

IFIC summer school  
2017

# Oscilaciones de Neutrinos

---

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

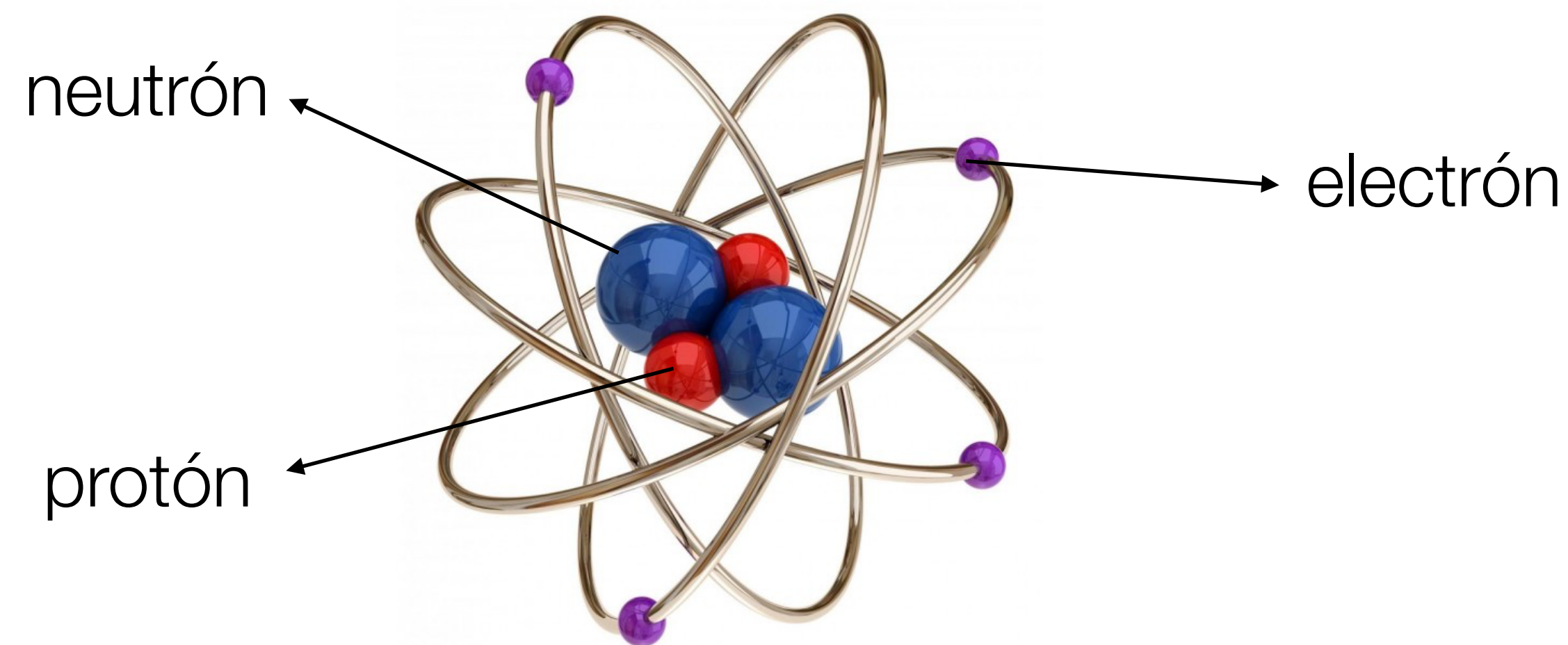
# Nuestro Universo

---

- 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

---

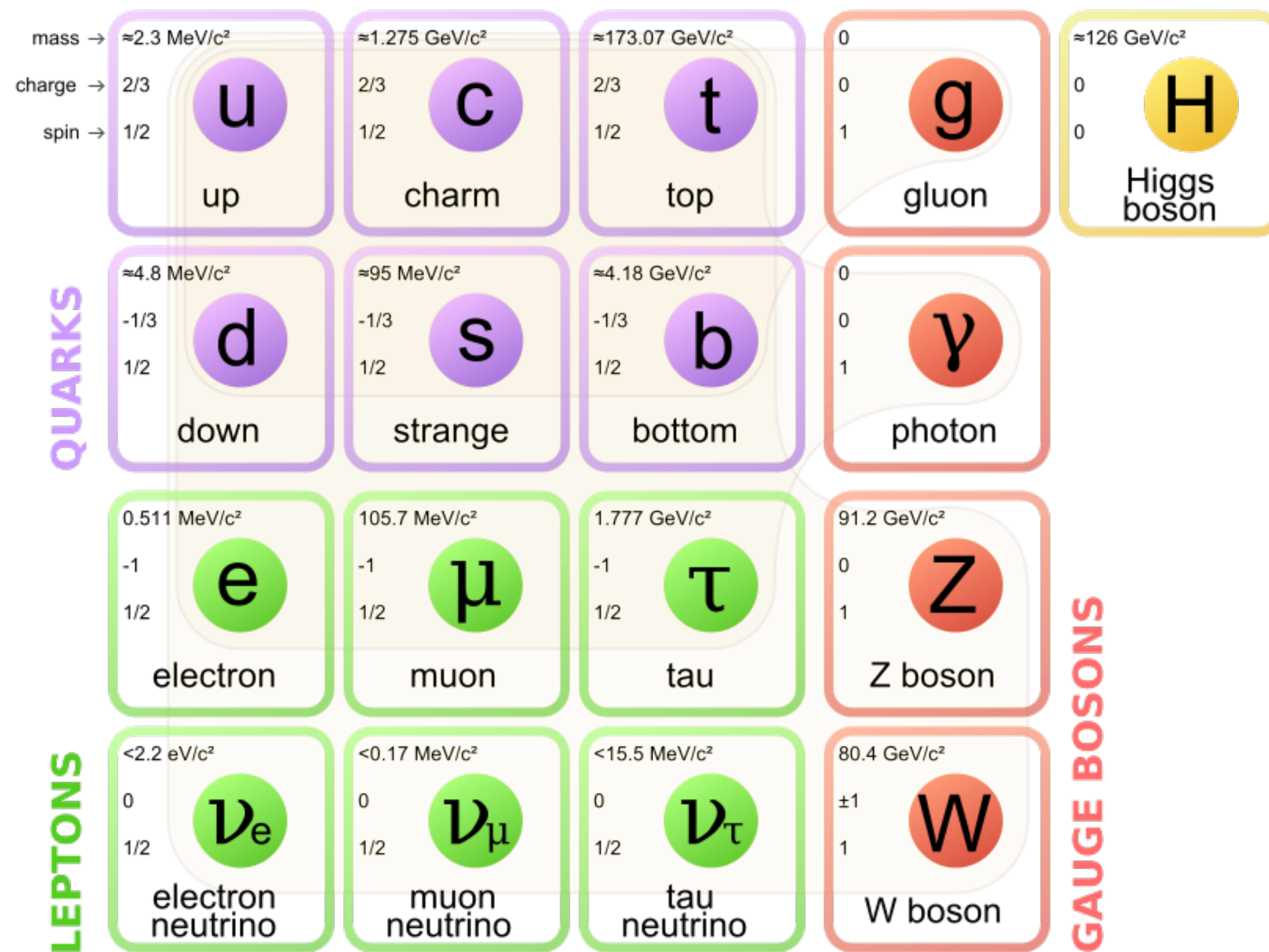
- Incluso vosotros estáis hechos de esas partículas



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

# El universo de Arcadi

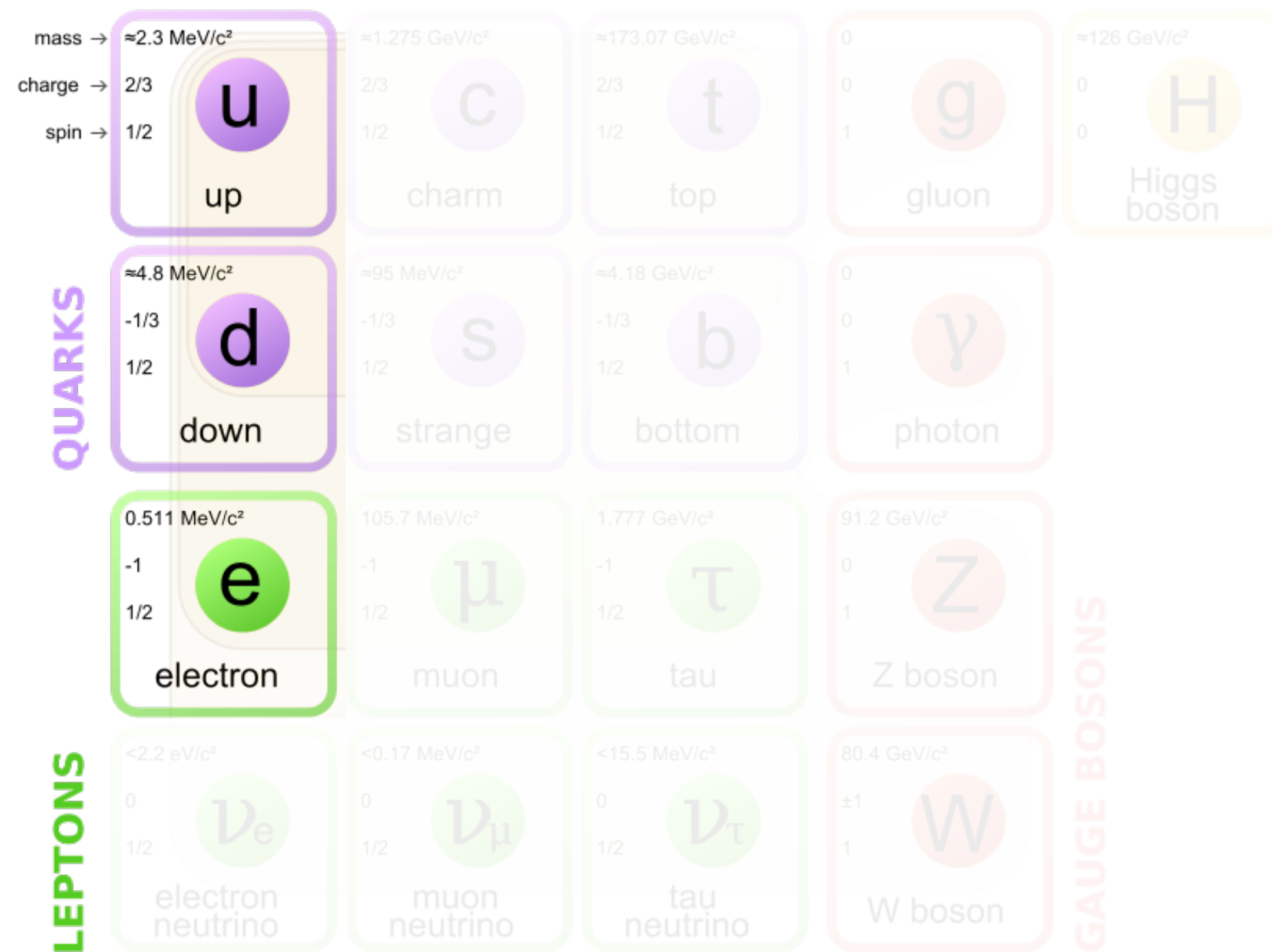
- Estás son las partículas fundamentales en el modelo standard





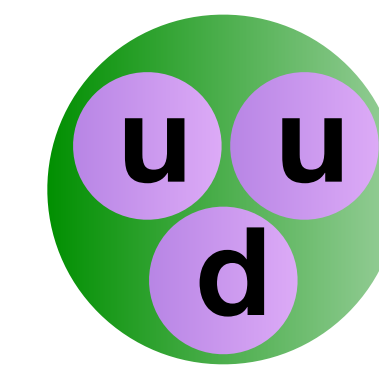
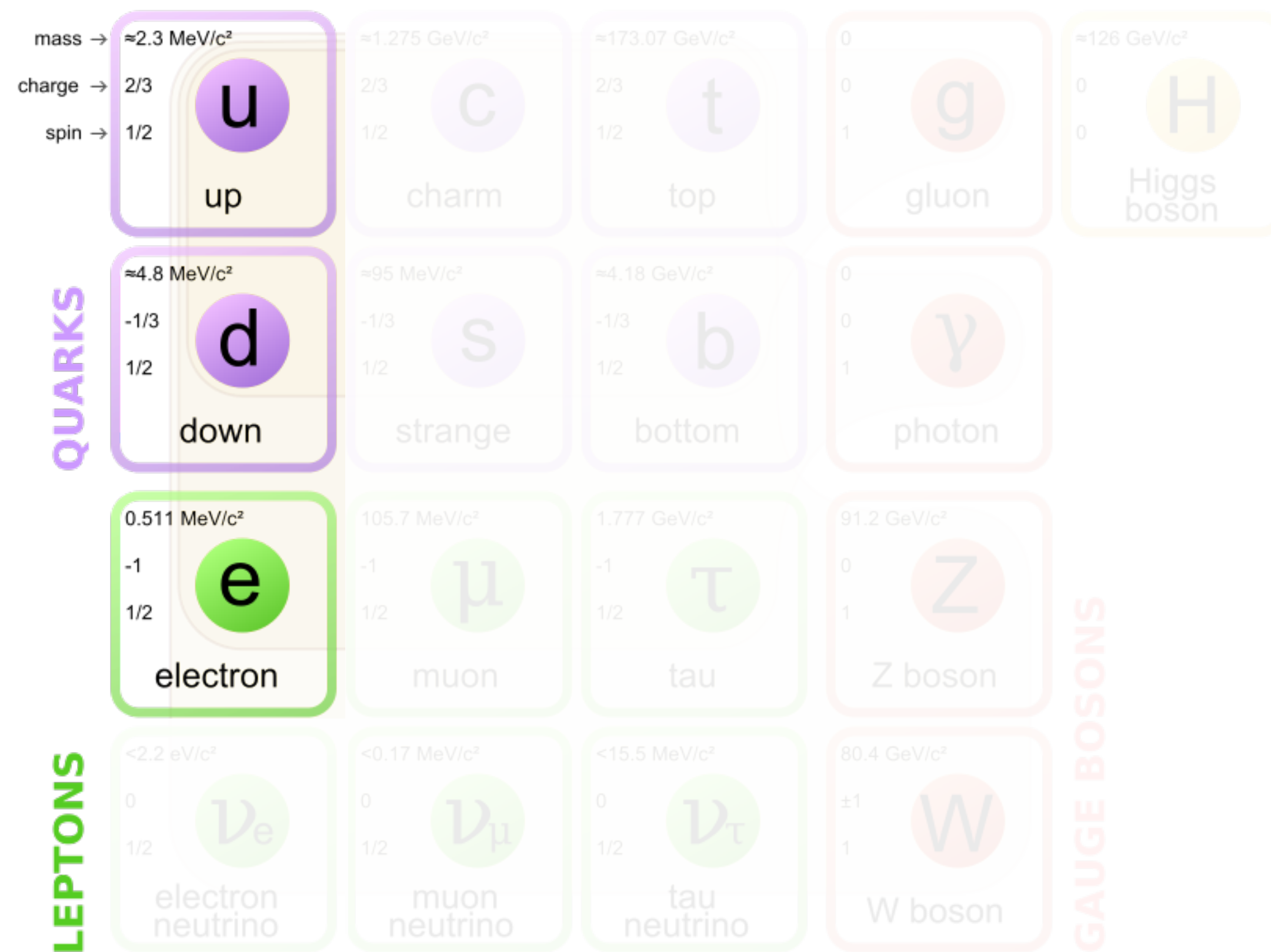
# El universo de Arcadi

- Estás son las partículas fundamentales en el modelo standard

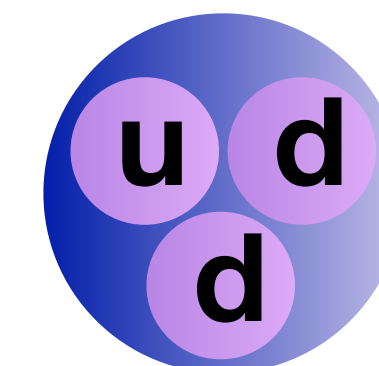


# El universo de Arcadi

- Estás son las partículas fundamentales en el modelo standard



protón



neutrón



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

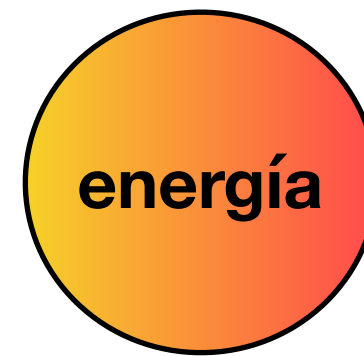
**p<sup>+</sup>**

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

# El Big Bang

---

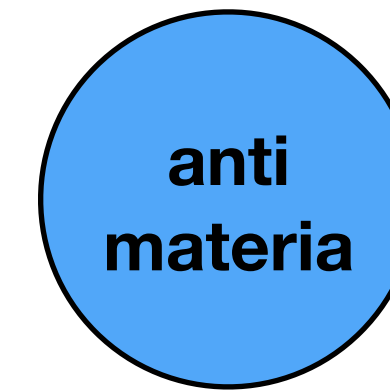
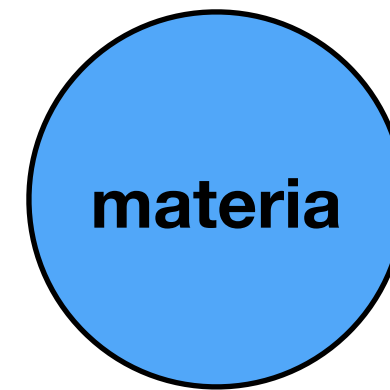
- A partir de una enorme cantidad de energía (concentrada) se produjeron iguales cantidades de materia y de antimateria



# El Big Bang

---

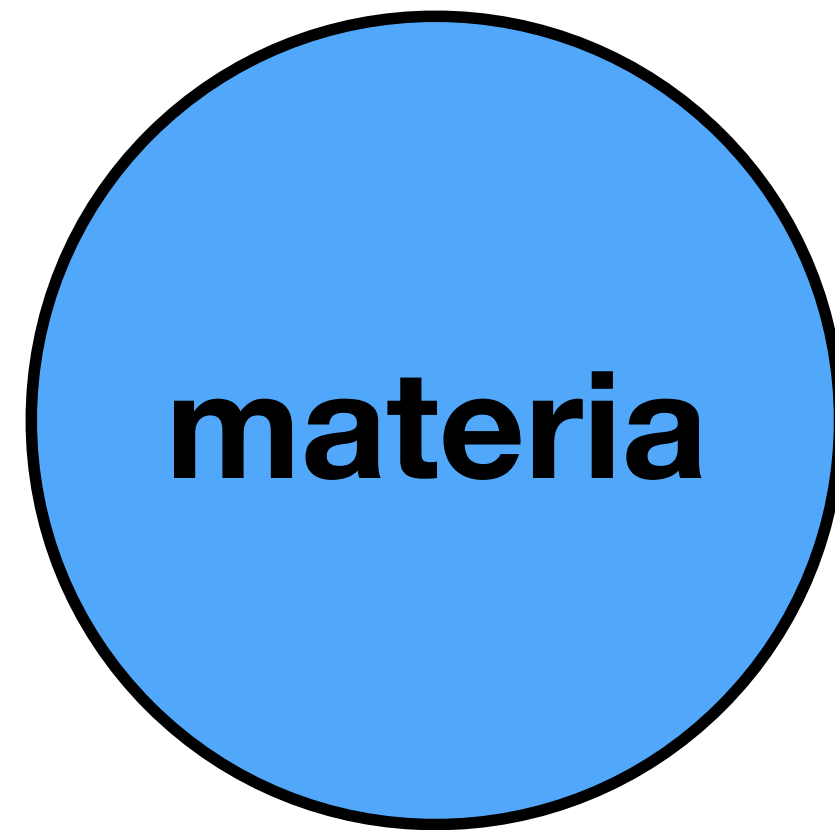
- A partir de una enorme cantidad de energía (concentrada) se produjeron iguales cantidades de materia y de antimateria



# 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~~

# Simetría Carga-Paridad (CP)

---

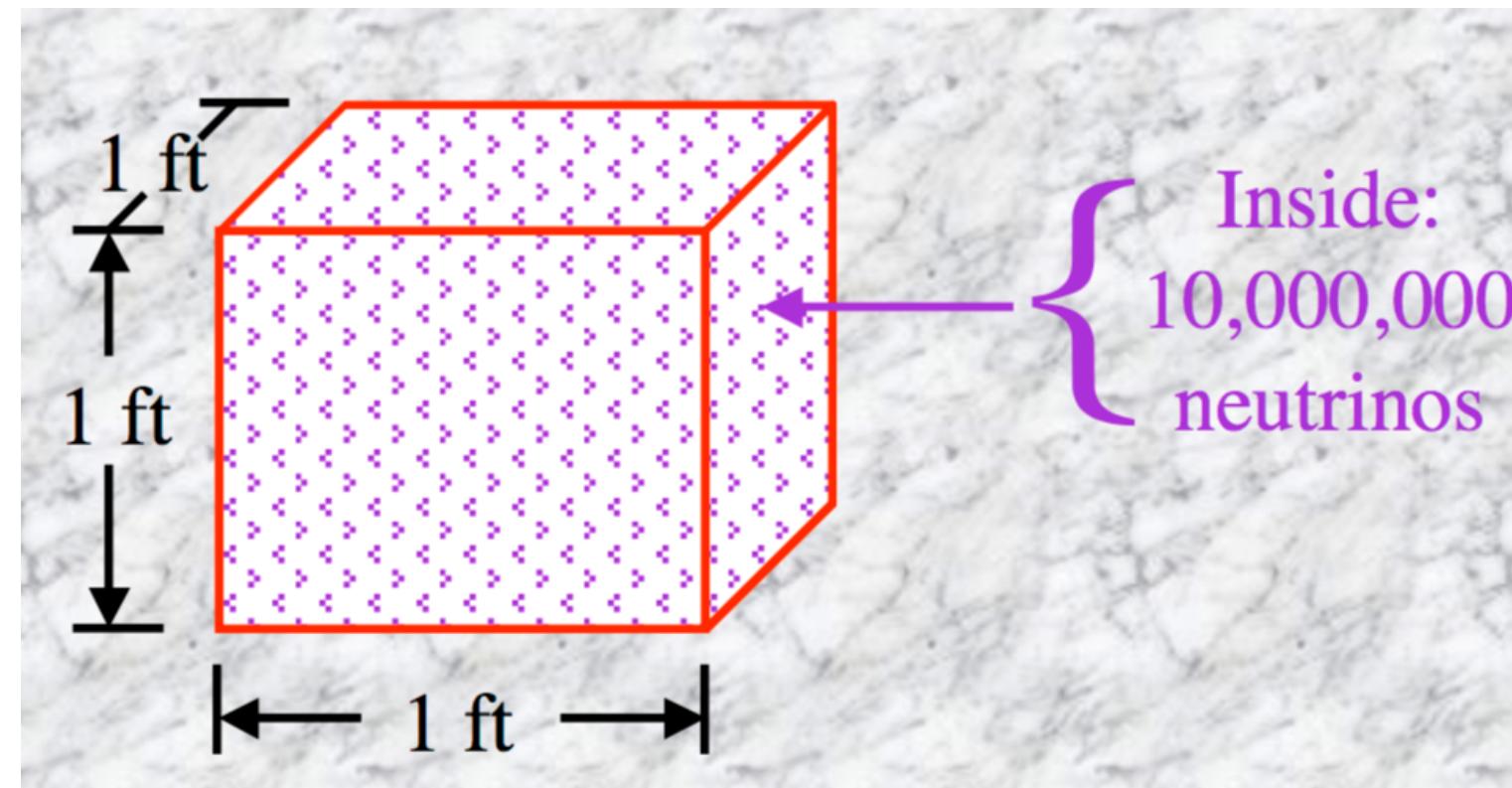
- La simetría CP nos dice que una partícula y su anti-partícula se comportan de igual forma (excepto por su carga)
- Sabemos que esta no es una simetría exacta de la naturaleza, pero hasta ahora solo se ha descubierto una violación muy débil en algunos sistemas
- Una violación importante en los neutrinos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



# Neutrinos por todas partes

---

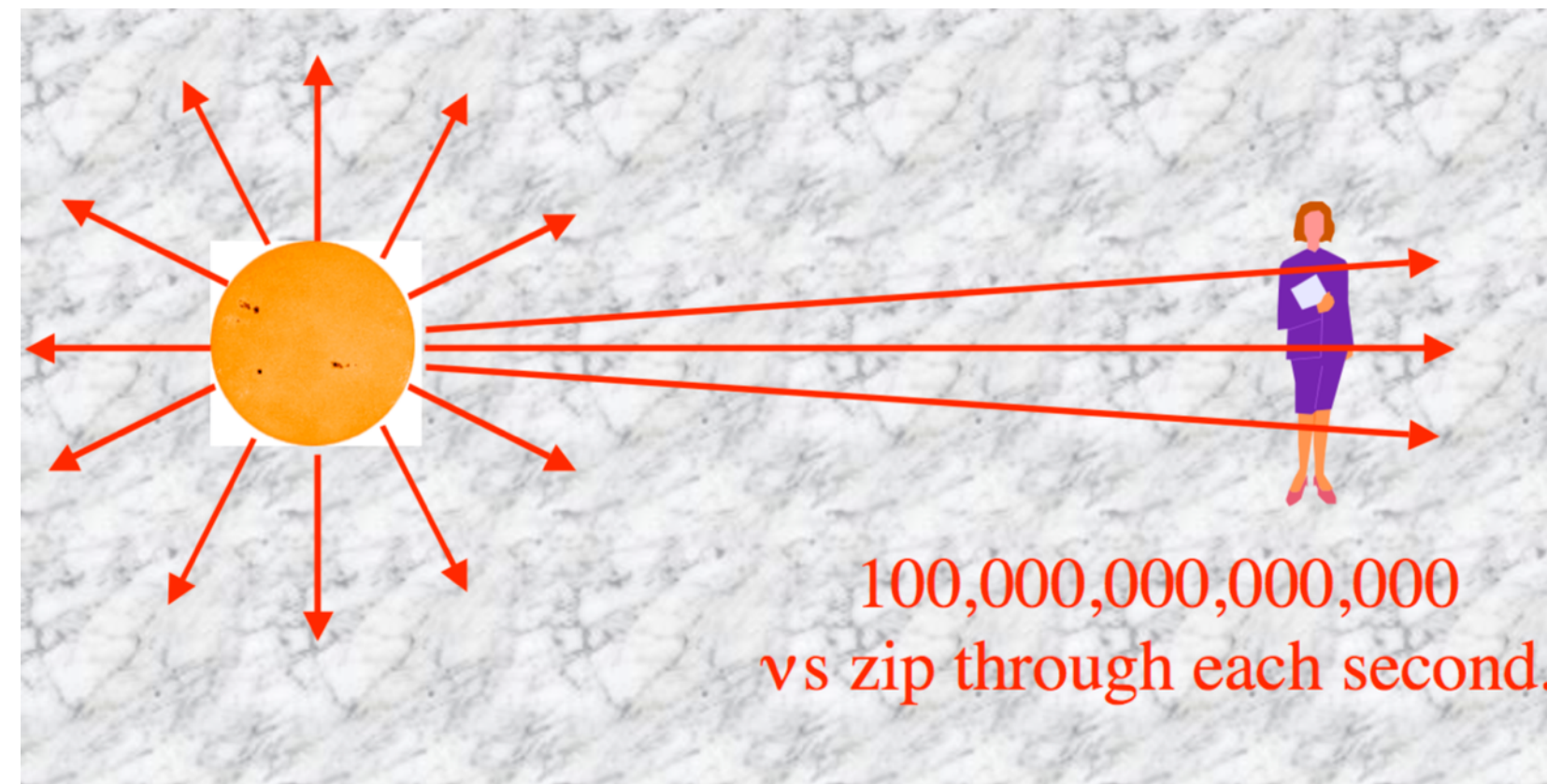
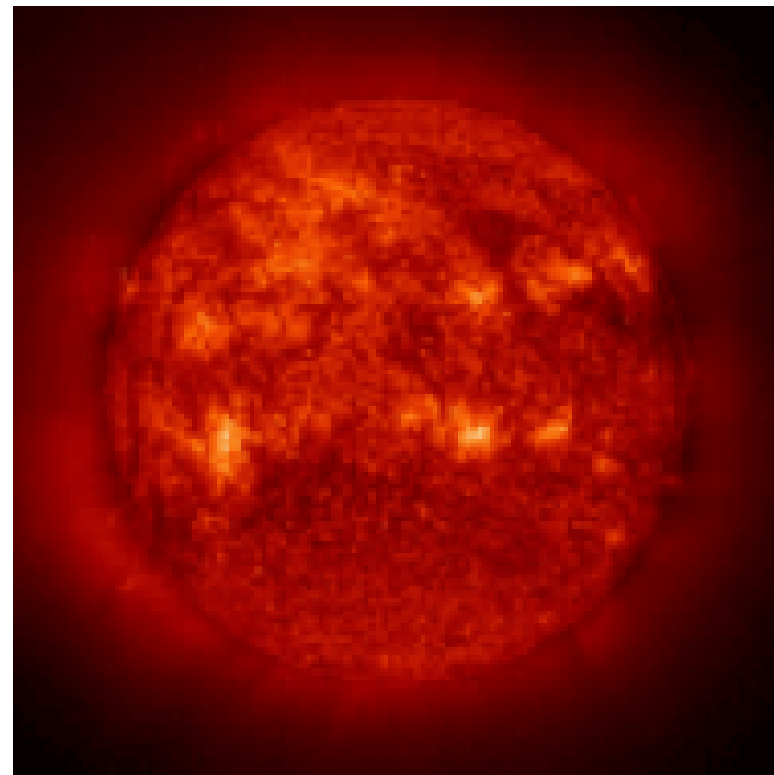
- Por cada proton, neutron o electron el universo contiene 1000 millones de neutrinos que provienen del Big Bang



**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

---

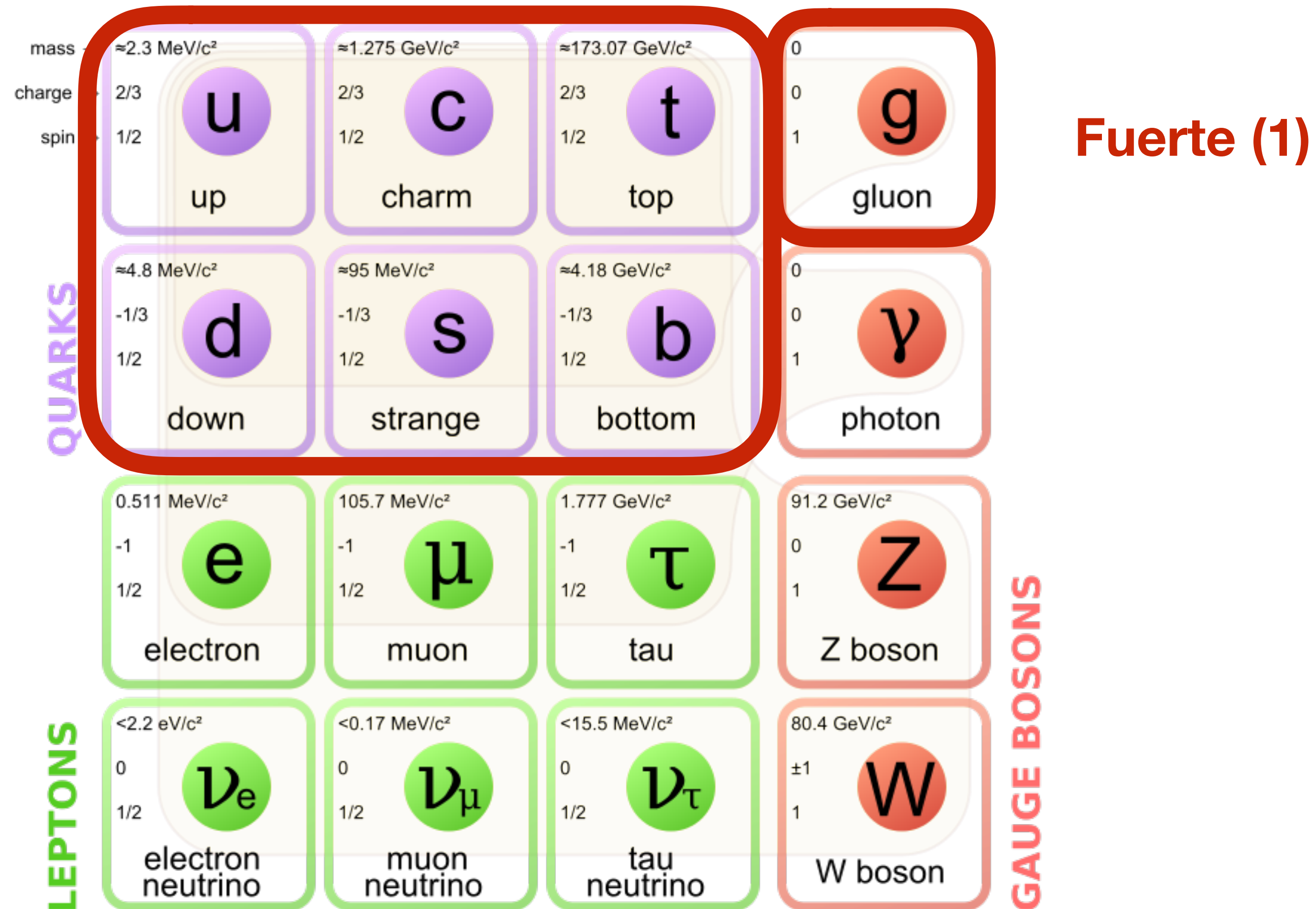
- Los neutrinos son muy tímidos y no interaccionan con nada ni con nadie
- Un neutrino solar tiene que cruzarse con 10,000,000,000,000,000,000 personas antes de interaccionar
- Por ello no fueron **descubiertos hasta 1953**, pese a ser las partículas más abundantes después del fotón (las partículas de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



# Las cuatro fuerzas fundamentales

















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

# Las cuatro fuerzas fundamentales





















# Las cuatro fuerzas fundamentales

|              |  |  |  |  |   |
|--------------|--|--|--|--|---|
| QUARKS       | 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   |
|              |  | <br>up              | <br>charm           | <br>top        | <br>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   |
|              |  | <br>down            | <br>strange         | <br>bottom     | <br>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  |   |
|              | <br>electron          | <br>muon          | <br>tau          | <br>Z boson |   |
| LEPTONS      |  | $< 2.2 \text{ eV}/c^2$   | $< 0.17 \text{ MeV}/c^2$   | $< 15.5 \text{ MeV}/c^2$   | $80.4 \text{ GeV}/c^2$  |
|              | 0  | 0  | 0  | $\pm 1$  |   |
|              | $1/2$  | $1/2$  | $1/2$  | 1  |   |
|              | <br>electron neutrino | <br>muon neutrino | <br>tau neutrino | <br>W boson |   |
| GAUGE BOSONS |  |  |  |  |   |

**Electromagnética ( $10^{-3}$ )**

# Las cuatro fuerzas fundamentales

|   |   |  |   |   |                        |
|---|---|--|---|---|------------------------|
| QUARKS  | 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                      |
|   |    |     |     |    |                        |
|   | up  | charm  | top   | gluon   |                        |
|   | mass  | $\approx 4.8 \text{ MeV}/c^2$  | $\approx 95 \text{ MeV}/c^2$  | $\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$  | 0                      |
| charge  | $-1/3$  | $-1/3$   | $-1/3$  | 0   |                        |
| spin  | $1/2$   | $1/2$  | $1/2$   | 1   |                        |
|    |    |    |    |   |                        |
| down  | strange   | bottom   | photon  |   |                        |
| LEPTONS   | mass  | $0.511 \text{ MeV}/c^2$  | $105.7 \text{ MeV}/c^2$   | $1.777 \text{ GeV}/c^2$   | $91.2 \text{ GeV}/c^2$ |
|   | charge  | -1   | -1  | -1  | 0                      |
|   | spin  | $1/2$  | $1/2$   | $1/2$   | 1                      |
|   |  |   |   |  |                        |
|   | electron  | muon   | tau   | Z boson   |                        |
|   | mass  | $< 2.2 \text{ eV}/c^2$   | $< 0.17 \text{ MeV}/c^2$  | $< 15.5 \text{ MeV}/c^2$  | $80.4 \text{ GeV}/c^2$ |
| charge  | 0   | 0  | 0   | $\pm 1$   |                        |
| spin  | $1/2$   | $1/2$  | $1/2$   | 1   |                        |
|  |  |  |  |   |                        |
| electron neutrino   | muon neutrino   | tau neutrino   | W boson   |   |                        |
| GAUGE BOSONS  |   |  |   |   |                        |

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

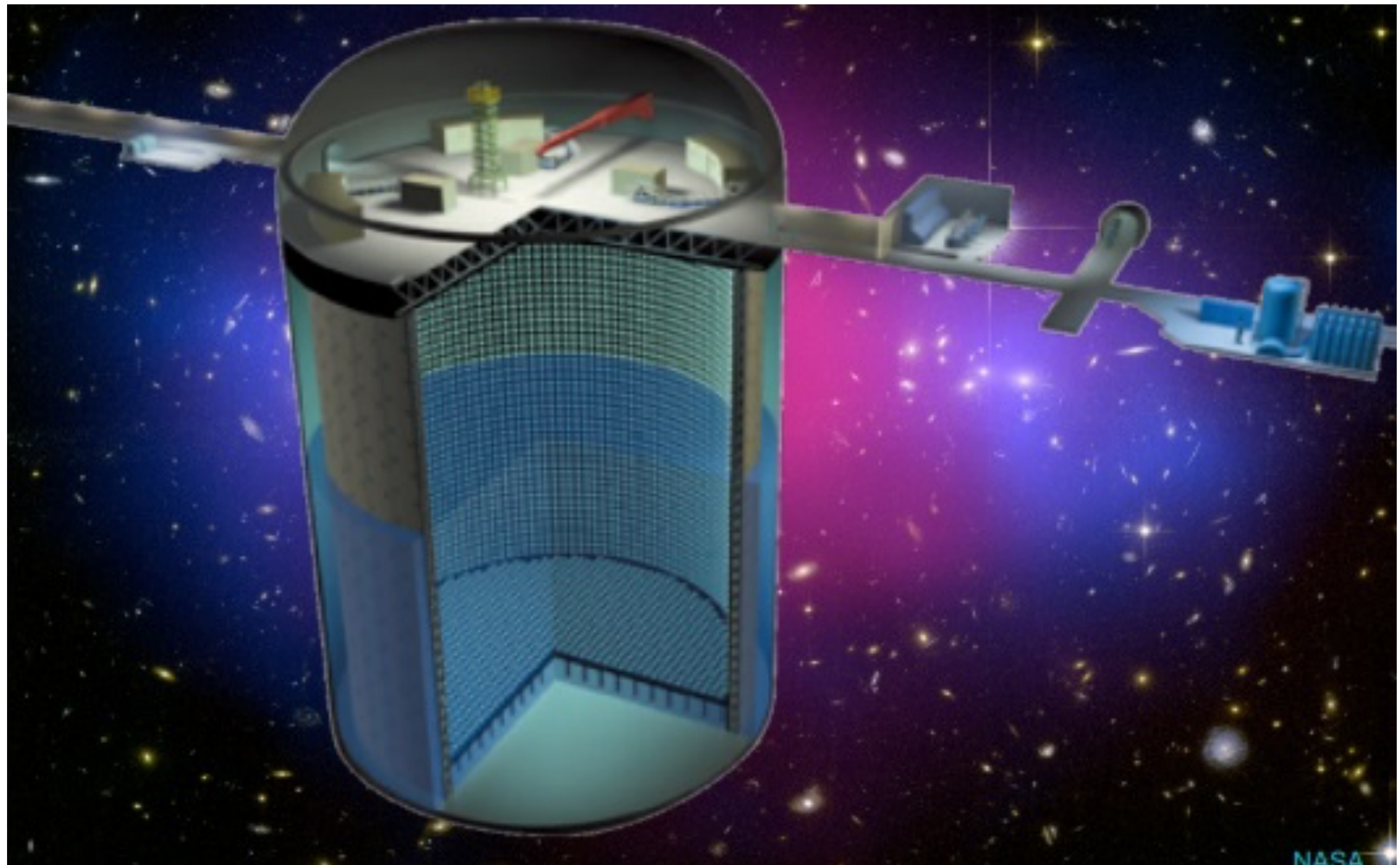
**Débil ( $10^{-5}$ )**



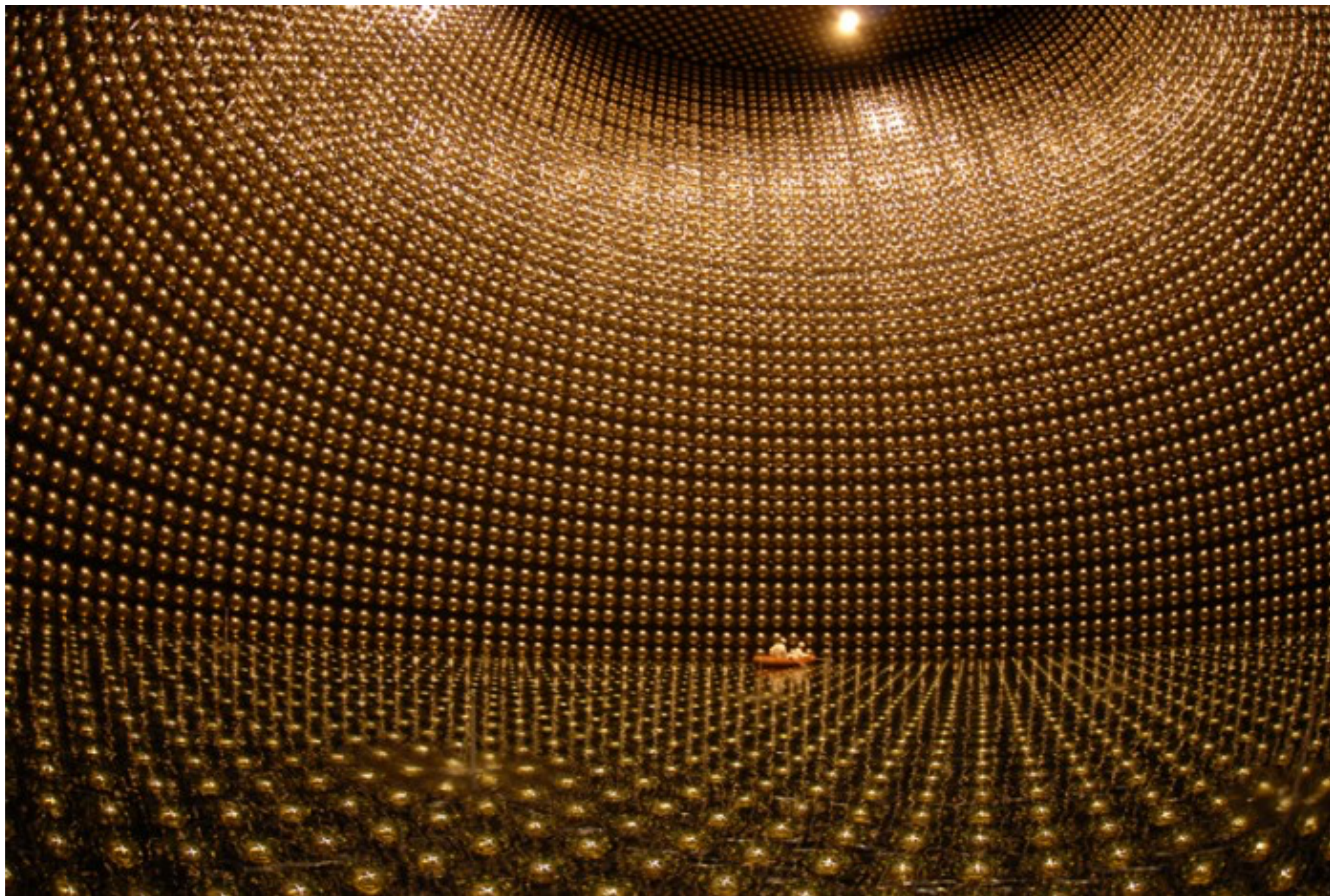
# 50 mill. de litros de agua bajo una montaña

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

50.000 toneladas de agua

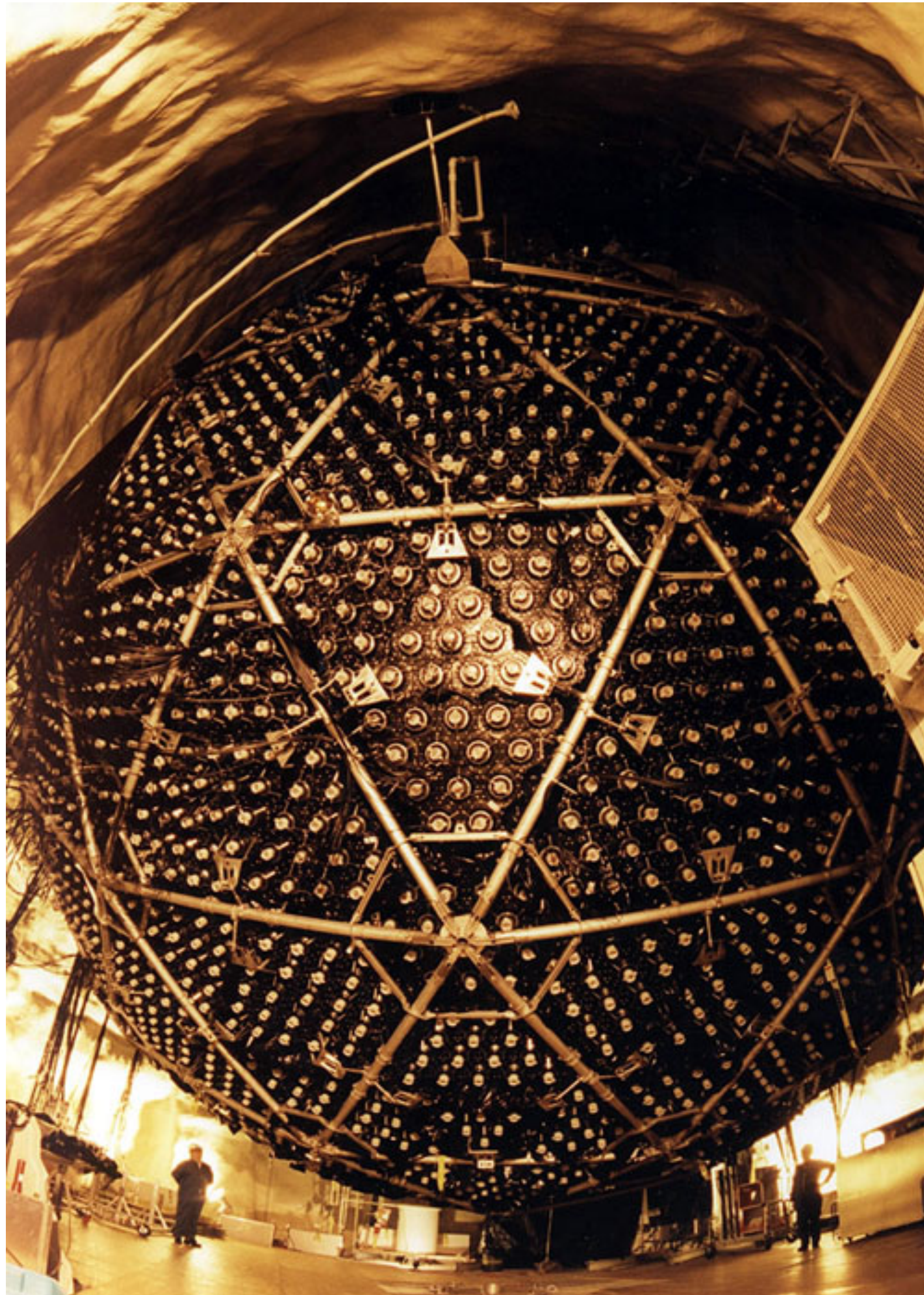




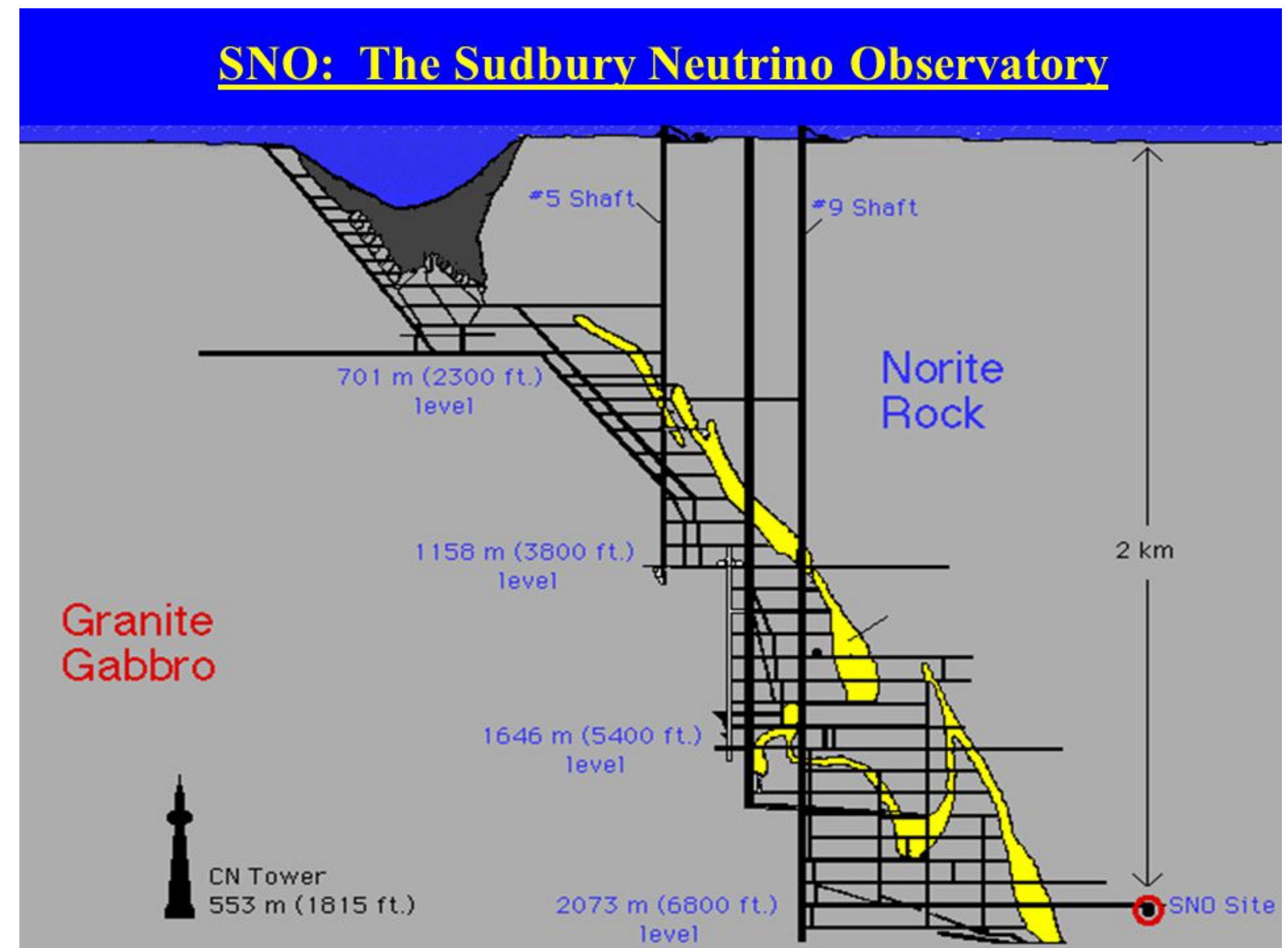




# A 2 km de profundidad



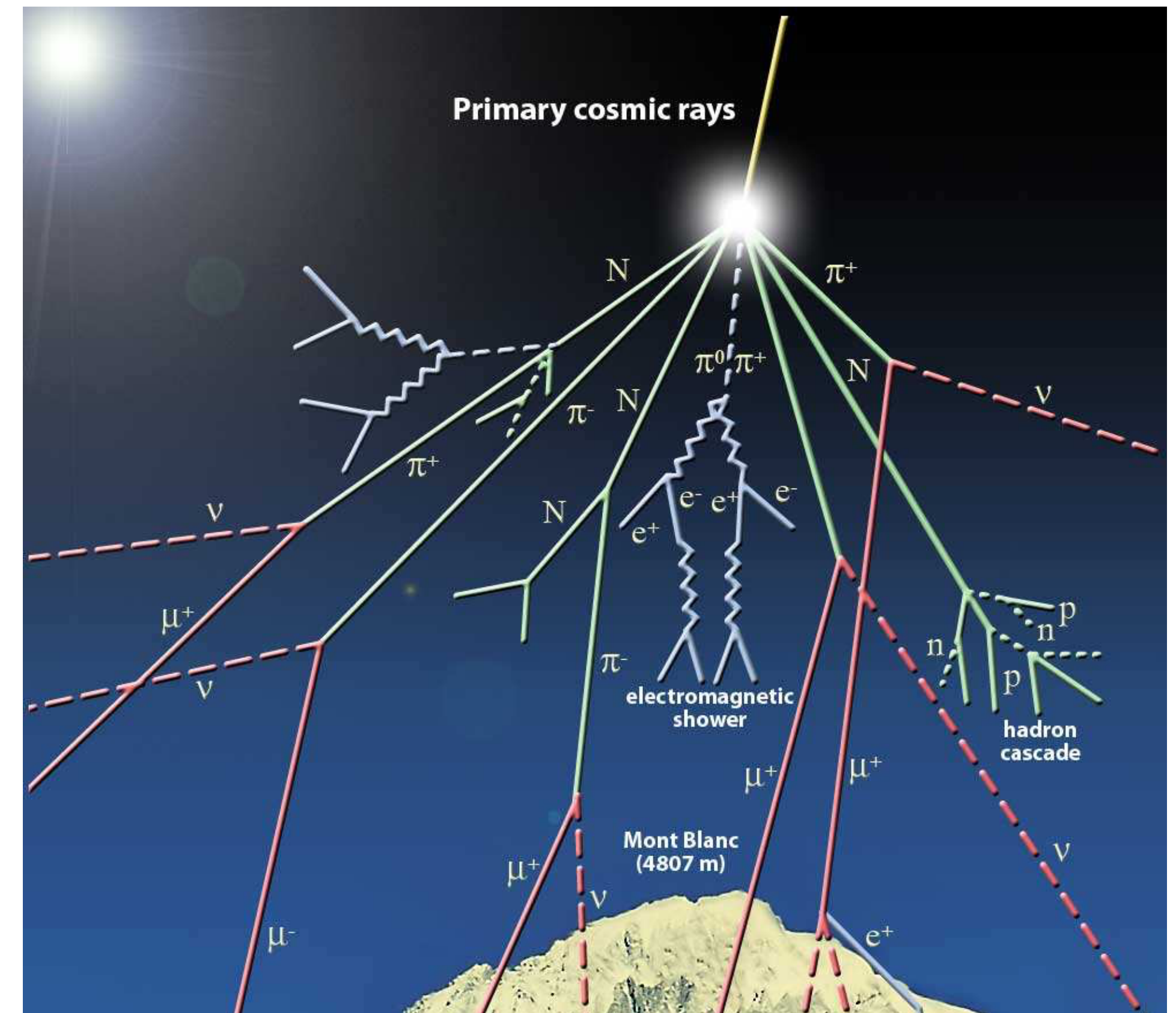
- SNO, un preciosa bola llena de agua pesada a 2 km de profundidad





# 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 1 Km de profundidad



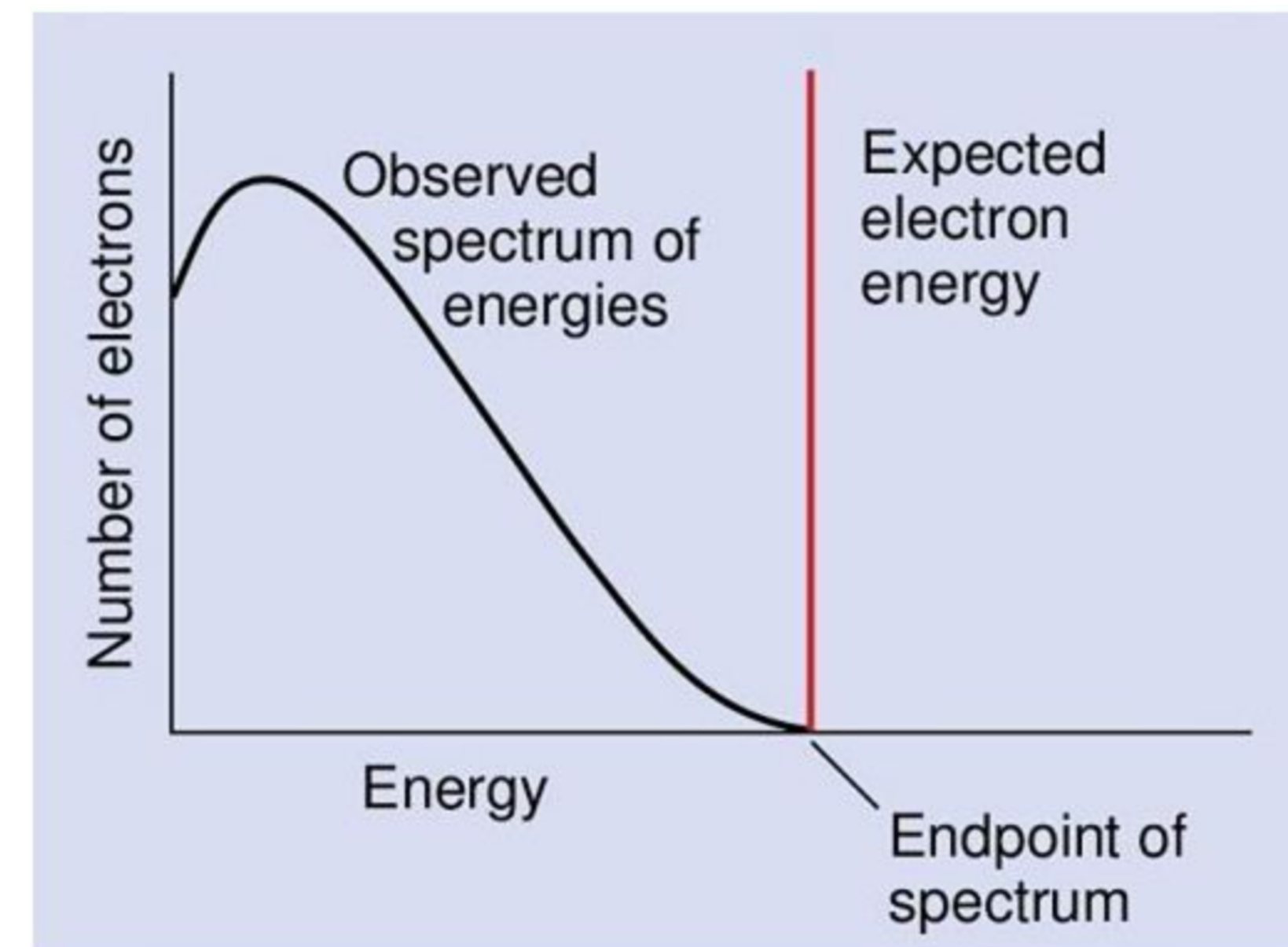
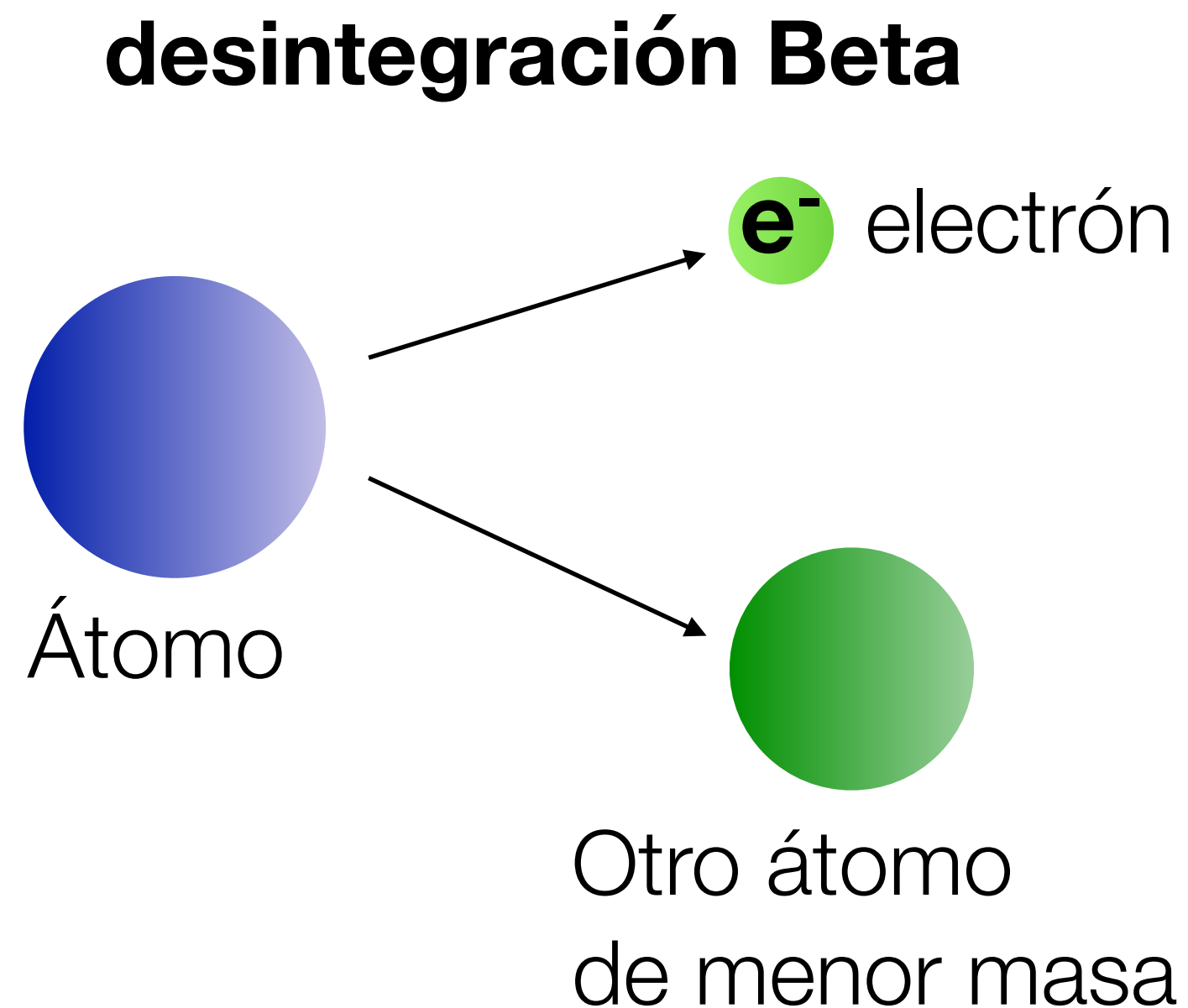
# El nacimiento del neutrino

---

- 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

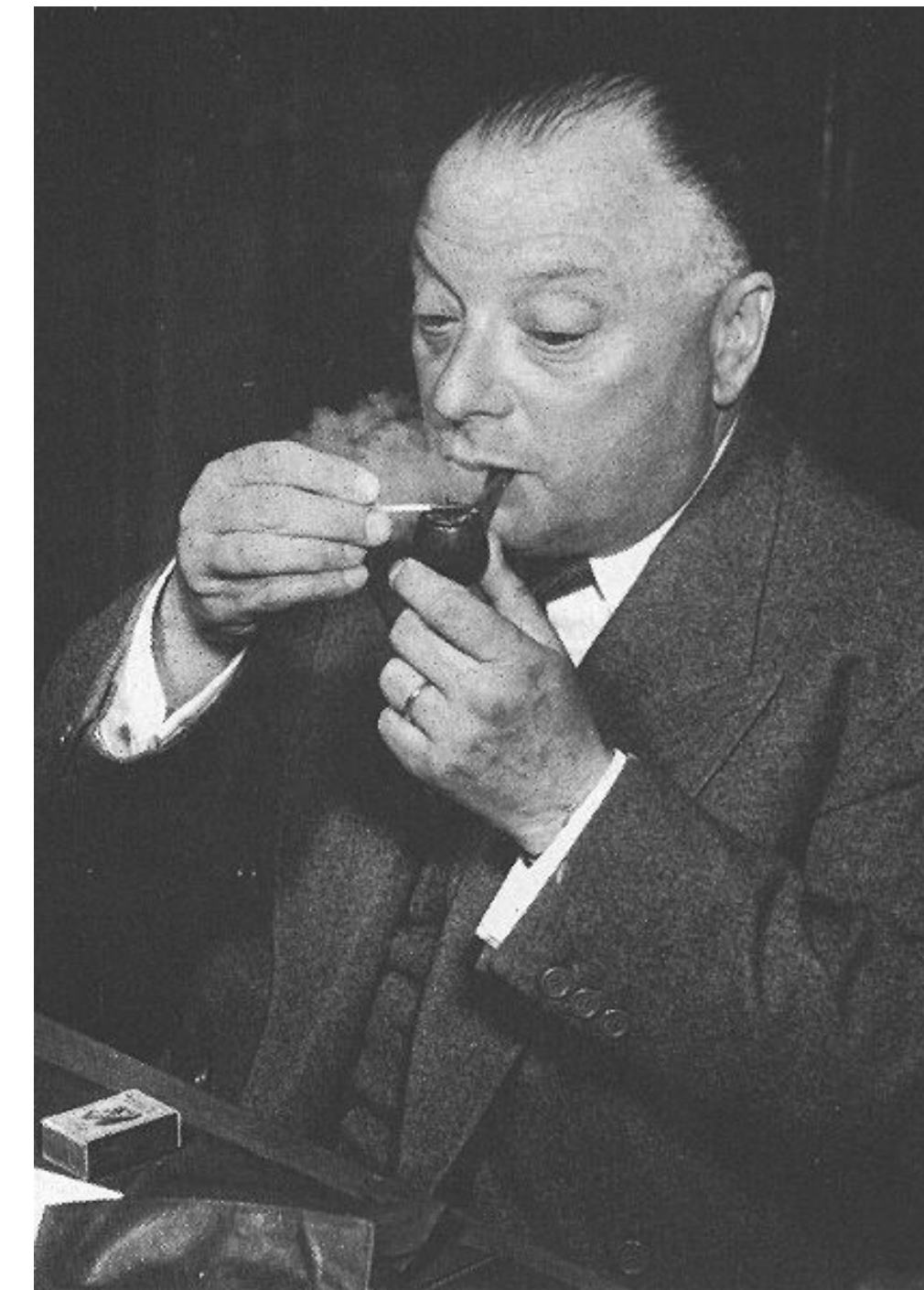
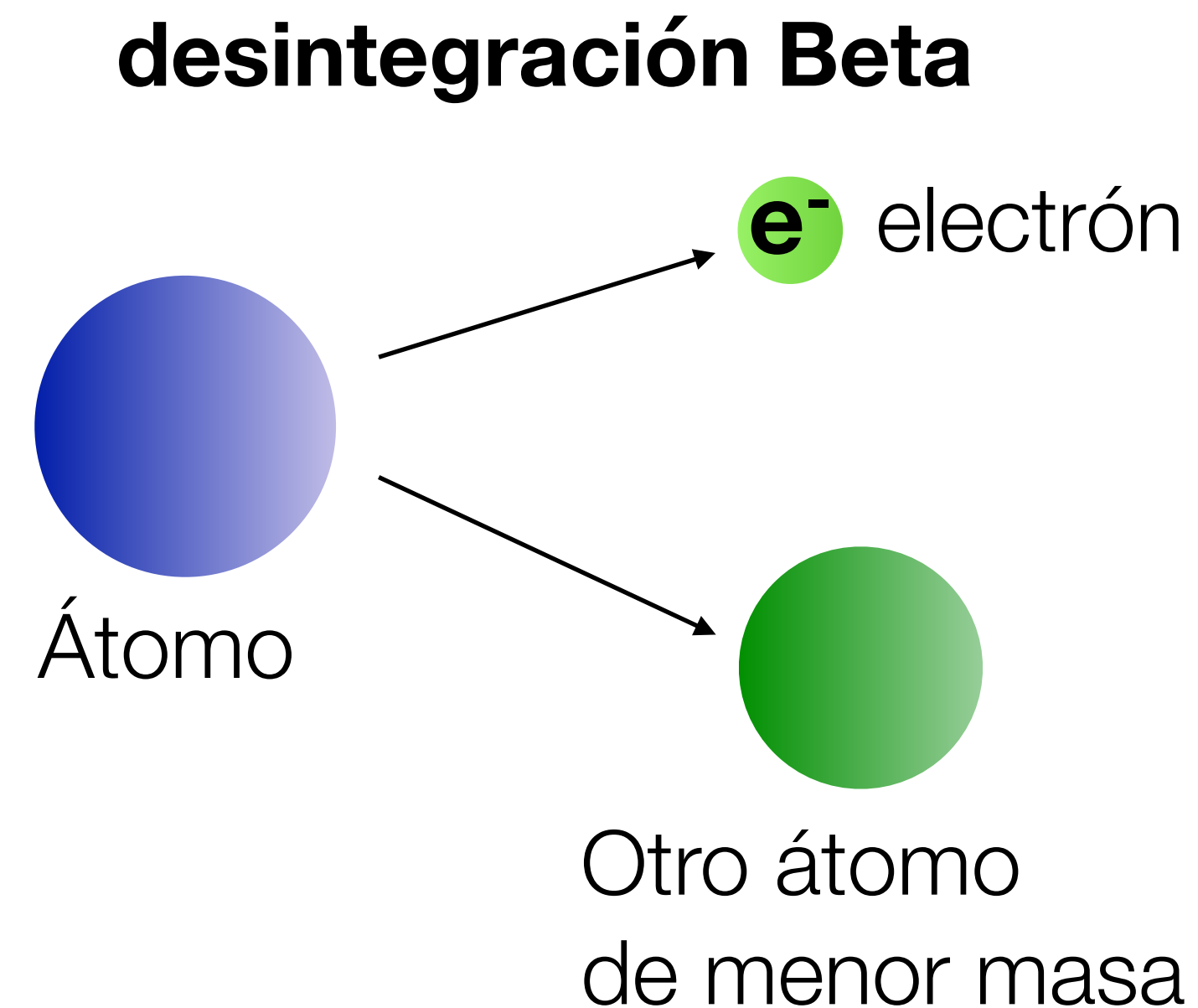
- A principios del siglo XX el neutrino “no existía”, no hacía falta para explicar todo lo que los Físicos Experimentales observaban
- Hasta que empezaron a ver cosas extrañas ..





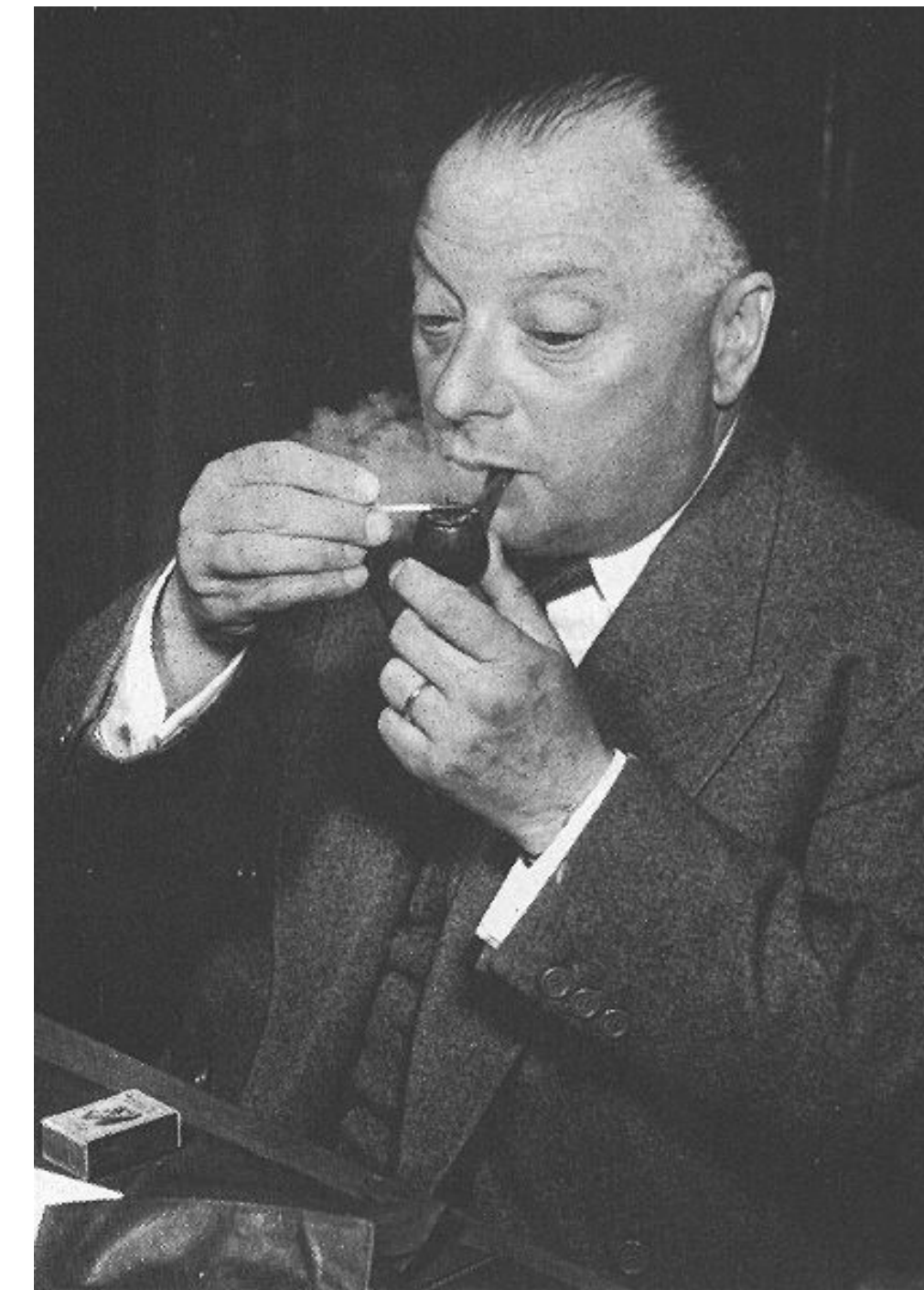
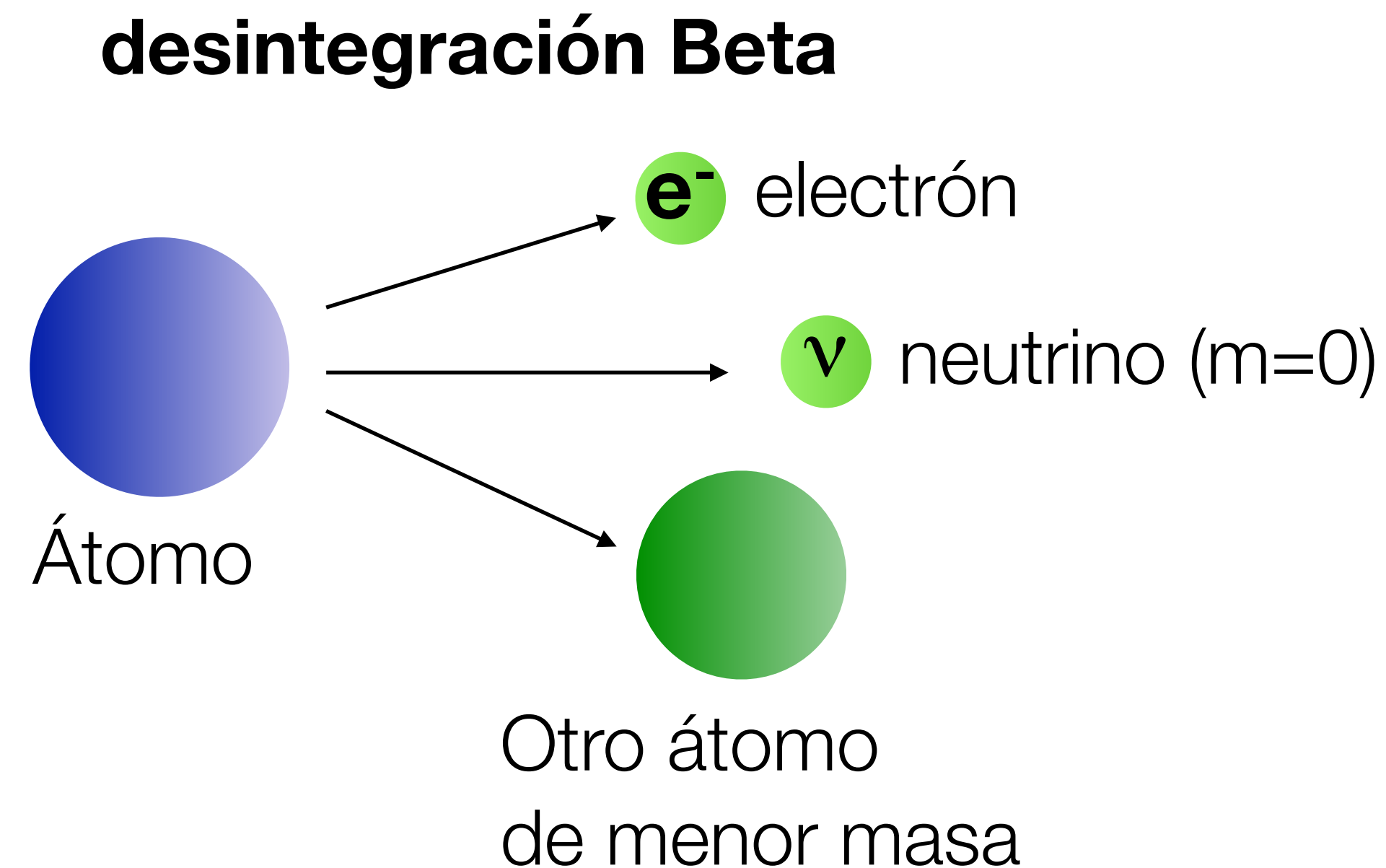
# La solución de Pauli

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



# La solución de Pauli

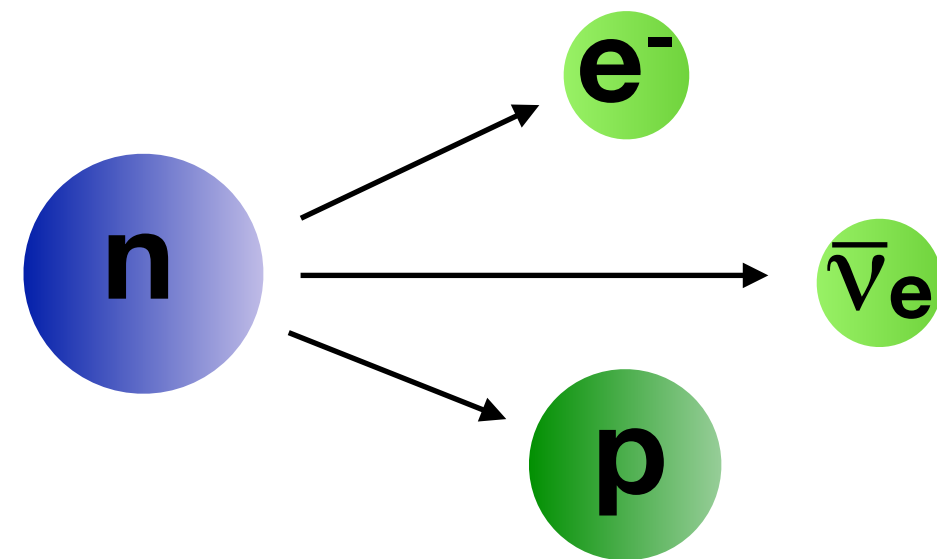
- En 1930 Pauli postuló la existencia de una pequeña partícula neutra y sin masa, portadora de la energía perdida



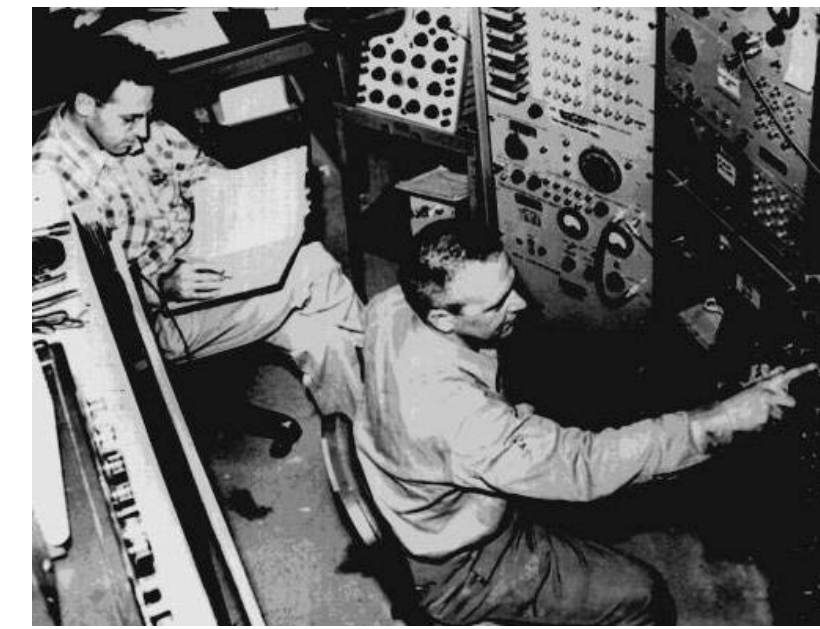
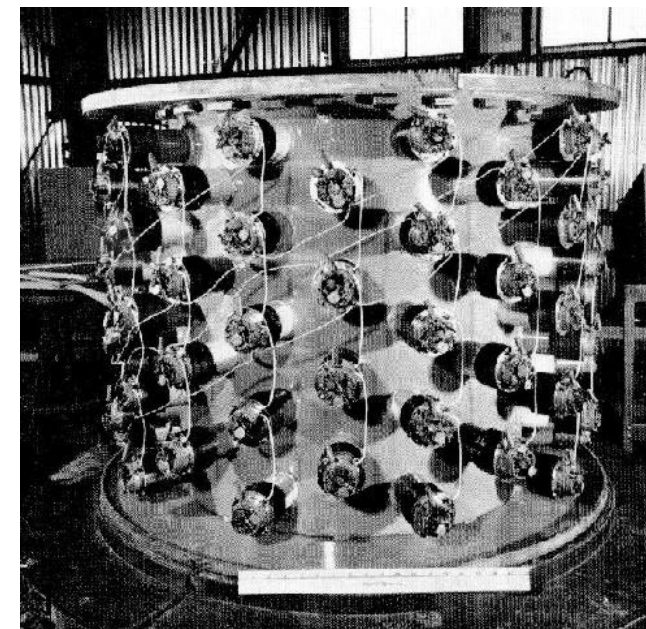


# Una larga historia

- Pero tardó 25 años en detectarse



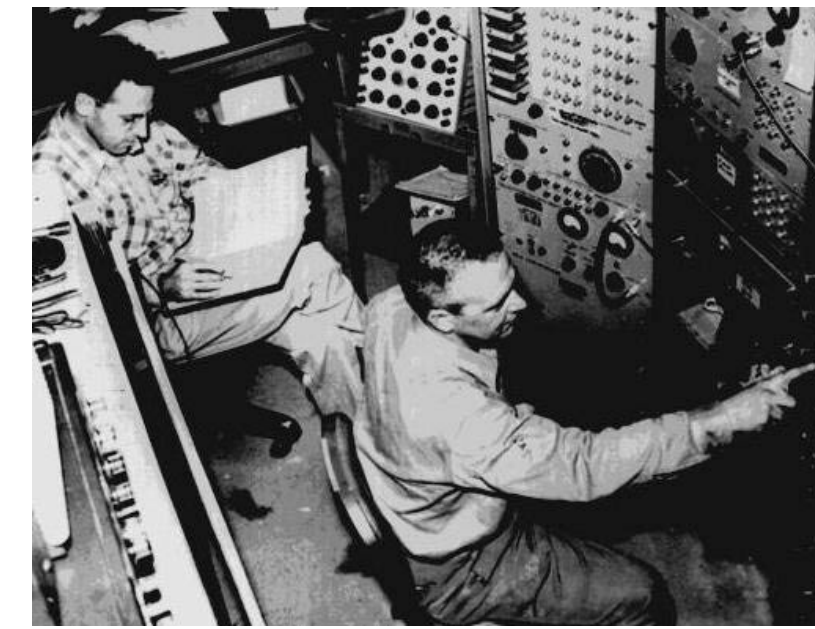
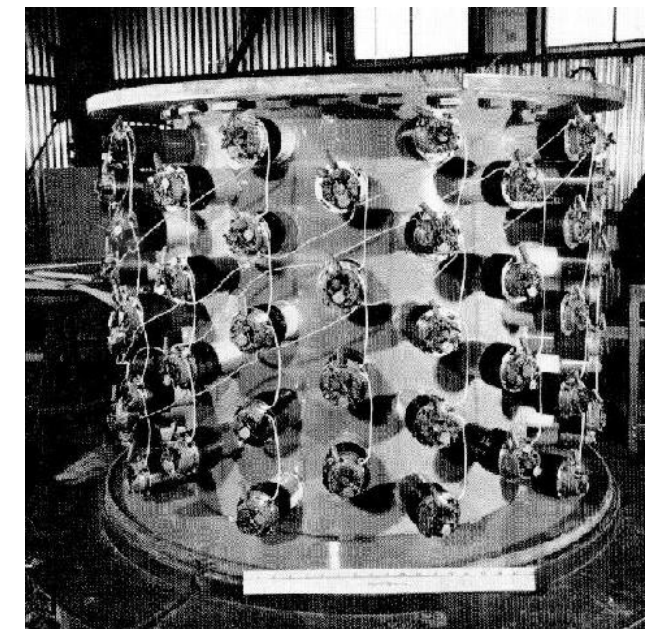
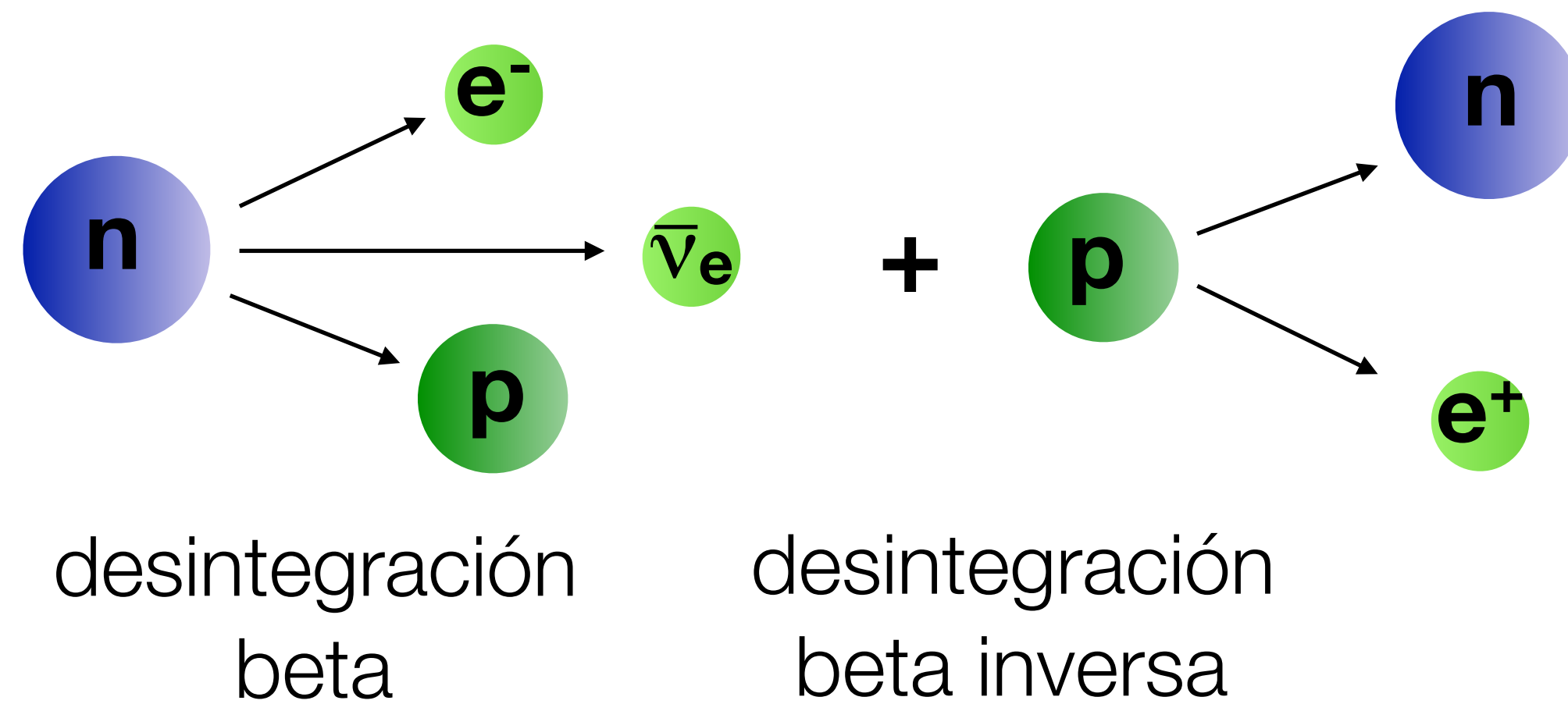
desintegración  
beta



Reines  
y  
Cowan

# Una larga historia

- Pero tardó 25 años en detectarse

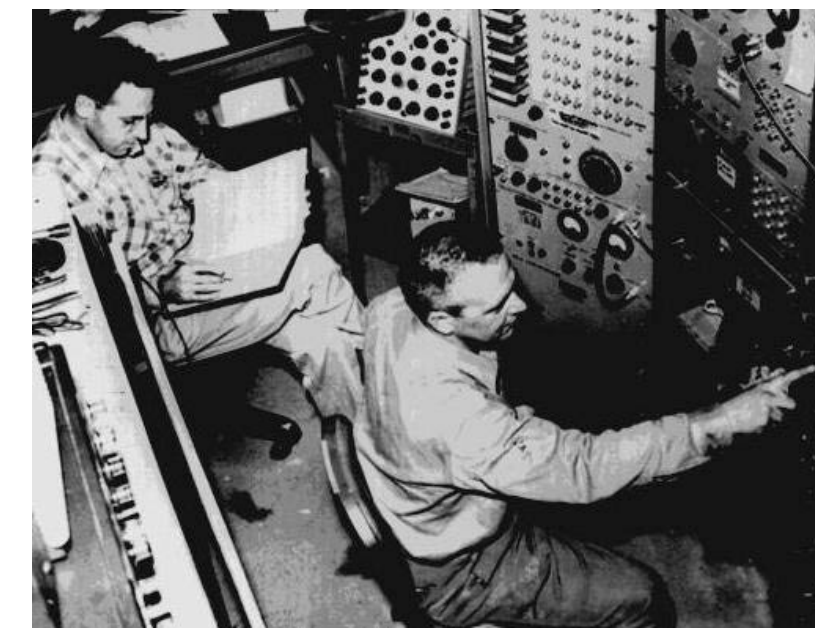
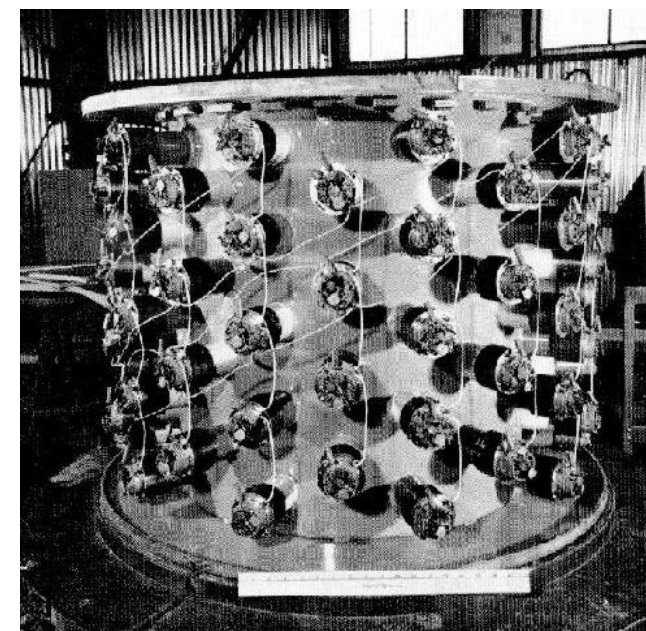
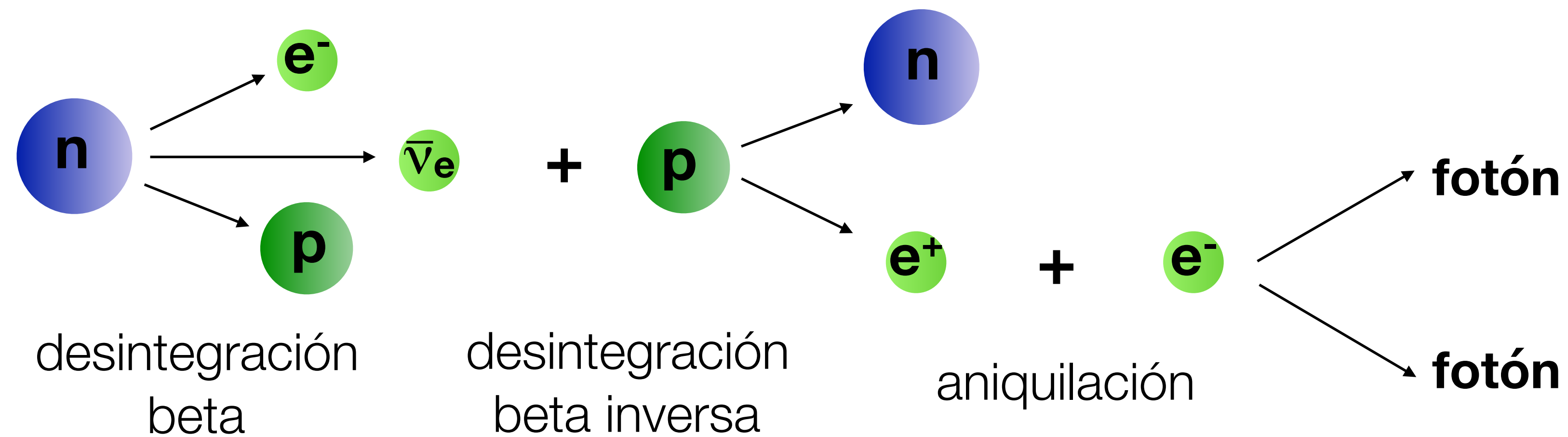


Reines  
y  
Cowan



# Una larga historia

- Pero tardó 25 años en detectarse

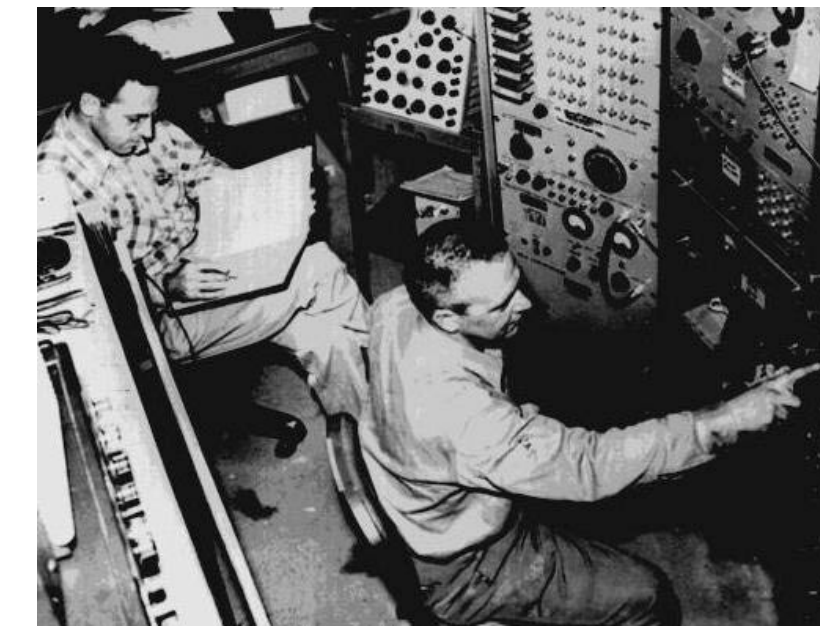
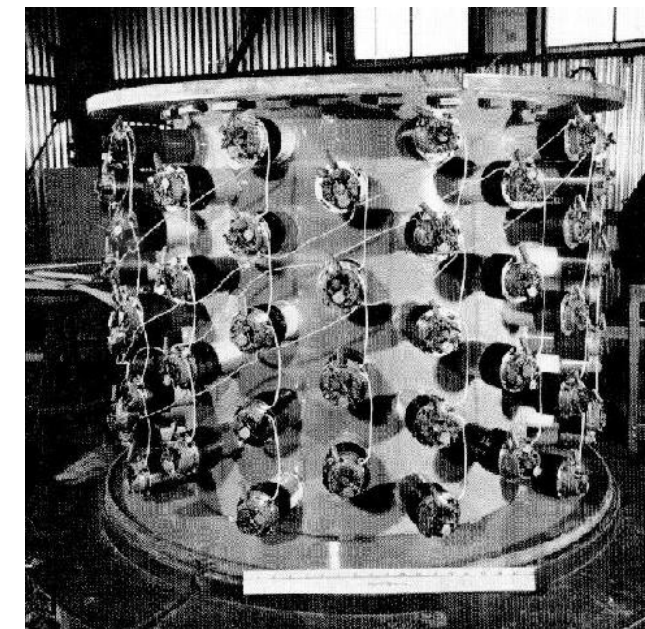
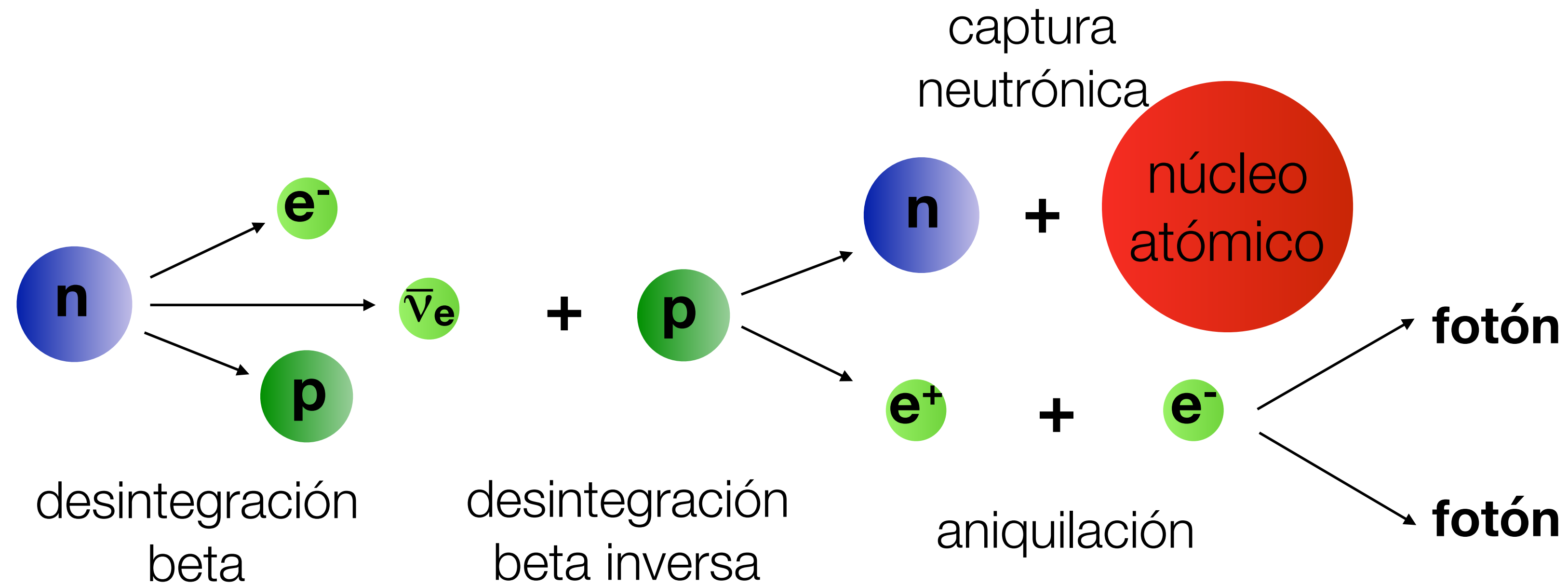


Reines  
y  
Cowan



# Una larga historia

- Pero tardó 25 años en detectarse

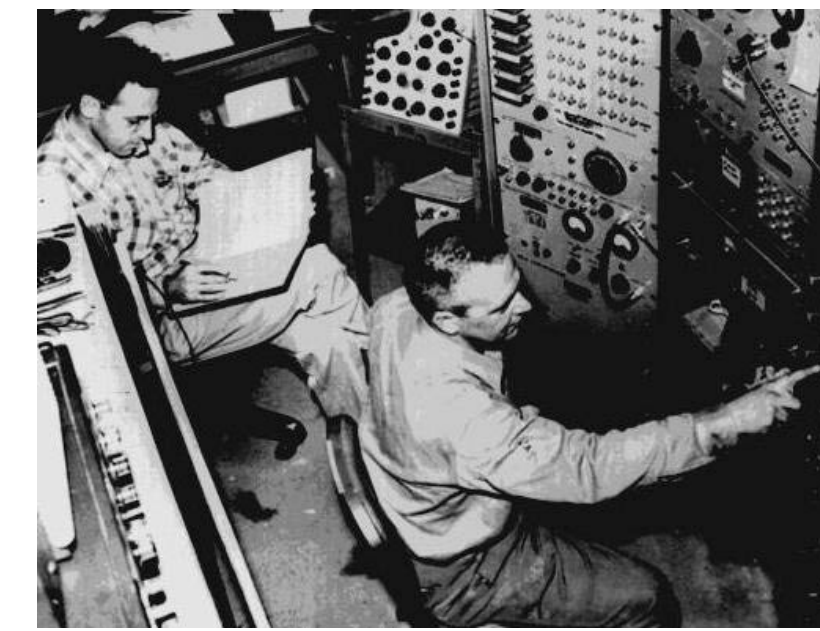
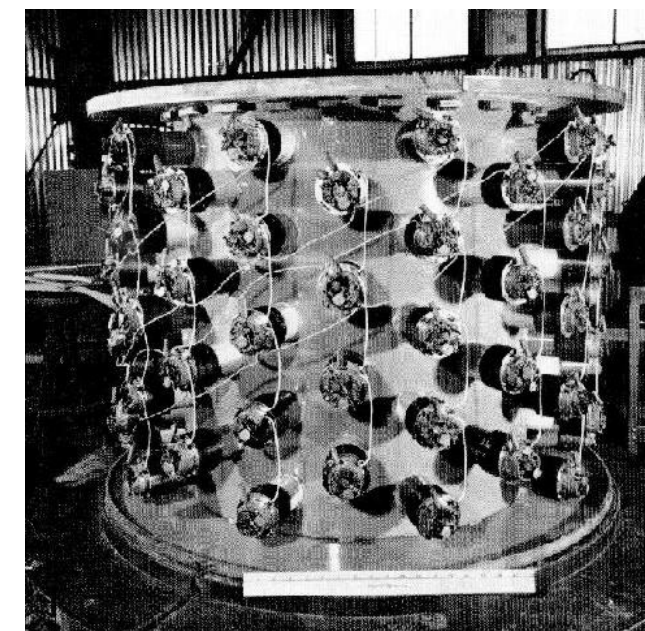
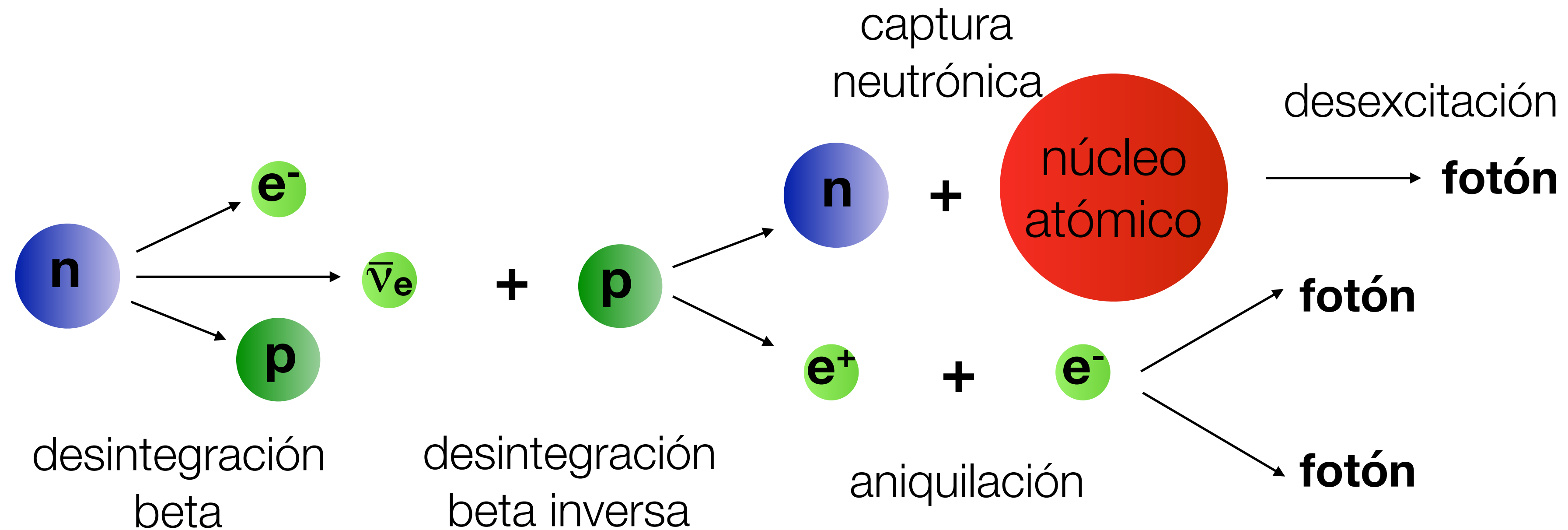


Reines  
y  
Cowan



# Una larga historia

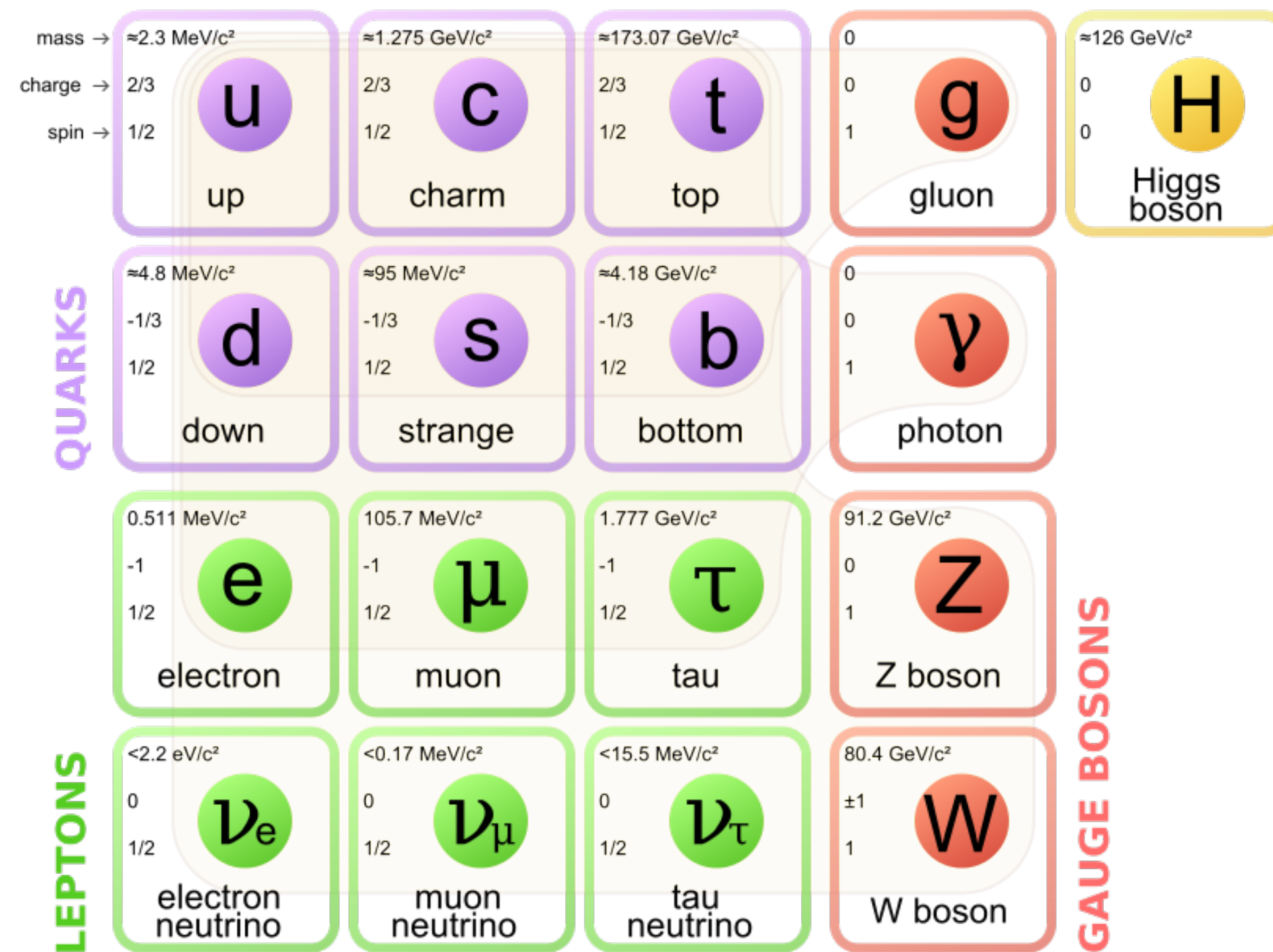
- Pero tardó 25 años en detectarse



Reines  
y  
Cowan

# ¿Solo hay un tipo de neutrino?

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



# El muón

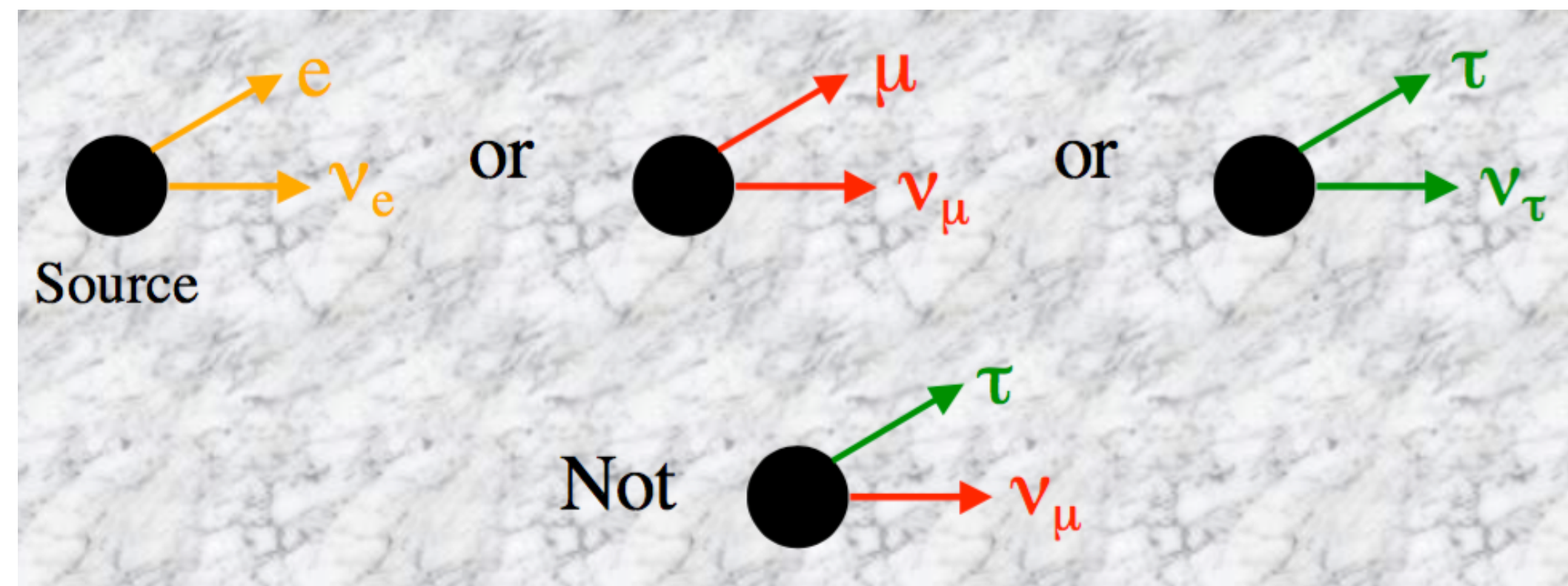
---

- 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

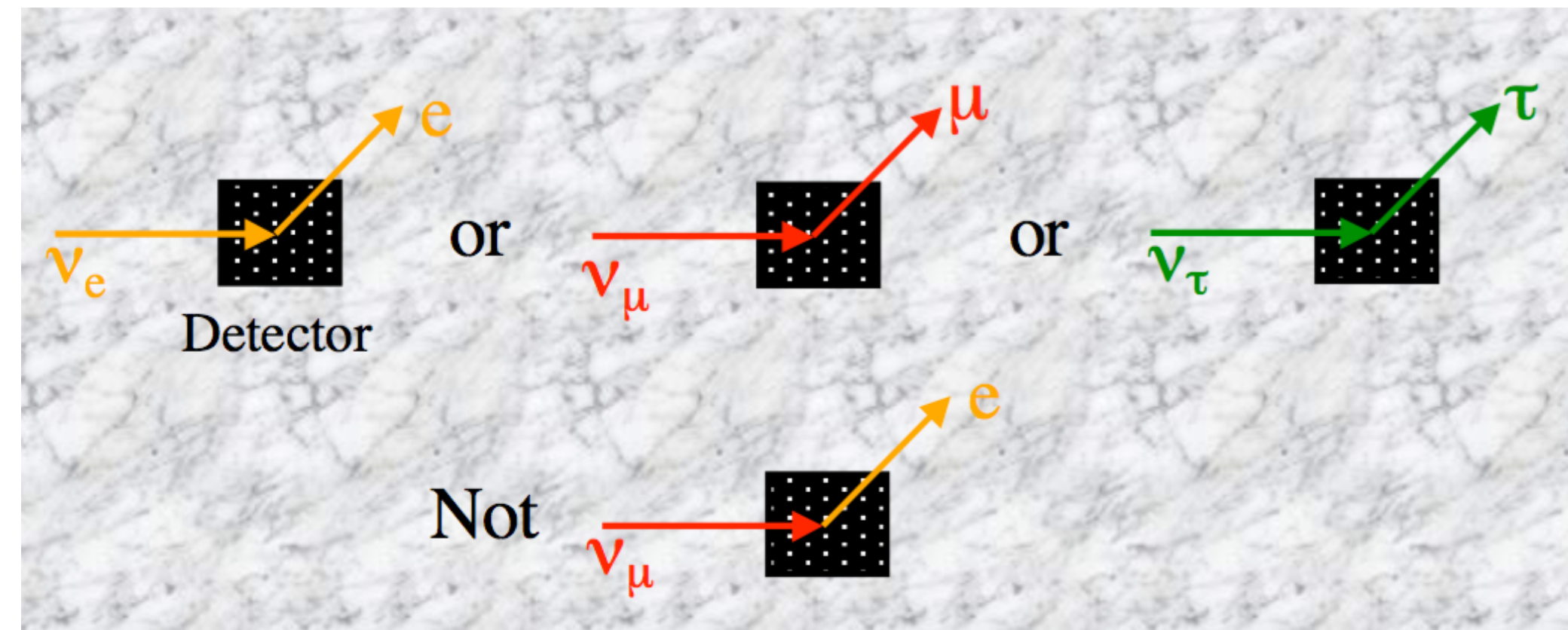


- **L** se conserva en cada familia de leptons



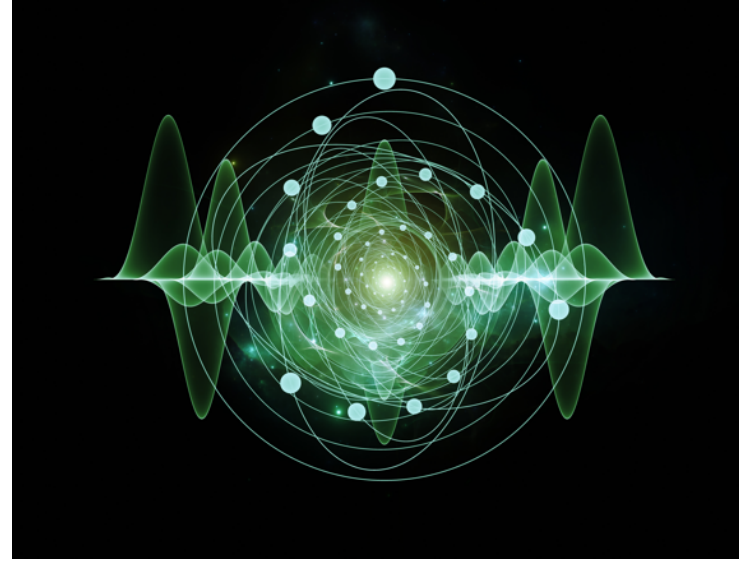
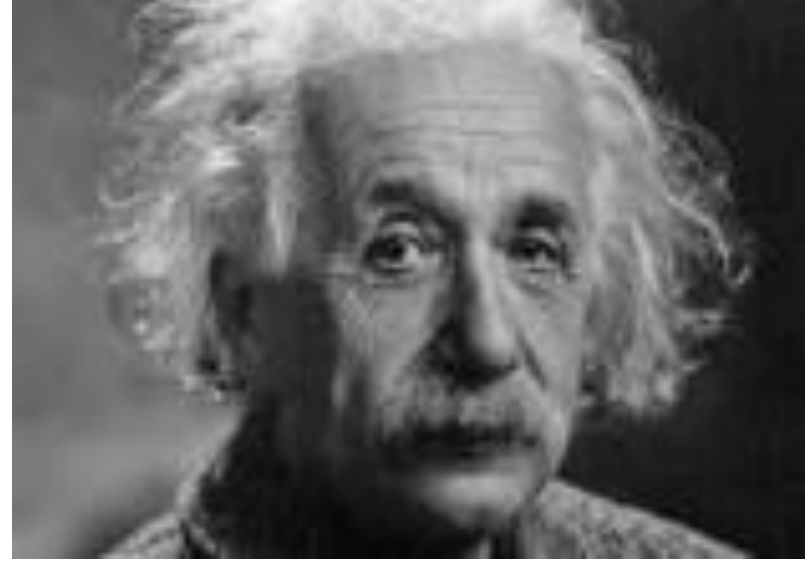
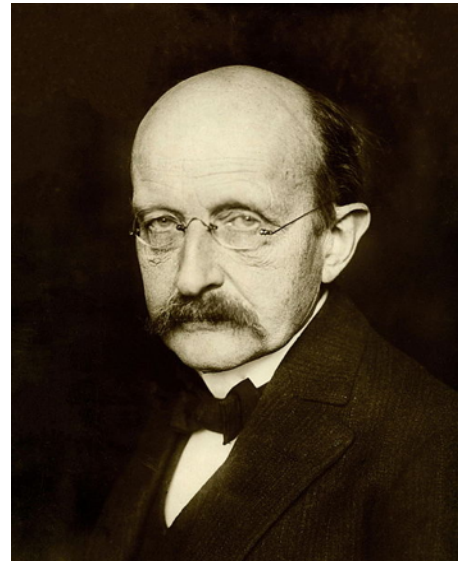
# Endogamia en los leptones

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

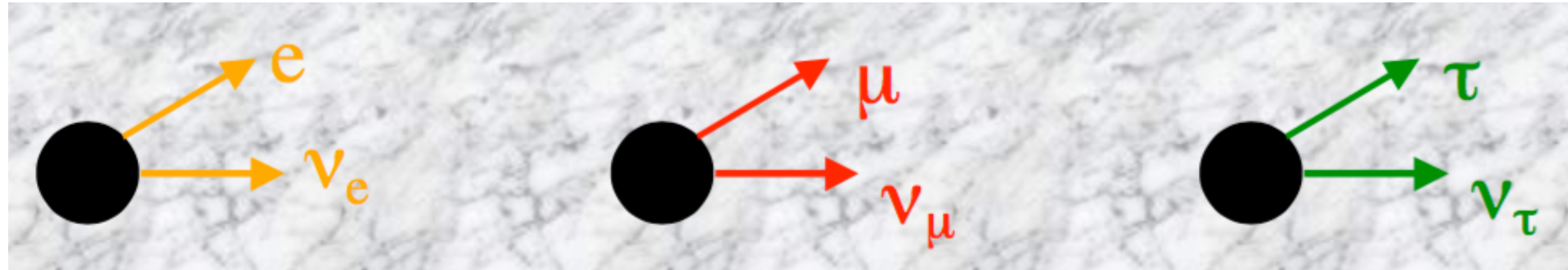


- Es el mundo de lo muy pequeño
- En este mundo la **incertidumbre** es la clave
  - La posición, energía, e incluso la naturaleza de las partículas no está bien definida
  - Todo es cuestión de **probabilidad**
  - Una partícula tiene cierta probabilidad de estar aquí o allá, de ser de un tipo o de 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  $\nu_3$



# Otra forma de verlo

---

- Un buen baso de cola-caó contiene: leche, cola-caó, 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-caó** 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

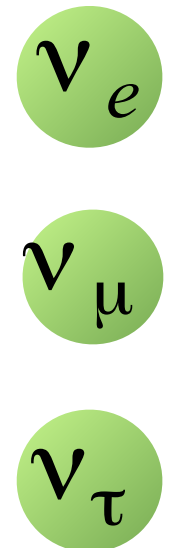
**Para una energía dada, la velocidad es función de la masa**

$$E \approx p = m v$$

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

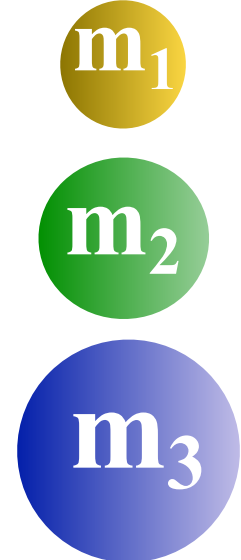
# Mezcla de sabores

(tamaños arbitrarios)



autoestados  
debiles

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



autoestados  
de masa

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


$$U = \underbrace{\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix}}_{\text{atmospheric sector}} \underbrace{\begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13}e^{-i\delta} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13}e^{i\delta} & 0 & c_{13} \end{pmatrix}}_{\text{connection between solar and atmospheric}} \underbrace{\begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}}_{\text{solar sector}}$$

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



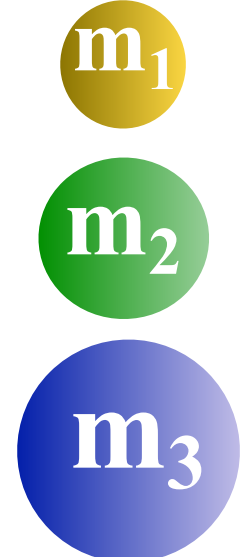
# Mezcla de sabores

(tamaños arbitrarios)



autoestados  
debiles

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



autoestados  
de masa

$\theta_{23}$

## PMNS mixing matrix

Pontecorvo–Maki–Nakagawa–Sakata

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

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


atmospheric sector

connection between  
solar and atmospheric

solar sector

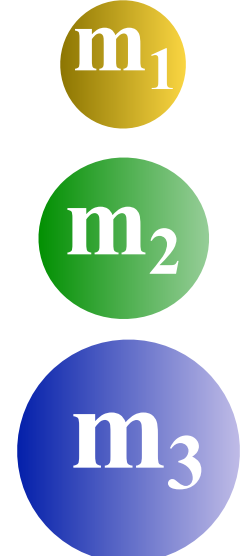
# Mezcla de sabores

(tamaños arbitrarios)



autoestados  
debiles

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



autoestados  
de masa

$\theta_{23}$

$\theta_{12}$

## PMNS mixing matrix

Pontecorvo–Maki–Nakagawa–Sakata

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

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

atmospheric sector

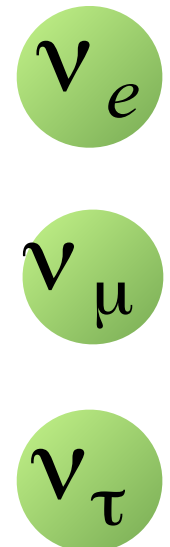
connection between  
solar and atmospheric

solar sector



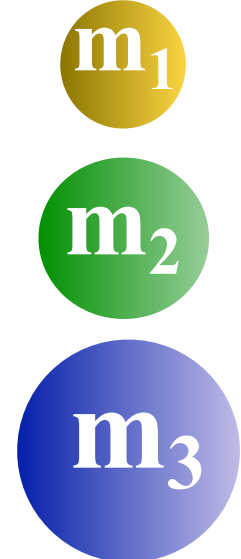
# Mezcla de sabores

(tamaños arbitrarios)



autoestados  
debiles

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



autoestados  
de masa

$\theta_{23}$

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

$\theta_{12}$

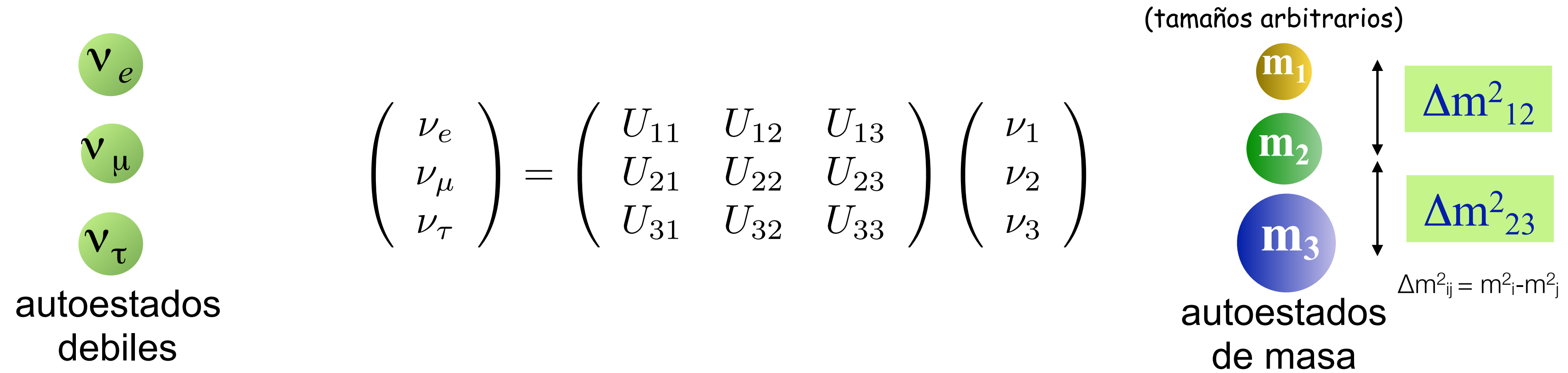
## PMNS mixing matrix

Pontecorvo–Maki–Nakagawa–Sakata

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

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

# Mezcla de sabores



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

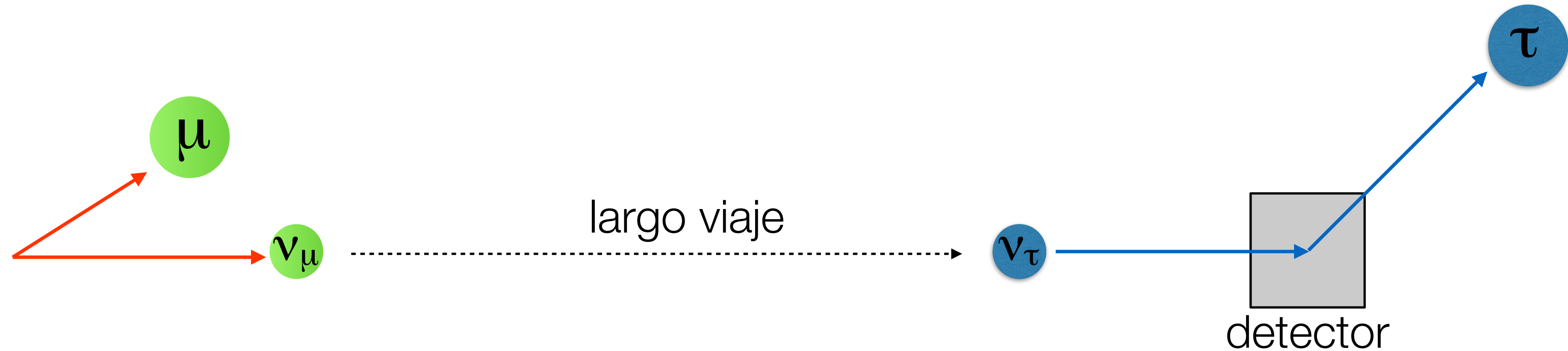
**PMNS mixing matrix**  
 Pontecorvo–Maki–Nakagawa–Sakata

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

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



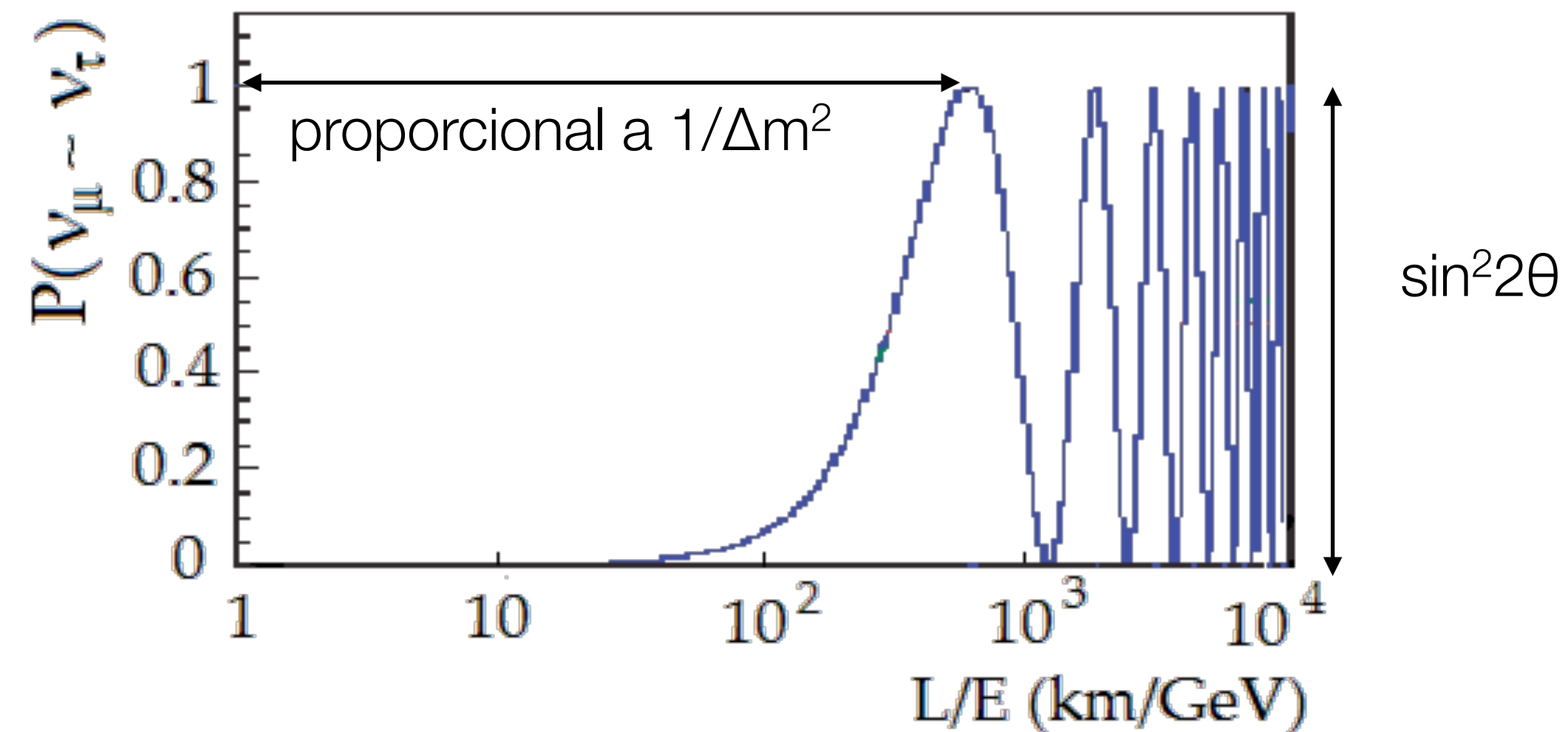
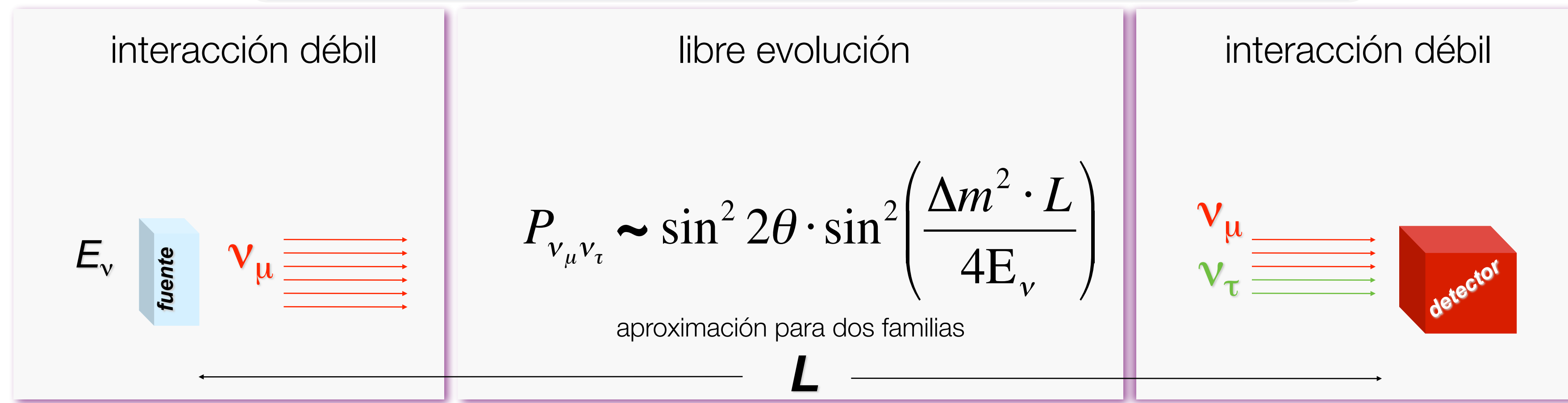
# ¿ Estaba loco Bruno Pontecorvo ?



- ¿ 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

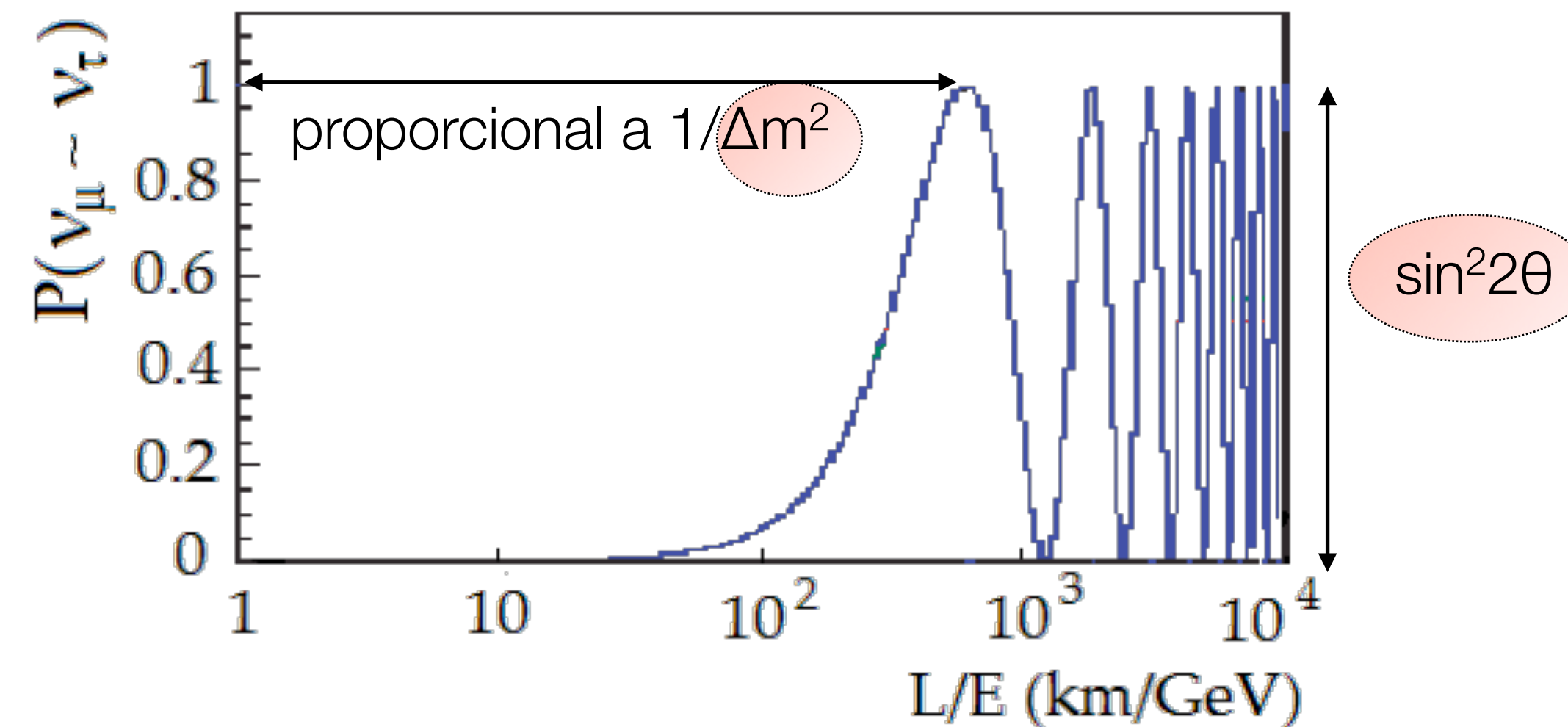
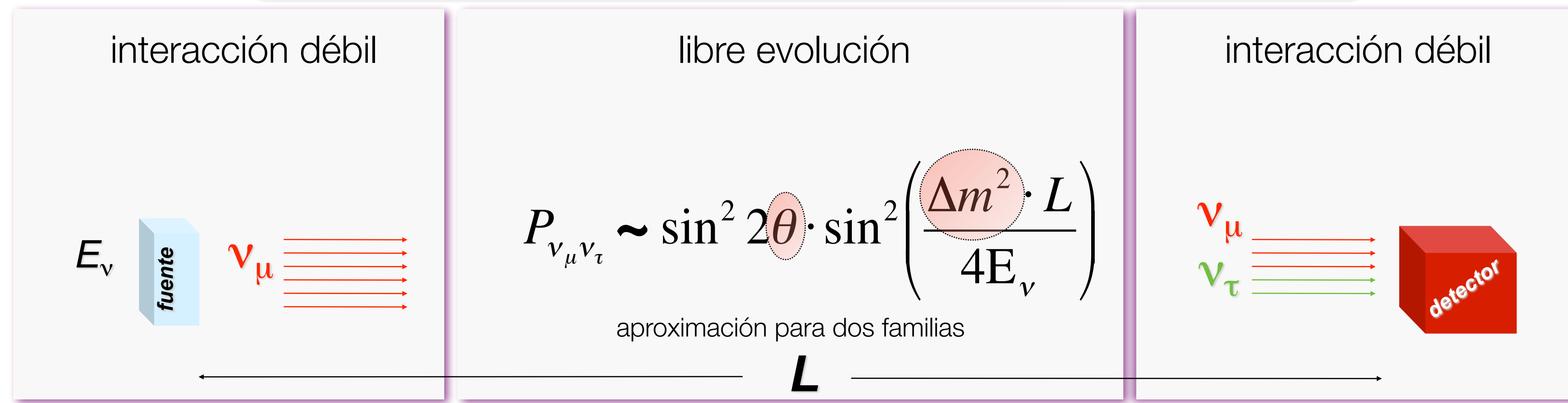
**Requisitos:** Neutrinos tienen masas diferentes





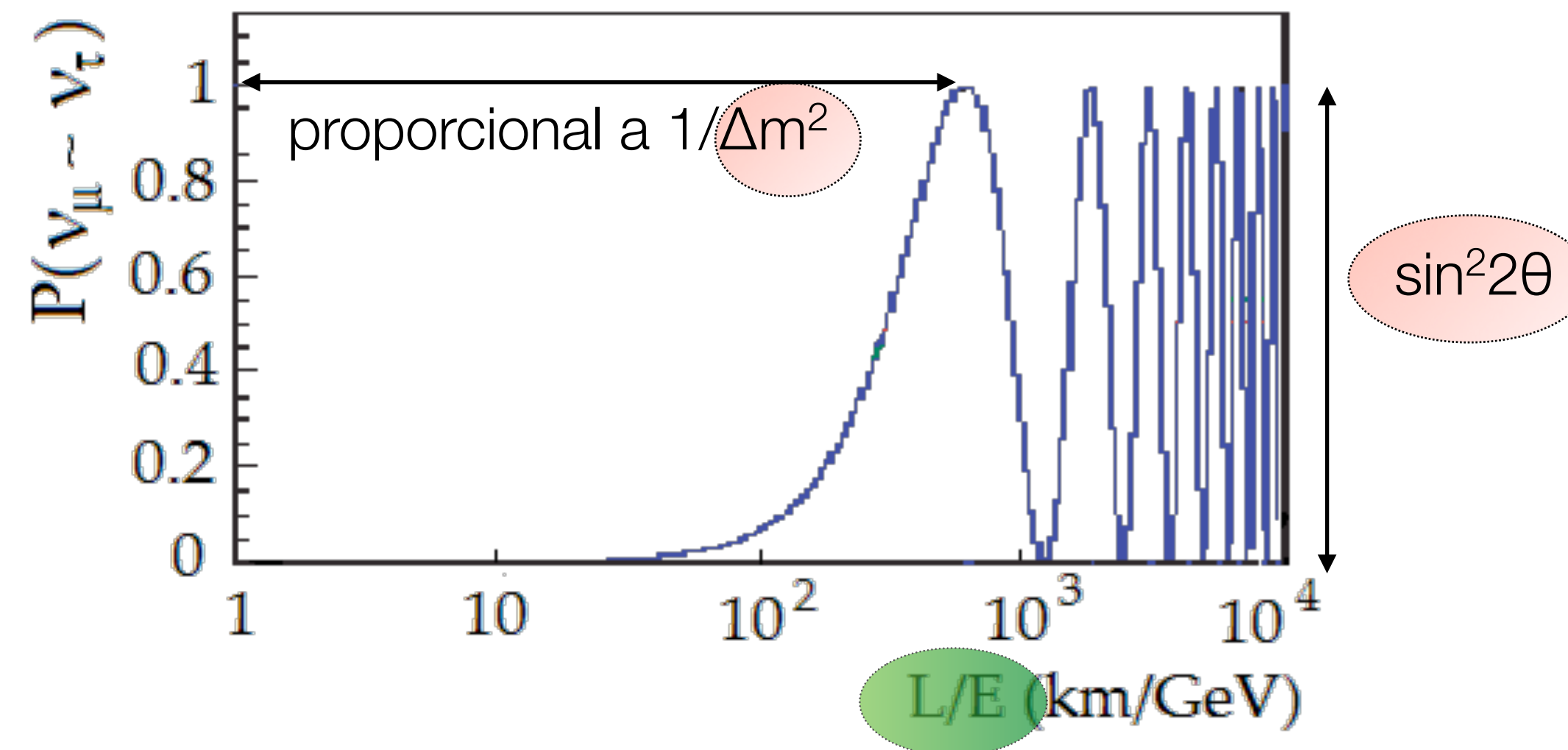
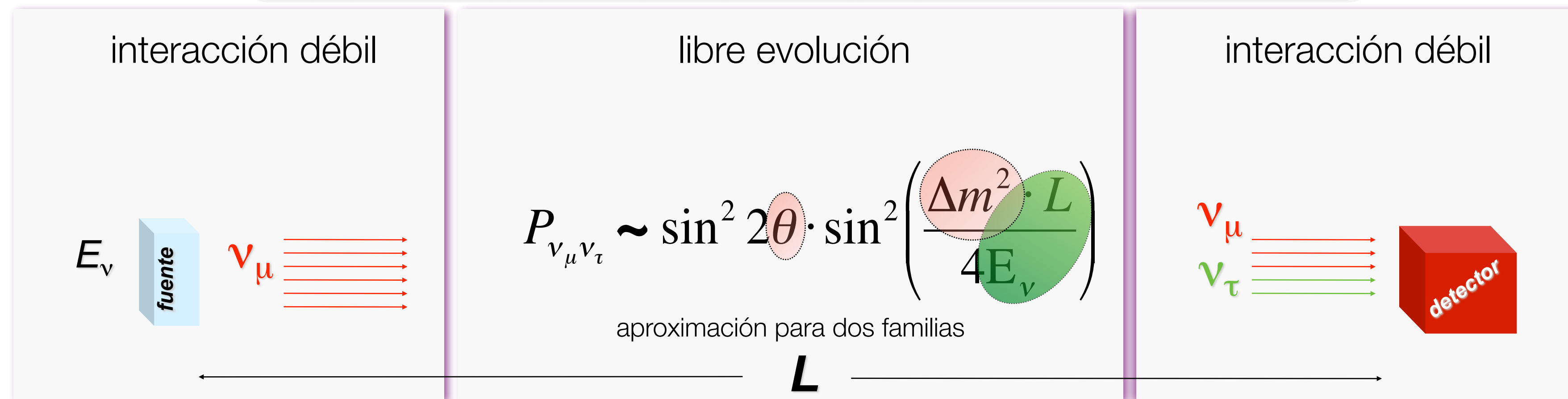
# Oscilaciones de neutrinos

**Requisitos:** Neutrinos tienen masas diferentes



# Oscilaciones de neutrinos

**Requisitos:** Neutrinos tienen masas diferentes





# La búsqueda

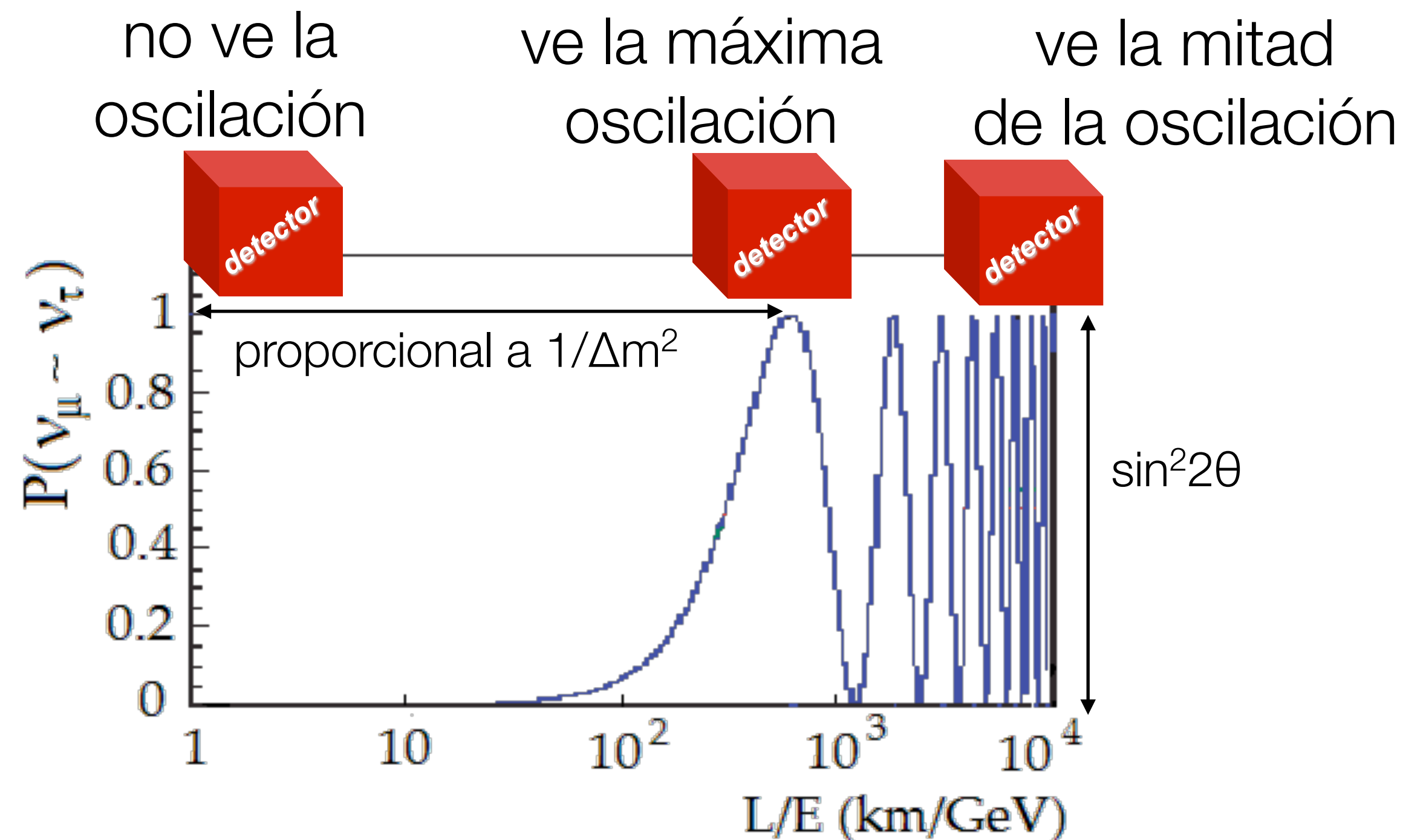
---

- 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  $\Delta m^2$





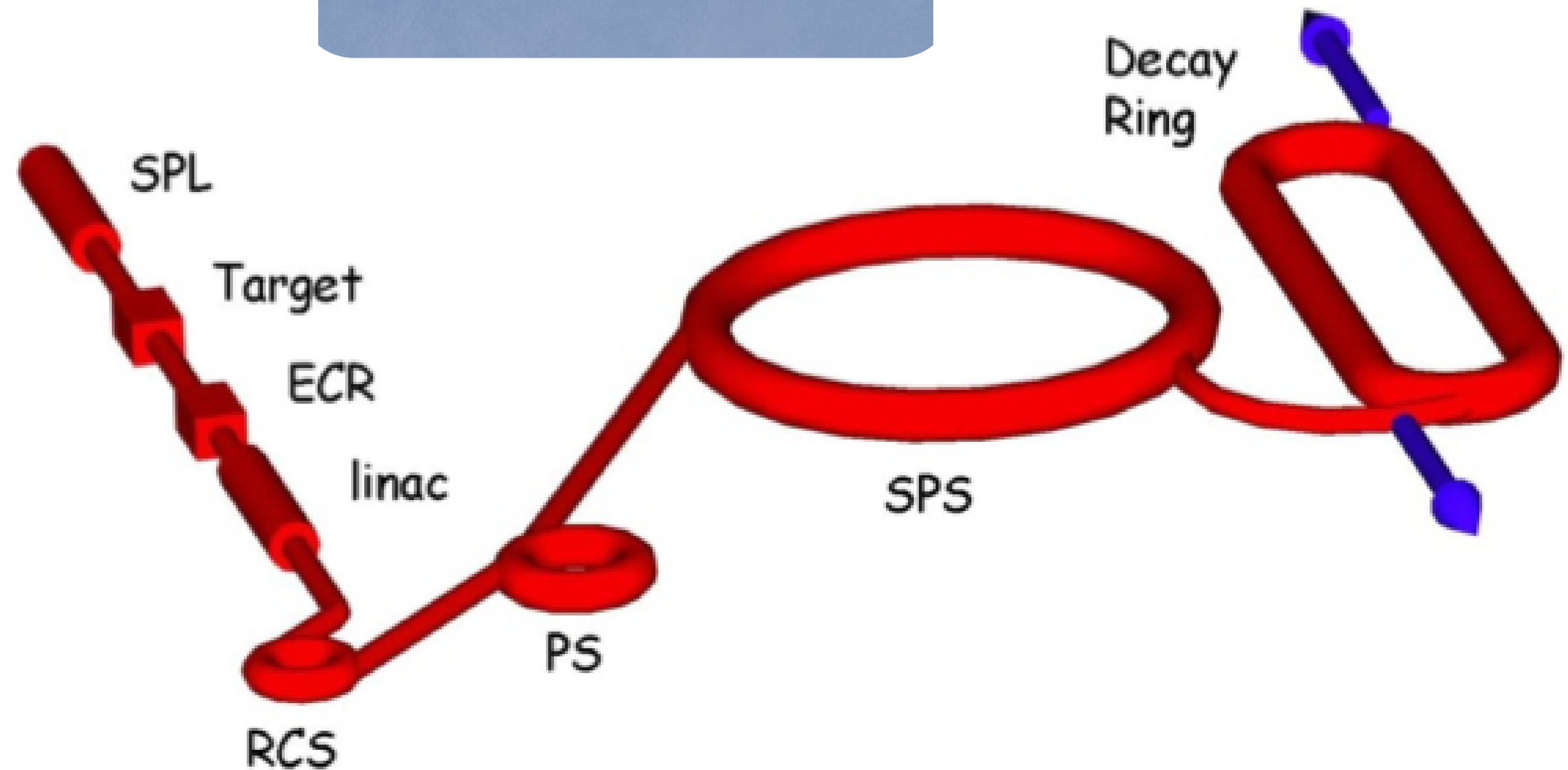
# Fuentes artificiales

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

Reactores



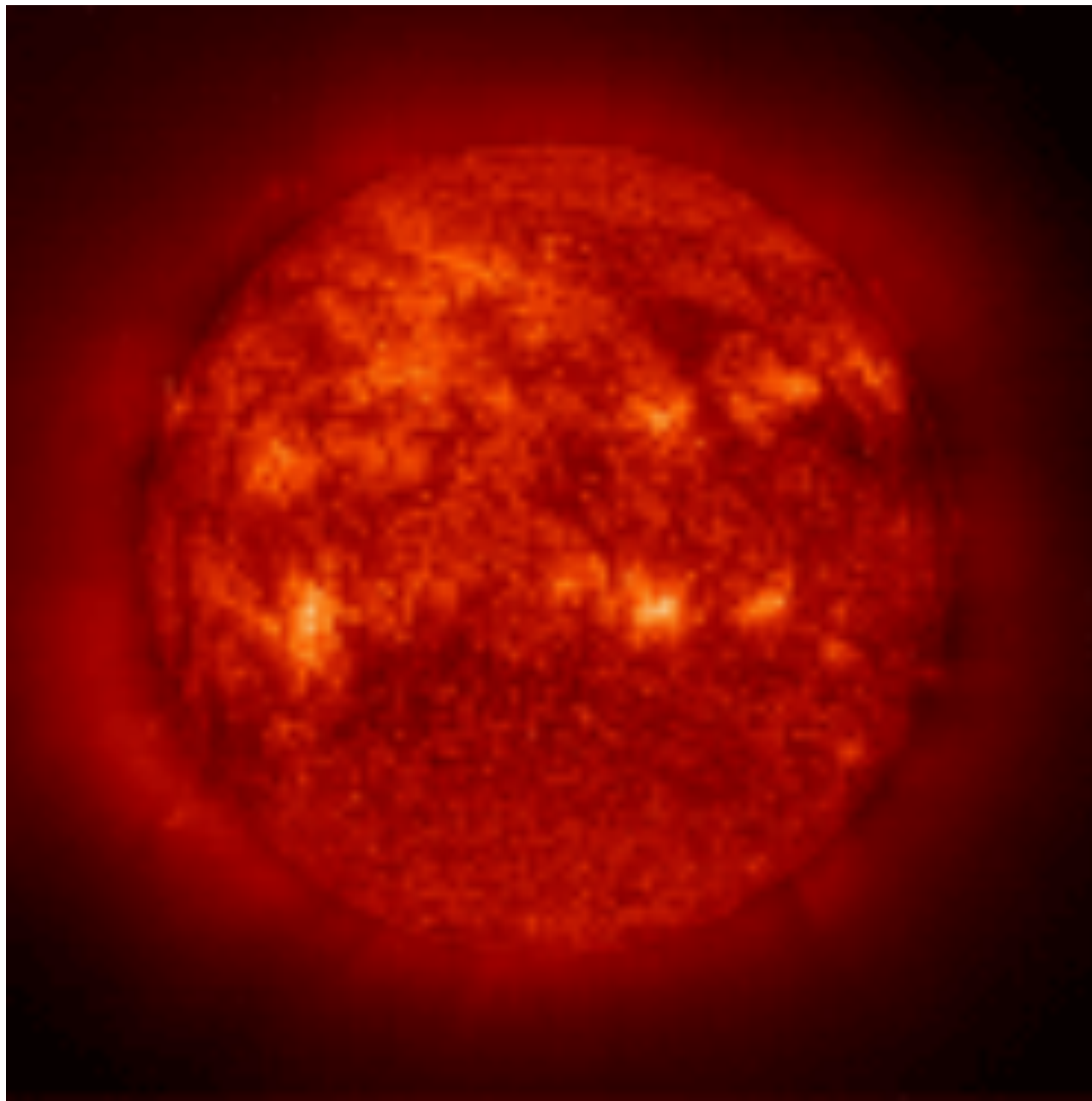
Acceleradores





# Fuentes naturales de neutrinos

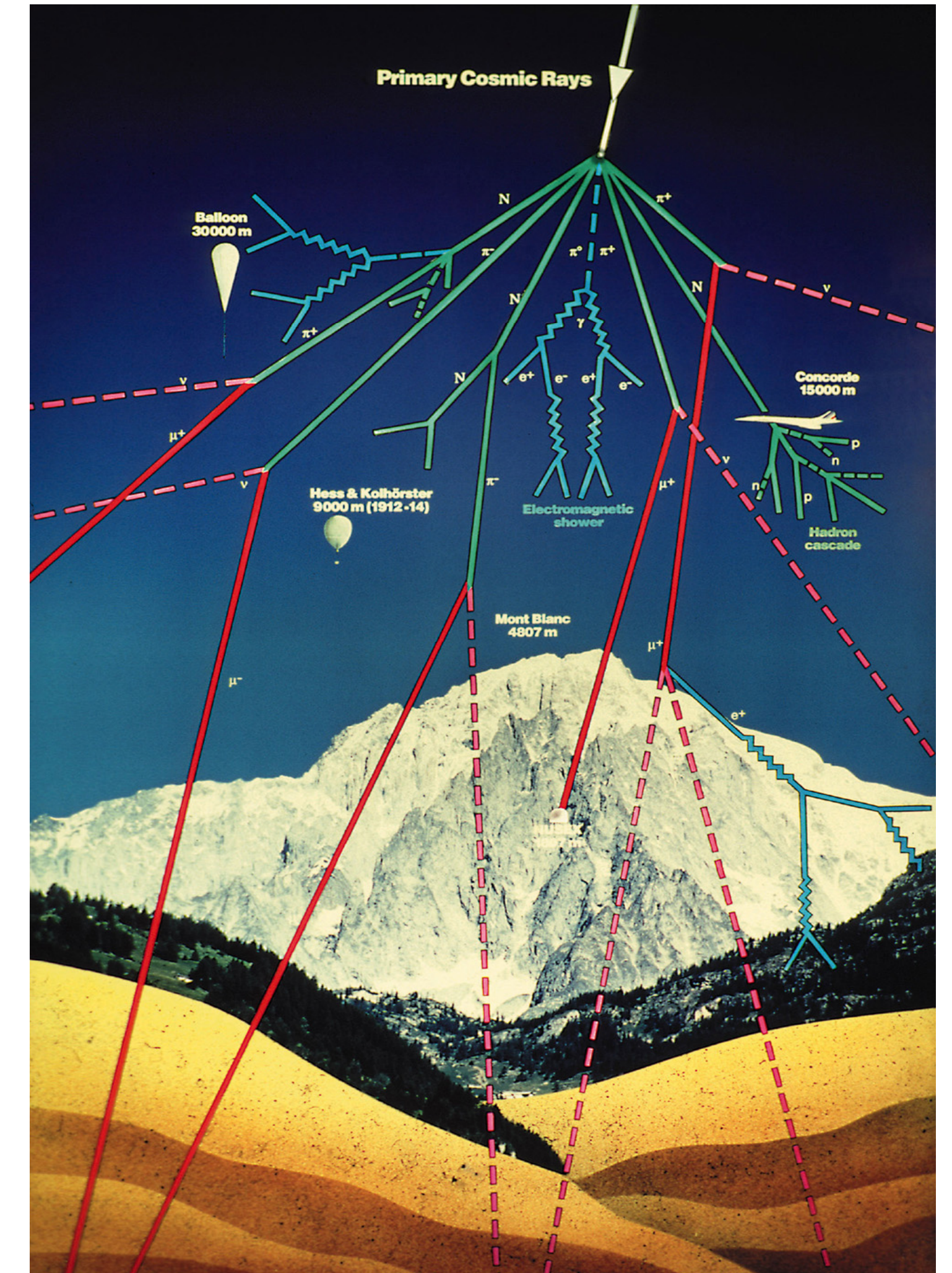
Sol



Supernova



Atmósfera



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



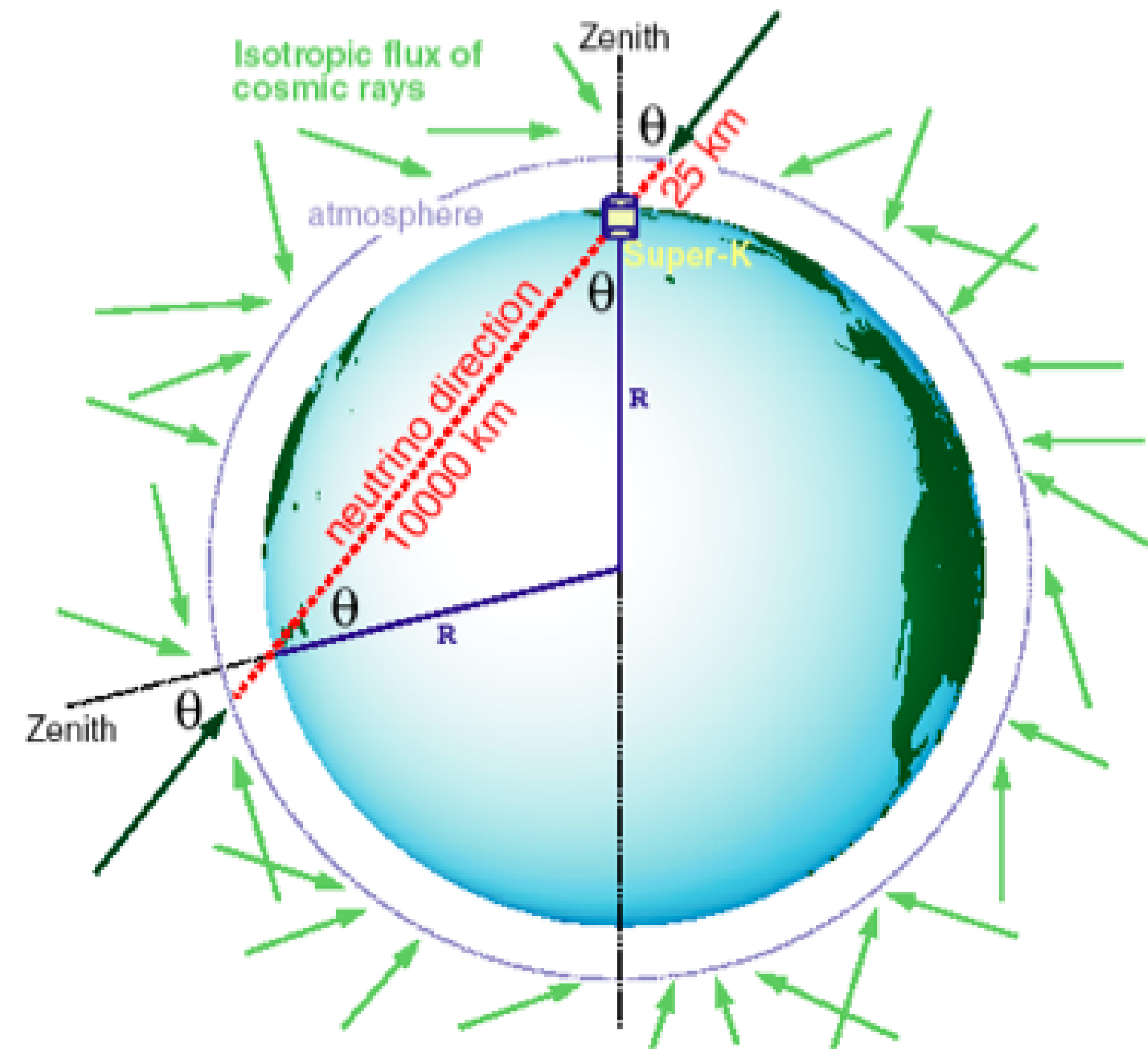
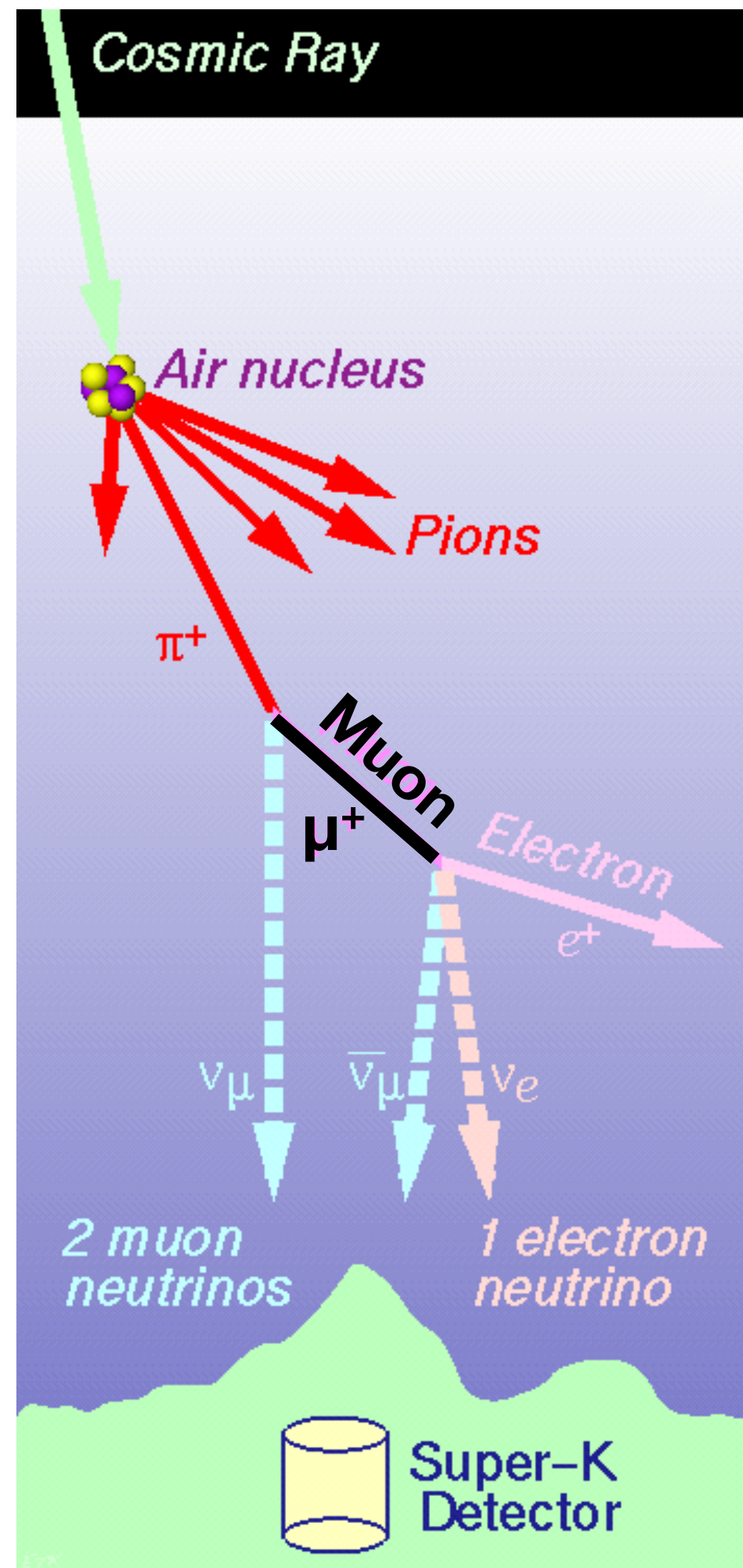
# De noche en una playa ...

---

- 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



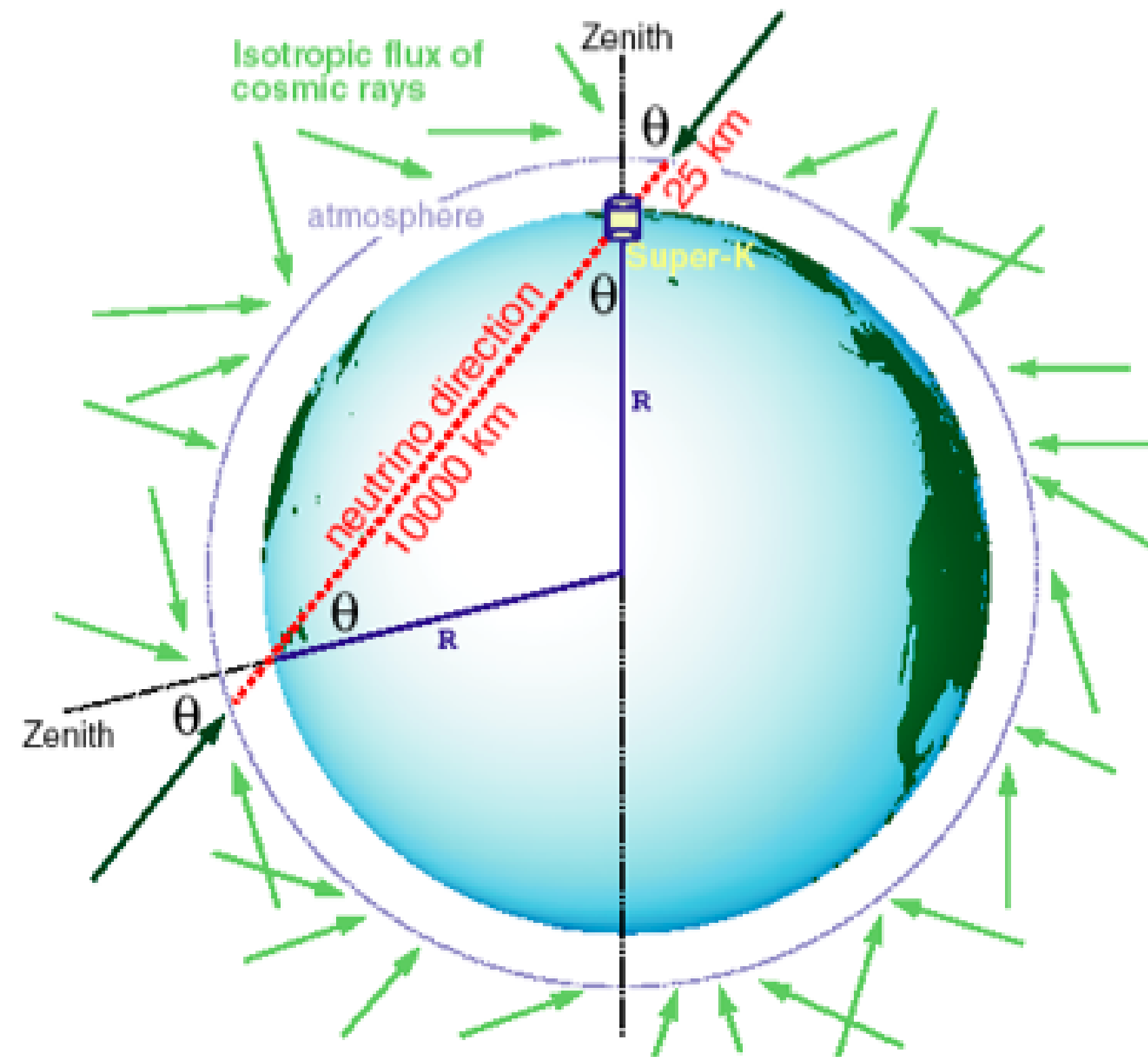
$$L=f(\theta)$$

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

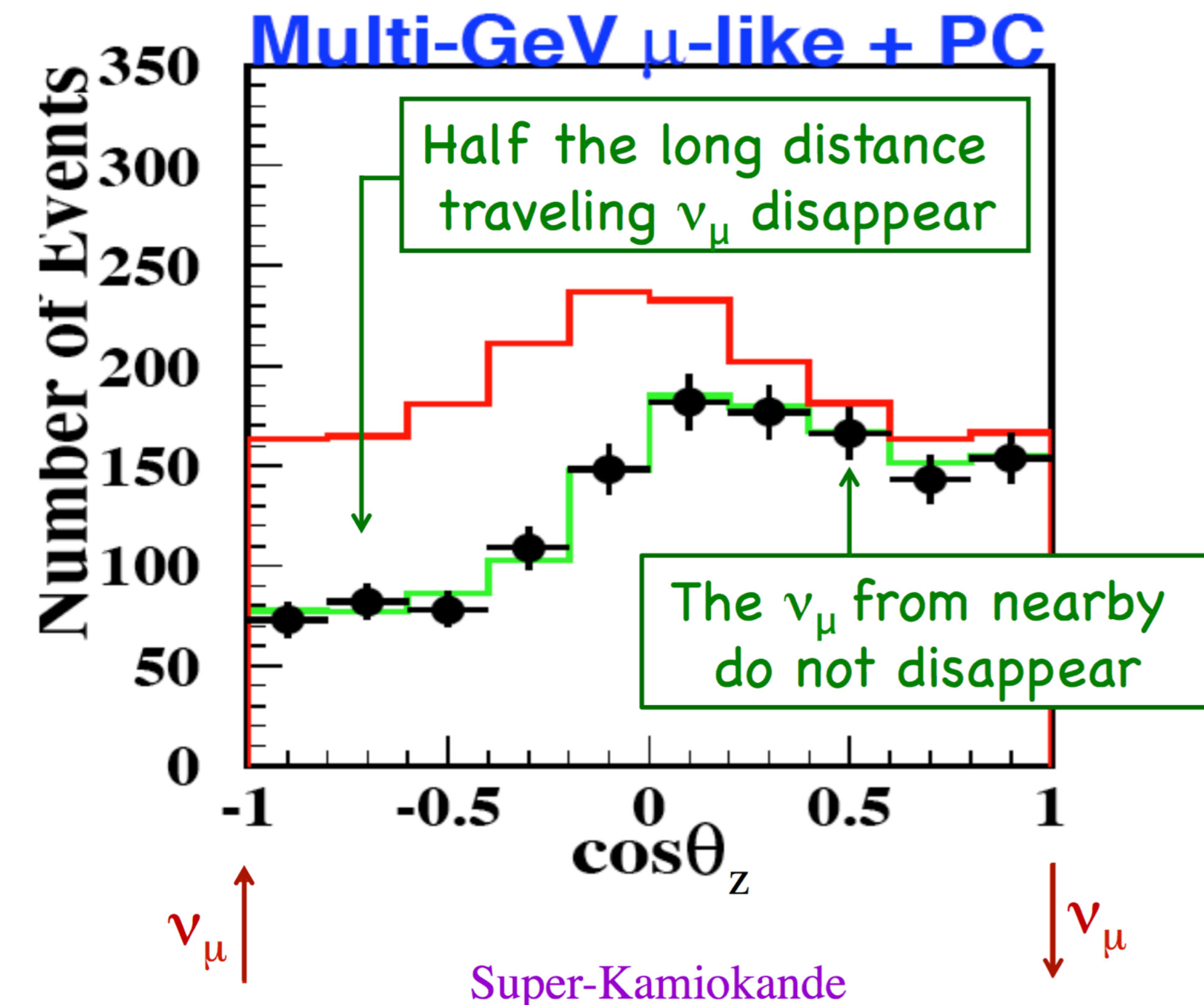


# El descubrimiento

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

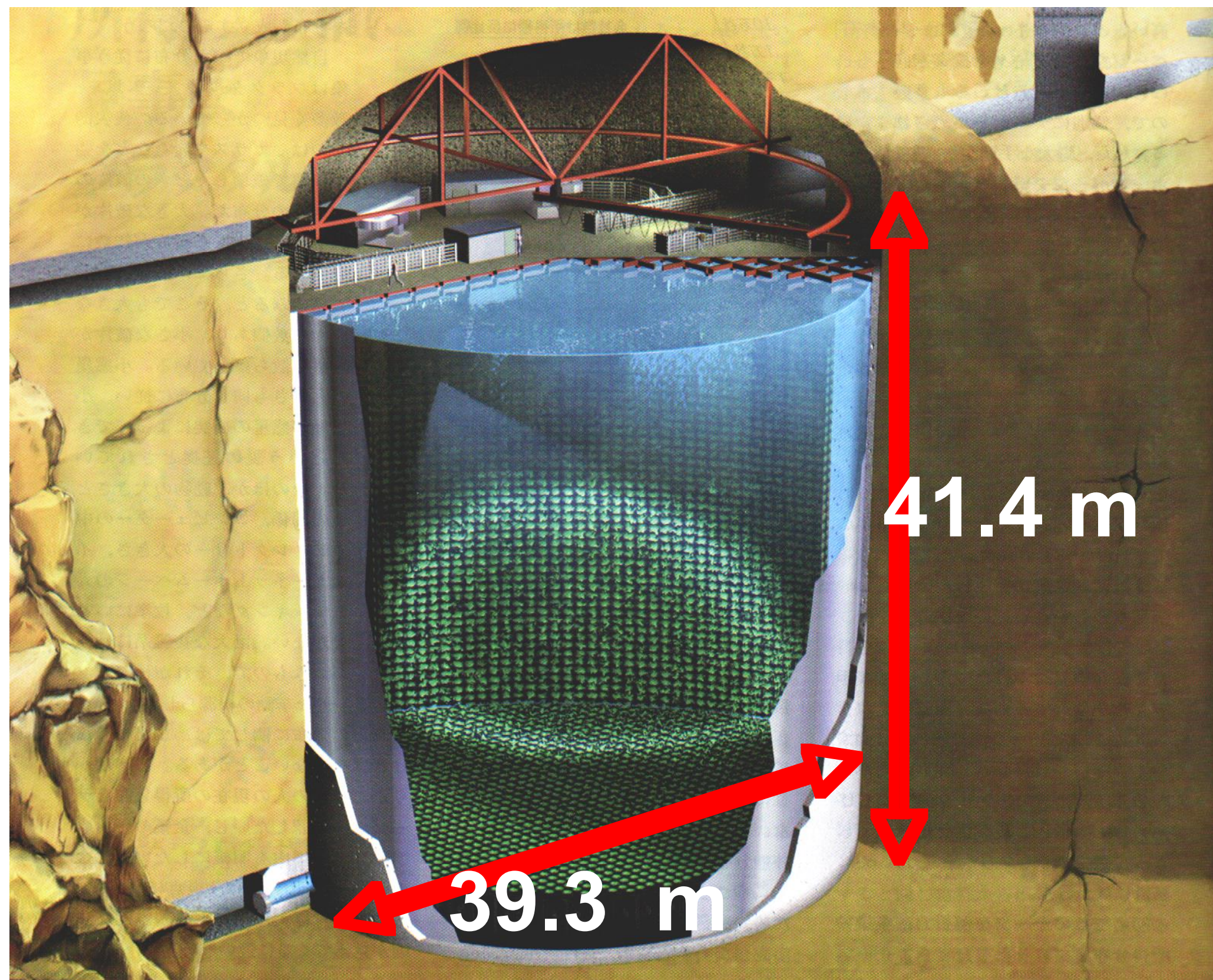


$$L=f(\theta), \quad 1\text{-}13000 \text{ km}$$

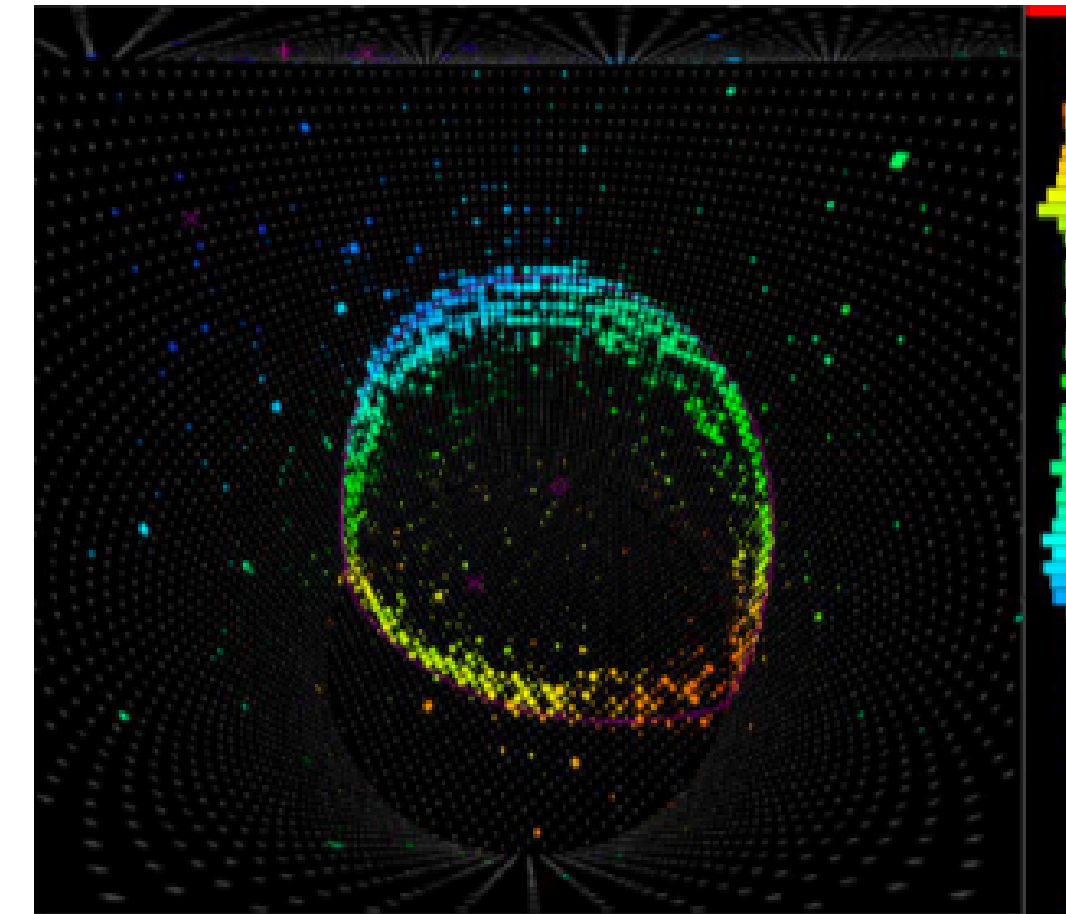




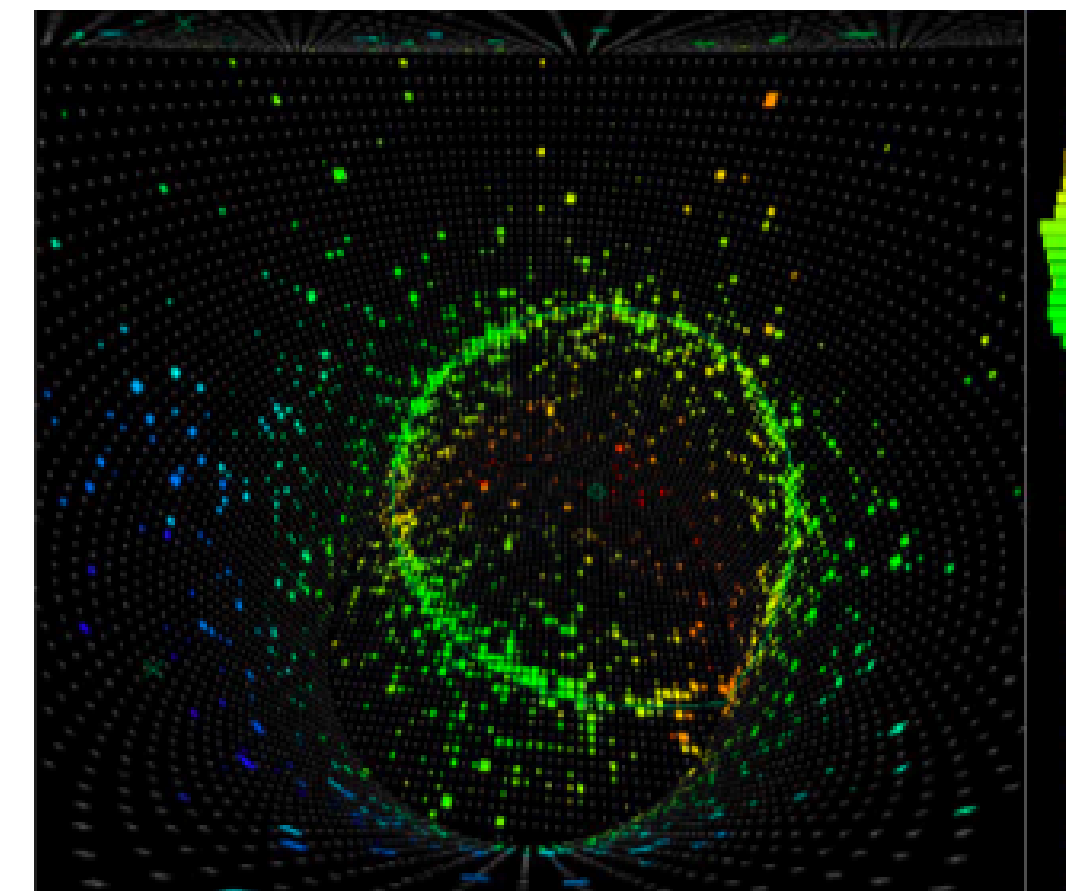
# Super-Kamiokande



anillo de tipo muón



anillo de tipo electrón





# de nuevo en la playa

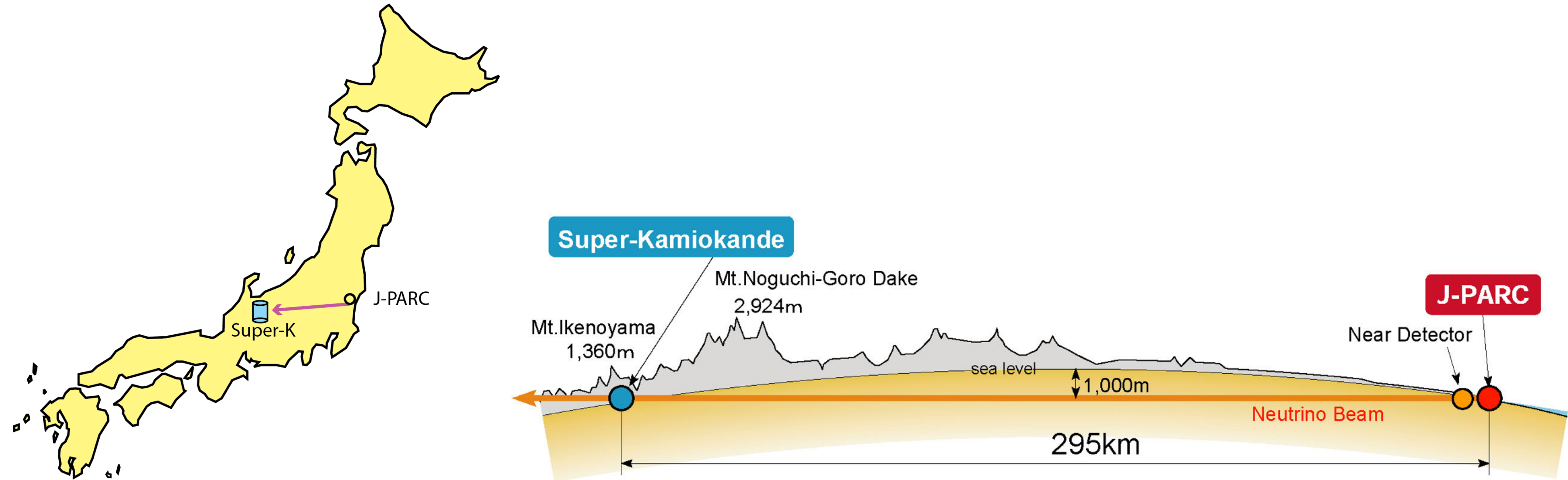
---

- 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
- Las 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

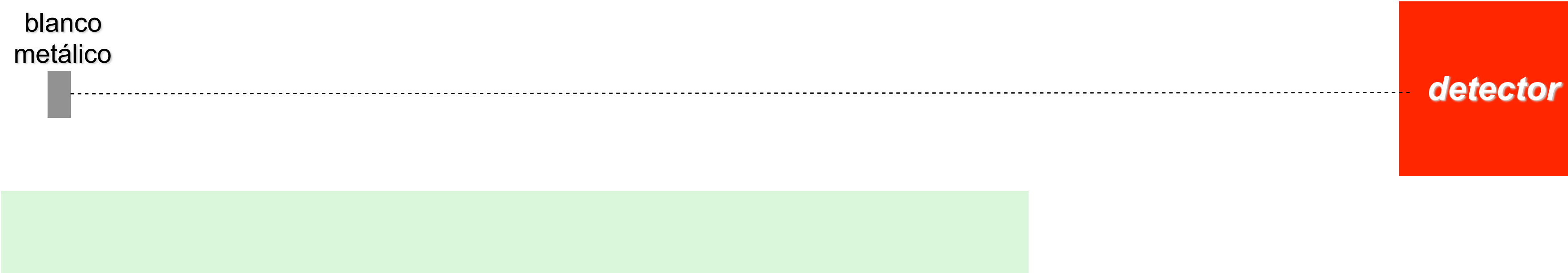




# Haces de neutrinos



- Todos los haces de neutrinos se producen así

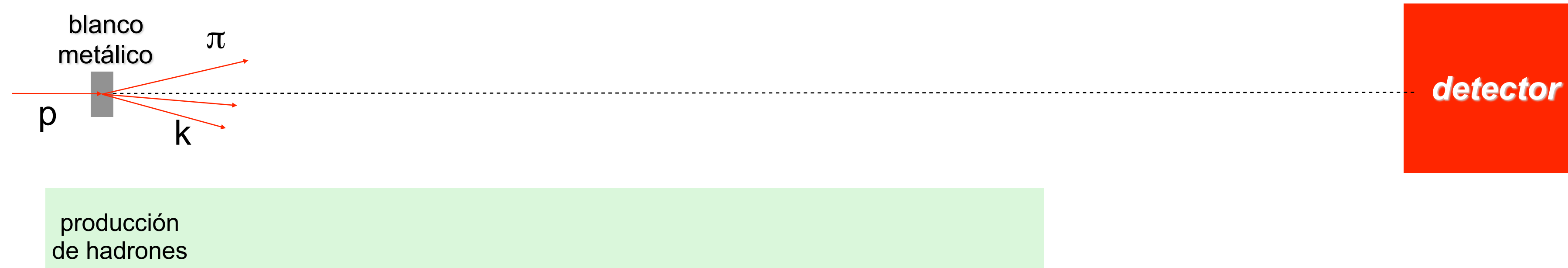


- En T2K buscamos un exceso de neutrinos electrónicos en el detector situado a 295 km

# Haces de neutrinos



- Todos los haces de neutrinos se producen así

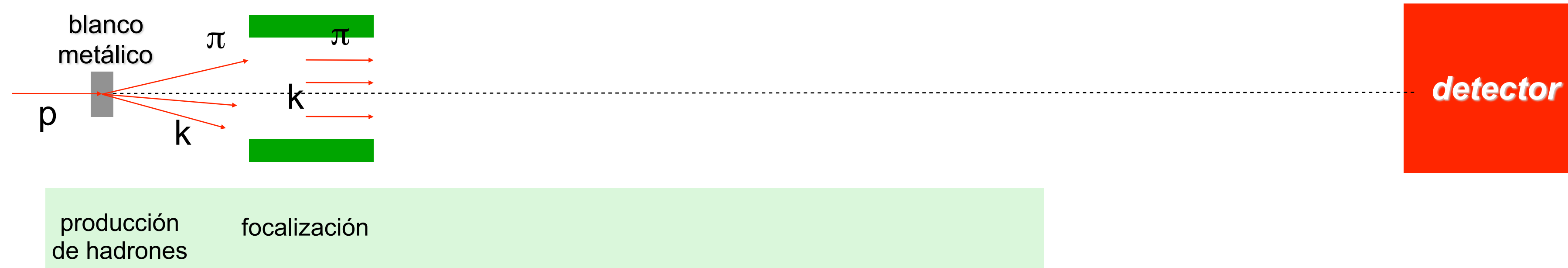


- En T2K buscamos un exceso de neutrinos electrónicos en el detector situado a 295 km



# Haces de neutrinos

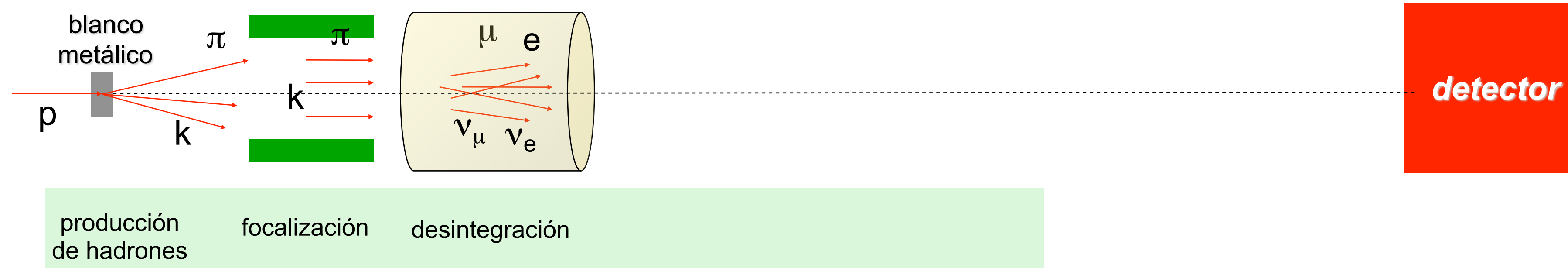
- Todos los haces de neutrinos se producen así



- 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

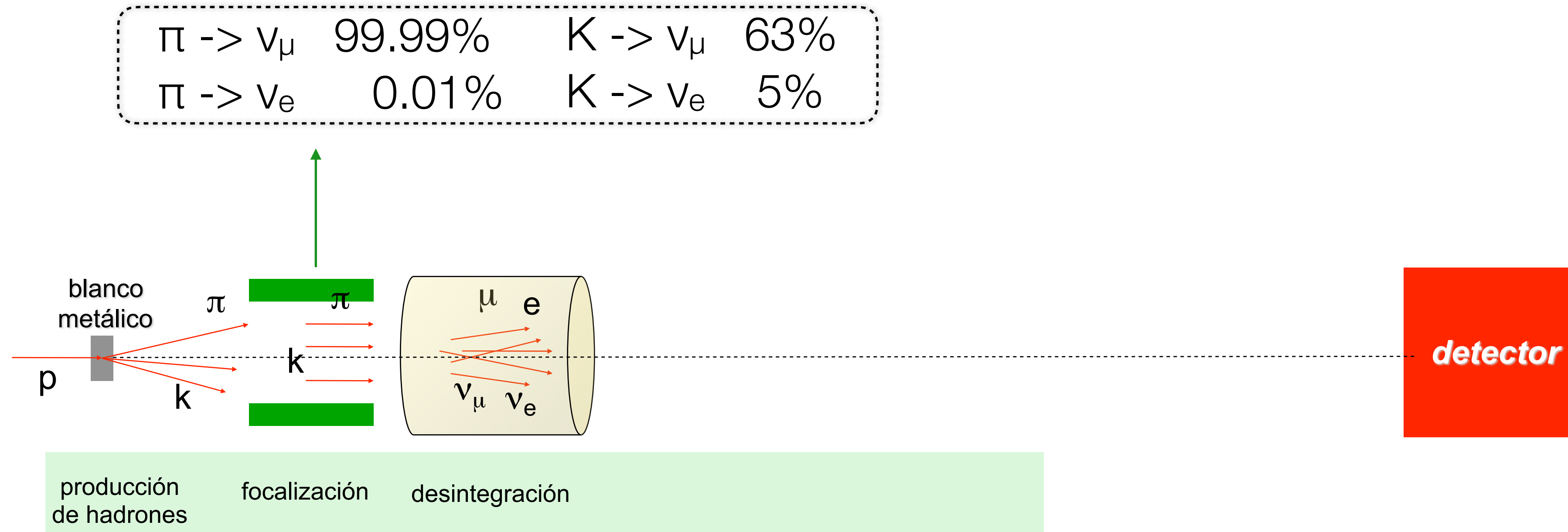


- En T2K buscamos un exceso de neutrinos electrónicos en el detector situado a 295 km



# Haces de neutrinos

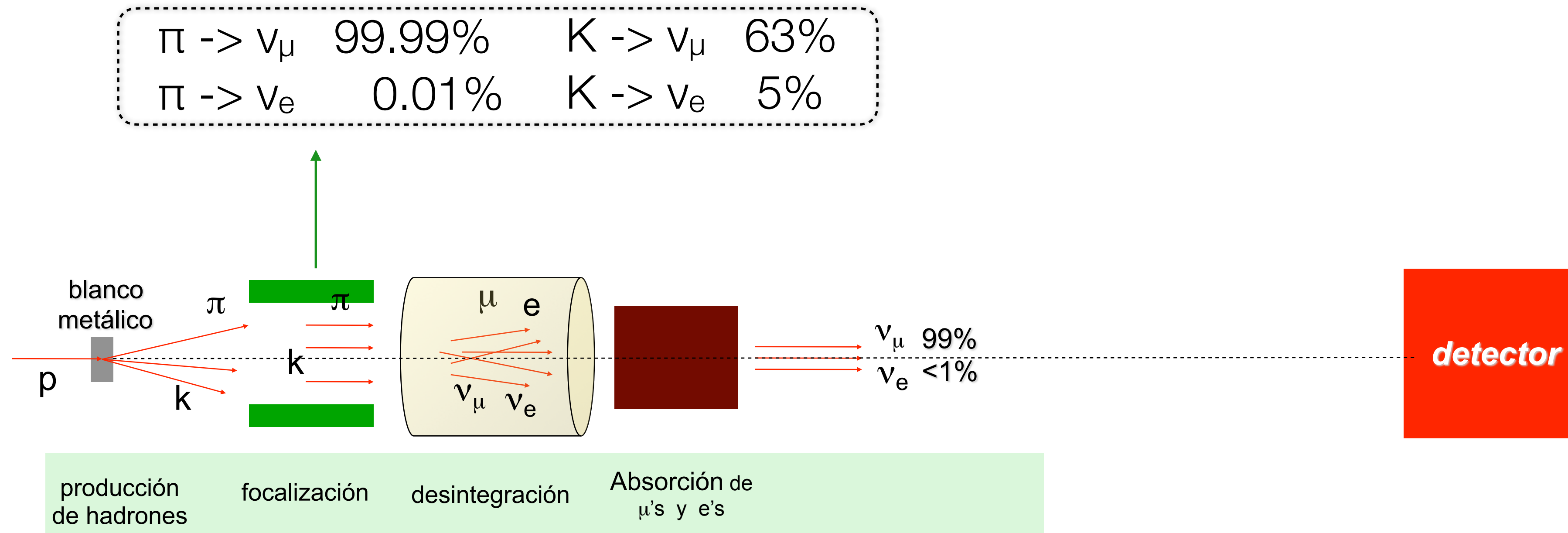
- Todos los haces de neutrinos se producen así



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

# Haces de neutrinos

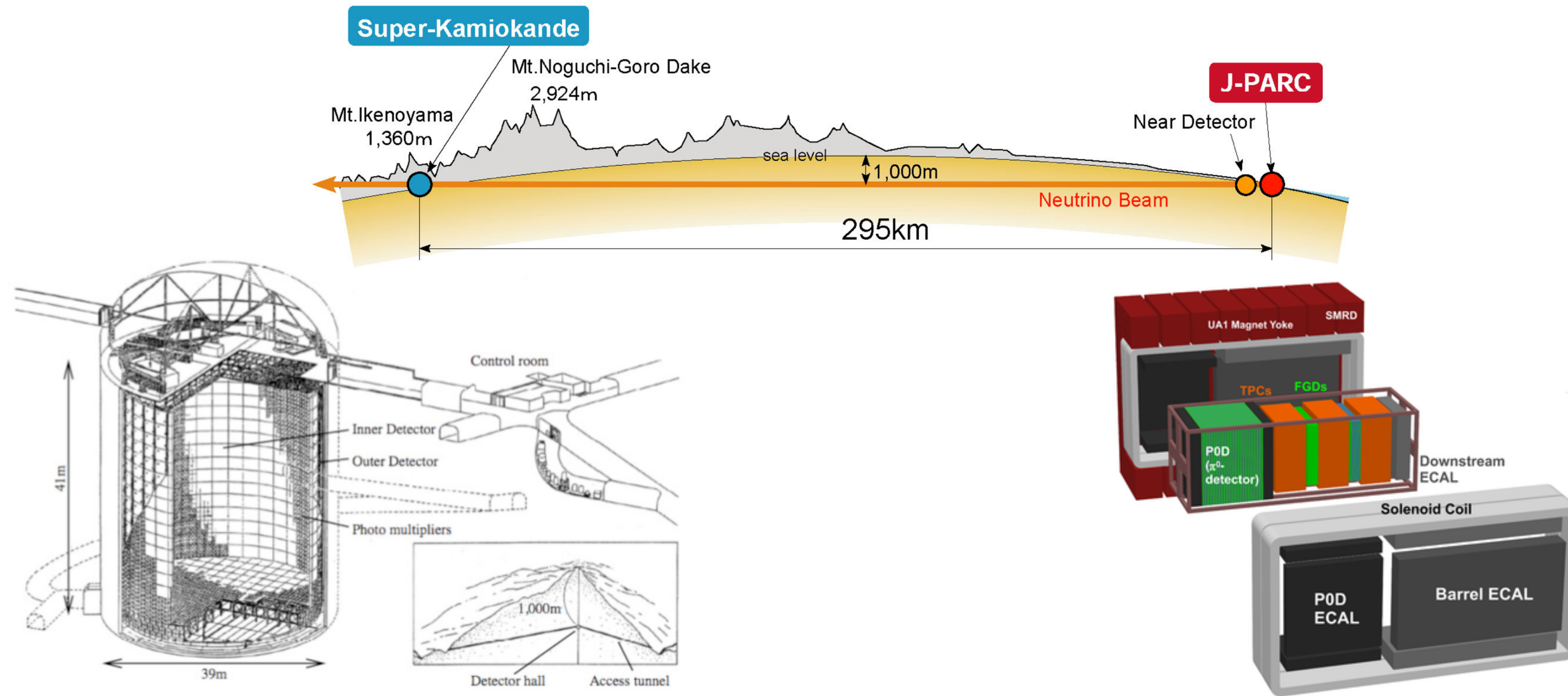
- Todos los haces de neutrinos se producen así



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

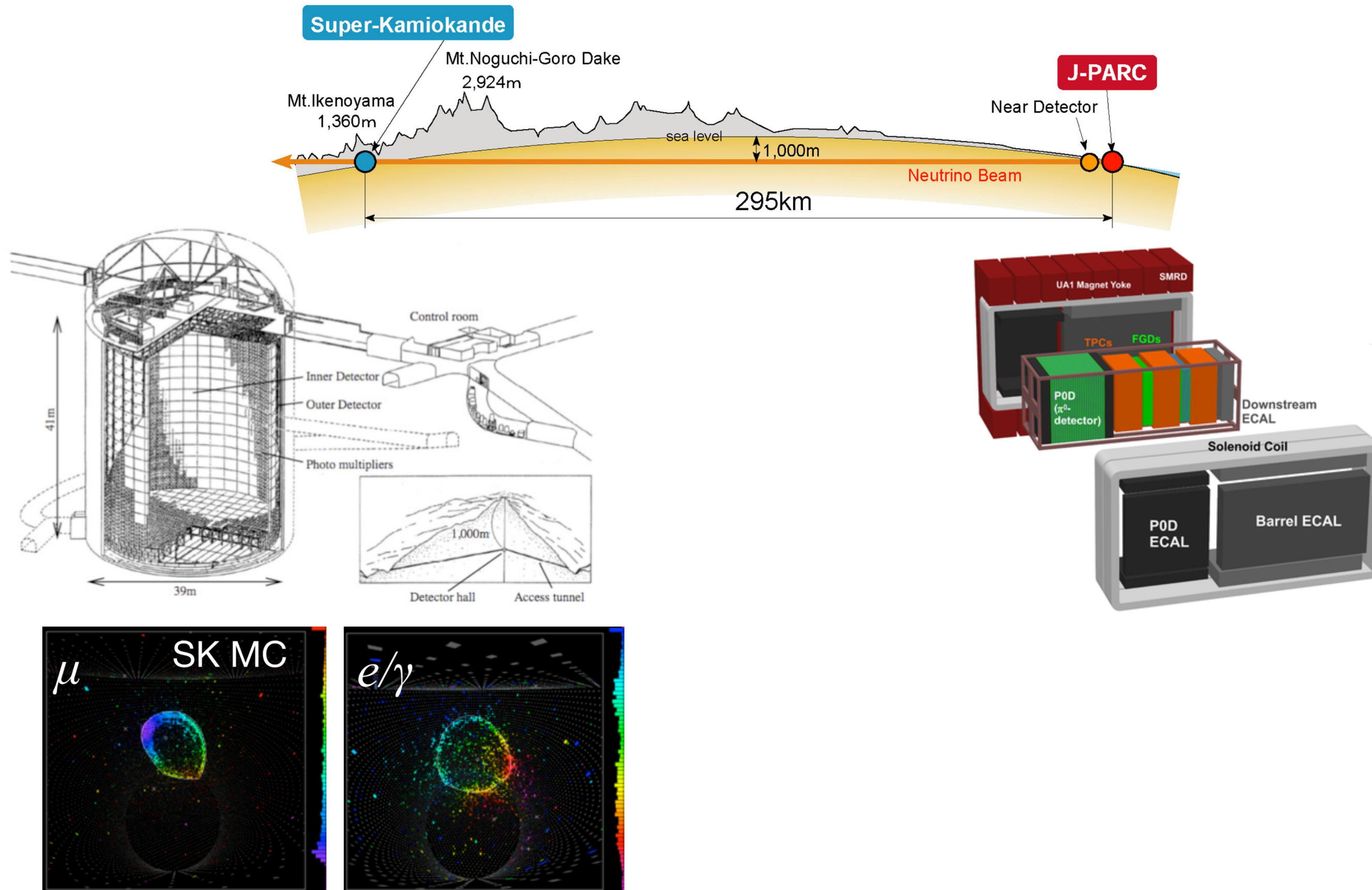


# Los detectores de T2K



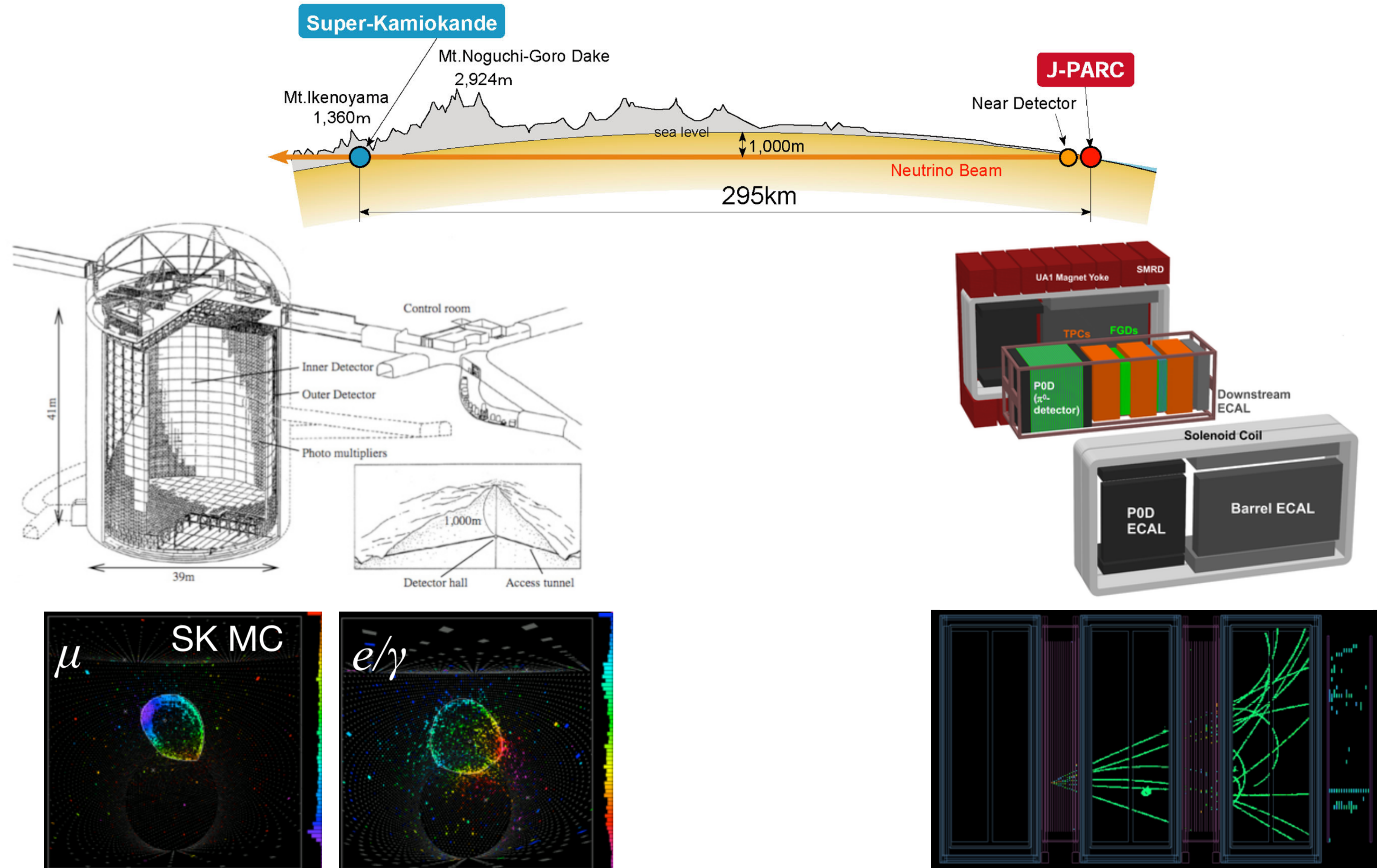


# Los detectores de T2K





# 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?

---



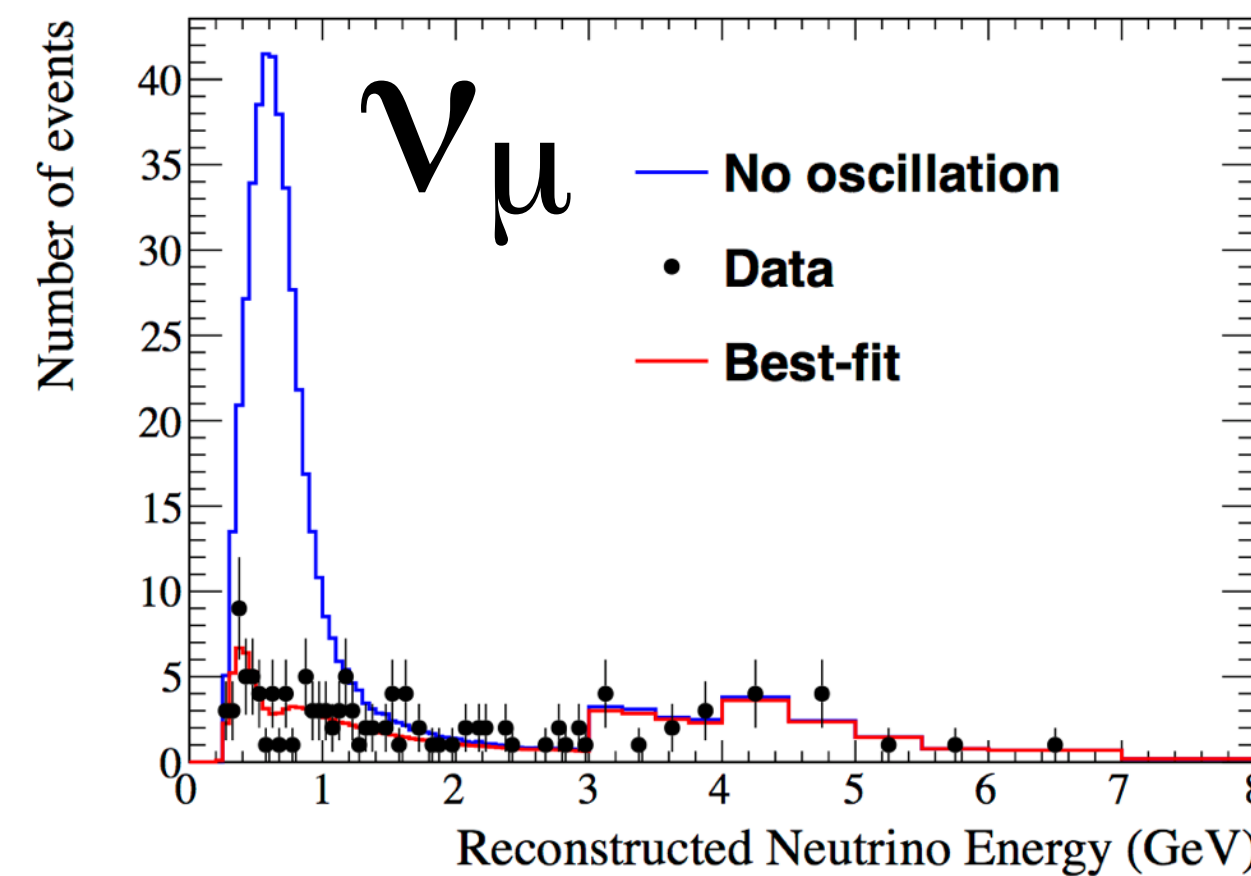
- La Física experimental no es solo esto:
  - Hemos participado en el diseño del detector
  - En los prototipos (en el CERN)
  - En la calibración del detector
  - En la elaboración del software de ...
  - En la elaboración del programa de análisis
  - En la toma de datos ....

# Las oscilaciones de T2K

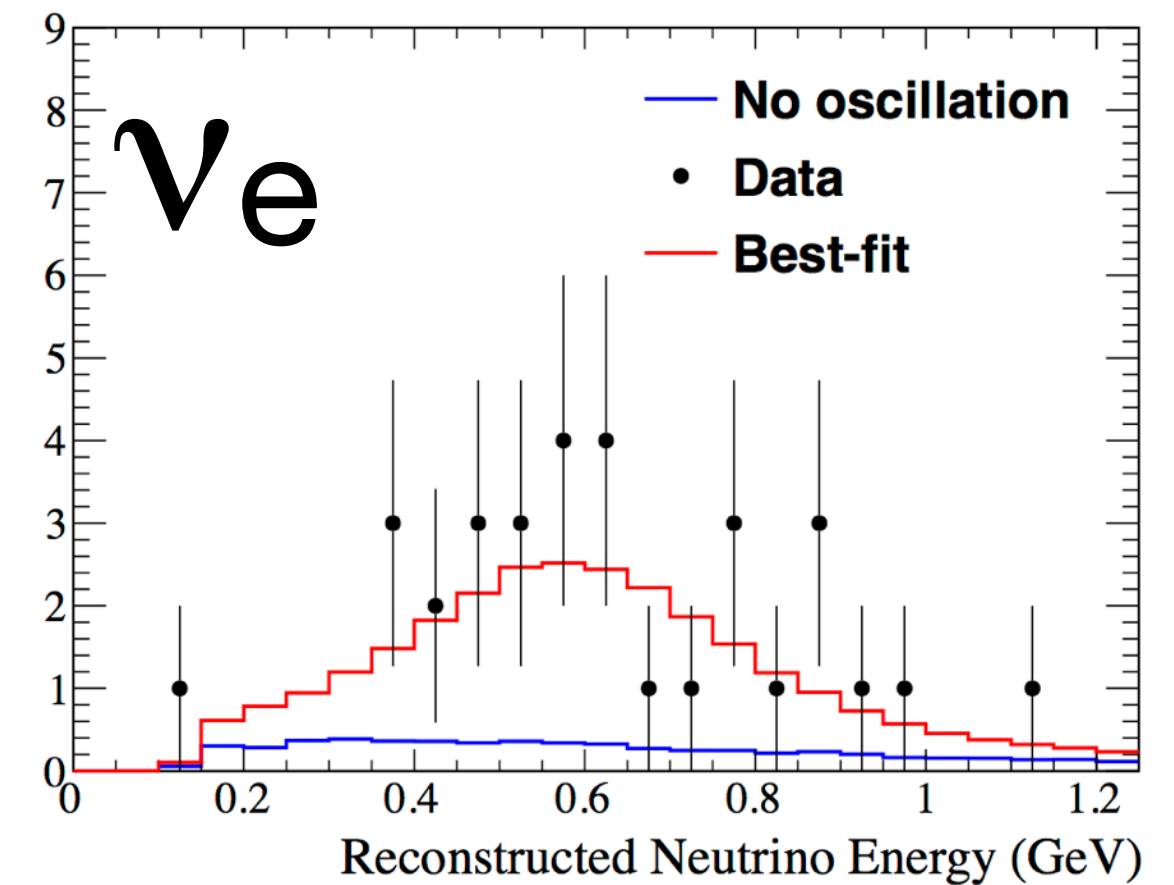


- La línea **azul** es lo que esperamos en ausencia de oscilaciones
- Los **puntos negros** con barras de error es lo que observamos
  - **menos neutrinos múonicos** de los que esperamos
  - **más neutrinos electrónicos** de los que esperamos
- La línea **roja** es lo que esperamos si hay oscilaciones, usando los parámetros de oscilación que mejor describen la realidad

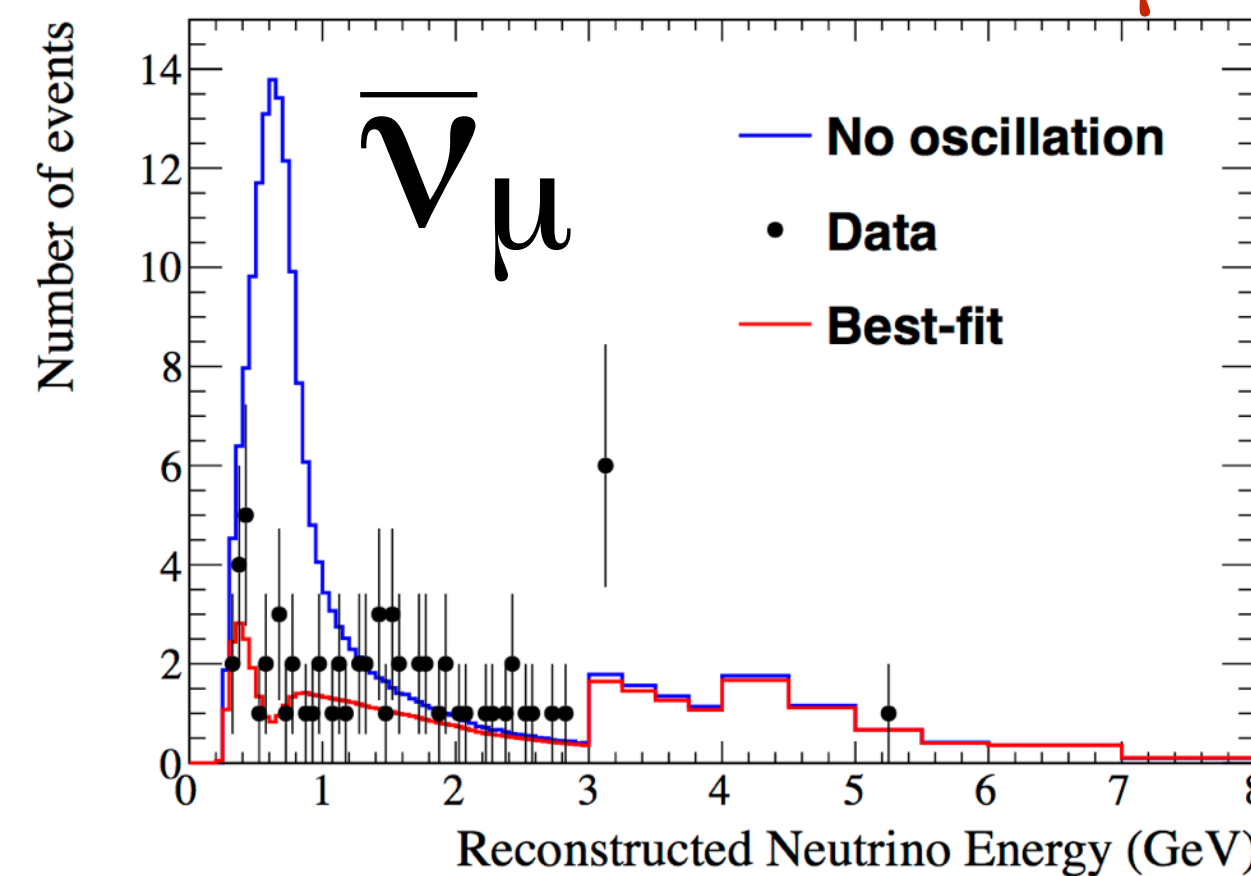
desaparición de  $\nu_\mu$



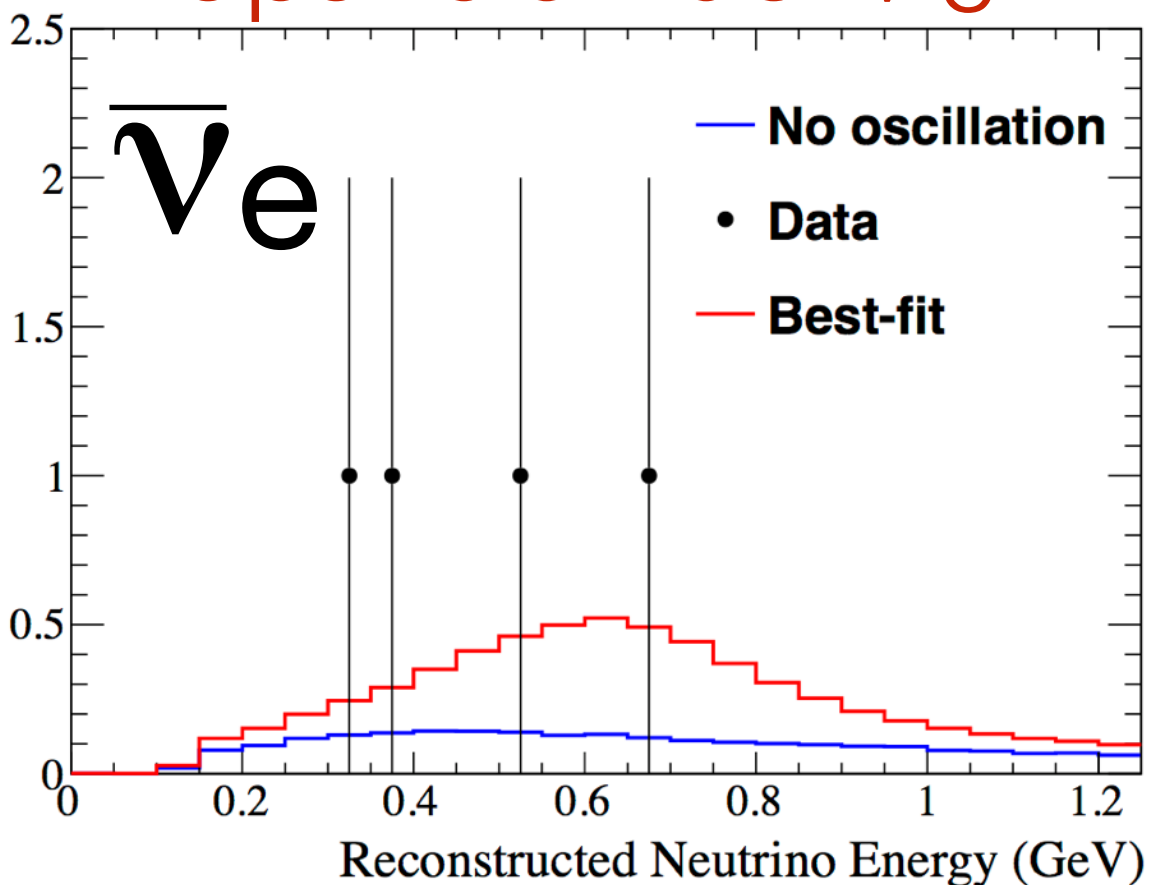
aparición de  $\nu_e$



desaparición de  $\bar{\nu}_\mu$



aparición de  $\bar{\nu}_e$





# ¿ 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

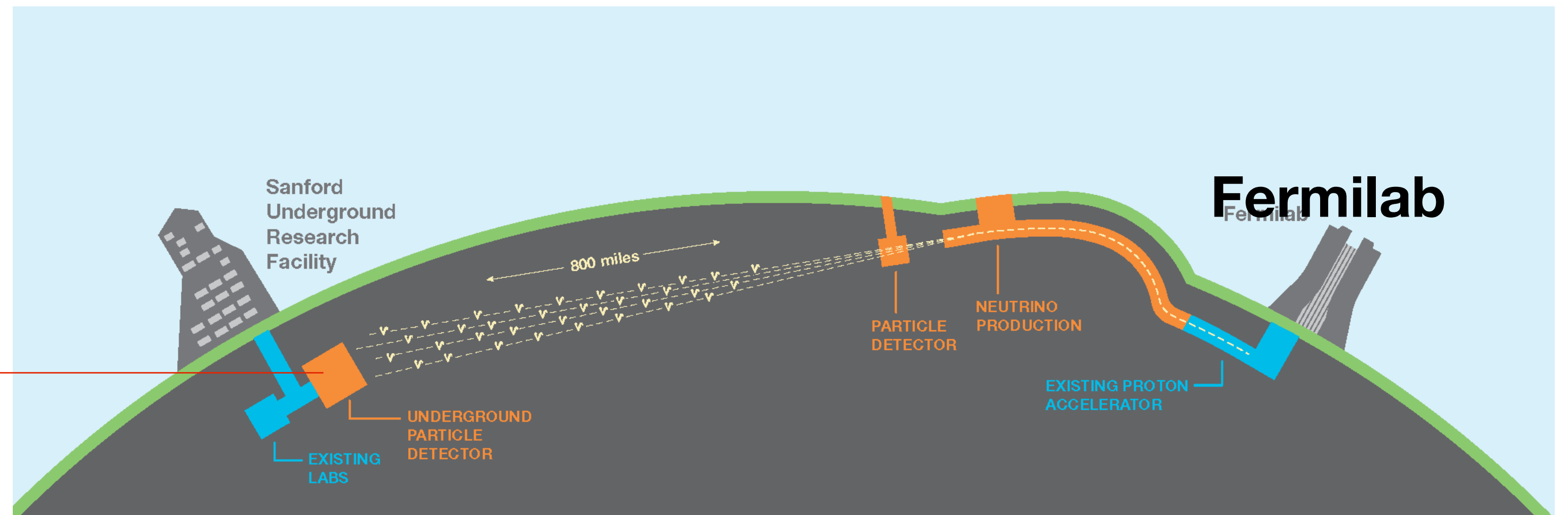
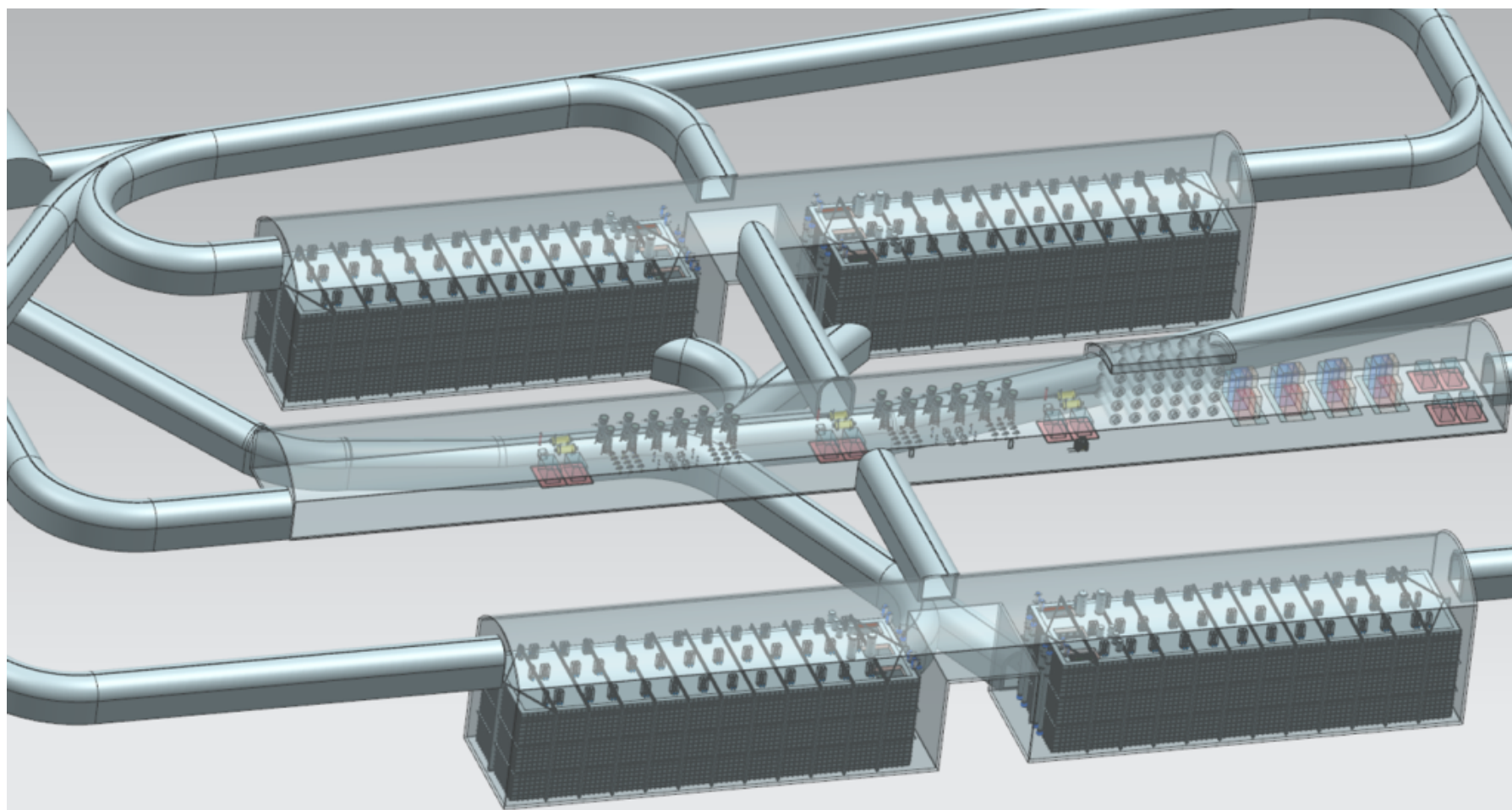
---

- 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

# Deep **U**nderground **N**eutrino **E**xperiment

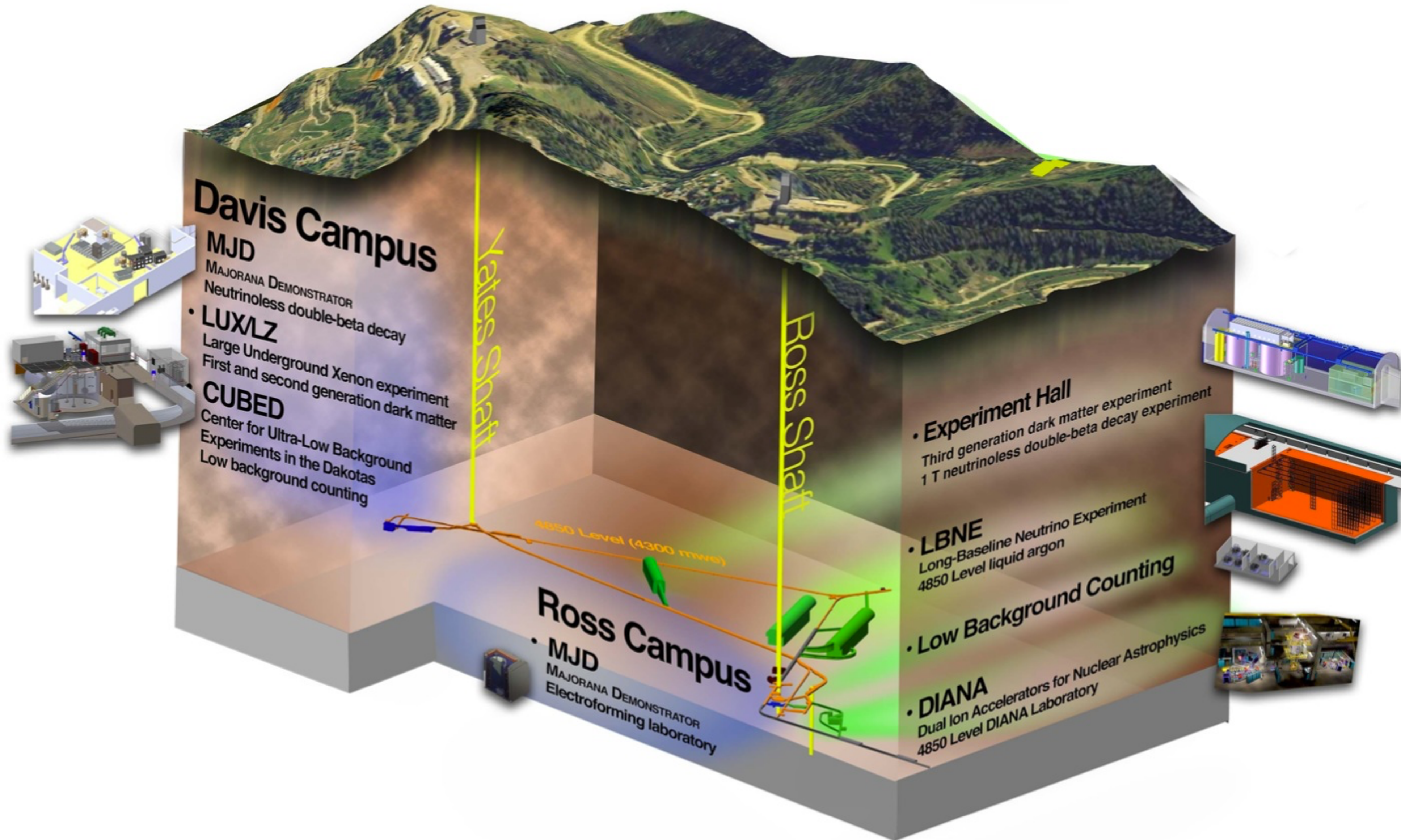


- Una técnica diferente, similar a la de NEXT, pero con Argón líquido en lugar de Xe gas
- 4 TPCs de 10.000 toneladas cada una
  - Similar en masa a Super-Kamiokande pero con una eficiencia de detección mucho mayor





# 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