

IFIC summer school  
2017

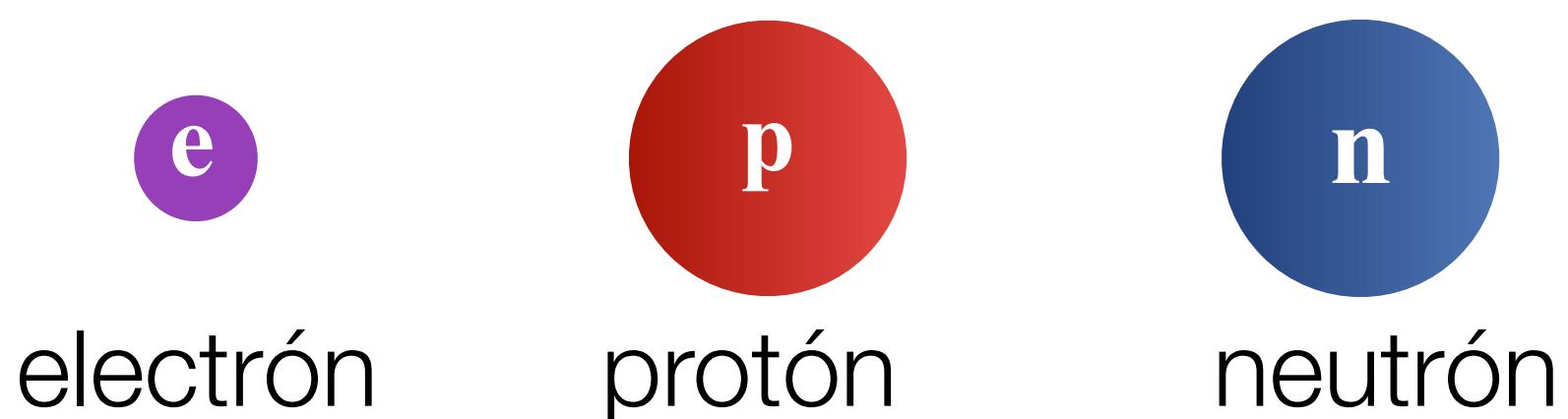
# Oscilaciones de Neutrinos

---

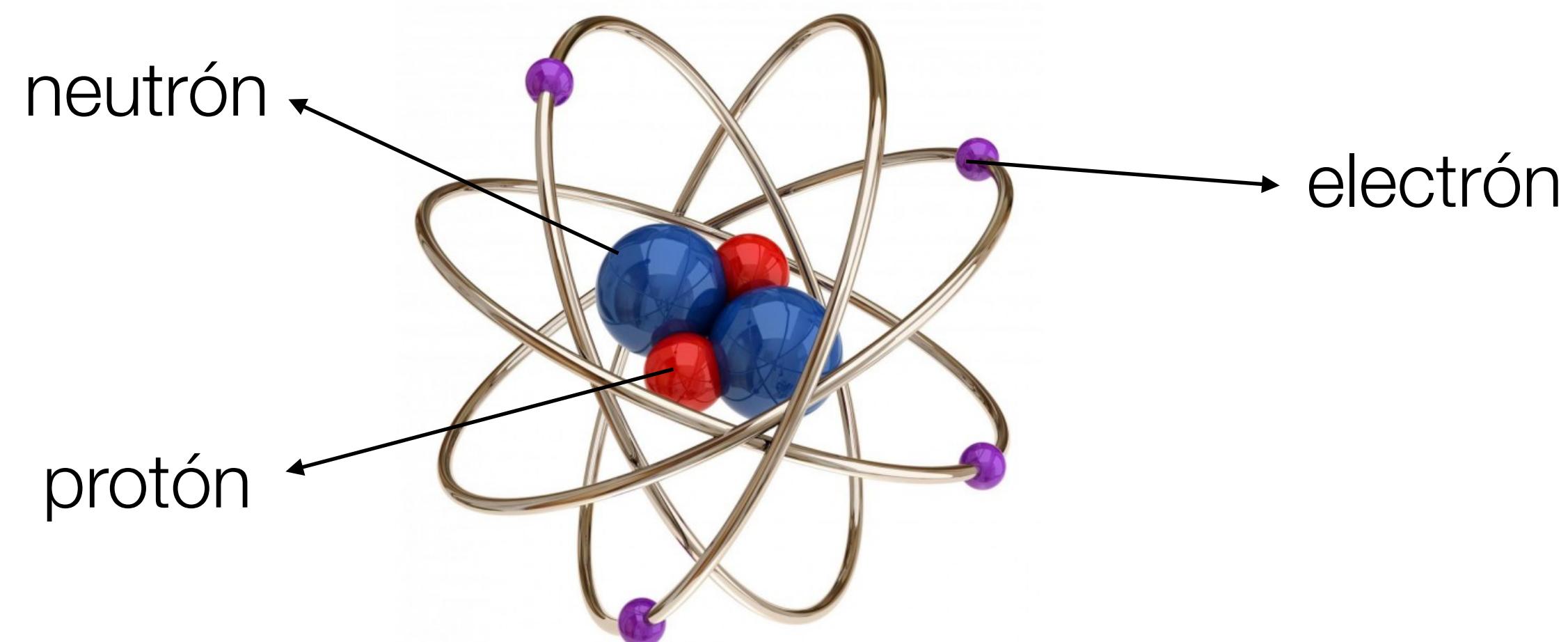
*Anselmo Cervera Villanueva*  
**IFIC (UV- CSIC)**  
**Valencia**

# 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

---

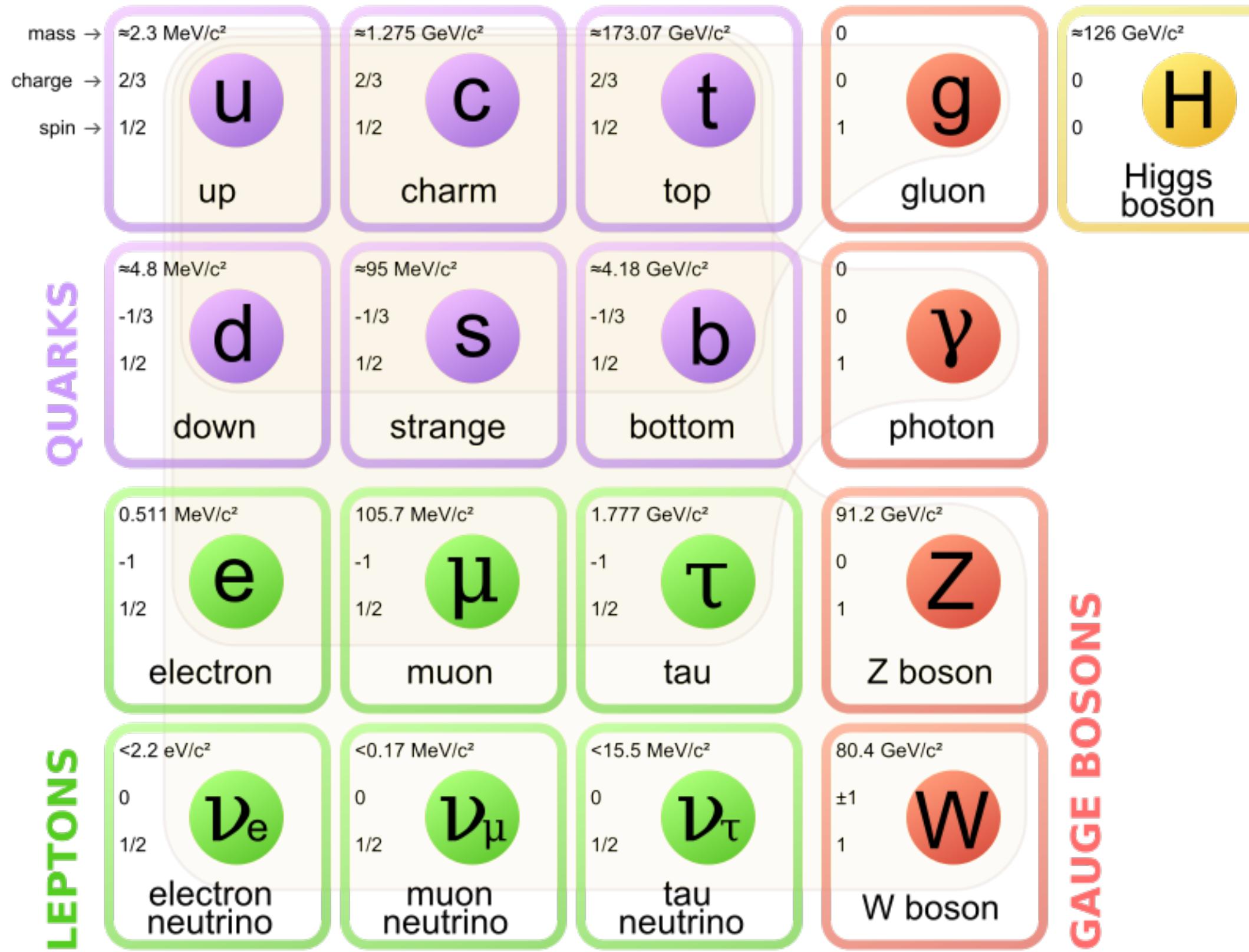
- Incluso vosotros estáis hechos de esas partículas



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

# El universo de Arcadi

- Estás son las partículas fundamentales en el modelo standard



# El universo de Arcadi

- Estás son las partículas fundamentales en el modelo standard



# El universo de Arcadi

- Estás son las partículas fundamentales en el modelo standard



# El anti-Universo

- Cada partícula tiene asociada una antipartícula

u ū

$e^-$   $e^+$

$$v_e \quad \bar{v}_e$$

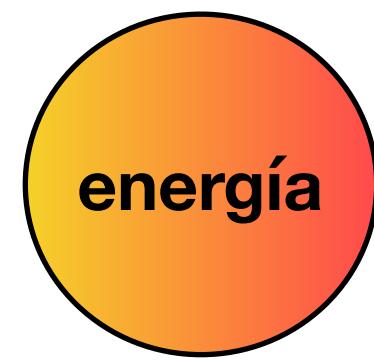
también para partículas compuestas

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

# El Big Bang

---

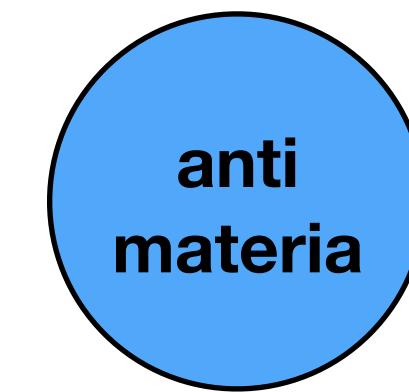
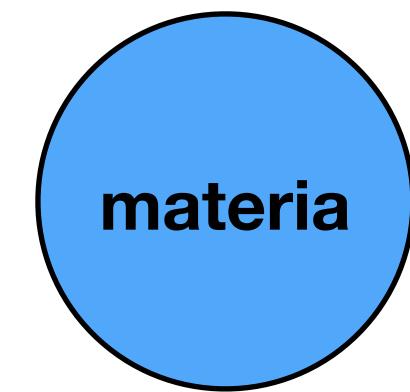
- A partir de una enorme cantidad de energía (concentrada) se produjeron iguales cantidades de materia y de antimateria



# El Big Bang

---

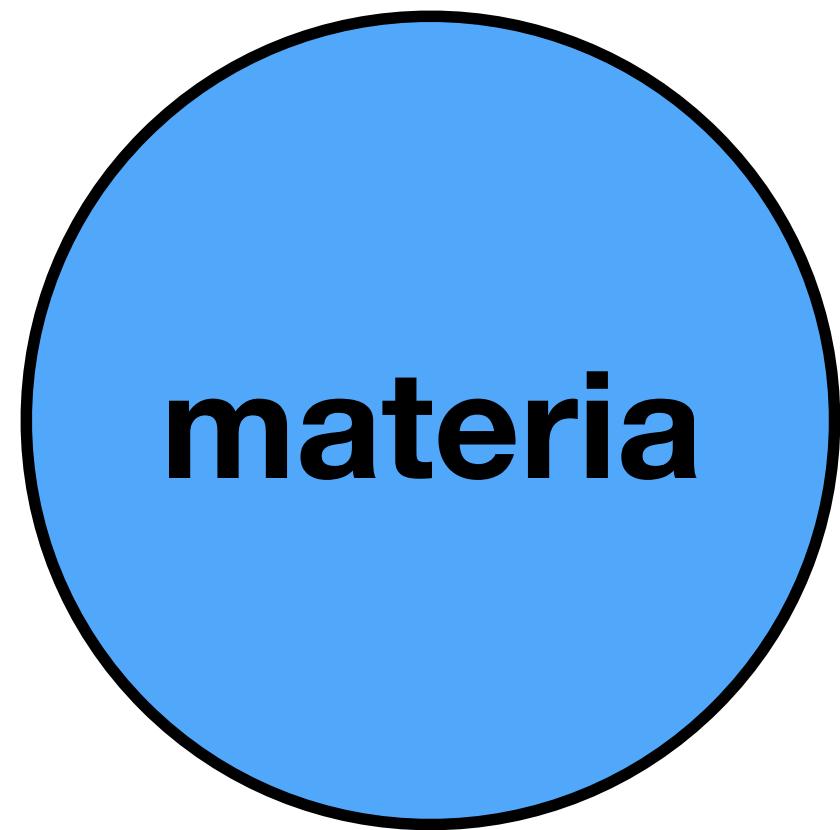
- A partir de una enorme cantidad de energía (concentrada) se produjeron iguales cantidades de materia y de antimateria



# 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~~

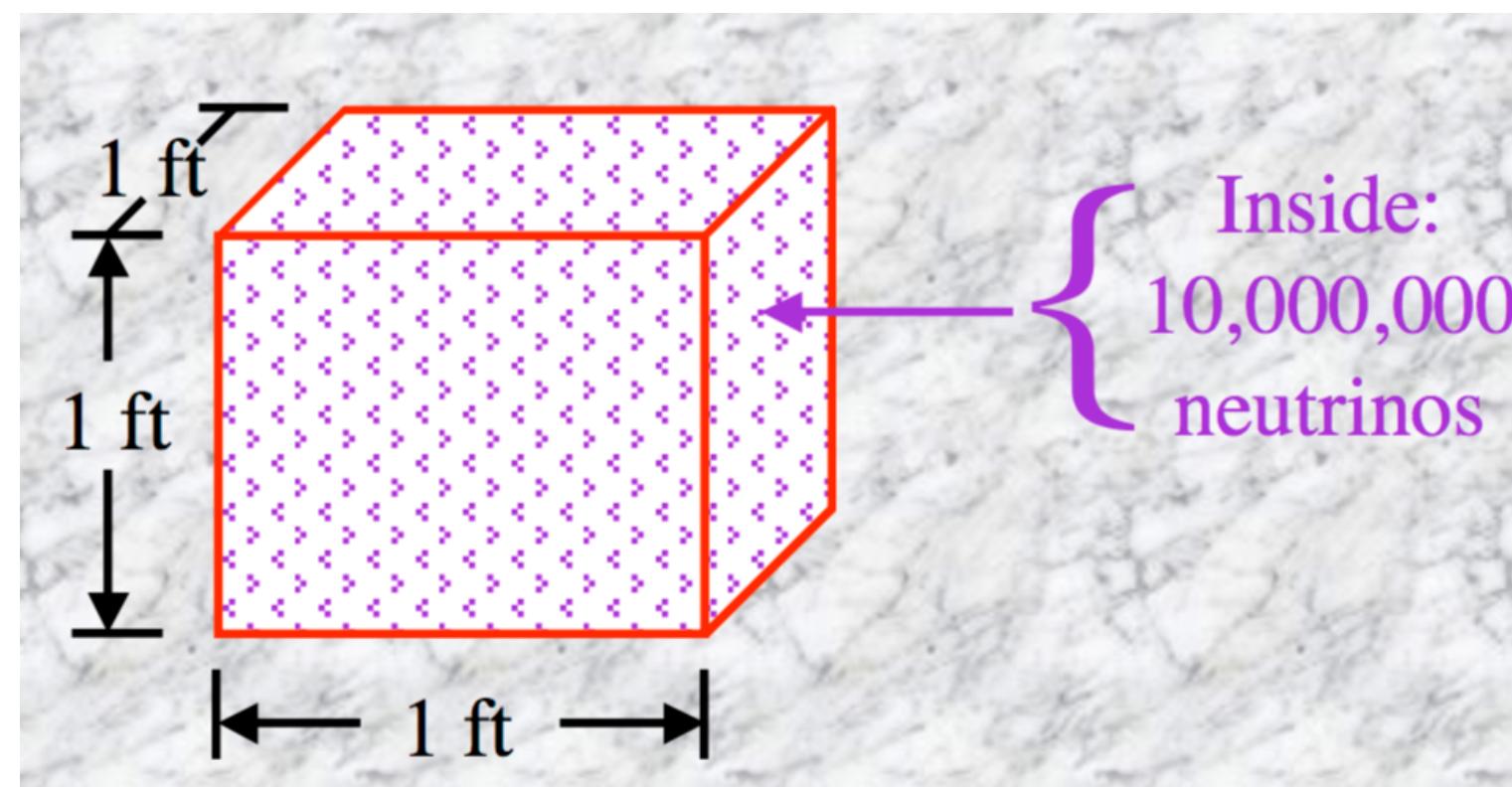
# Simetría Carga-Paridad (CP)

---

- 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

# Neutrinos por todas partes

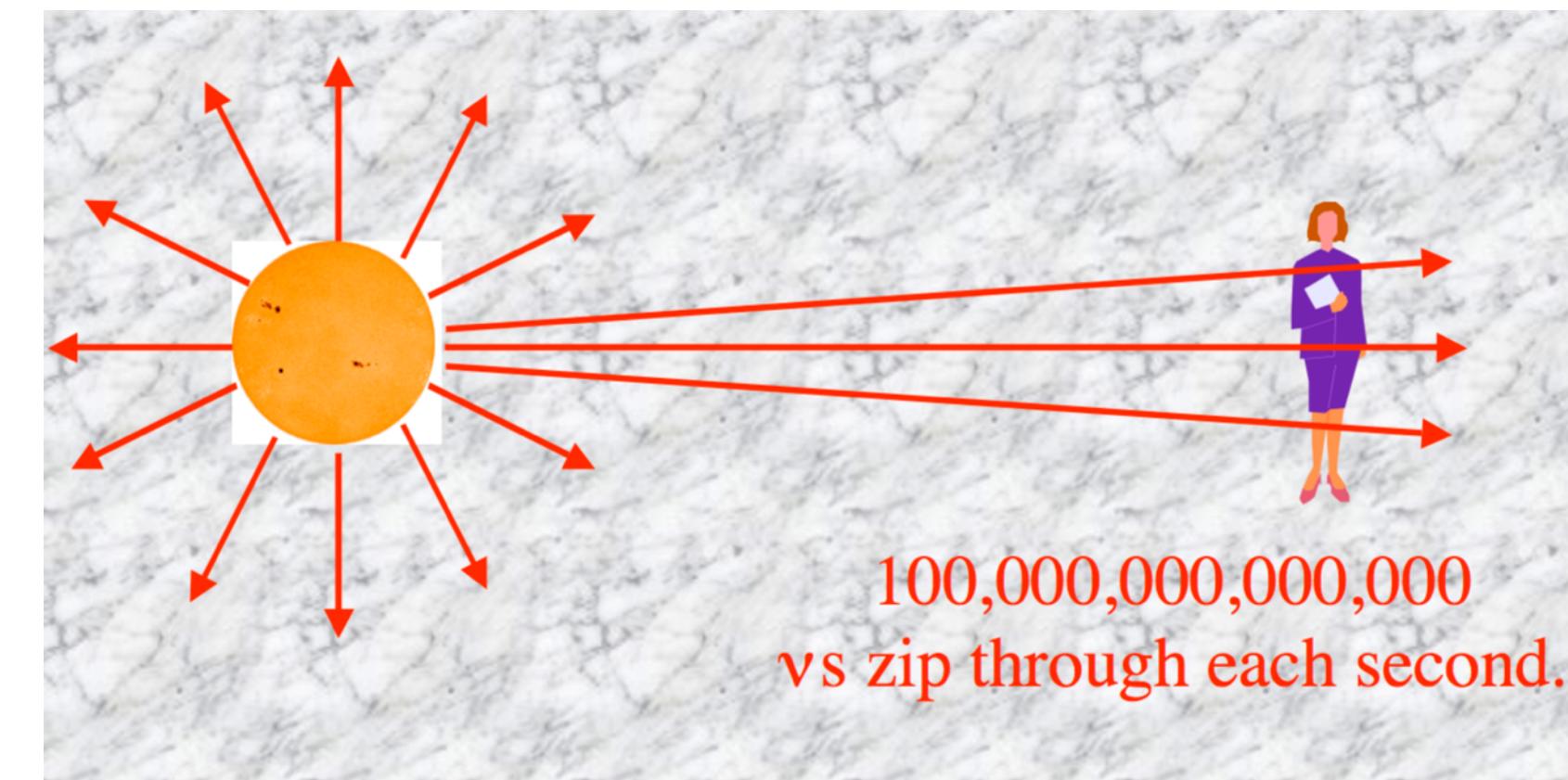
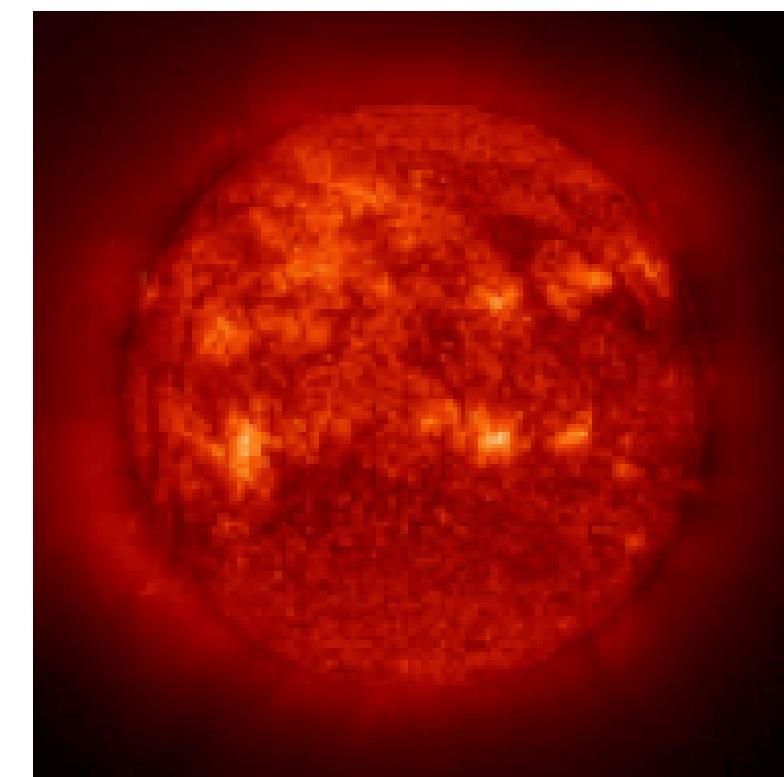
- Por cada proton, neutron o electron el universo contiene 1000 millones de neutrinos que provienen del Big Bang



**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



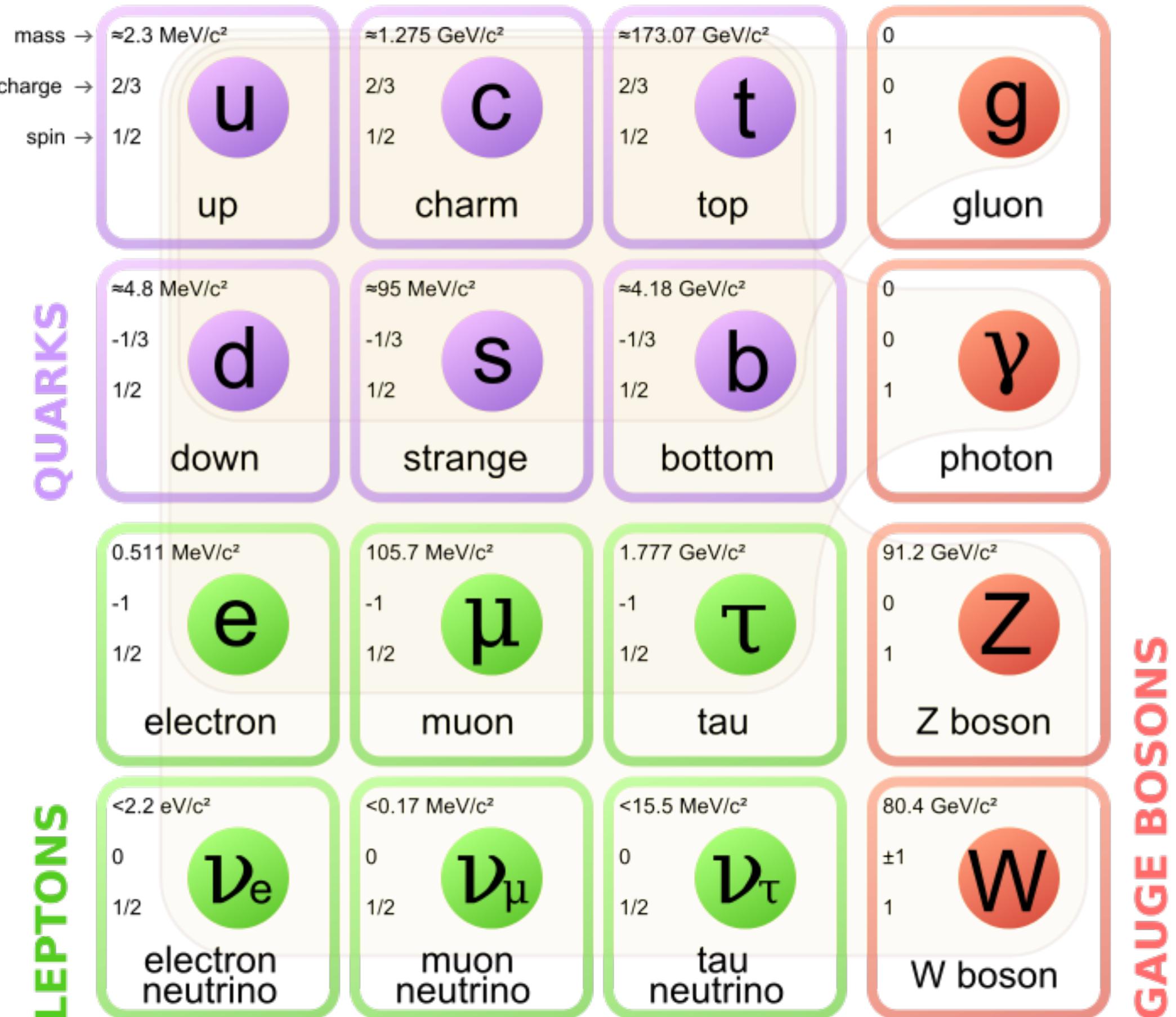
- Deberíamos estar preocupados, ¿ no ?

# La timidez de los neutrinos

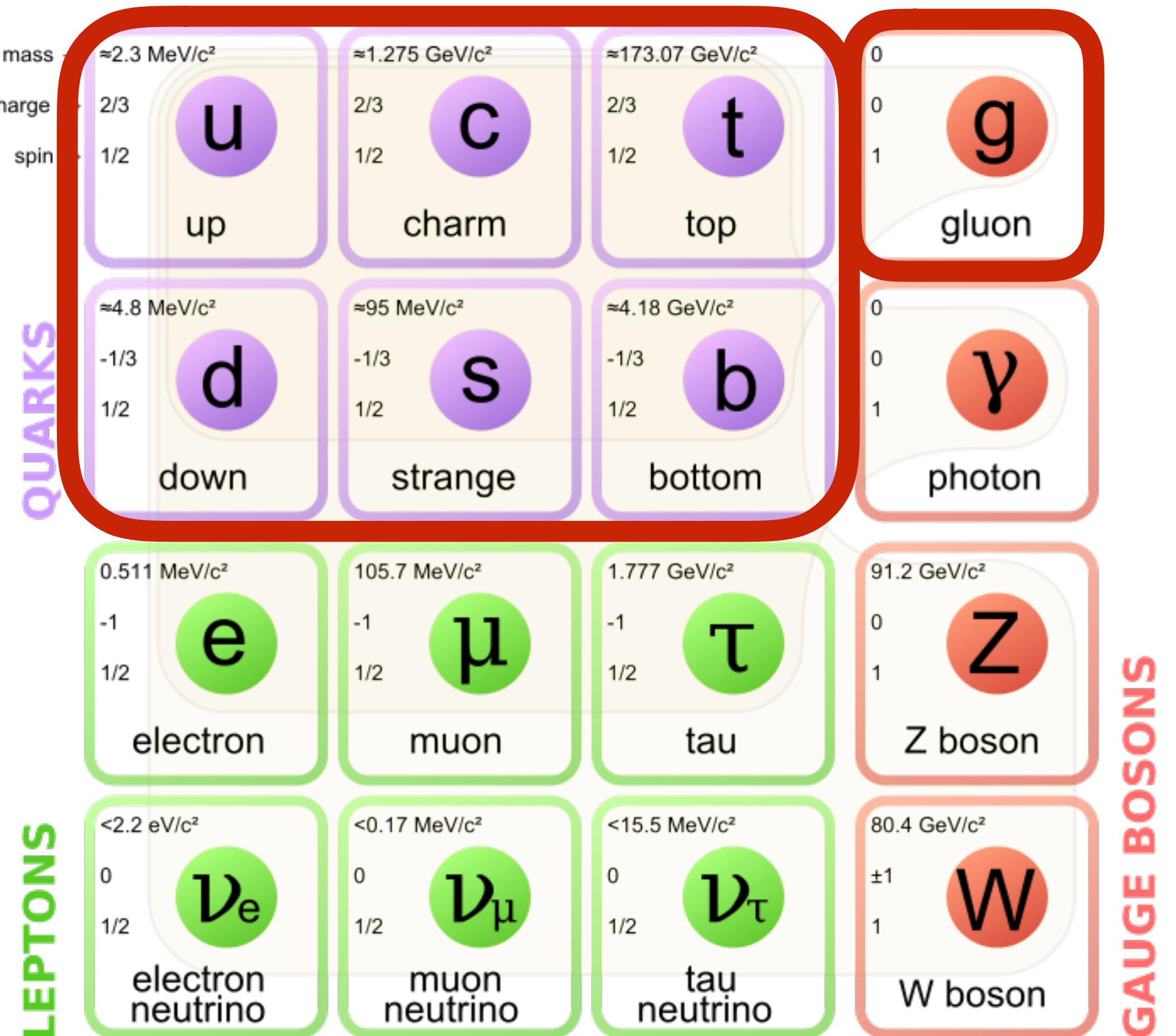
---

- Los neutrinos son muy tímidos y no interaccionan con nada ni con nadie
- Un neutrino solar tiene que cruzarse con 10,000,000,000,000,000 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



# Las cuatro fuerzas fundamentales



Fuerte (1)

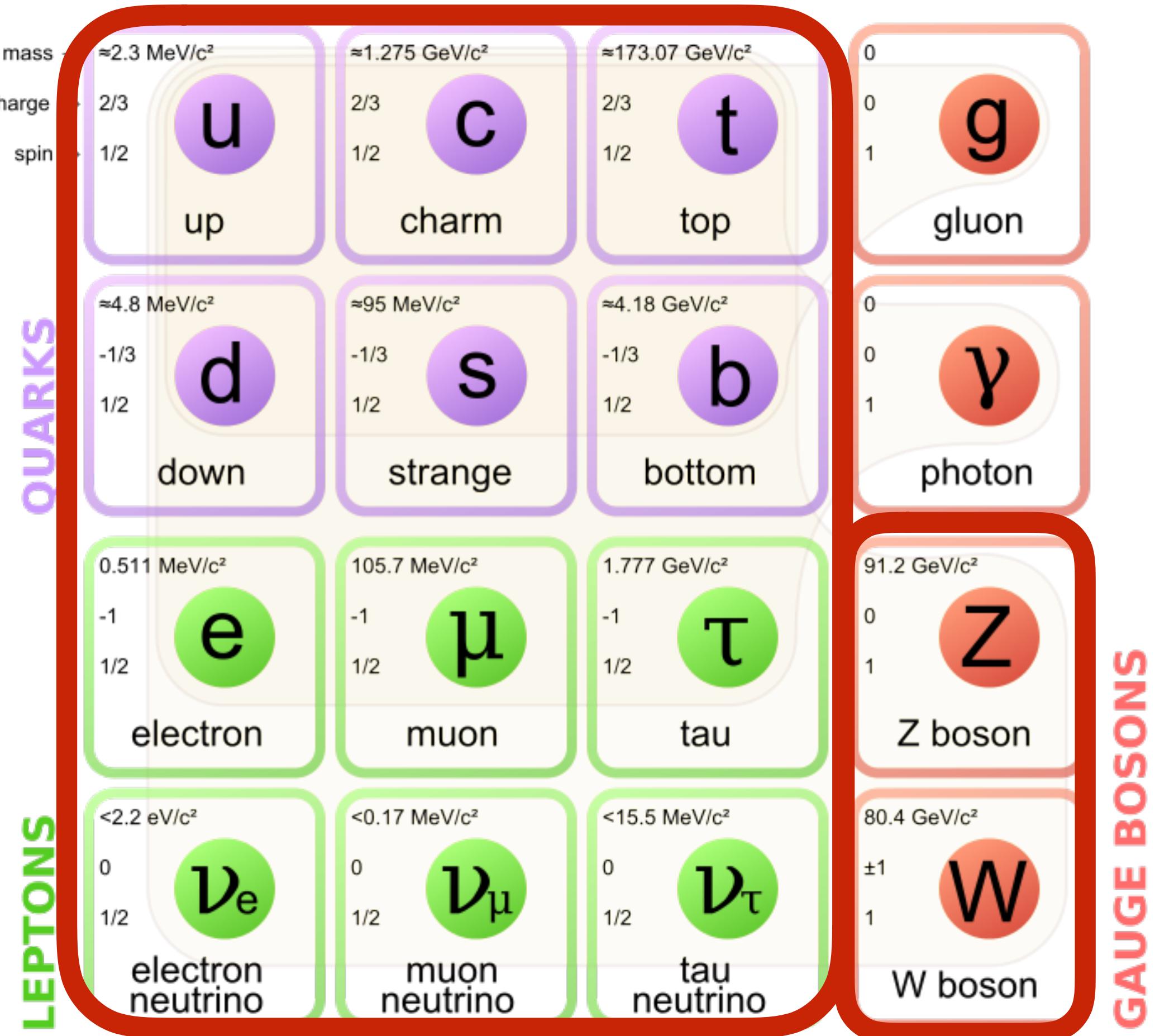
# Las cuatro fuerzas fundamentales

	mass	$\approx 2.3 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.275 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.07 \text{ GeV}/c^2$	
charge	2/3	2/3	2/3	2/3	
spin	1/2	1/2	1/2	1/2	
<b>QUARKS</b>	up	u	c	t	gluon
	down	d	s	b	photon
<b>LEPTONS</b>	electron	e	$\mu$	$\tau$	Z boson
	electron neutrino	$\nu_e$	$\nu_\mu$	$\nu_\tau$	W boson

**Electromagnética ( $10^{-3}$ )**

**GAUGE BOSONS**

# Las cuatro fuerzas fundamentales



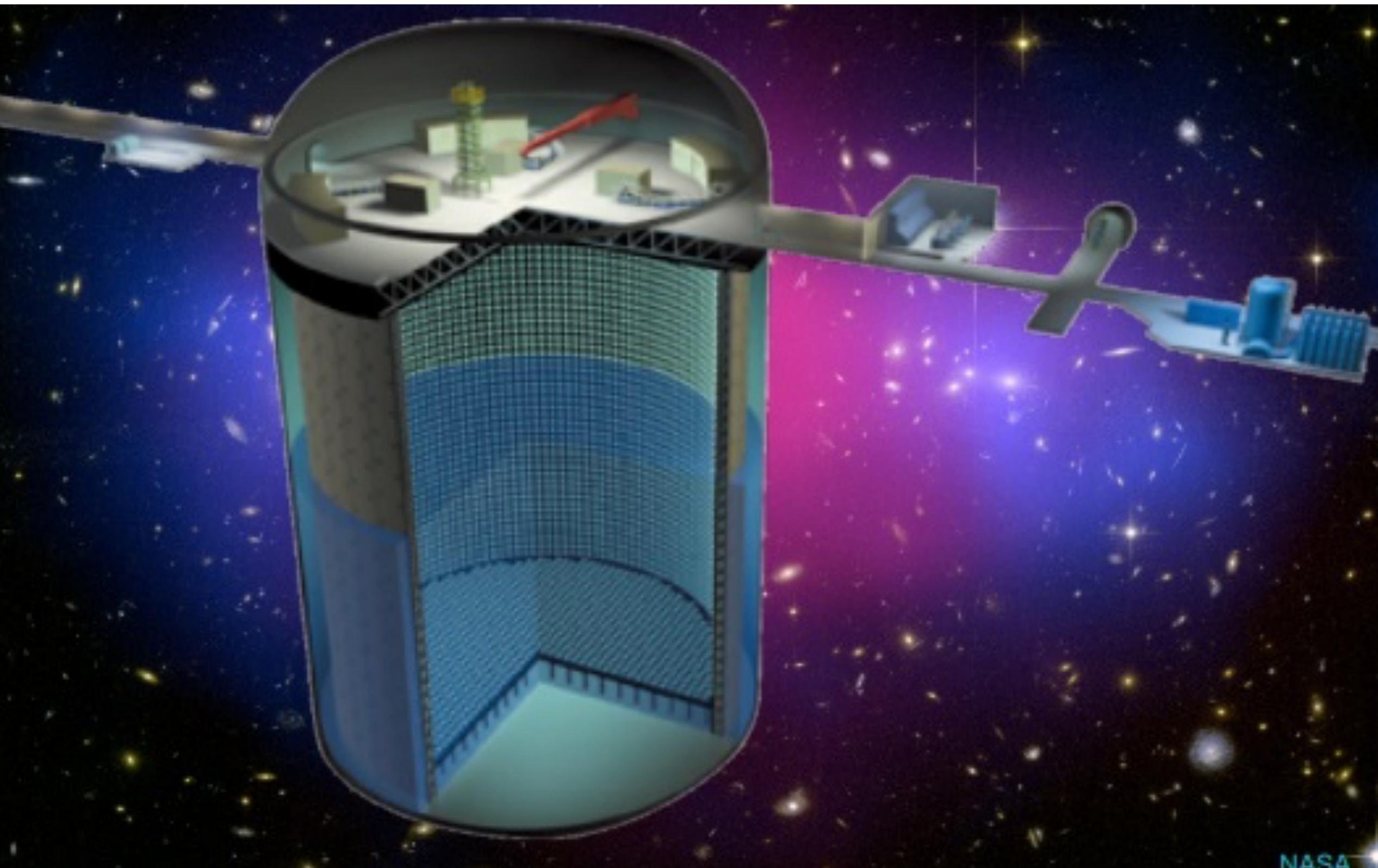
- Neutrinos solo sienten la fuerza débil (y la gravitatoria, irrelevante para partículas)
- Por eso son tan difíciles de detectar

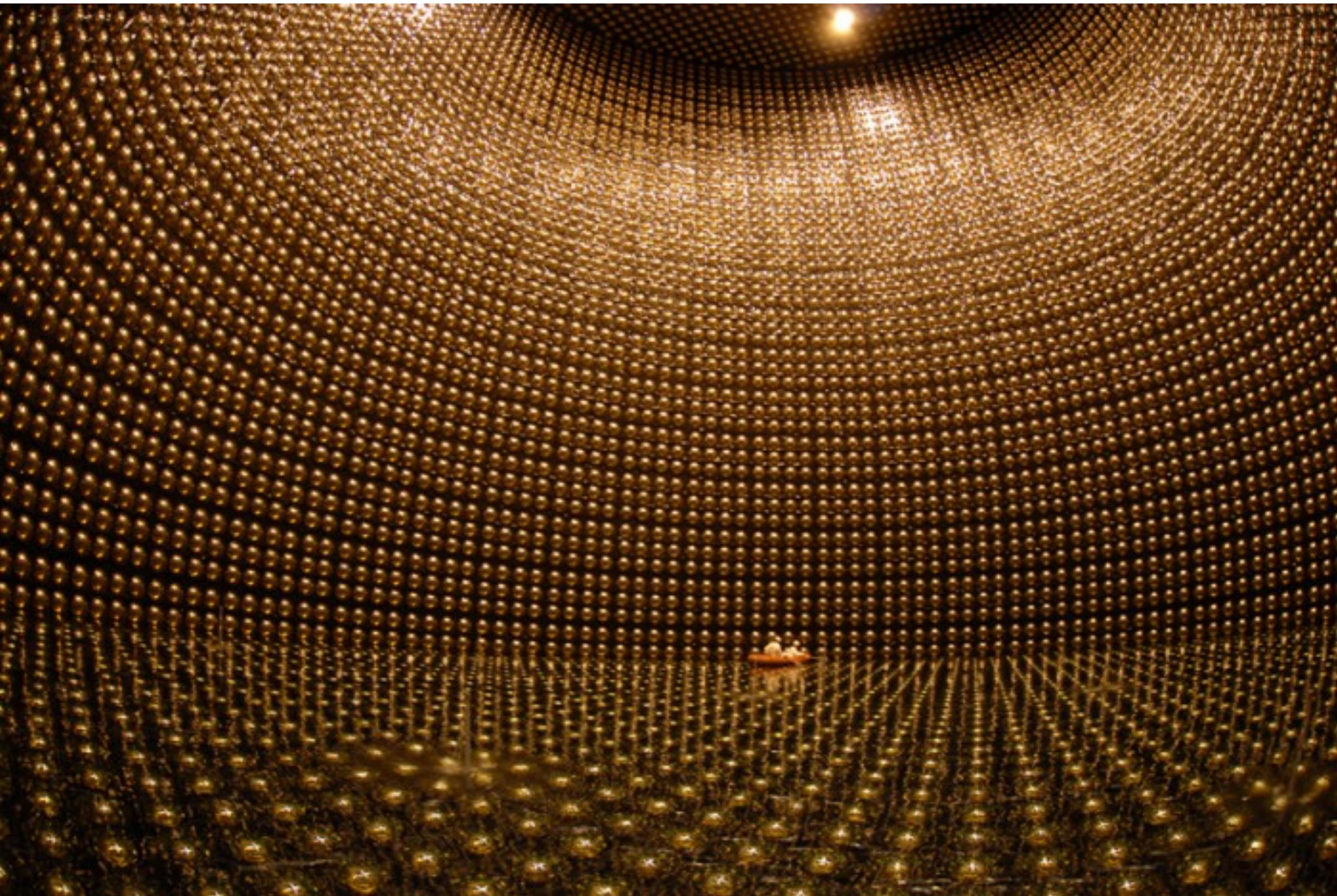
**Débil ( $10^{-5}$ )**

# 50 mill. de litros de agua bajo una montaña

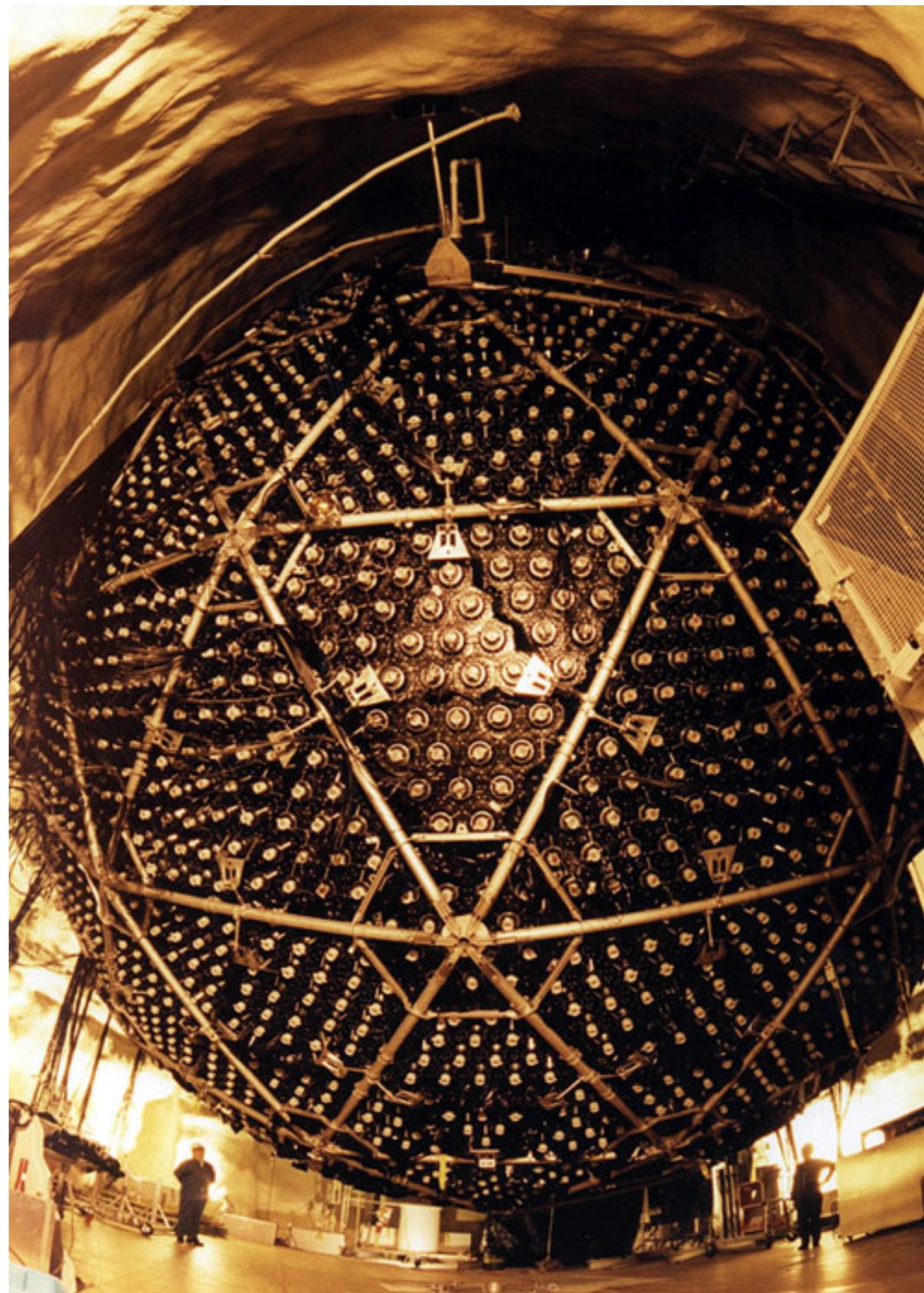
- Super-Kamiokande, un gran tanque de agua de 50 metros de altura, situado bajo una montaña

50.000 toneladas de agua

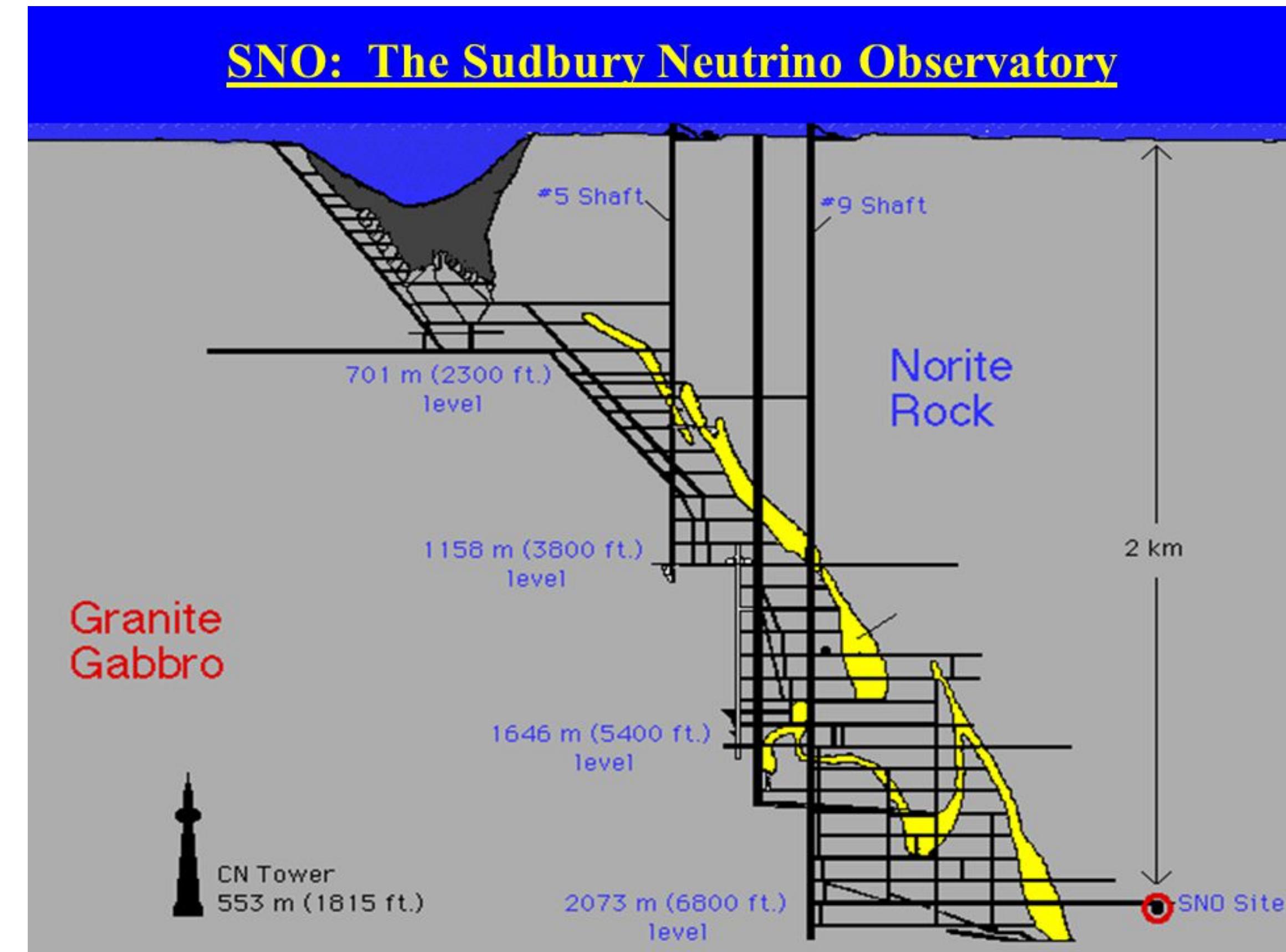




# A 2 km de profundidad

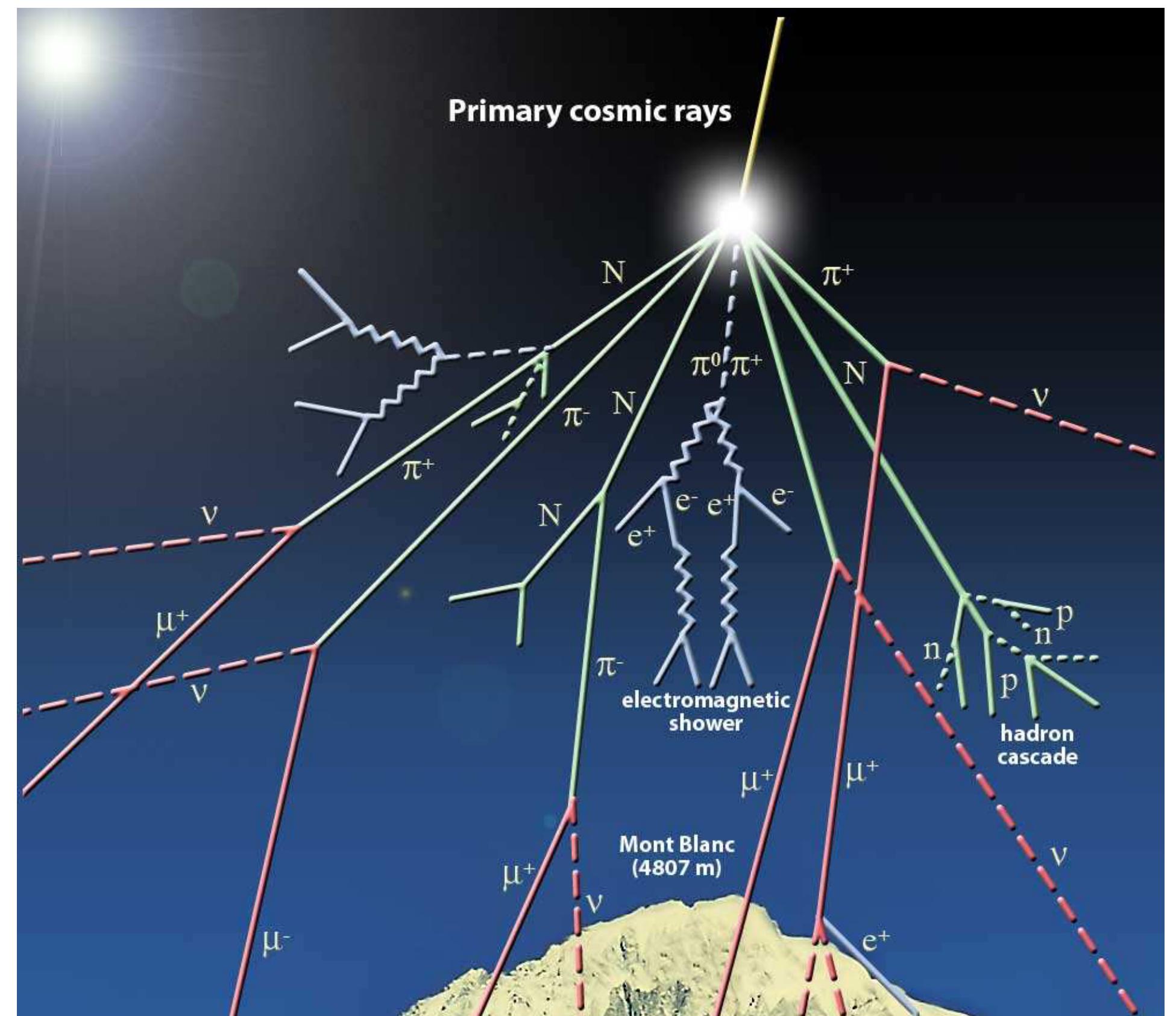


- SNO, un preciosa bola llena de agua pesada a 2 km de profundidad



# En las profundidades de la Tierra

- Los rayos cósmicos son 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



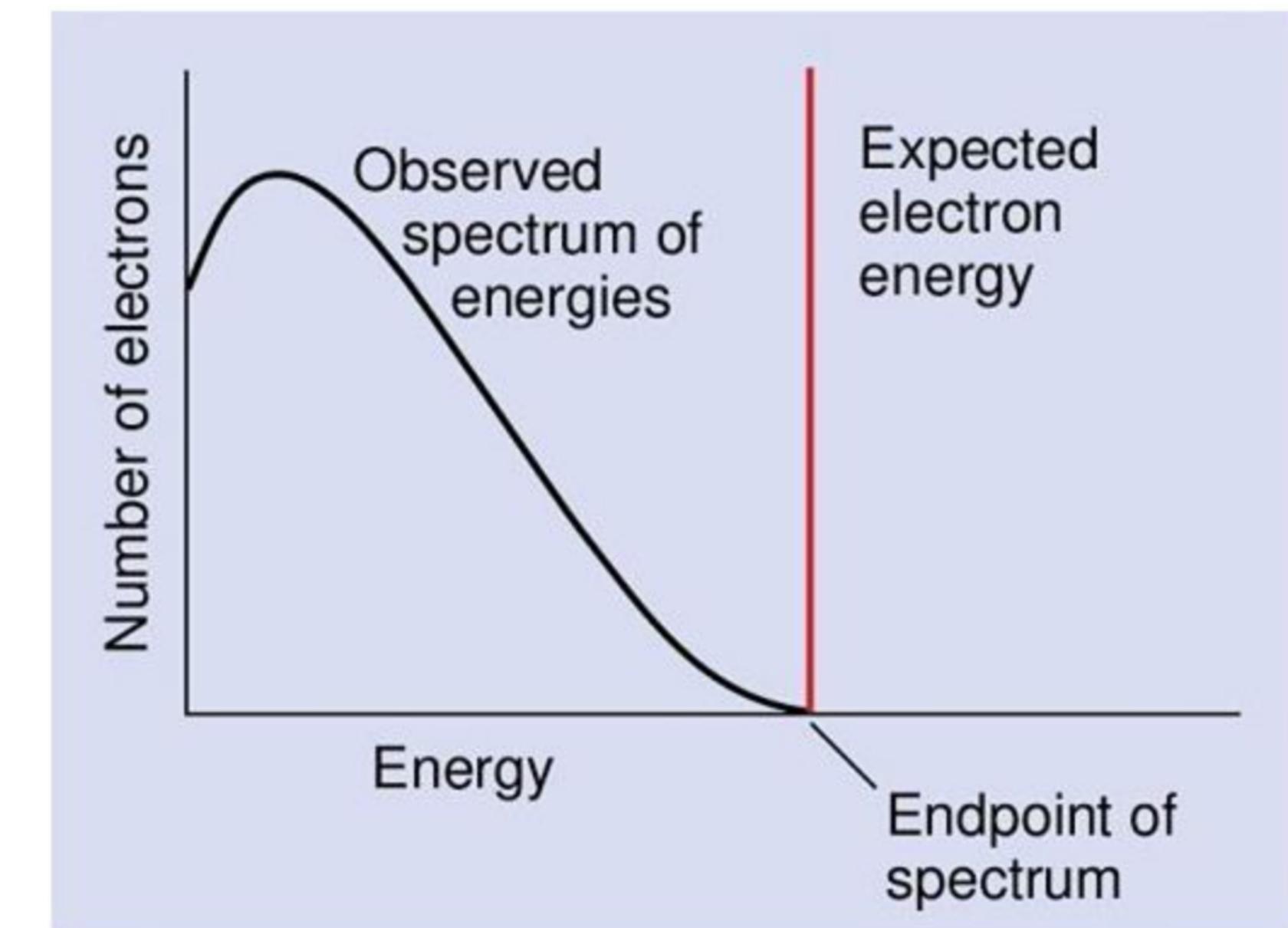
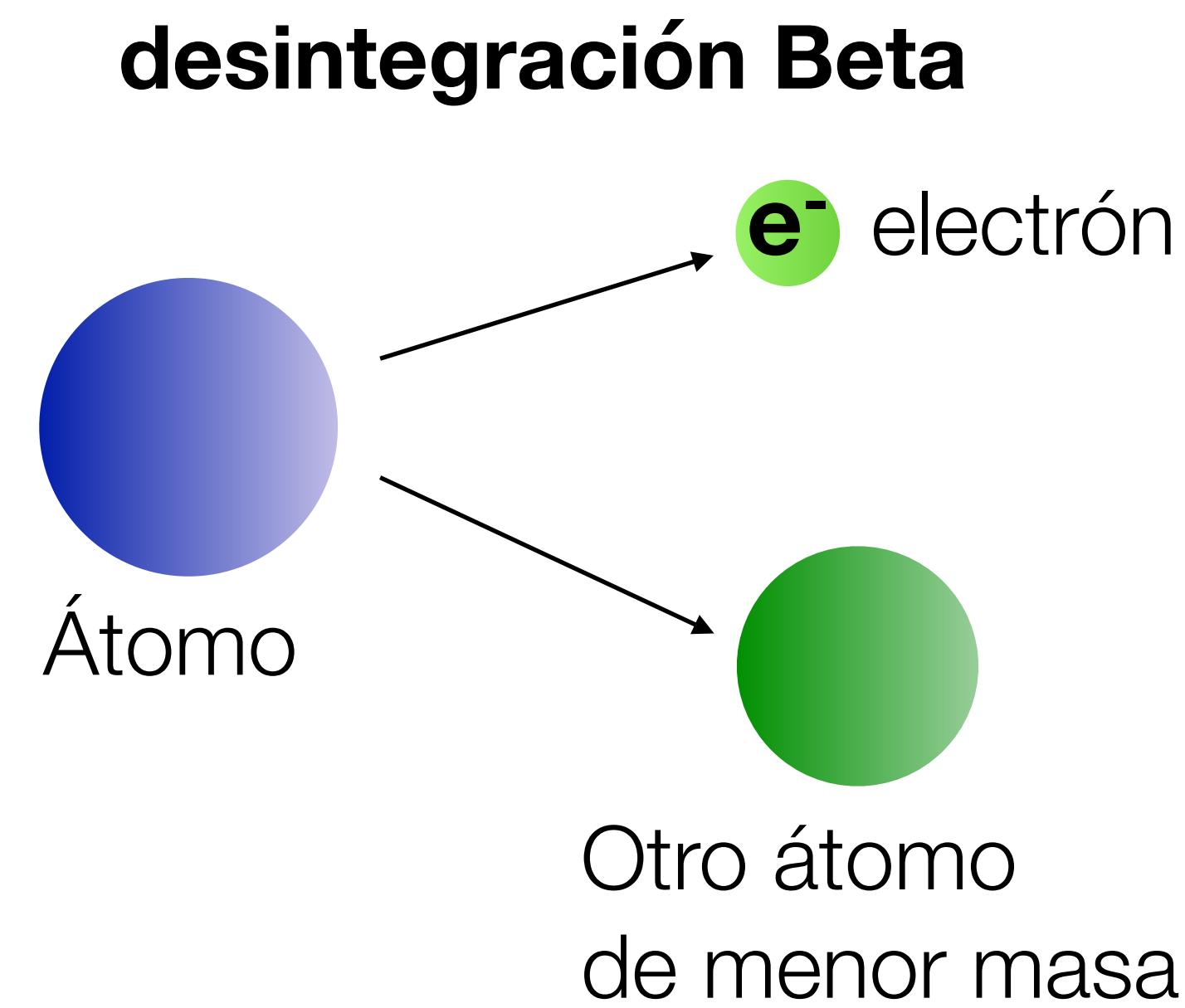
# El nacimiento del neutrino

---

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

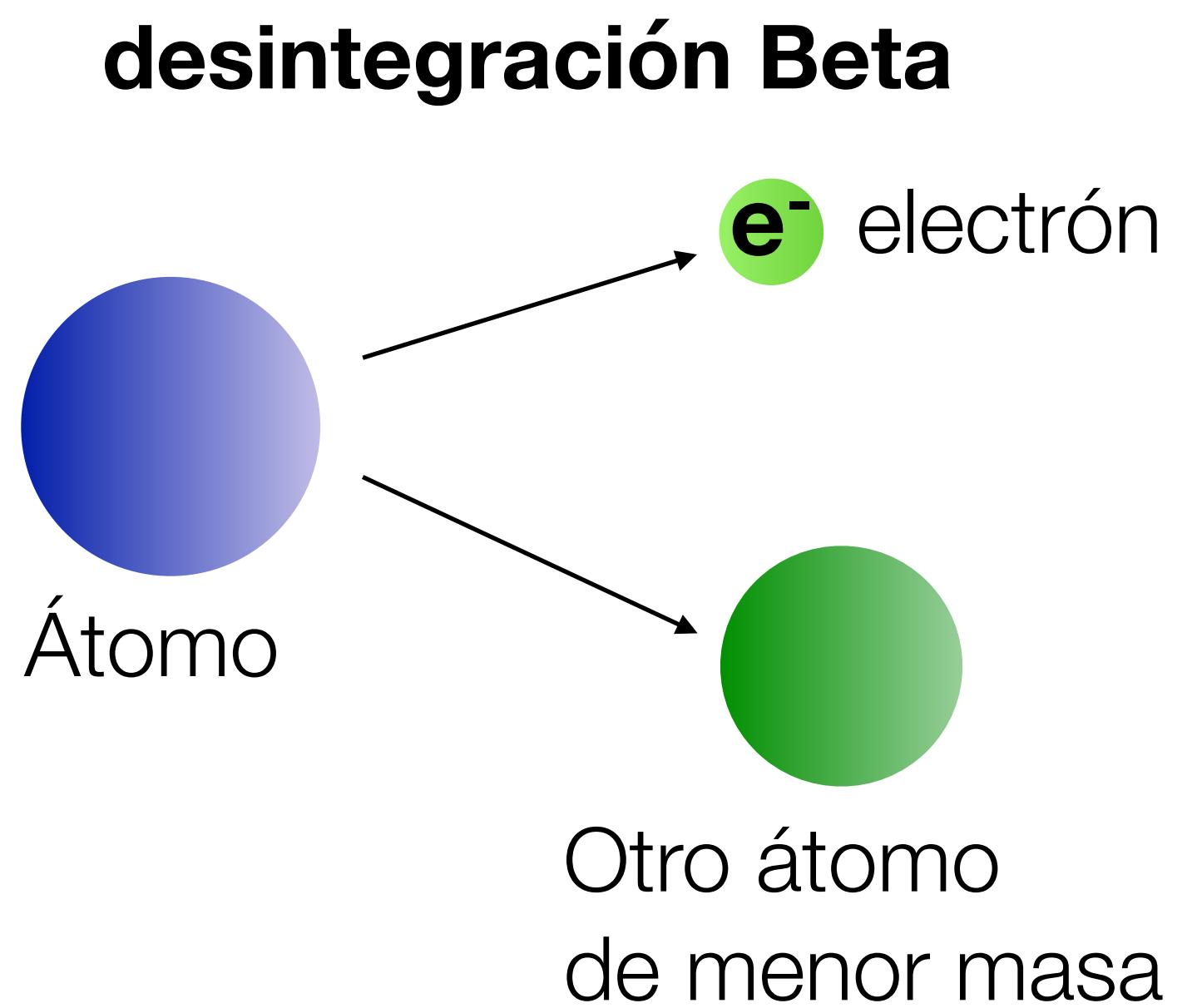
# El nacimiento del neutrino

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



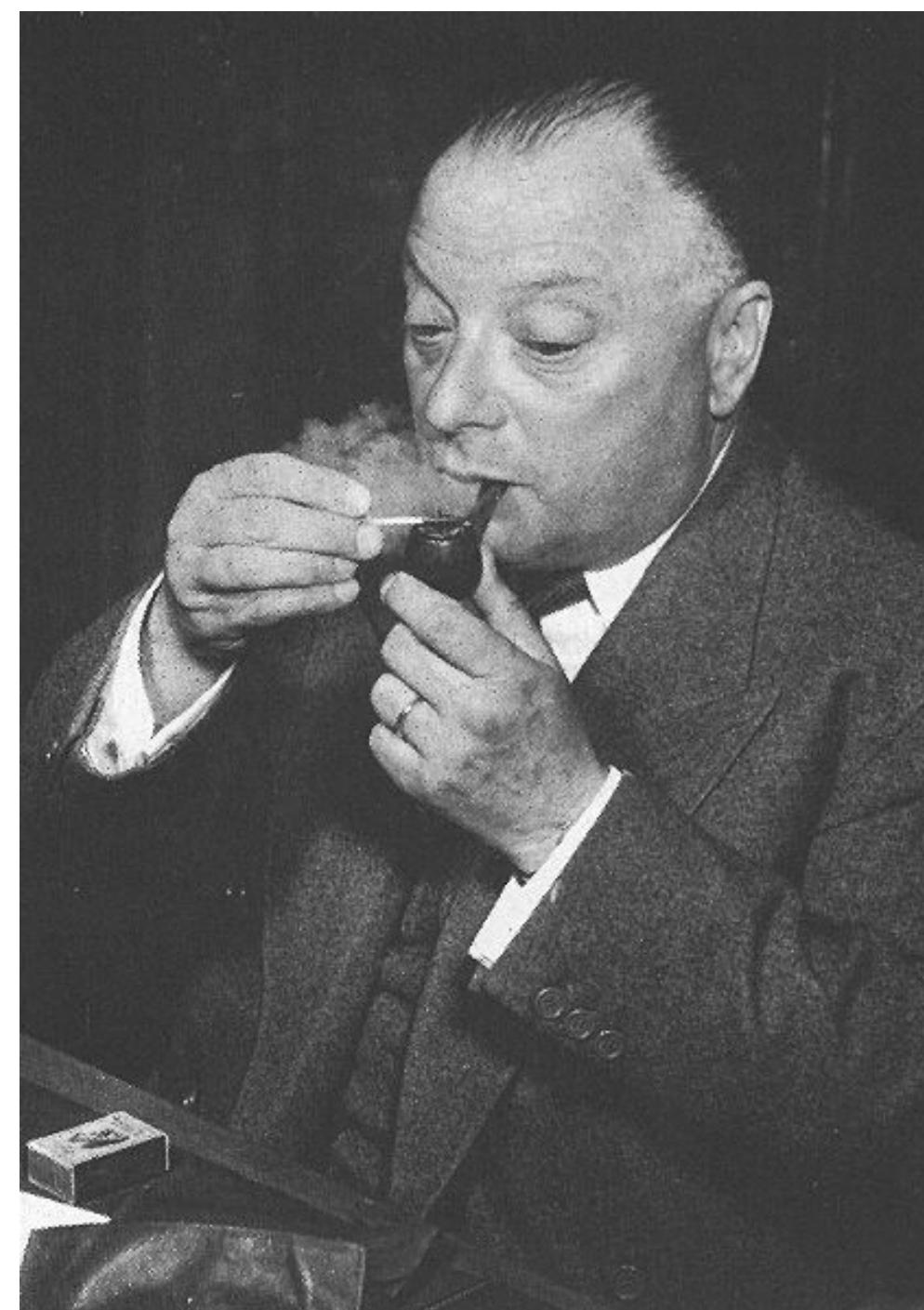
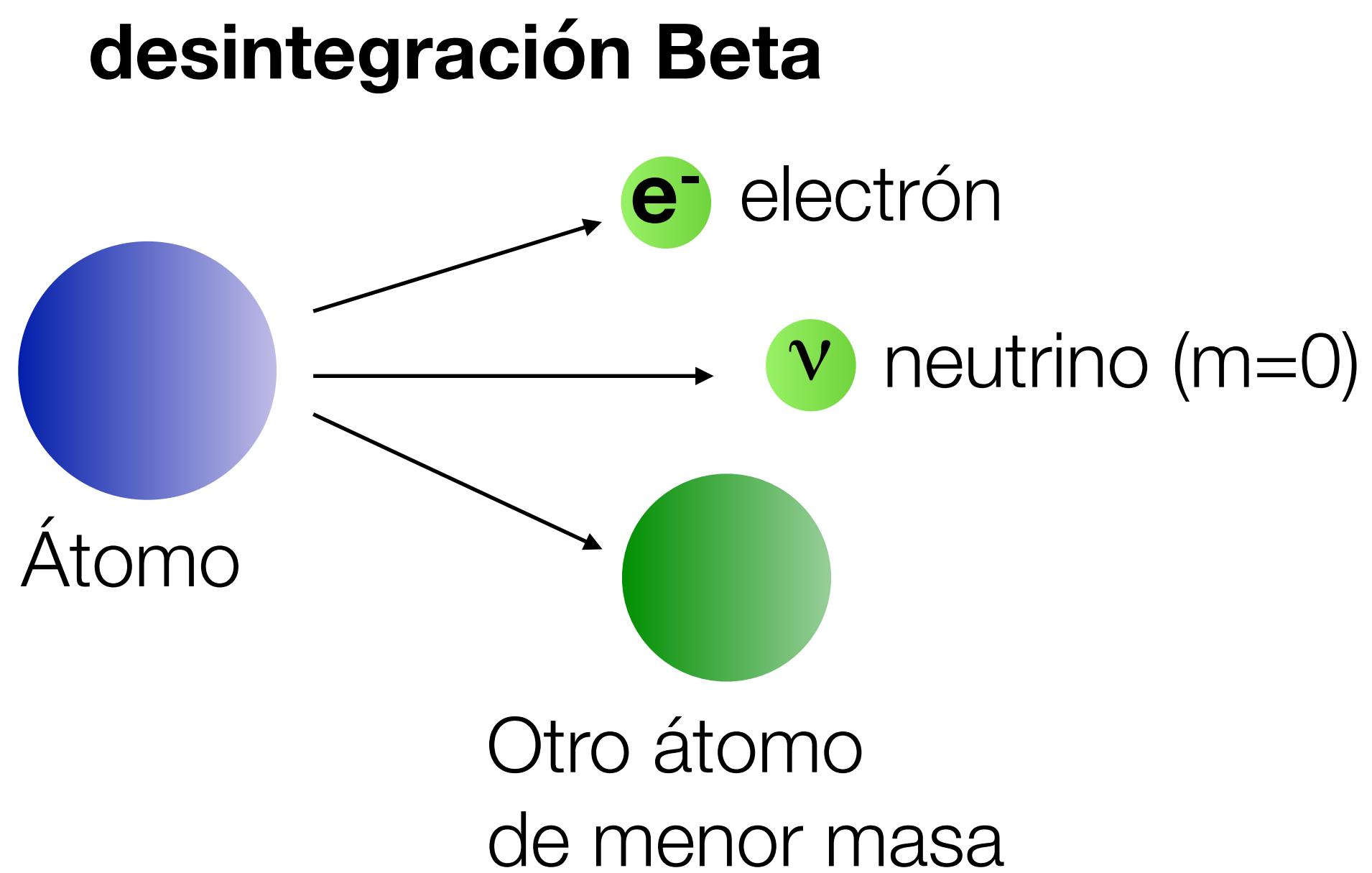
# La solución de Pauli

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



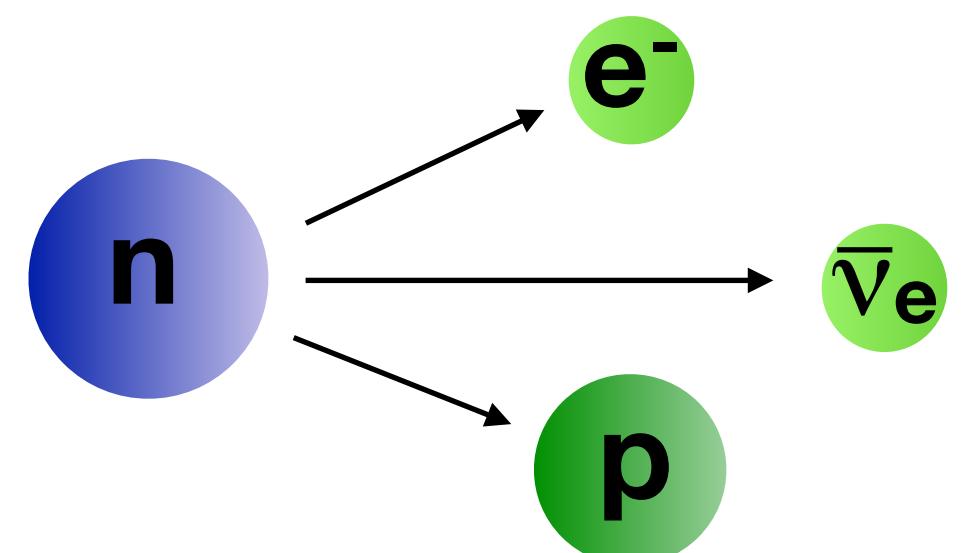
# La solución de Pauli

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

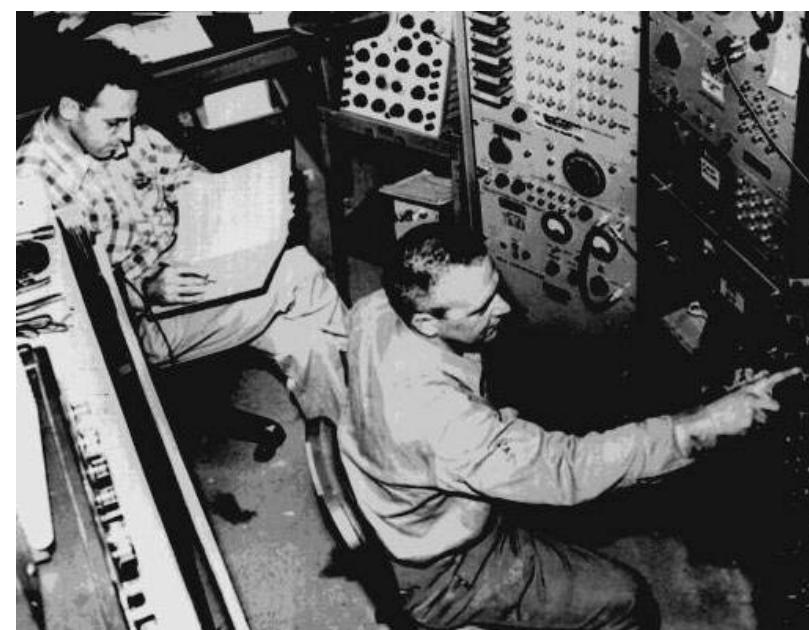
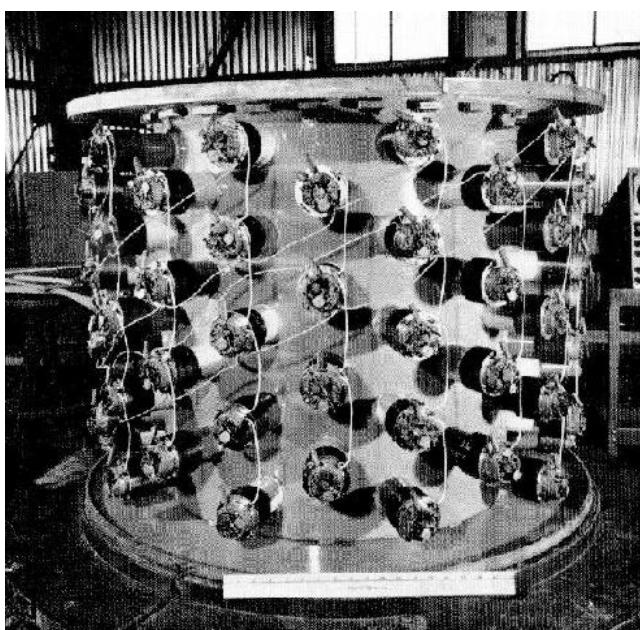
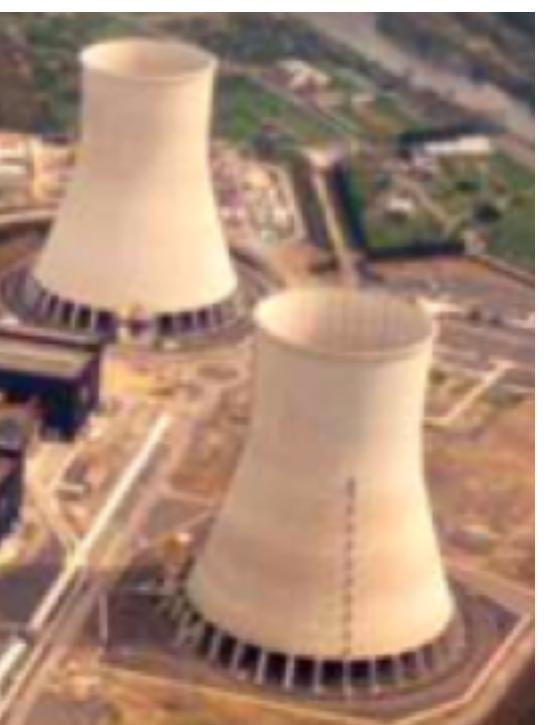


# Una larga historia

- Pero tardó 25 años en detectarse



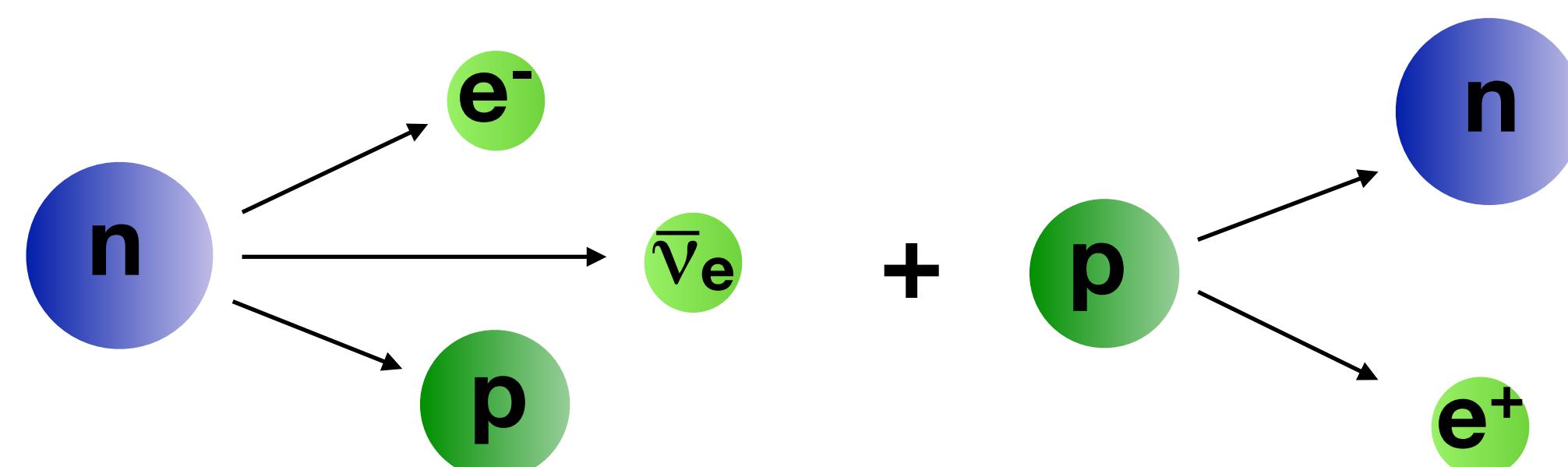
desintegración  
beta



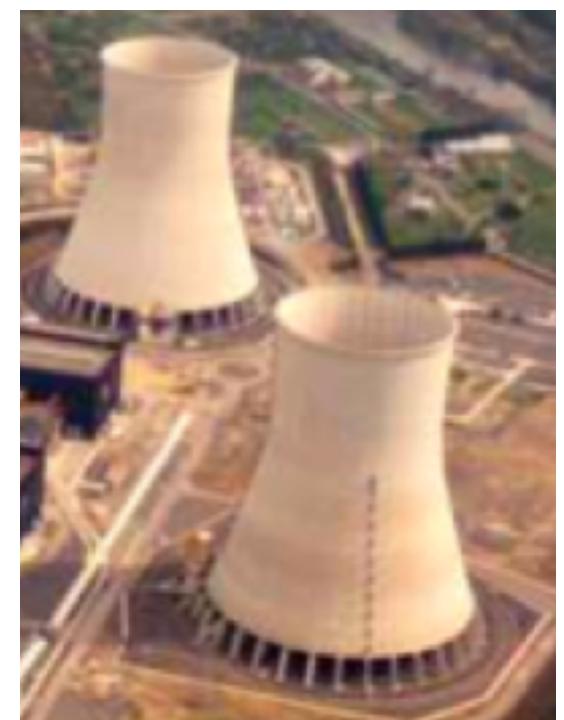
Reines  
y  
Cowan

# Una larga historia

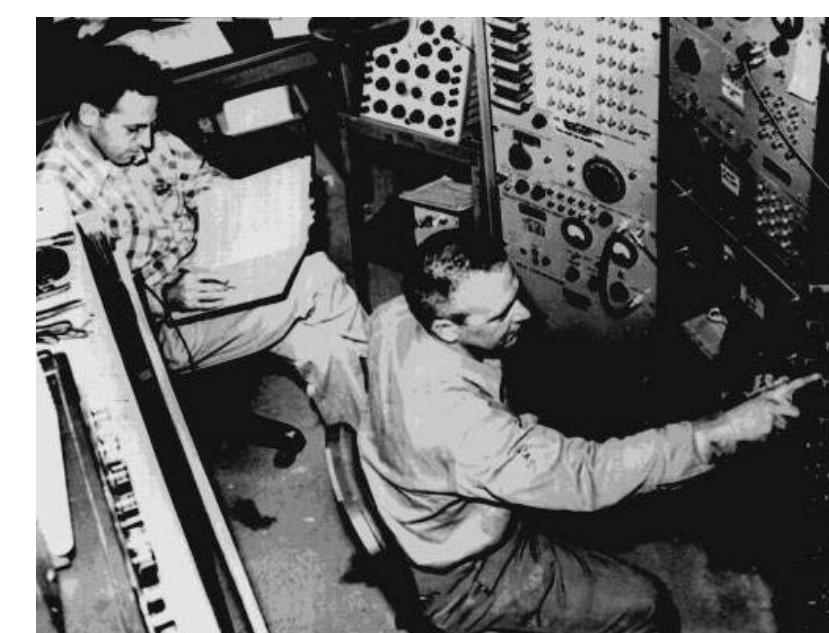
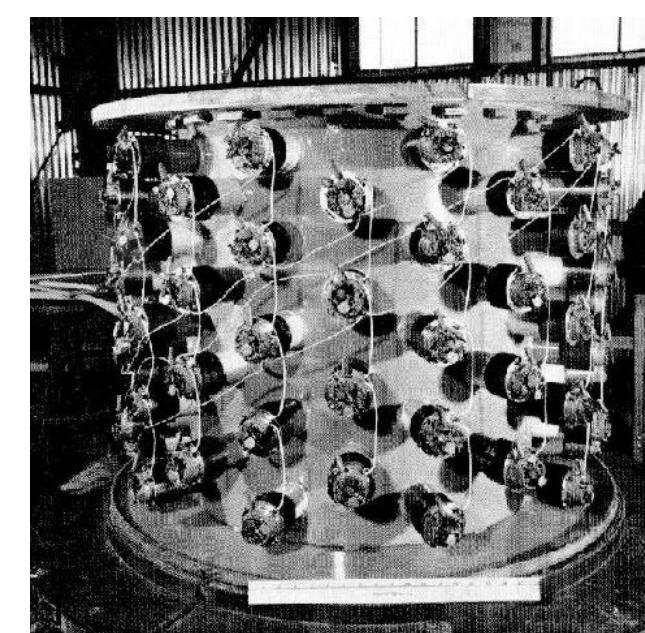
- Pero tardó 25 años en detectarse



desintegración  
beta



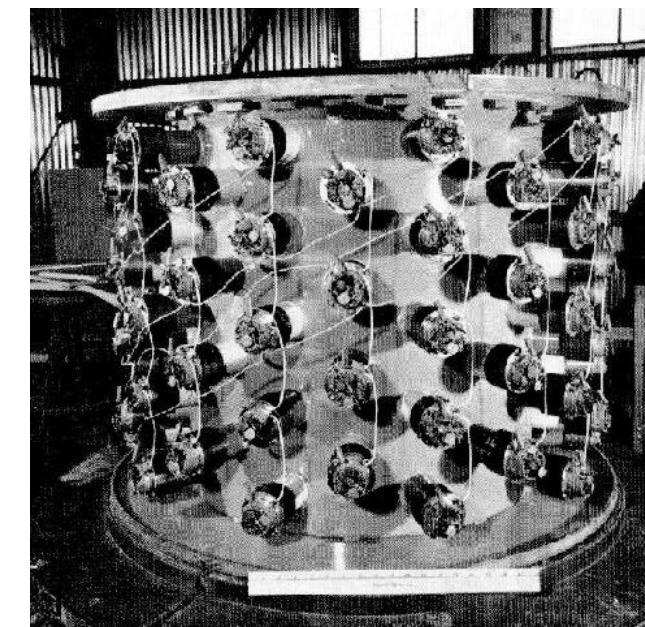
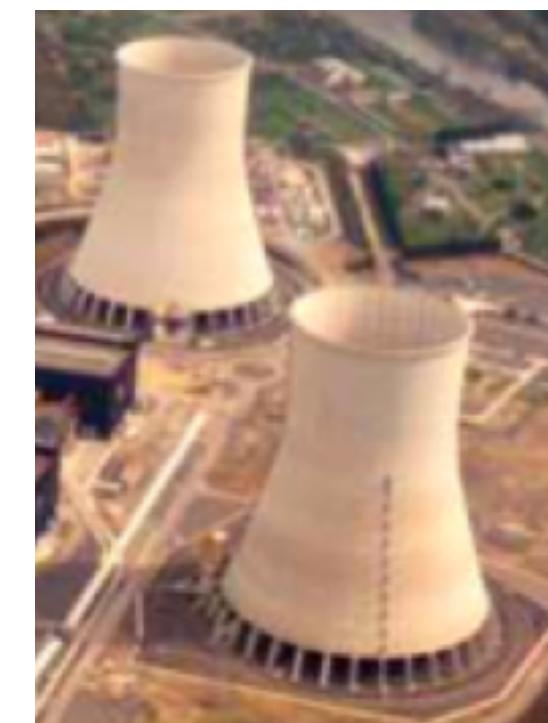
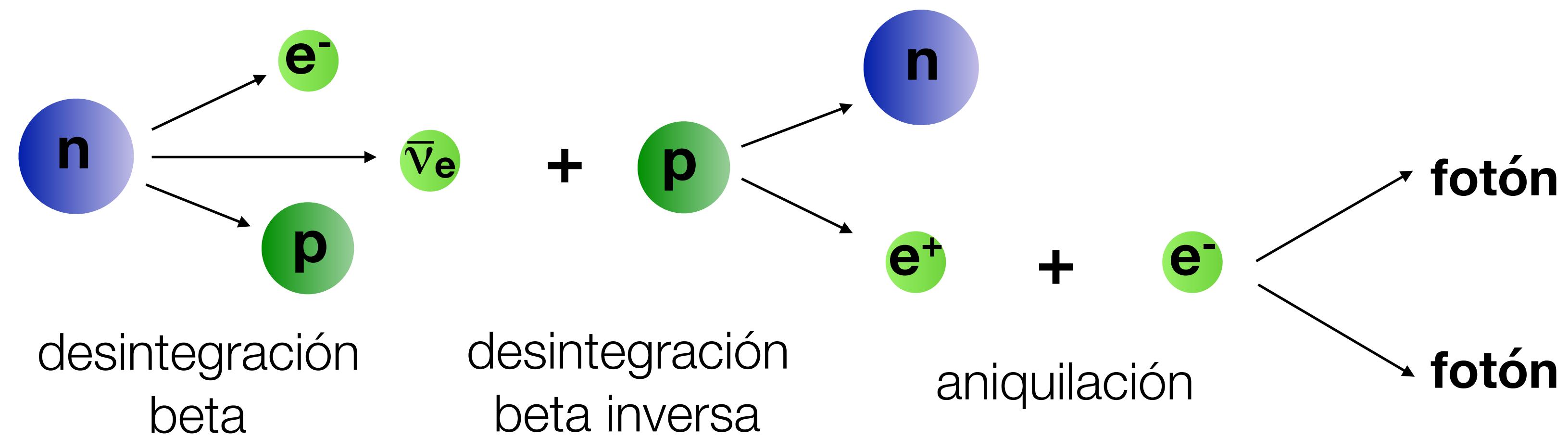
desintegración  
beta inversa



Reines  
y  
Cowan

# Una larga historia

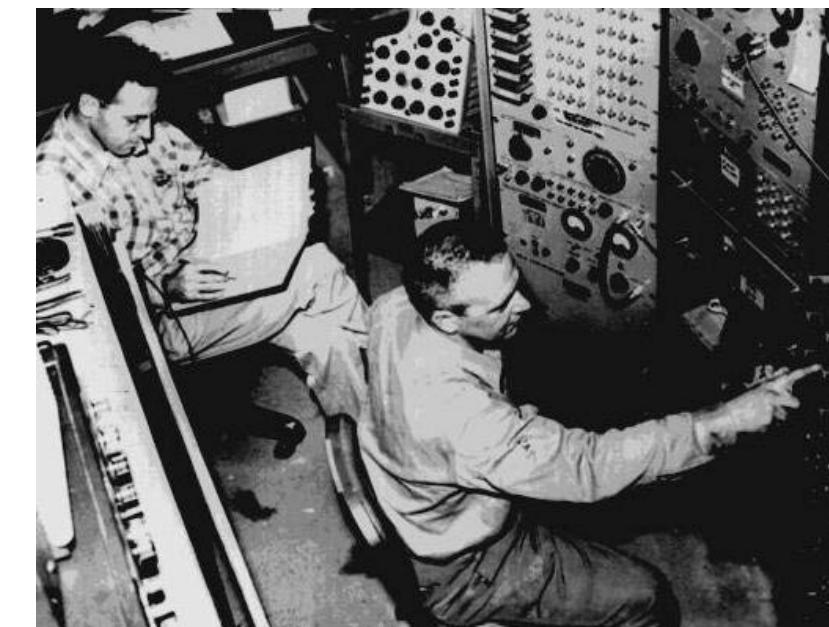
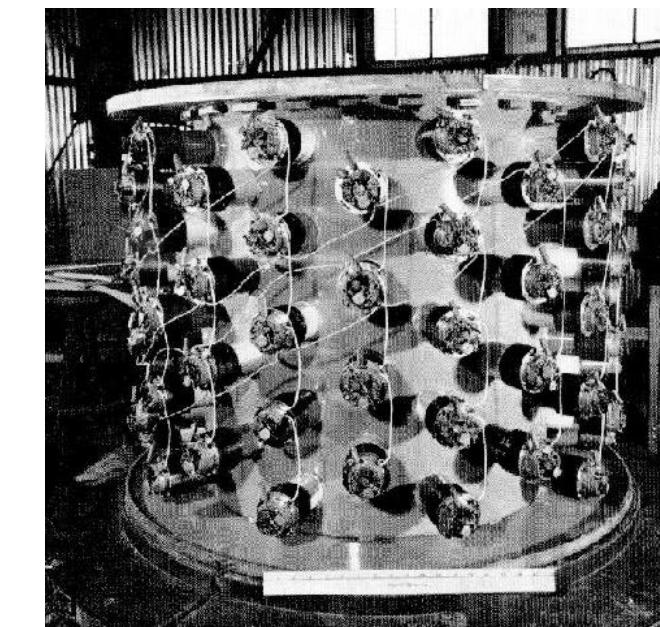
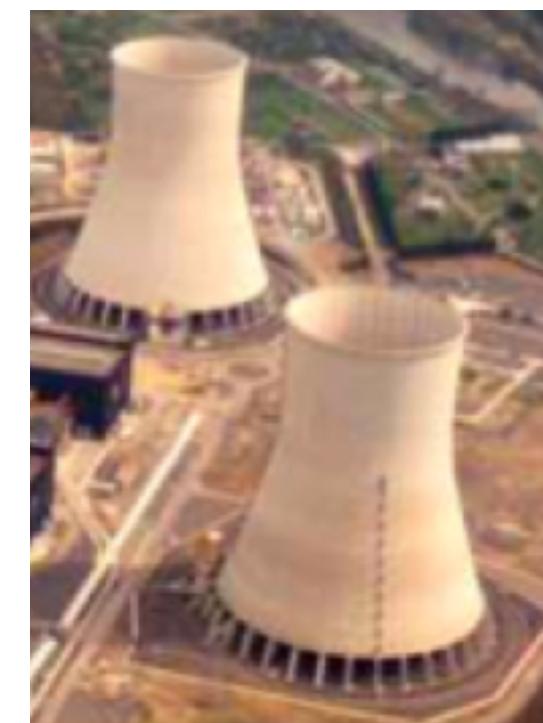
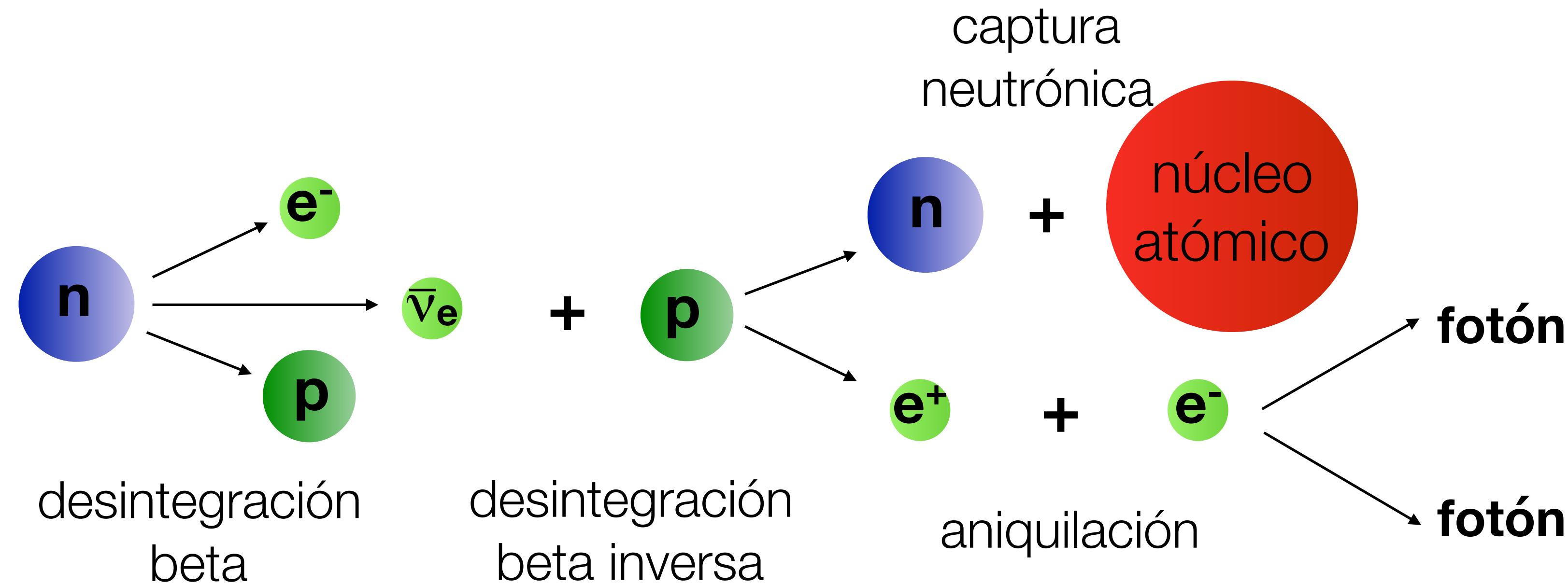
- Pero tardó 25 años en detectarse



Reines  
y  
Cowan

# Una larga historia

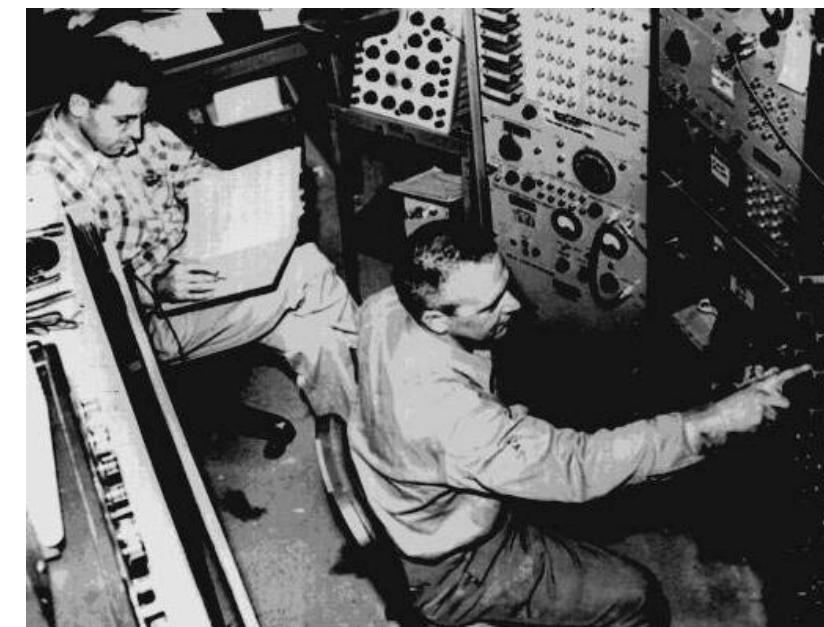
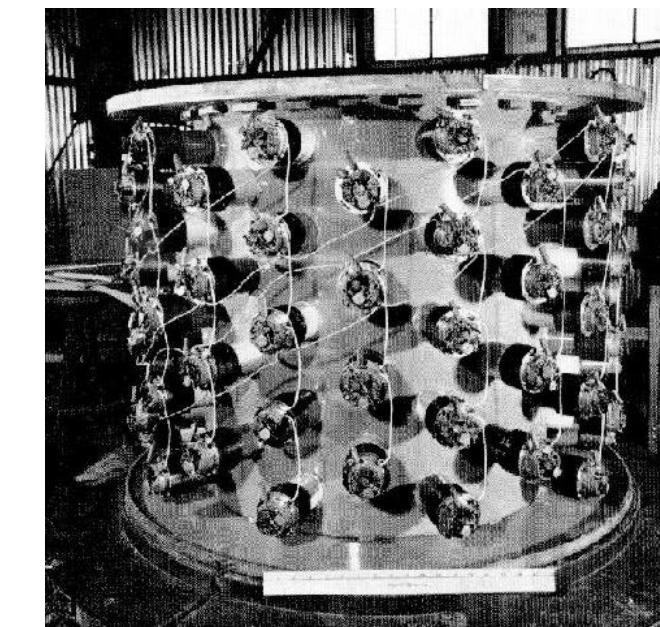
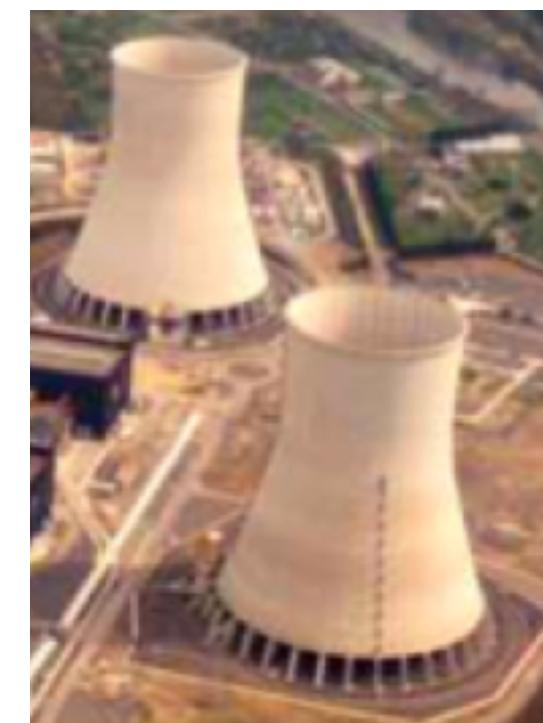
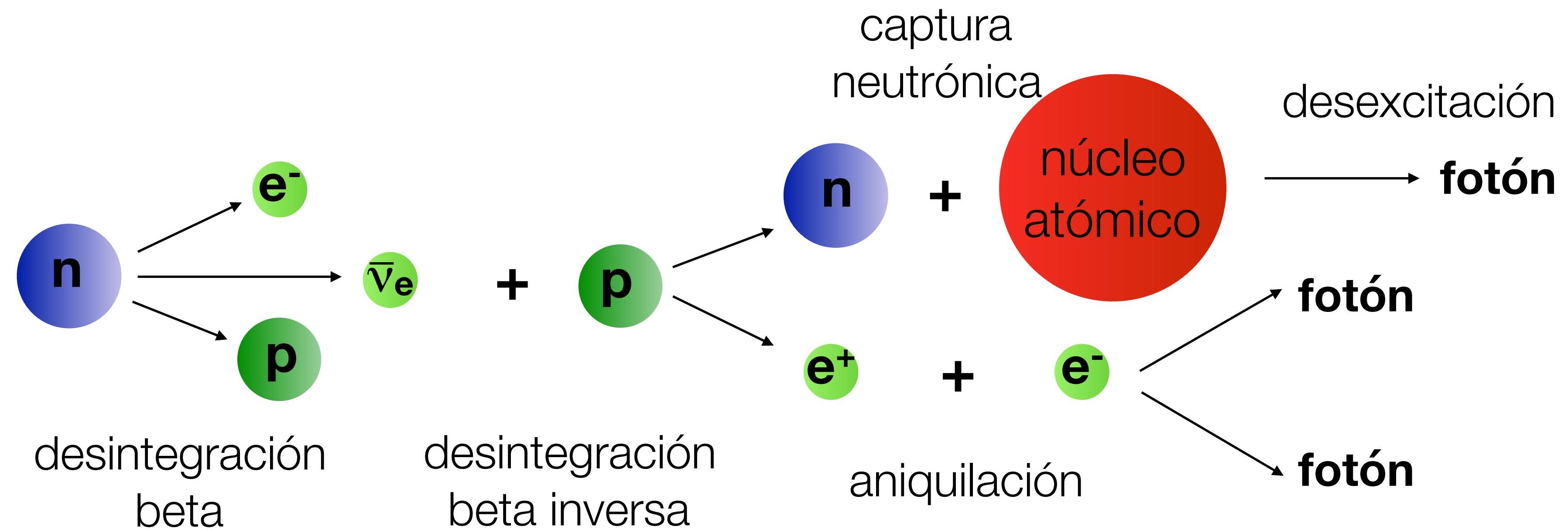
- Pero tardó 25 años en detectarse



Reines  
y  
Cowan

# Una larga historia

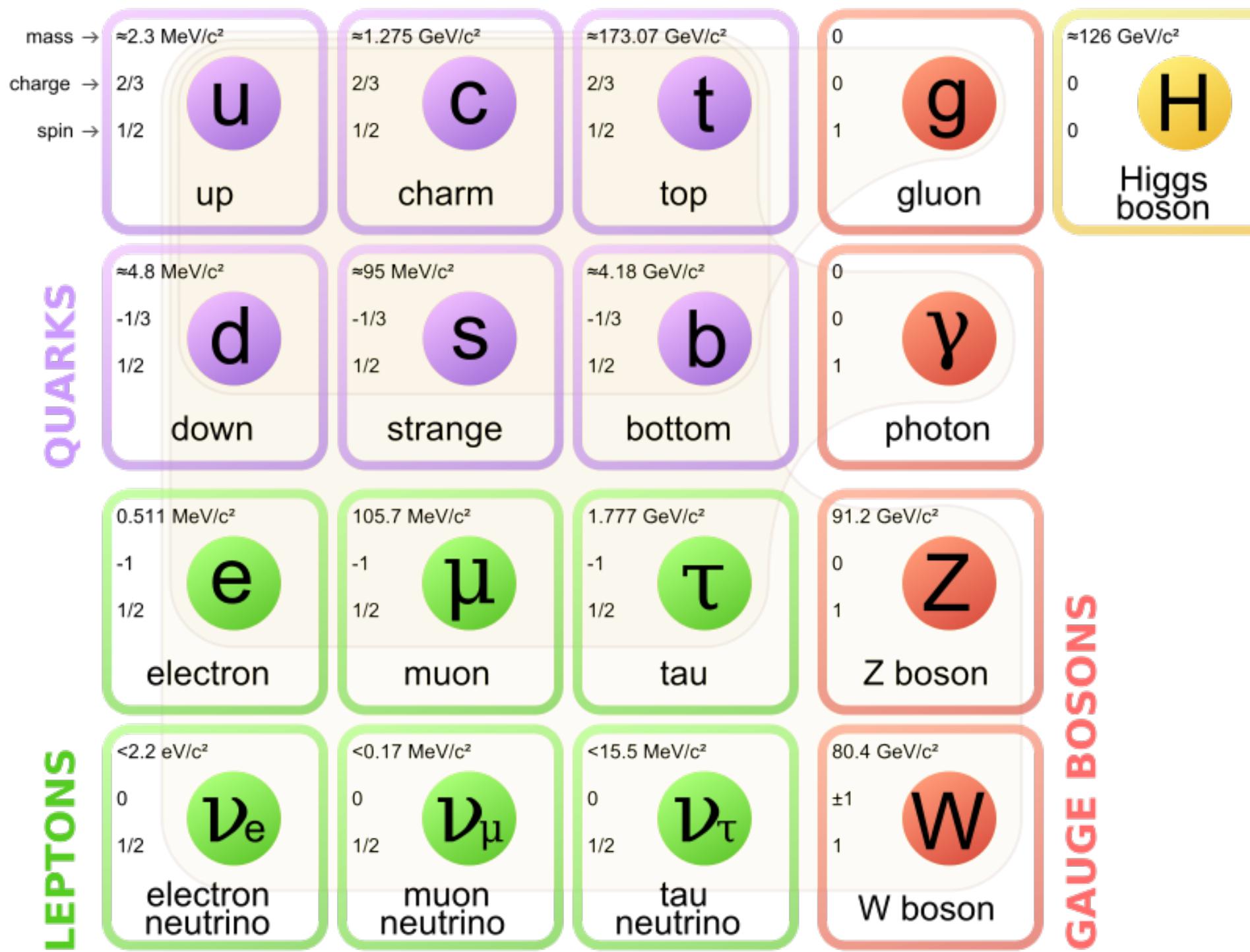
- Pero tardó 25 años en detectarse



Reines  
y  
Cowan

# ¿Solo hay un tipo de neutrino?

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



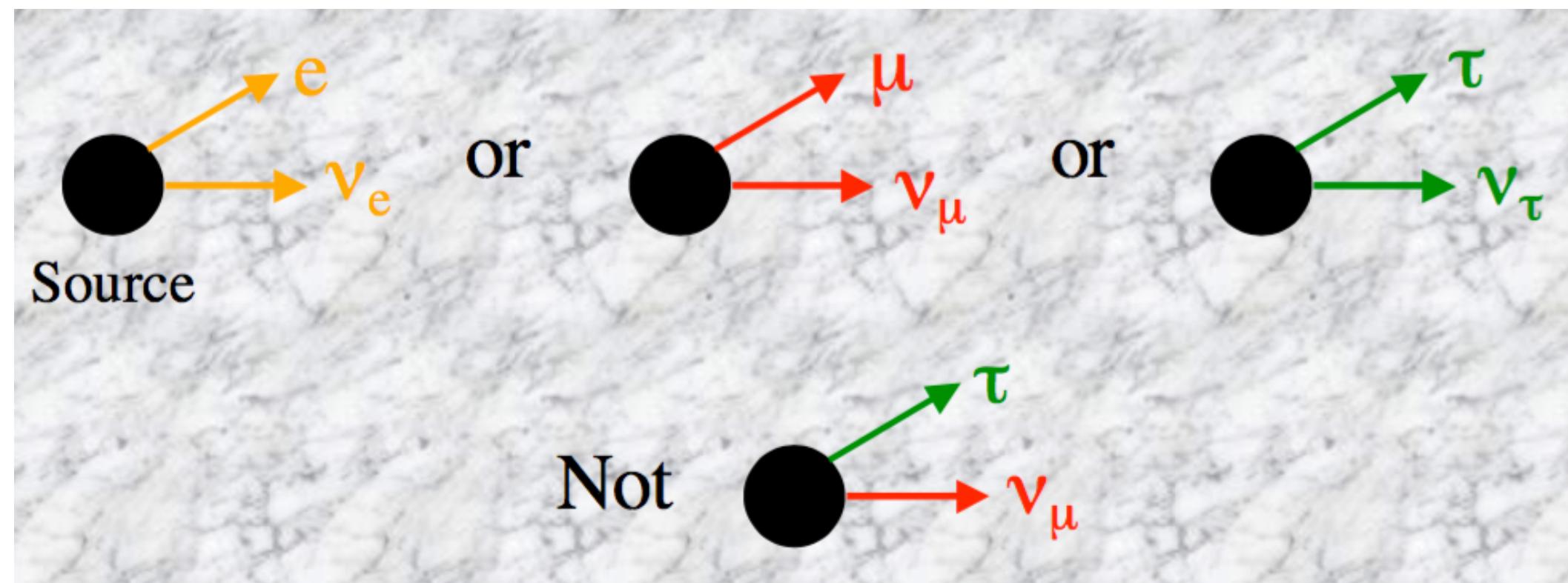
# El muón

---

- 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 descubierto en el primer haz de neutrinos

# La sagrada familia

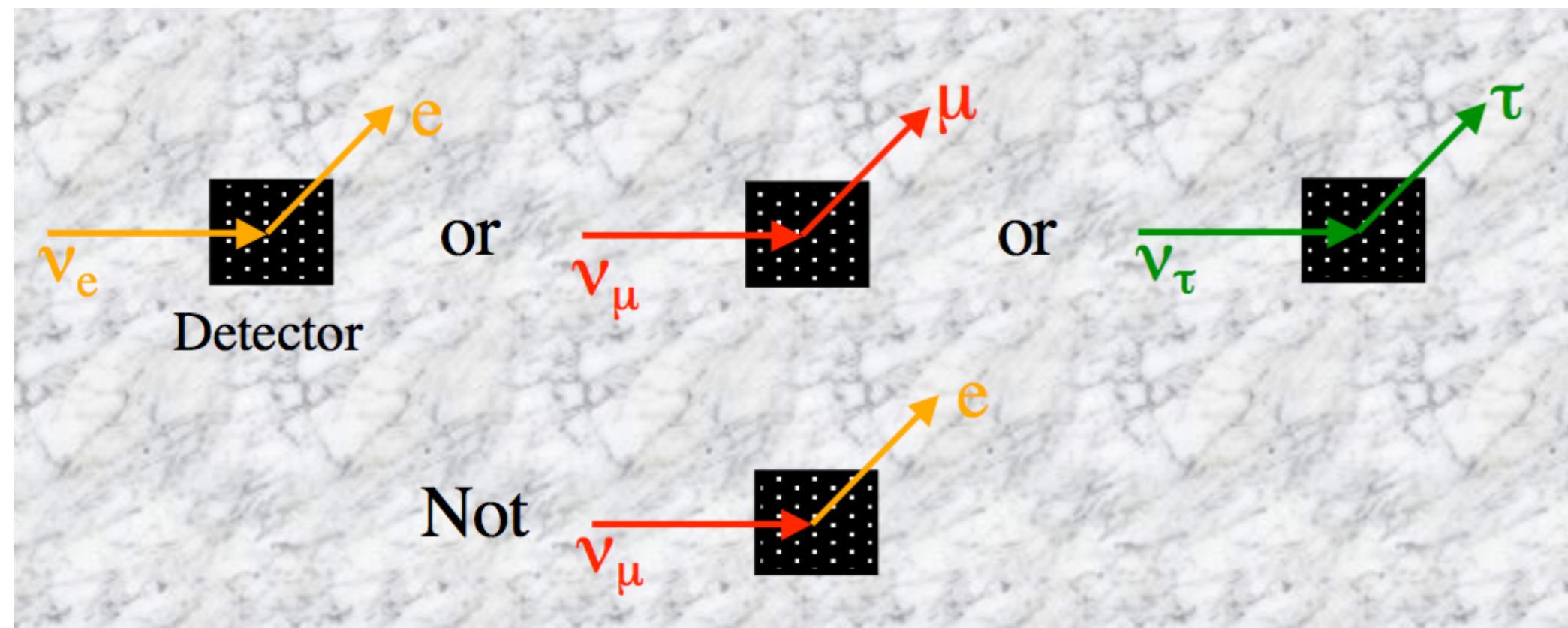
- En la naturaleza y en el laboratorio un neutrino siempre va acompañado de un leptón cargado. Conservación Número leptónico (**L**)
- Cada tipo de neutrino siempre aparece asociado a su compañero cargado



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

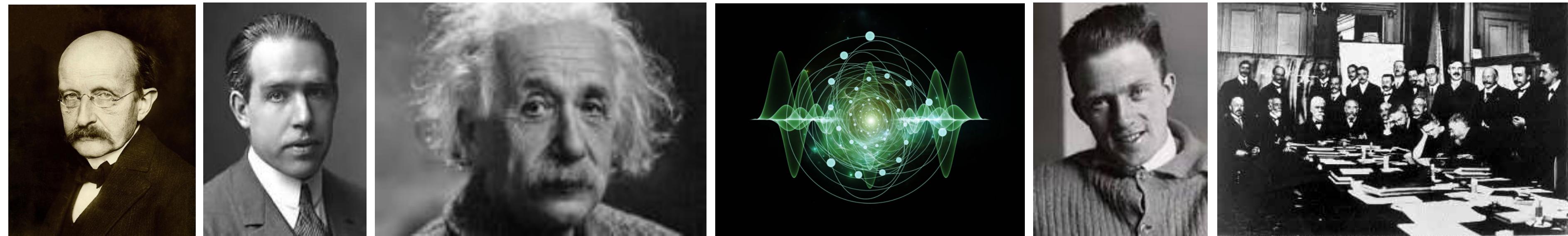
# Endogamia en los leptones

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



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

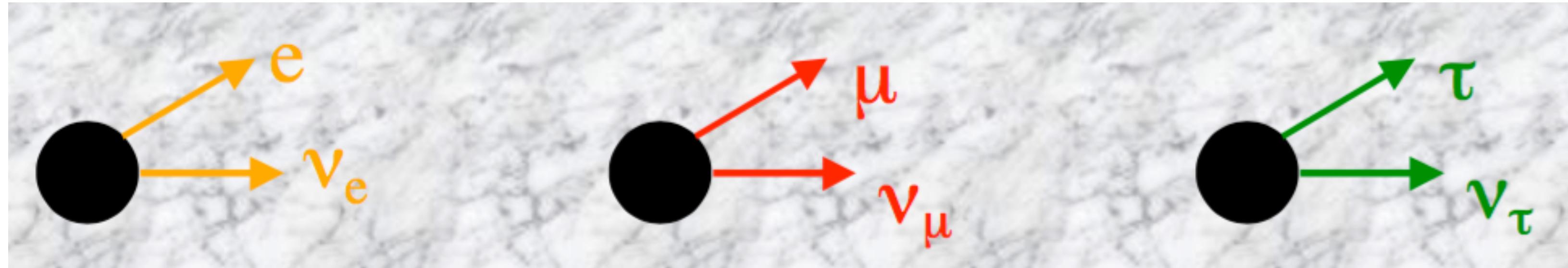
# El mundo Mecano-Cuántico



- 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



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

# Otra forma de verlo

---

- Un buen baso de cola-cao contiene: leche, cola-cao, azúcar
- Estos son los tres componentes fundamentales
- Pero lo que nosotros veíamos cuando nuestra madre nos traía (?) el desayuno a la mesa era un vaso con leche que podía ser más claro, más oscuro, más dulce, etc.
- La **leche**, el **cola-cao** y el **azúcar** serían los neutrinos **1,2,3**, mientras que la leche más **oscura**, más **clara** y más **dulce** serían los neutrinos  $\nu_e$   $\nu_\mu$   $\nu_\tau$
- Son dos formas diferentes de

- 
- En este caso lo que sucede es que los neutrinos que conocemos ( $\nu_e$ ,  $\nu_\mu$ ,  $\nu_\tau$ ) son combinaciones lineales de los neutrinos que tienen masa ( $\nu_1$ ,  $\nu_2$ ,  $\nu_3$ )

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U_{11} & U_{12} & U_{13} \\ U_{21} & U_{22} & U_{23} \\ U_{31} & U_{32} & U_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

# ¿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

**Para una energía dada, la velocidad es función de la masa**

$$E \approx p = m v$$

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

# Mezcla de sabores

$$\begin{array}{c}
 \nu_e \\
 \nu_\mu \\
 \nu_\tau
 \end{array}
 \text{autoestados debiles}
 \quad
 \begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U_{11} & U_{12} & U_{13} \\ U_{21} & U_{22} & U_{23} \\ U_{31} & U_{32} & U_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}
 \quad
 \begin{array}{c}
 (tamaños arbitrarios) \\
 m_1 \\
 m_2 \\
 m_3
 \end{array}
 \text{autoestados de masa}$$

**PMNS mixing matrix**  
Pontecorvo–Maki–Nakagawa–Sakata

$$U = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13}e^{-i\delta} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13}e^{i\delta} & 0 & c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{21} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$c_{ij} = \cos \theta_{ij}$       atmospheric sector      connection between solar and atmospheric      solar sector  
 $s_{ij} = \sin \theta_{ij}$

# Mezcla de sabores

$$\begin{array}{c}
 \nu_e \\
 \nu_\mu \\
 \nu_\tau
 \end{array}
 \text{autoestados debiles}
 \quad
 \begin{array}{c}
 (tamaños arbitrarios) \\
 m_1 \\
 m_2 \\
 m_3
 \end{array}
 \text{autoestados de masa}
 \\
 \left( \begin{array}{c} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{array} \right) = \left( \begin{array}{ccc} U_{11} & U_{12} & U_{13} \\ U_{21} & U_{22} & U_{23} \\ U_{31} & U_{32} & U_{33} \end{array} \right) \left( \begin{array}{c} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{array} \right)$$

$\theta_{23}$

**PMNS mixing matrix**  
Pontecorvo–Maki–Nakagawa–Sakata

$$U = \left( \begin{array}{ccc} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{array} \right) \left( \begin{array}{ccc} c_{13} & 0 & s_{13}e^{-i\delta} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13}e^{i\delta} & 0 & c_{13} \end{array} \right) \left( \begin{array}{ccc} c_{21} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{array} \right)$$

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

atmospheric sector      connection between solar and atmospheric      solar sector

# Mezcla de sabores

$$\begin{array}{c}
 \nu_e \\
 \nu_\mu \\
 \nu_\tau
 \end{array}
 \text{autoestados debiles}
 \quad
 \begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U_{11} & U_{12} & U_{13} \\ U_{21} & U_{22} & U_{23} \\ U_{31} & U_{32} & U_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}
 \quad
 \begin{array}{c}
 (tamaños arbitrarios) \\
 m_1 \\
 m_2 \\
 m_3
 \end{array}
 \text{autoestados de masa}$$

**PMNS mixing matrix**  
Pontecorvo–Maki–Nakagawa–Sakata

$$U = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13}e^{-i\delta} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13}e^{i\delta} & 0 & c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{21} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$\theta_{23}$   $\theta_{12}$

$\longleftrightarrow$  atmospheric sector  $\longleftrightarrow$  connection between solar and atmospheric  $\longleftrightarrow$  solar sector

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

# Mezcla de sabores

$$\begin{array}{c}
 \nu_e \\
 \nu_\mu \\
 \nu_\tau
 \end{array}
 \text{autoestados debiles}
 \quad
 \begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U_{11} & U_{12} & U_{13} \\ U_{21} & U_{22} & U_{23} \\ U_{31} & U_{32} & U_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

(tamaños arbitrarios)

$$\begin{array}{c}
 m_1 \\
 m_2 \\
 m_3
 \end{array}
 \text{autoestados de masa}$$

**PMNS mixing matrix**  
Pontecorvo–Maki–Nakagawa–Sakata

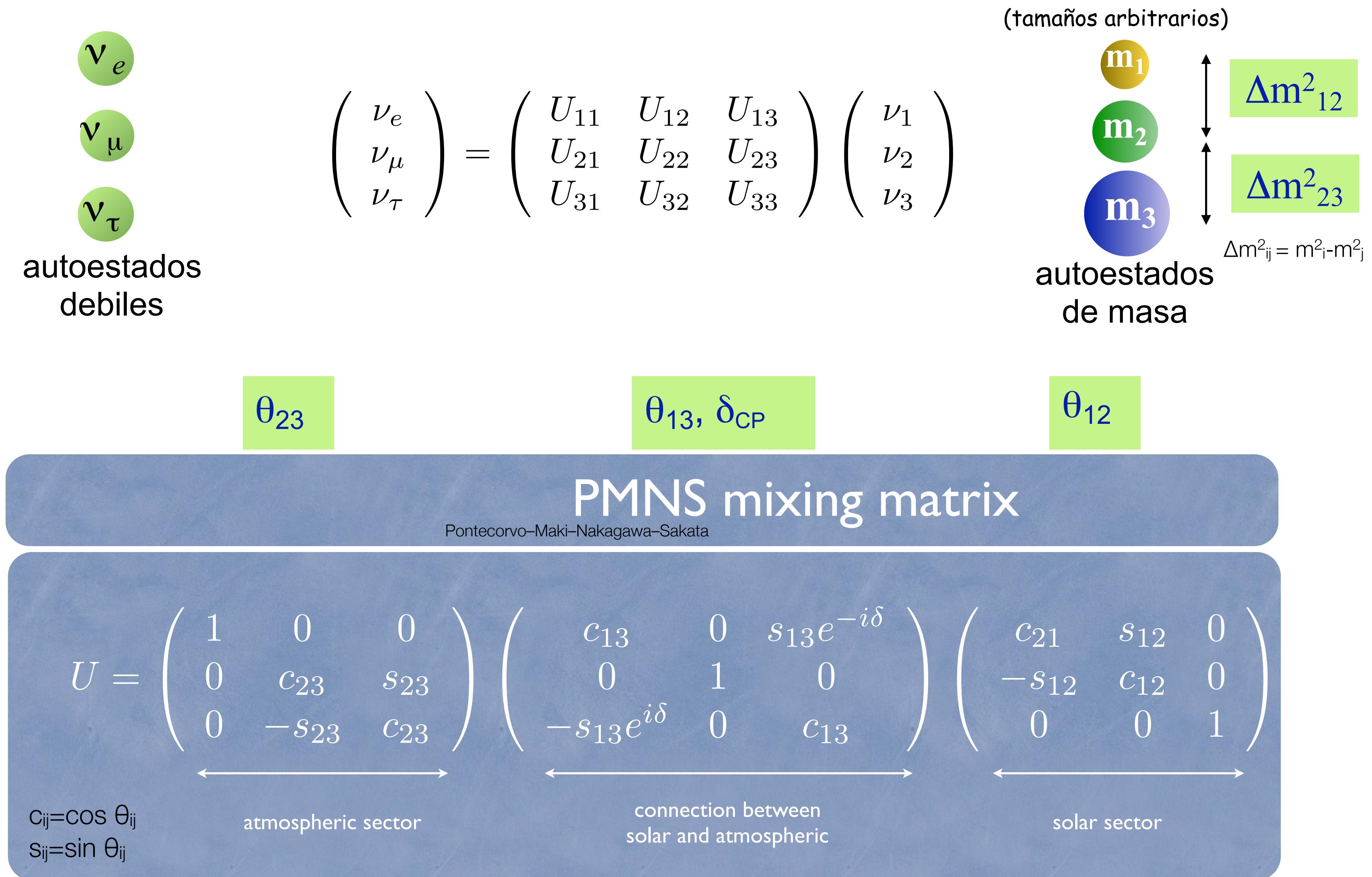
$$U = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13}e^{-i\delta} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13}e^{i\delta} & 0 & c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{21} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$\theta_{23}$        $\theta_{13}, \delta_{CP}$        $\theta_{12}$

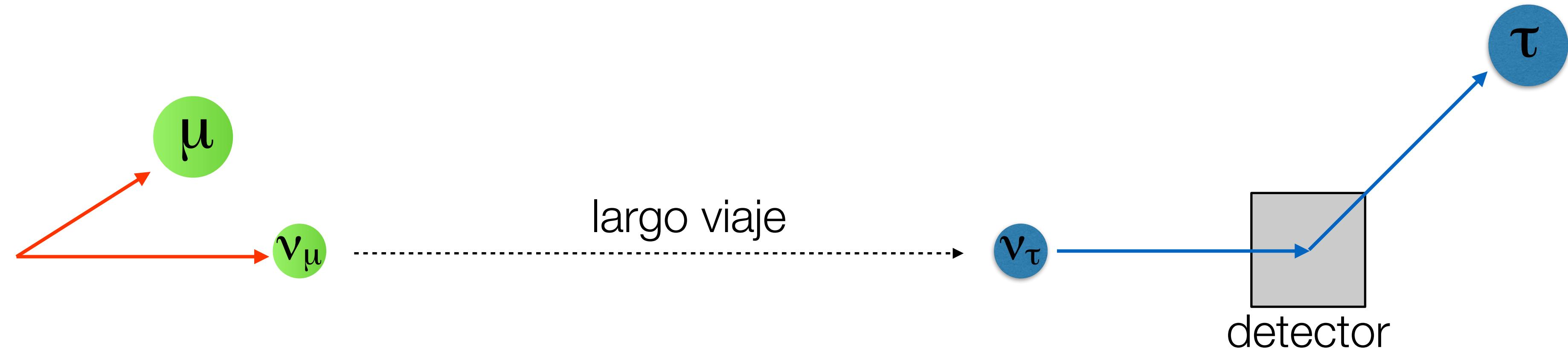
$\longleftrightarrow$  atmospheric sector       $\longleftrightarrow$  connection between solar and atmospheric       $\longleftrightarrow$  solar sector

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

# Mezcla de sabores



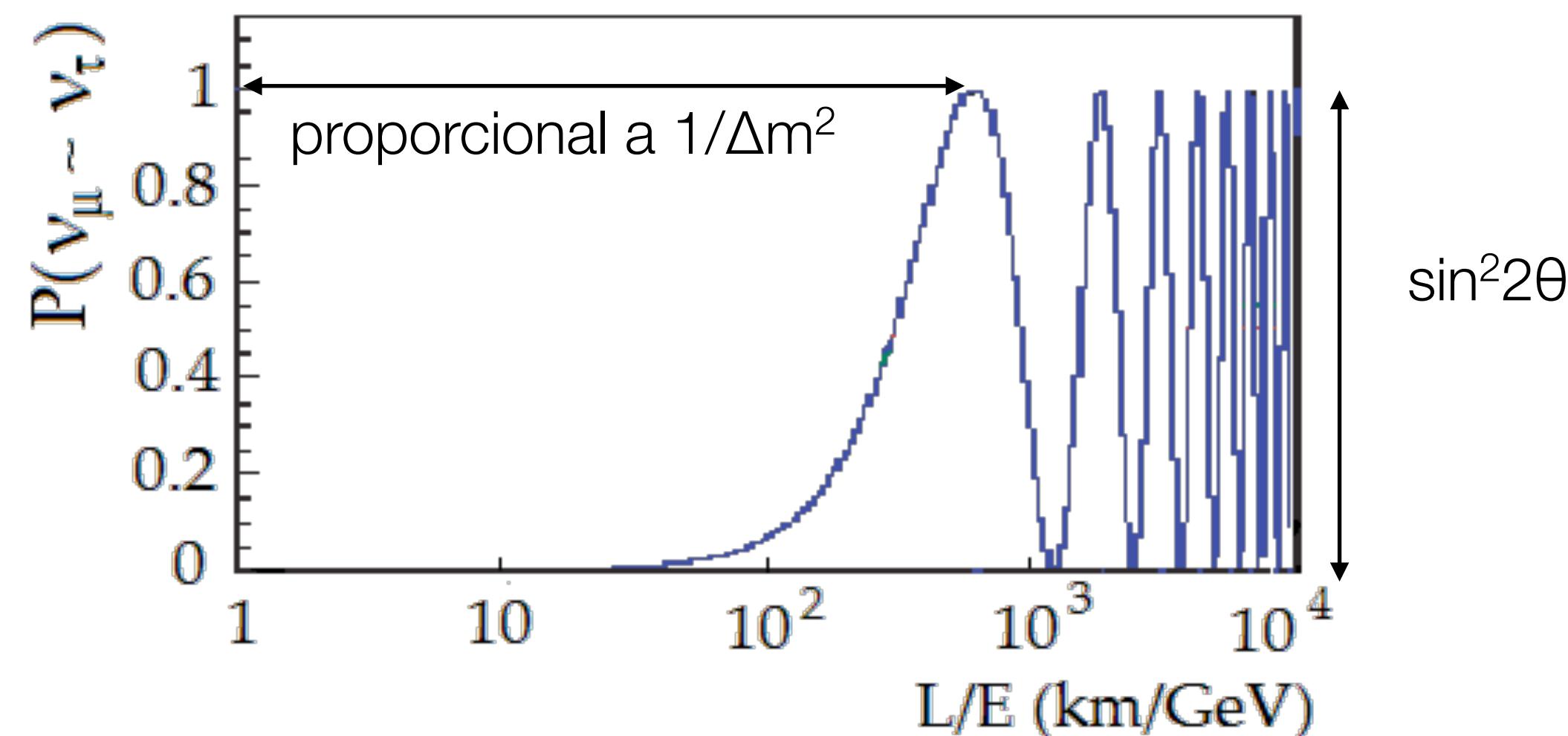
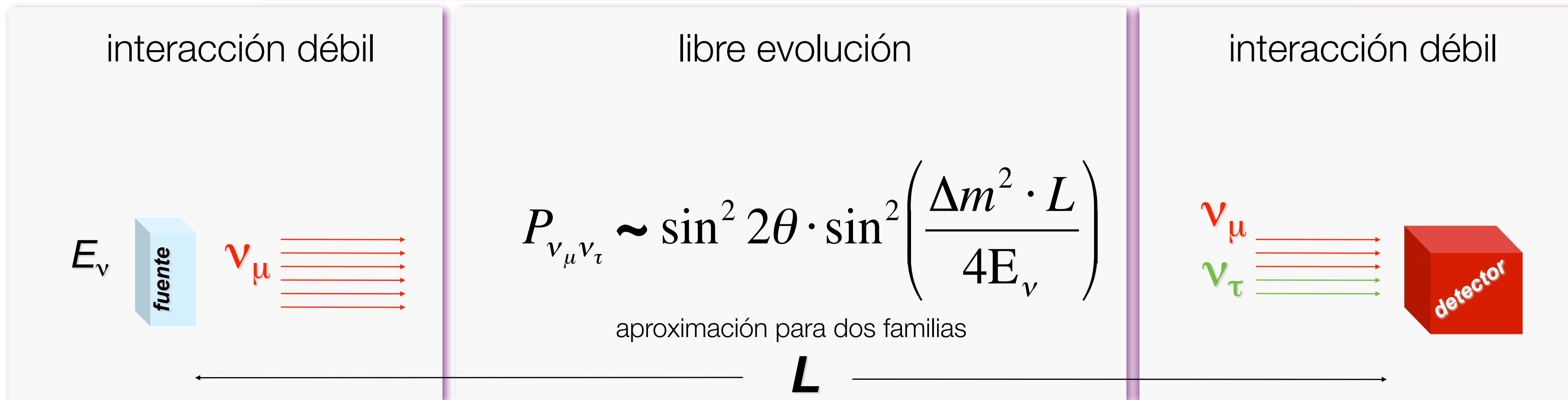
# ¿ Estaba loco Bruno Pontecorvo ?



- ¿ 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

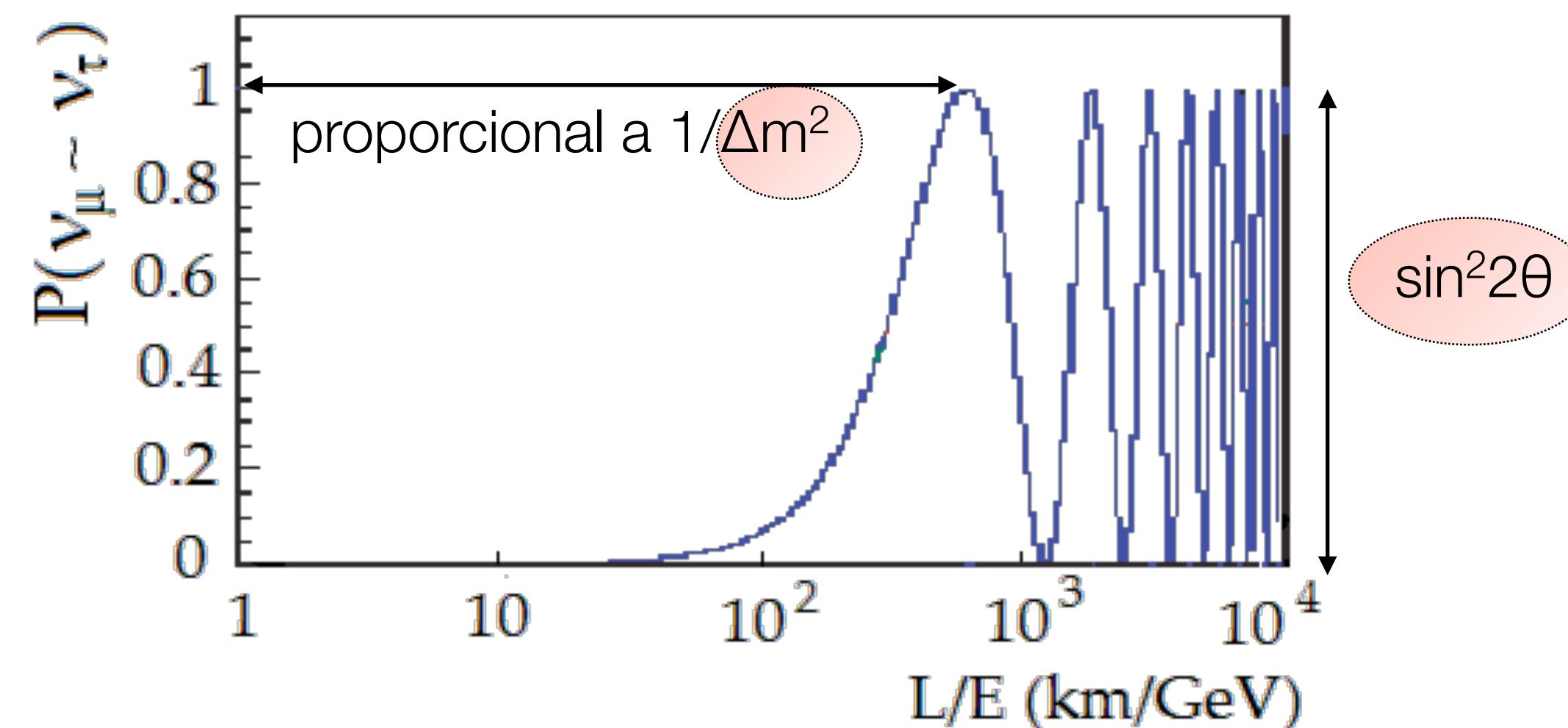
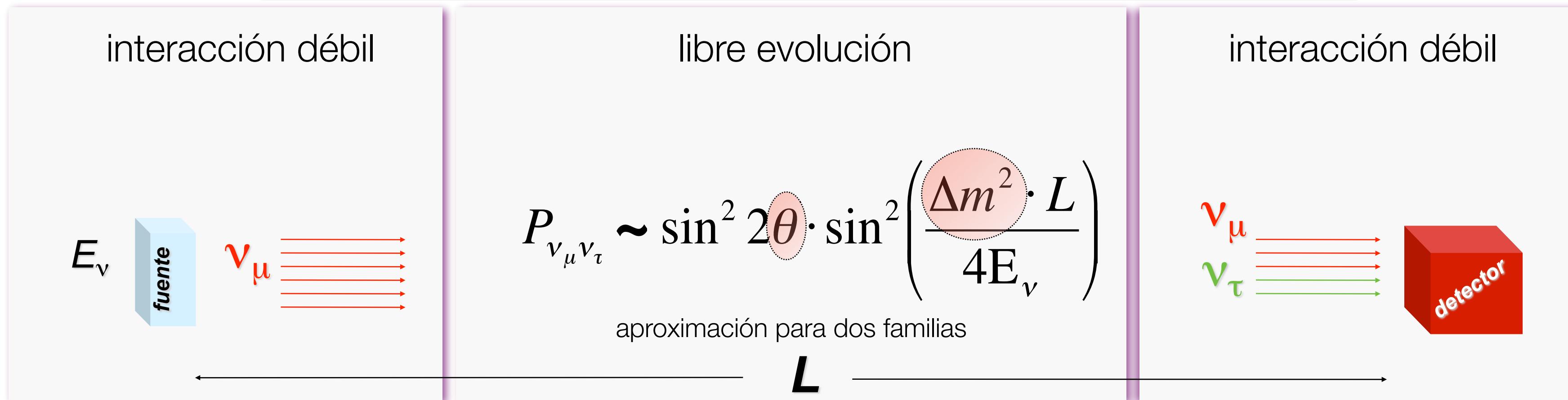
# Oscilaciones de neutrinos

Requisitos: Neutrinos tienen masas diferentes



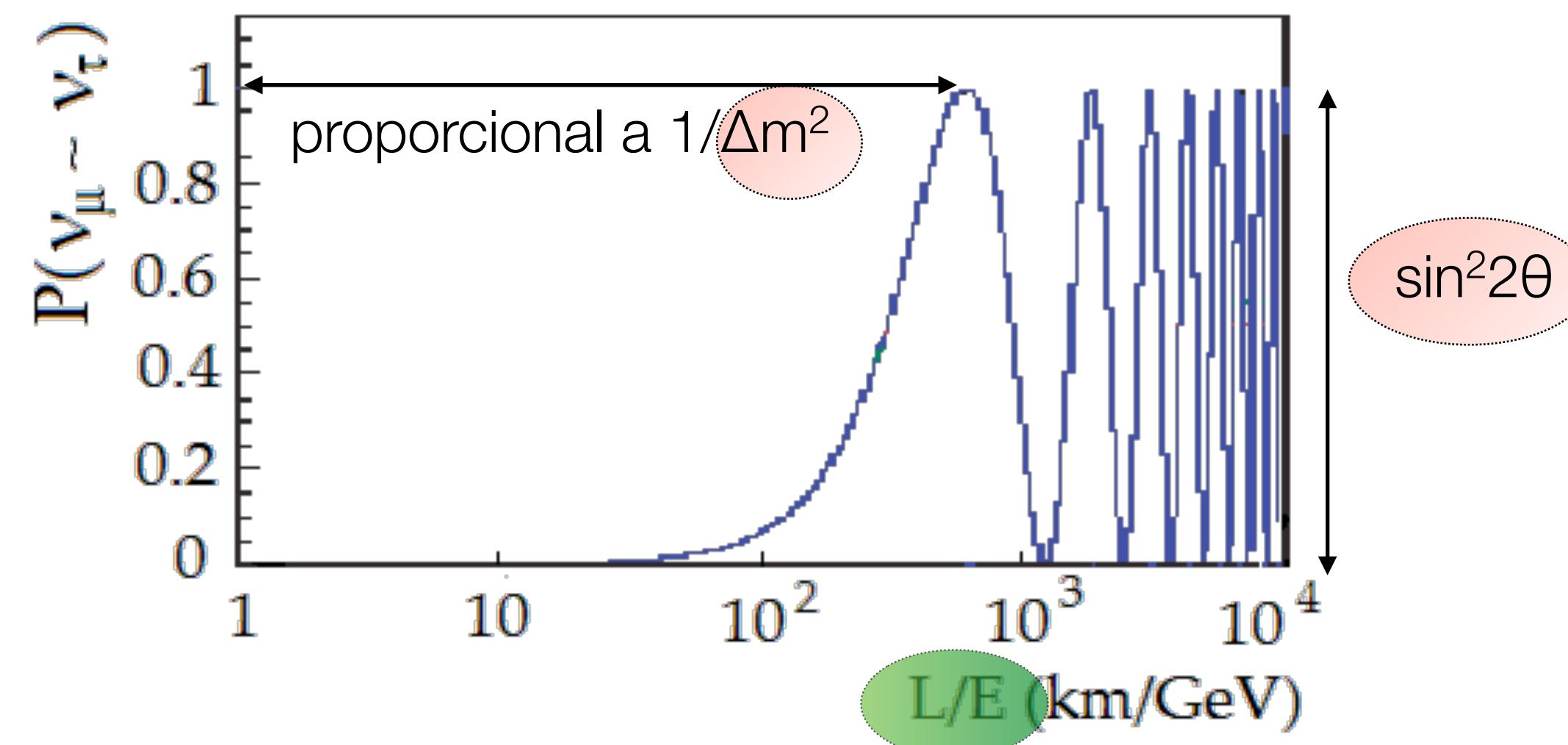
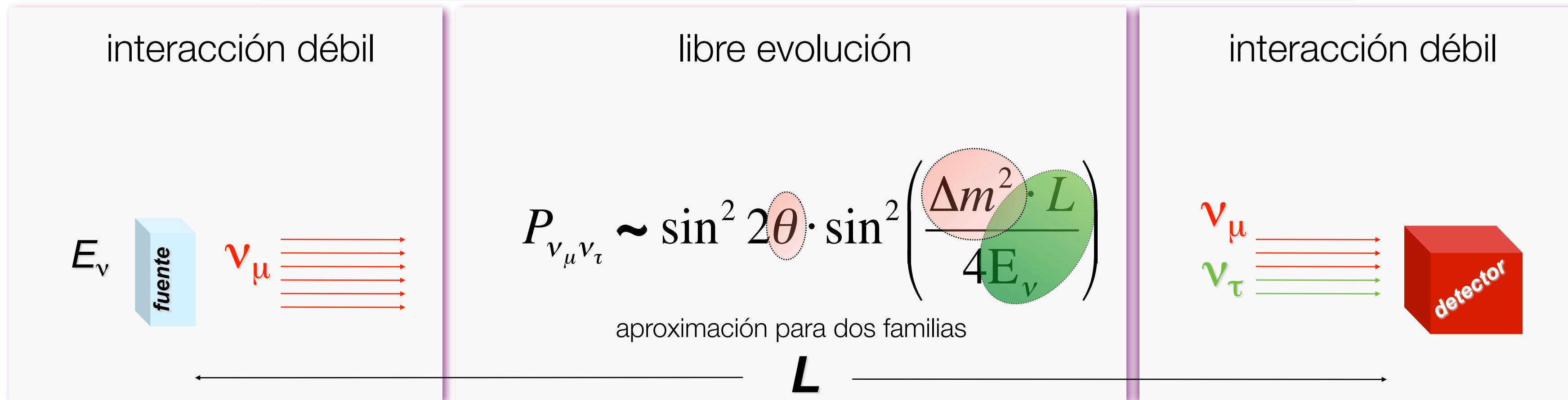
# Oscilaciones de neutrinos

Requisitos: Neutrinos tienen masas diferentes



# Oscilaciones de neutrinos

Requisitos: Neutrinos tienen masas diferentes



# La búsqueda

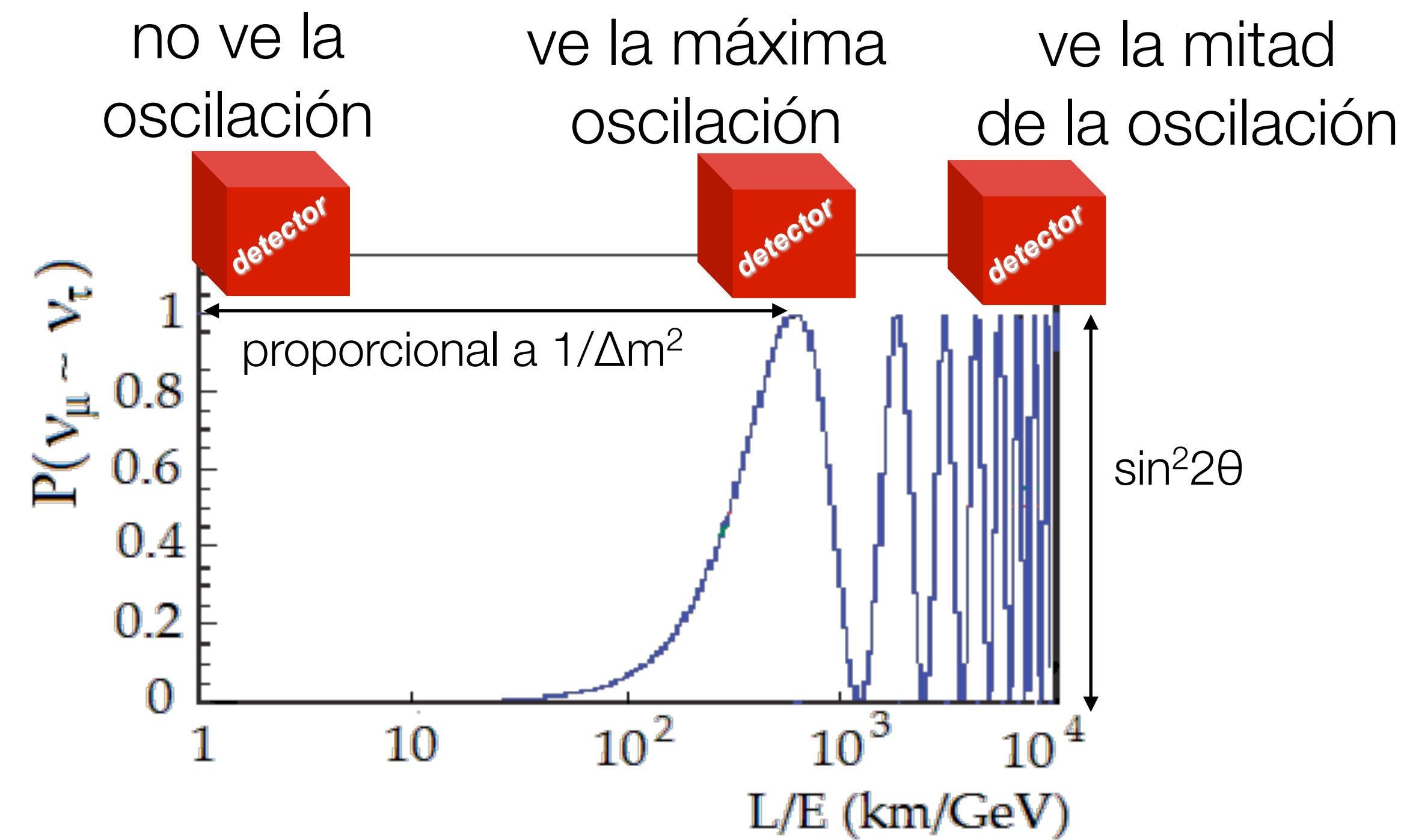
---

- 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

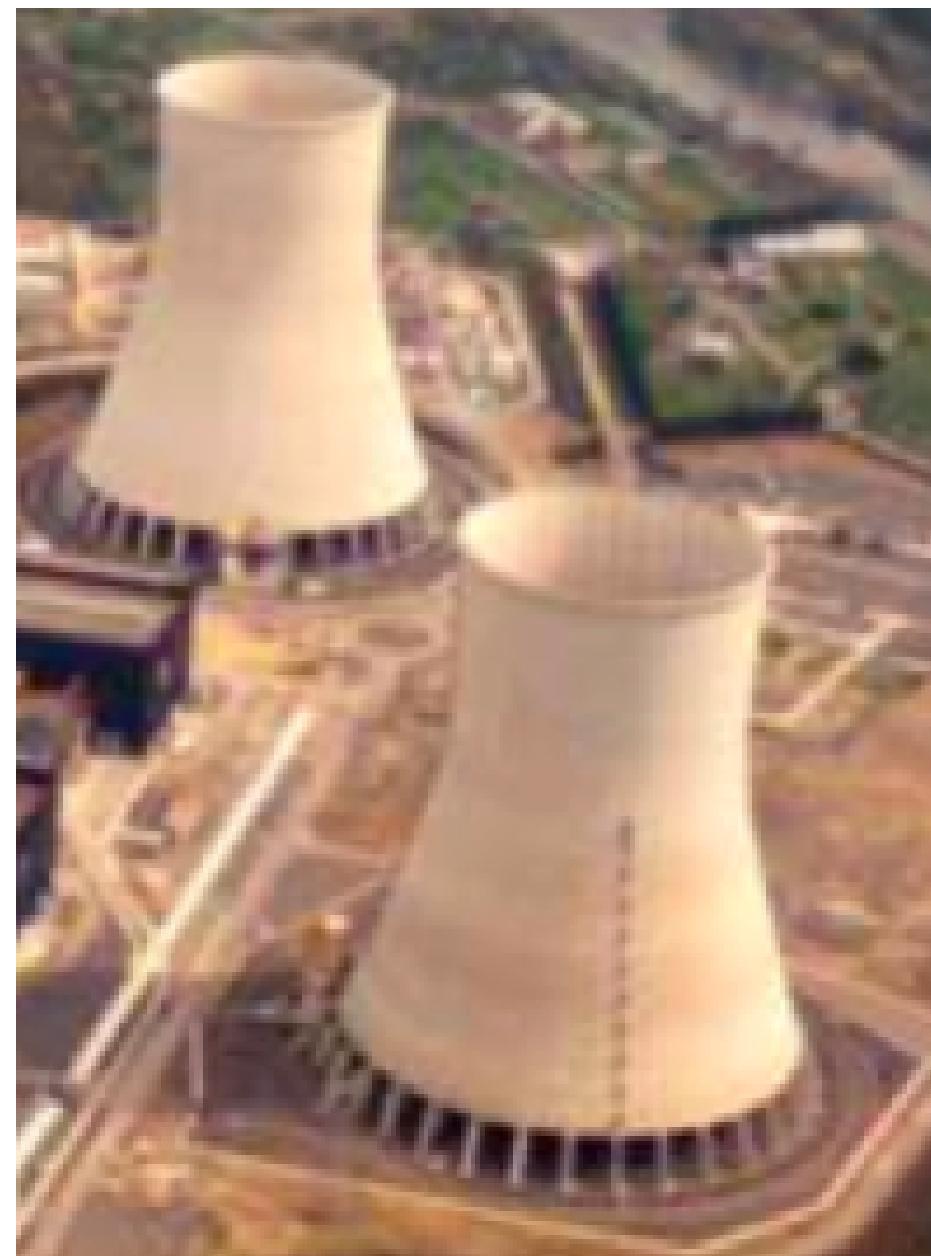
- El estudio de las oscilaciones requiere una fuente muy intensa de neutrinos y un detector muy masivo situado a la distancia correcta, que depende de  $\Delta m^2$



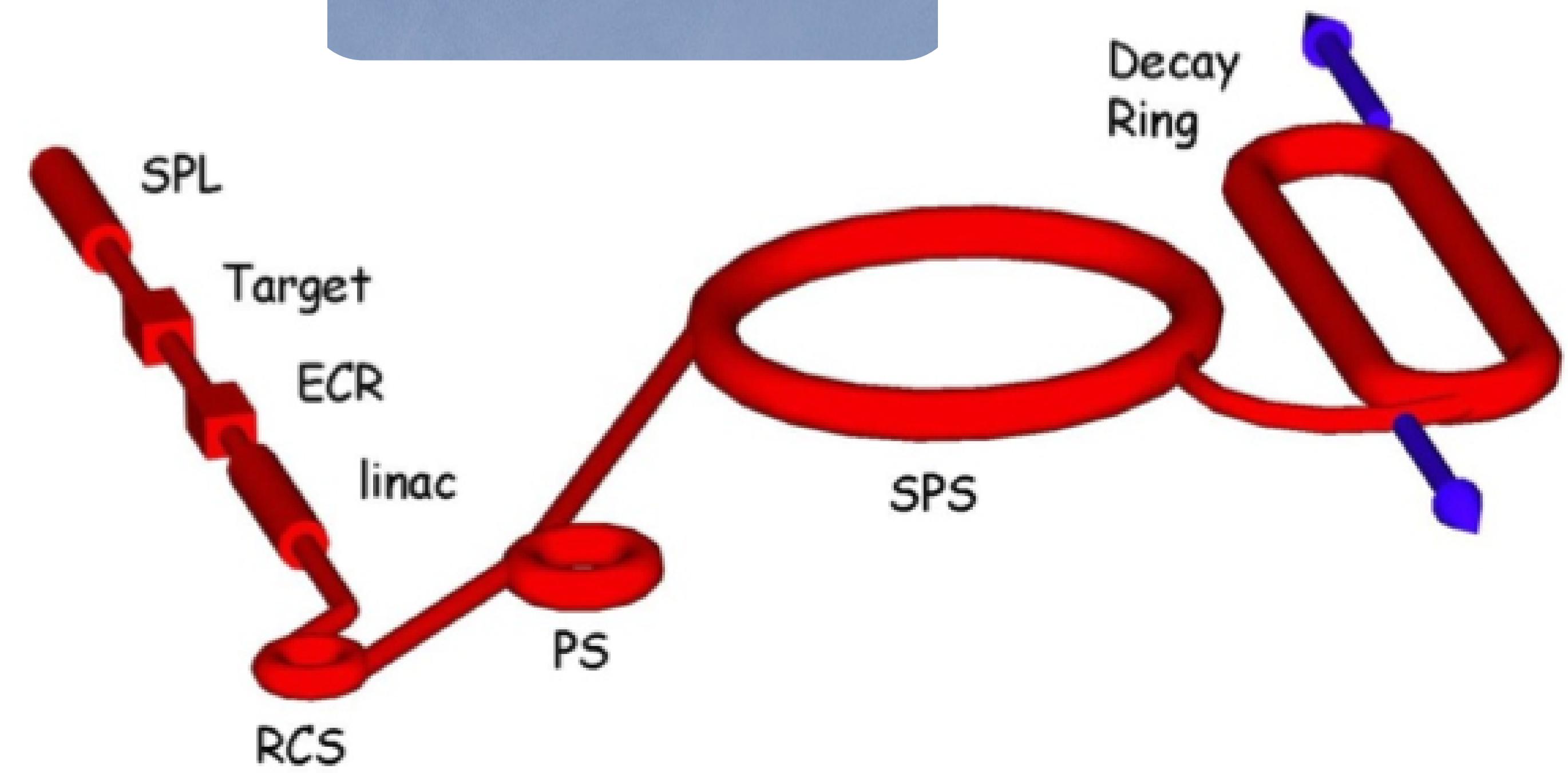
# Fuentes artificiales

- Las fuentes artificiales pueden ser controladas:
  - Elegimos  $E$  y  $L$ , de forma que podemos explorar regiones de  $\Delta m^2$  concretas

Reactores

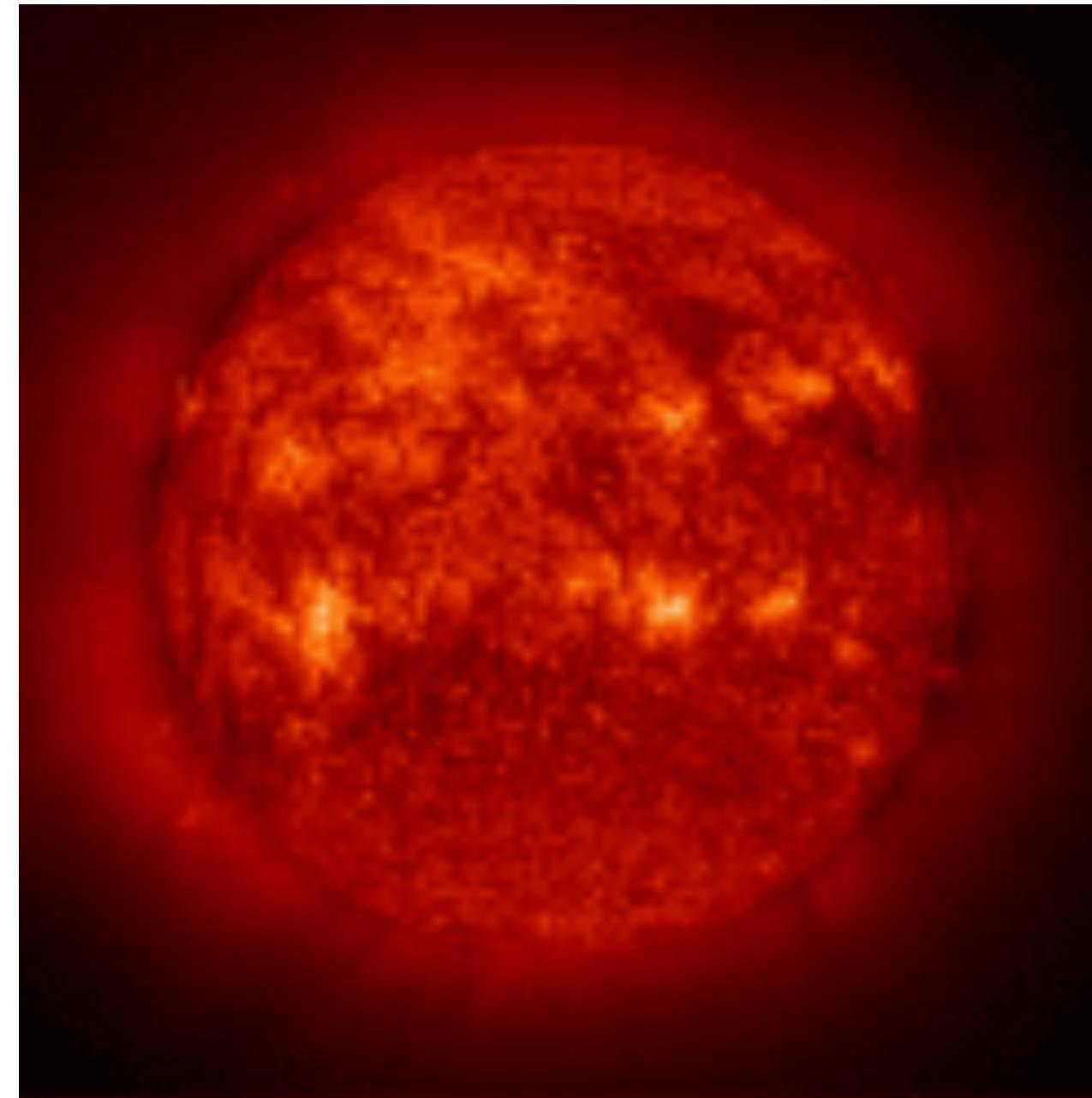


Acceleradores



# Fuentes naturales de neutrinos

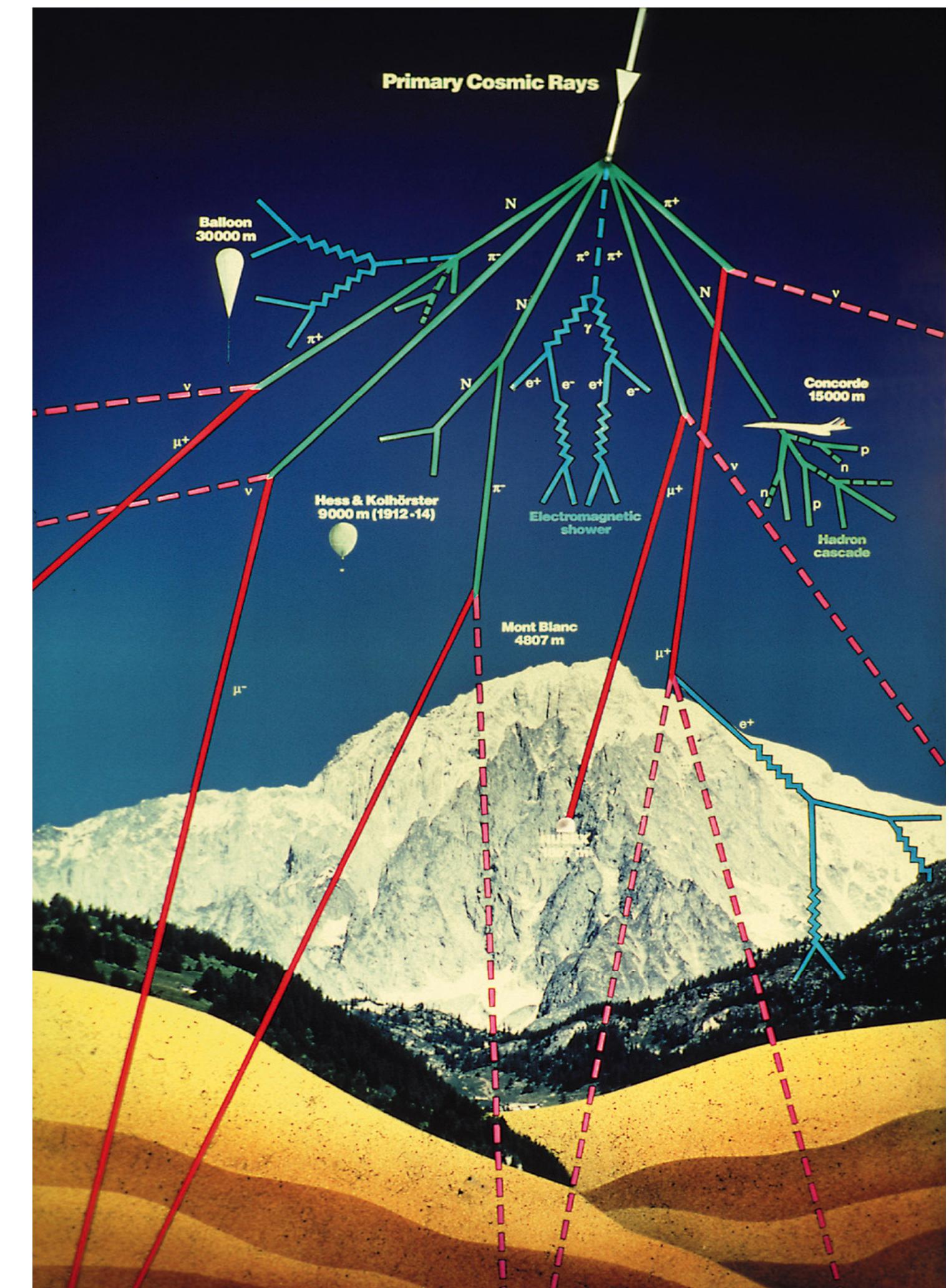
Sol



Supernova



Atmósfera



- Las fuentes naturales “son como son”,  $E$  y  $L$  nos vienen dadas. Pero tienen una gran ventaja ...

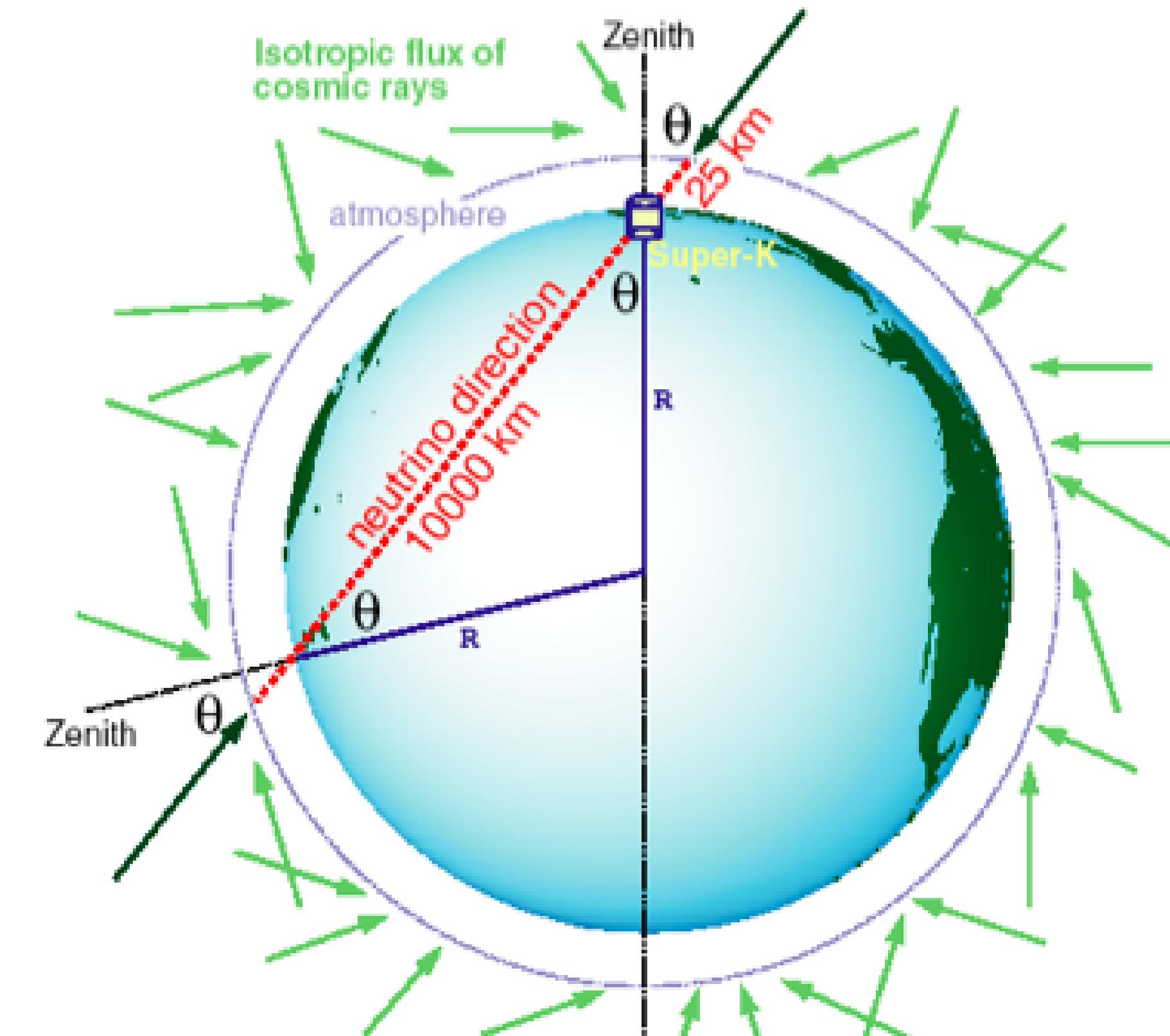
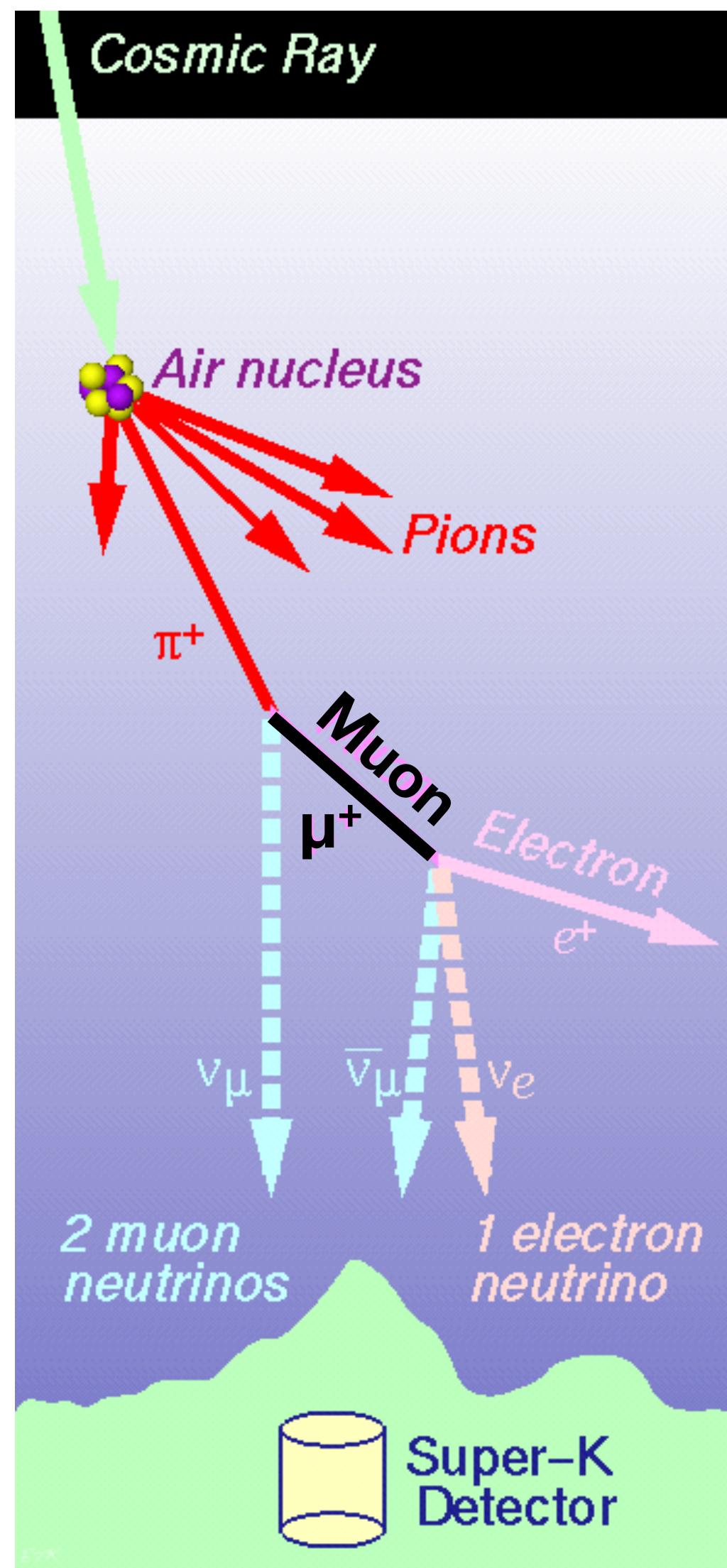
# De noche en una playa ...

- Supón que te encuentras en una isla desierta; en una playa paradisiaca. Te han dicho que hay alguien más, pero no sabes donde. Hay un problema añadido, es de noche.



- Que es más fácil, encontrar a tu misterioso compañero en una noche de luna llena sin ayuda artificial, o en una noche sin luna con una linterna super potente ?

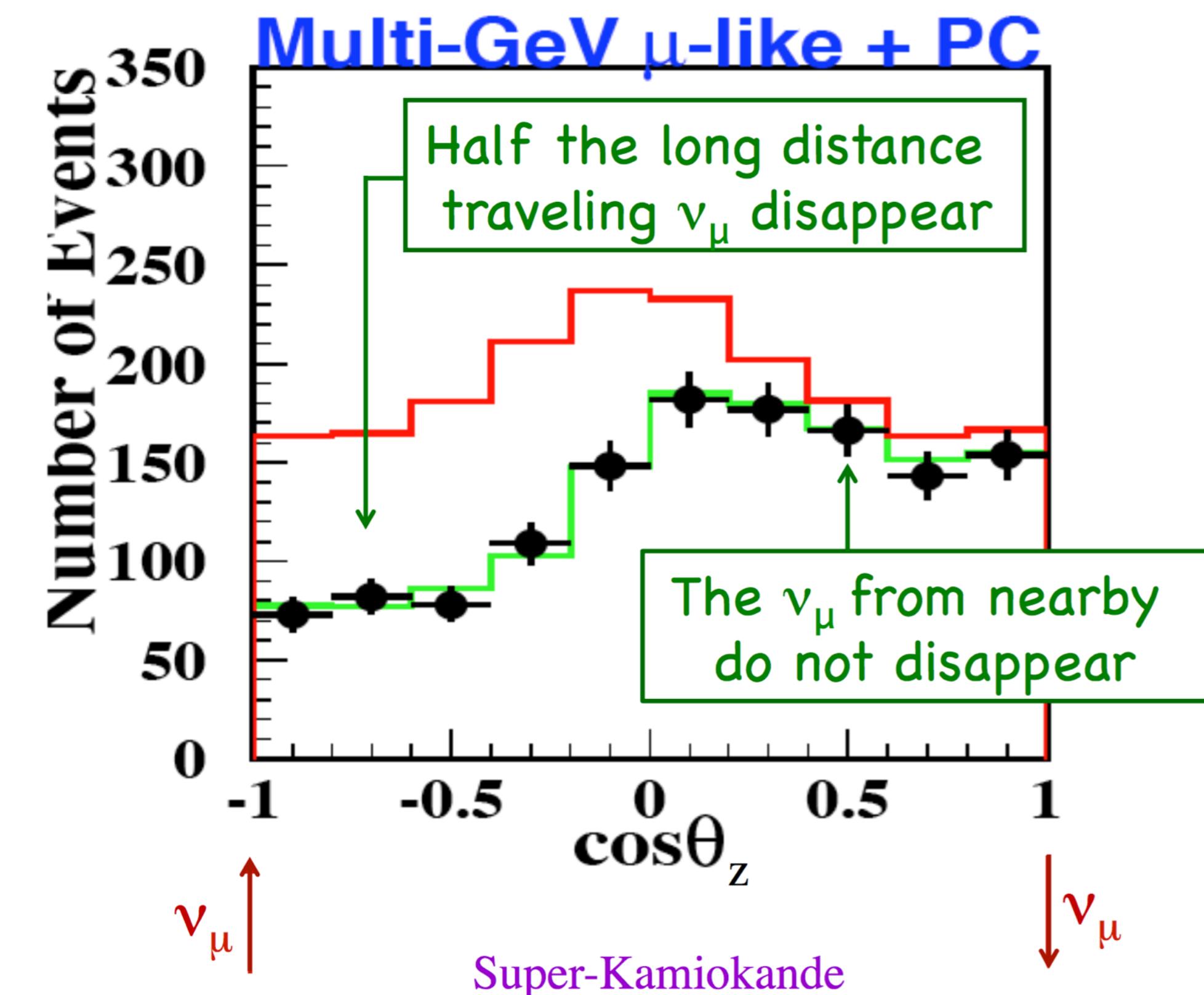
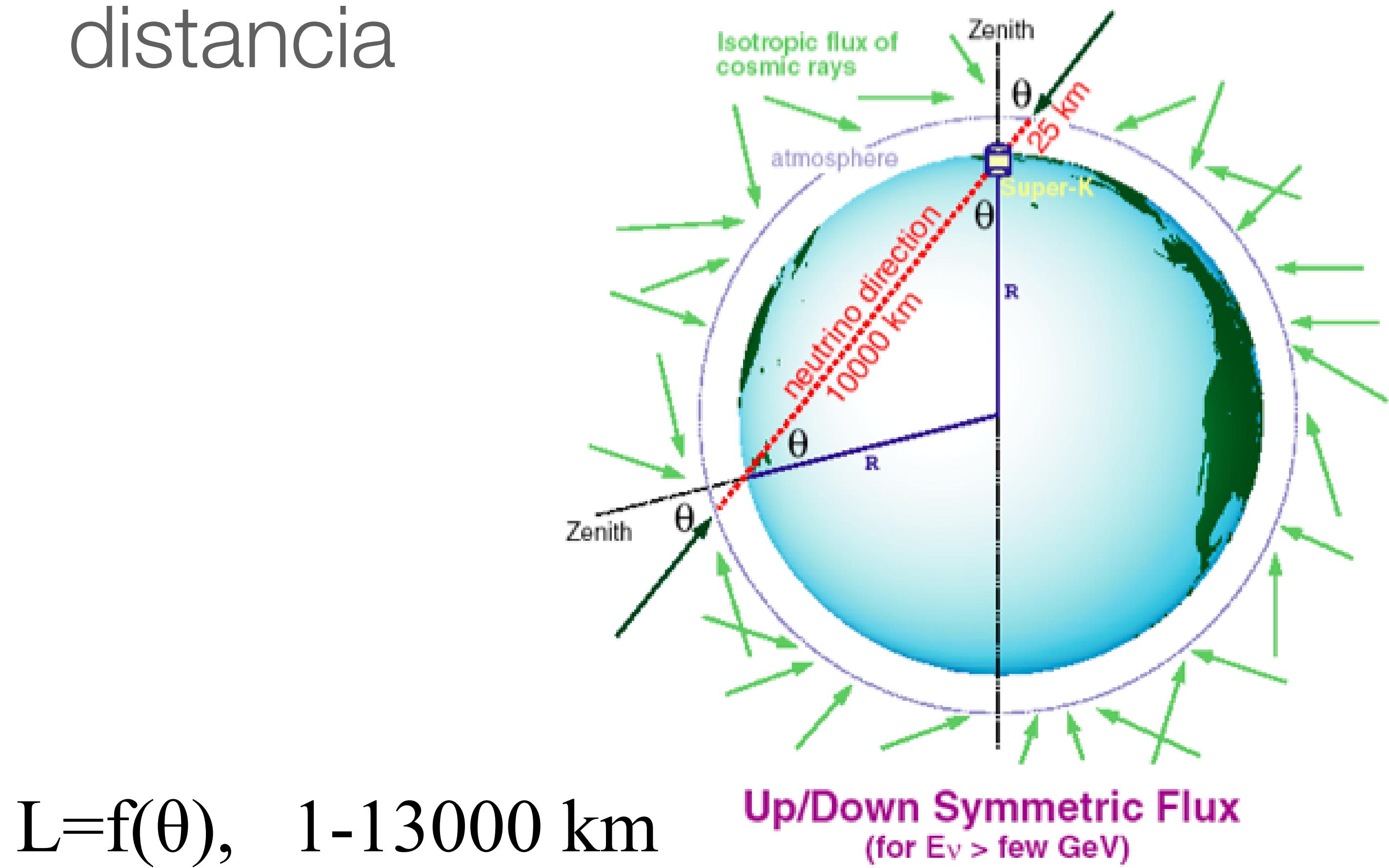
# Neutrinos atmosféricos



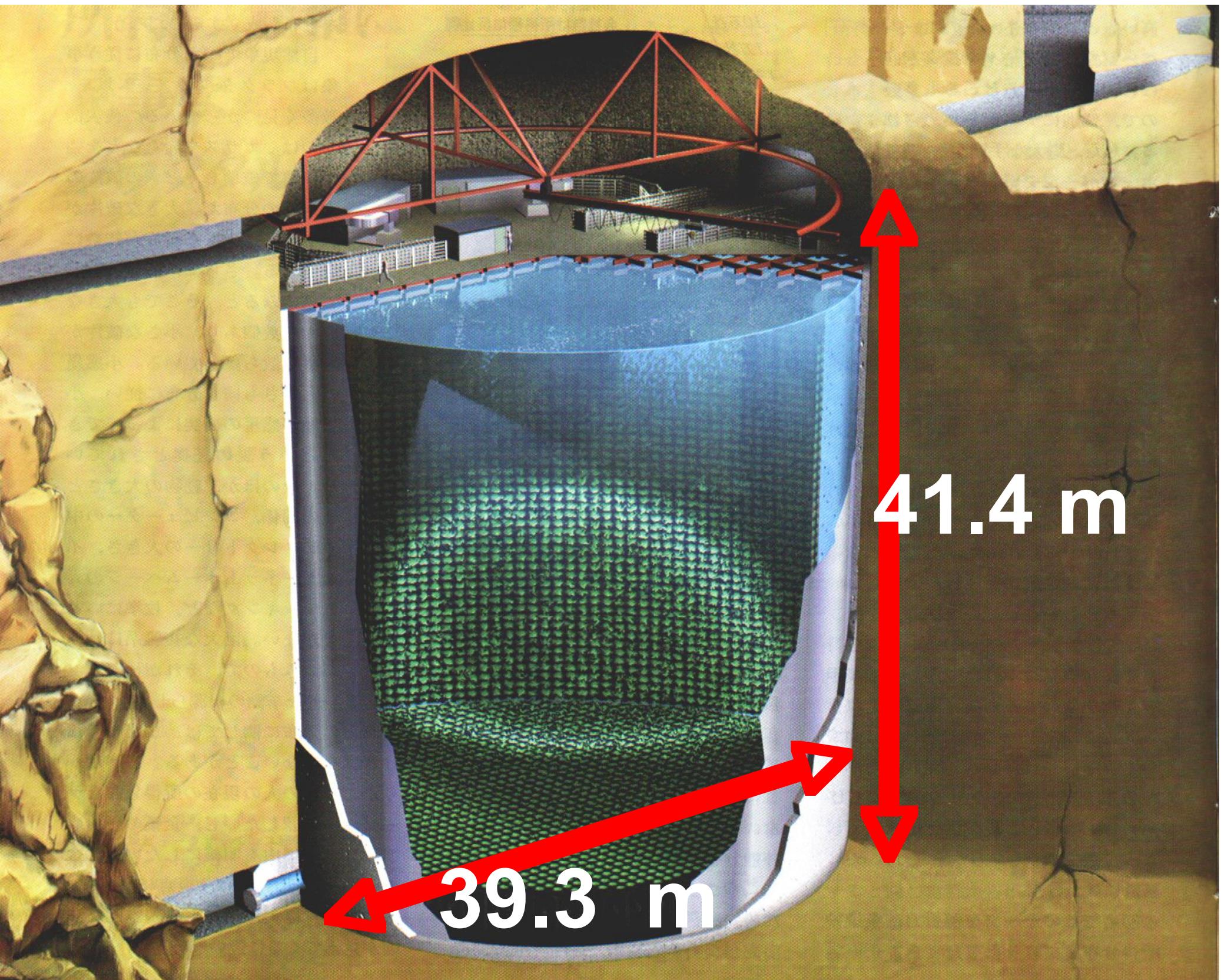
$$L/E \sim 1 - 10^4 \text{ km/GeV}$$

# El descubrimiento

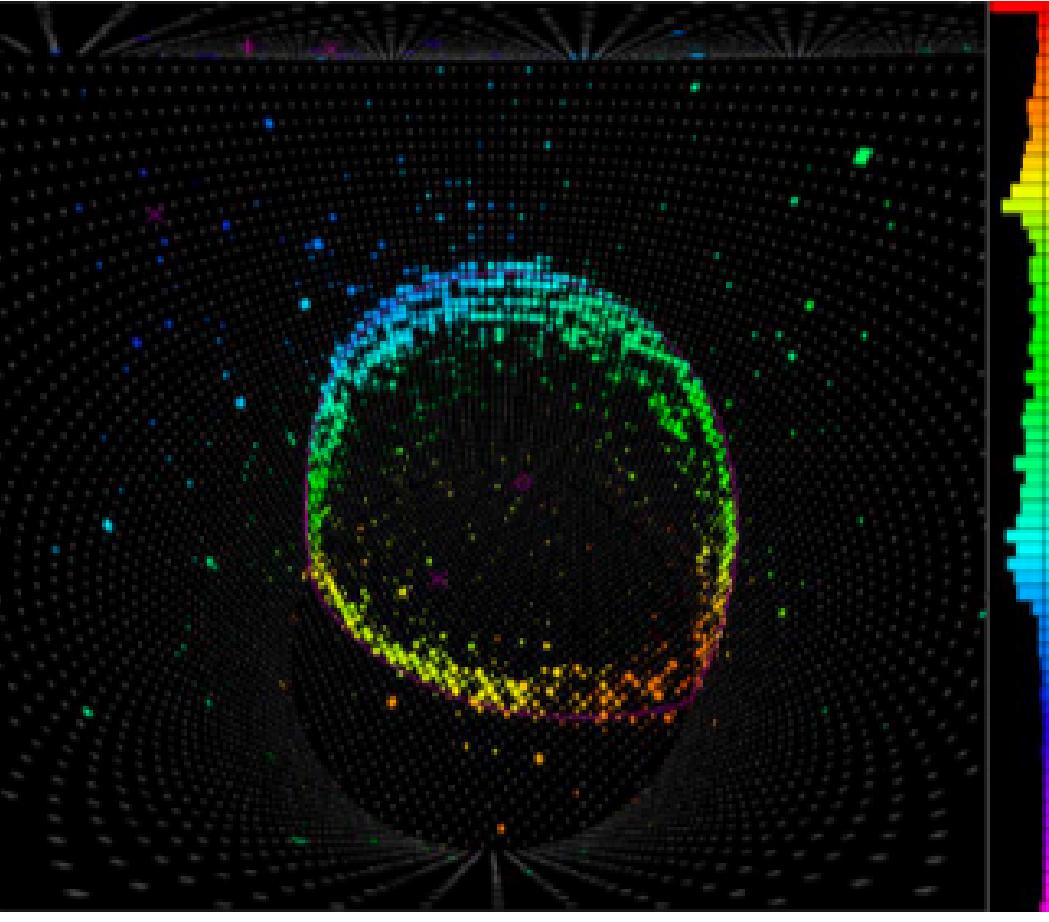
- Super-Kamiokande observó en 1998 que el déficit de neutrinos atmosféricos dependía del ángulo y por tanto de la distancia



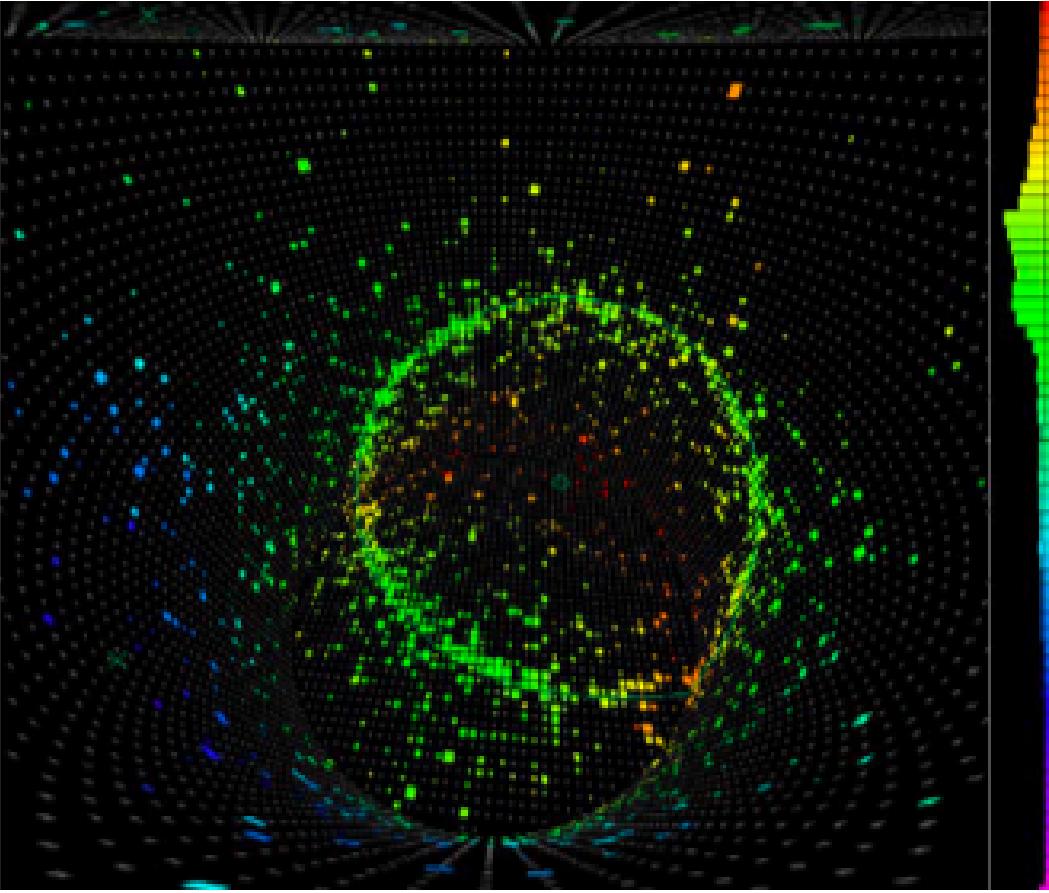
# Super-Kamiokande



anillo de tipo muón



anillo de tipo electrón



# de nuevo en la playa

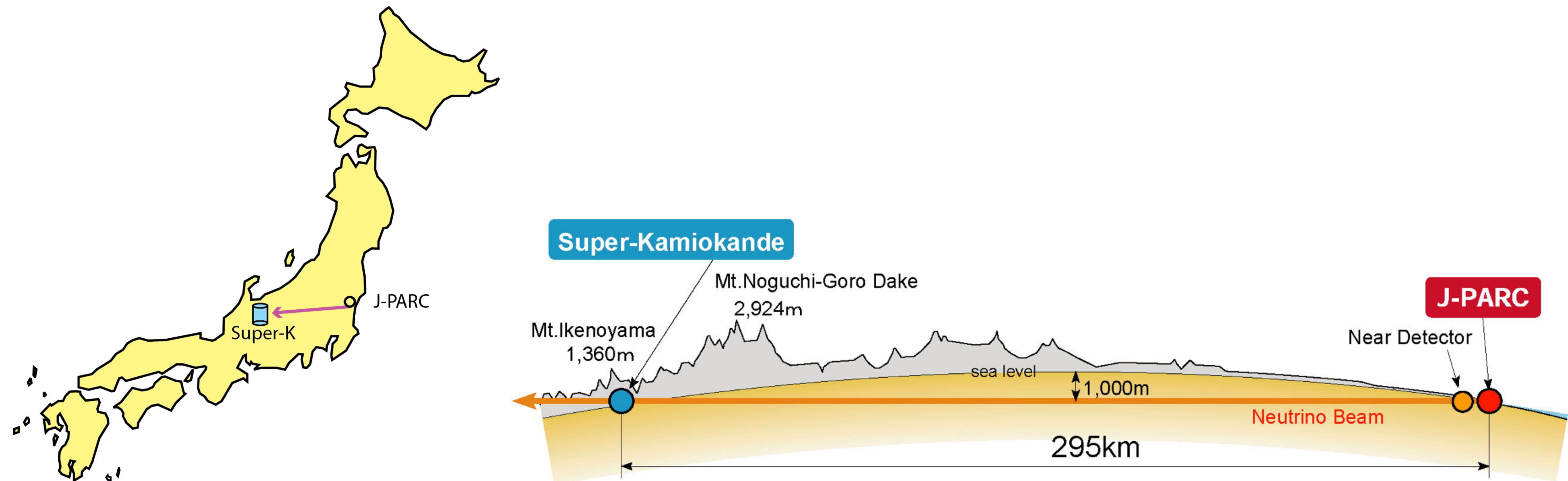
---

- Ahora que has encontrado a alguien en esa noche de luna llena, quieres saber algo más sobre esa persona: el color de su pelo, de sus ojos, etc
- Ahora si que te puede ser útil la linterna
- La fuentes de neutrinos creadas por el hombre nos permiten estudiar sus propiedades en detalle, pues podemos poner el foco donde más nos interesa en cada caso



# El experimento T2K en Japón

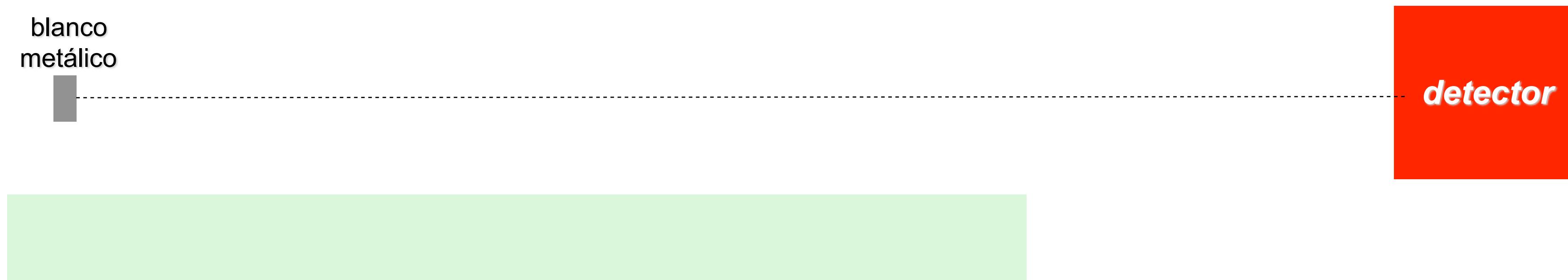
- Pionero en la búsqueda de **violación de CP**
- Nuestro grupo participa en T2K desde 2006



# Haces de neutrinos



- Todos los haces de neutrinos se producen así

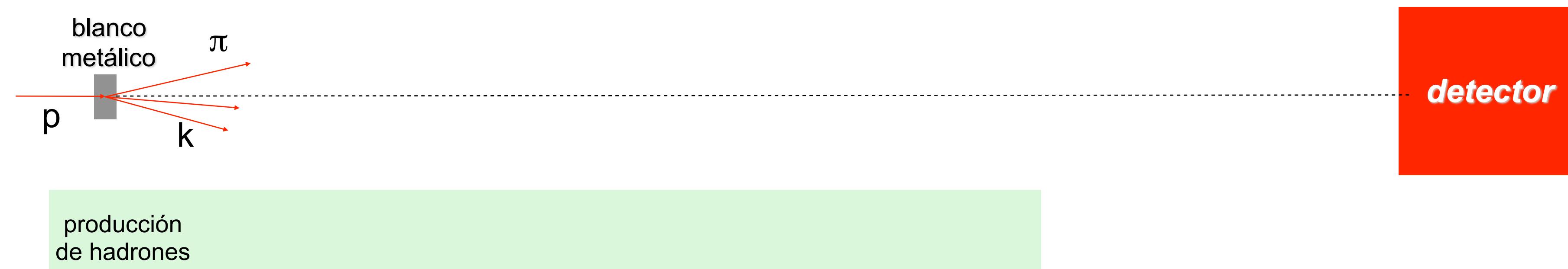


- En T2K buscamos un exceso de neutrinos electrónicos en el detector situado a 295 km

# Haces de neutrinos



- Todos los haces de neutrinos se producen así

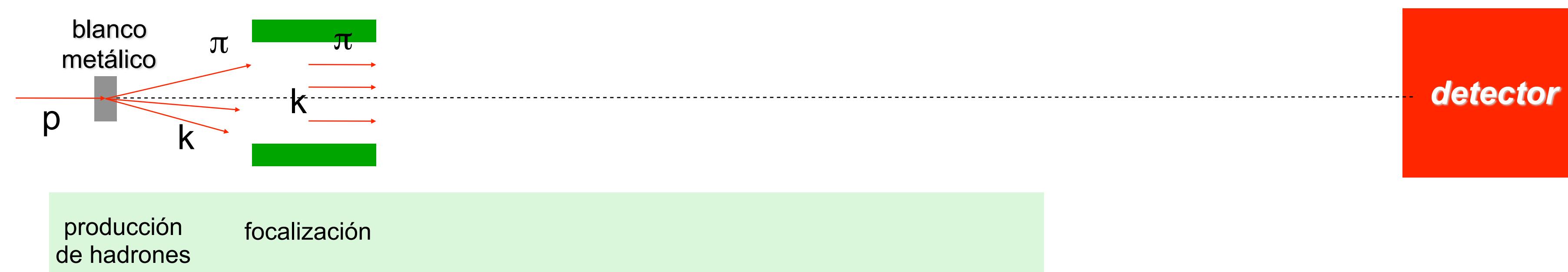


- En T2K buscamos un exceso de neutrinos electrónicos en el detector situado a 295 km

# Haces de neutrinos



- Todos los haces de neutrinos se producen así

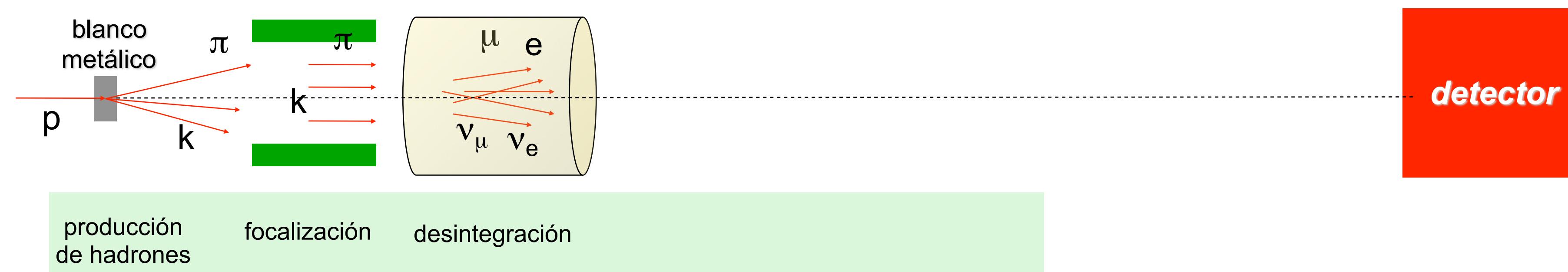


- En T2K buscamos un exceso de neutrinos electrónicos en el detector situado a 295 km

# Haces de neutrinos



- Todos los haces de neutrinos se producen así

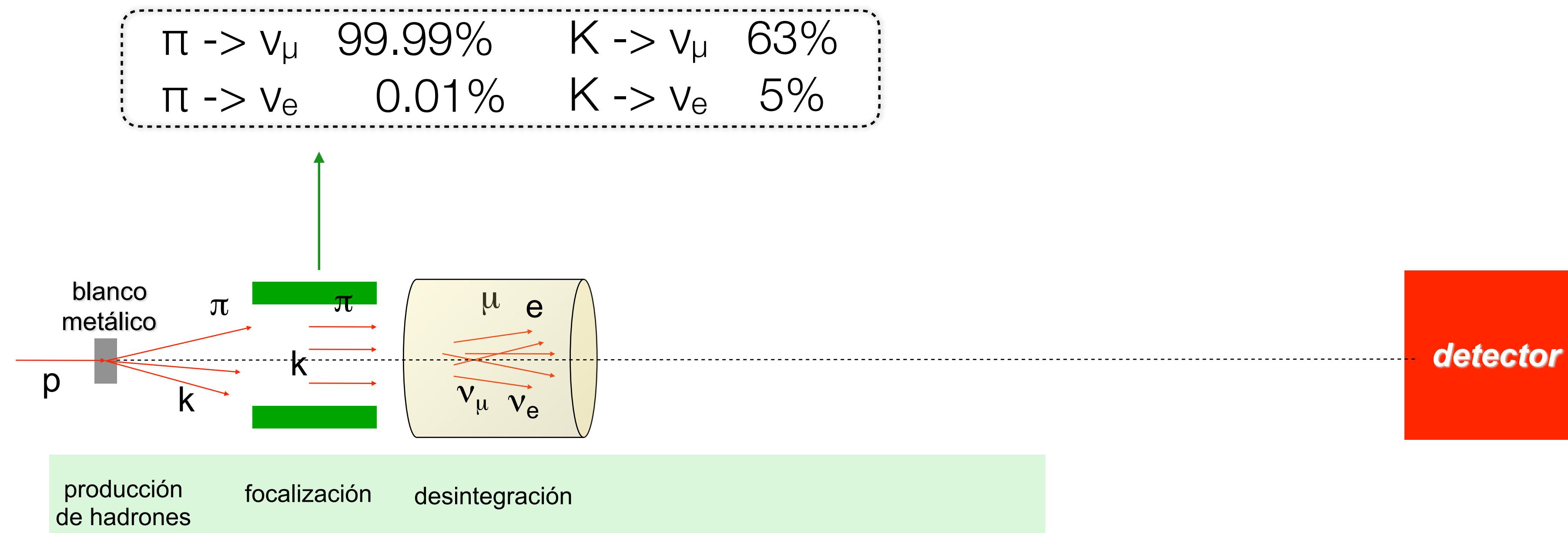


- En T2K buscamos un exceso de neutrinos electrónicos en el detector situado a 295 km

# Haces de neutrinos



- Todos los haces de neutrinos se producen así

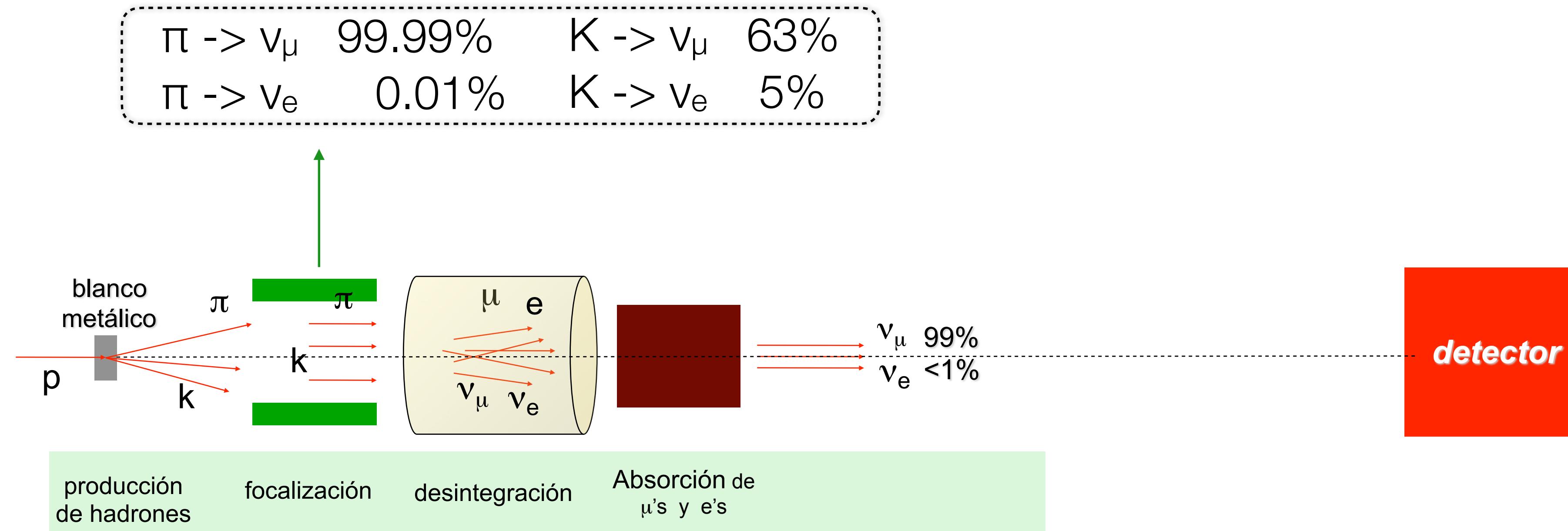


- En T2K buscamos un exceso de neutrinos electrónicos en el detector situado a 295 km

# Haces de neutrinos

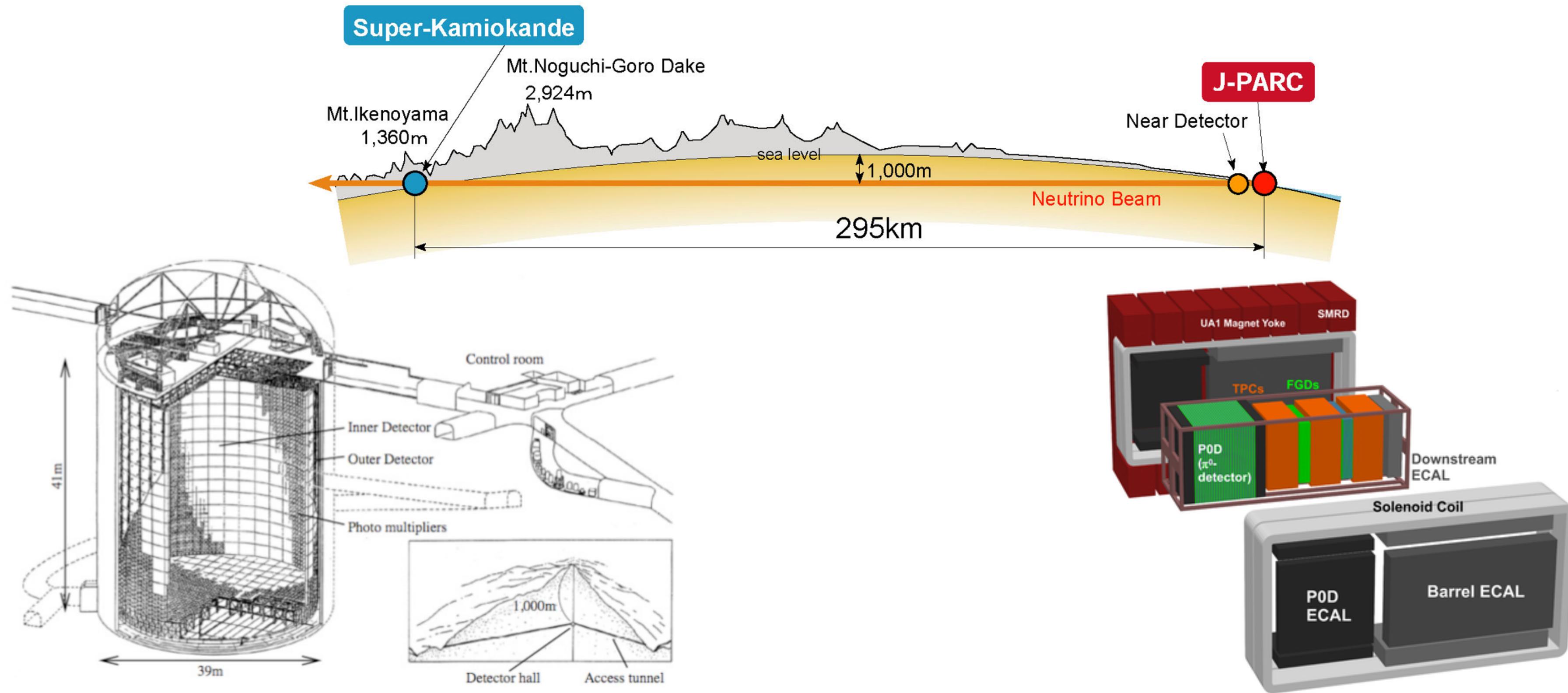


- Todos los haces de neutrinos se producen así

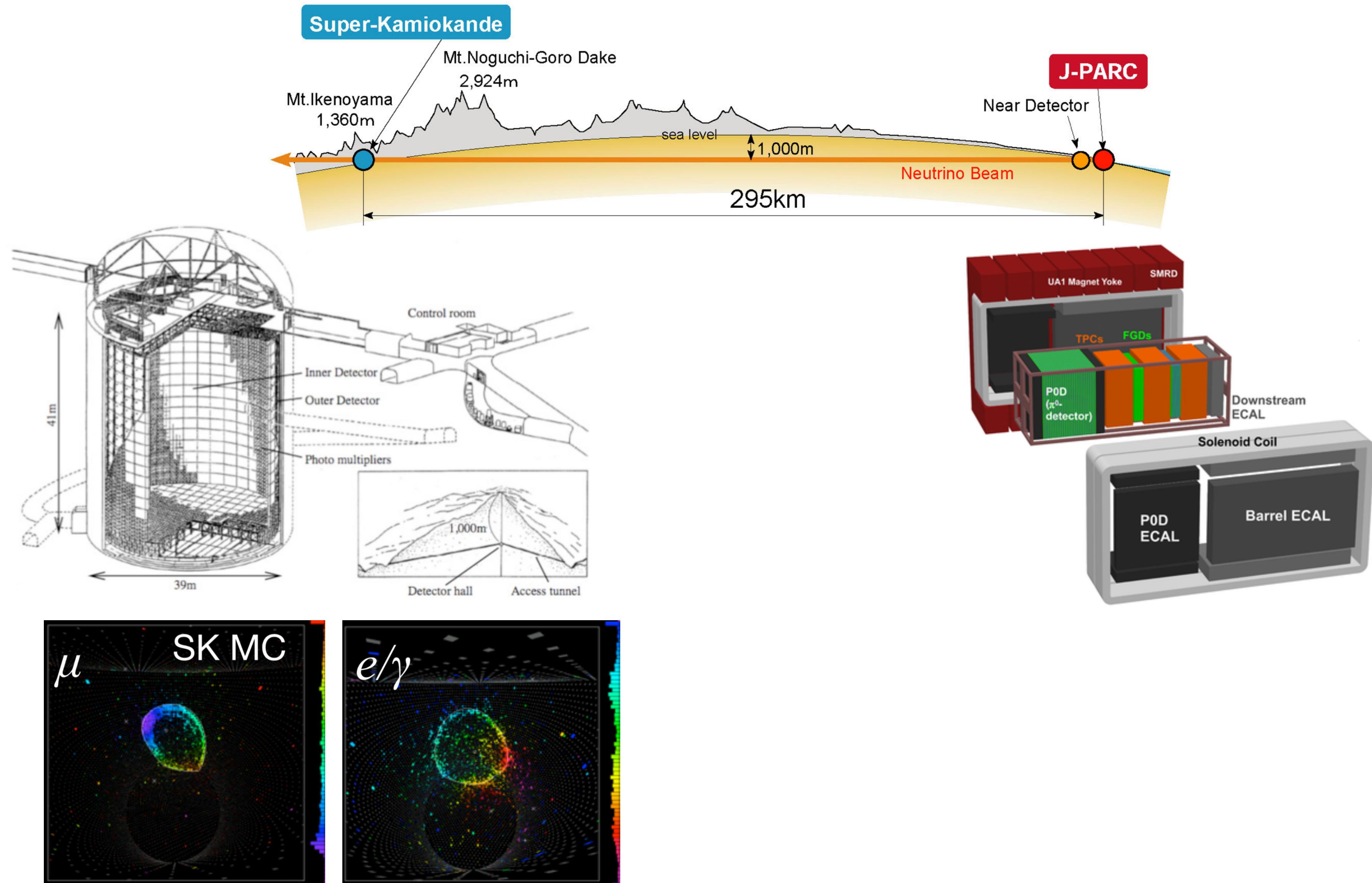


- En T2K buscamos un exceso de neutrinos electrónicos en el detector situado a 295 km

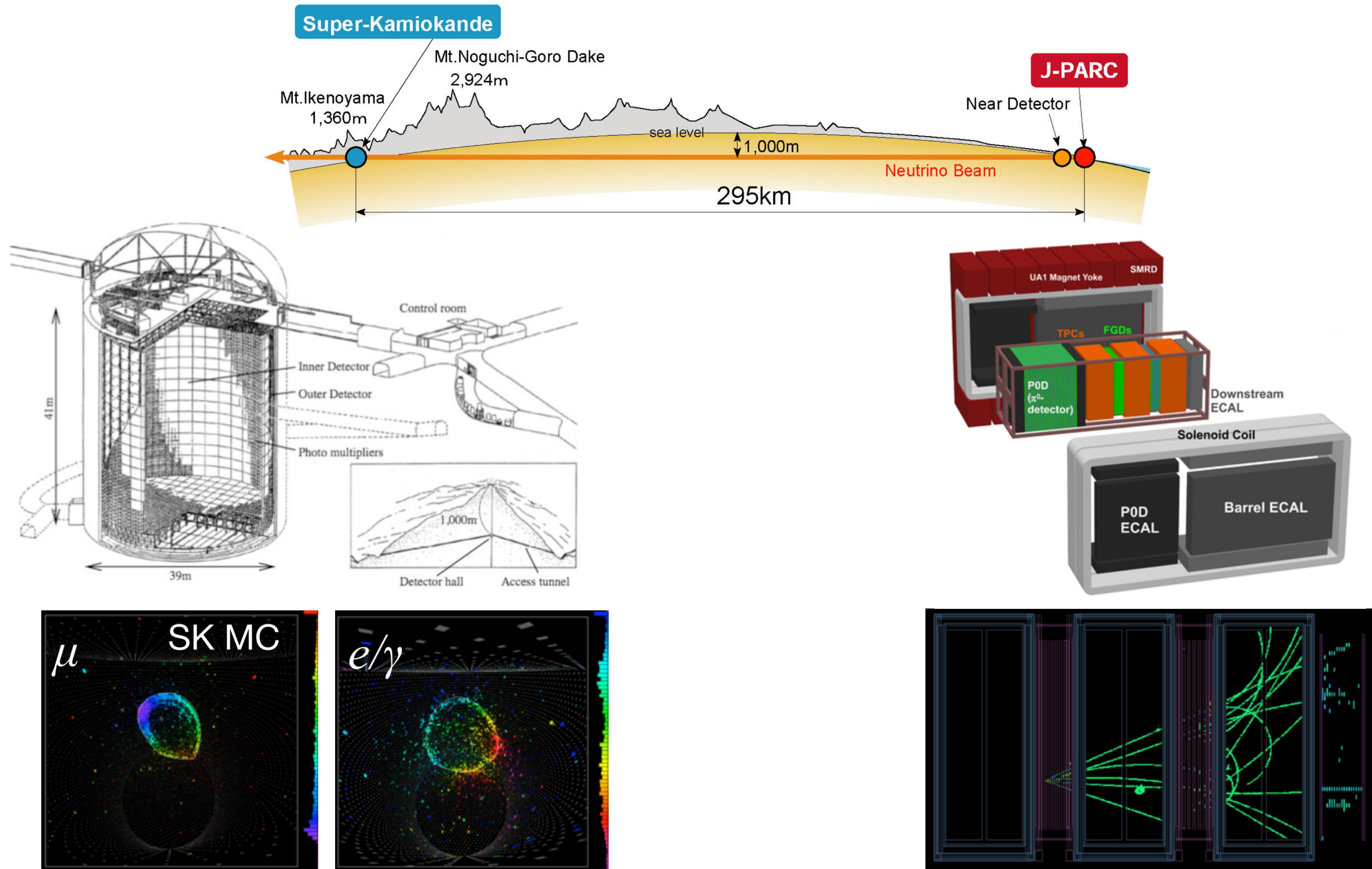
# Los detectores de T2K



# Los detectores de T2K



# Los detectores de T2K



# ¿ 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?

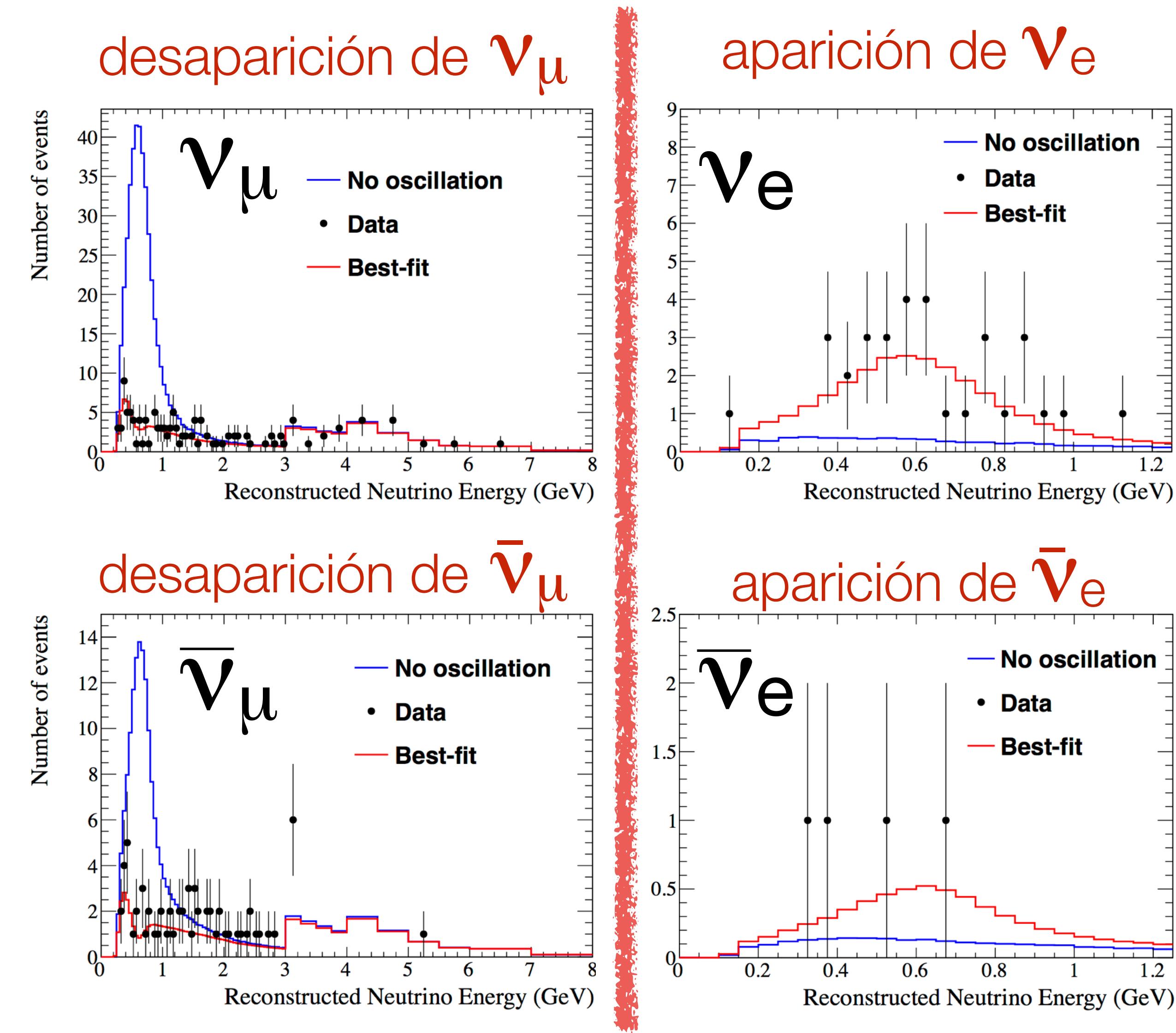


- La Física experimental no es solo esto:
  - Hemos participado en el diseño del detector
  - En los prototipos (en el CERN)
  - En la calibración del detector
  - En la elaboración del software de ...
  - En la elaboración del programa de análisis
  - En la toma de datos ....

# Las oscilaciones de T2K



- La linea **azul** es lo que esperamos en ausencia de oscilaciones
- Los **puntos negros** con barras de error es lo que observamos
  - **menos neutrinos m\xf3nicos** de los que esperamos
  - **m\xfas neutrinos electr\xf3nicos** de los que esperamos
- La linea **roja** es lo que esperamos si hay oscilaciones, usando los par\xe1metros de oscilaci\xf3n que mejor describen la realidad



# ¿ Observa T2K violación de CP ?

---

- 90% de probabilidad de que  $\delta_{CP}$  no sea 0
- Para confirmarlo esta probabilidad tiene que ser  $>99.9999\%$ .  
Necesitamos más datos

# ¿Que viene después?

---

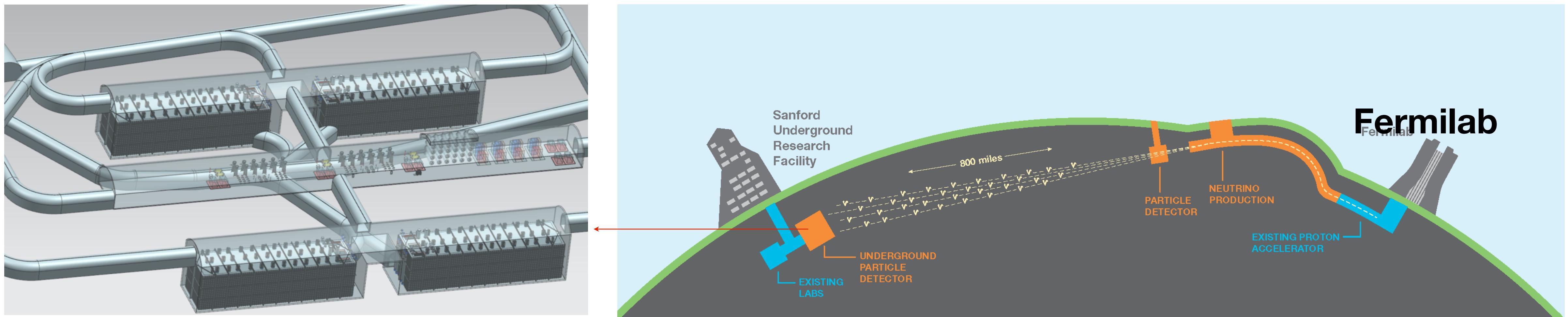
- T2K no es el final de la historia
- En los cinco años que le quedan de toma de datos no detectará suficientes neutrinos para descubrir la violación de CP, aunque puede quedarse muy cerca (tenemos indicios!!)
- Necesitamos un haz más potente y un detector más grande y/o eficiente
  - ¿Es esto posible?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

# Avances tecnológicos

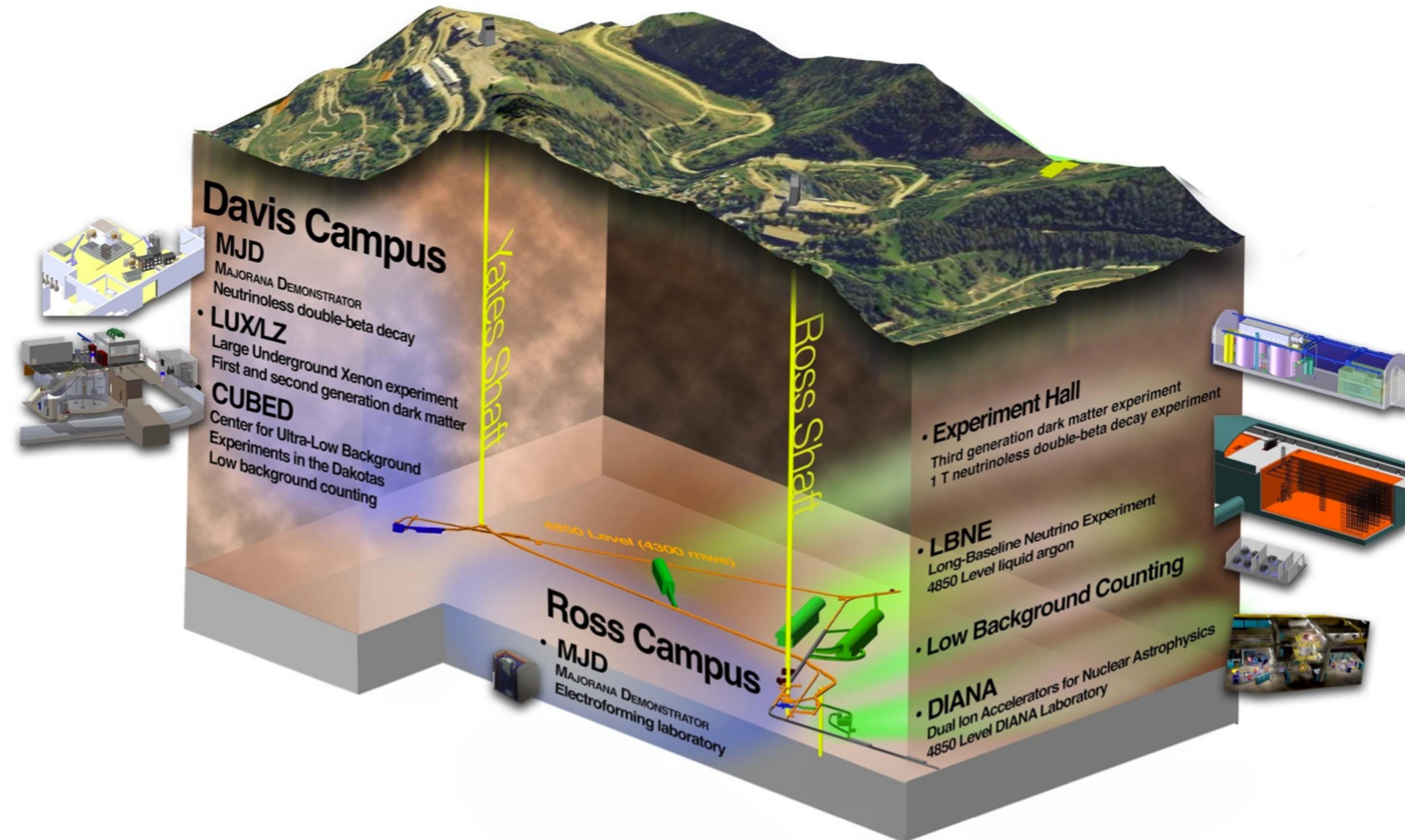
---

- 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

- 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
  - Similar en masa a Super-Kamiokande pero con una eficiencia de detección mucho mayor



# Liquid Argon events



# ProtoDUNE en el CERN

- Dos prototipos de DUNE se están construyendo en el CERN y tomaran datos en 2018 y 2019



# ¿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 construidos en el CERN (próximos tres años)
  - Somos responsables del sistema de control y de las medidas de temperatura
  - 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