

IFIC summer school  
2016

# Oscilaciones de Neutrinos

---

*Anselmo Cervera Villanueva*  
**IFIC (UV- CSIC)**  
**Valencia**



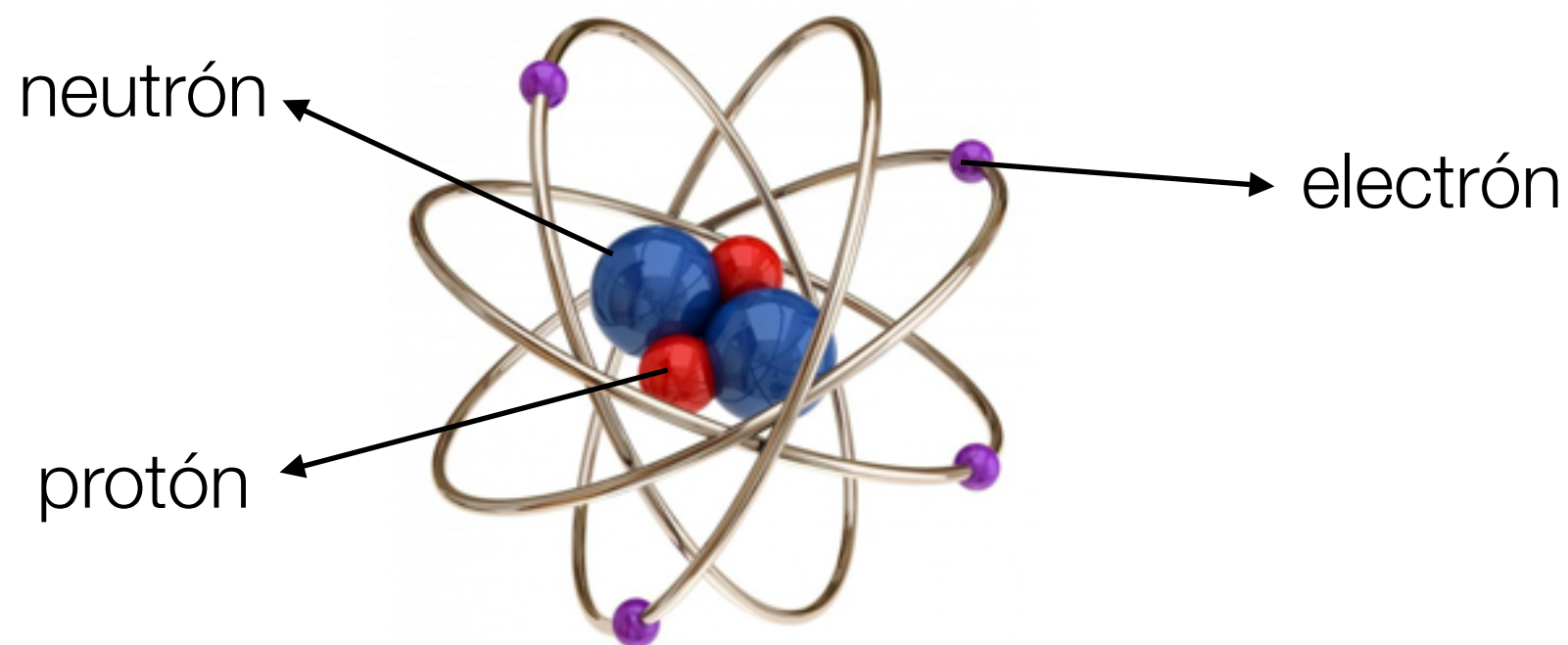
# Nuestro Universo

---

- Nosotros y todo lo que nos rodea está hecho de pequeñas partículas



- Que se agrupan para formar átomos





# Nuestro Universo

- Estos átomos forman:



Seres vivos



Edificios y ciudades



Nuestro planeta



# Nuestro Universo

---

- Incluso vosotros estáis hechos de esas partículas

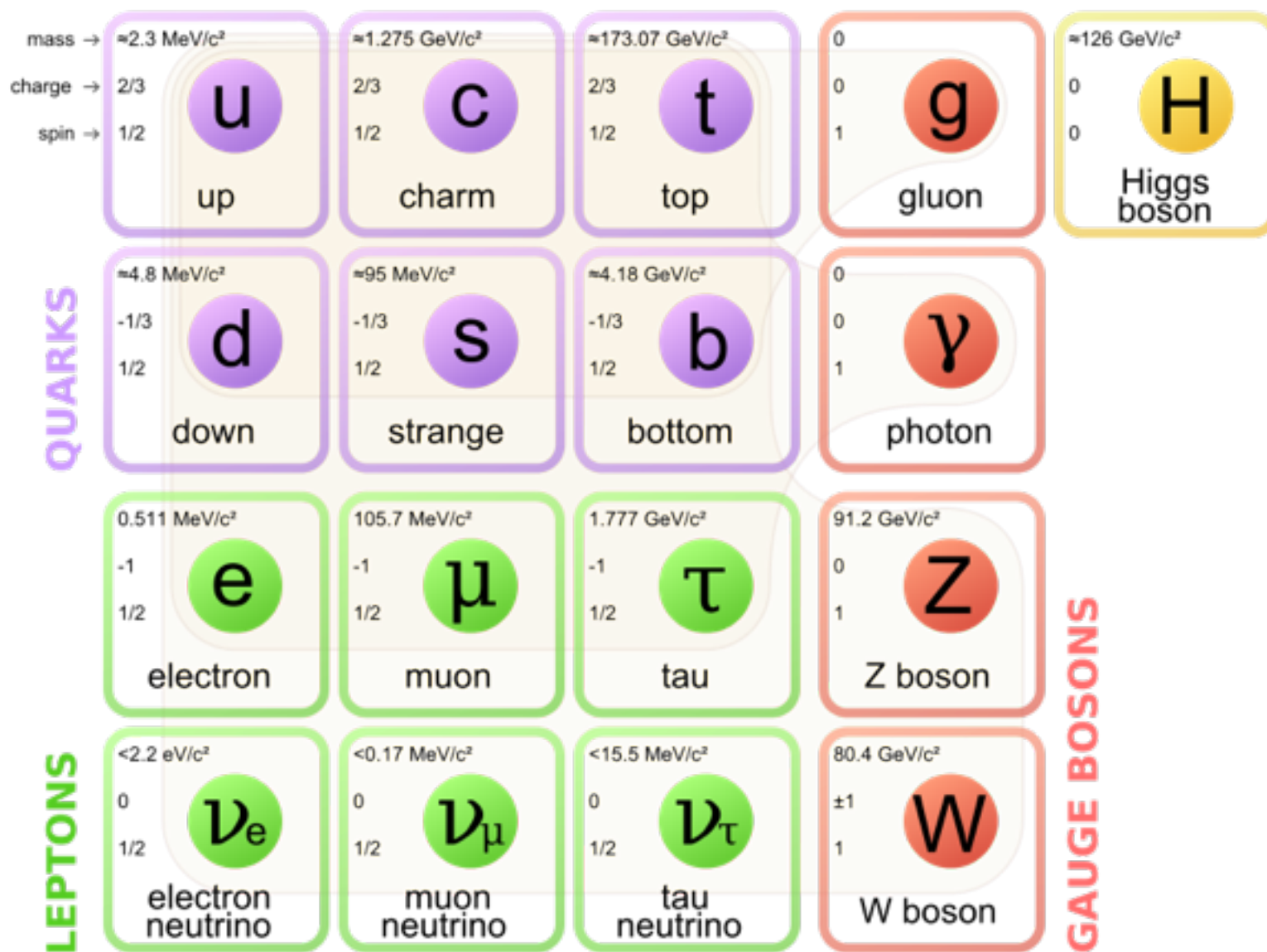


- Pero, ¿está todo el universo formado por protones, neutrones y electrones ?



# El universo de Pich

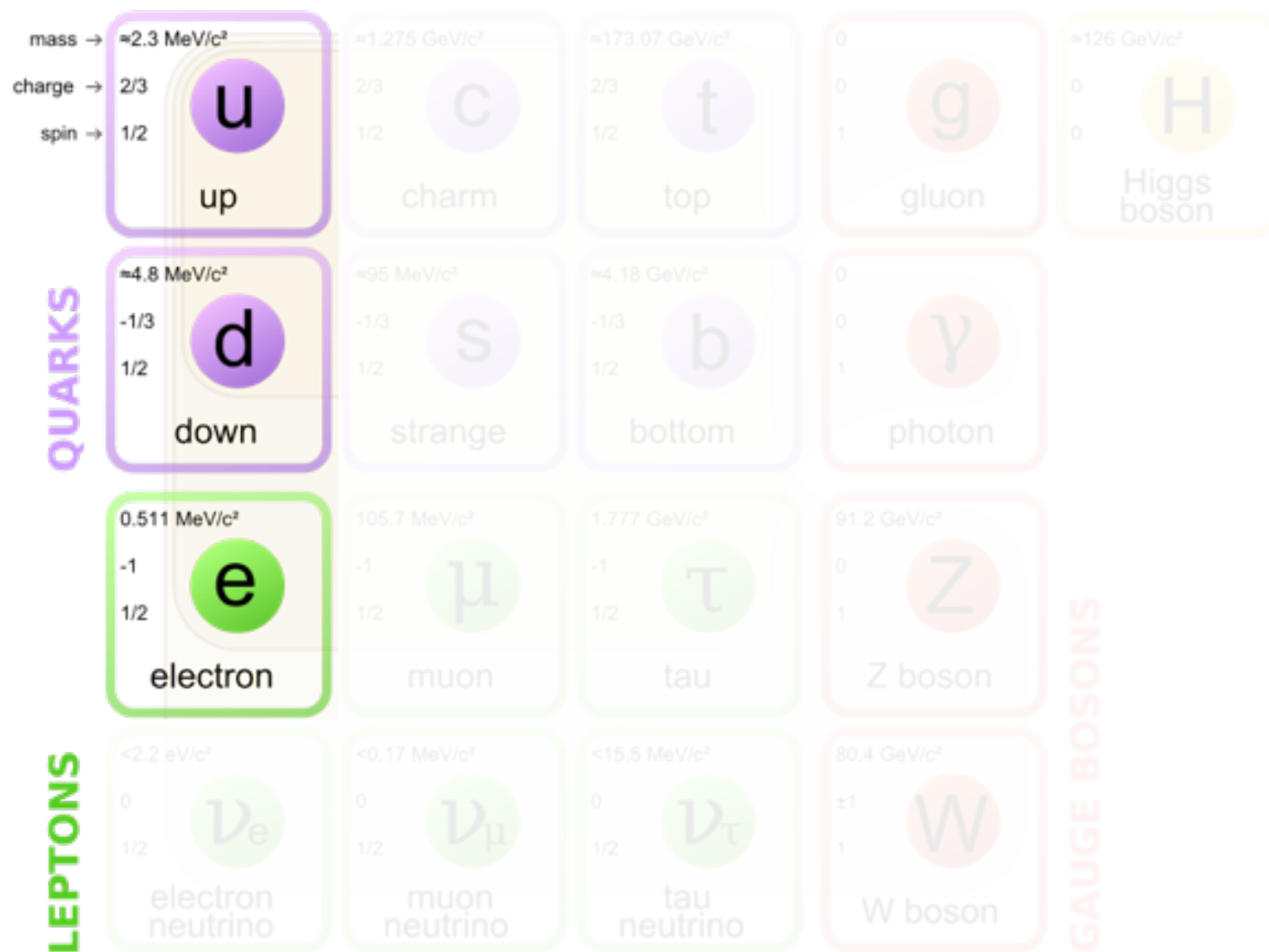
- Estas son las partículas fundamentales en el modelo standard





# El universo de Pich

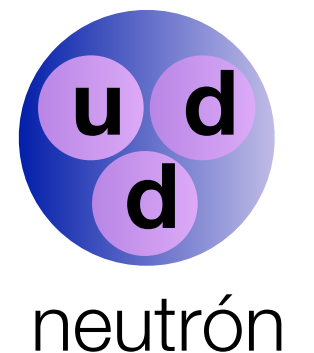
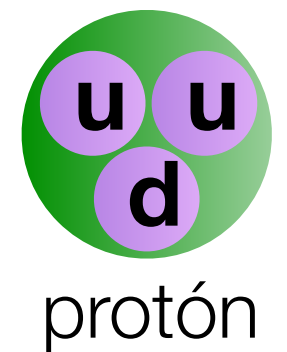
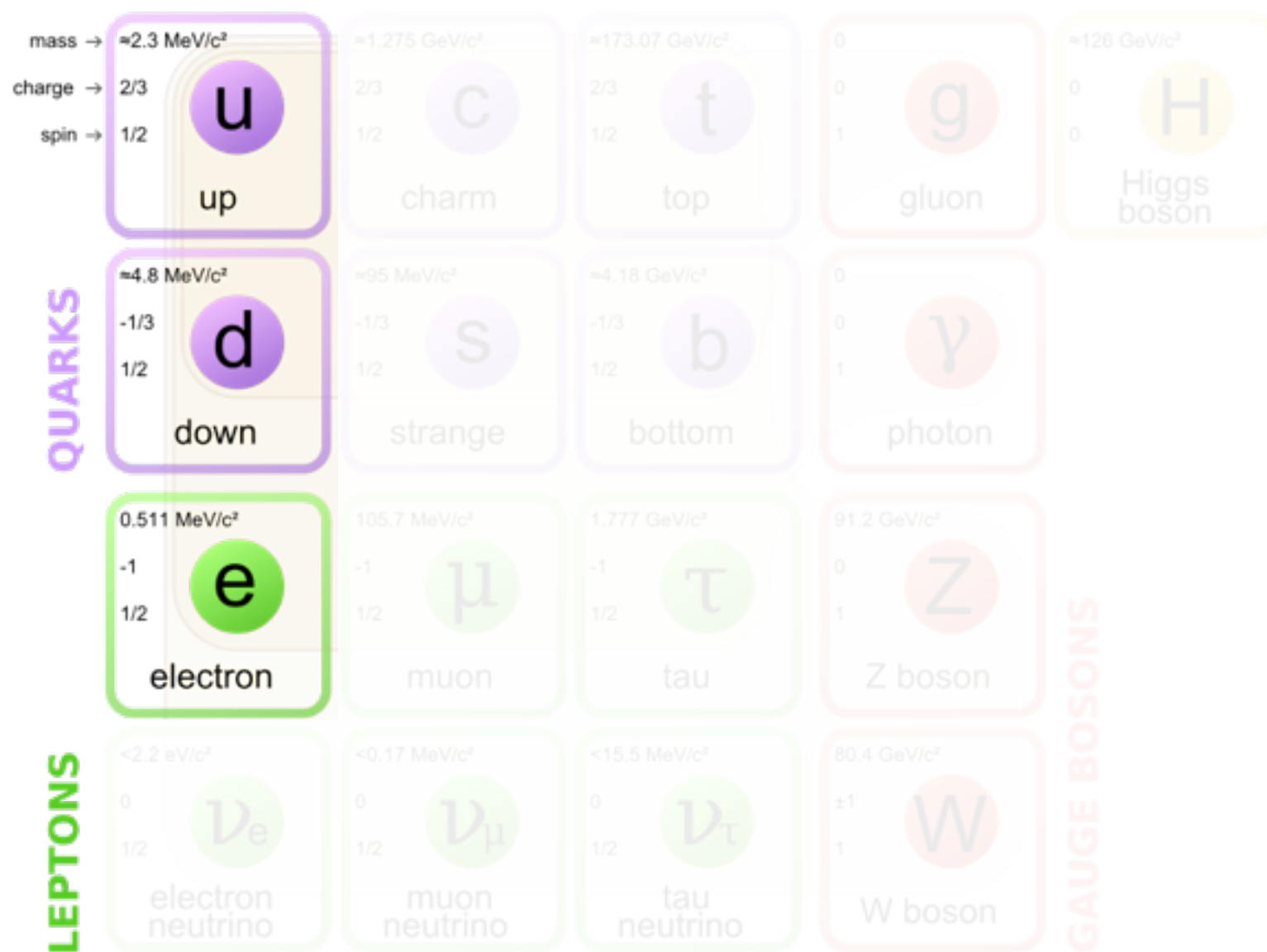
- Estas son las partículas fundamentales en el modelo standard





# El universo de Pich

- Estas son las partículas fundamentales en el modelo standard



electrón



# El anti-Universo

---

- Cada partícula tiene asociada una antipartícula

partículas

**u**

**e<sup>-</sup>**

**$\nu_e$**

...

anti-partículas

**$\bar{u}$**

**e<sup>+</sup>**

**$\bar{\nu}_e$**

...

también para partículas compuestas

**p<sup>+</sup>**

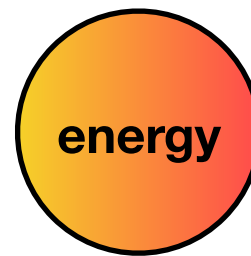
**p<sup>-</sup>**



# EL Big Bang

---

- A partir de una enorme cantidad de energía (concentrada) se produjeron iguales cantidades de materia y de antimateria

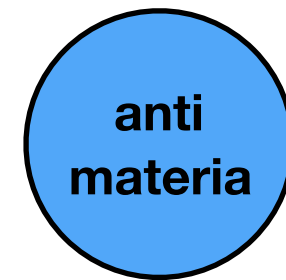
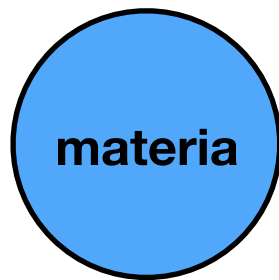




# EL Big Bang

---

- A partir de una enorme cantidad de energía (concentrada) se produjeron iguales cantidades de materia y de antimateria

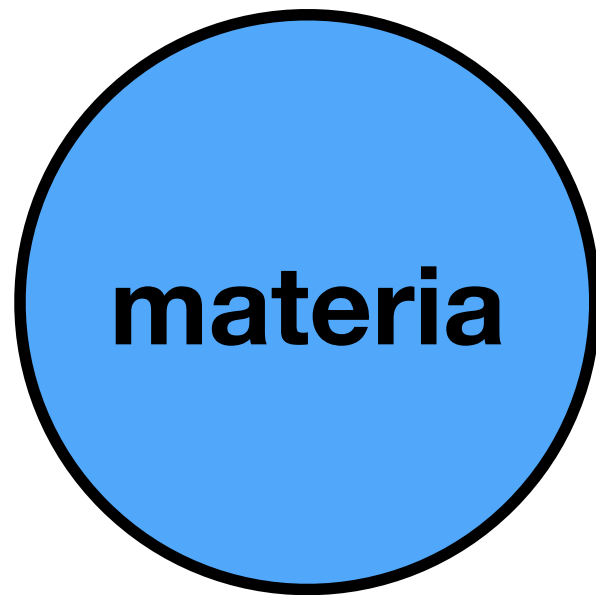




# EL Big Bang

---

- A partir de una enorme cantidad de energía (concentrada) se produjeron iguales cantidades de materia y de antimateria



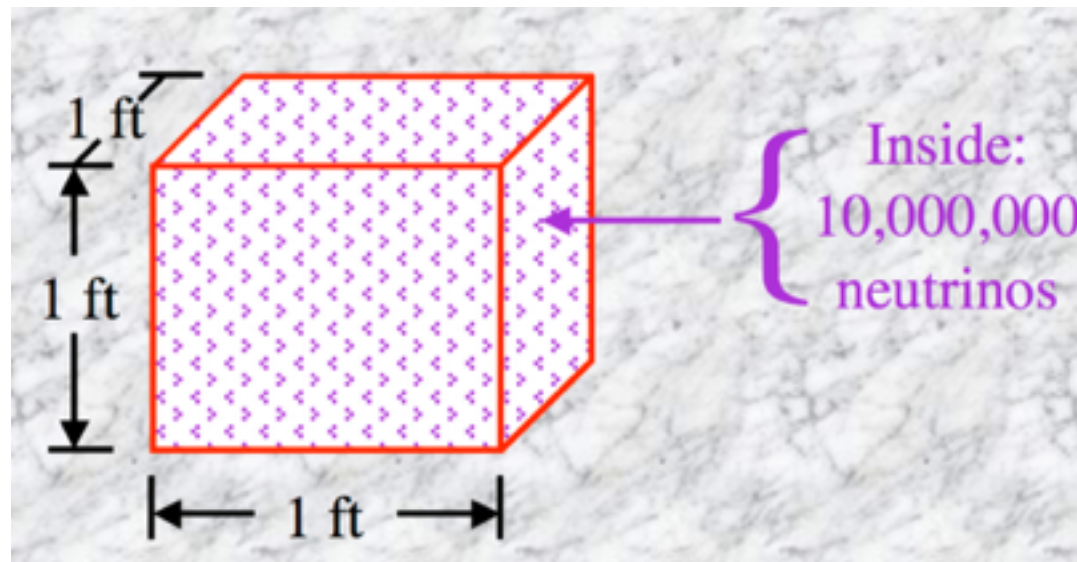
- Pero por alguna razón la anti-materia fue aniquilada. ¿Por qué?
- Los neutrinos podrían tener la respuesta: ~~CP~~



# Neutrinos por todas partes

---

- Por cada proton, neutron o electron el universo contiene 1000 millones de neutrinos que provienen del Big Bang

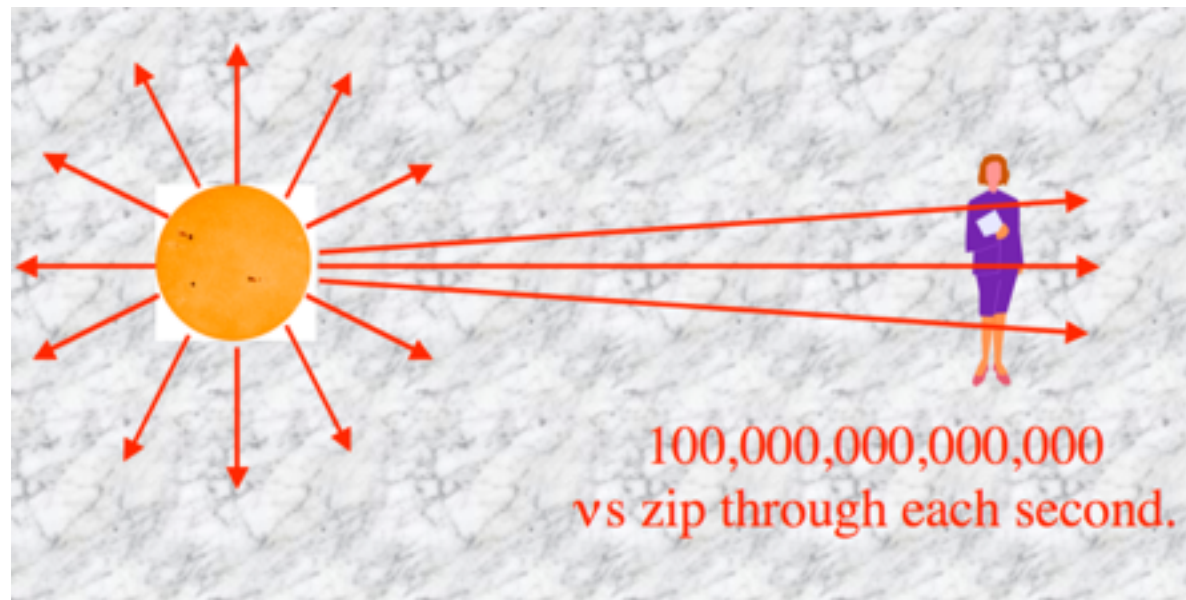
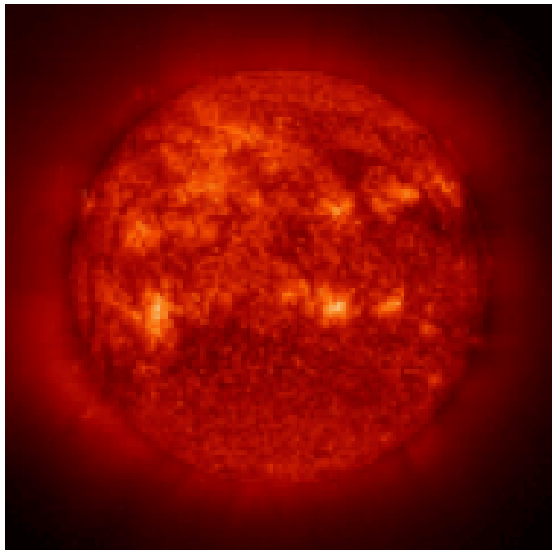


**Para entender nuestro Universo  
tenemos que entender a los Neutrinos**



# ¿ Son peligrosos ?

- El interior del sol funciona como un gran reactor nuclear
- Como veremos más adelante, las reacciones nucleares producen neutrinos



- Deberíamos estar preocupados, ¿ no ?



# La timidez de los neutrinos

---

- Los neutrinos son muy tímidos y prácticamente no interaccionan con nada ni con nadie
- Un neutrino solar tiene que cruzarse con 10,000,000,000,000,000,000 personas antes de interaccionar
- Por ello no fueron **descubiertos hasta 1953**, pese a ser las partículas más abundantes después del fotón (las partículas de luz)

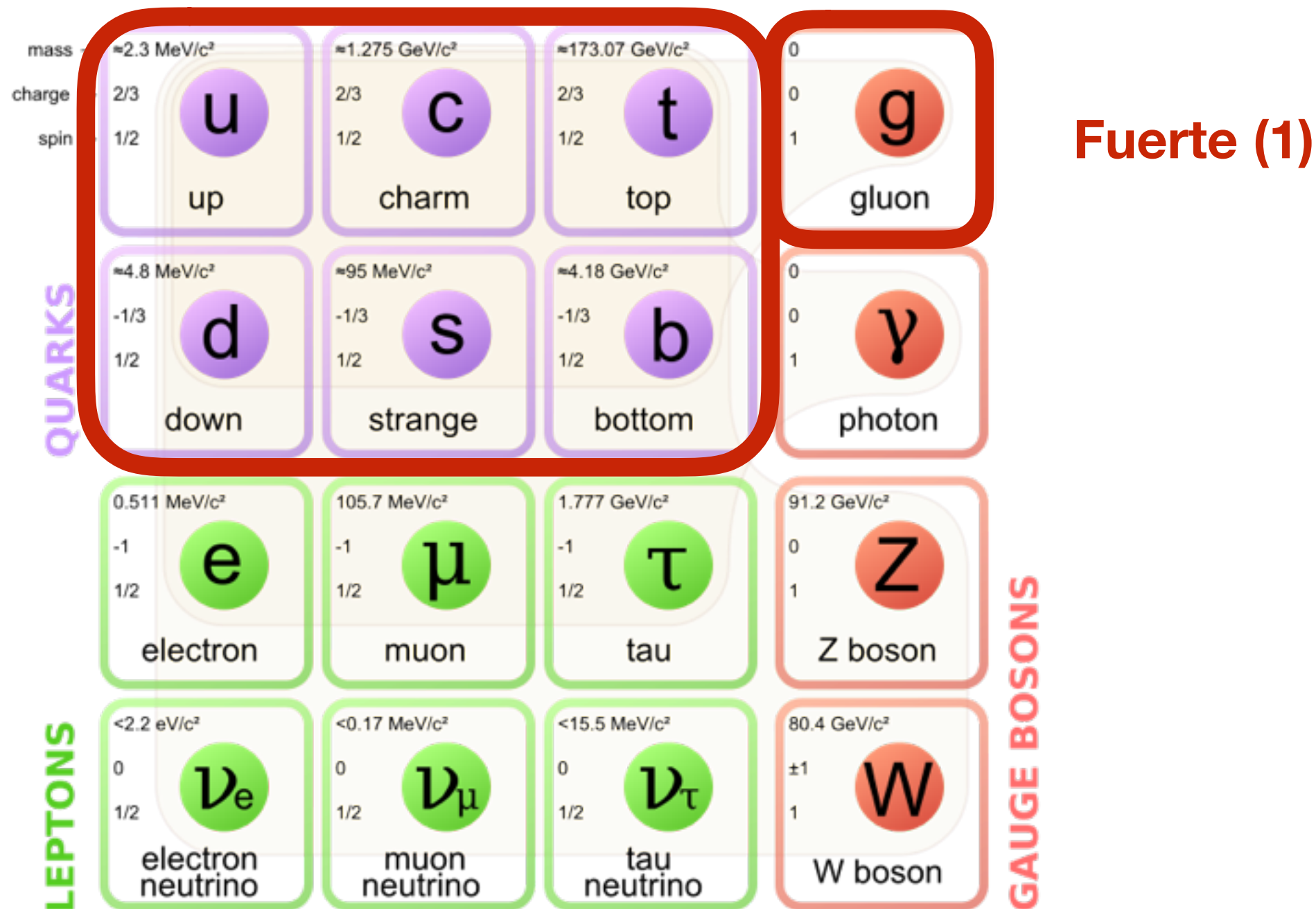


# Las cuatro fuerzas fundamentales

QUARKS	mass → $\approx 2.3 \text{ MeV}/c^2$ charge → $2/3$ spin → $1/2$  up	mass → $\approx 1.275 \text{ GeV}/c^2$ charge → $2/3$ spin → $1/2$  charm	mass → $\approx 173.07 \text{ GeV}/c^2$ charge → $2/3$ spin → $1/2$  top	 gluon
	mass → $\approx 4.8 \text{ MeV}/c^2$ charge → $-1/3$ spin → $1/2$  down	mass → $\approx 95 \text{ MeV}/c^2$ charge → $-1/3$ spin → $1/2$  strange	mass → $\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$ charge → $-1/3$ spin → $1/2$  bottom	 photon
	 electron	 muon	 tau	 Z boson
LEPTONS	mass → $< 2.2 \text{ eV}/c^2$ charge → $0$ spin → $1/2$  electron neutrino	mass → $< 0.17 \text{ MeV}/c^2$ charge → $0$ spin → $1/2$  muon neutrino	mass → $< 15.5 \text{ MeV}/c^2$ charge → $0$ spin → $1/2$  tau neutrino	 W boson
				GAUGE BOSONS



# Las cuatro fuerzas fundamentales





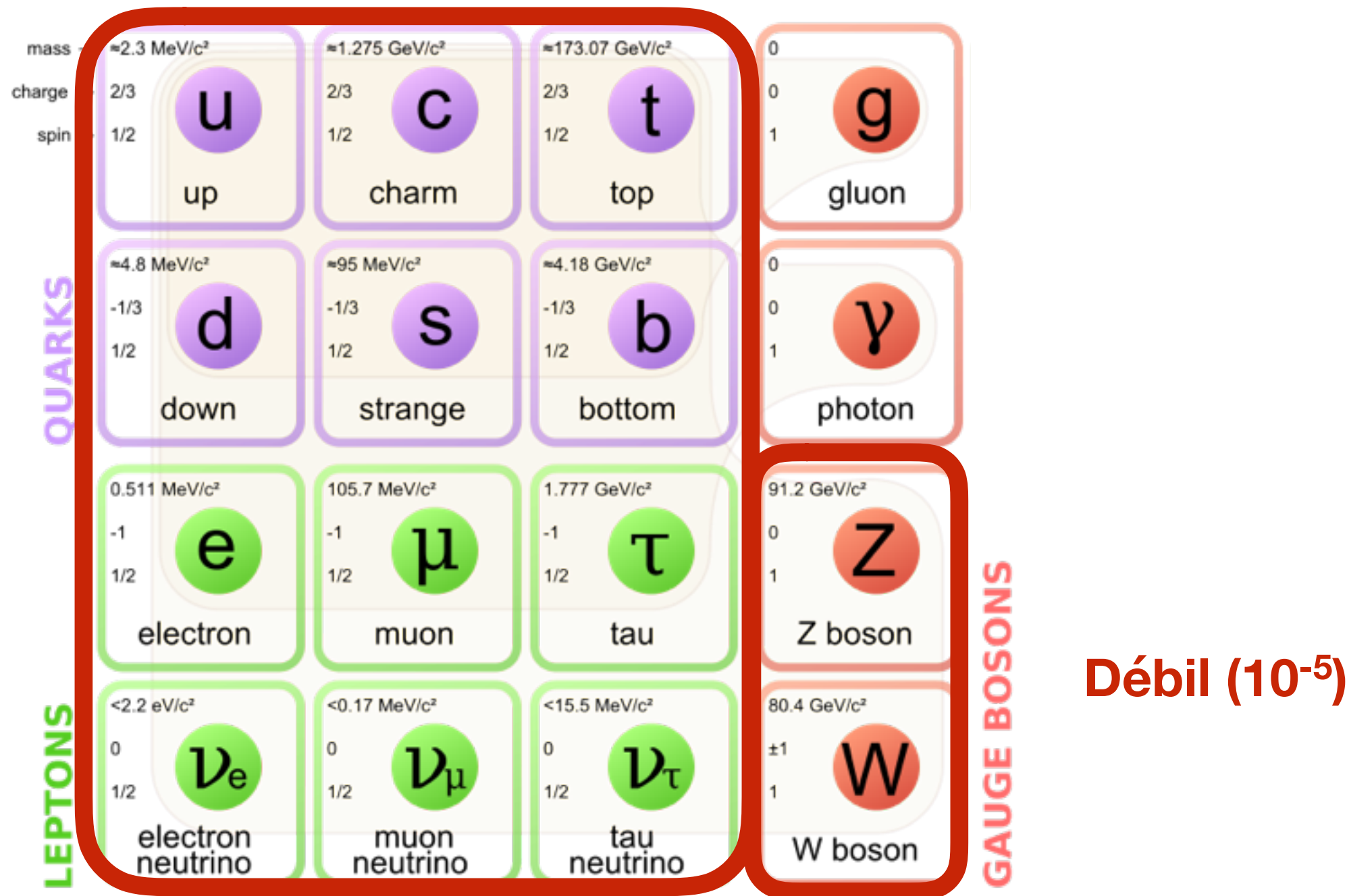
# Las cuatro fuerzas fundamentales

mass	$\approx 2.3 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.275 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.07 \text{ GeV}/c^2$	0
charge	$2/3$	$2/3$	$2/3$	0
spin	$1/2$	$1/2$	$1/2$	1
	<b>u</b>	<b>c</b>	<b>t</b>	<b>g</b>
	up	charm	top	gluon
	$\approx 4.8 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 95 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$	0
	$-1/3$	$-1/3$	$-1/3$	0
	$1/2$	$1/2$	$1/2$	1
	<b>d</b>	<b>s</b>	<b>b</b>	<b><math>\gamma</math></b>
	down	strange	bottom	photon
	$0.511 \text{ MeV}/c^2$	$105.7 \text{ MeV}/c^2$	$1.777 \text{ GeV}/c^2$	$91.2 \text{ GeV}/c^2$
	-1	-1	-1	0
	$1/2$	$1/2$	$1/2$	1
	<b>e</b>	<b><math>\mu</math></b>	<b><math>\tau</math></b>	<b>Z</b>
	electron	muon	tau	Z boson
	$< 2.2 \text{ eV}/c^2$	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$	$< 15.5 \text{ MeV}/c^2$	$80.4 \text{ GeV}/c^2$
	0	0	0	$\pm 1$
	$1/2$	$1/2$	$1/2$	1
	<b><math>\nu_e</math></b>	<b><math>\nu_\mu</math></b>	<b><math>\nu_\tau</math></b>	<b>W</b>
	electron neutrino	muon neutrino	tau neutrino	W boson

**Electromagnética ( $10^{-3}$ )**



# Las cuatro fuerzas fundamentales

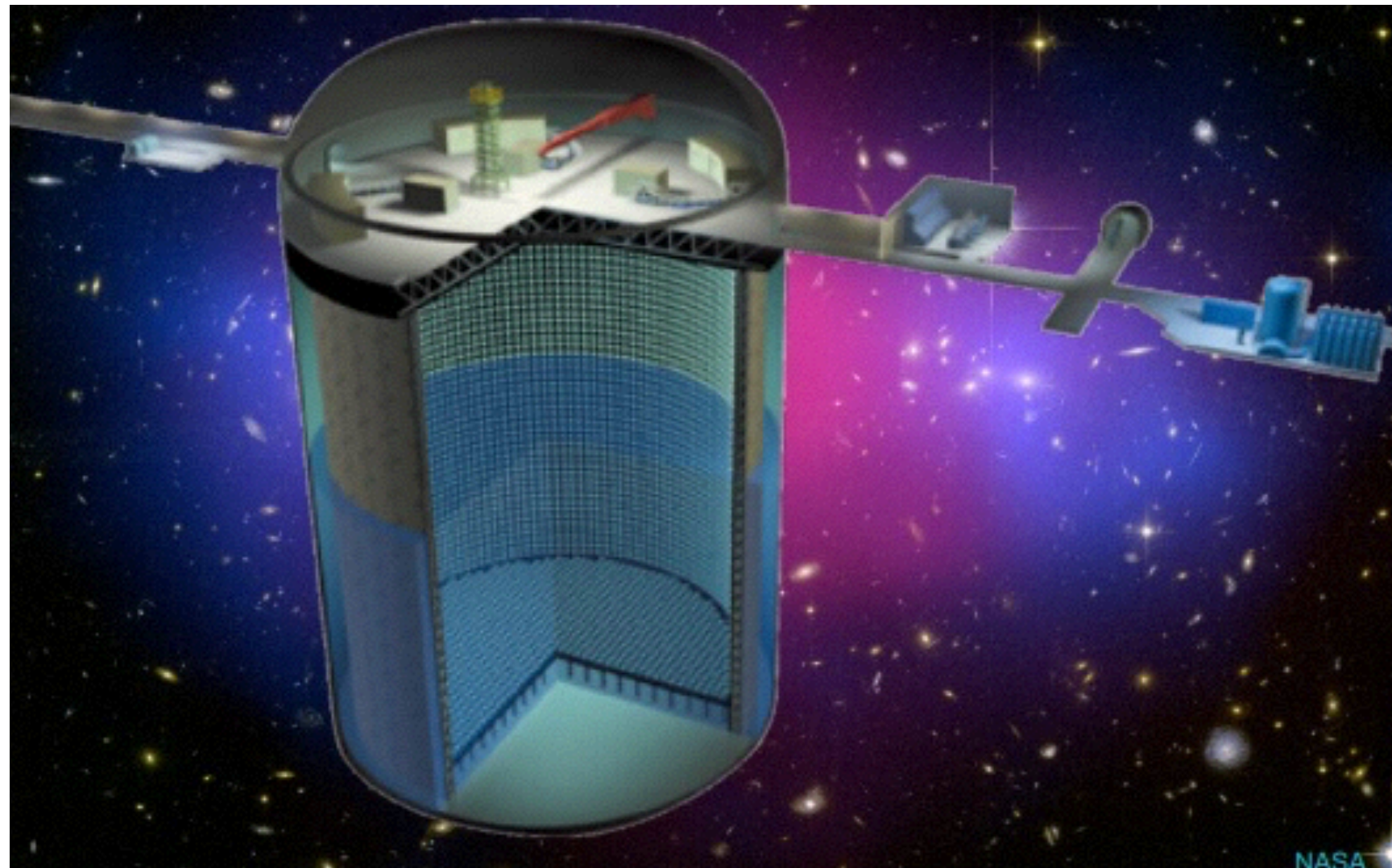


- Neutrinos solo sienten la fuerza débil (y la gravitatoria, irrelevante para partículas)

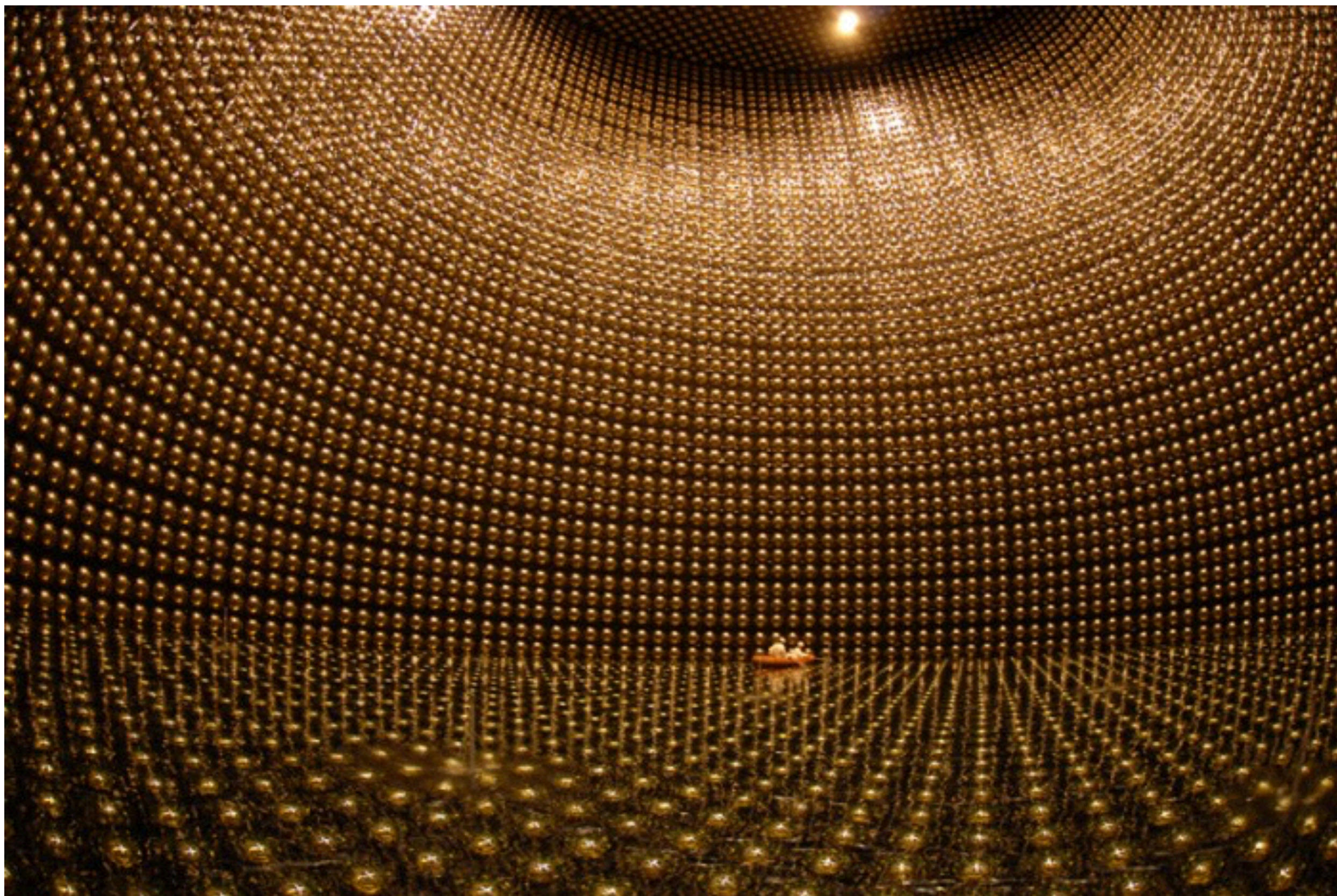


# Super-Kamiokande

- Un gran tanque de agua de 50 metros de altura, situado bajo una montaña

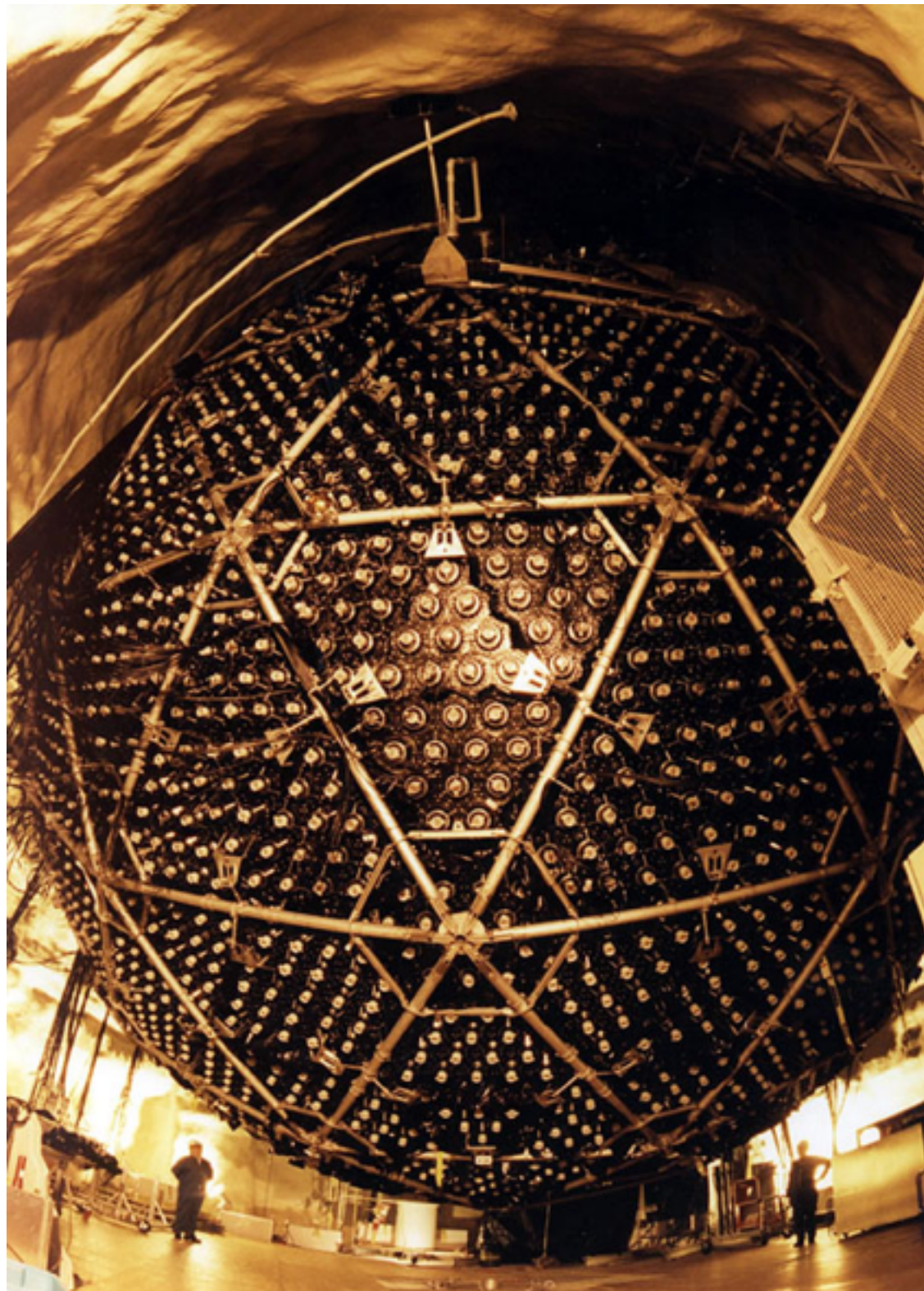




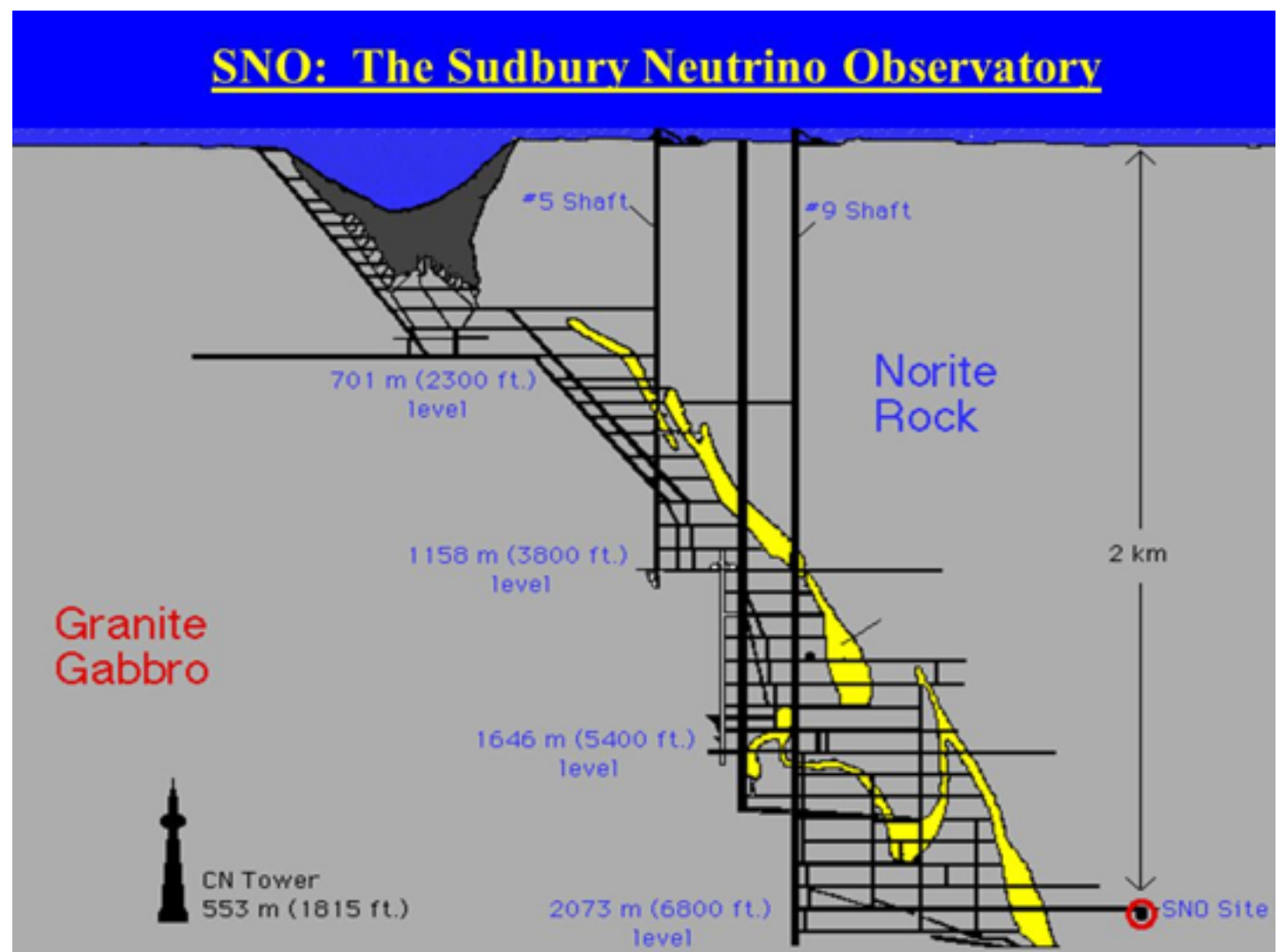




# A 2 km de profundidad



- SNO, un preciosa bola llena de agua pesada a 2 km de profundidad





# El nacimiento del neutrino

---

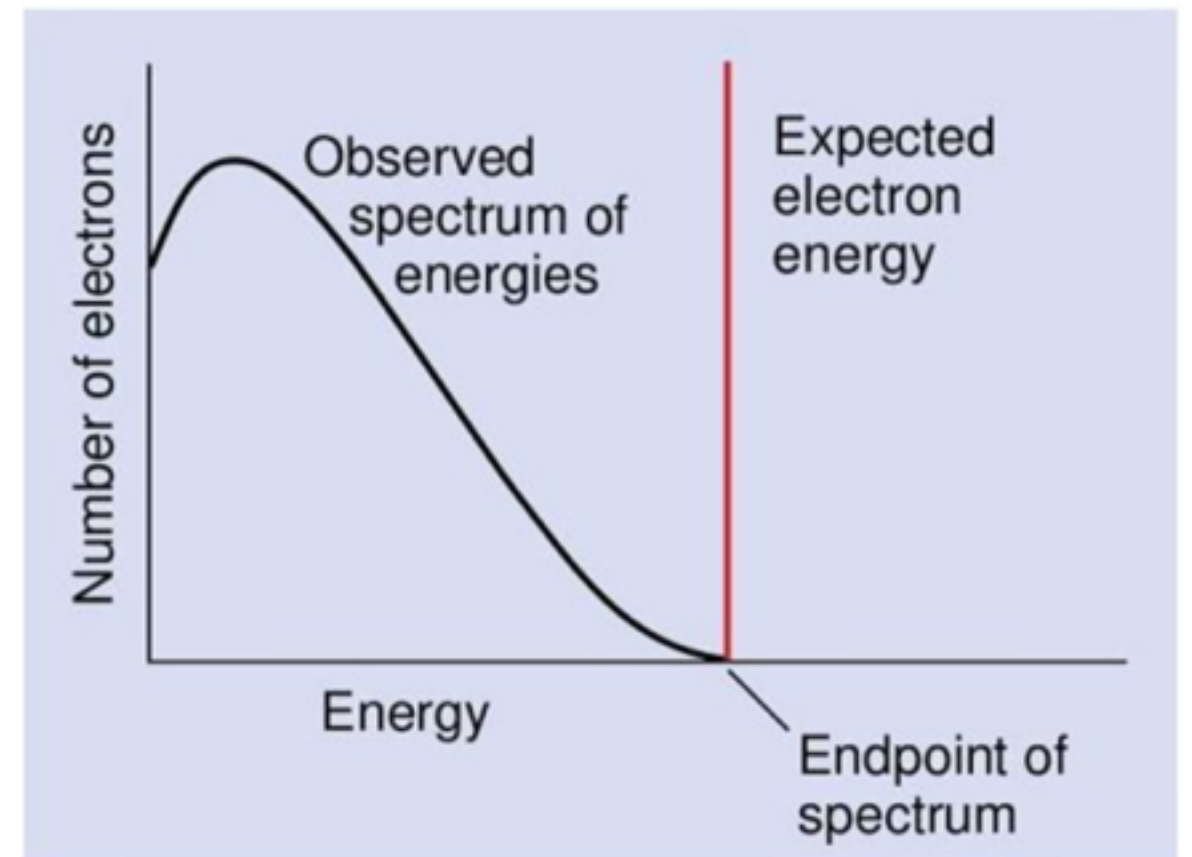
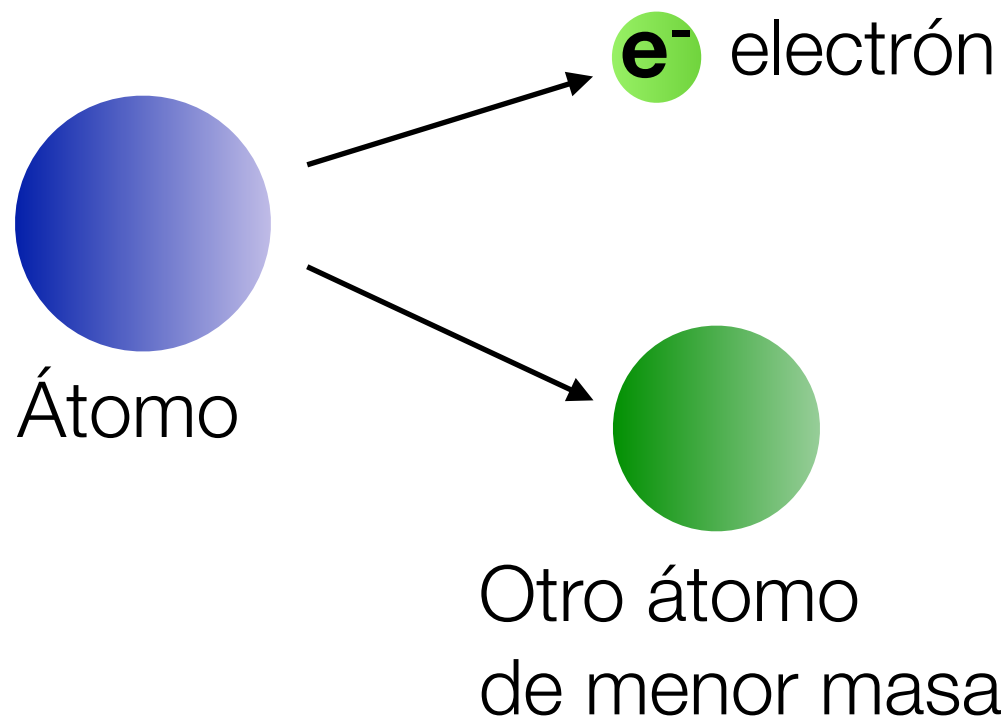
- A principios del siglo XX el neutrino “no existía”, no hacía falta para explicar todo lo que los Físicos Experimentales observaban
- Hasta que empezaron a ver cosas extrañas ..



# El nacimiento del neutrino

- A principios del siglo XX el neutrino “no existía”, no hacía falta para explicar todo lo que los Físicos Experimentales observaban
- Hasta que empezaron a ver cosas extrañas ..

## desintegración Beta

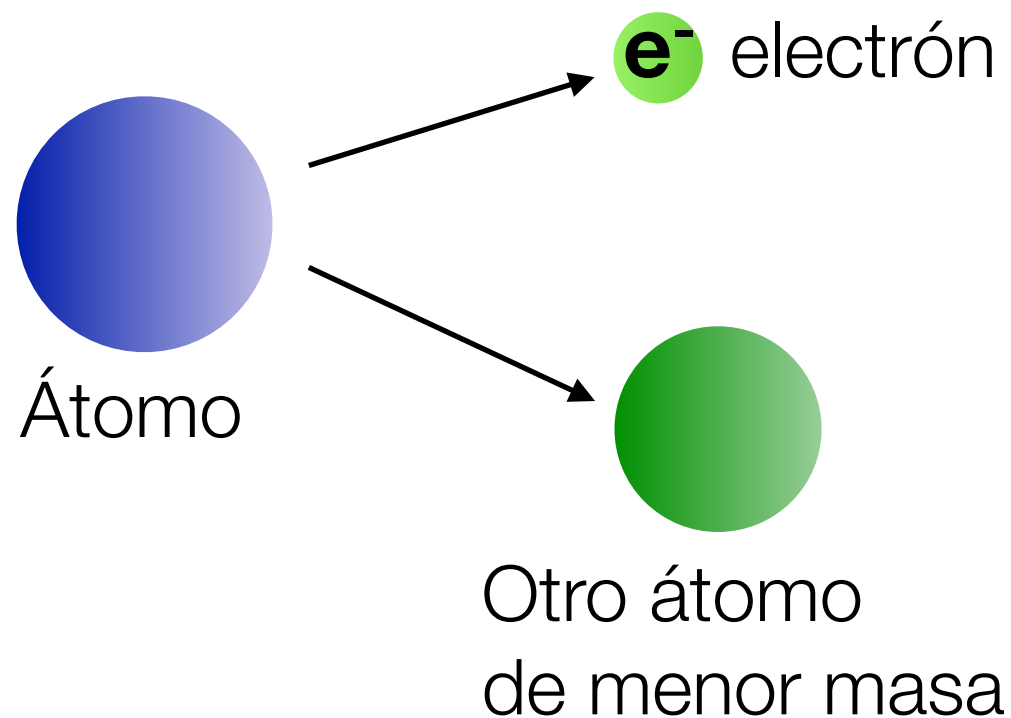




# La solución de Pauli

- En 1930 Pauli postuló la existencia de una pequeña partícula neutra y sin masa, portadora de la energía perdida

## desintegración Beta

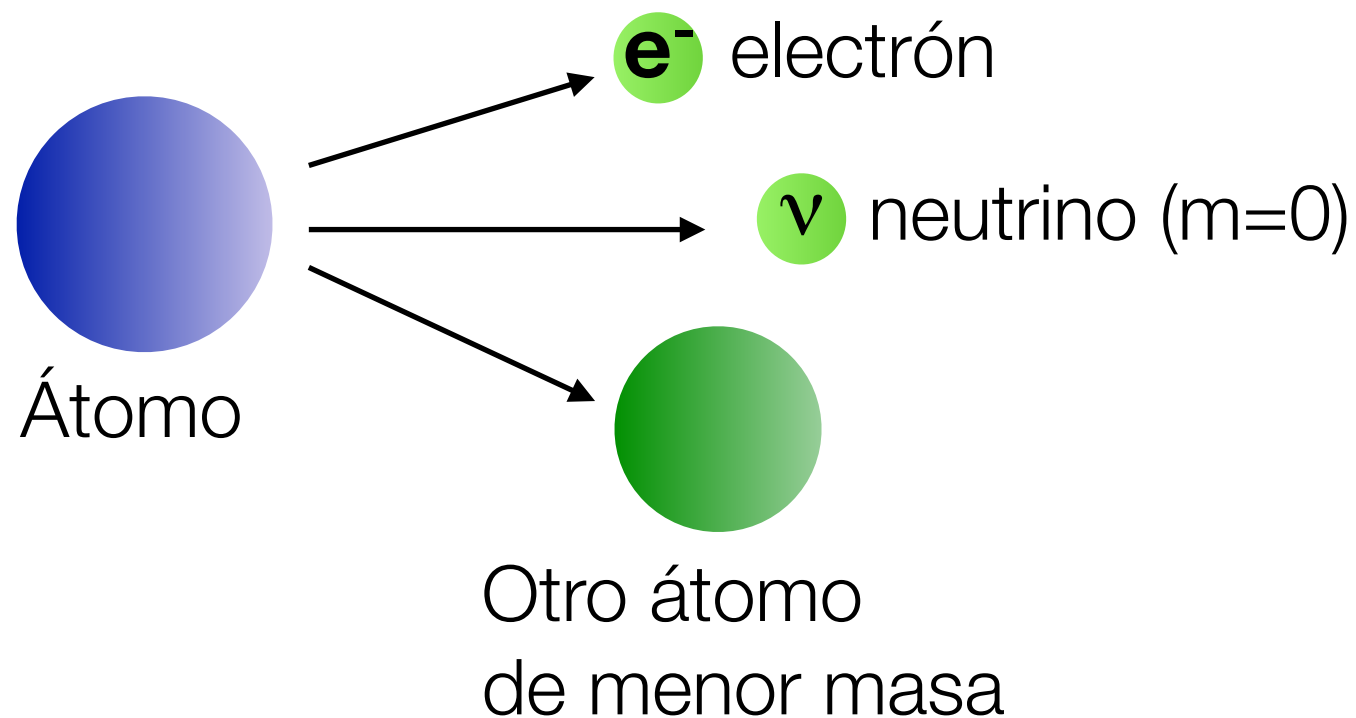




# La solución de Pauli

- En 1930 Pauli postuló la existencia de una pequeña partícula neutra y sin masa, portadora de la energía perdida

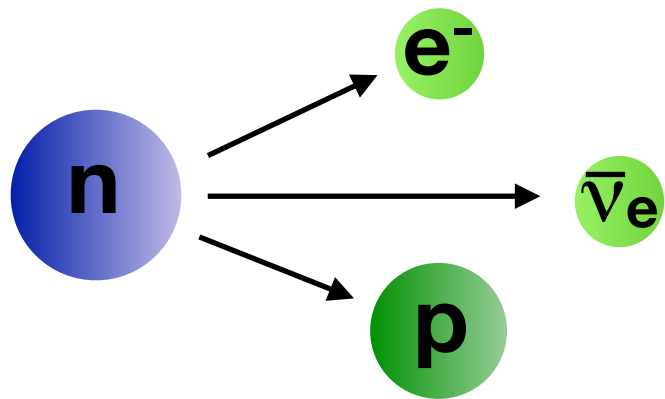
## desintegración Beta



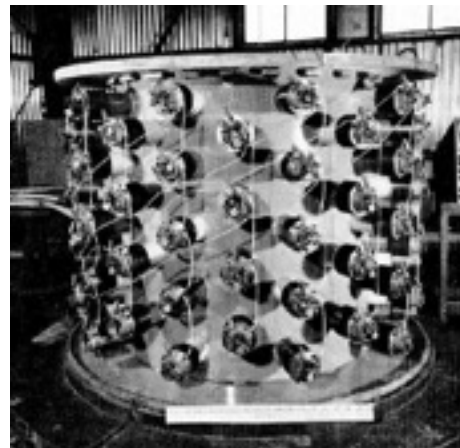


# Una larga historia

- Pero tardó 25 años en detectarse



desintegración  
beta

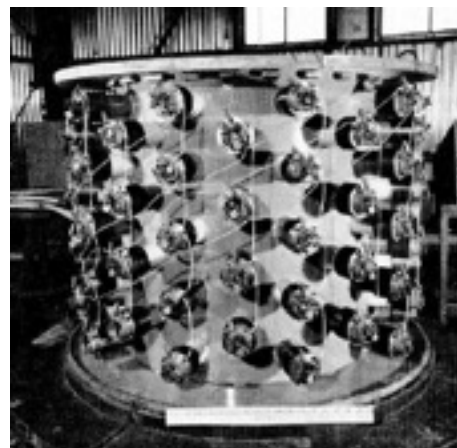
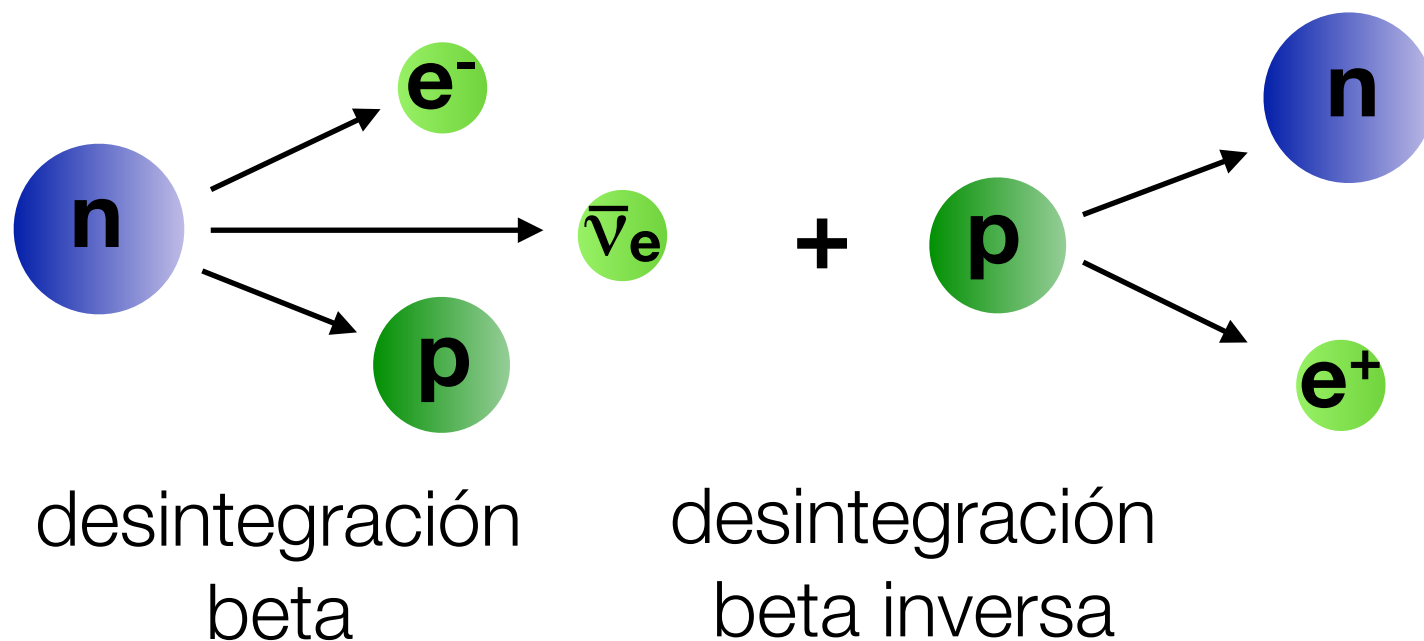


Reines  
y  
Cowan



# Una larga historia

- Pero tardó 25 años en detectarse

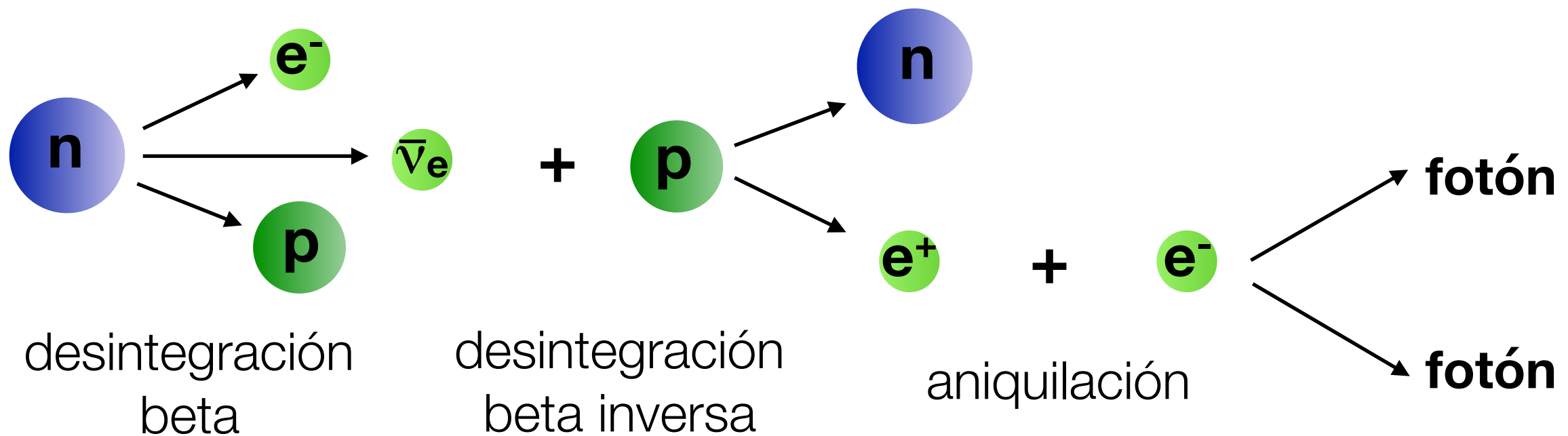


Reines  
y  
Cowan



# Una larga historia

- Pero tardó 25 años en detectarse

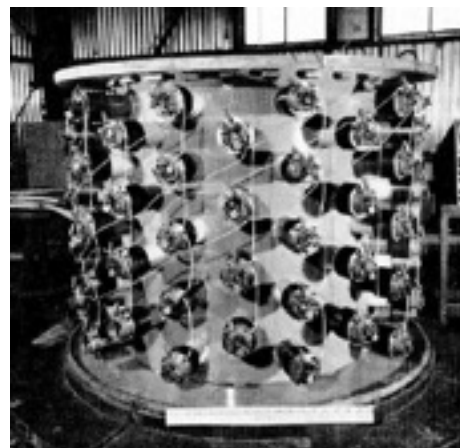
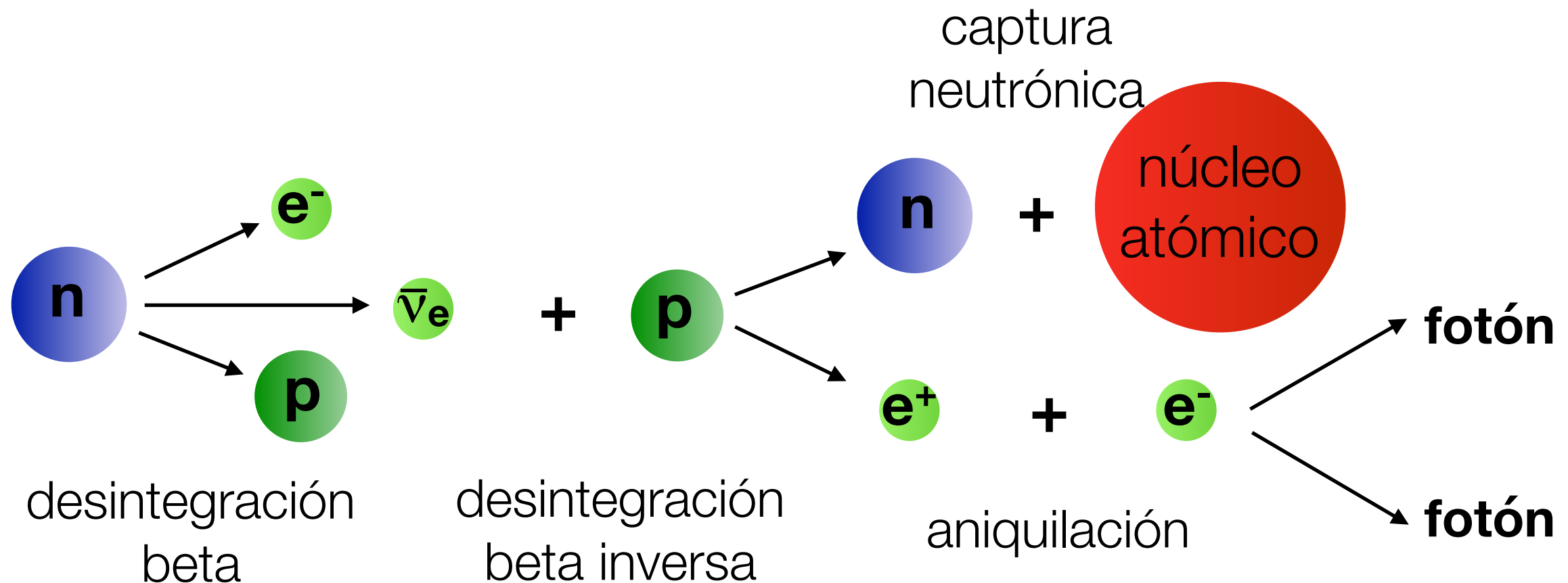


Reines  
y  
Cowan



# Una larga historia

- Pero tardó 25 años en detectarse

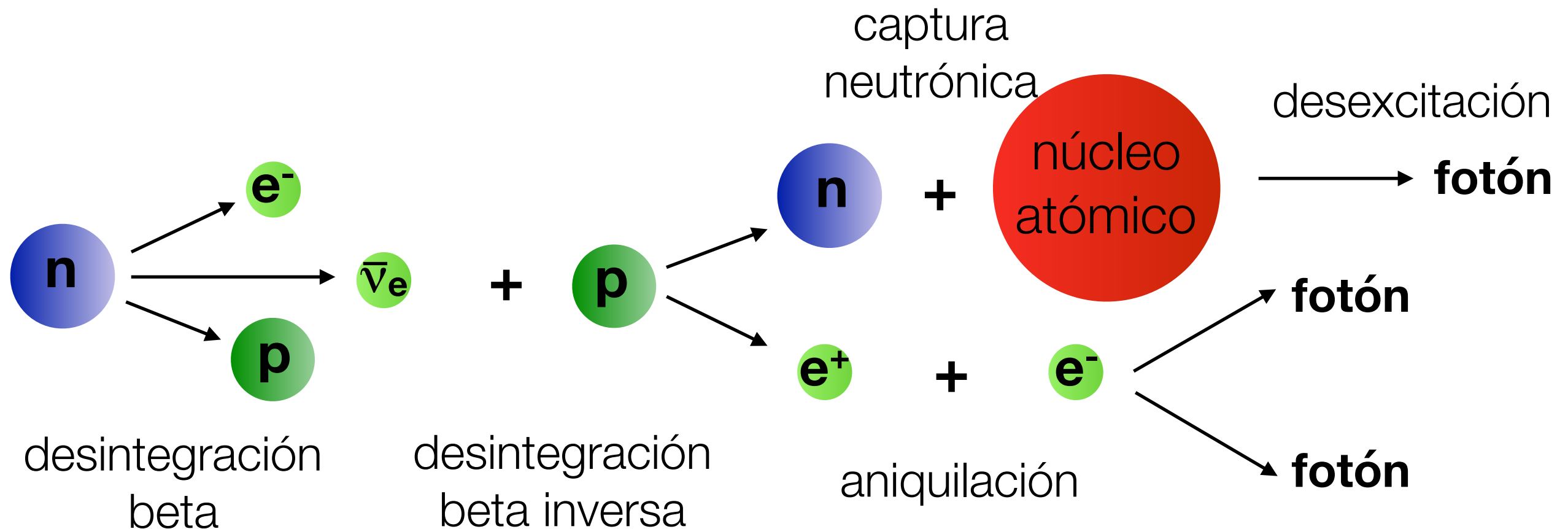


Reines  
y  
Cowan



# Una larga historia

- Pero tardó 25 años en detectarse

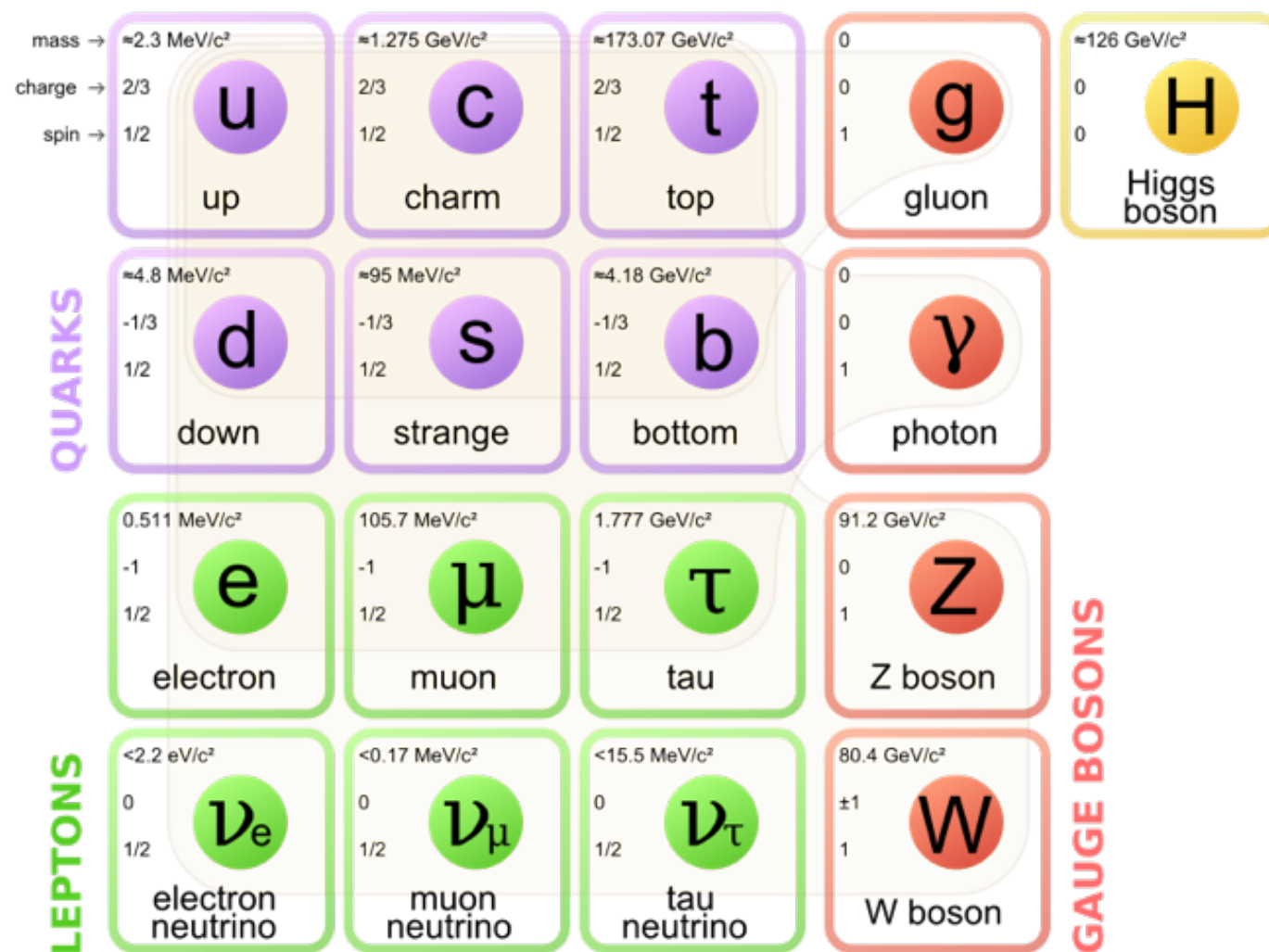


Reines  
y  
Cowan



# ¿Solo hay un tipo de neutrino?

- Pich os dijo que no. ¿Pero como lo sabe?





# El muón

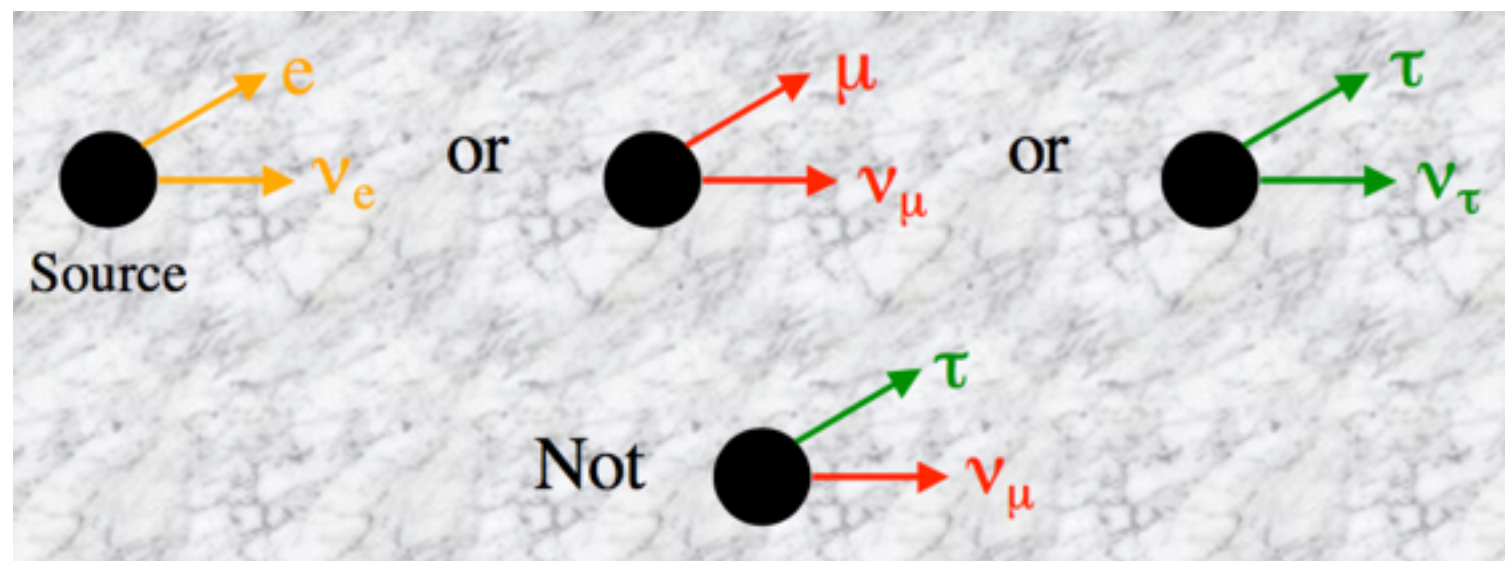
---

- En 1936 se descubrió el muon, una partícula similar al electrón pero 200 veces más pesada
- Enseguida se postuló la existencia de un segundo neutrino asociado al muón
- Como veremos más adelante el neutrino muónico fue descubierta en el primer haz de neutrinos



# La sagrada familia

- En la naturaleza y en el laboratorio un neutrino siempre va acompañado de un leptón cargado. Conservación Número leptónico (**L**)
- Cada tipo de neutrino siempre aparece asociado a su compañero cargado

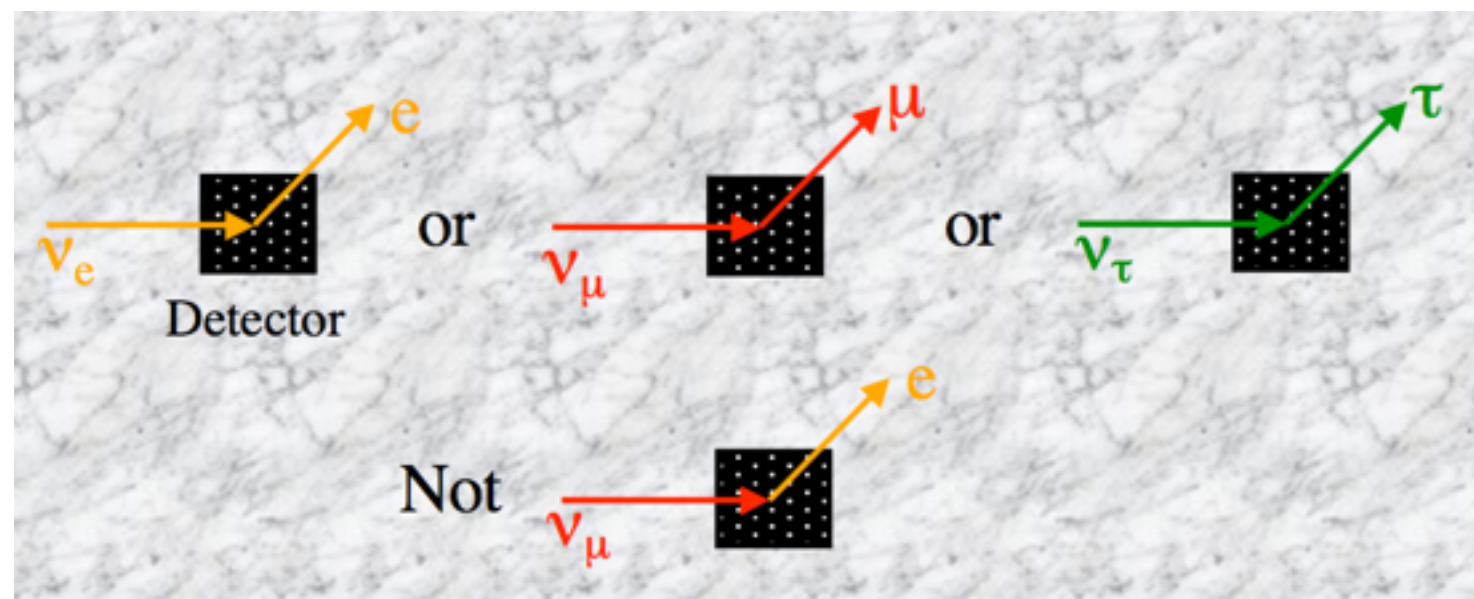


- **L** se conserva en cada familia de leptons



# Endogamia en los leptones

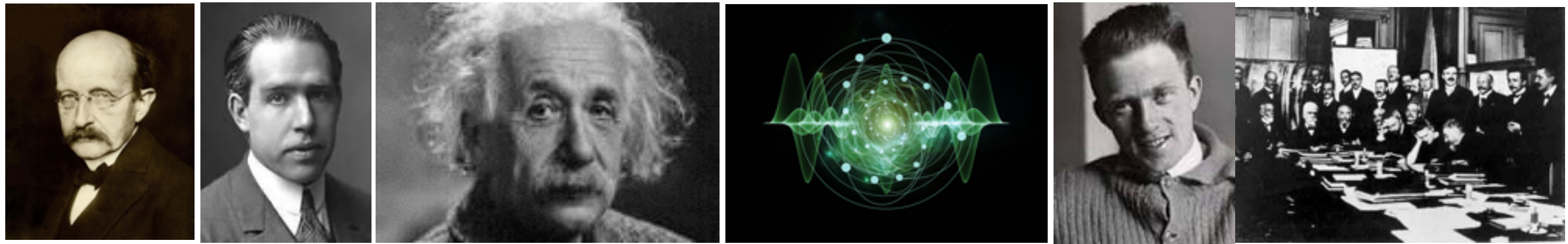
- De la misma forma, cuando un neutrino interacciona con un átomo de un detector produce un leptón de su misma familia



- Esta es precisamente la forma de diferenciar unos neutrinos de otros, por el lepton cargado que producen



# El mundo Mecano-Cuántico

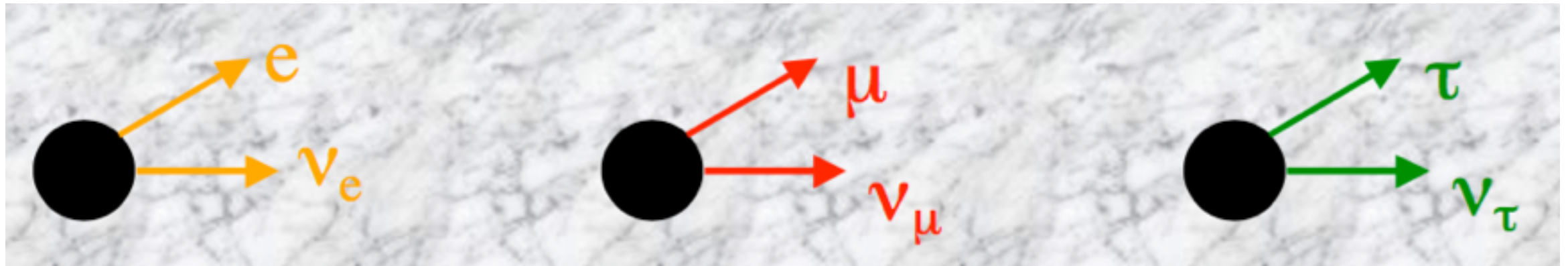


- Es el mundo de lo muy pequeño
- En este mundo la **incertidumbre** es la clave
  - La posición, energía, e incluso la naturaleza, de las partículas no está bien definida
  - Todo es cuestión de **probabilidad**
  - Una partícula tiene cierta probabilidad de estar aquí o allá, de ser de un tipo o de otro ....



# ¿Y si $\nu_e \nu_\mu \nu_\tau$ no fueran partículas?

- En este mundo los neutrinos que conocemos podrían ser mezclas diferentes de otros neutrinos  $\nu_1 \nu_2 \nu_3$ , que si serían partículas
- En cada una de estas reacciones



- El neutrino emitido sería en realidad  $\nu_1 \nu_2$  ó  $\nu_3$

- De cada 100 reacciones  el  $\nu_e$ 

60%	es $\nu_1$
35%	es $\nu_2$
5%	es $\nu_3$



# ¿ Y si $\nu_1$ $\nu_2$ $\nu_3$ tuvieran masa ?

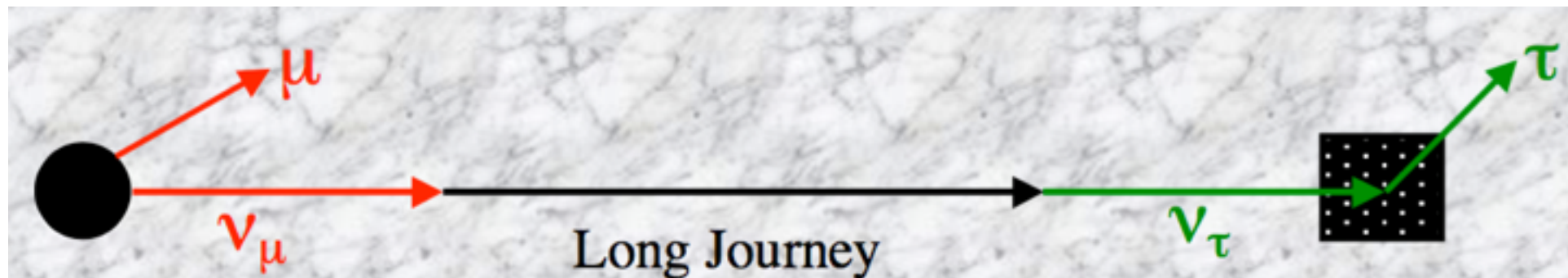
---

- Si los neutrinos  $\nu_1$   $\nu_2$   $\nu_3$  tuvieran masa, y sus masas fueran diferentes, viajarían a velocidades diferentes

$$E^2 = m^2 + p^2$$

- De esta forma la mezcla cambiaría con la distancia y en un detector lejano podríamos observar un tipo de neutrino diferente del original



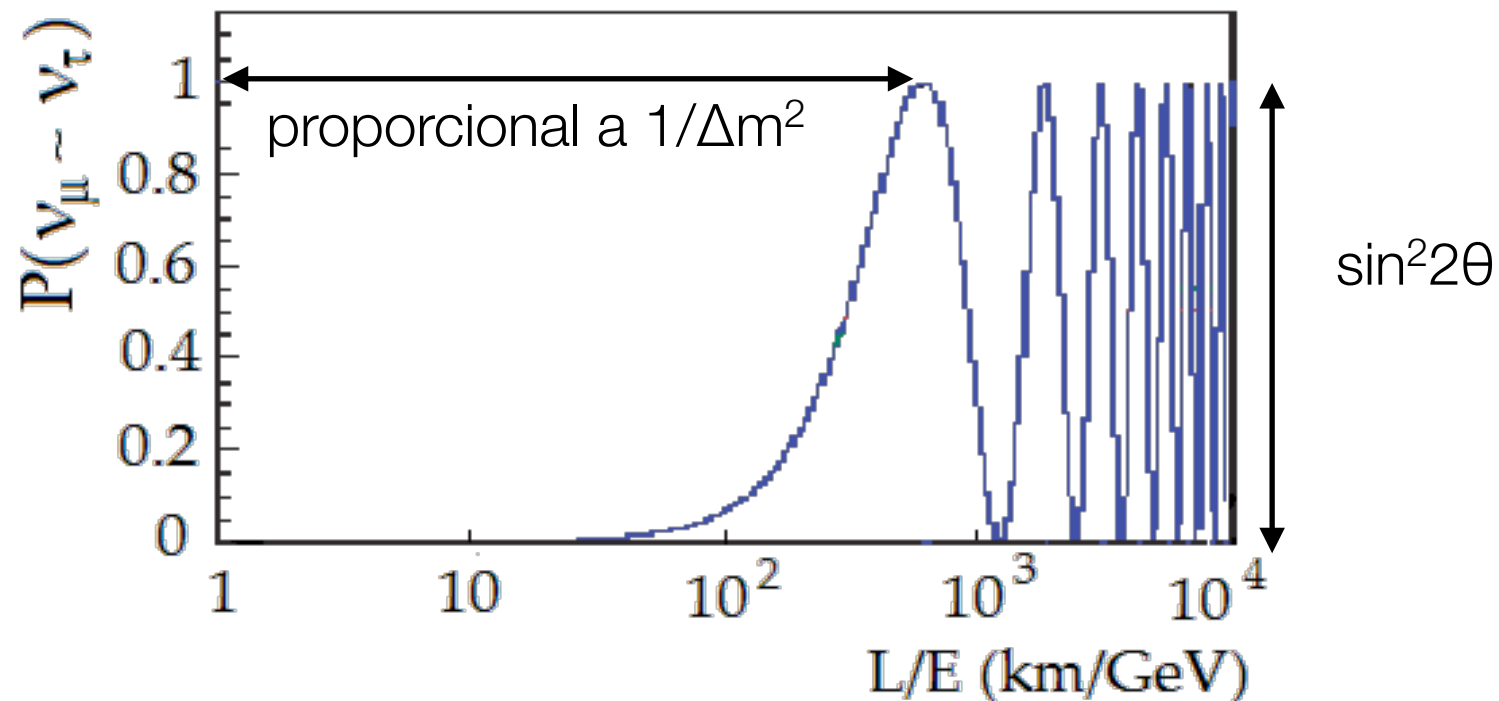
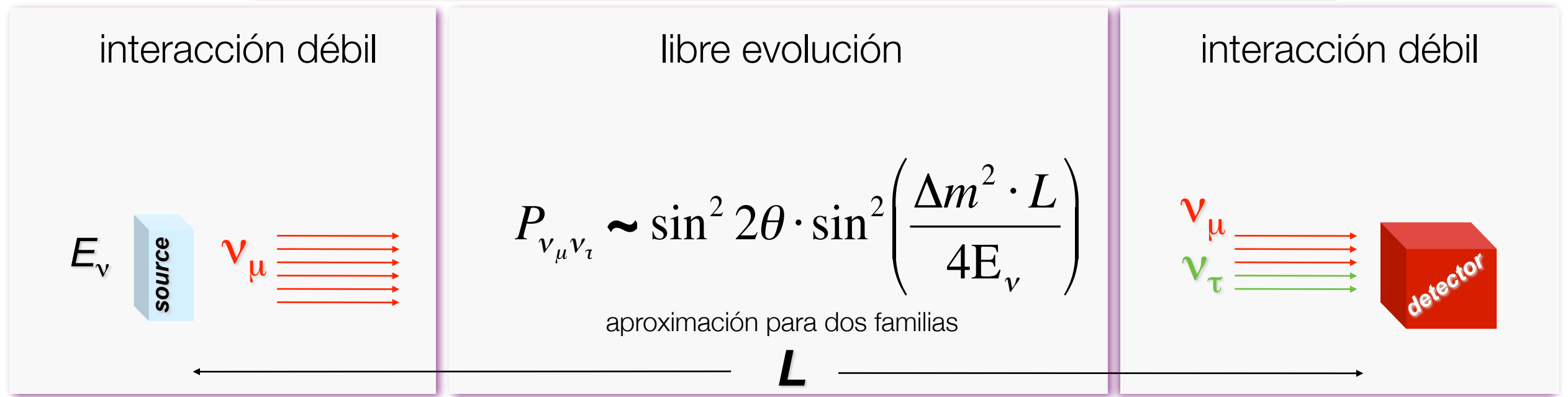


- ¿ Es esto cierto o es solo una elucubración mental de algún Físico Teórico ?
- Este mecanismo fue postulado por Bruno Pontecorvo en 1957 pero no fue hasta 1998 que se demostró su validez



# Oscilaciones de neutrinos

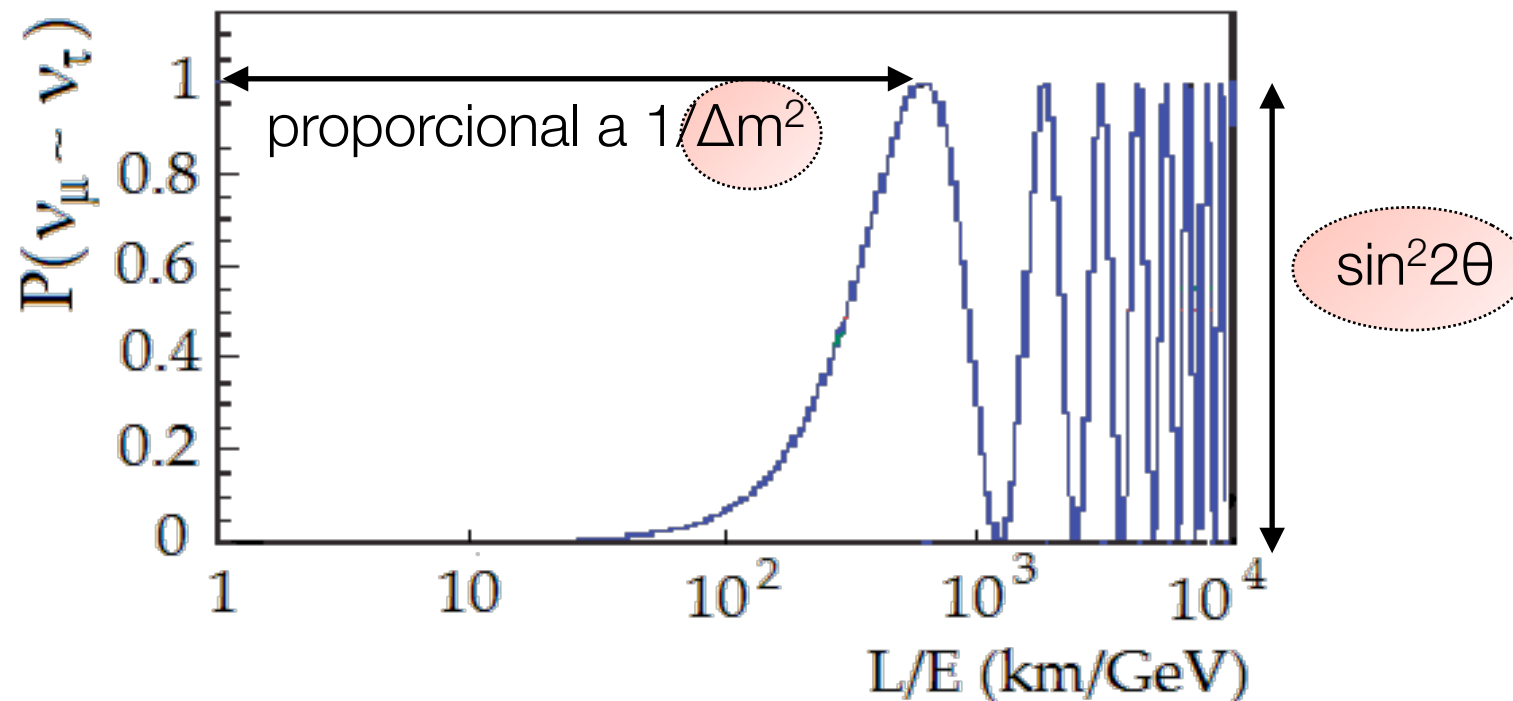
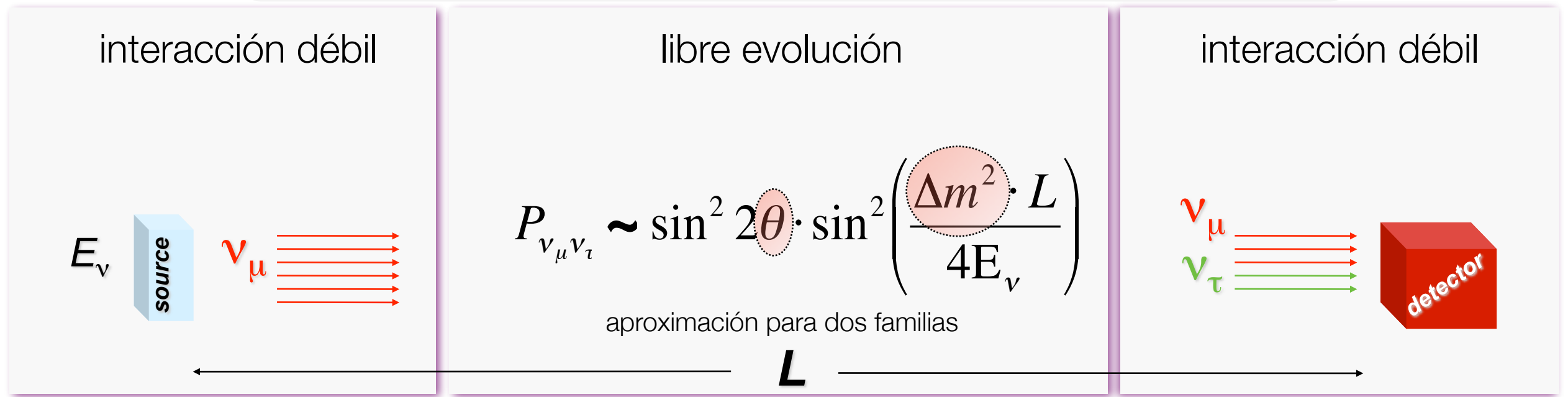
**Requisitos:** Neutrinos tienen masas diferentes





# Oscilaciones de neutrinos

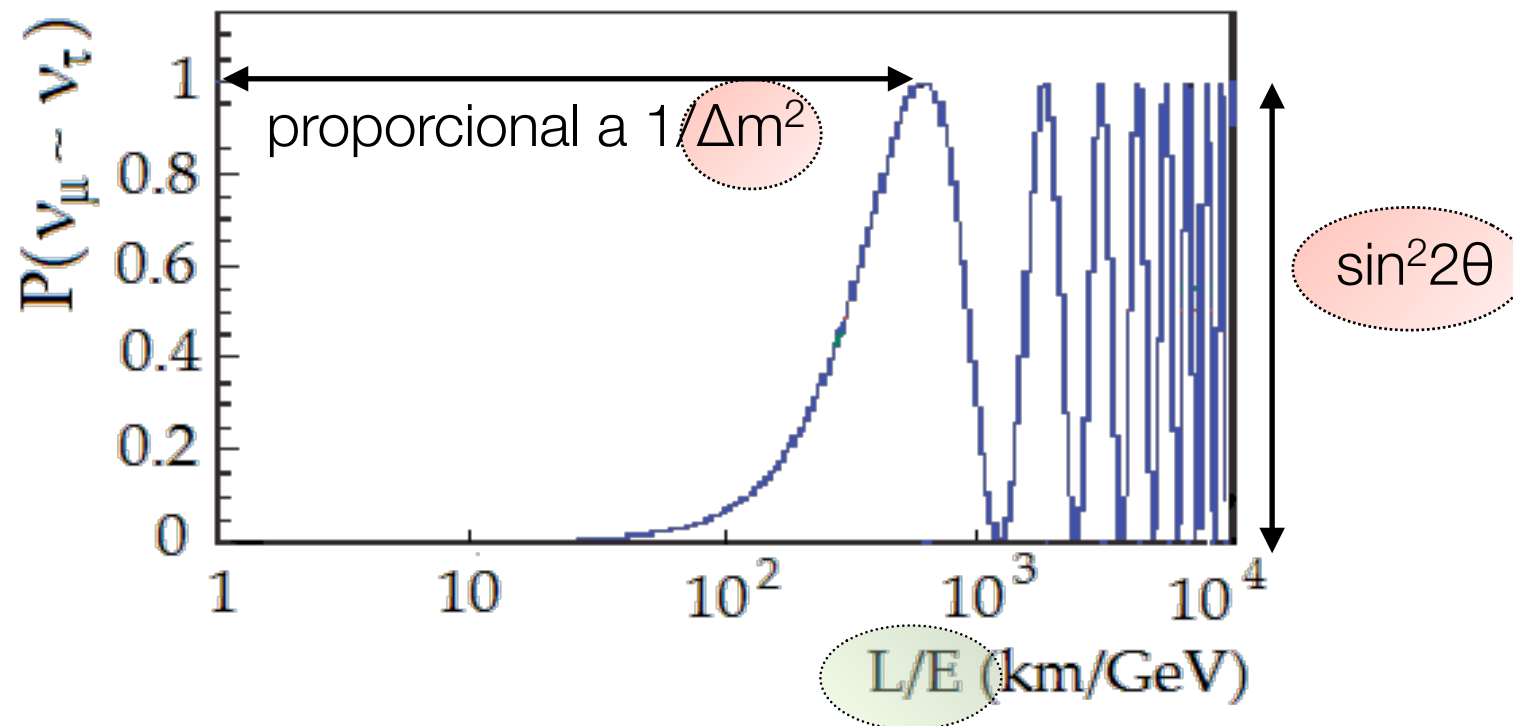
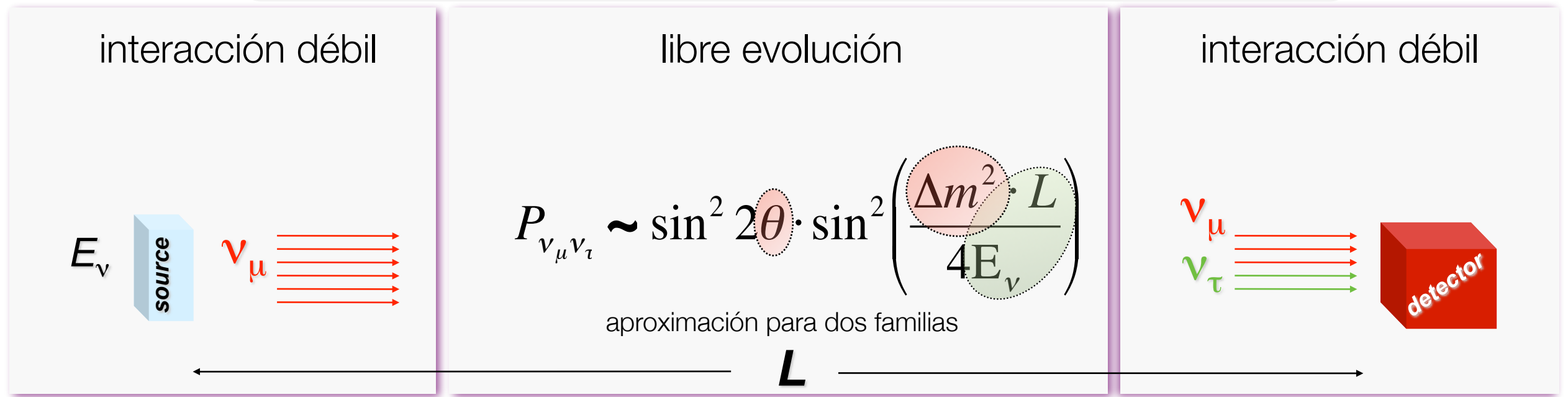
**Requisitos:** Neutrinos tienen masas diferentes





# Oscilaciones de neutrinos

**Requisitos:** Neutrinos tienen masas diferentes





# La búsqueda

---

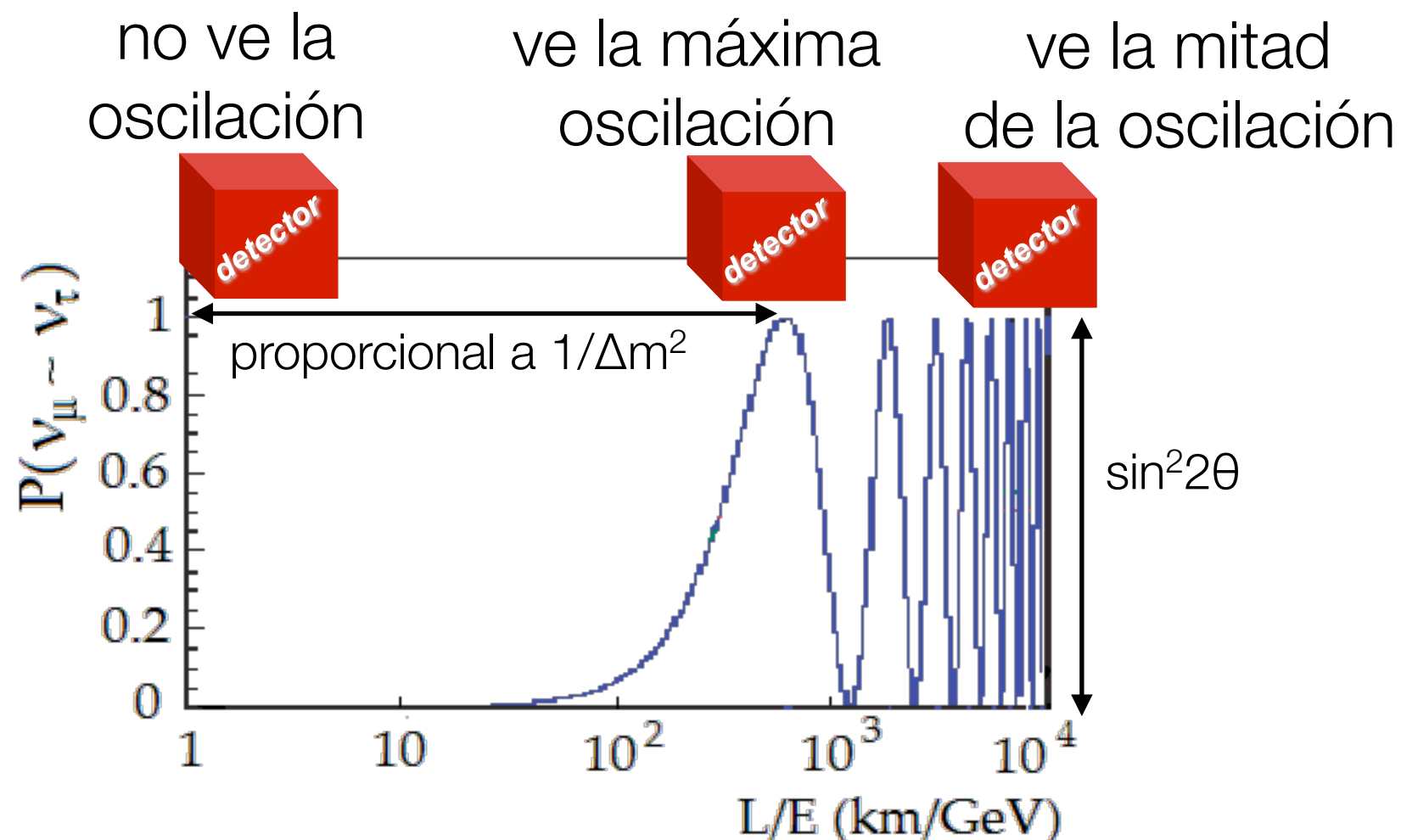
- El estudio de las oscilaciones requiere una fuente muy intensa de neutrinos y un detector muy masivo situado a la distancia correcta, que depende de  $\Delta m^2$





# La búsqueda

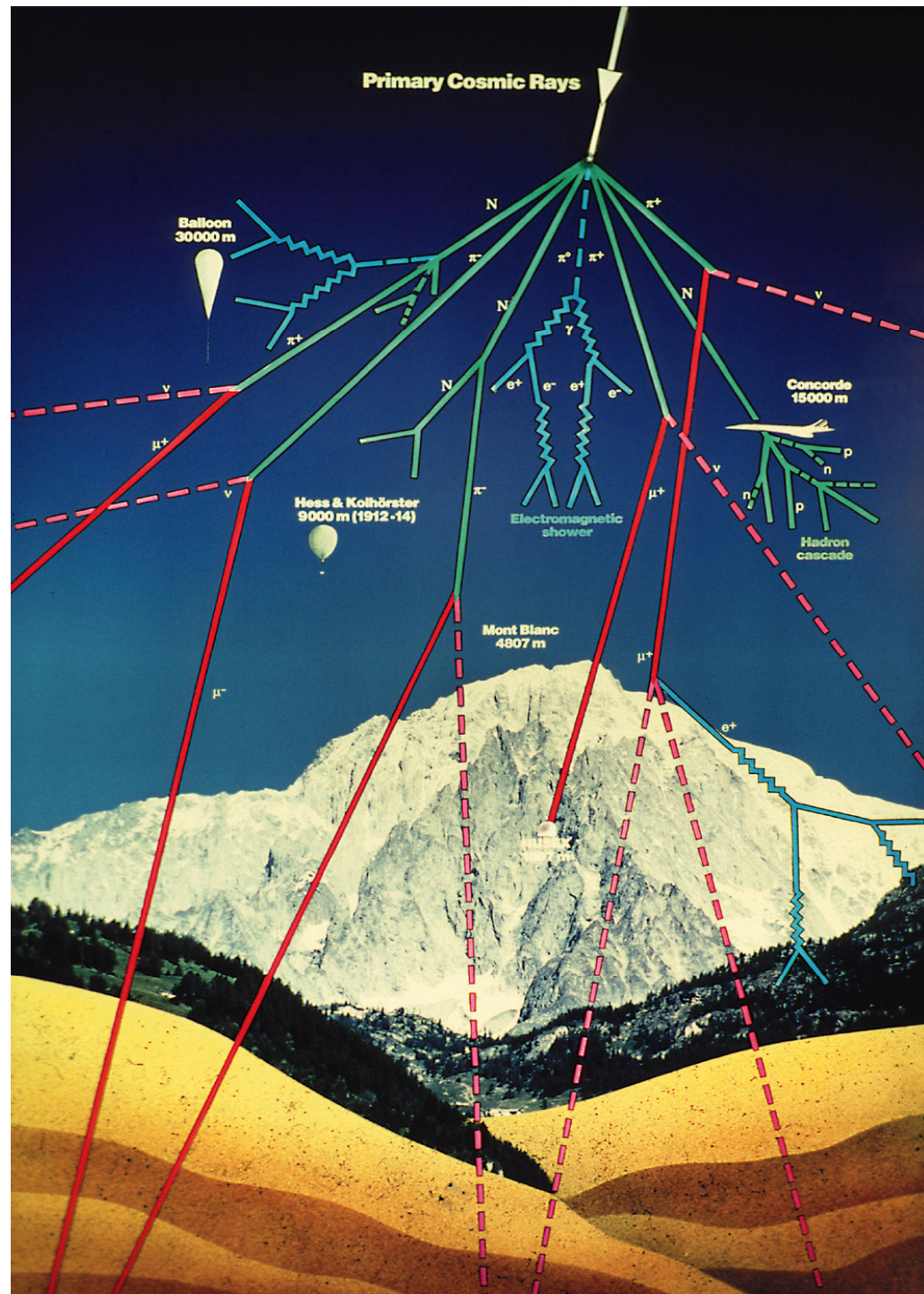
- El estudio de las oscilaciones requiere una fuente muy intensa de neutrinos y un detector muy masivo situado a la distancia correcta, que depende de  $\Delta m^2$



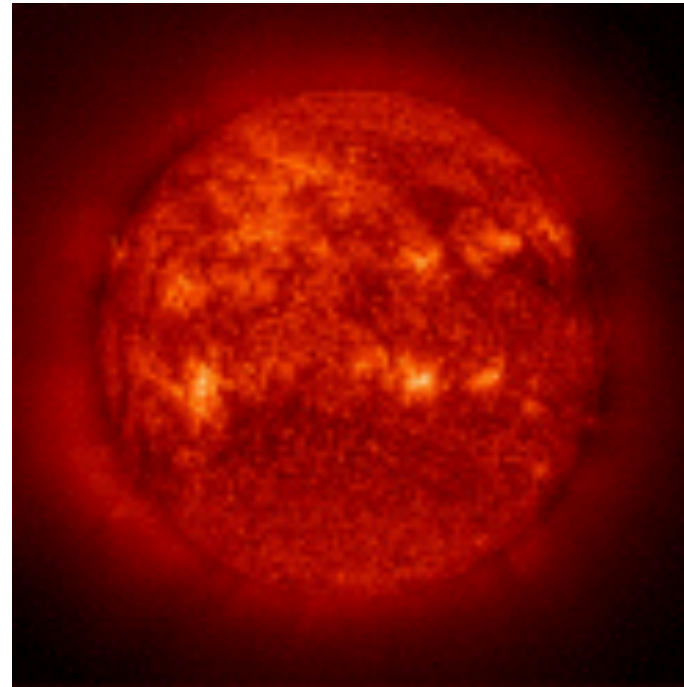


# Fuentes de neutrinos

Atmosphere



Sun



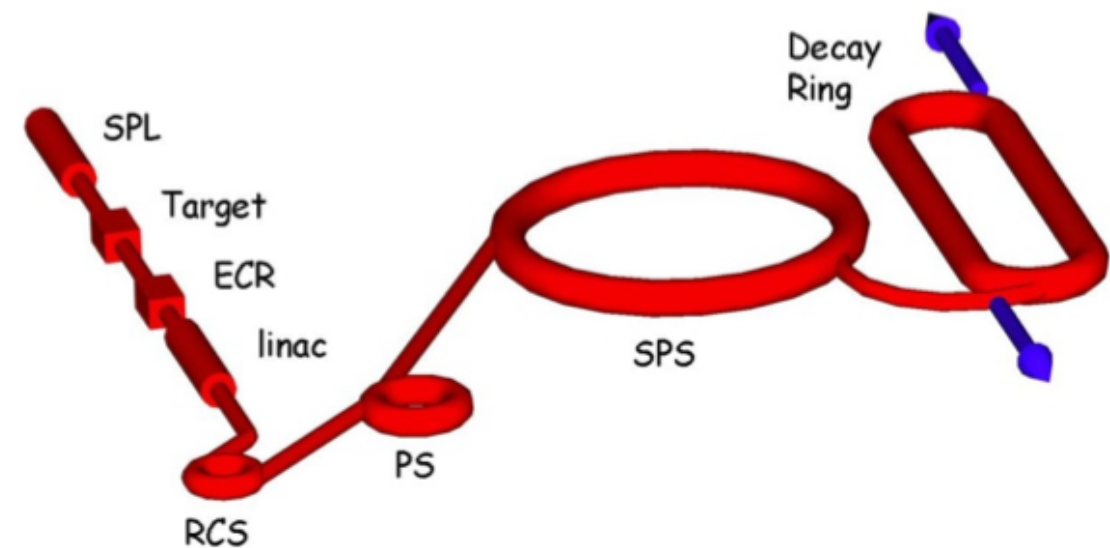
Supernovae



Reactors



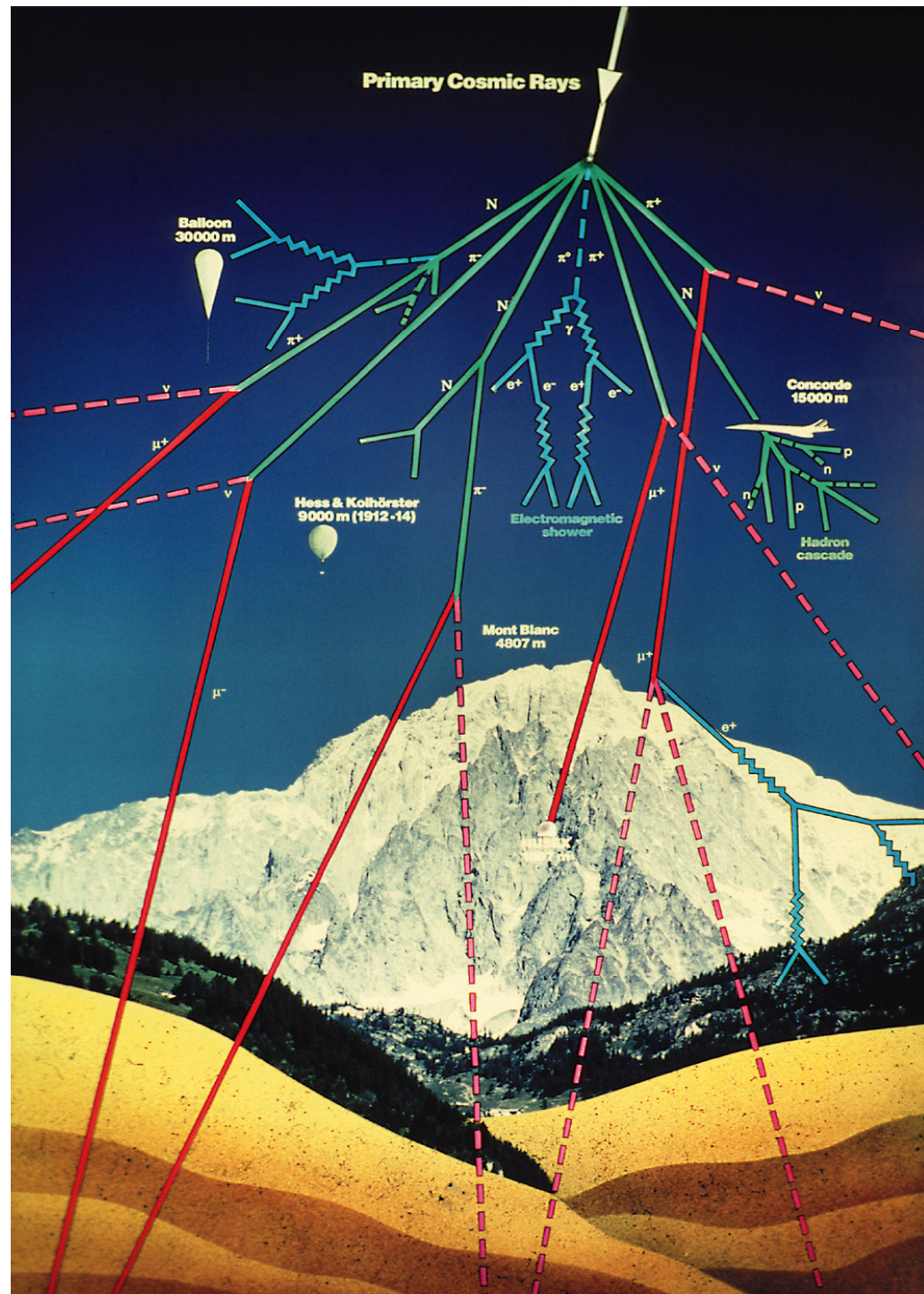
Accelerators



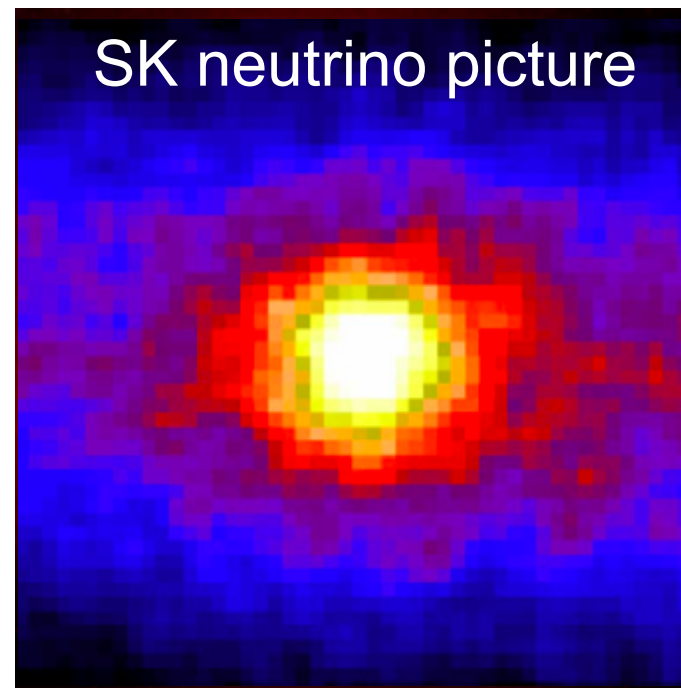


# Fuentes de neutrinos

## Atmosphere



## Sun



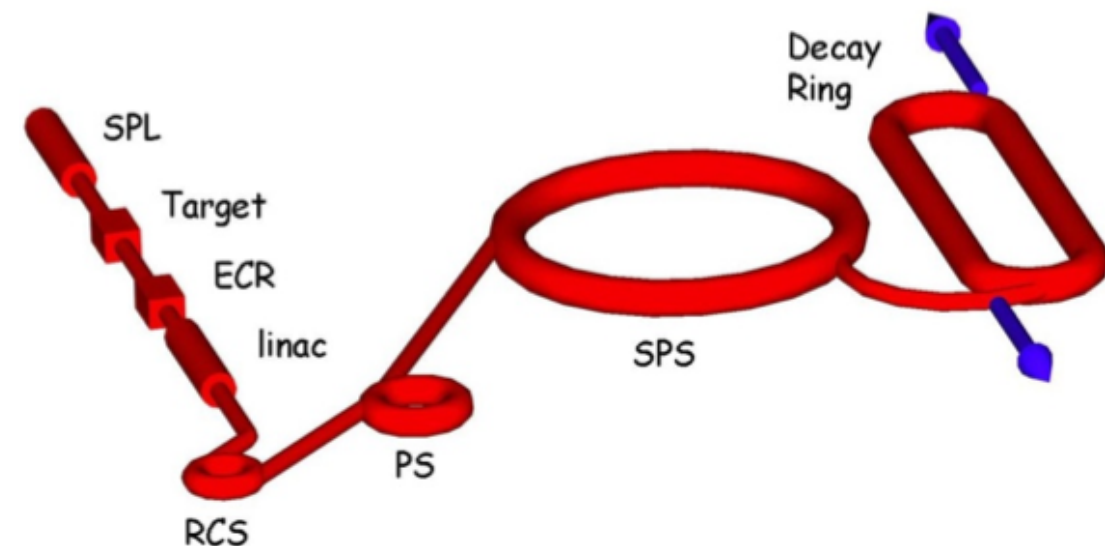
## Supernovae



## Reactors



## Accelerators





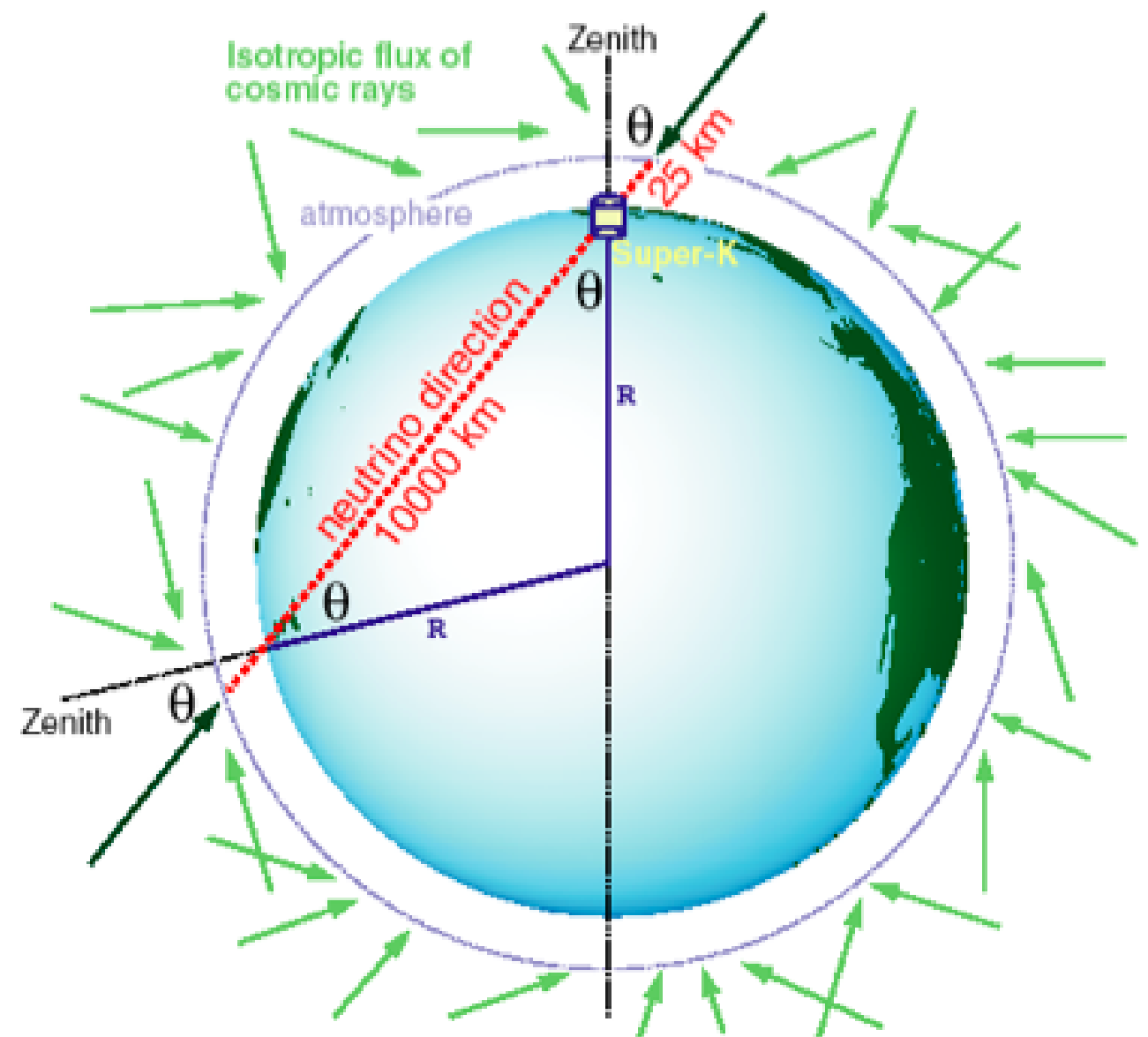
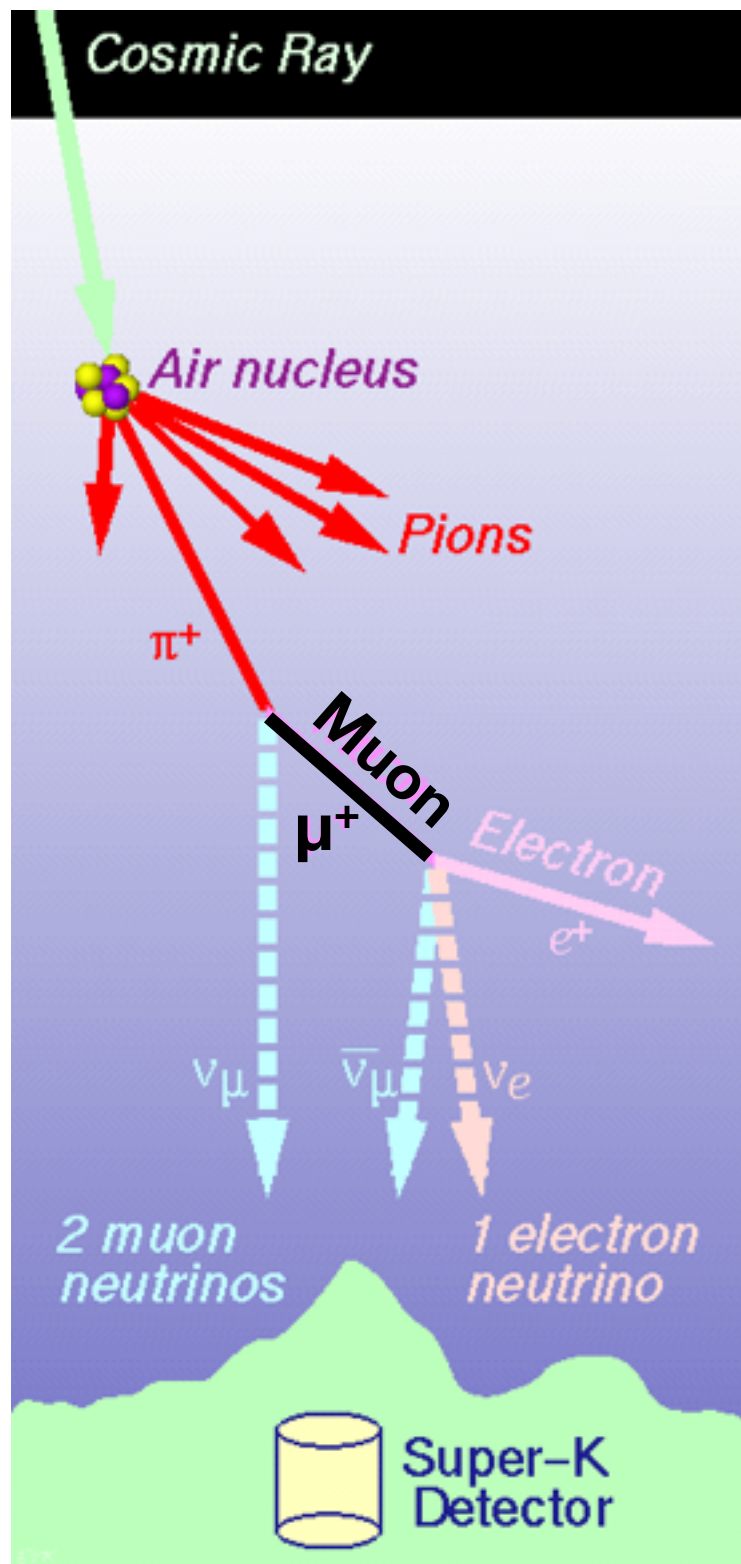
# Naturales o artificiales

---

- Las fuentes artificiales (reactores y aceleradores) pueden ser controladas:
  - Elegimos E y L, de forma que podemos explorar regiones de  $\Delta m^2$  concretas
- Las fuentes naturales “son como son”, E y L nos vienen dadas. Pero tienen una gran ventaja ...



# Neutrinos atmosféricos



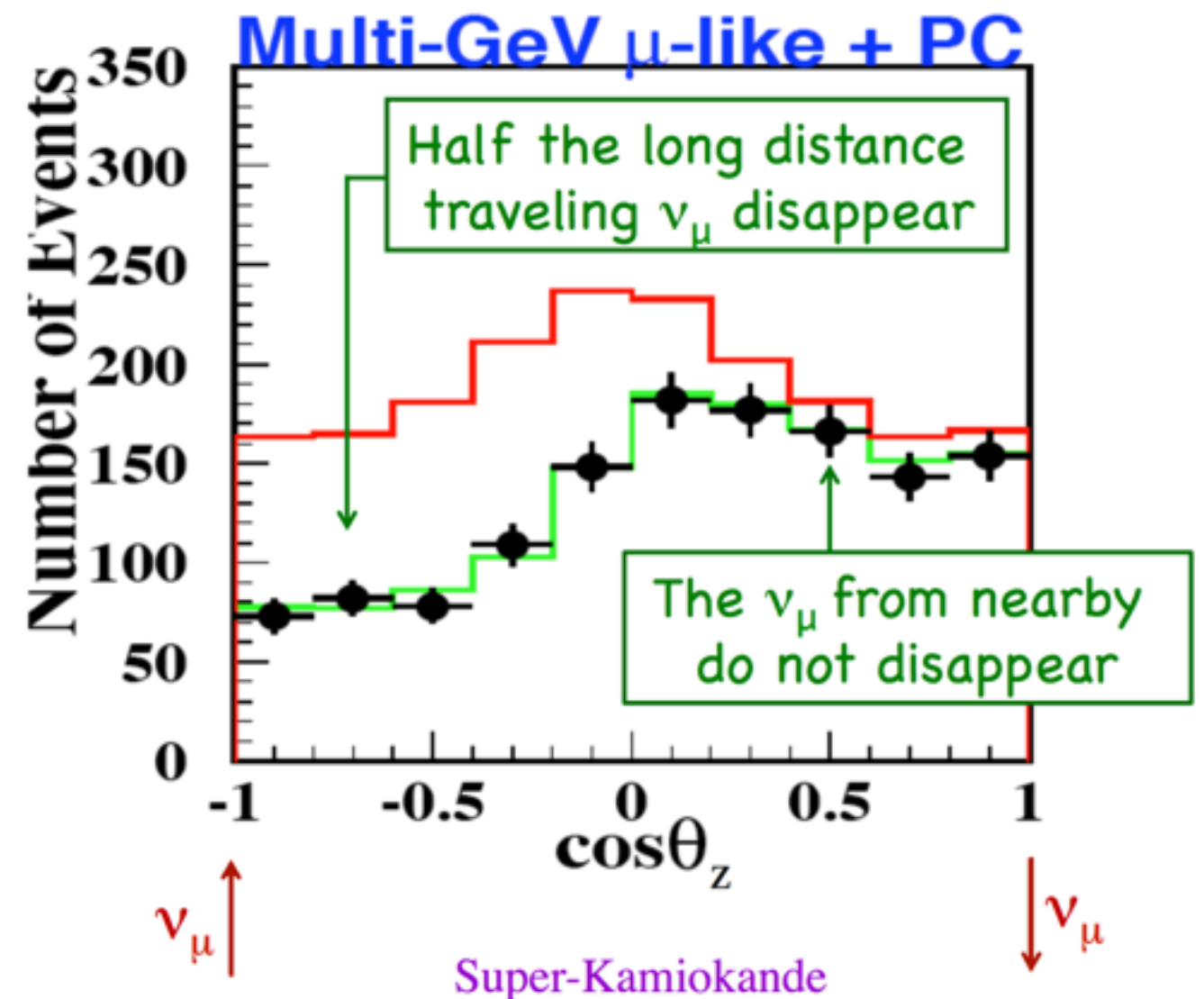
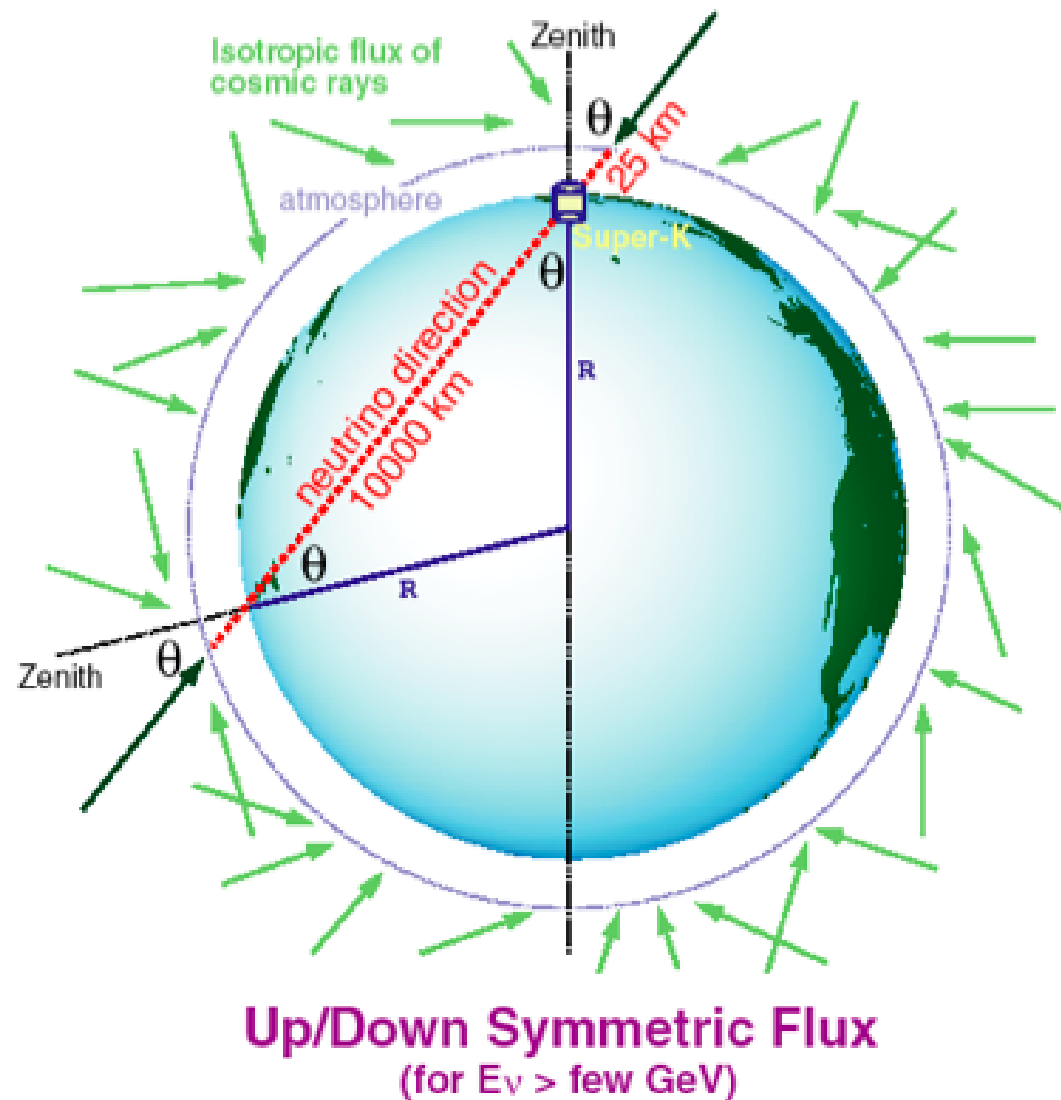
$$L=f(\theta)$$

$$L/E \sim 1 - 10^4 \text{ km/GeV}$$



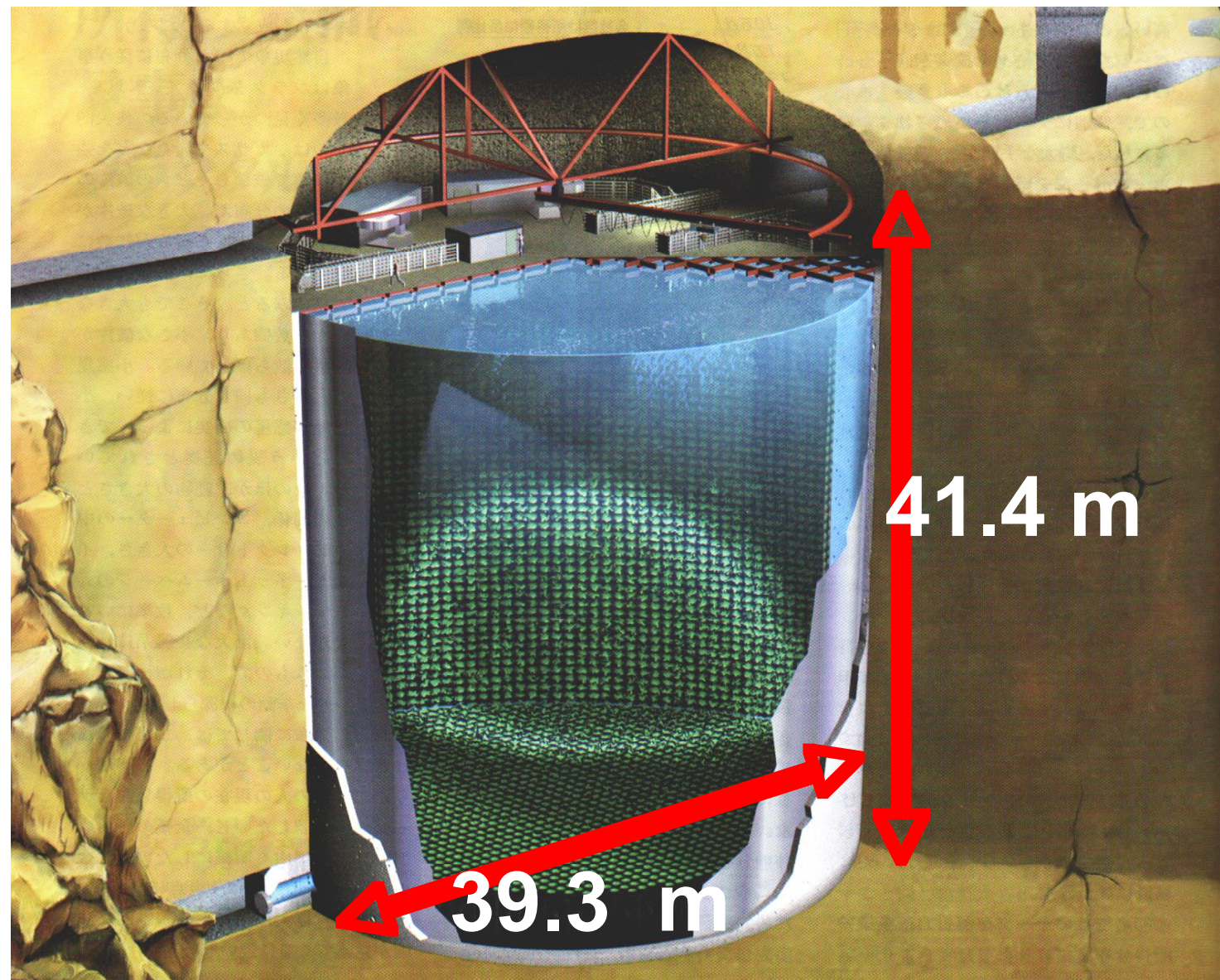
# El descubrimiento

- Super-Kamiokande observó en 1998 que el déficit de neutrinos dependía del ángulo y por tanto de la distancia

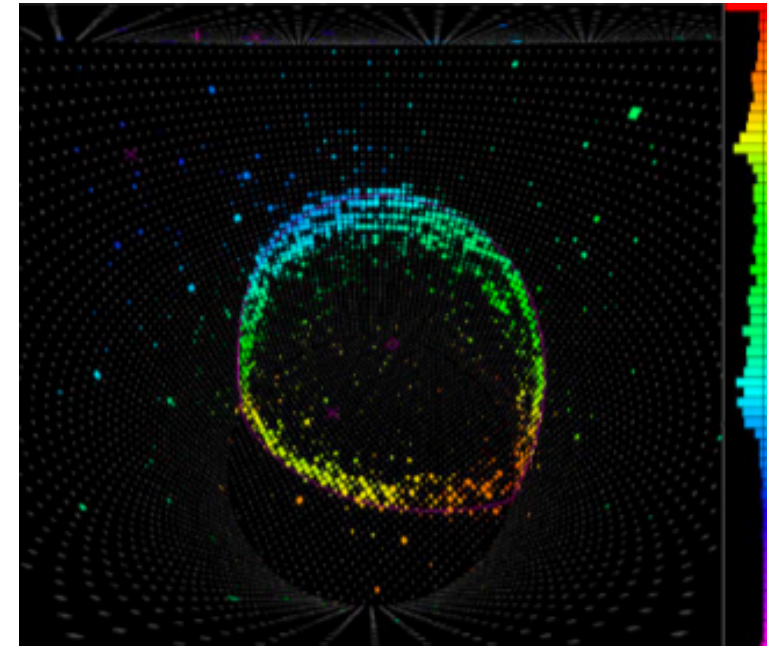




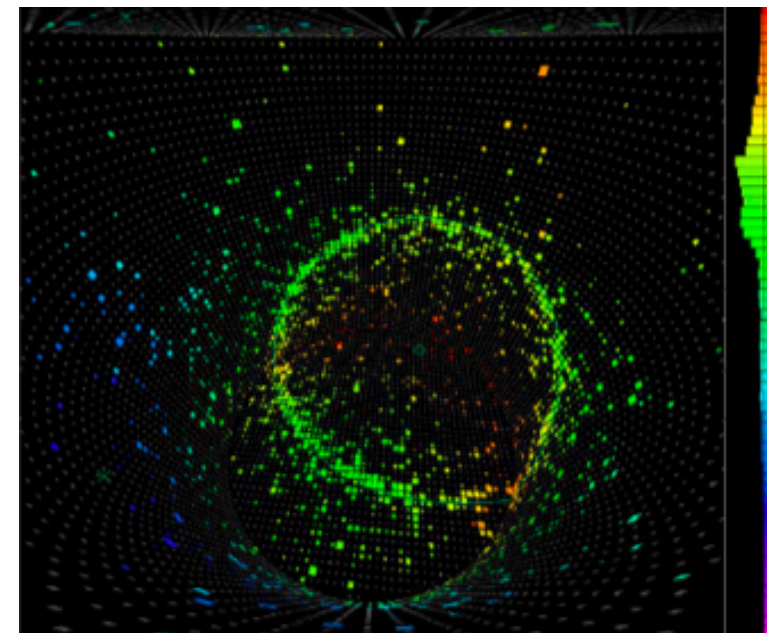
# Super-Kamiokande



anillo de tipo muón



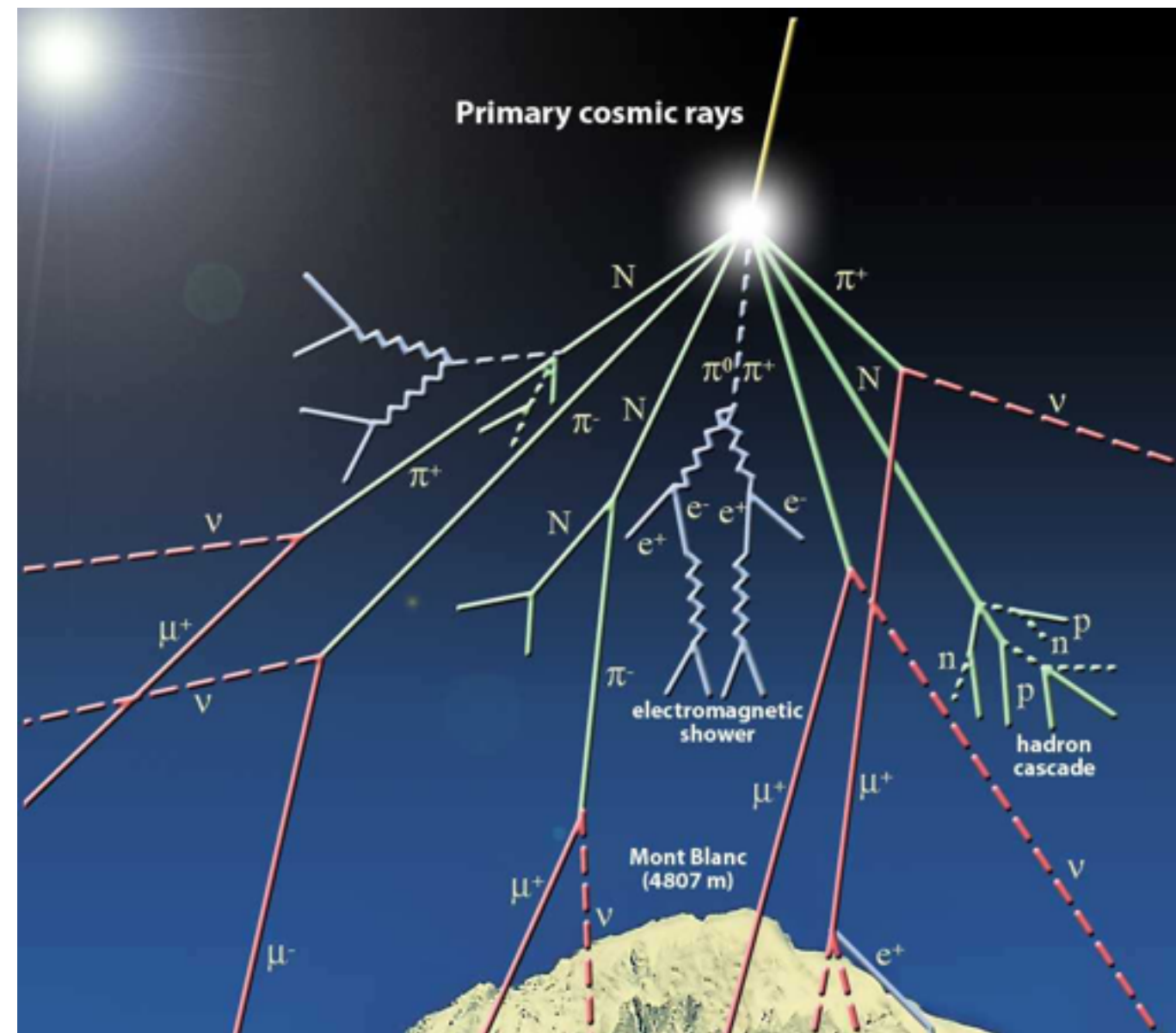
anillo de tipo electrón





# En las profundidades de la Tierra

- Los rayos cósmicos son a la vez nuestros peores enemigos
- Casi todos los detectores de neutrinos se sitúan bajo tierra, en túneles bajo montañas o en minas bajo tierra a más de 1Km de profundidad





# Neutrinos solares en SNO

- A 2km de profundidad, en una mina, SNO detecta neutrinos solares de dos formas

Una forma cuenta

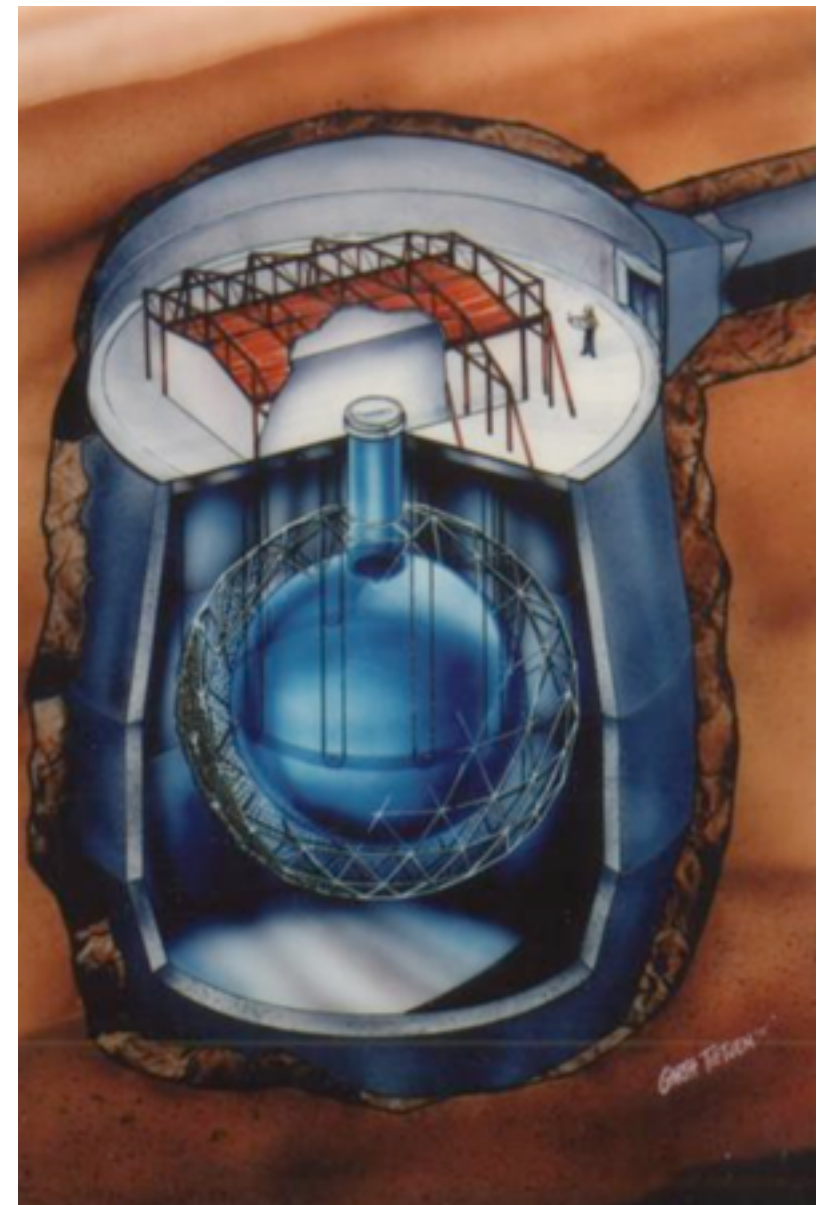
$$\text{Número}(\nu_e)$$

Otra forma cuenta el numero total de neutrinos

$$\text{Número}(\nu_e) + \text{Número}(\nu_\mu) + \text{Número}(\nu_\tau)$$

- SNO observa

$$\frac{\text{Número}(\nu_e)}{\text{Número}(\nu_e) + \text{Número}(\nu_\mu) + \text{Número}(\nu_\tau)} \sim 1/3$$





# Uno más en la familia

$$U = \underbrace{\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix}}_{\text{sector atmosférico}} \underbrace{\begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13}e^{-i\delta} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13}e^{i\delta} & 0 & c_{13} \end{pmatrix}}_{\text{interferencia}} \underbrace{\begin{pmatrix} c_{21} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}}_{\text{sector solar}}$$

~ identity

$\theta_{13} < 10^\circ$  (Chooz en 1998)

- Medidas de precisión requieren la 3 familias
- La cosa se complica pues aparecen efectos secundarios (subdominantes), que son en realidad los más interesantes
  - En particular  $\delta$ , una fase ( $0-2\pi$ ) que de no ser 0 implicaría **violación de la simetría CP**



# Simetría Carga-Paridad (CP)

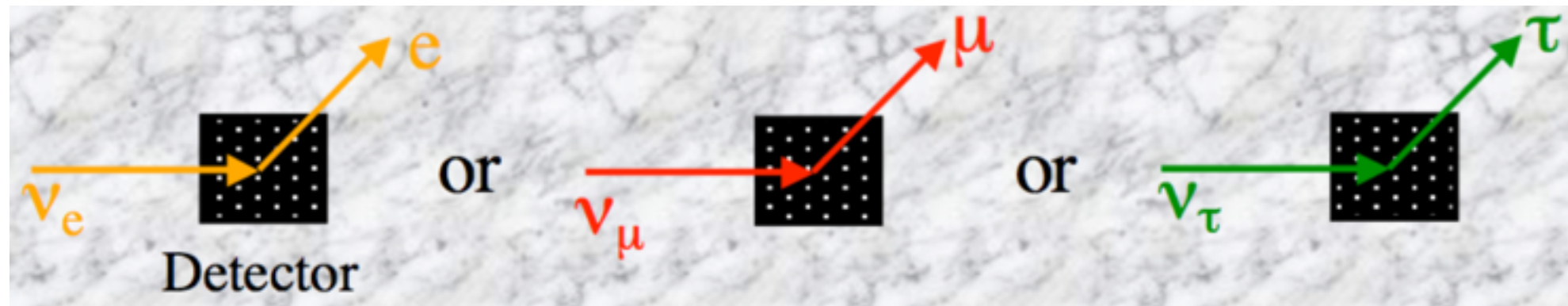
---

- La simetría CP nos dice que una partícula y su anti-partícula se comportan de igual forma (excepto por su carga)
- Sabemos que esta no es una simetría exacta de la naturaleza, pero hasta ahora solo se ha descubierto una violación muy débil en algunos sistemas
- Una violación importante en los neutrinos podría explicar por qué el universo contiene materia, pero no anti-materia



# Aparición o desaparición

- En un detector vemos el leptón cargado



- La energía del neutrino  $>$  masa del leptón
  - neutrinos solares incapaces de producir  $\mu$   $\tau$
  - Los experimentos con neutrinos solares observan un deficit de neutrinos electrónicos, pero no detectan el exceso de los otros tipos

## Experimentos de desaparición

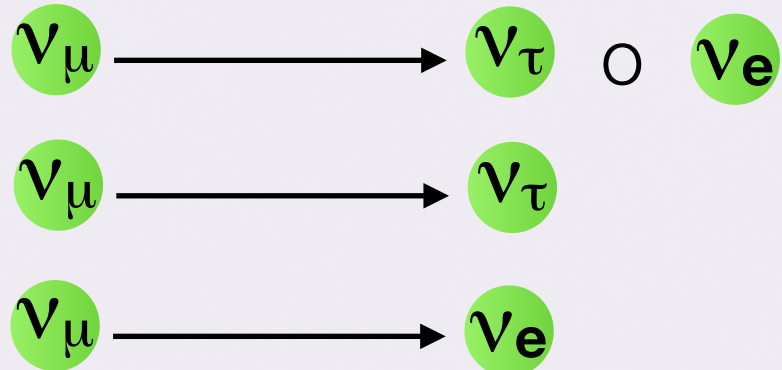


# Tipos de experimentos

atmosféricos



aceleradores  
larga distancia (>200 Km)



reactores  
corta distancia (1 km)



solares



reactores  
larga distancia (>50 km)



$\theta_{23}$   $\Delta m^2_{23}$

$\theta_{13}$   $\delta_{CP}$   $\theta_{23}$   $\Delta m^2_{23}$

$\theta_{13}$   $\Delta m^2_{23}$

$\theta_{12}$   $\Delta m^2_{12}$



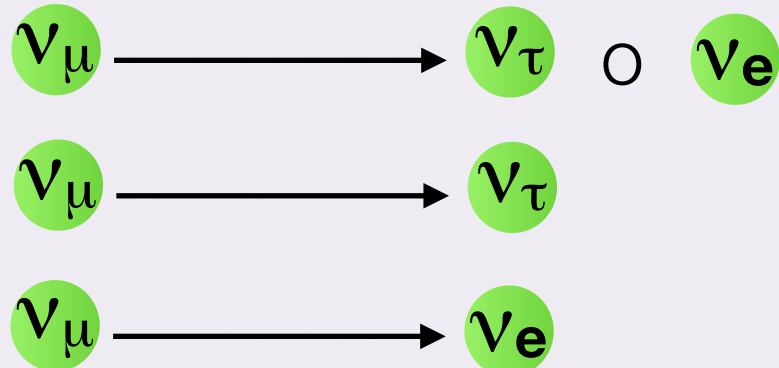
# Tipos de experimentos

atmosféricos



**D**

aceleradores  
larga distancia (>200 Km)



**D**

**A**

**A**

$\theta_{23}$   $\Delta m^2_{23}$

$\theta_{13}$   $\delta_{CP}$   $\theta_{23}$   $\Delta m^2_{23}$

reactores  
corta distancia (1 km)



**D**

$\theta_{13}$   $\Delta m^2_{23}$

solares



**D**

$\theta_{12}$   $\Delta m^2_{12}$

reactores  
larga distancia (>50 km)



**D**



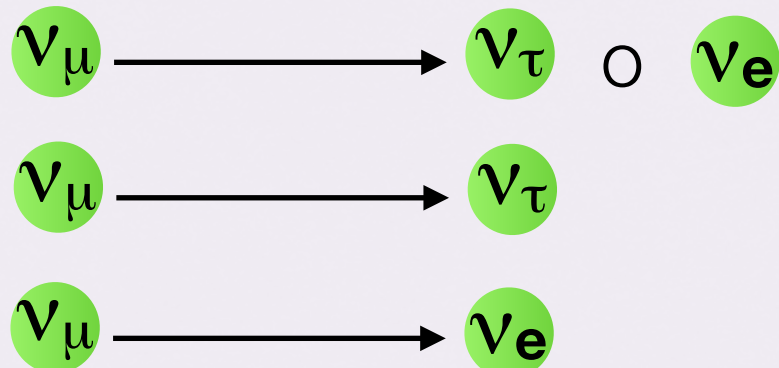
# Tipos de experimentos

atmosféricos



**D**

aceleradores  
larga distancia (>200 Km)



**D**

**A**

**A**

$\theta_{23}$   $\Delta m^2_{23}$

$\theta_{13}$   $\delta_{CP}$   $\theta_{23}$   $\Delta m^2_{23}$

reactores  
corta distancia (1 km)



**D**

$\theta_{13}$

$\Delta m^2_{23}$  (signo)

solares



**D**

$\theta_{12}$   $\Delta m^2_{12}$

reactores  
larga distancia (>50 km)



**D**



# La búsqueda violación de CP

- Se asume que CPT es una simetría exacta.  
Entonces

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

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

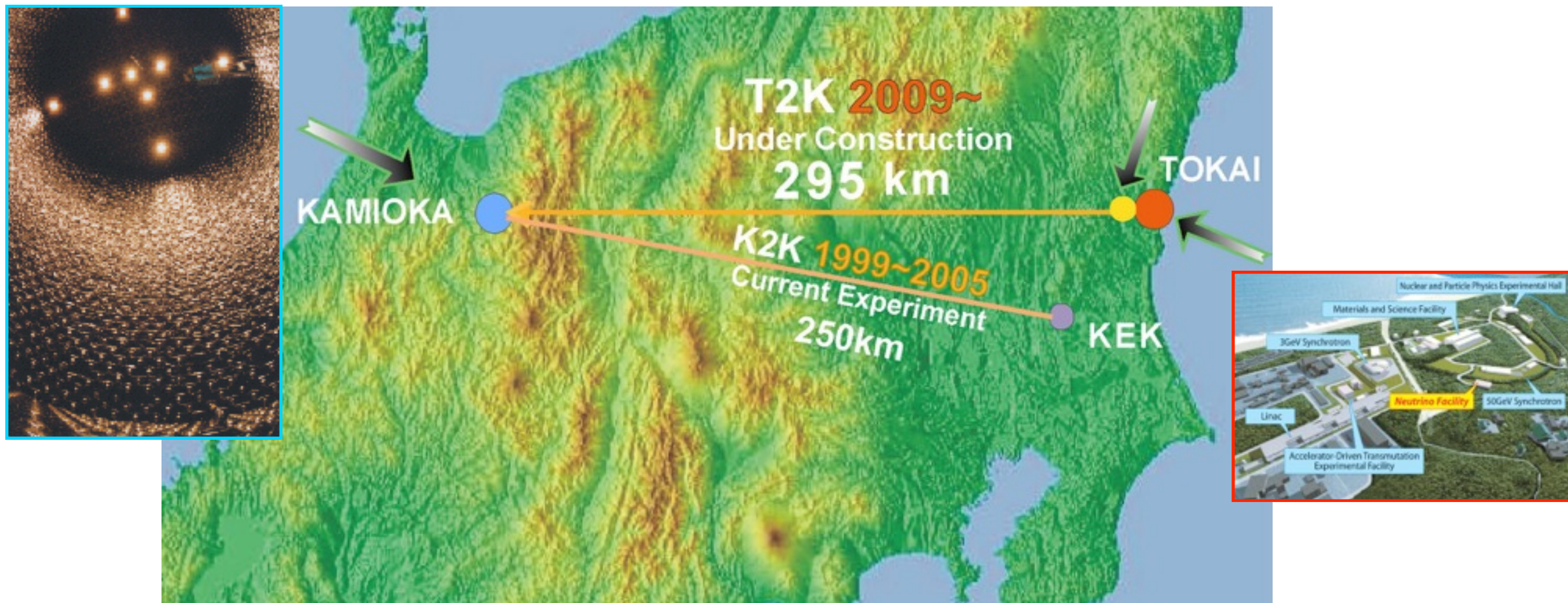
- Los experimentos de desaparición no son sensibles a la violación de CP
- Si lo son los experimentos de aparición

$$P(\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e) - P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) = 2 \cos \theta_{13} \sin 2\theta_{13} \sin 2\theta_{12} \sin 2\theta_{23} \sin \delta$$
$$\times \sin\left(\Delta m^2_{31} \frac{L}{4E}\right) \sin\left(\Delta m^2_{32} \frac{L}{4E}\right) \sin\left(\Delta m^2_{21} \frac{L}{4E}\right)$$



# El experimento T2K en Japón

- Primer experimento de aparición y pionero en la búsqueda de violación de CP
- Nuestro grupo participa en T2K desde 2006





- Todos los haces de neutrinos se producen así

blanco  
metálico



*detector*

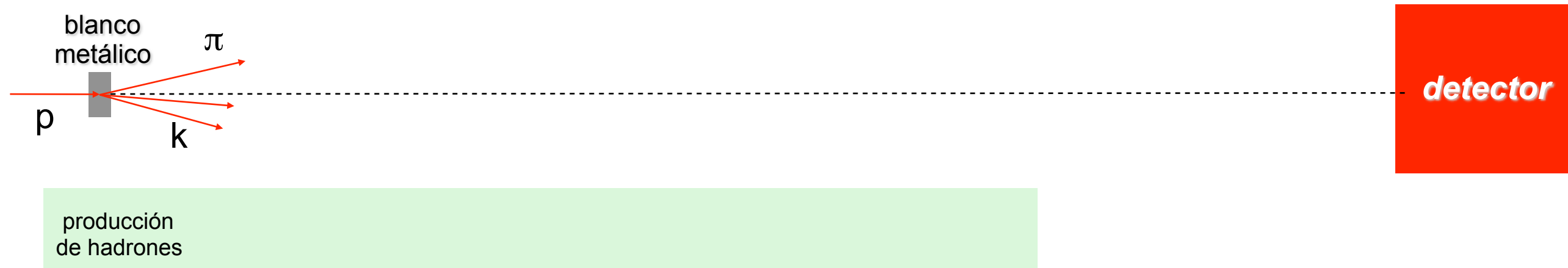


- En T2K buscamos un exceso de neutrinos electrónicos en el detector situado a 295 km



# Haces de neutrinos

- Todos los haces de neutrinos se producen así

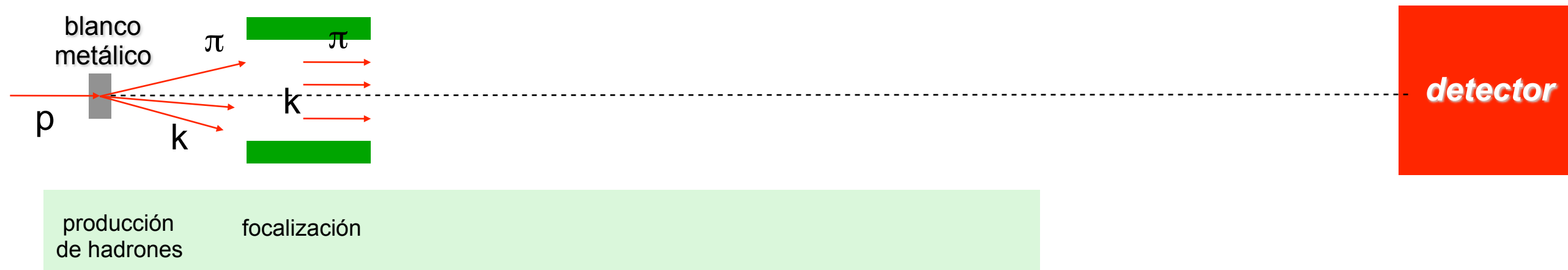


- En T2K buscamos un exceso de neutrinos electrónicos en el detector situado a 295 km



# Haces de neutrinos

- Todos los haces de neutrinos se producen así

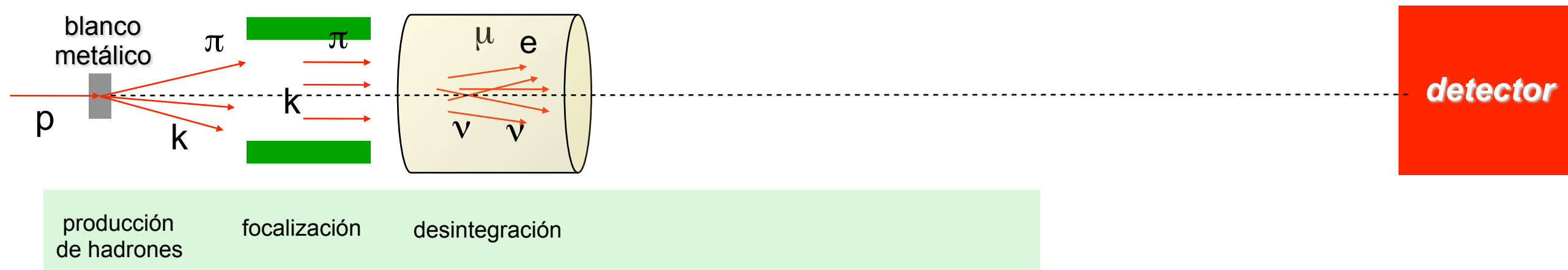


- En T2K buscamos un exceso de neutrinos electrónicos en el detector situado a 295 km



# Haces de neutrinos

- Todos los haces de neutrinos se producen así

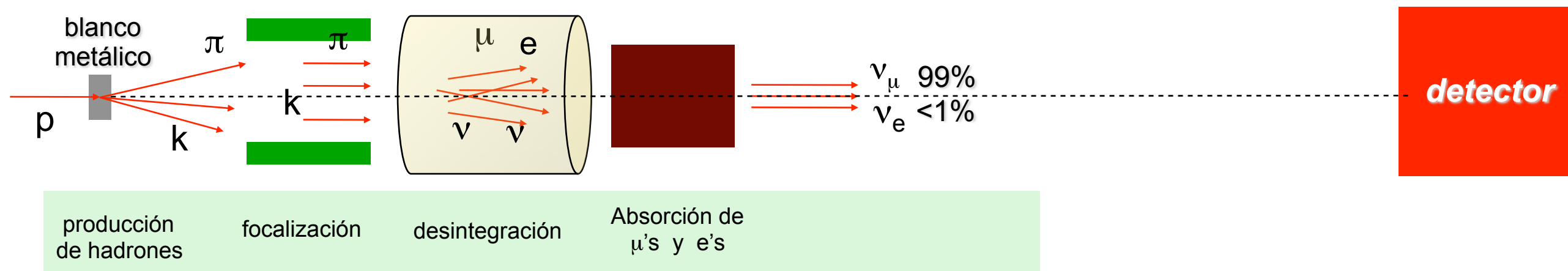


- En T2K buscamos un exceso de neutrinos electrónicos en el detector situado a 295 km



# Haces de neutrinos

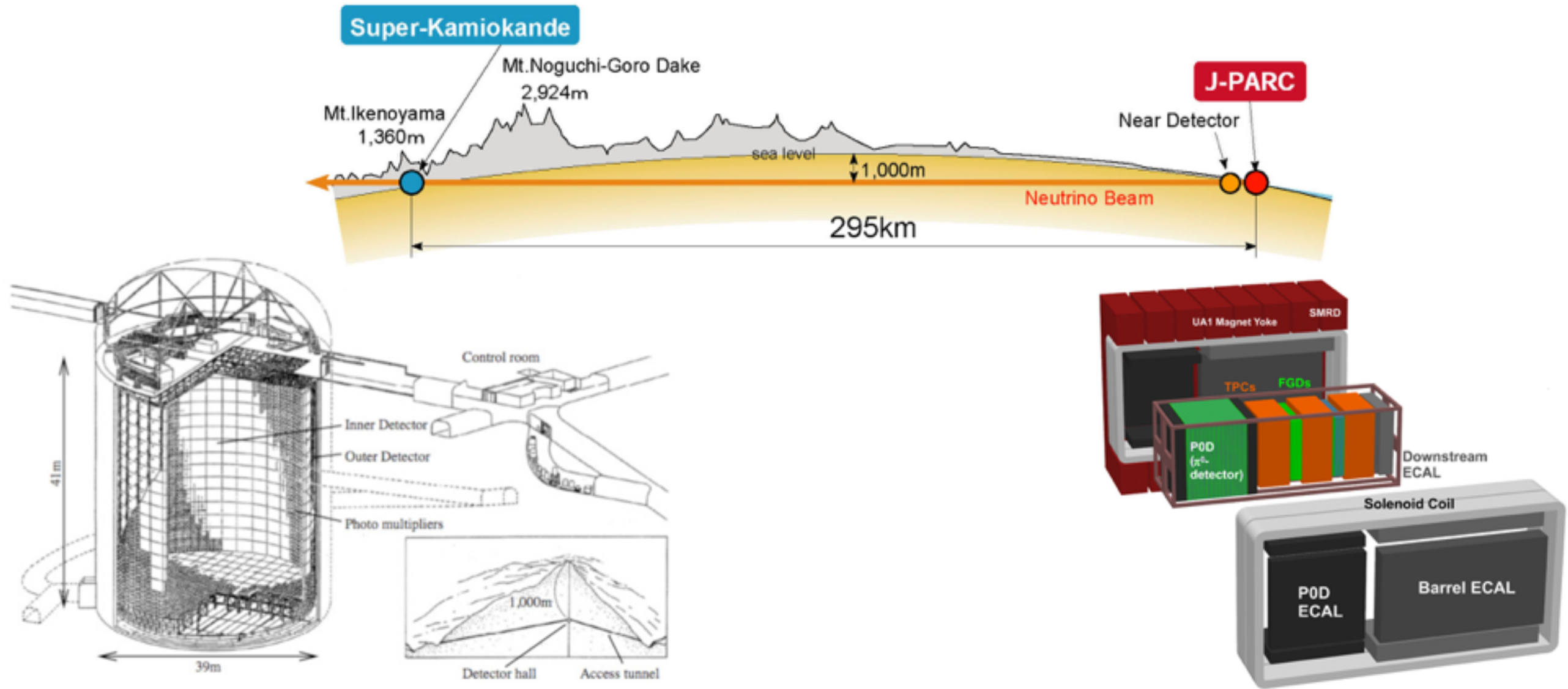
- Todos los haces de neutrinos se producen así



- En T2K buscamos un exceso de neutrinos electrónicos en el detector situado a 295 km

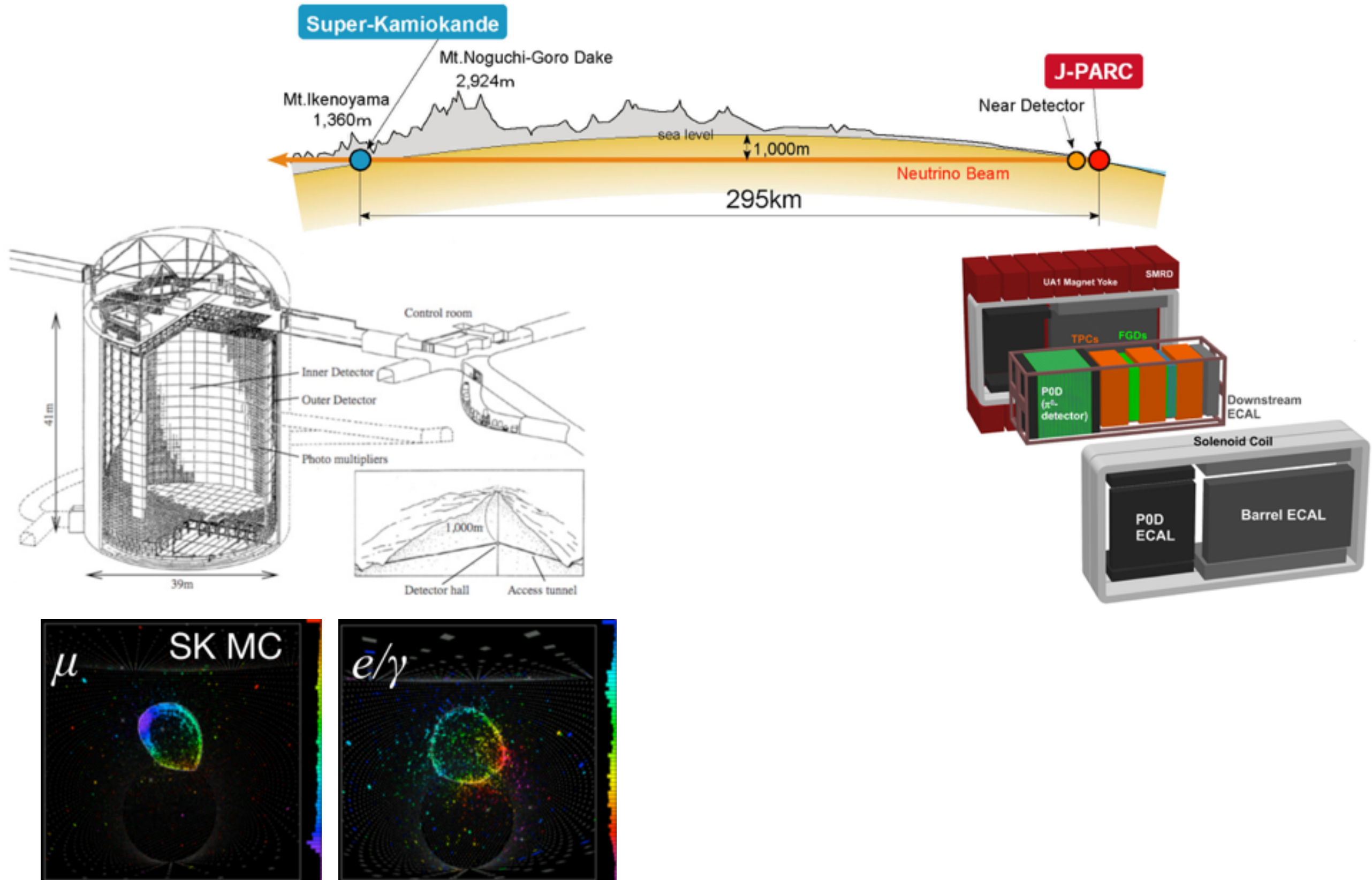


# Los detectores de T2K



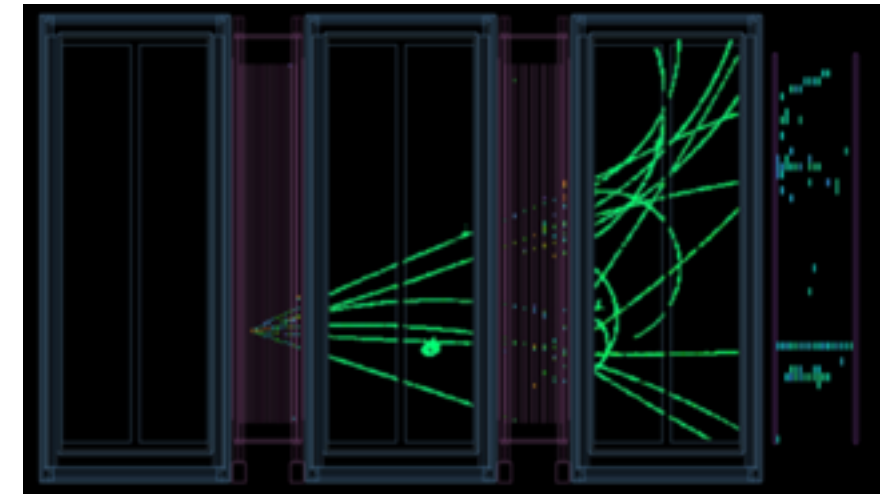
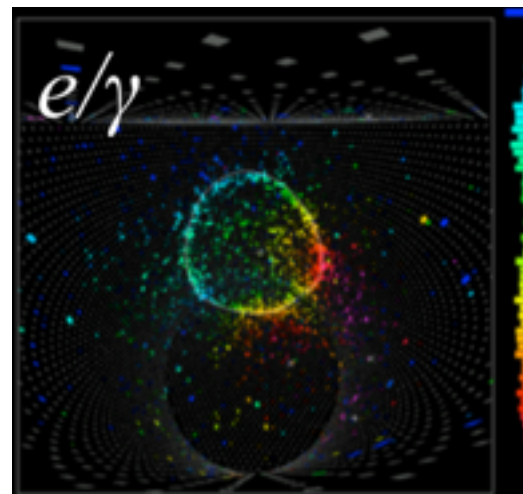
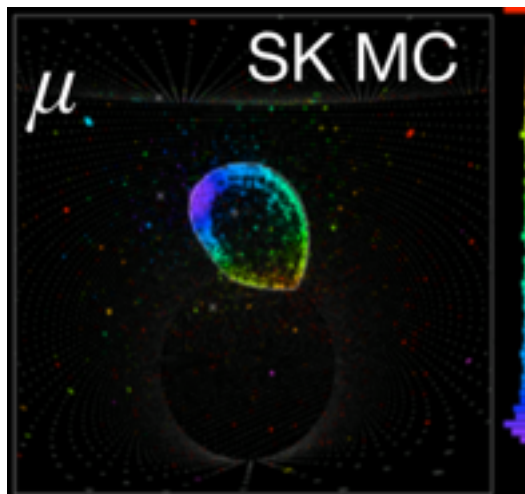
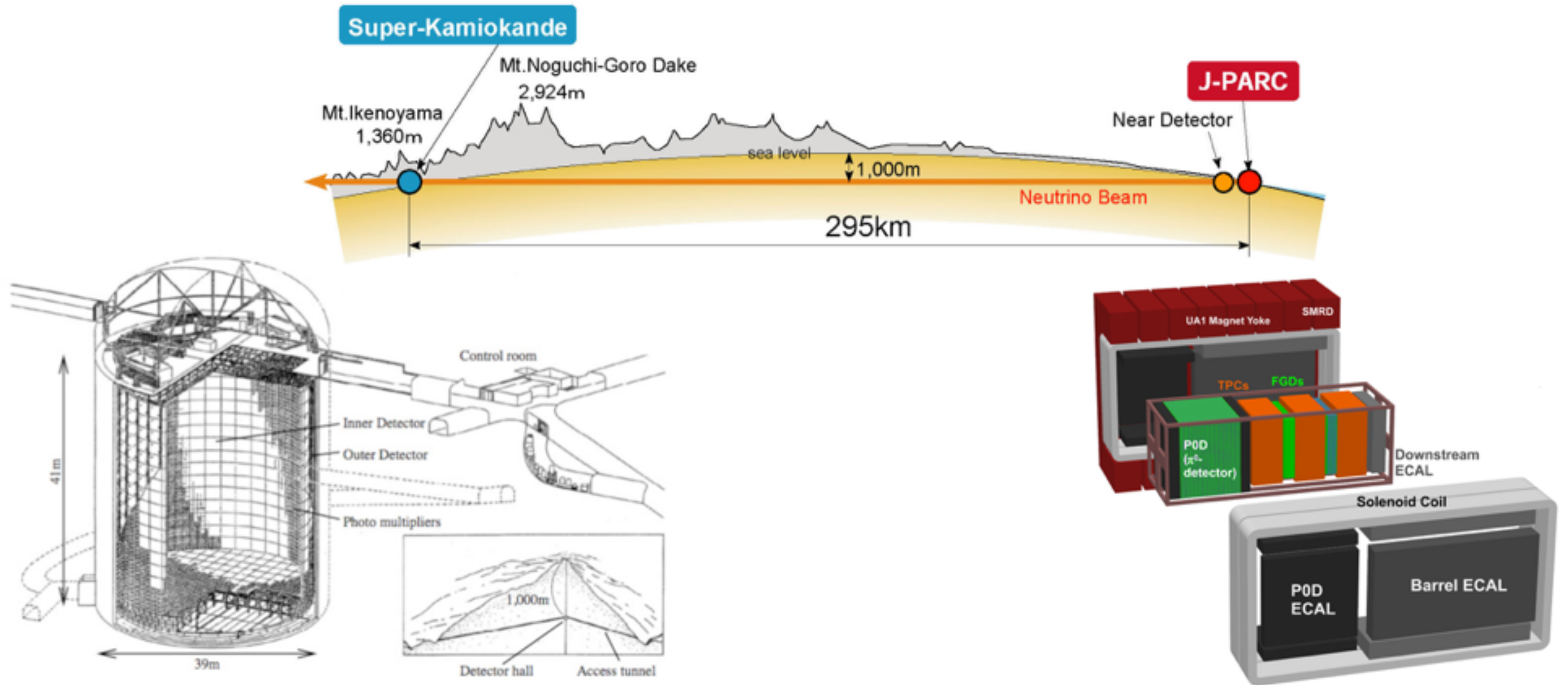


# Los detectores de T2K





# Los detectores de T2K

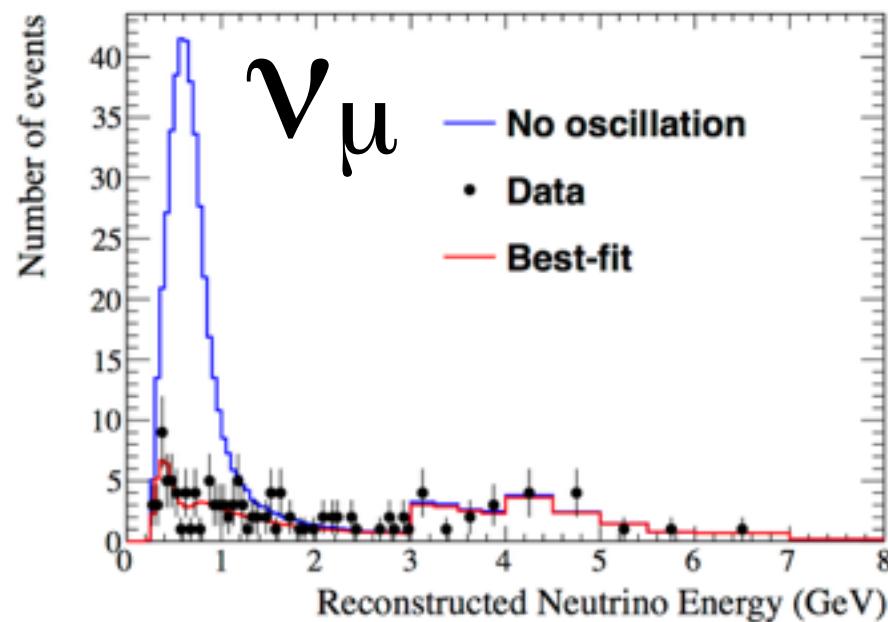




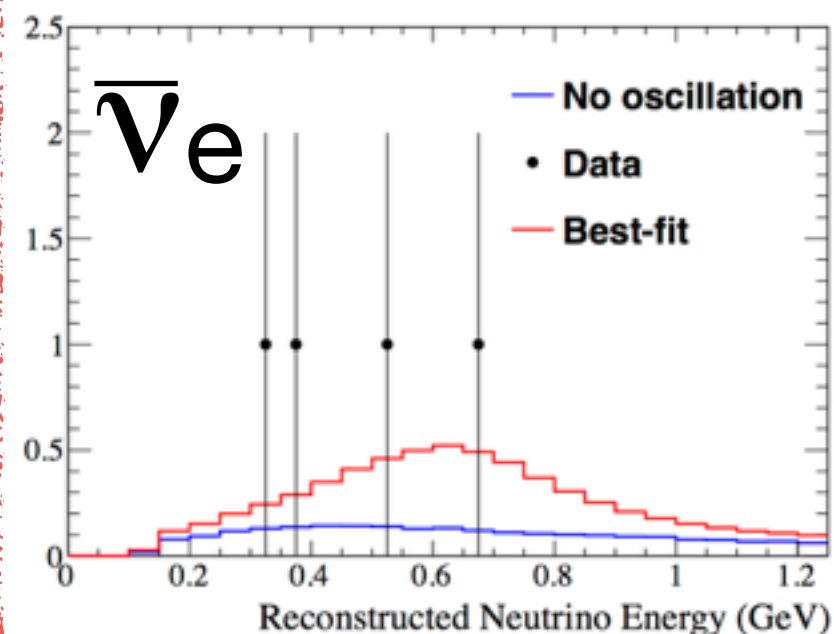
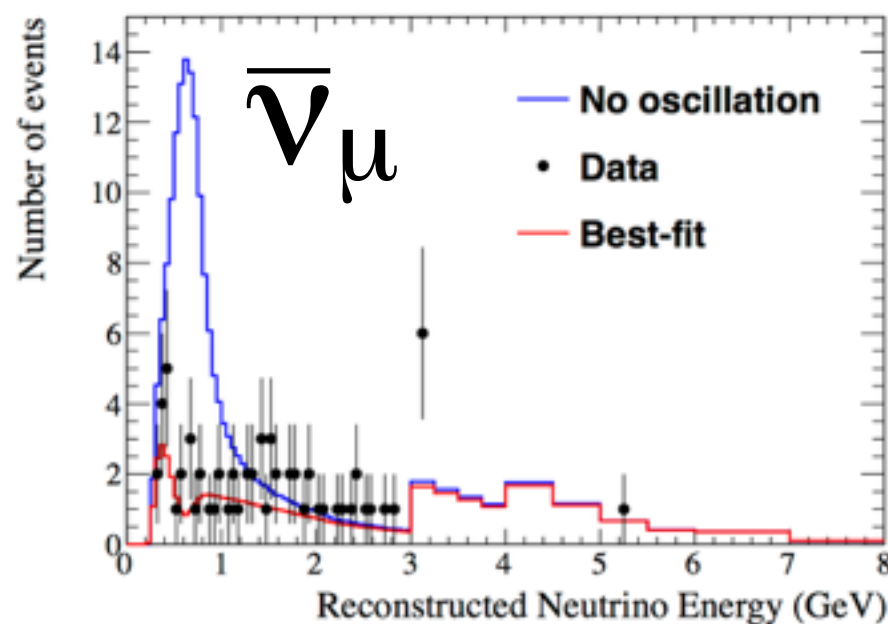
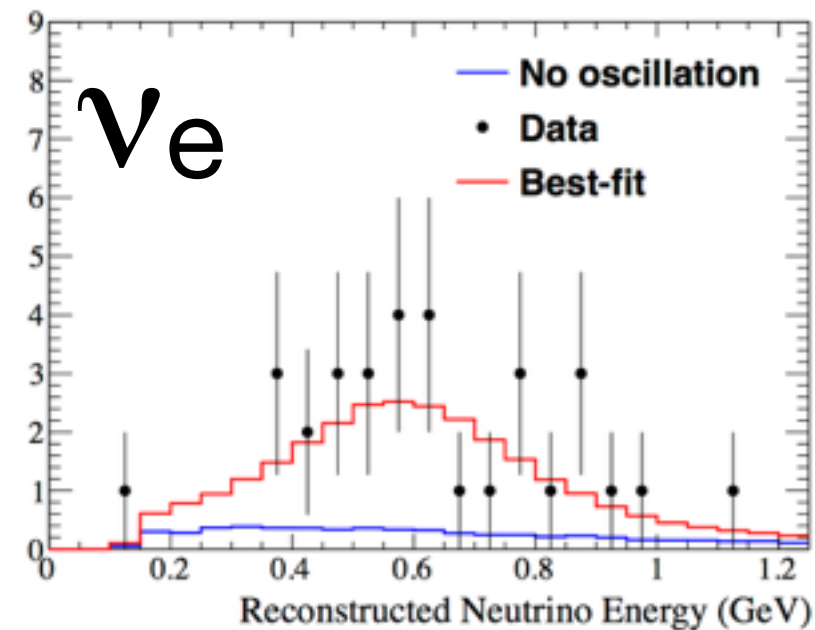
# Las oscilaciones de T2K



desaparición de  $\bar{\nu}_\mu$



aparición de  $\bar{\nu}_e$





# ¿ Que hacemos en T2K ?

---



- Viajar mucho a Japón (3 o 4 veces al año)
- Además hemos hecho todo tipo de estudios de **Física en el detector cercano**
  - Medida del flujo antes de oscilar
  - Estudio de interacciones de neutrinos
- Y hemos hecho el primer **análisis de oscilaciones** combinando los canales de aparición y desaparición
  - Premio extraordinario de doctorado 2015



# ¿Que más?

---

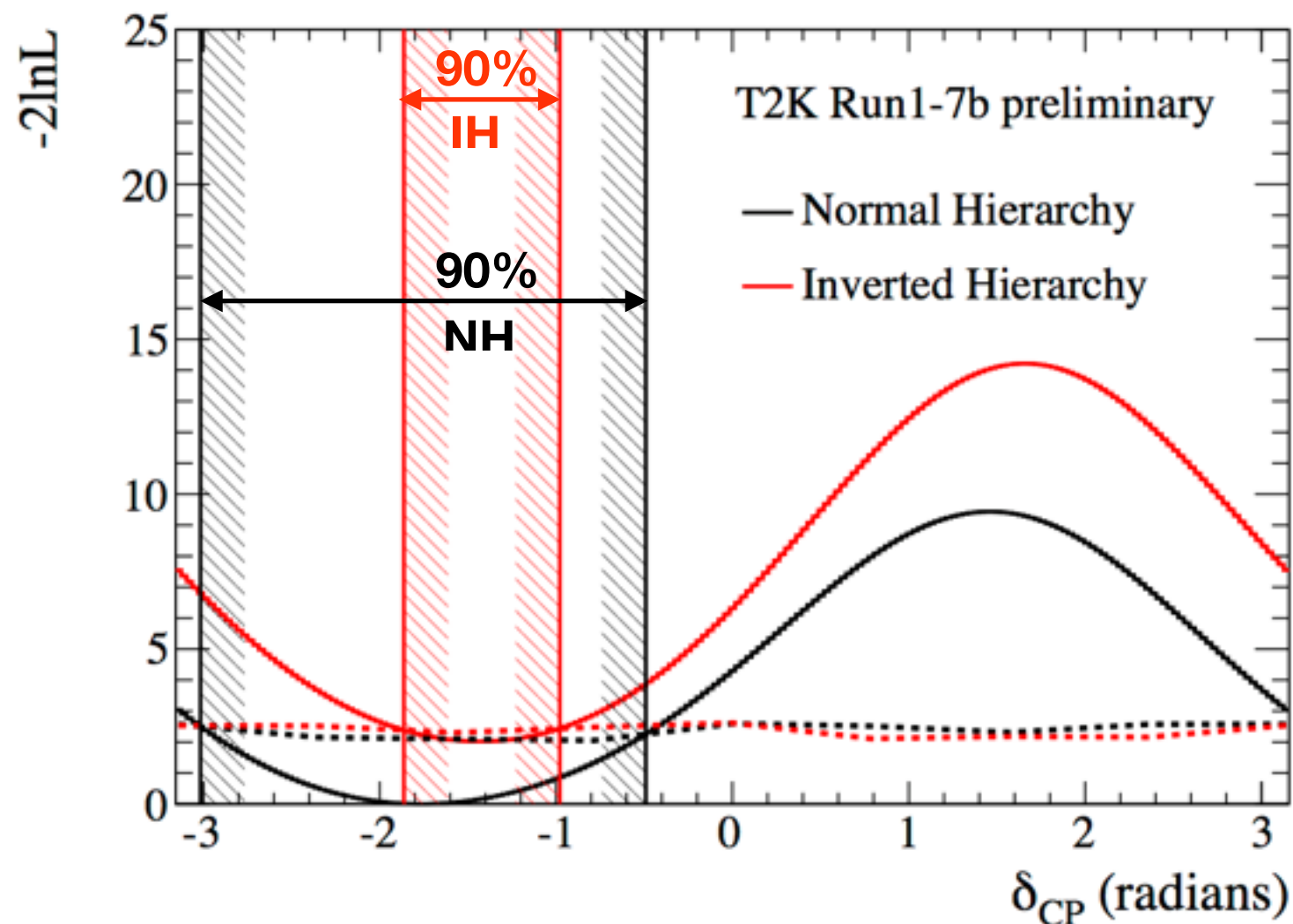


- La Física experimental no es solo esto:
  - Participamos en el diseño del detector
  - En los prototipos (en el CERN)
  - En la calibración del detector
  - **En la elaboración del programa de reconstrucción**
  - **En la elaboración del programa de análisis**
  - En la toma de datos ....



# ¿ Observa T2K violación de CP ?

- 90% de probabilidad de que  $\delta_{CP}$  no sea 0
- Para confirmarlo esta probabilidad tiene que ser  $>99.9\%$ . Necesitamos más datos





# ¿Que viene después?

---

- T2K no es el final de la historia
- En los cinco años que le quedan de toma de datos no detectará suficientes neutrinos para descubrir la violación de CP, aunque puede quedarse muy cerca (tenemos indicaciones!!)
- Necesitamos un haz más potente y un detector más grande y/o eficiente
  - ¿Es esto posible? ¿No está Super-Kamiokande a límite de lo que el hombre puede construir?



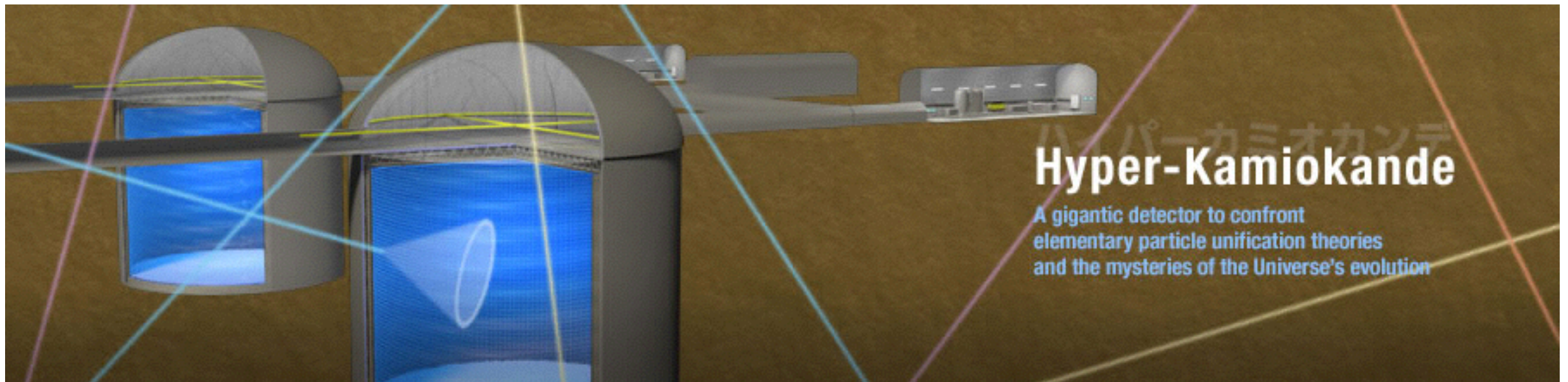
# No nos rendiremos ...

---

- Los Físicos experimentales son tenaces y llevan la tecnología al límite
- Muchos avances tecnológicos que luego se exportan a otros campos nacen en la Física experimental
  - La web (nació en el CERN), la GRID
  - Los sistemas de adquisición de datos más veloces
  - Los láseres más potentes y precisos
  - Técnicas de excavación y mineras



# Hyper-Kamiokande (HK)

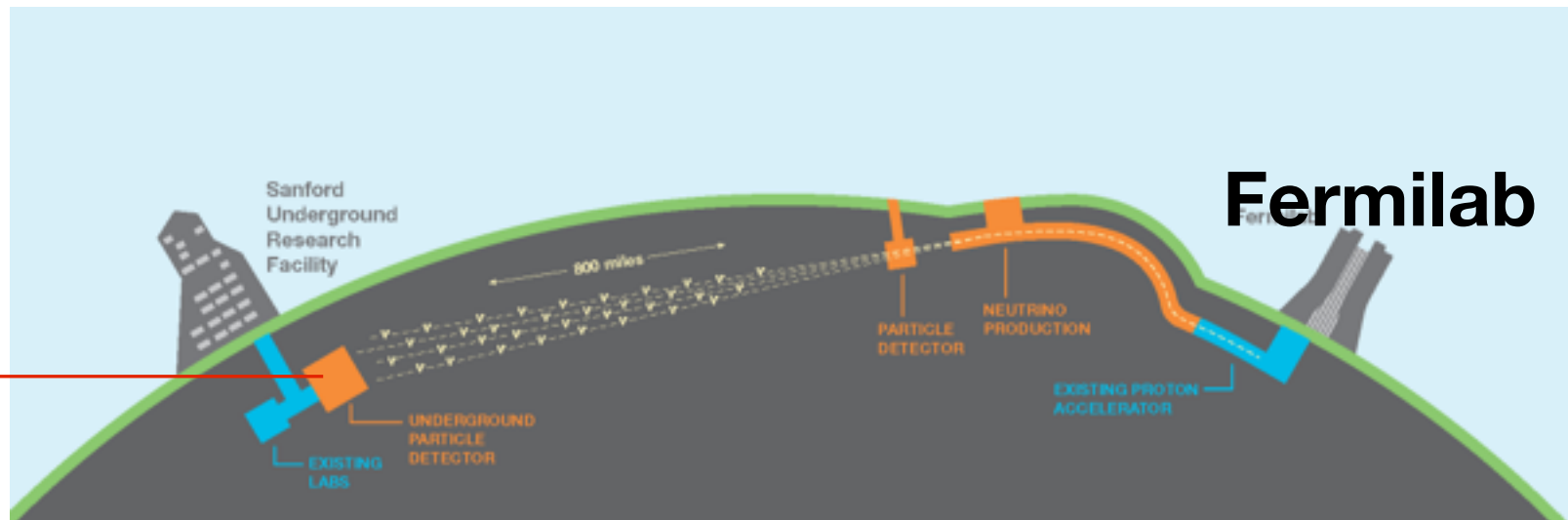
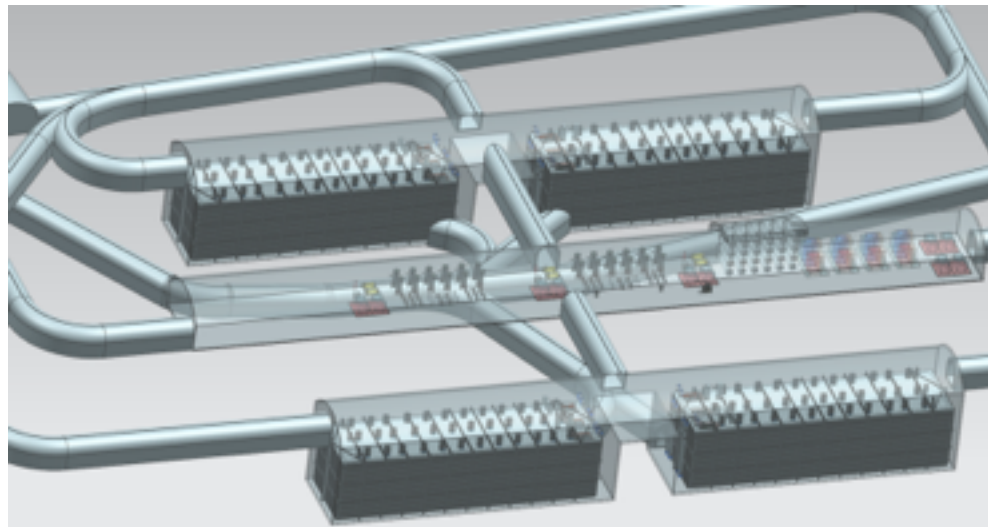


<http://www.hyper-k.org/en/>

- En Japón. Similar a T2K pero:
  - 20 x Super-Kamiokande (millón de toneladas)
  - Un haz 5 veces más potente



# Deep Underground Neutrino Experiment



- Una técnica diferente, similar a la de NEXT, pero con Argón líquido en lugar de Xe gas
- 4 TPCs de 10.000 toneladas cada una
  - La masa es 20 veces menor que en HK pero la eficiencia de detección y la precisión mucho mayores



# ¿ Qué hacemos en DUNE ?

---

- Viajar a EEUU y al CERN varias veces al año
- Además:
  - Nos encargamos de adaptar el programa de análisis de T2K
  - Participamos en los prototipos que serán contruidos en el CERN (próximos tres años)
    - Somos responsables del sistema de control
  - Somos coordinadores de Física de desintegración del protón



# Los grandes laboratorios

---

- Grandes laboratorios en Física de Partículas
  - CERN (Suiza)
  - Fermilab (USA)
  - KEK - JPARC (Japón)
- Los haces de neutrinos son tan complejos que solo los grandes laboratorios tienen capacidad para producirlos
- En la actualidad nuestro grupo esta presente en todos ellos



# Conclusiones

---

- Las oscilaciones de neutrinos son hasta la fecha la única Física más allá del Modelo Estándar
- Una auténtica revolución durante los últimos 20 años (premio Nóbel en 2002 y 2015)
- Pero es curioso ...
- ... pues es posible que podamos cerrar este capítulo de la Física durante los próximos 20 años con experimentos como T2K y DUNE