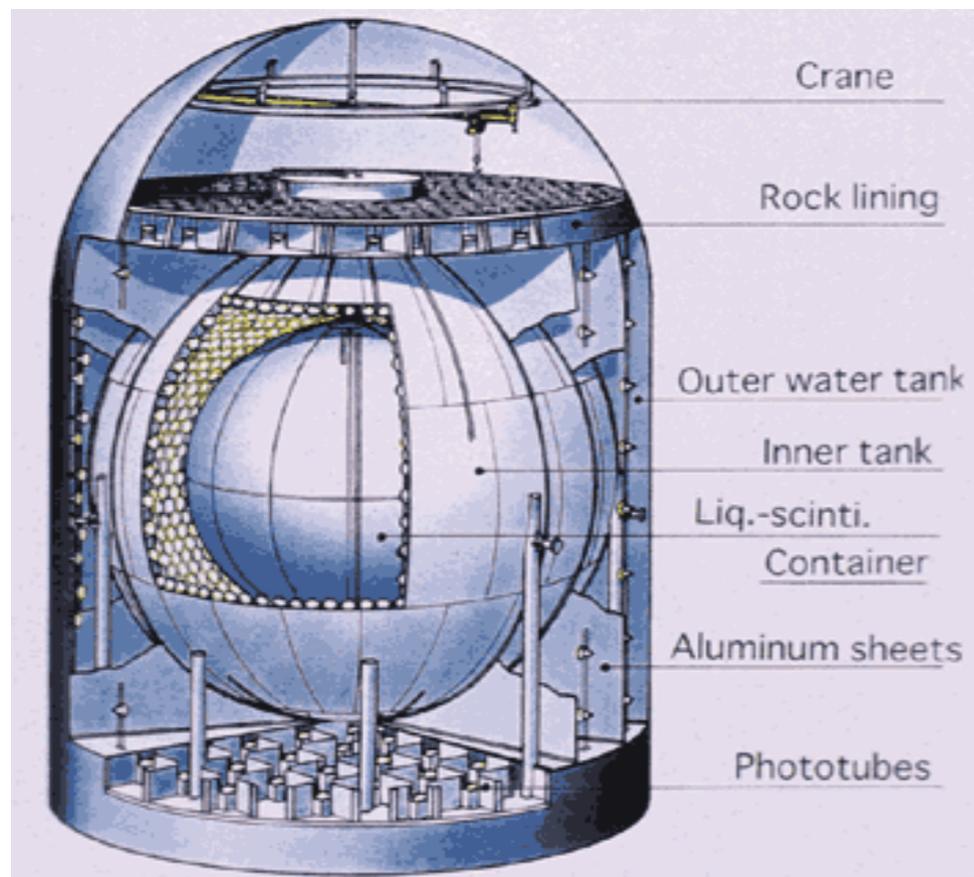


Oscilaciones de neutrinos en reactores

KAMLAND (2002)

Viaje de larga distancia (~ 180 km)

- Confirmación de las oscilaciones de neutrinos solares
- Desaparición de $\bar{\nu}_e$



Double Chooz, Daya Bay, RENO (2011-)

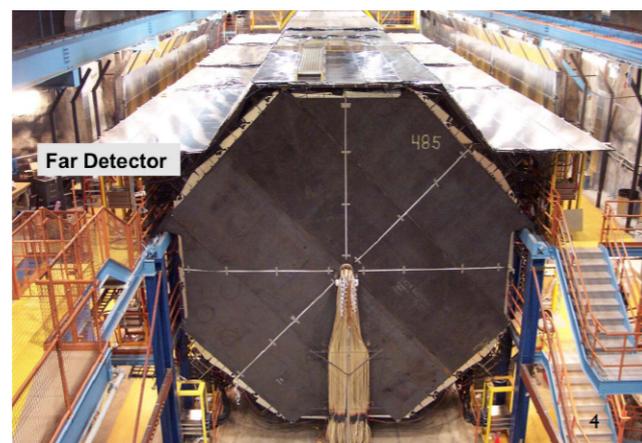
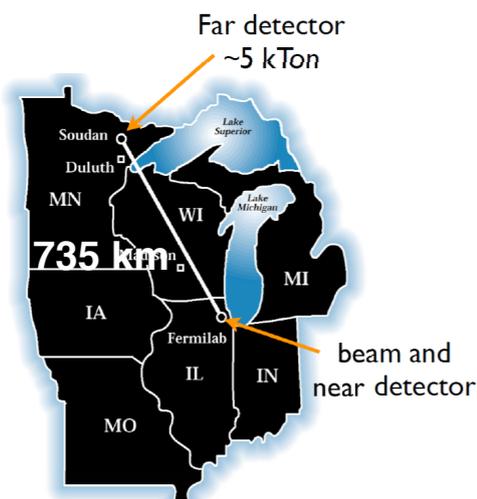
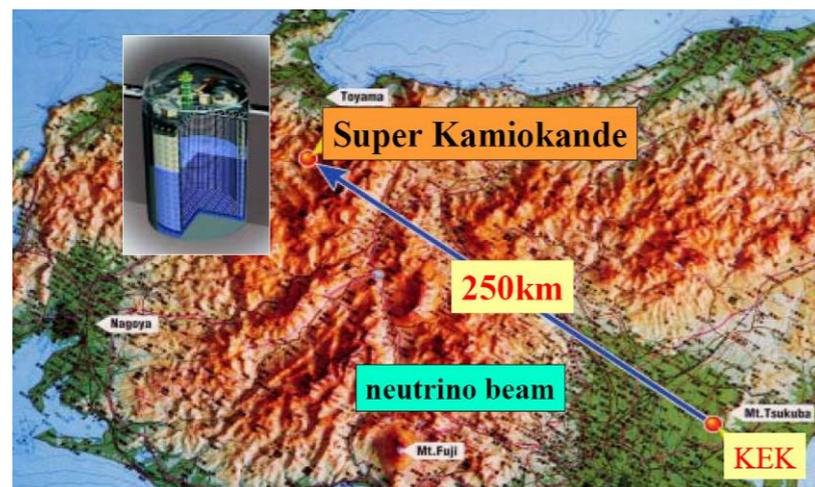
Viaje de corta distancia (~ 1 km)

- Medida de un nuevo tipo de oscilación
- Desaparición de $\bar{\nu}_e$



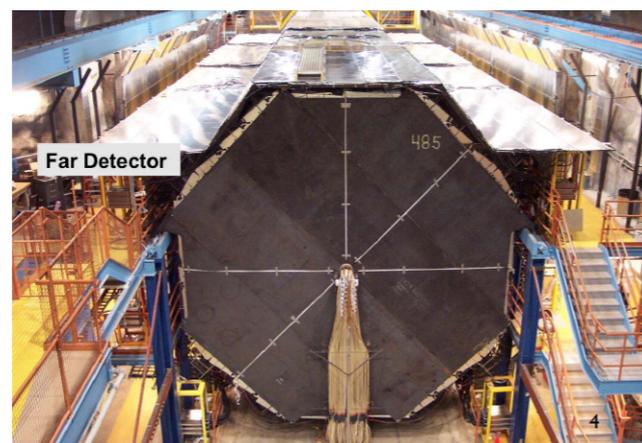
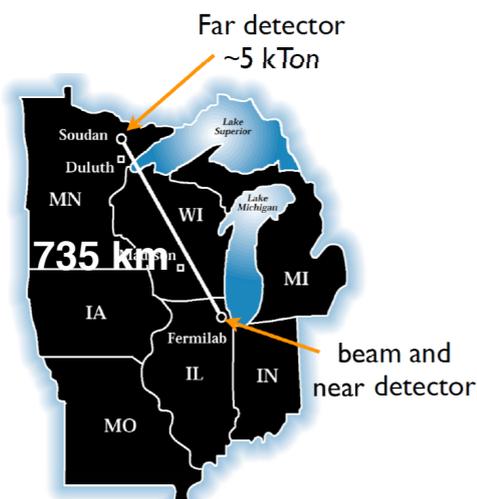
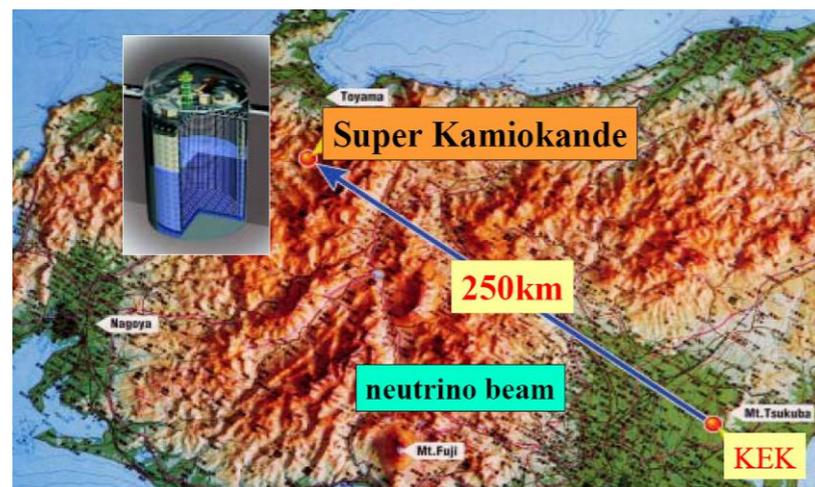
Oscilaciones de neutrinos en aceleradores

- **K2K (2004)**: primera medida de oscilación en aceleradores
- **MINOS (2006)**: confirmación oscilación neutrinos atmosféricos



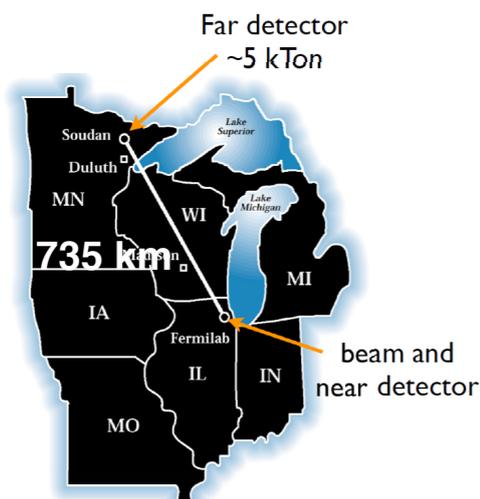
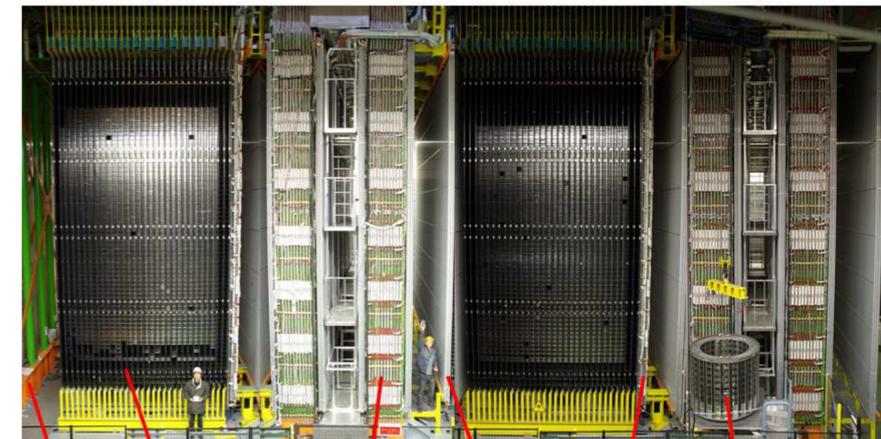
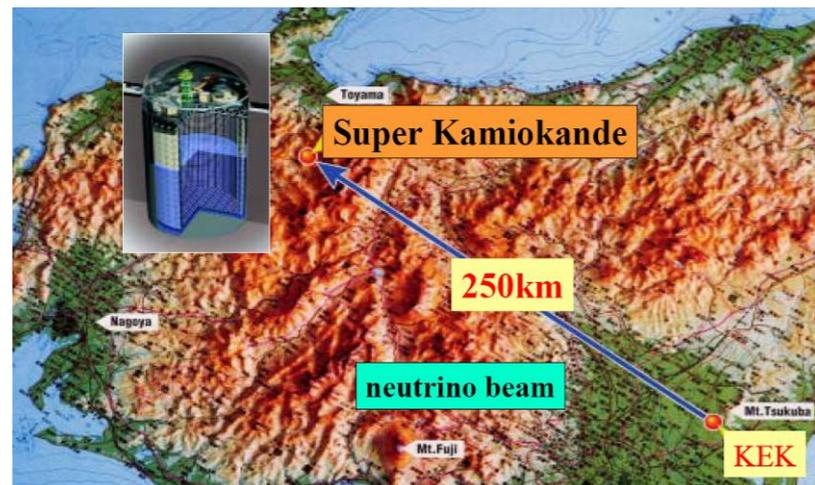
Oscilaciones de neutrinos en aceleradores

- **K2K (2004)**: primera medida de oscilación en aceleradores
- **MINOS (2006)**: confirmación oscilación neutrinos atmosféricos
- **OPERA (2010)**: medida de la aparición de ν_τ en un haz de ν_μ
- **T2K (2011-)**: medida de la aparición de ν_e en un haz de ν_μ



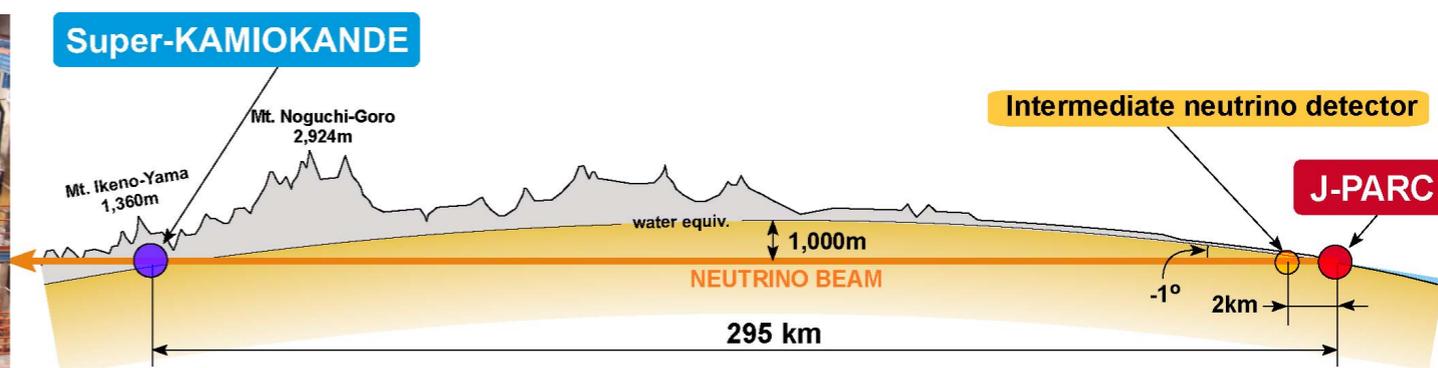
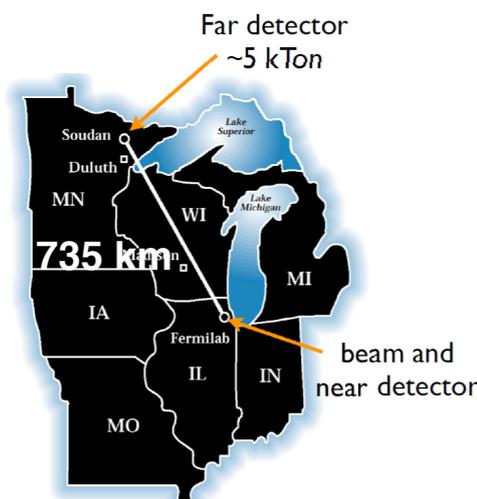
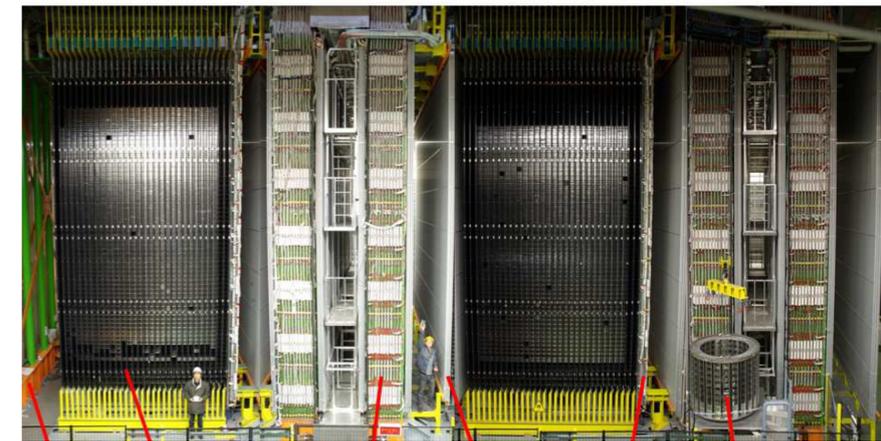
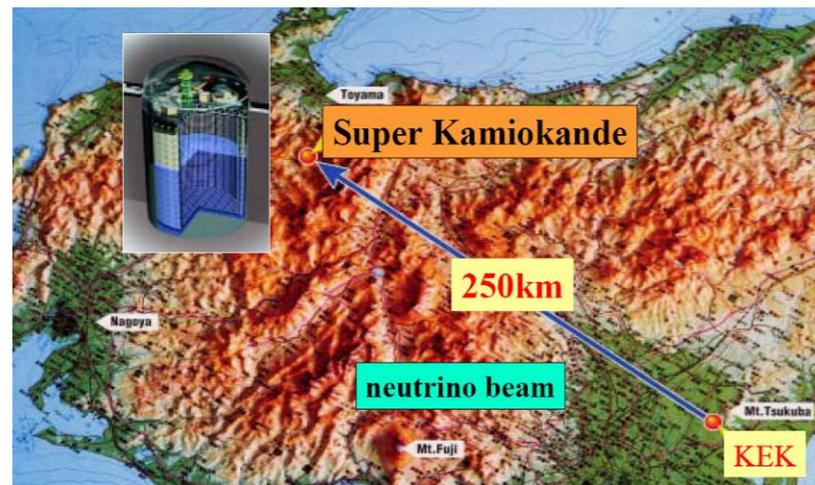
Oscilaciones de neutrinos en aceleradores

- **K2K (2004)**: primera medida de oscilación en aceleradores
- **MINOS (2006)**: confirmación oscilación neutrinos atmosféricos
- **OPERA (2010)**: medida de la aparición de ν_τ en un haz de ν_μ
- **T2K (2011-)**: medida de la aparición de ν_e en un haz de ν_μ



Oscilaciones de neutrinos en aceleradores

- **K2K (2004)**: primera medida de oscilación en aceleradores
- **MINOS (2006)**: confirmación oscilación neutrinos atmosféricos
- **OPERA (2010)**: medida de la aparición de ν_τ en un haz de ν_μ
- **T2K (2011-)**: medida de la aparición de ν_e en un haz de ν_μ



Oscilaciones observadas

Experimento	Modo	Fuente de neutrinos	Parámetros medidos
IMB, Kamiokande, SK, K2K, MINOS, T2K	$\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu$ $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_\mu$	Atmósfera / Aceleradores	$ \Delta m^2_{32} $ θ_{23}
T2K, MINOS	$\nu_\mu \rightarrow \nu_e$	Aceleradores	θ_{13}
Double Chooz, Daya Bay, RENO	$\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e$	Reactores	θ_{13}
Homestake, GNO, GALLEX, SAGE, SK, SNO, Borexino, KamLAND	$\nu_e \rightarrow \nu_e$ $\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e$	Sol / Reactores	Δm^2_{21} θ_{12}
OPERA	$\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$	Aceleradores	

Magnitudes medidas

- Ángulos de mezcla y diferencias de masas:

Magnitudes medidas

- Ángulos de mezcla y diferencias de masas:

PDG K.A. Olive et al., Chin. Phys. C, 38, 090001 (2014)

$$\sin^2(2\theta_{12}) = 0.846 \pm 0.021$$

$$\Delta m_{21}^2 = (7.53 \pm 0.18) \times 10^{-5} \text{ eV}^2$$

$$\sin^2(2\theta_{23}) = 0.999^{+0.001}_{-0.018} \quad (\text{normal mass hierarchy})$$

$$\sin^2(2\theta_{23}) = 1.000^{+0.000}_{-0.017} \quad (\text{inverted mass hierarchy})$$

$$\Delta m_{32}^2 = (2.44 \pm 0.06) \times 10^{-3} \text{ eV}^2 [i] \quad (\text{normal mass hierarchy})$$

$$\Delta m_{32}^2 = (2.52 \pm 0.07) \times 10^{-3} \text{ eV}^2 [i] \quad (\text{inverted mass hierarchy})$$

$$\sin^2(2\theta_{13}) = (9.3 \pm 0.8) \times 10^{-2}$$

[i] The sign of Δm_{32}^2 is not known at this time. The range quoted is for the absolute value.

Magnitudes medidas

- Ángulos de mezcla y diferencias de masas:

PDG K.A. Olive et al., Chin. Phys. C, 38, 090001 (2014)

$$\sin^2(2\theta_{12}) = 0.846 \pm 0.021$$

$$\Delta m_{21}^2 = (7.53 \pm 0.18) \times 10^{-5} \text{ eV}^2$$

$$\sin^2(2\theta_{23}) = 0.999^{+0.001}_{-0.018} \quad (\text{normal mass hierarchy})$$

$$\sin^2(2\theta_{23}) = 1.000^{+0.000}_{-0.017} \quad (\text{inverted mass hierarchy})$$

$$\Delta m_{32}^2 = (2.44 \pm 0.06) \times 10^{-3} \text{ eV}^2 [i] \quad (\text{normal mass hierarchy})$$

$$\Delta m_{32}^2 = (2.52 \pm 0.07) \times 10^{-3} \text{ eV}^2 [i] \quad (\text{inverted mass hierarchy})$$

$$\sin^2(2\theta_{13}) = (9.3 \pm 0.8) \times 10^{-2}$$

[i] The sign of Δm_{32}^2 is not known at this time. The range quoted is for the absolute value.

- Pero todavía no se han medido todos los parámetros que gobiernan las oscilaciones:

Magnitudes medidas

- Ángulos de mezcla y diferencias de masas:

PDG K.A. Olive et al., Chin. Phys. C, 38, 090001 (2014)

$$\sin^2(2\theta_{12}) = 0.846 \pm 0.021$$

$$\Delta m_{21}^2 = (7.53 \pm 0.18) \times 10^{-5} \text{ eV}^2$$

$$\sin^2(2\theta_{23}) = 0.999^{+0.001}_{-0.018} \quad (\text{normal mass hierarchy})$$

$$\sin^2(2\theta_{23}) = 1.000^{+0.000}_{-0.017} \quad (\text{inverted mass hierarchy})$$

$$\Delta m_{32}^2 = (2.44 \pm 0.06) \times 10^{-3} \text{ eV}^2 [i] \quad (\text{normal mass hierarchy})$$

$$\Delta m_{32}^2 = (2.52 \pm 0.07) \times 10^{-3} \text{ eV}^2 [i] \quad (\text{inverted mass hierarchy})$$

$$\sin^2(2\theta_{13}) = (9.3 \pm 0.8) \times 10^{-2}$$

[i] The sign of Δm_{32}^2 is not known at this time. The range quoted is for the absolute value.

- Pero todavía no se han medido todos los parámetros que gobiernan las oscilaciones:
 - Jerarquía de masas (signo de Δm_{32}^2)?

Magnitudes medidas

- Ángulos de mezcla y diferencias de masas:

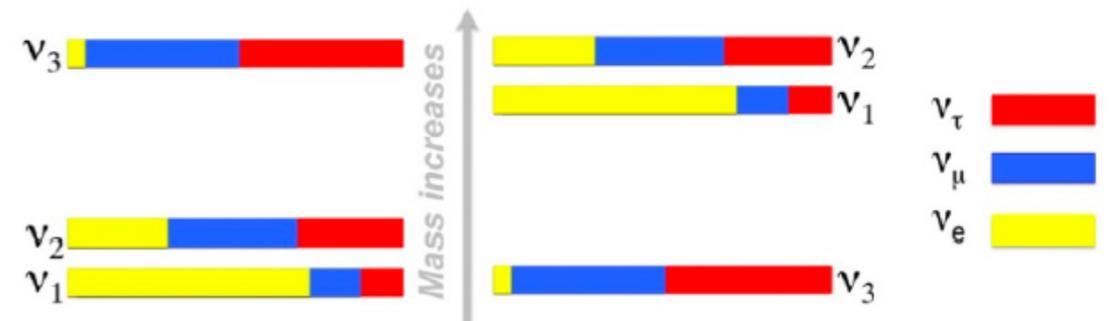
PDG K.A. Olive et al., Chin. Phys. C, 38, 090001 (2014)

$$\begin{aligned} \sin^2(2\theta_{12}) &= 0.846 \pm 0.021 \\ \Delta m_{21}^2 &= (7.53 \pm 0.18) \times 10^{-5} \text{ eV}^2 \\ \sin^2(2\theta_{23}) &= 0.999^{+0.001}_{-0.018} \quad (\text{normal mass hierarchy}) \\ \sin^2(2\theta_{23}) &= 1.000^{+0.000}_{-0.017} \quad (\text{inverted mass hierarchy}) \\ \Delta m_{32}^2 &= (2.44 \pm 0.06) \times 10^{-3} \text{ eV}^2 [i] \quad (\text{normal mass hierarchy}) \\ \Delta m_{32}^2 &= (2.52 \pm 0.07) \times 10^{-3} \text{ eV}^2 [i] \quad (\text{inverted mass hierarchy}) \\ \sin^2(2\theta_{13}) &= (9.3 \pm 0.8) \times 10^{-2} \end{aligned}$$

[i] The sign of Δm_{32}^2 is not known at this time. The range quoted is for the absolute value.

- Pero todavía no se han medido todos los parámetros que gobiernan las oscilaciones:

- Jerarquía de masas (signo de Δm_{32}^2)?



Magnitudes medidas

- Ángulos de mezcla y diferencias de masas:

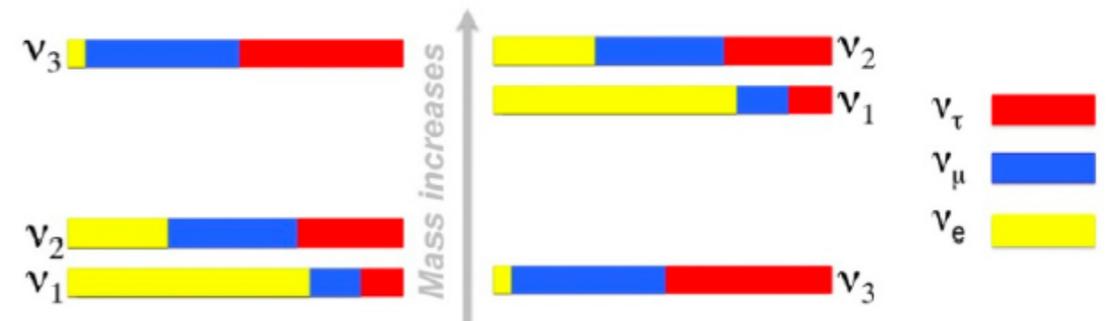
PDG K.A. Olive et al., Chin. Phys. C, 38, 090001 (2014)

$$\begin{aligned} \sin^2(2\theta_{12}) &= 0.846 \pm 0.021 \\ \Delta m_{21}^2 &= (7.53 \pm 0.18) \times 10^{-5} \text{ eV}^2 \\ \sin^2(2\theta_{23}) &= 0.999^{+0.001}_{-0.018} \quad (\text{normal mass hierarchy}) \\ \sin^2(2\theta_{23}) &= 1.000^{+0.000}_{-0.017} \quad (\text{inverted mass hierarchy}) \\ \Delta m_{32}^2 &= (2.44 \pm 0.06) \times 10^{-3} \text{ eV}^2 [i] \quad (\text{normal mass hierarchy}) \\ \Delta m_{32}^2 &= (2.52 \pm 0.07) \times 10^{-3} \text{ eV}^2 [i] \quad (\text{inverted mass hierarchy}) \\ \sin^2(2\theta_{13}) &= (9.3 \pm 0.8) \times 10^{-2} \end{aligned}$$

[i] The sign of Δm_{32}^2 is not known at this time. The range quoted is for the absolute value.

- Pero todavía no se han medido todos los parámetros que gobiernan las oscilaciones:

- Jerarquía de masas (signo de Δm_{32}^2)?
- Octante de θ_{23}



Magnitudes medidas

- Ángulos de mezcla y diferencias de masas:

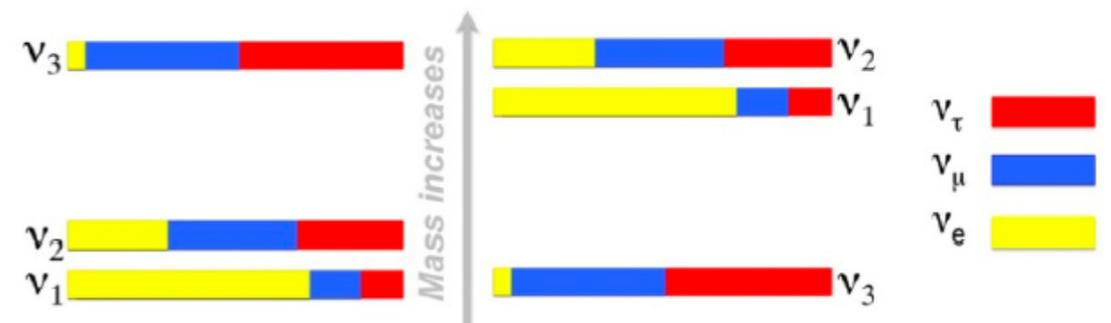
PDG K.A. Olive et al., Chin. Phys. C, 38, 090001 (2014)

$$\begin{aligned} \sin^2(2\theta_{12}) &= 0.846 \pm 0.021 \\ \Delta m_{21}^2 &= (7.53 \pm 0.18) \times 10^{-5} \text{ eV}^2 \\ \sin^2(2\theta_{23}) &= 0.999^{+0.001}_{-0.018} \quad (\text{normal mass hierarchy}) \\ \sin^2(2\theta_{23}) &= 1.000^{+0.000}_{-0.017} \quad (\text{inverted mass hierarchy}) \\ \Delta m_{32}^2 &= (2.44 \pm 0.06) \times 10^{-3} \text{ eV}^2 [i] \quad (\text{normal mass hierarchy}) \\ \Delta m_{32}^2 &= (2.52 \pm 0.07) \times 10^{-3} \text{ eV}^2 [i] \quad (\text{inverted mass hierarchy}) \\ \sin^2(2\theta_{13}) &= (9.3 \pm 0.8) \times 10^{-2} \end{aligned}$$

[i] The sign of Δm_{32}^2 is not known at this time. The range quoted is for the absolute value.

- Pero todavía no se han medido todos los parámetros que gobiernan las oscilaciones:

- Jerarquía de masas (signo de Δm_{32}^2)?
- Octante de θ_{23}
- Fase de violación CP





Grandes interrogantes por resolver

¿?

- Masa de los neutrinos: valor, origen...
- Tipo de partícula: Dirac o Majorana
- Relación con el resto de partículas
- ¿Violan los neutrinos la simetría CP?
- ¿Hay más de 3 neutrinos?

La masa del neutrino

☑ **Medida directa:** $m_{\nu_e}^2 = \sum_i |U_{ei}|^2 \cdot m_{\nu_i}^2$

Experimentos de desintegración beta del tritio:

- Troitsk & Mainz: **$m < 2 \text{ eV (95\% CL)}$**
- KATRIN (objetivo): $m < 0.2 \text{ eV (90\% CL)}$

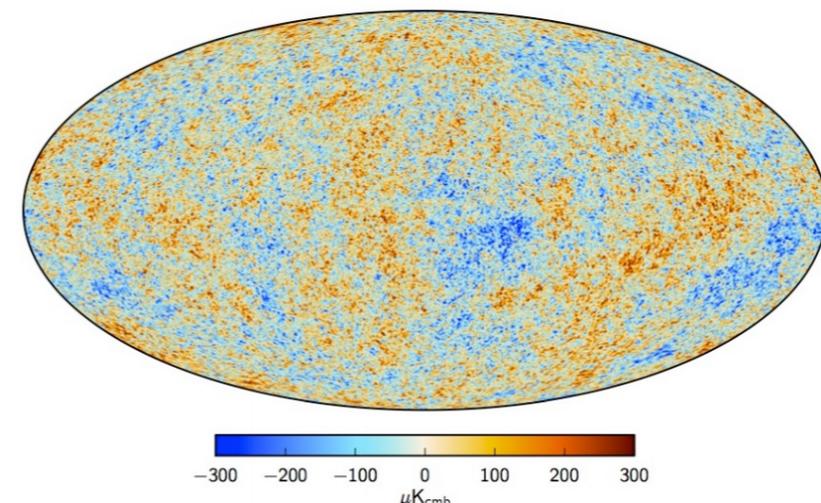
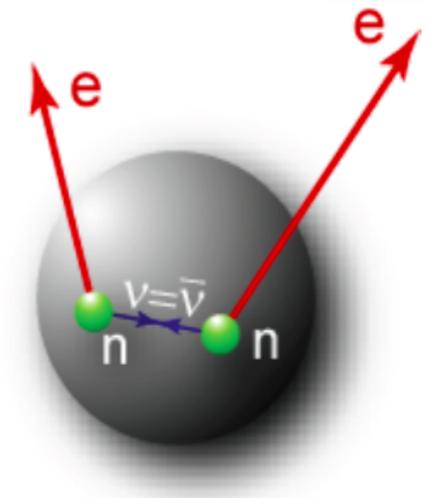
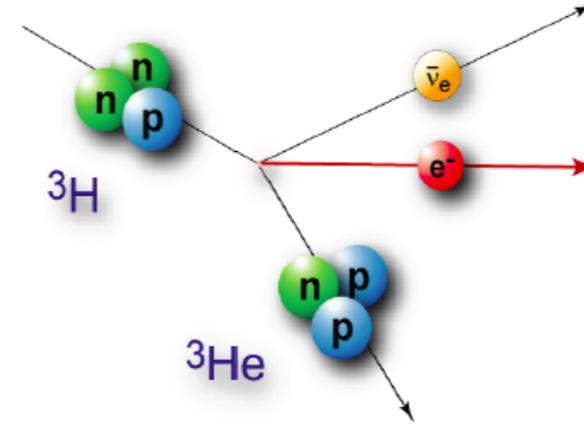
☑ **Desintegración doble beta sin neutrinos:** $m_{\beta\beta} = \left| \sum_i U_{ei}^2 \cdot m_{\nu_i} \right|$

- Si se mide, los neutrinos son partículas Majorana
- GERDA, EXO, CUORICINO, KamLAND-Zen, NEMO-3:
 $m_{\beta\beta} < 0.2\text{-}0.4 \text{ eV (90\% CL)}$
- Futuros experimentos en la escala del ton: $m_{\beta\beta} < 10 \text{ meV}$

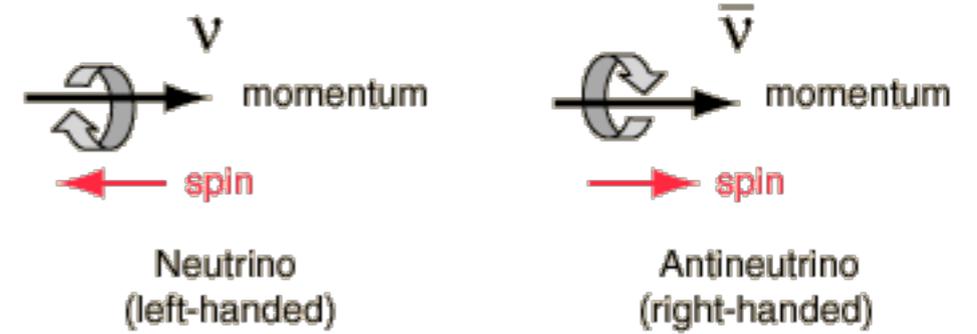
☑ **Medida indirecta (Cosmología):** $m = \sum_i m_{\nu_i}$

PLANCK 2015 (arXiv:1502.01589)

- **$\Sigma m_{\nu} < 0.23 \text{ eV}$** (Planck TT+lowP+lensing+ext.)
- $N_{\text{eff}} = 4$ excluido al $> 99\% \text{ CL}$
- $N_{\text{eff}} = 3.15 \pm 0.23$ (Planck TT+lowP+BAO)

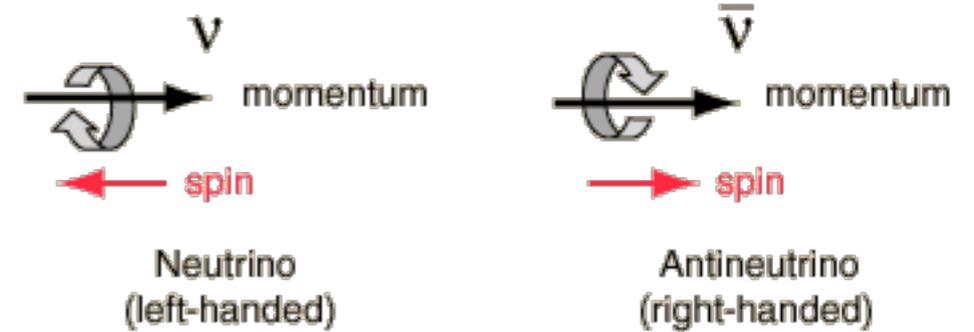


La identidad del neutrino



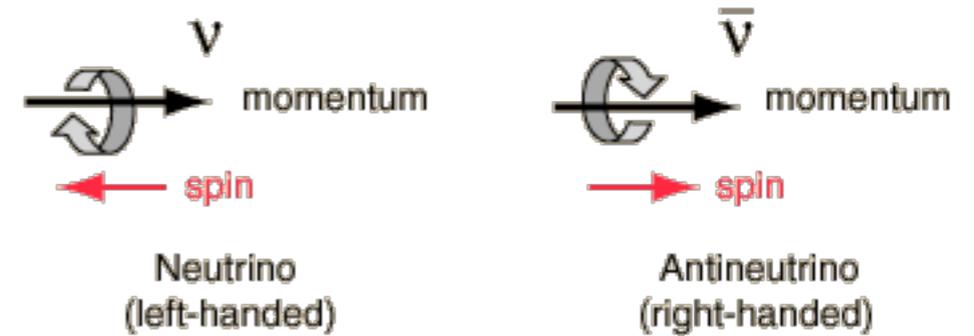
La identidad del neutrino

- Los neutrinos no tienen carga eléctrica
 - Podrían ser sus propias antipartículas (Majorana)



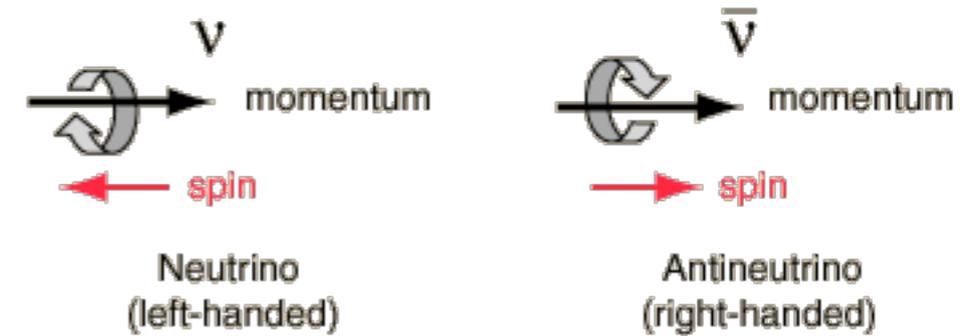
La identidad del neutrino

- Los neutrinos no tienen carga eléctrica
 - Podrían ser sus propias antipartículas (Majorana)
- **¿Cómo saberlo?**
 - Búsquedas de sucesos raros: **desintegraciones doble beta sin neutrinos**
 - Muchos experimentos buscan este proceso en la actualidad

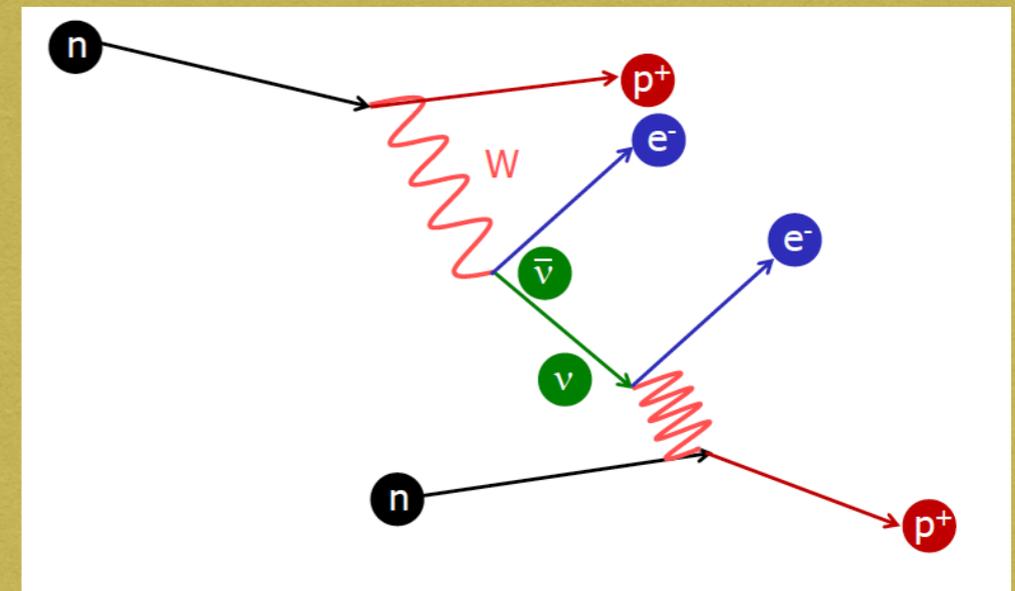


La identidad del neutrino

- Los neutrinos no tienen carga eléctrica
 - Podrían ser sus propias antipartículas (Majorana)
- ¿Cómo saberlo?
 - Búsquedas de sucesos raros: **desintegraciones doble beta sin neutrinos**
 - Muchos experimentos buscan este proceso en la actualidad

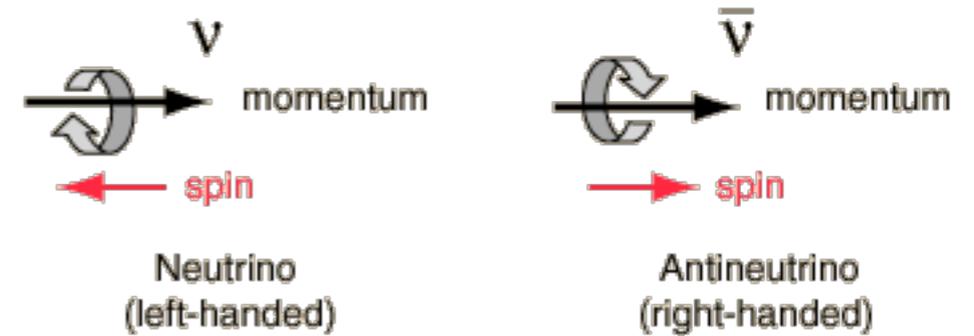


Desintegración doble beta sin neutrinos

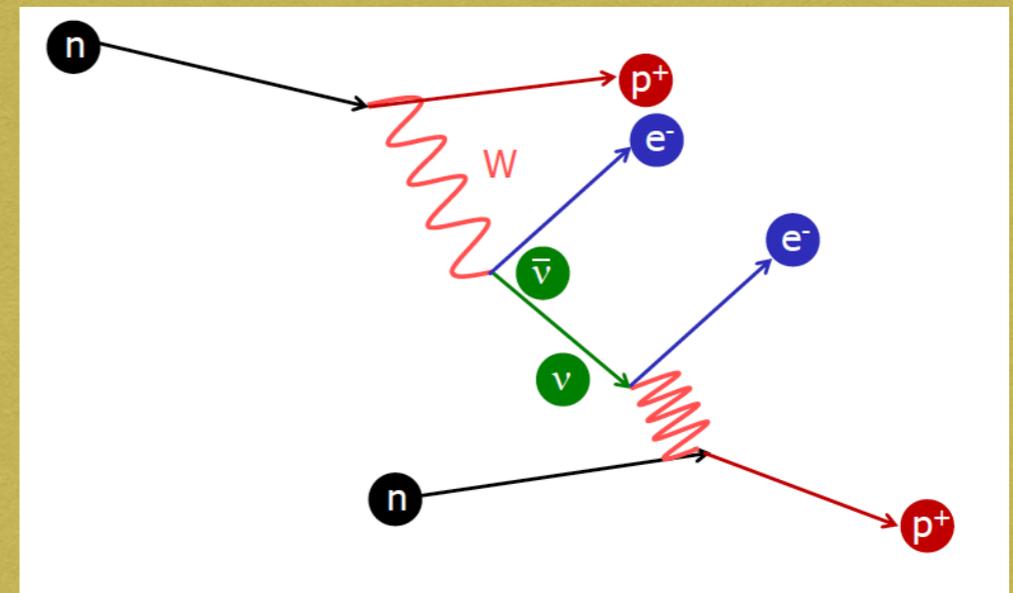


La identidad del neutrino

- Los neutrinos no tienen carga eléctrica
 - Podrían ser sus propias antipartículas (Majorana)
- ¿Cómo saberlo?
 - Búsquedas de sucesos raros: **desintegraciones doble beta sin neutrinos**
 - Muchos experimentos buscan este proceso en la actualidad



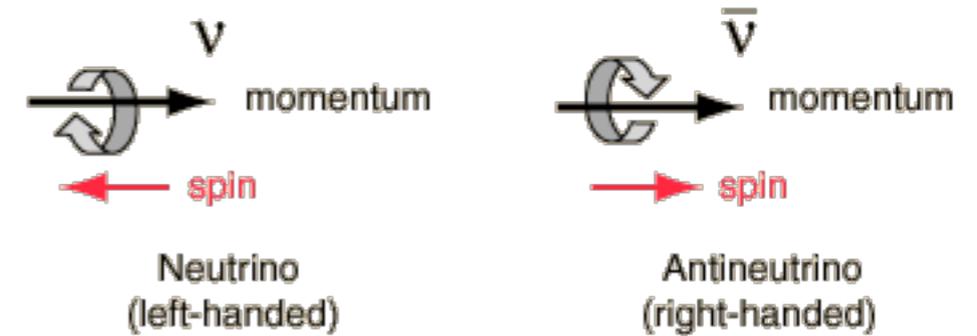
Desintegración doble beta sin neutrinos



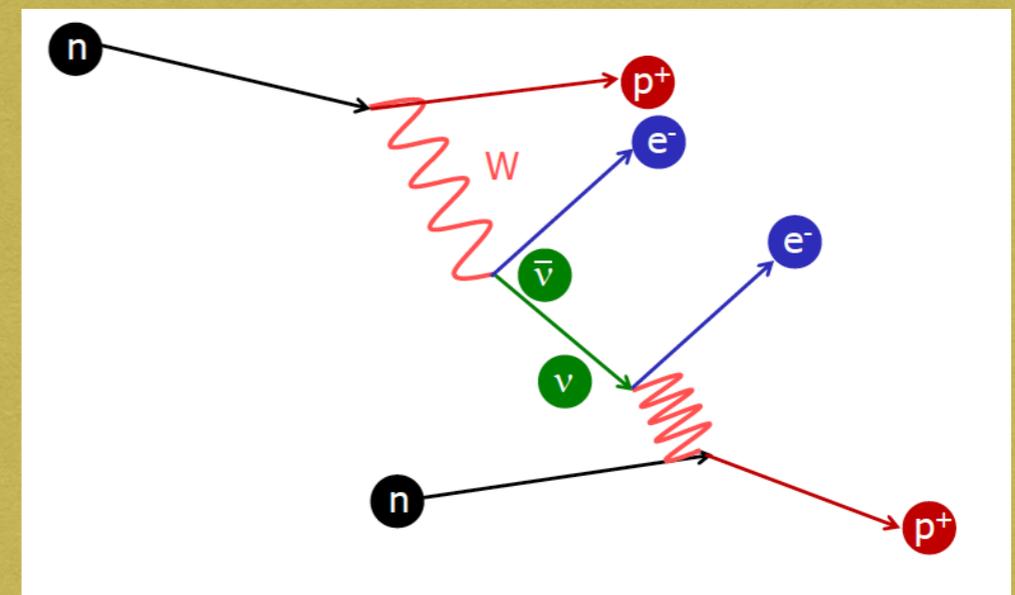
Prueba directa de que los neutrinos son partículas de Majorana

La identidad del neutrino

- Los neutrinos no tienen carga eléctrica
 - Podrían ser sus propias antipartículas (Majorana)
- ¿Cómo saberlo?
 - Búsquedas de sucesos raros: **desintegraciones doble beta sin neutrinos**
 - Muchos experimentos buscan este proceso en la actualidad
- Si los neutrinos son de Majorana, se podría explicar **por qué son tan ligeros** y...



Desintegración doble beta sin neutrinos

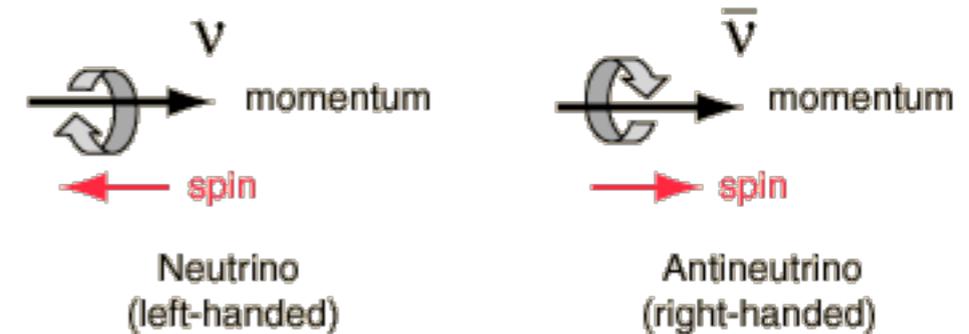


Prueba directa de que los neutrinos son partículas de Majorana

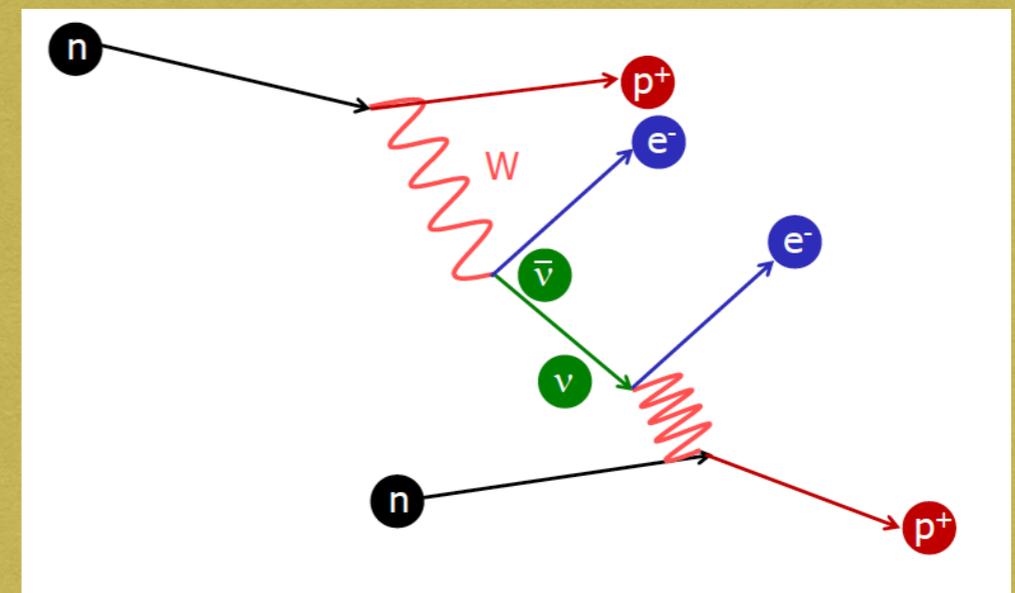
La identidad del neutrino

- Los neutrinos no tienen carga eléctrica
 - Podrían ser sus propias antipartículas (Majorana)
- ¿Cómo saberlo?
 - Búsquedas de sucesos raros: **desintegraciones doble beta sin neutrinos**
 - Muchos experimentos buscan este proceso en la actualidad
- Si los neutrinos son de Majorana, se podría explicar **por qué son tan ligeros** y...
- Podrían explicar la **asimetría materia-antimateria del Universo**:

⇒ **LEPTOGÉNESIS**



Desintegración doble beta sin neutrinos



Prueba directa de que los neutrinos son partículas de Majorana

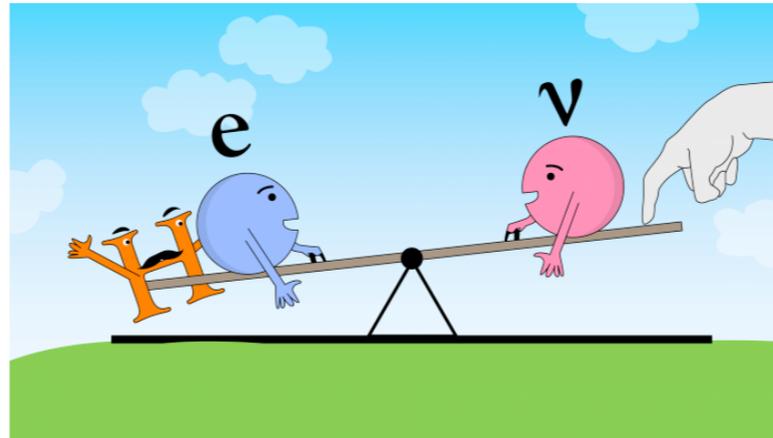
Relación con las otras partículas

Relación con las otras partículas

- Relación con el [Higgs](#)?

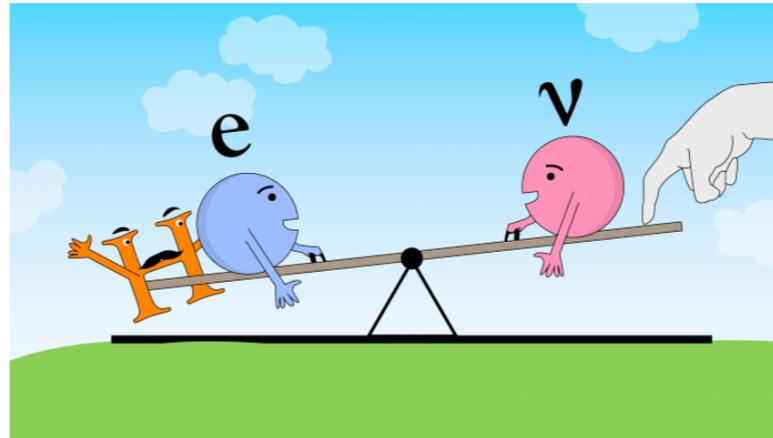
Relación con las otras partículas

- Relación con el [Higgs](#)?



Relación con las otras partículas

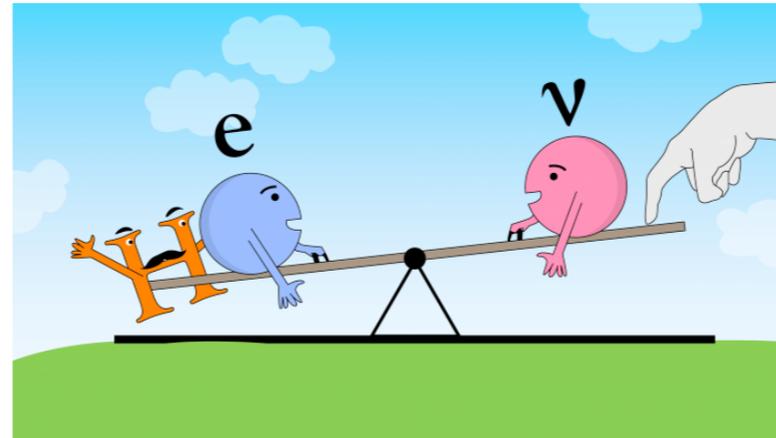
- Relación con el **Higgs**?



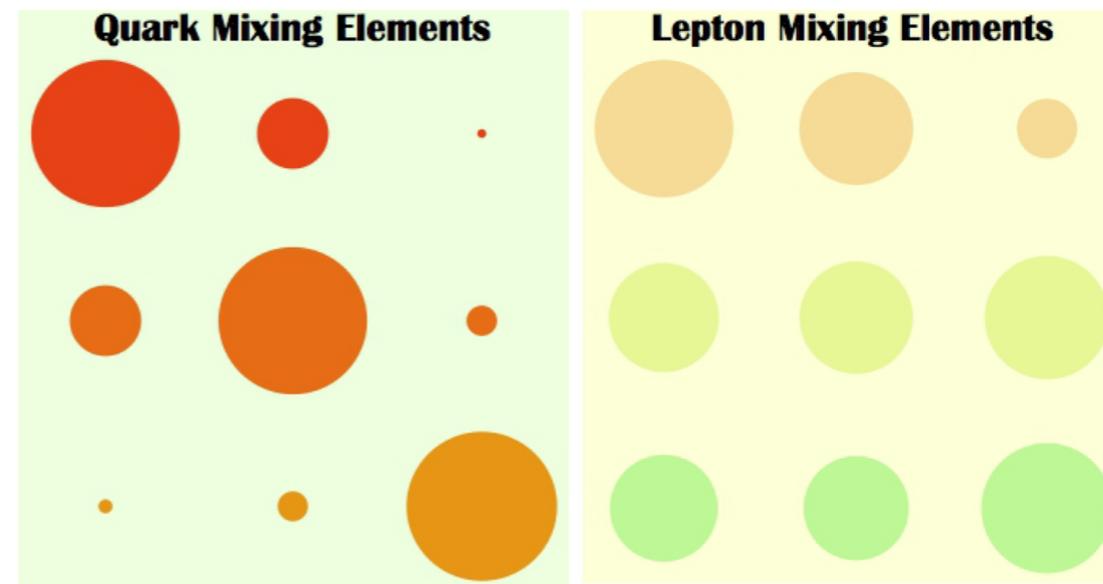
- Relación con los **quarks**?

Relación con las otras partículas

- Relación con el Higgs?

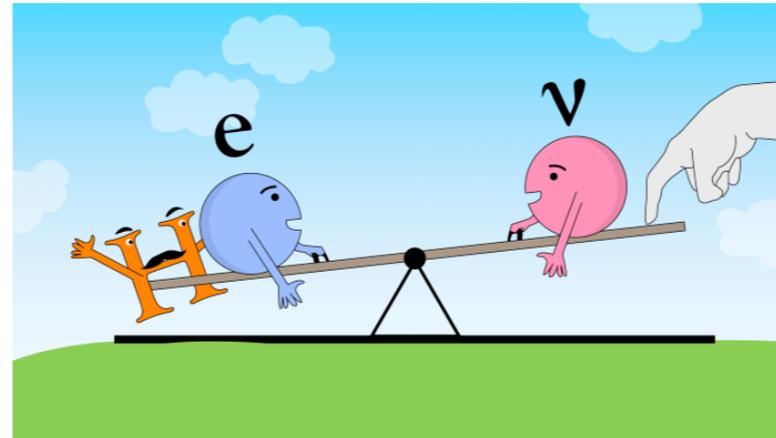


- Relación con los quarks?

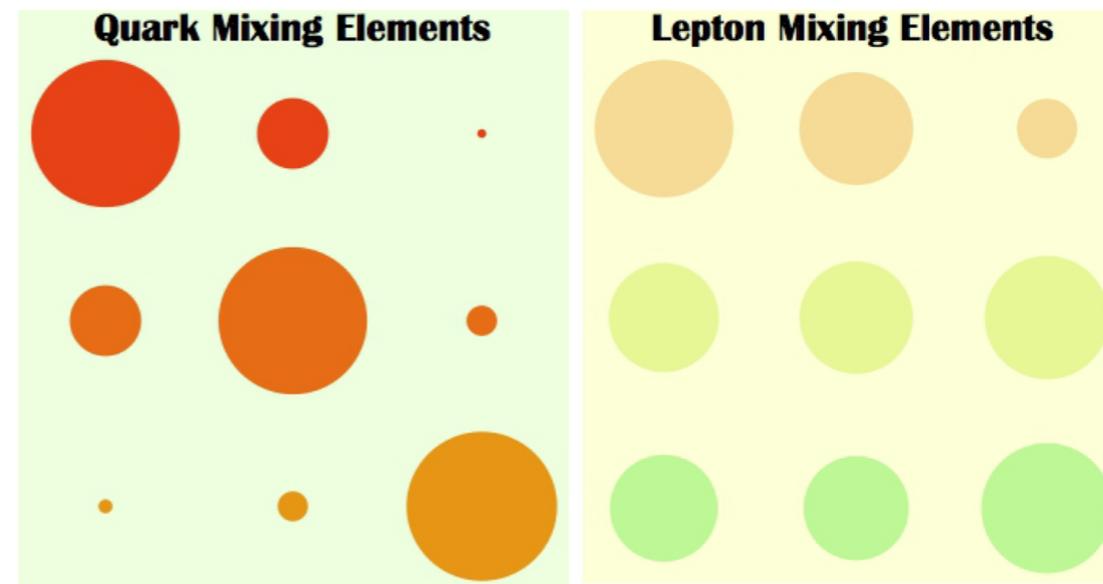


Relación con las otras partículas

- Relación con el Higgs?



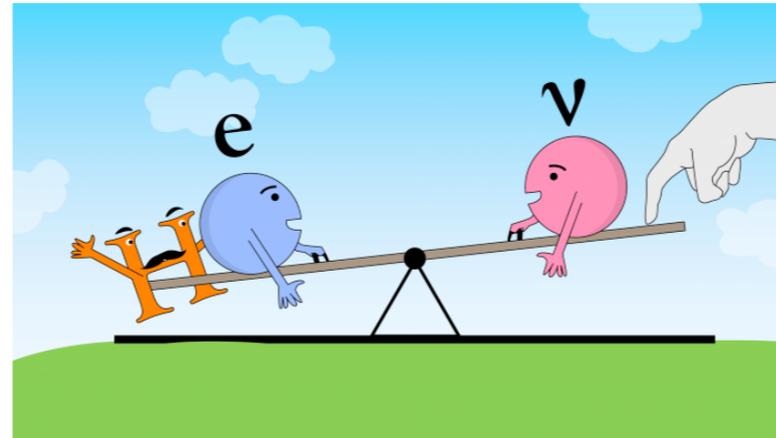
- Relación con los quarks?



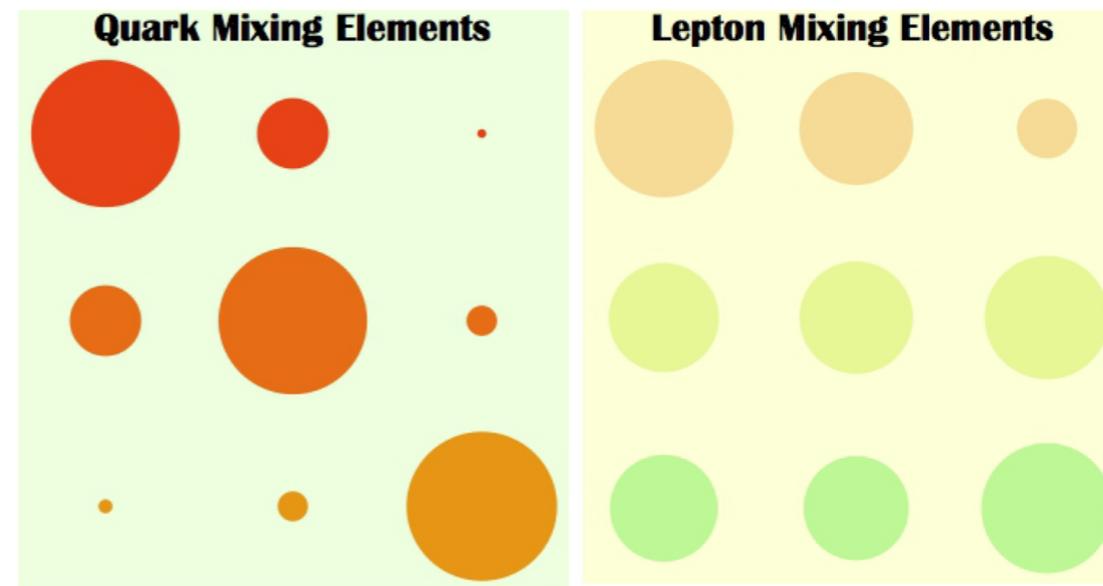
- Relación con los otros leptones:
¿por qué son mucho más ligeros?

Relación con las otras partículas

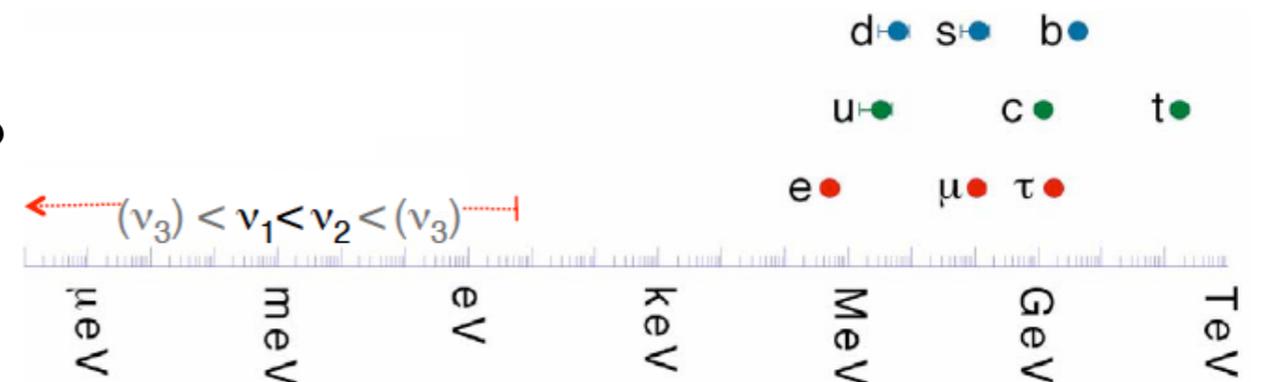
- Relación con el Higgs?



- Relación con los quarks?



- Relación con los otros leptones:
¿por qué son mucho más ligeros?



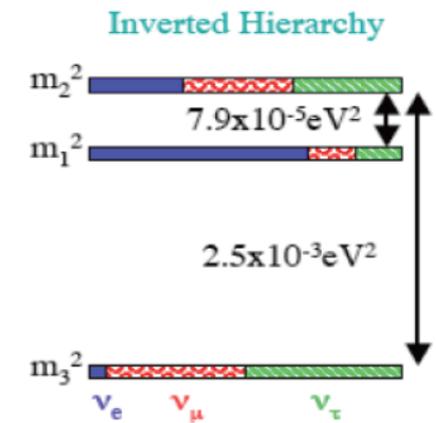
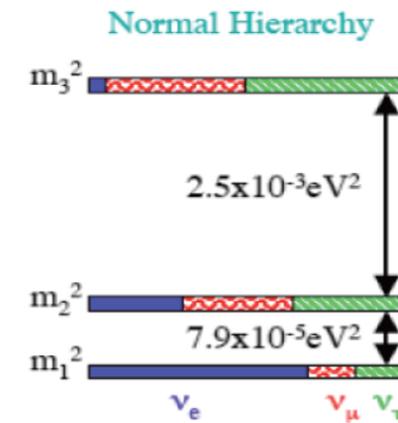
Oscilaciones: violación CP y jerarquía de masas

Oscilaciones: violación CP y jerarquía de masas

- ¿Es $m_3 > m_2$ o $m_2 > m_3$? (jerarquía de masas)

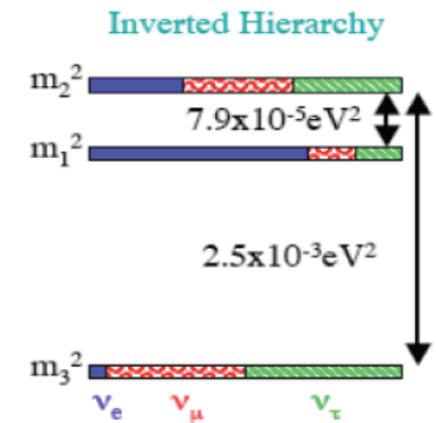
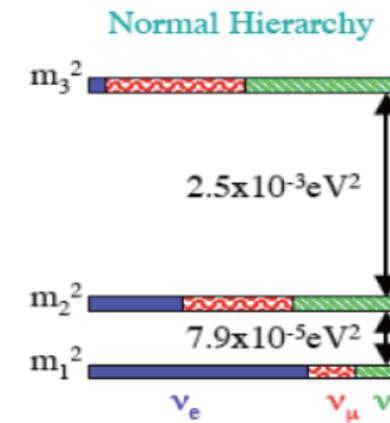
Oscilaciones: violación CP y jerarquía de masas

- ¿Es $m_3 > m_2$ o $m_2 > m_3$? (jerarquía de masas)



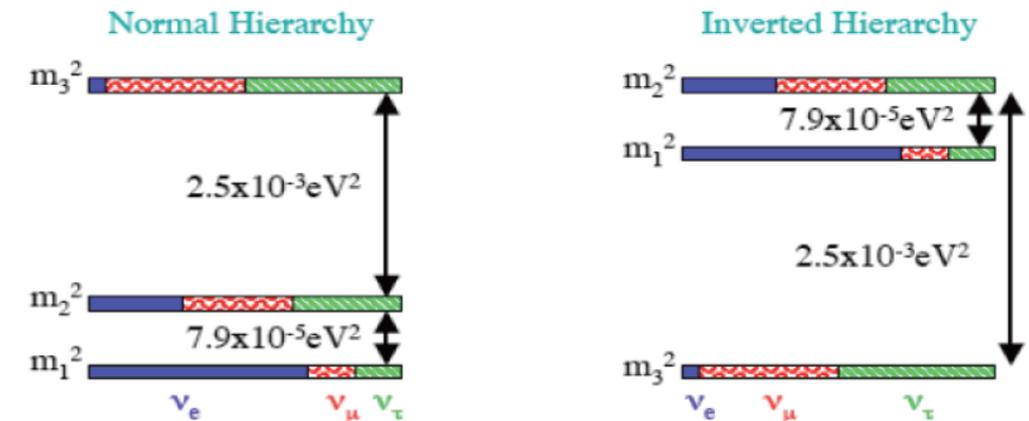
Oscilaciones: violación CP y jerarquía de masas

- ¿Es $m_3 > m_2$ o $m_2 > m_3$? (jerarquía de masas)
- ¿Se viola la **simetría CP** en el caso de los neutrinos? ¿Existe diferencia entre **neutrinos y antineutrinos**?



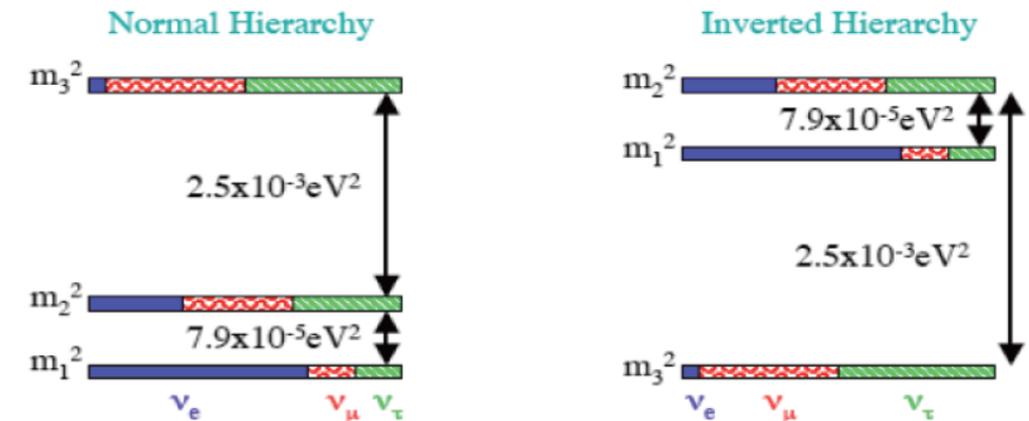
Oscilaciones: violación CP y jerarquía de masas

- ¿Es $m_3 > m_2$ o $m_2 > m_3$? (jerarquía de masas)
- ¿Se viola la **simetría CP** en el caso de los neutrinos? ¿Existe diferencia entre **neutrinos y antineutrinos**?
- Si la violación CP establece una **distinción entre materia y antimateria**, podría ser la causa de que nuestro Universo esté hecho de materia!



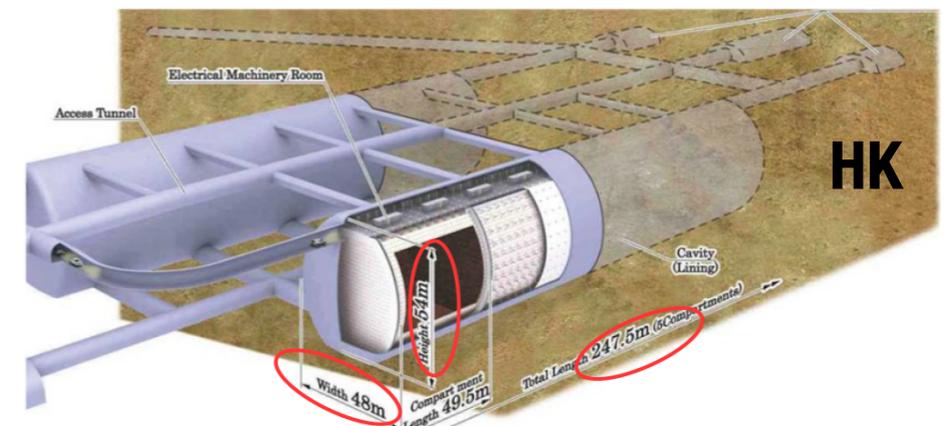
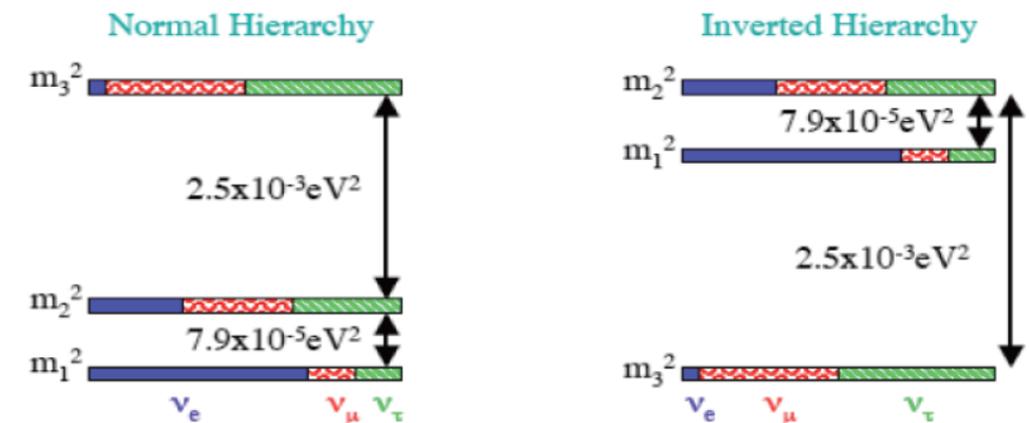
Oscilaciones: violación CP y jerarquía de masas

- ¿Es $m_3 > m_2$ o $m_2 > m_3$? (jerarquía de masas)
- ¿Se viola la **simetría CP** en el caso de los neutrinos? ¿Existe diferencia entre **neutrinos y antineutrinos**?
- Si la violación CP establece una **distinción entre materia y antimateria**, podría ser la causa de que nuestro Universo esté hecho de materia!
- Requisitos experimentales para medir CP:
 - Haces de neutrinos muy intensos (aumento de la potencia de los aceleradores)
 - Detectores gigantescos (cientos de kton)



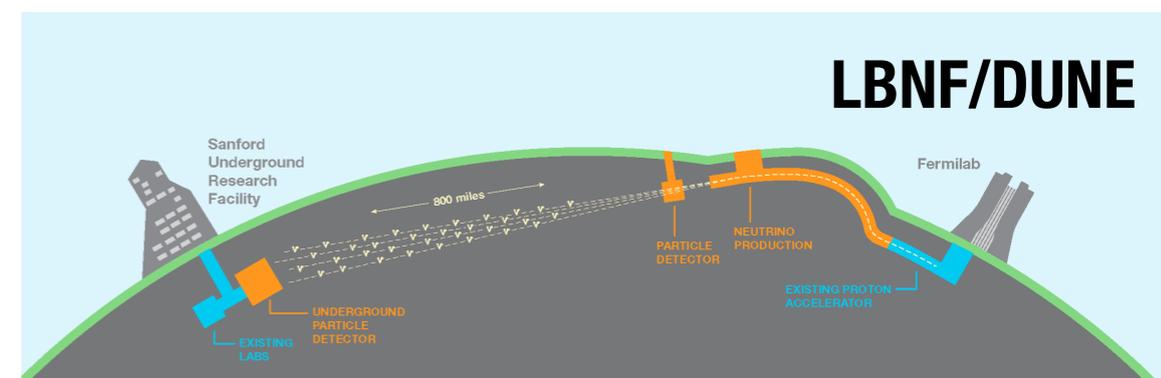
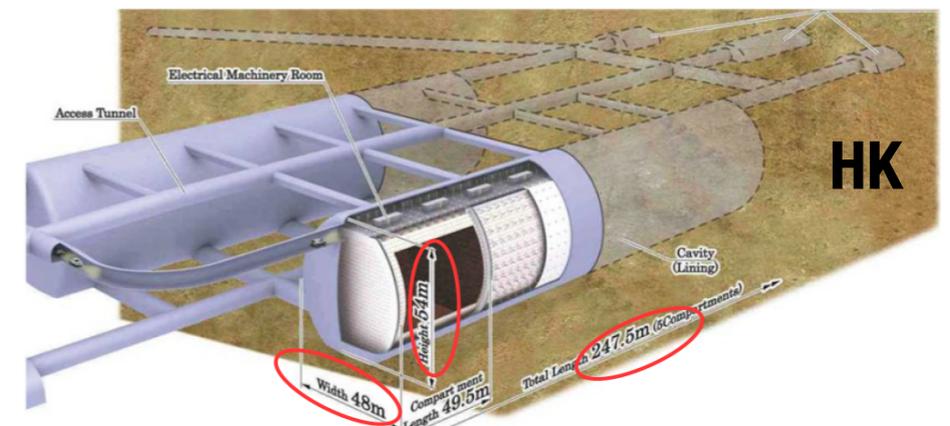
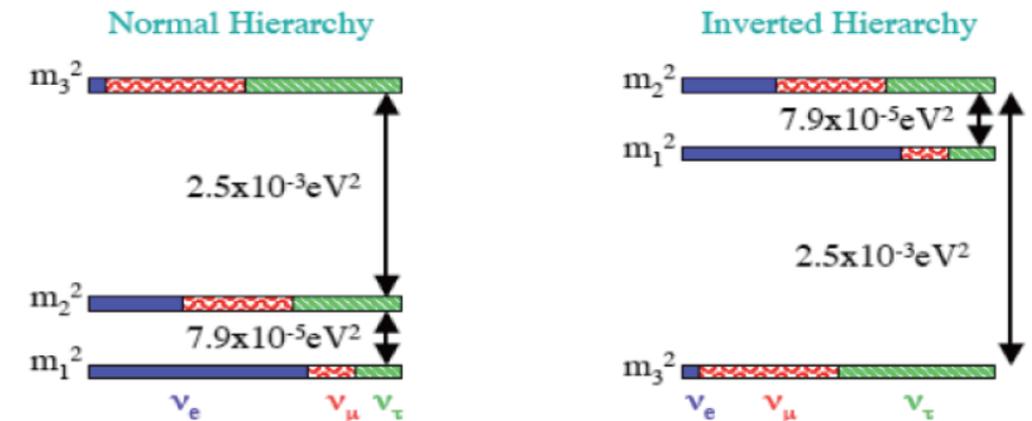
Oscilaciones: violación CP y jerarquía de masas

- ¿Es $m_3 > m_2$ o $m_2 > m_3$? (jerarquía de masas)
- ¿Se viola la **simetría CP** en el caso de los neutrinos? ¿Existe diferencia entre **neutrinos y antineutrinos**?
- Si la violación CP establece una **distinción entre materia y antimateria**, podría ser la causa de que nuestro Universo esté hecho de materia!
- Requisitos experimentales para medir CP:
 - Haces de neutrinos muy intensos (aumento de la potencia de los aceleradores)
 - Detectores gigantescos (cientos de kton)



Oscilaciones: violación CP y jerarquía de masas

- ¿Es $m_3 > m_2$ o $m_2 > m_3$? (jerarquía de masas)
- ¿Se viola la **simetría CP** en el caso de los neutrinos? ¿Existe diferencia entre **neutrinos y antineutrinos**?
- Si la violación CP establece una **distinción entre materia y antimateria**, podría ser la causa de que nuestro Universo esté hecho de materia!
- Requisitos experimentales para medir CP:
 - Haces de neutrinos muy intensos (aumento de la potencia de los aceleradores)
 - Detectores gigantes (cientos de kton)



La plataforma de neutrinos del CERN

La plataforma de neutrinos del CERN

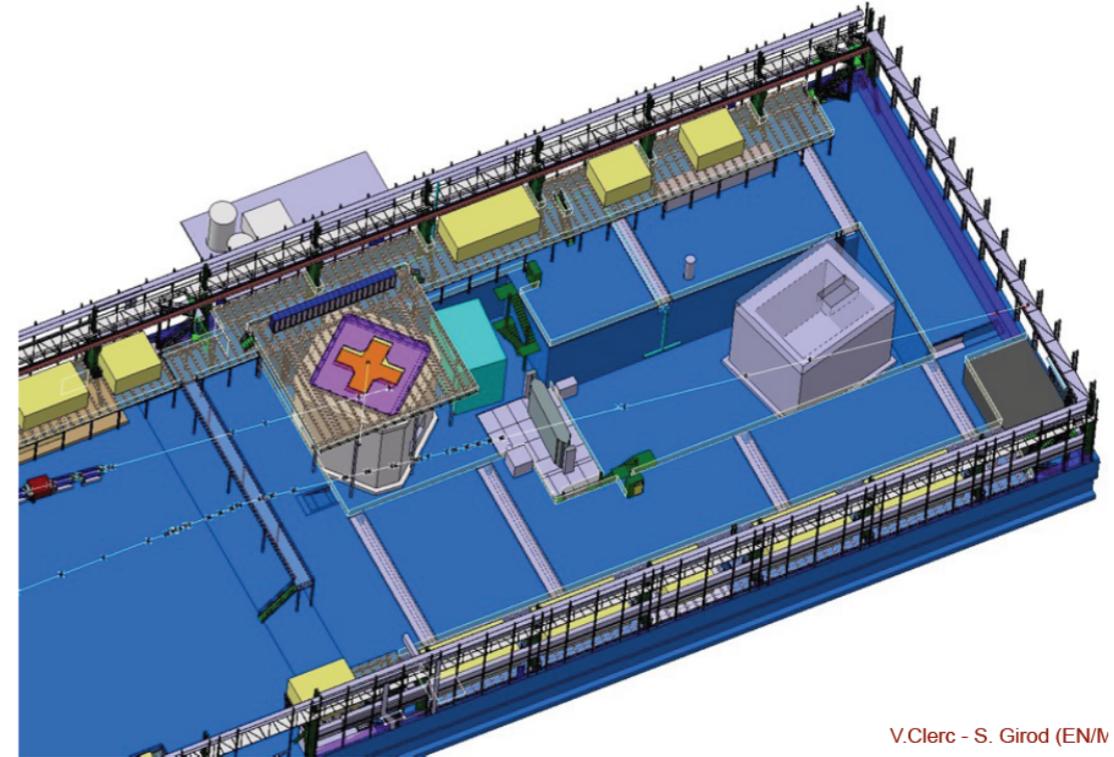
- Aprobada por el Consejo del CERN en 2014 para [desarrollar en los próximos 5 años una infraestructura de I+D y tests de detectores, haces y componentes para experimentos de neutrinos](#)

La plataforma de neutrinos del CERN

- Aprobada por el Consejo del CERN en 2014 para **desarrollar en los próximos 5 años una infraestructura de I+D y tests de detectores, haces y componentes para experimentos de neutrinos**
- Se está preparando **una nueva área experimental** (extensión del EHN1) con capacidad para haces de partículas cargadas: disponible en 2017

La plataforma de neutrinos del CERN

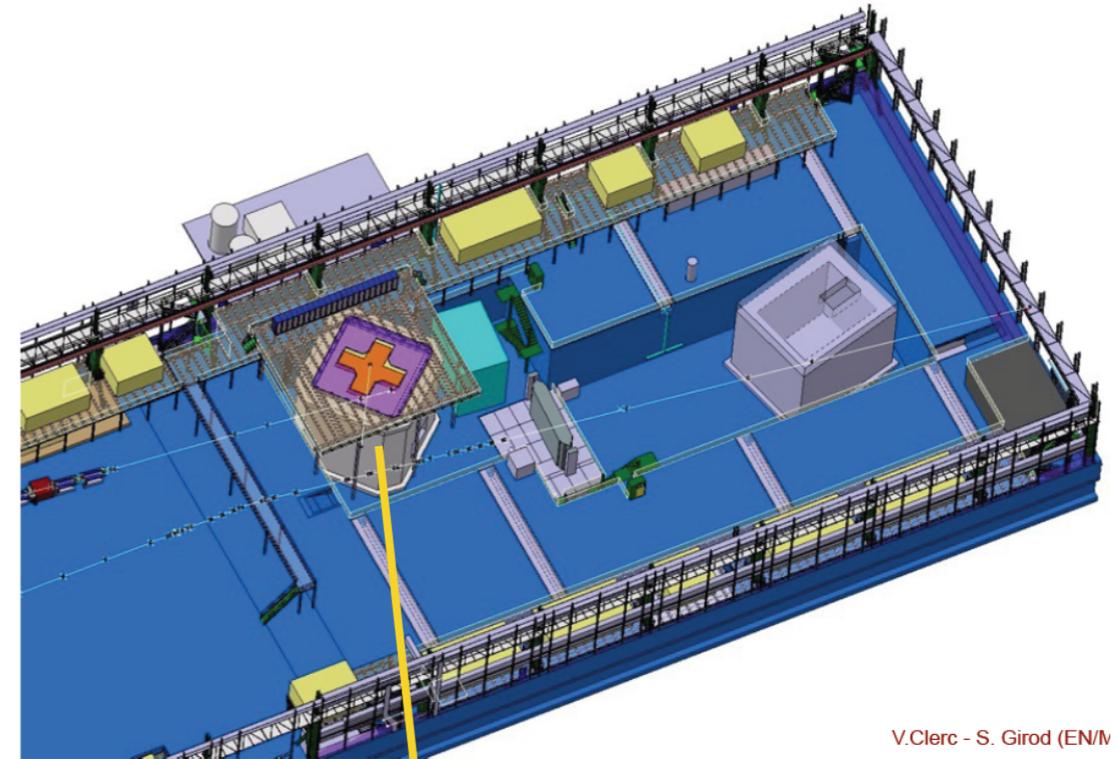
- Aprobada por el Consejo del CERN en 2014 para **desarrollar en los próximos 5 años una infraestructura de I+D y tests de detectores, haces y componentes para experimentos de neutrinos**
- Se está preparando **una nueva área experimental** (extensión del EHN1) con capacidad para haces de partículas cargadas: disponible en 2017



V.Clerc - S. Girod (EN/W)

La plataforma de neutrinos del CERN

- Aprobada por el Consejo del CERN en 2014 para **desarrollar en los próximos 5 años una infraestructura de I+D y tests de detectores, haces y componentes para experimentos de neutrinos**
- Se está preparando **una nueva área experimental** (extensión del EHN1) con capacidad para haces de partículas cargadas: disponible en 2017

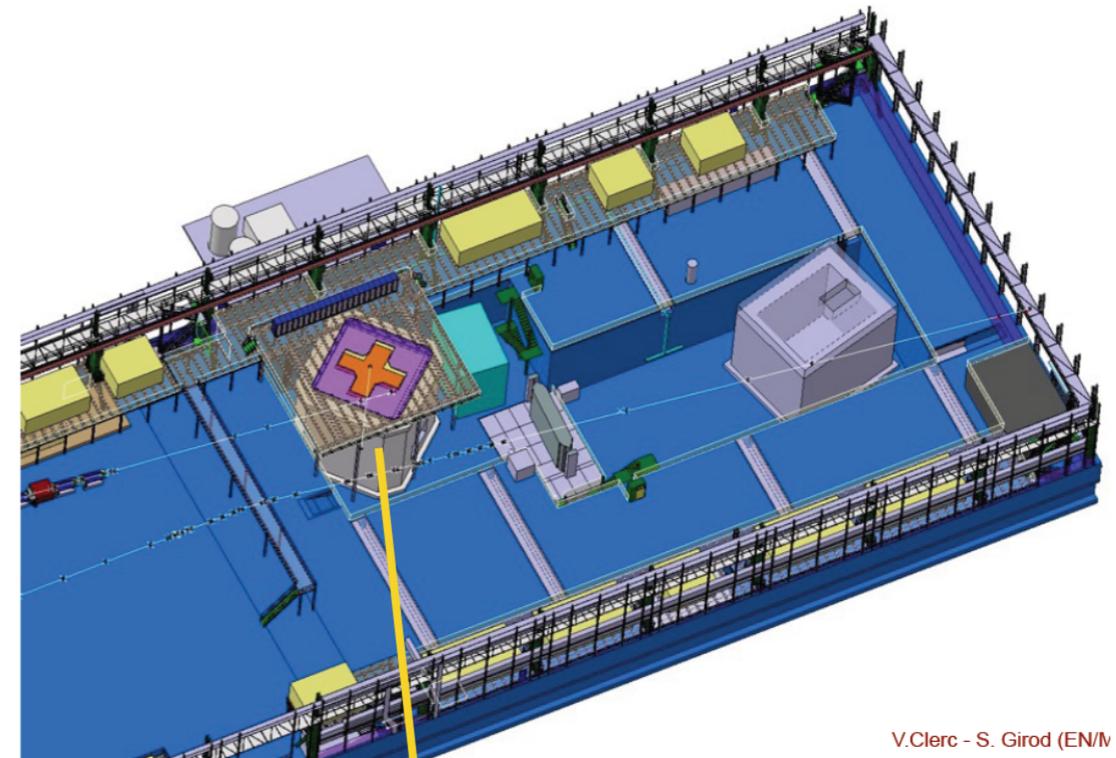


WA105

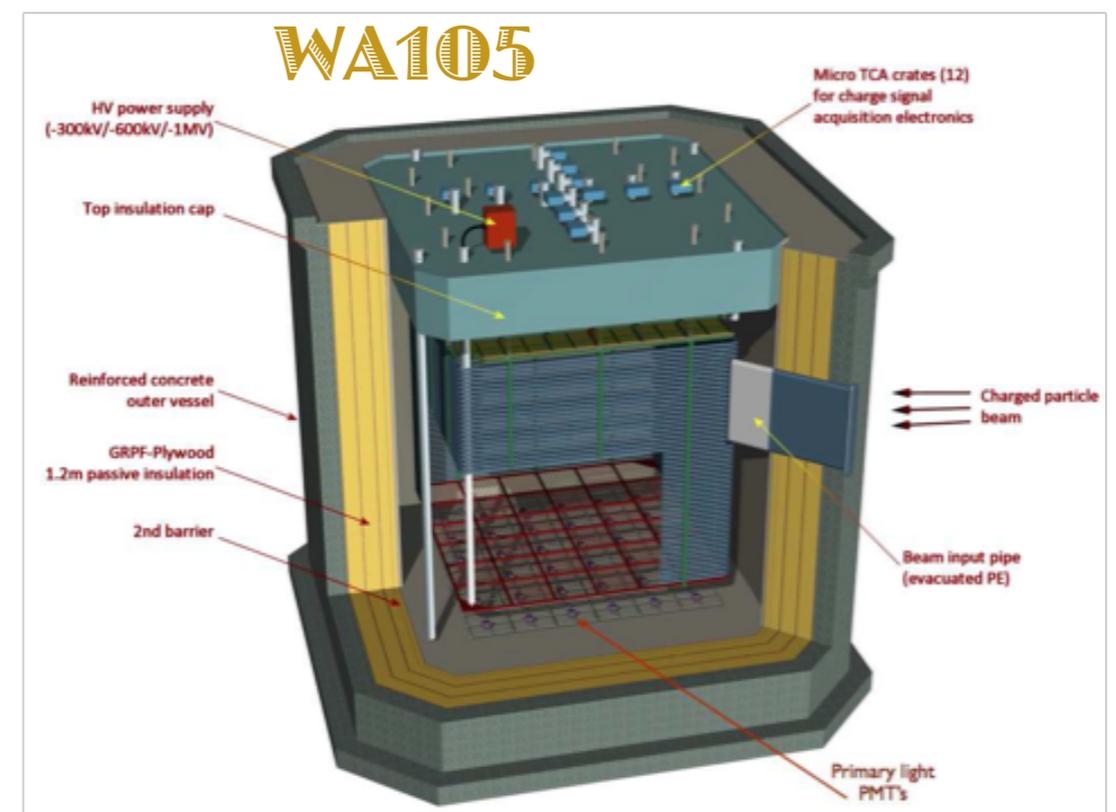
V.Clerc - S. Girod (EN/W)

La plataforma de neutrinos del CERN

- Aprobada por el Consejo del CERN en 2014 para desarrollar en los próximos 5 años una infraestructura de I+D y tests de detectores, haces y componentes para experimentos de neutrinos
- Se está preparando una nueva área experimental (extensión del EHN1) con capacidad para haces de partículas cargadas: disponible en 2017

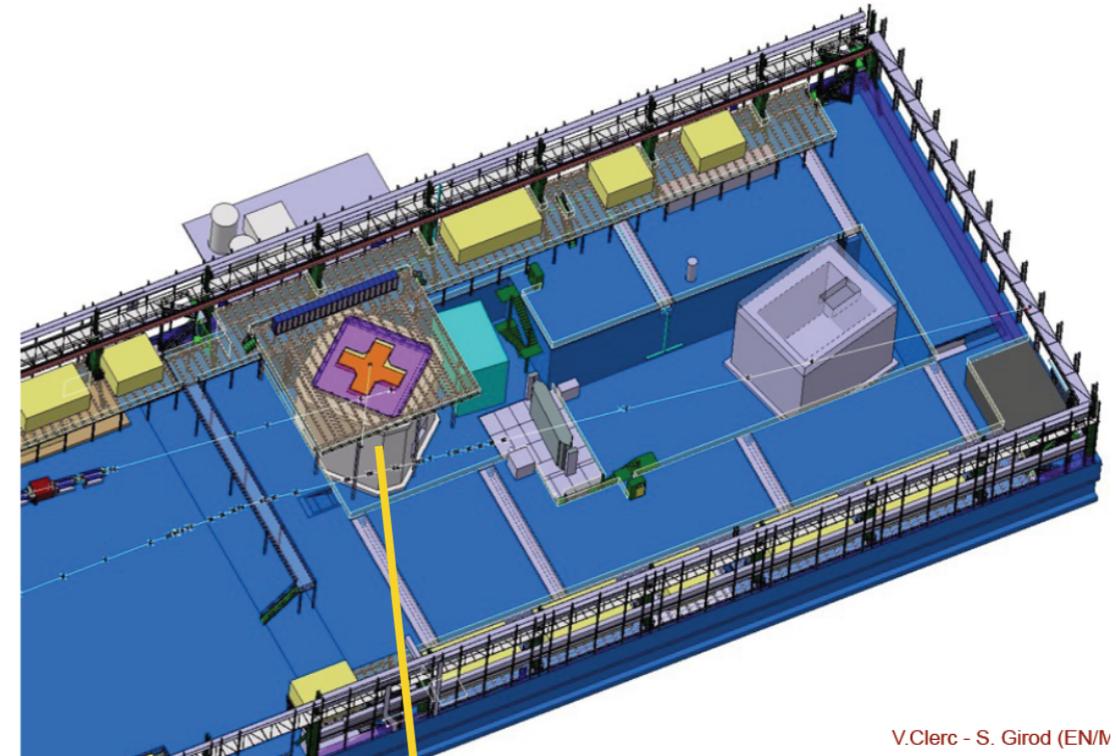


V.Clerc - S. Girod (EN/W)

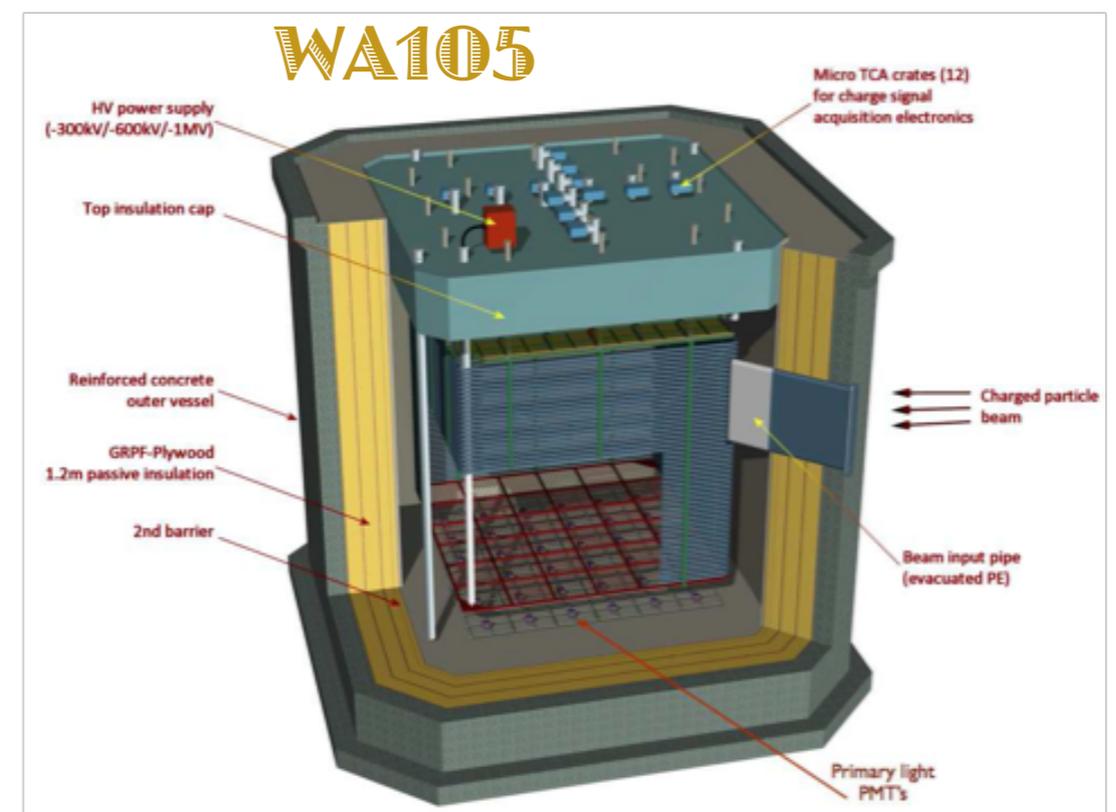


La plataforma de neutrinos del CERN

- Aprobada por el Consejo del CERN en 2014 para **desarrollar en los próximos 5 años una infraestructura de I+D y tests de detectores, haces y componentes para experimentos de neutrinos**
- Se está preparando **una nueva área experimental** (extensión del EHN1) con capacidad para haces de partículas cargadas: disponible en 2017
- **WA105 (LBNO-DEMO)**: construcción, operación y exposición a haces de partículas de un detector de doble fase de $6 \times 6 \times 6 \text{ m}^3$ de argón líquido

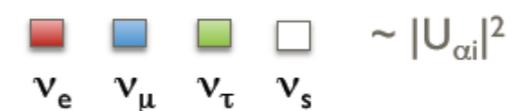
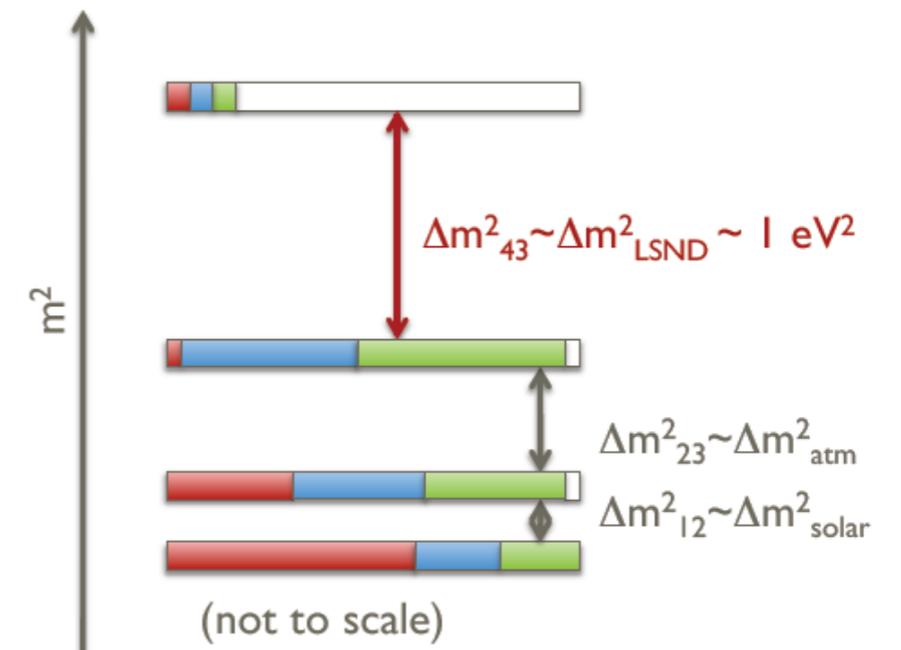
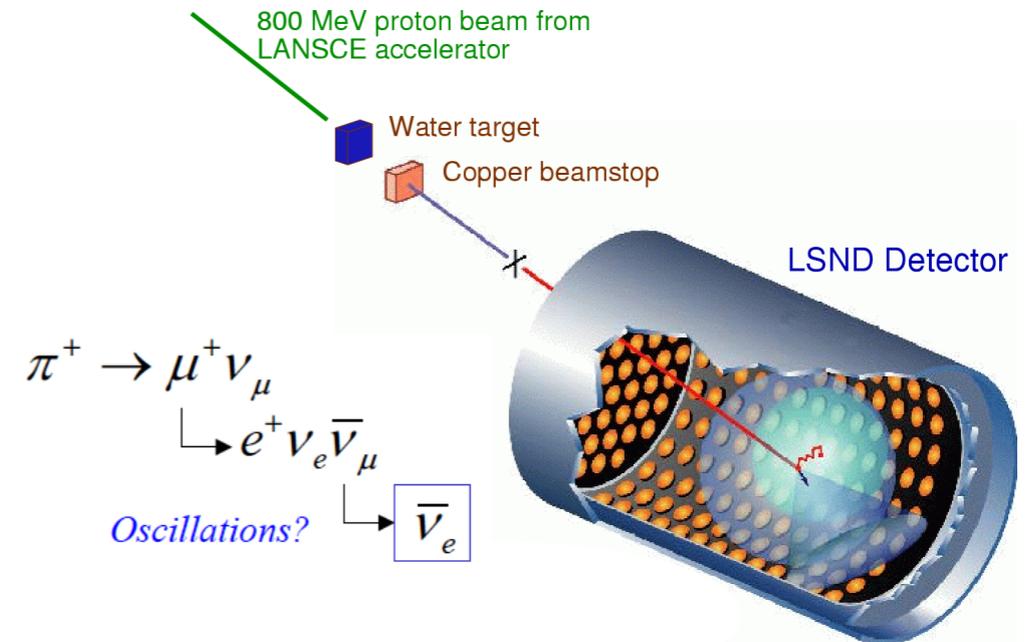


V.Clerc - S. Girod (EN/IV)



Anomalías: ¿un cuarto neutrino?

- Señal positiva de LSND y MiniBooNE ($\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$)
 - Oscilación vista no compatible con 3 neutrinos (diferente frecuencia): $m_4 \gg m_3, m_2, m_1$
 - No confirmado por KARMEN e ICARUS
- Experimentos de Galio
 - Déficit de ν_e procedentes de intensas fuentes radioactivas (^{51}Cr y ^{37}Ar)
- Experimentos de reactores a muy cortas distancias
 - Déficit de $\bar{\nu}_e$ a cortas distancias (a pocos metros de los reactores)

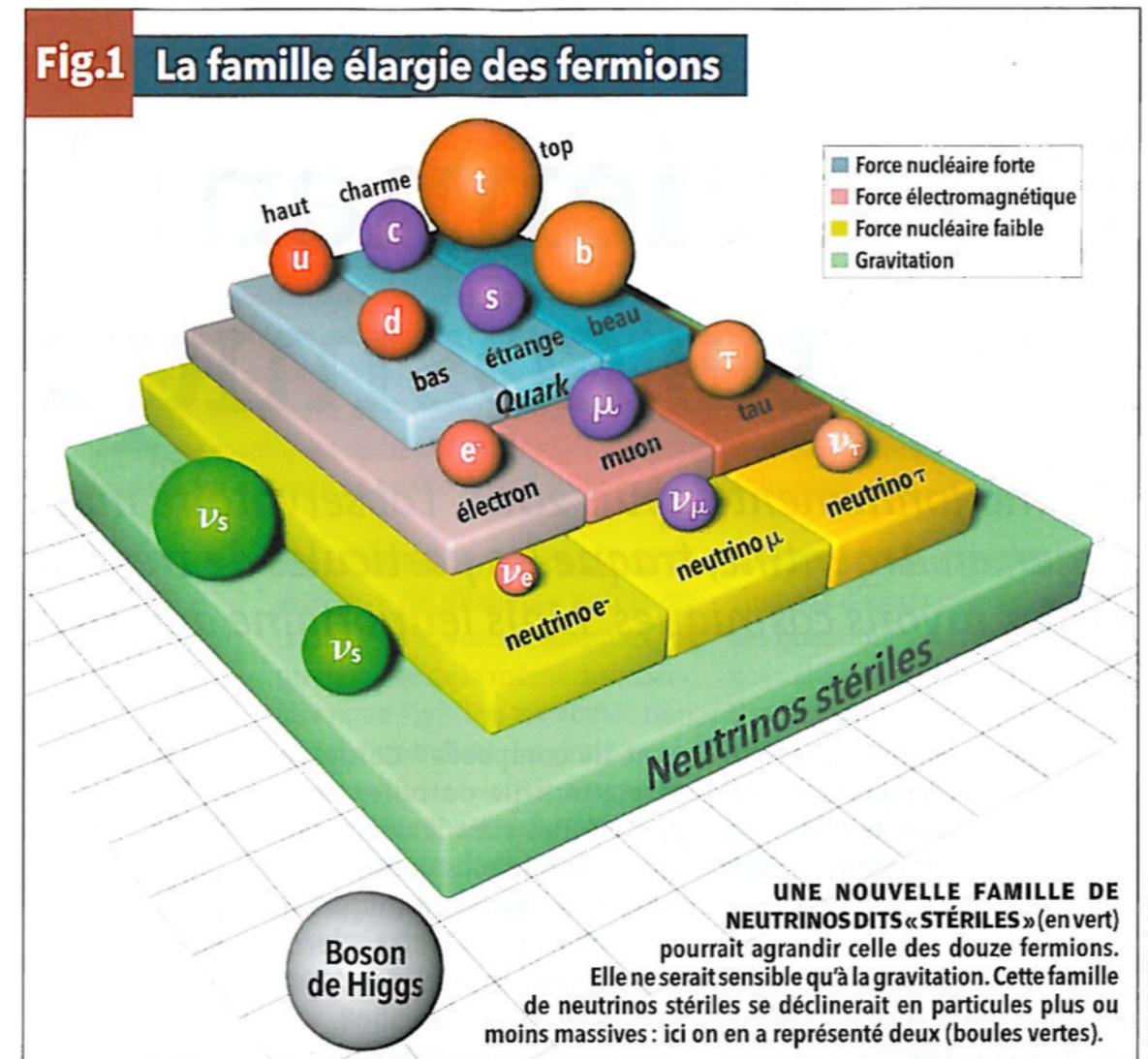


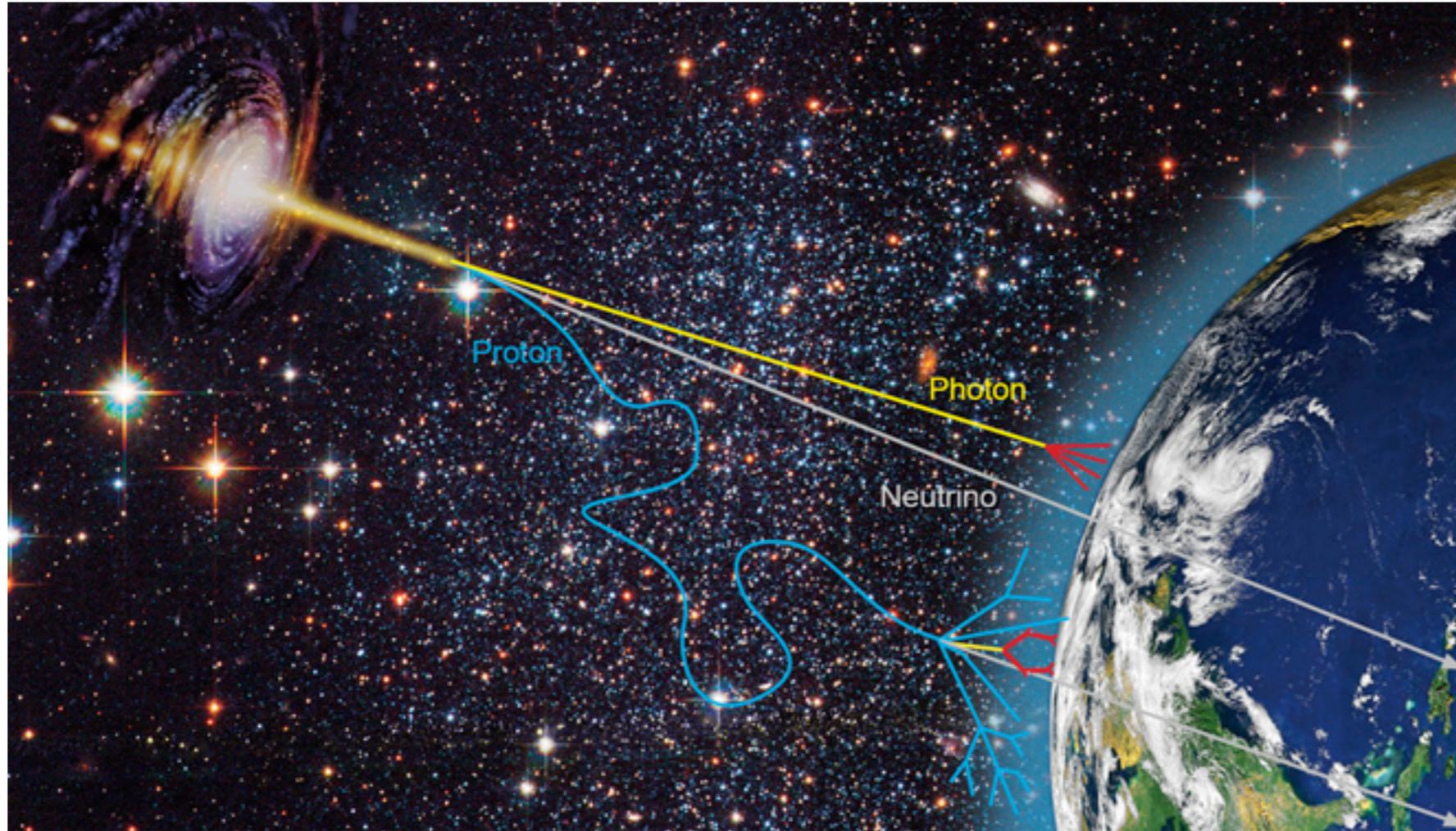
¿Más de 3 neutrinos?

Neutrinos estériles (ν_s):

- No interaccionan débilmente con otras partículas
- Sólo experimentan la fuerza de gravedad
- Se mezclan con los otros neutrinos
- Posibilidad:

$$\nu_\mu \rightarrow \nu_s \rightarrow \nu_e \quad \text{O} \quad \nu_e \rightarrow \nu_s$$

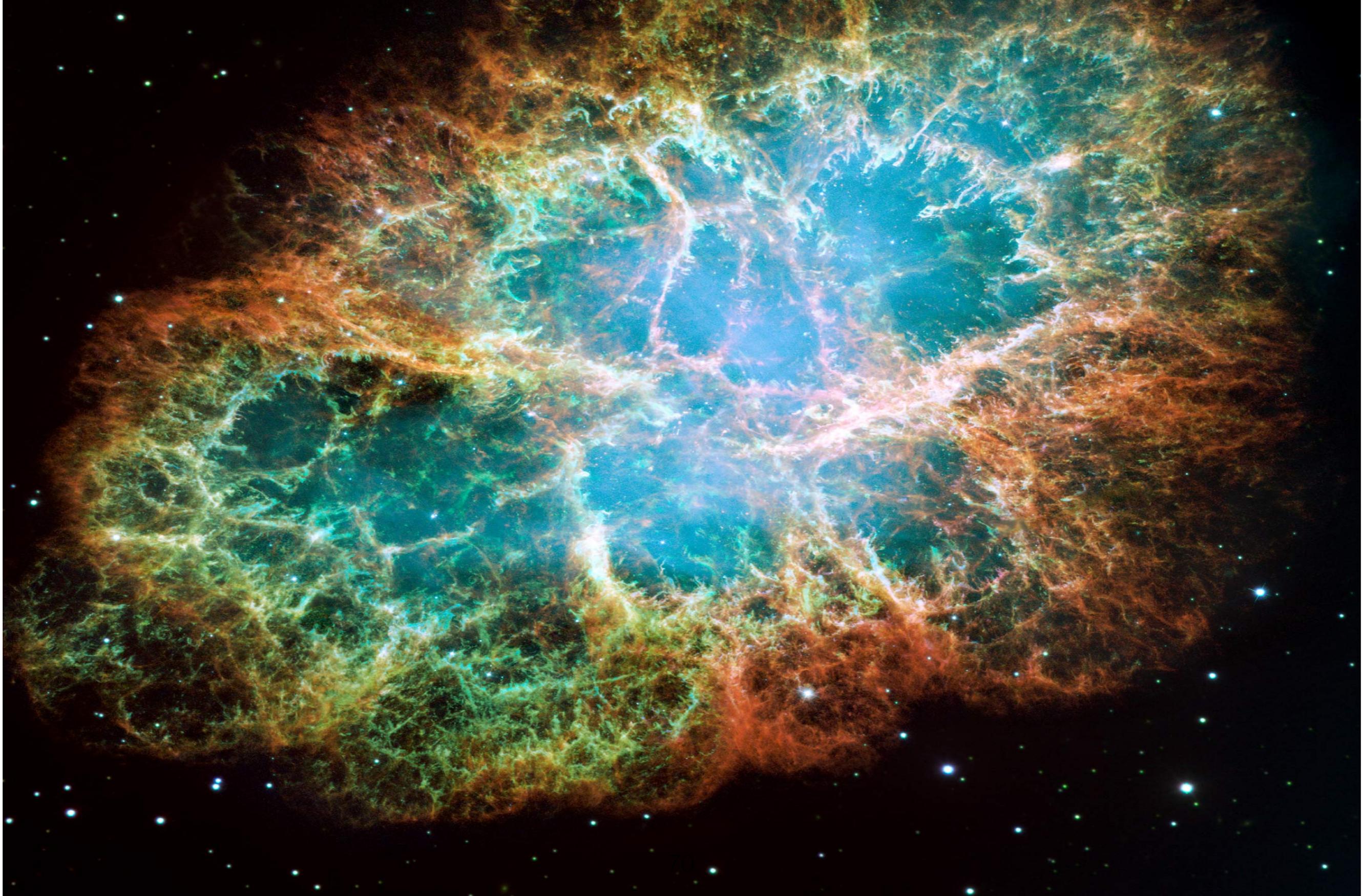




5

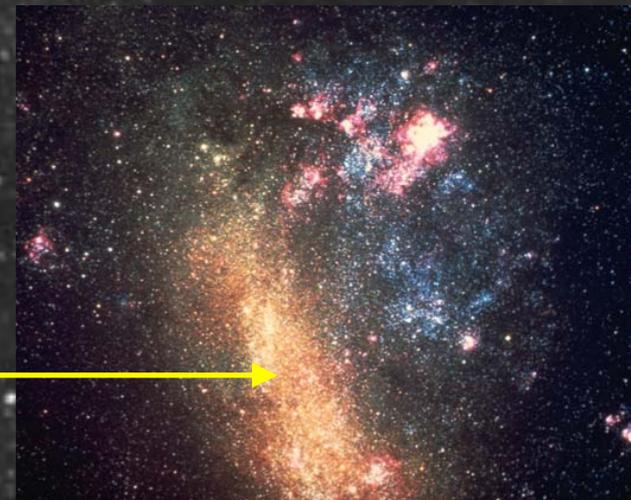
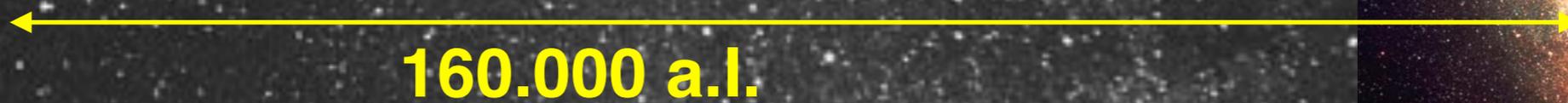
Mensajeros del Cosmos

Información del Más Allá...



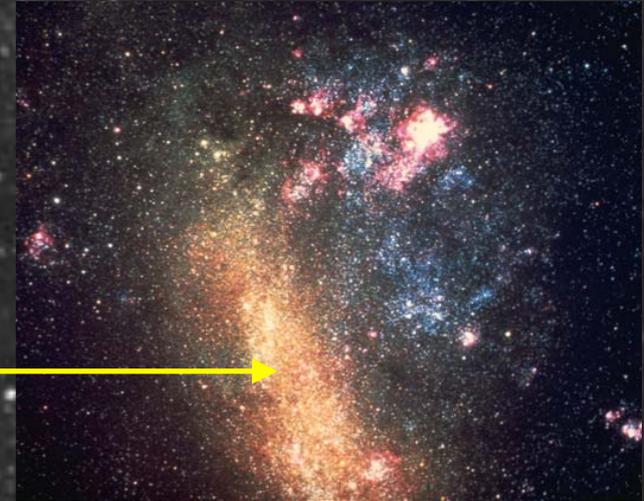
SN1987A

Gran Nube de Magallanes



SN1987A

Gran Nube de Magallanes



23 febrero 1987

A simple vista se pudo observar una gran explosión



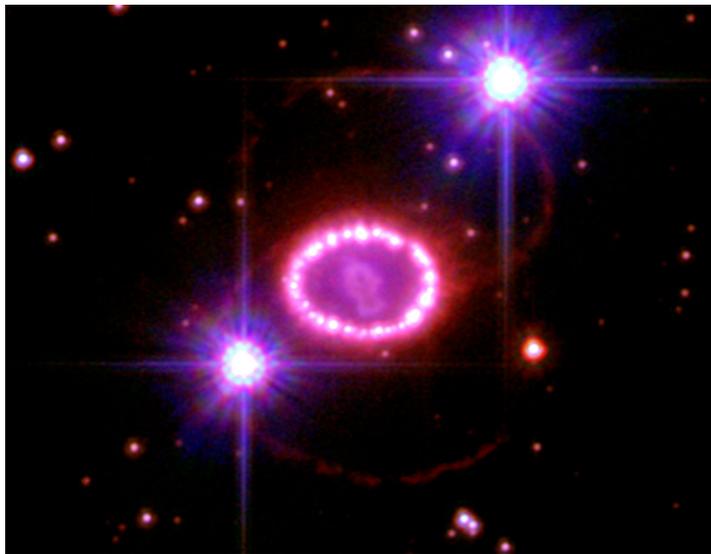


Observatorio de Las Campanas (Chile)

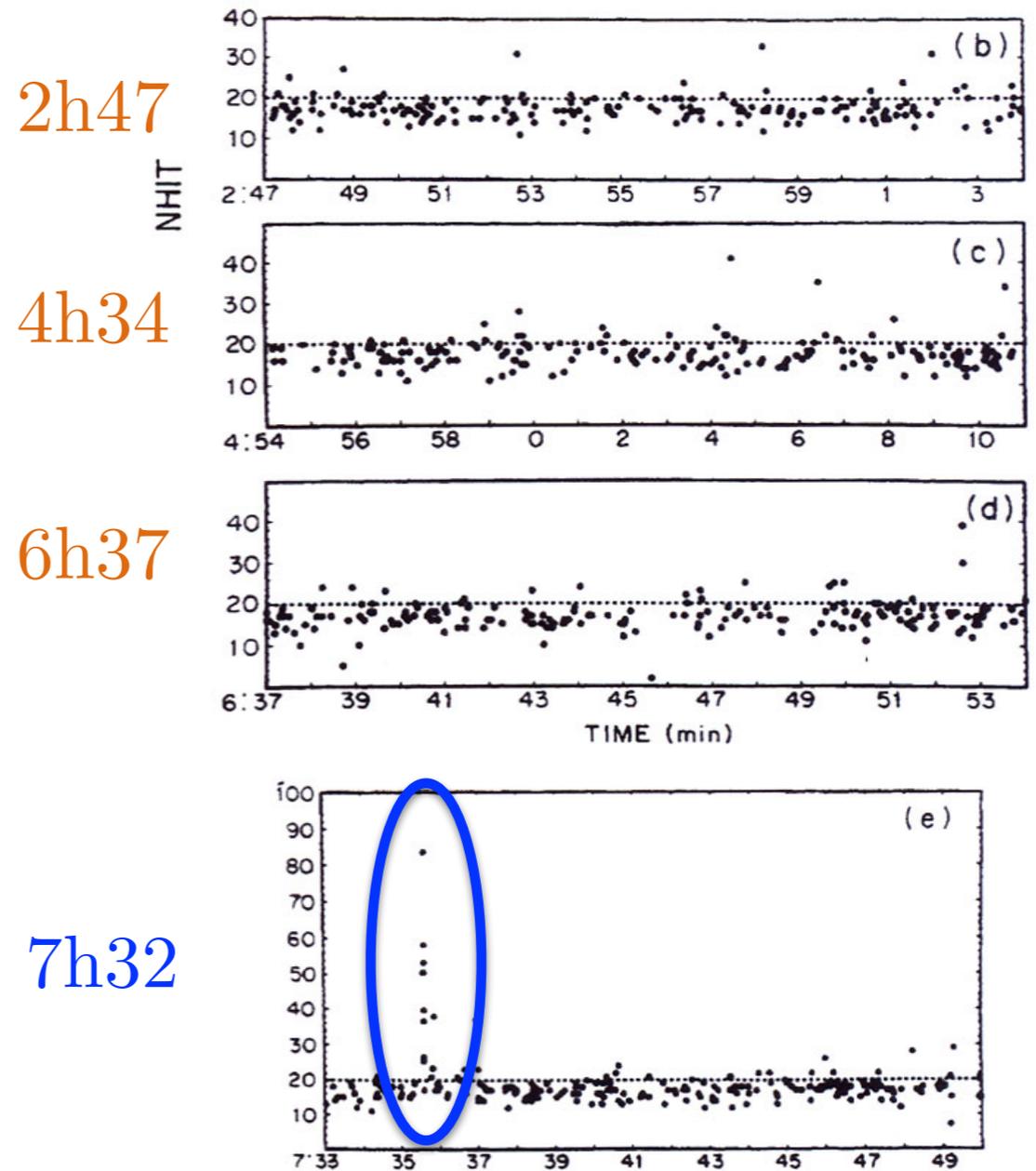
© Anglo-Australian Observatory

SN1987A: primera detección de neutrinos extragalácticos

- 10^{58} neutrinos emitidos por la supernova SN1987A hace 160.000 años
- 450 mil billones atravesaron Kamiokande
- **Detectados 10 neutrinos!!**

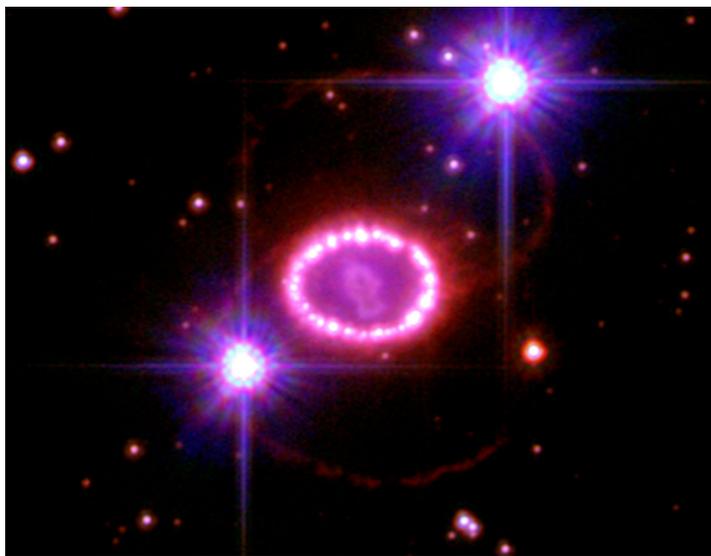


Kamiokande



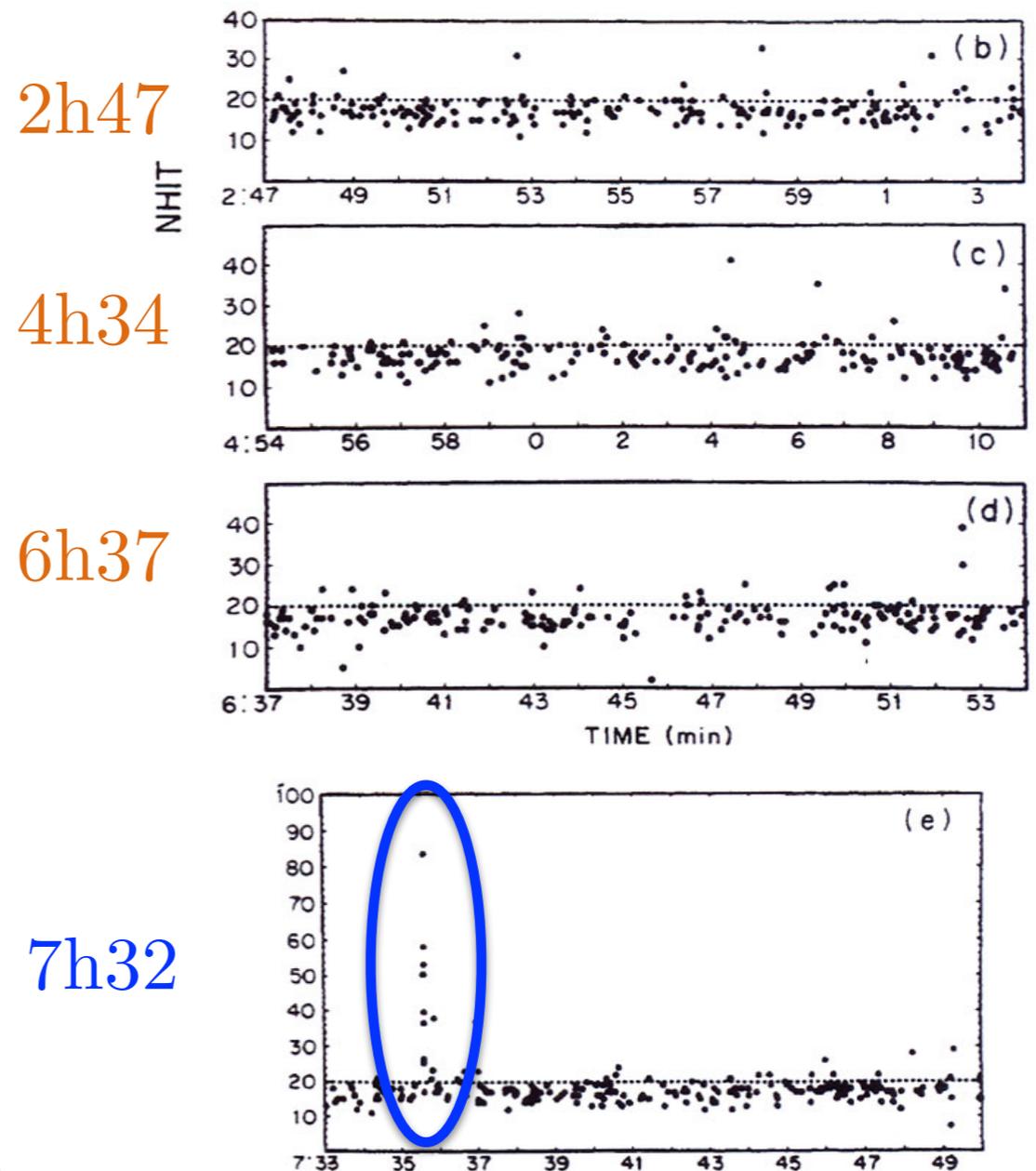
SN1987A: primera detección de neutrinos extragalácticos

- 10^{58} neutrinos emitidos por la supernova SN1987A hace 160.000 años
- 450 mil billones atravesaron Kamiokande
- **Detectados 10 neutrinos!!**



Premio Nobel de Física 2002

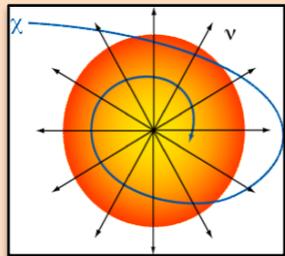
Kamiokande



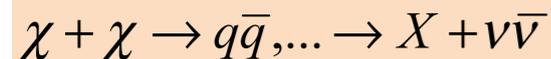
Neutrinos de muy alta energía

Origen de los HE neutrinos

WIMP decay products?



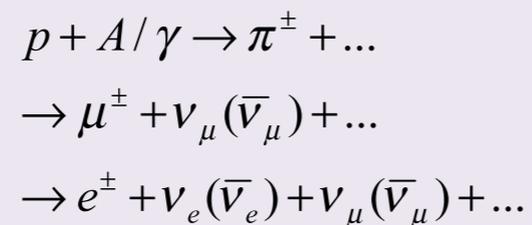
HE neutrinos are the decay sub-products of the **annihilation** of **WIMPs** which may concentrate in astrophysical objects



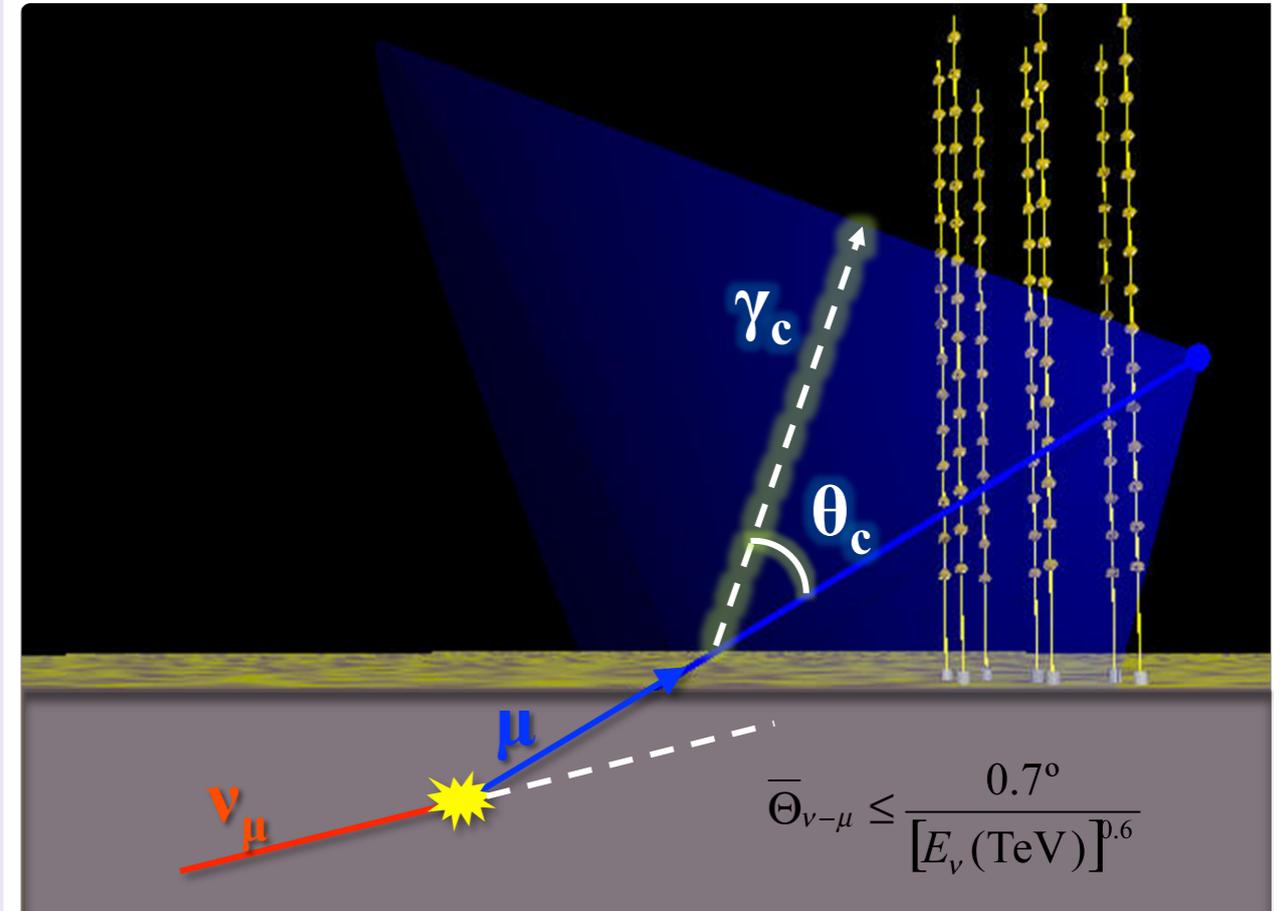
Astrophysical objects



HE neutrinos appear as the sub-product of interactions of **accelerated protons** or nuclei with matter or radiation



Detección de los HE neutrinos

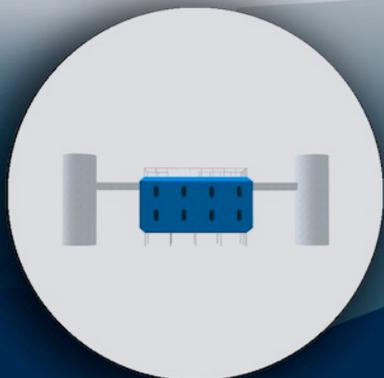


- Los ν_μ son los más adecuados para ser detectados a altas energías (debido a que la sección eficaz y el alcance del muón aumentan con la energía) aunque también se pueden detectar ν_e y ν_τ
- Una red de fotomultiplicadores detecta la luz Cerenkov emitida por los muones que se crean por la interacción de los neutrinos
- Hay que reconstruir el cono Cerenkov para determinar la energía y la dirección del muñón



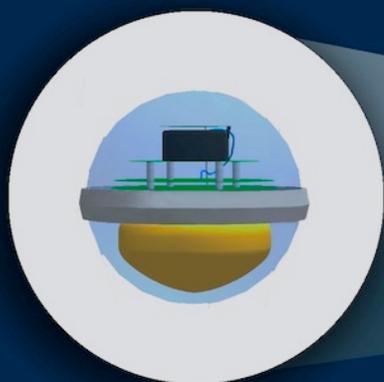
ICECUBE

SOUTH POLE NEUTRINO OBSERVATORY

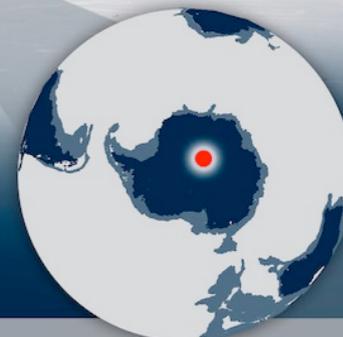


IceCube Laboratory

Data from every sensor is collected here and sent by satellite to the IceCube data warehouse at UW-Madison



Digital Optical Module (DOM)
5,160 DOMs deployed in the ice



Amundsen-Scott South Pole Station, Antarctica
A National Science Foundation-managed research facility

50 m

IceTop

1450 m

2450 m

2820 m

IceCube

bedrock

86 strings

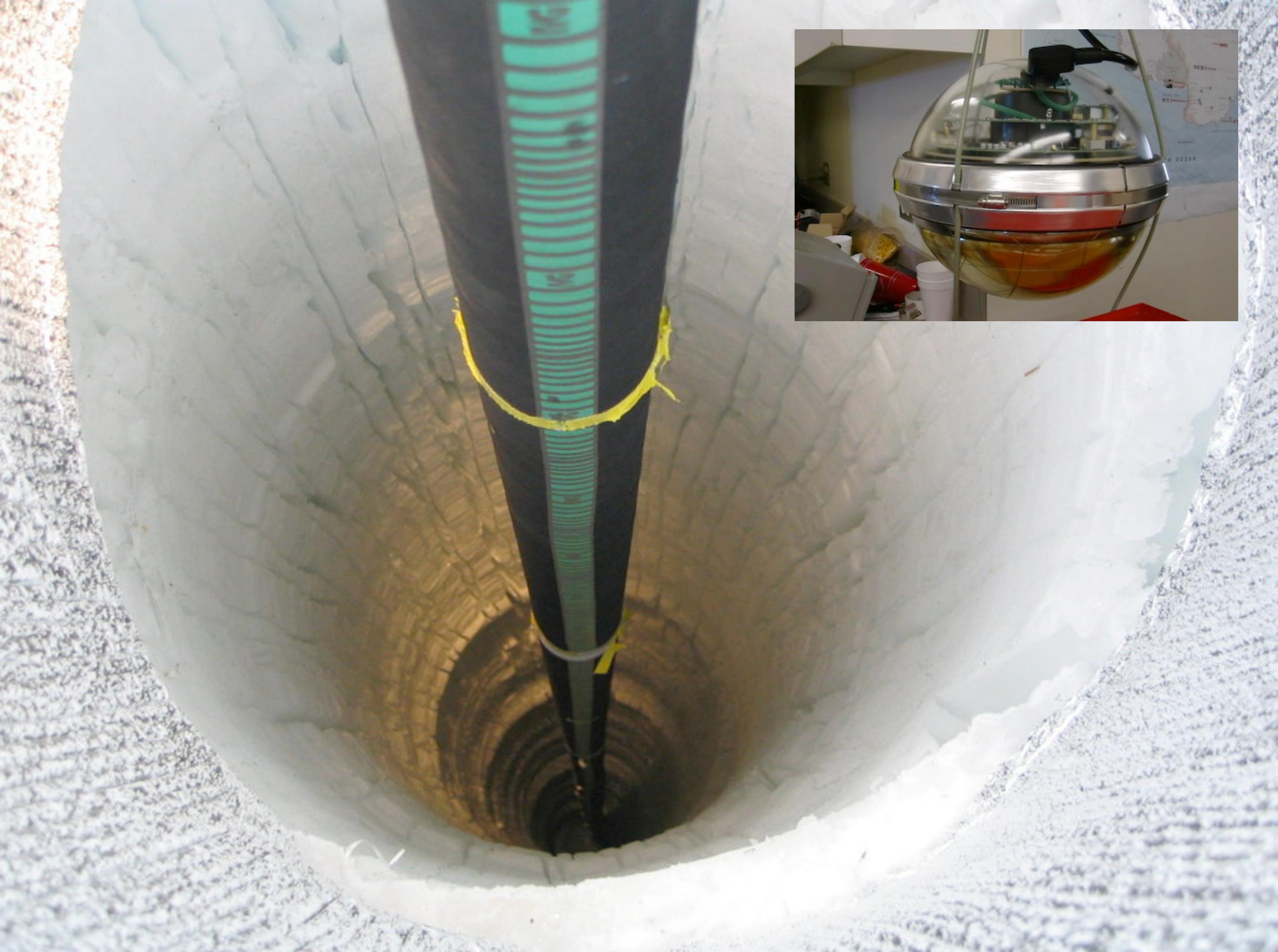
DeepCore



Eiffel Tower
324 m







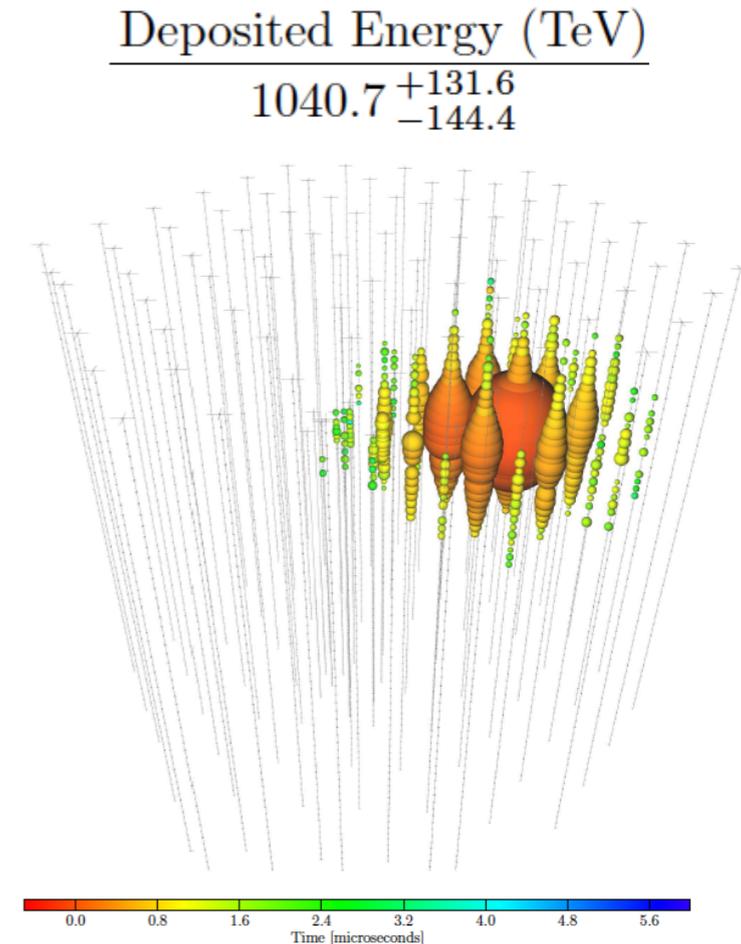
Neutrinos de muy alta energía

- IceCube ha detectado **37 sucesos de muy alta energía** entre mayo 2010 y mayo 2013 (5.7σ sobre el fondo). Es una sólida evidencia de neutrinos astrofísicos procedentes de una fuente cósmica
- No se ha localizado una única fuente puntual de la que provengan (flujo de neutrinos astrofísicos con energías entre 30 y 2000 TeV y direcciones de llegada isotrópicas)
- Se necesitan más datos para entender la fuentes de este flujo astrofísico
- La toma de datos continúa



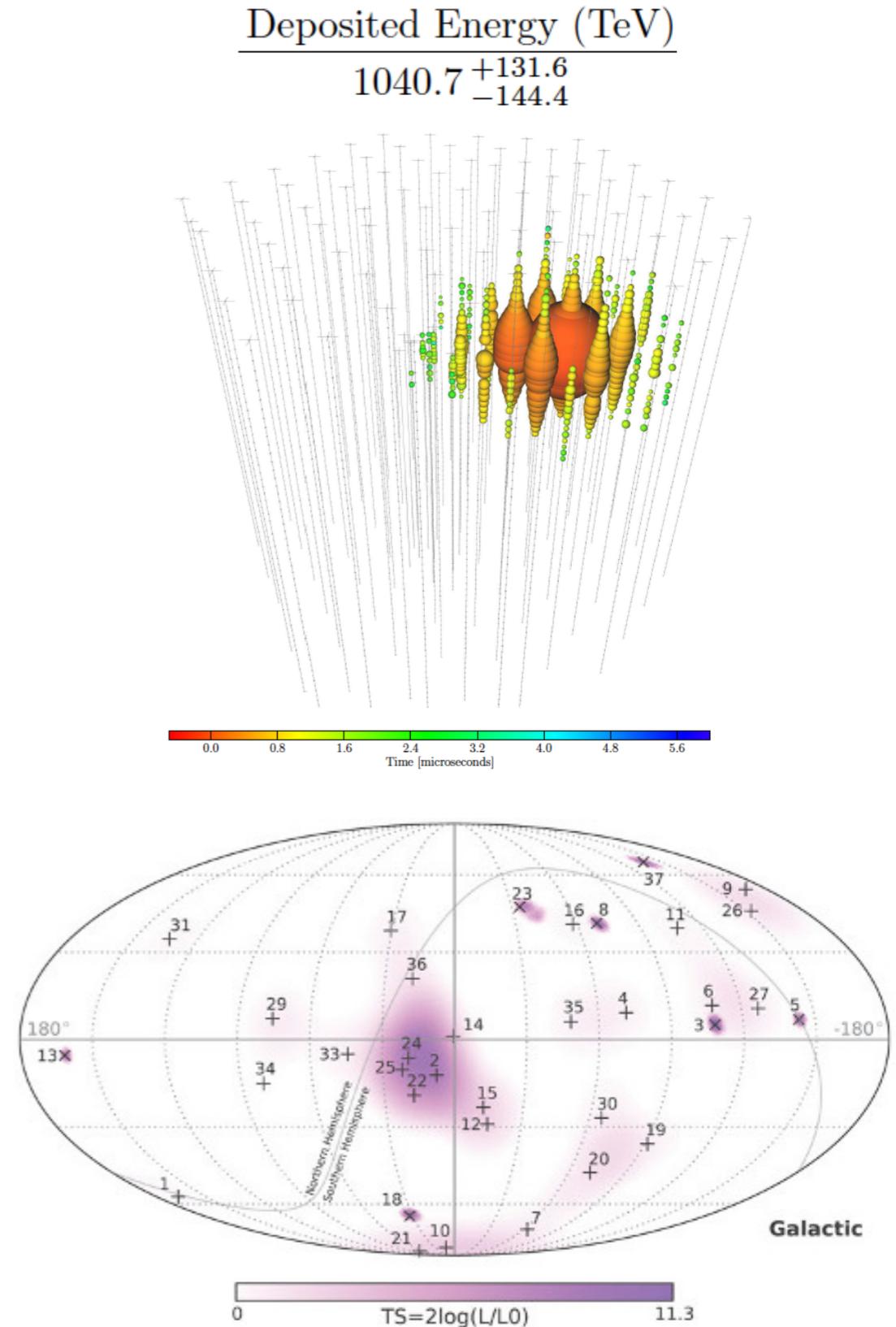
Neutrinos de muy alta energía

- IceCube ha detectado **37 sucesos de muy alta energía** entre mayo 2010 y mayo 2013 (5.7σ sobre el fondo). Es una sólida evidencia de neutrinos astrofísicos procedentes de una fuente cósmica
- No se ha localizado una única fuente puntual de la que provengan (flujo de neutrinos astrofísicos con energías entre 30 y 2000 TeV y direcciones de llegada isotrópicas)
- Se necesitan más datos para entender la fuentes de este flujo astrofísico
- La toma de datos continúa

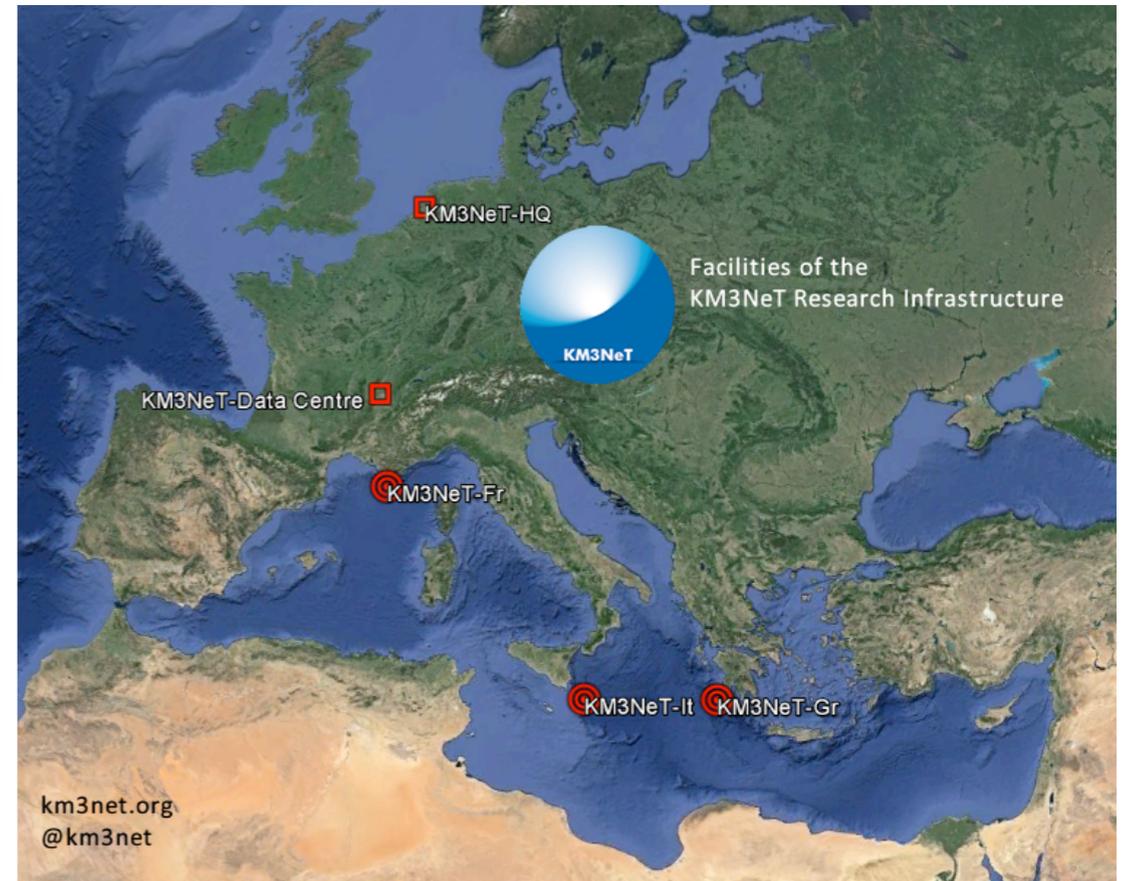
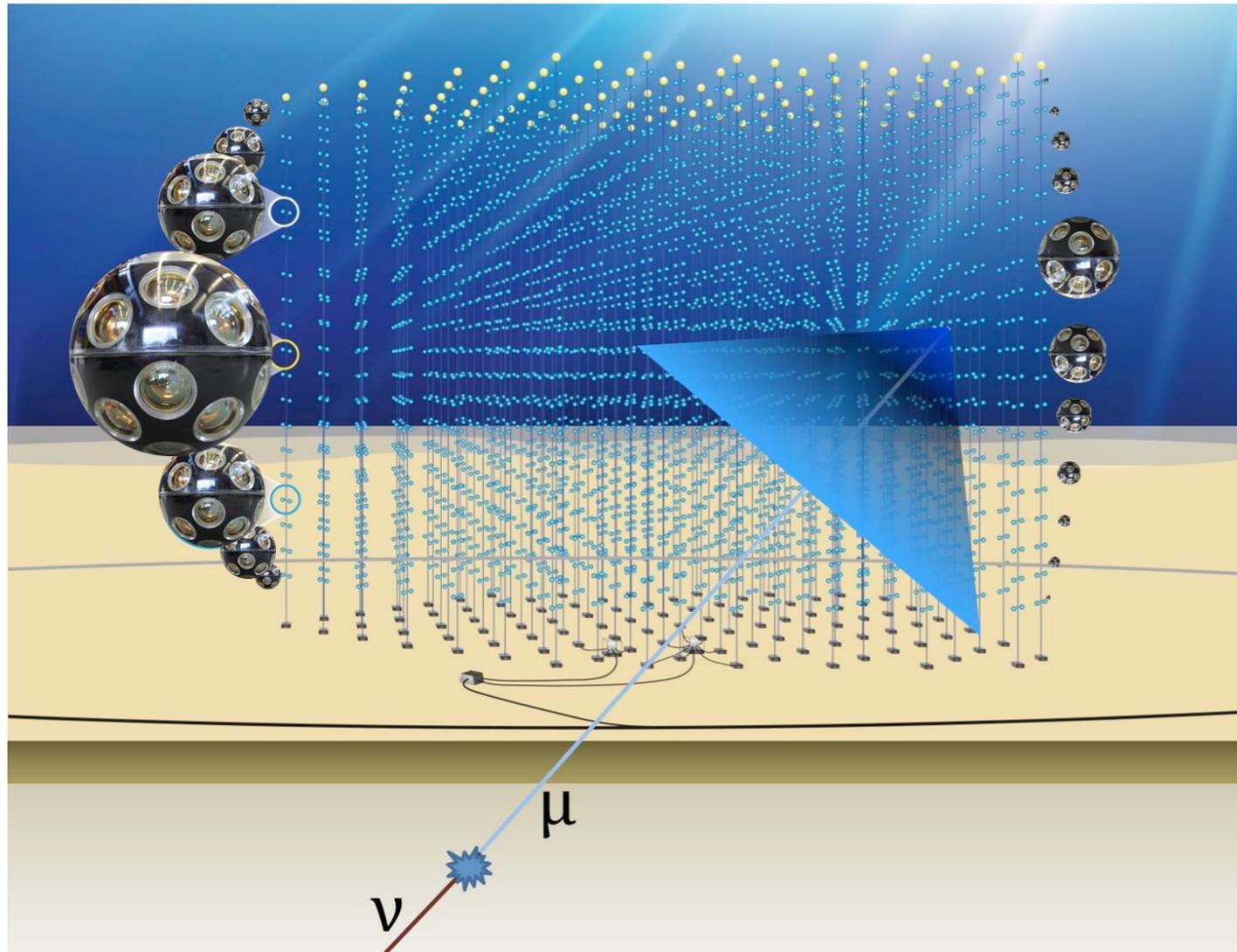


Neutrinos de muy alta energía

- IceCube ha detectado **37 sucesos de muy alta energía** entre mayo 2010 y mayo 2013 (5.7σ sobre el fondo). Es una sólida evidencia de neutrinos astrofísicos procedentes de una fuente cósmica
- No se ha localizado una única fuente puntual de la que provengan (flujo de neutrinos astrofísicos con energías entre 30 y 2000 TeV y direcciones de llegada isotrópicas)
- Se necesitan más datos para entender la fuentes de este flujo astrofísico
- La toma de datos continúa

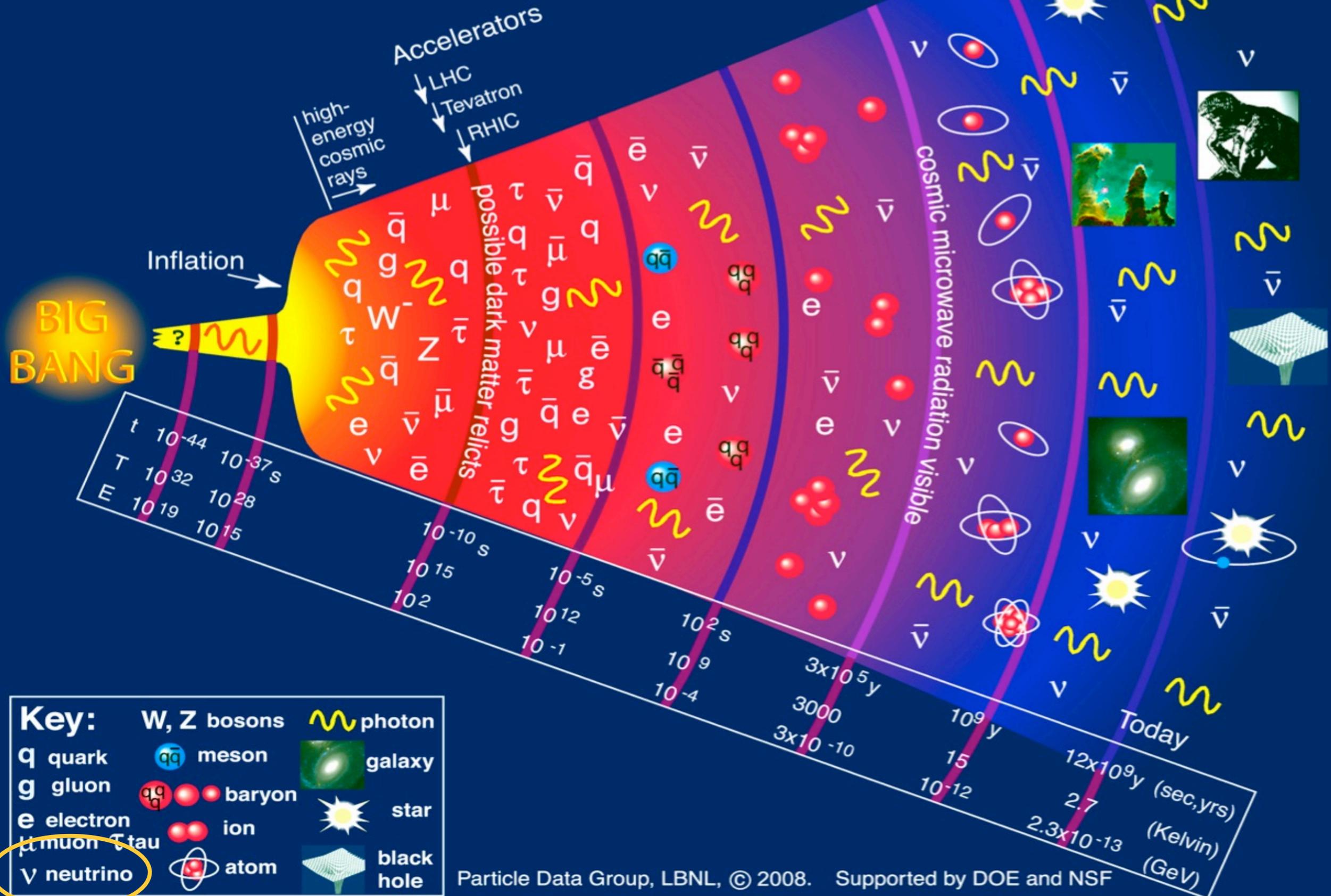


Otras propuestas en Europa

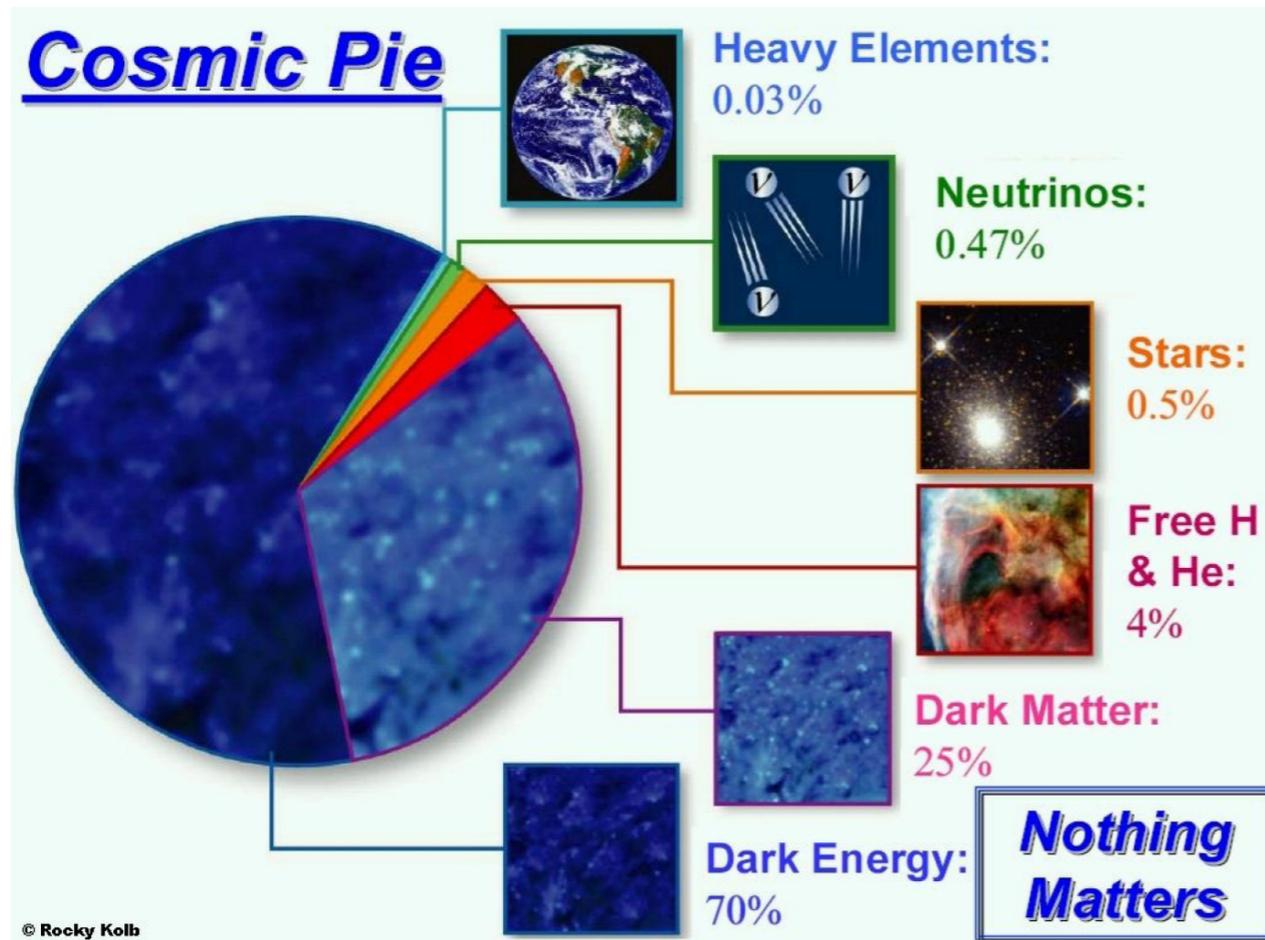


- **KM3NeT:** un telescopio de neutrinos de 1 km^3 en el mar Mediterráneo
- 3 infraestructuras ubicadas en Toulon (Francia), Sicilia (Italia) y Pylos (Grecia)
- ANTARES ha sido su predecesor: 12 líneas con 885 PMTs con excelente resolución angular. Continúa tomando datos hasta finales de 2016

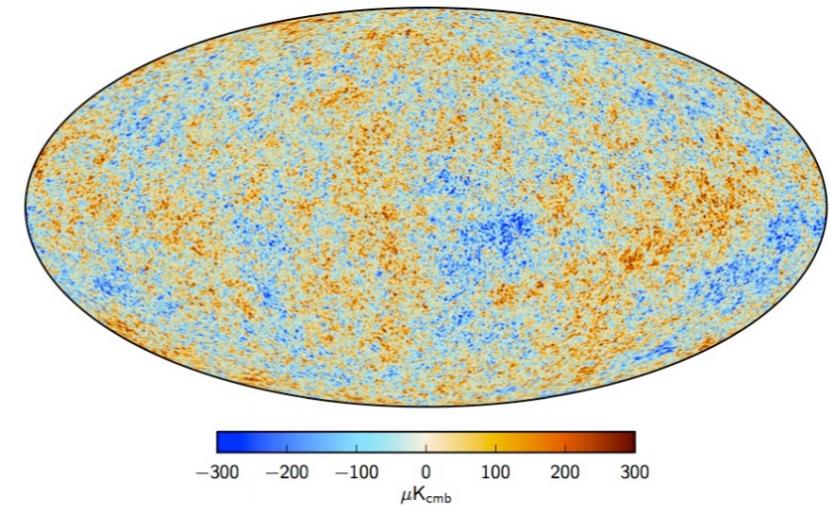
Historia del Universo



Los neutrinos del Big Bang

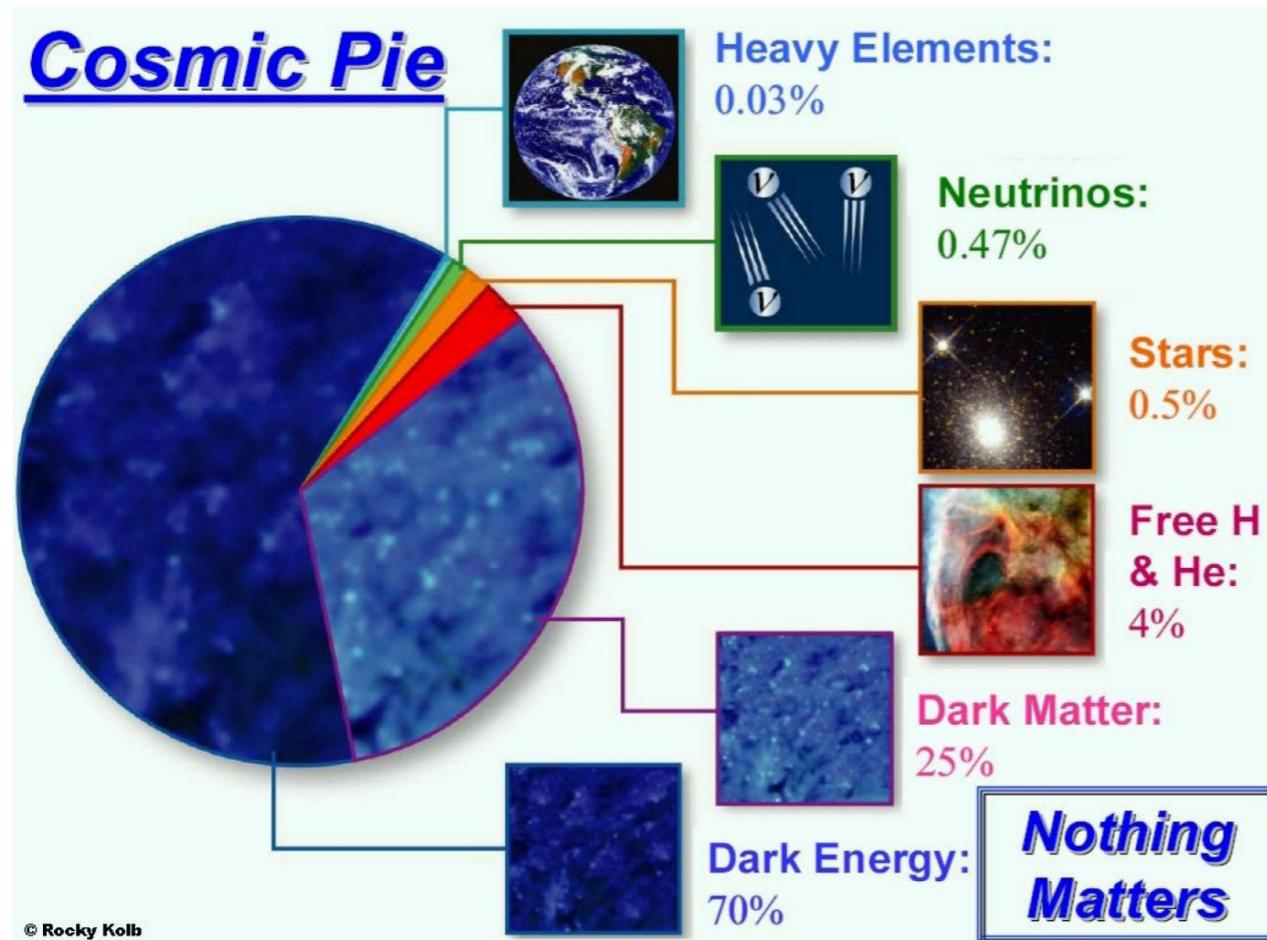


CMB visto por PLANCK

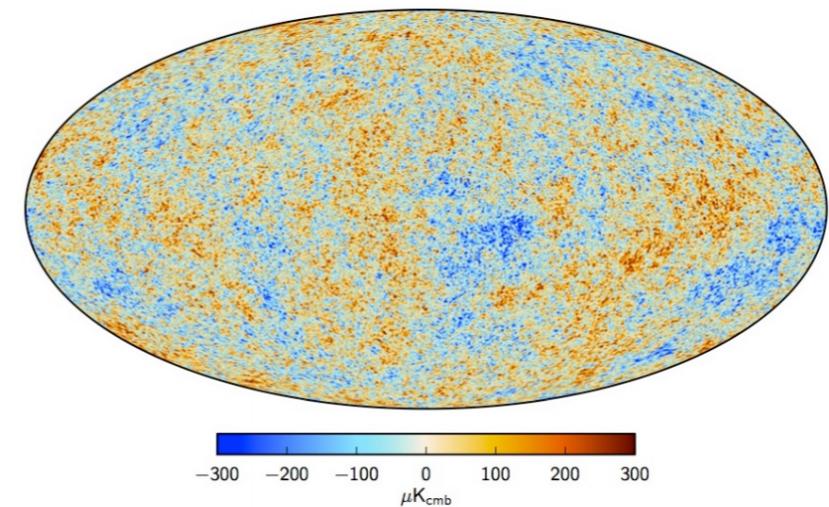


- Se prevé un fondo cósmico de neutrinos (~ 330 por cm^3)
- Todavía no detectados de manera directa...

Los neutrinos del Big Bang

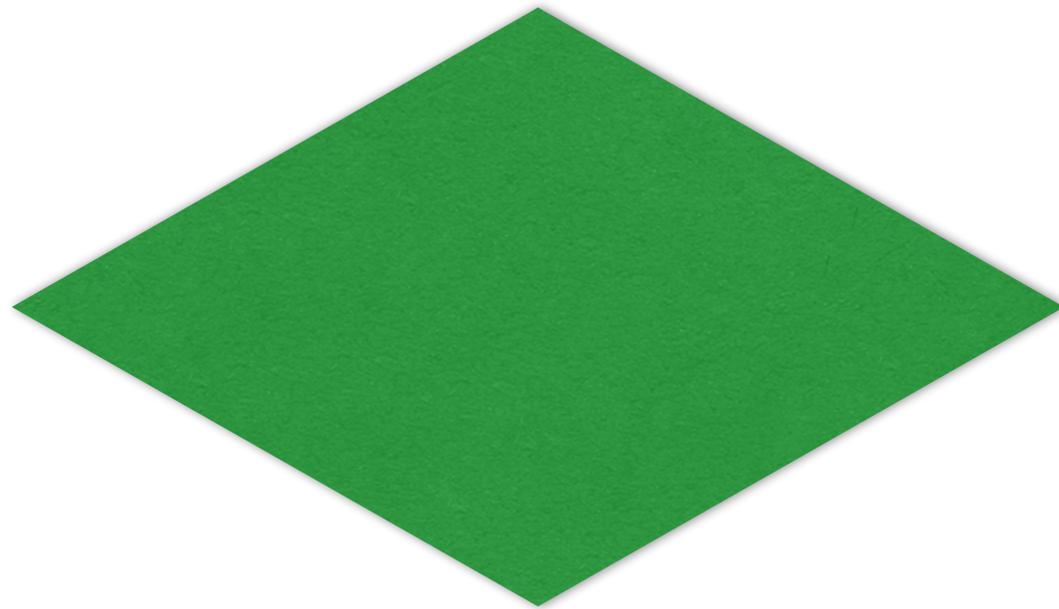


CMB visto por PLANCK



- Se prevé un fondo cósmico de neutrinos (~ 330 por cm^3)
- Todavía no detectados de manera directa...

Los neutrinos estándar no pueden explicar la materia oscura del Universo pero podrían ser la clave para entender la asimetría entre materia y antimateria

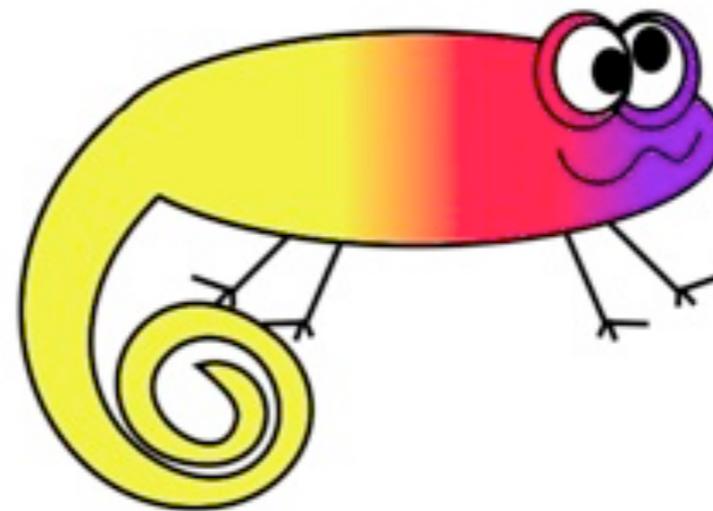
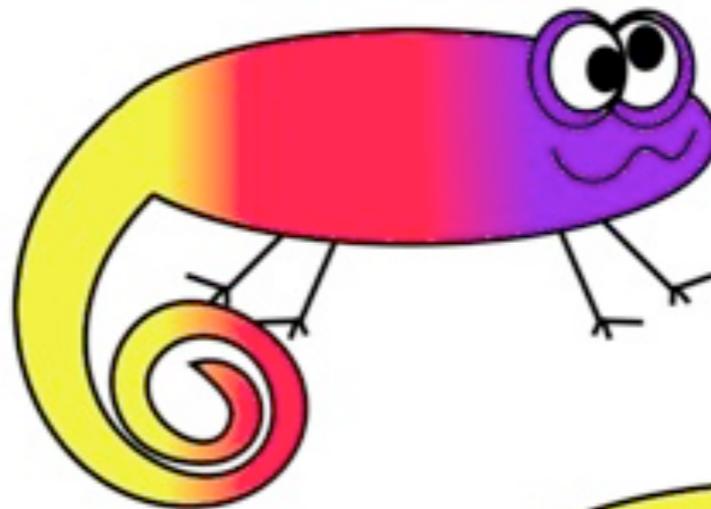
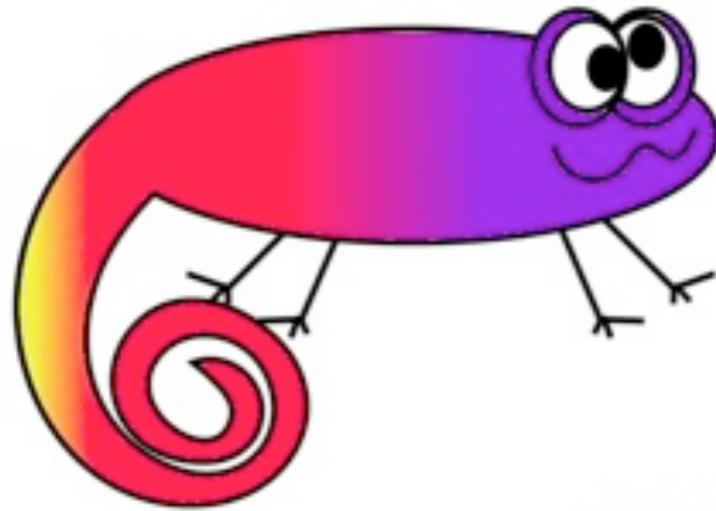


Conclusiones

Conclusiones finales

- Los neutrinos son **especiales** dentro del conjunto de partículas elementales
 - ▶ No se sabe cuál es el **valor de su masa** pero son mucho más ligeros que el resto de partículas
 - ▶ **Interaccionan muy débilmente** con la materia
 - ▶ **Mezclan sus sabores**
 - ▶ Podrían ser **su propia antipartícula**
- Los neutrinos son partículas **muy abundantes** en el Universo
 - ▶ Nos proporcionan información sobre sucesos que ocurrieron y ocurren en el Cosmos
- Los neutrinos podrían explicar el **exceso de materia en el Universo**

GRACIAS



ines.gil@ciemat.es
ines.gil.botella@cern.ch

“Everyone is a genius. But if you judge a fish by its ability to climb a tree, it will live its whole life believing that it is stupid.”

– Albert Einstein