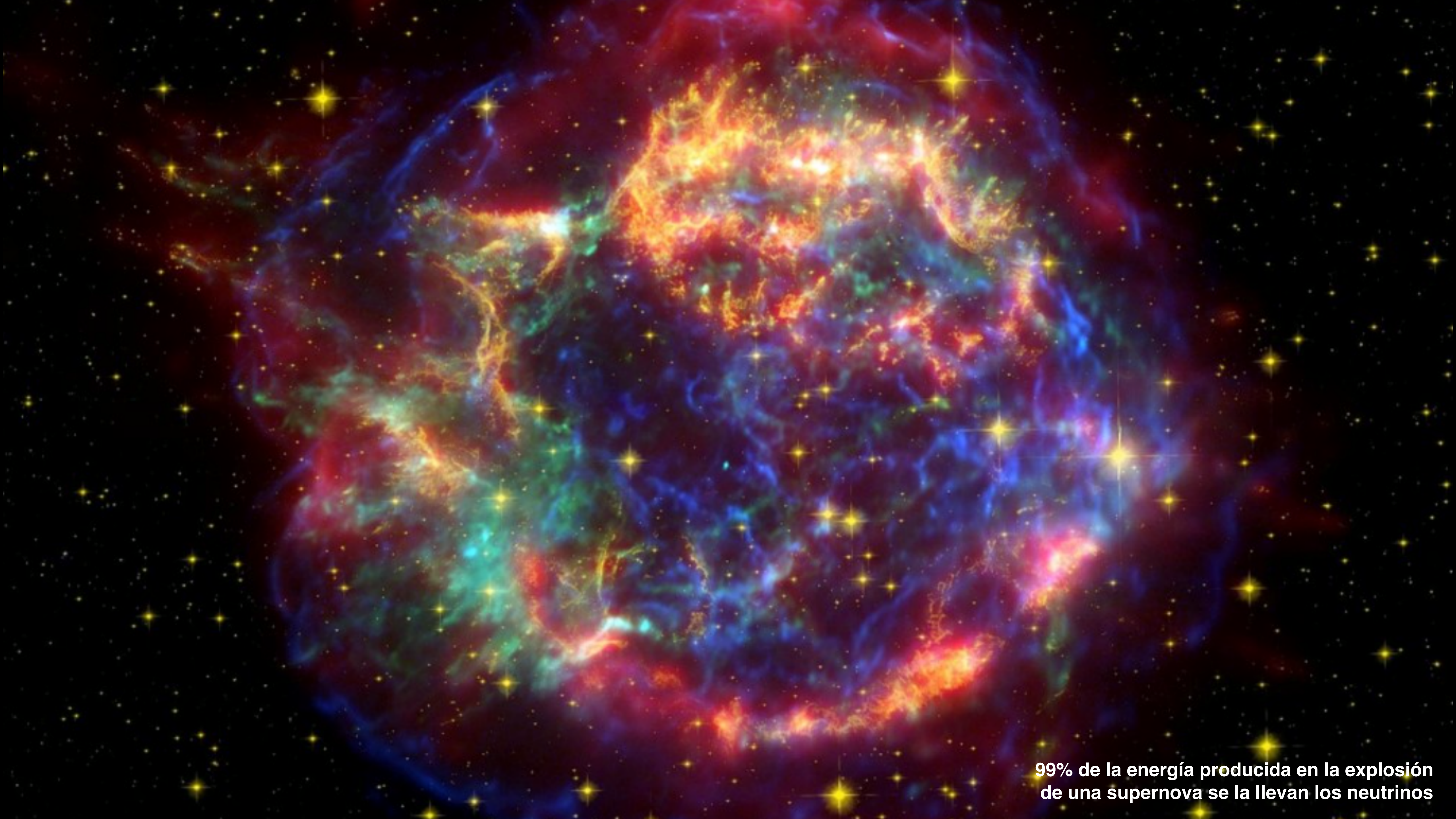




Por cada proton/neutron/electron el Universo
contiene mil millones de neutrinos del Big Bang

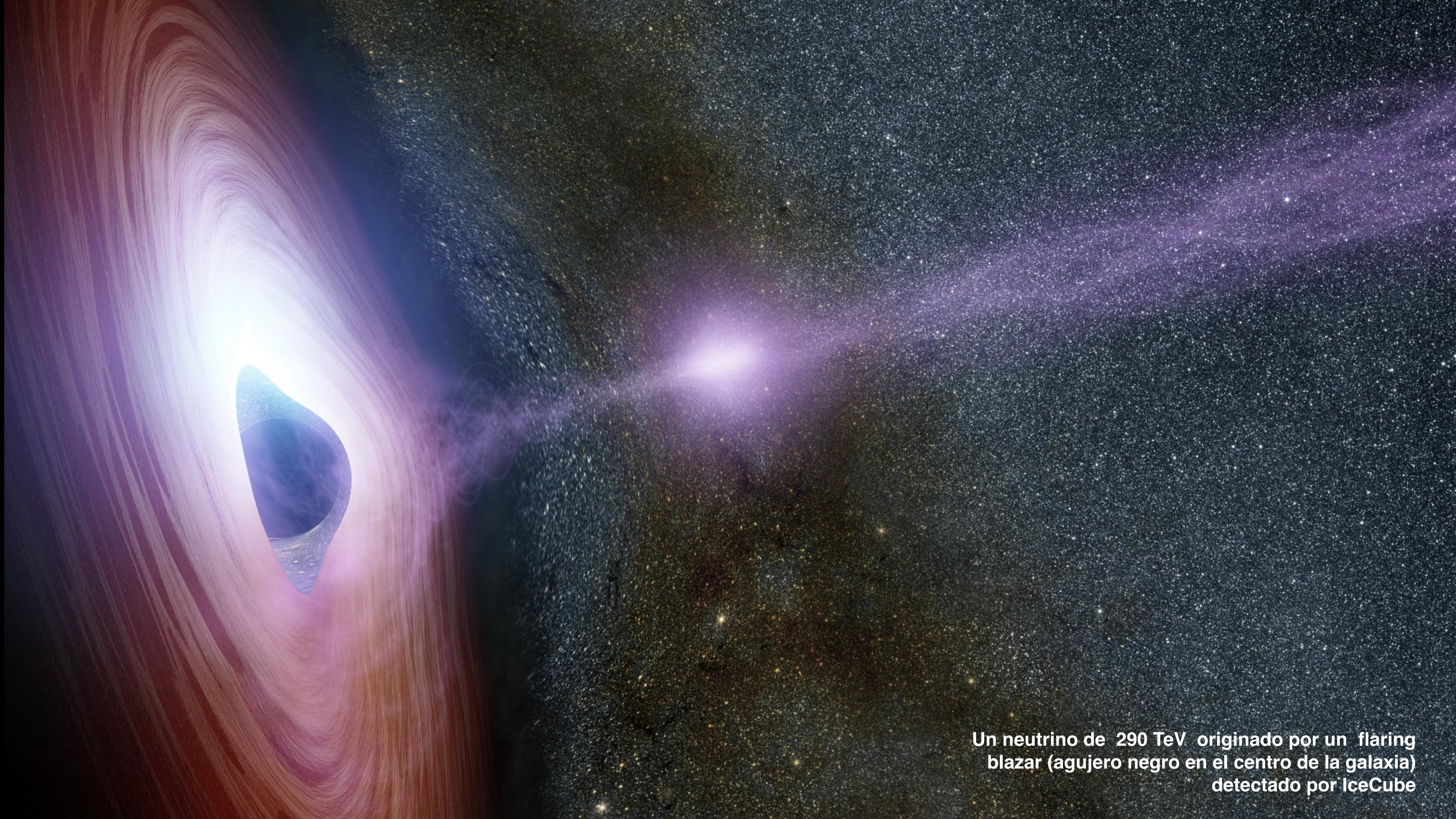


99% de la energía producida en la explosión
de una supernova se la llevan los neutrinos

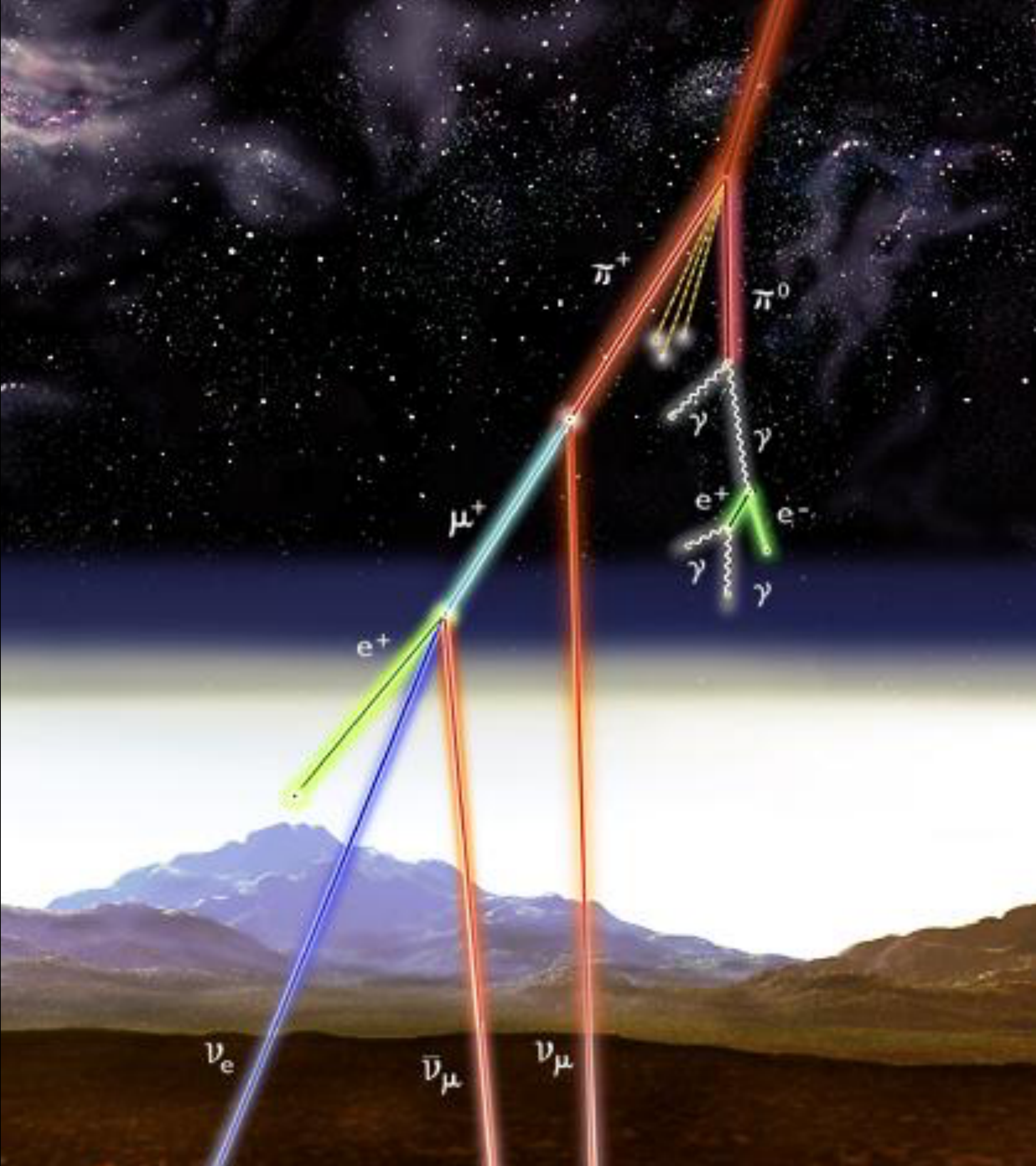


**10^{38} neutrinos por segundo
producidos por el sol**

(con un flujo de $\sim 10^{11}/\text{cm}^2/\text{sec}$ en la Tierra)

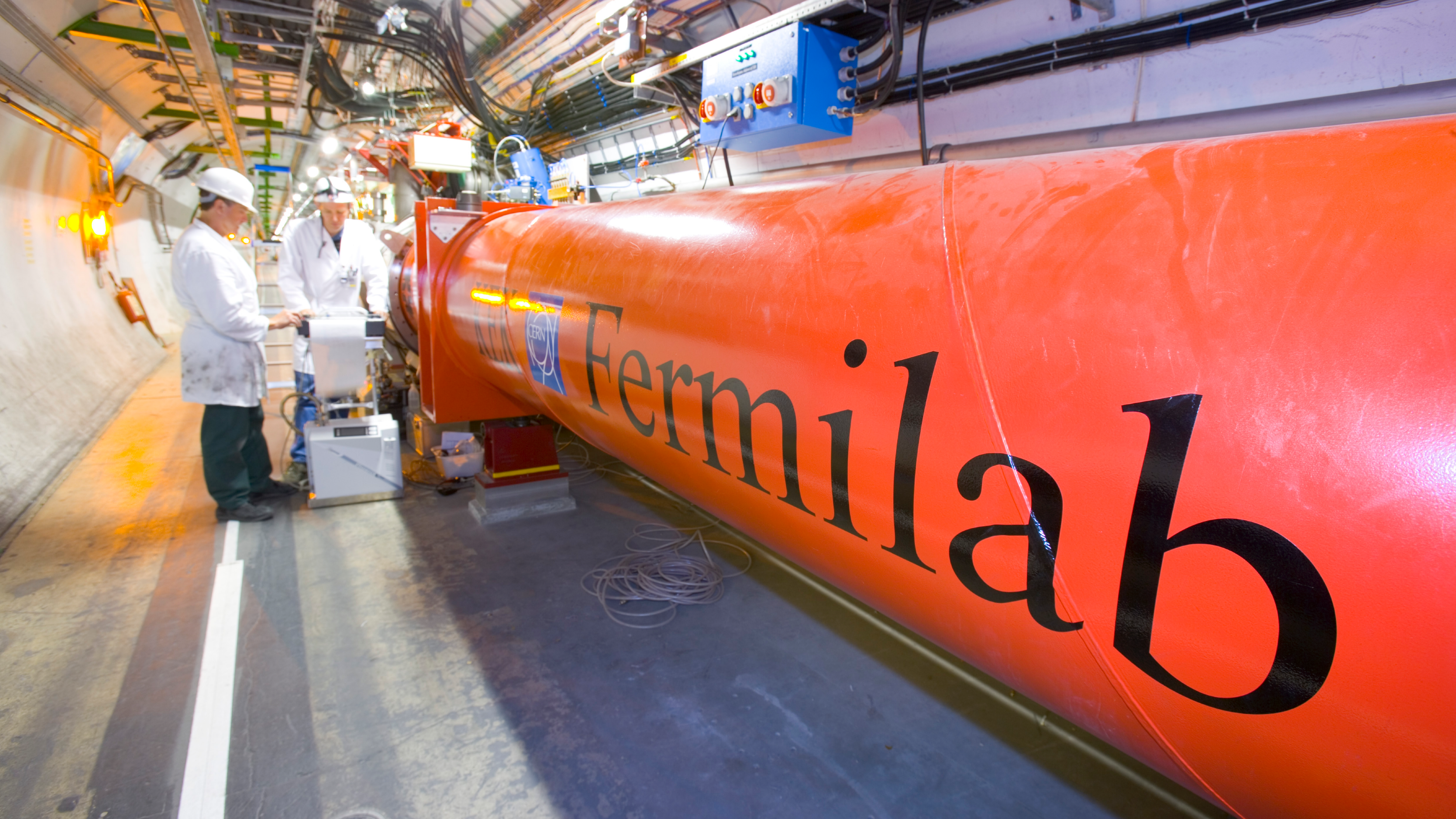


Un neutrino de 290 TeV originado por un flaring
blazar (agujero negro en el centro de la galaxia)
detectado por IceCube



Neutrinos también se producen
en la atmósfera





Fermilab



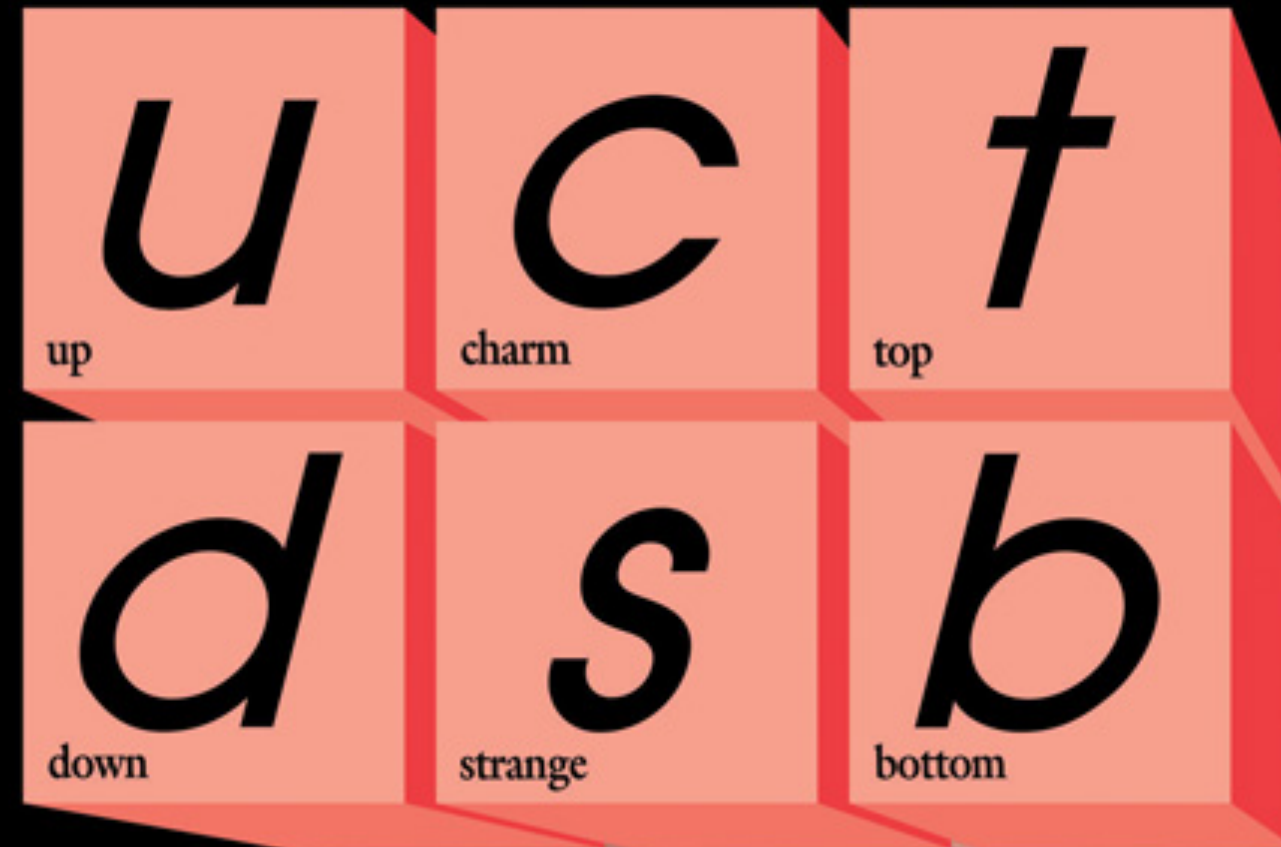
IFIC summer school 2026
16/07/2025



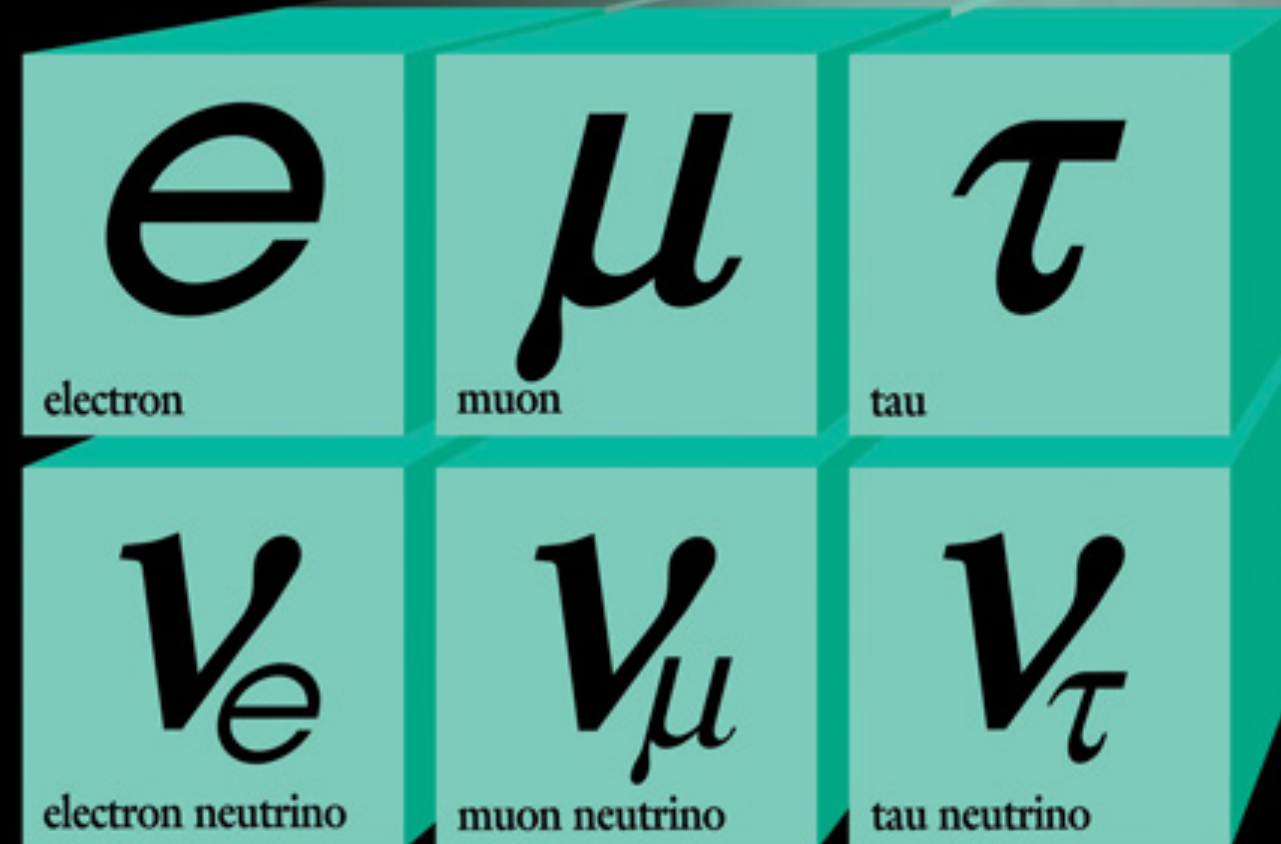
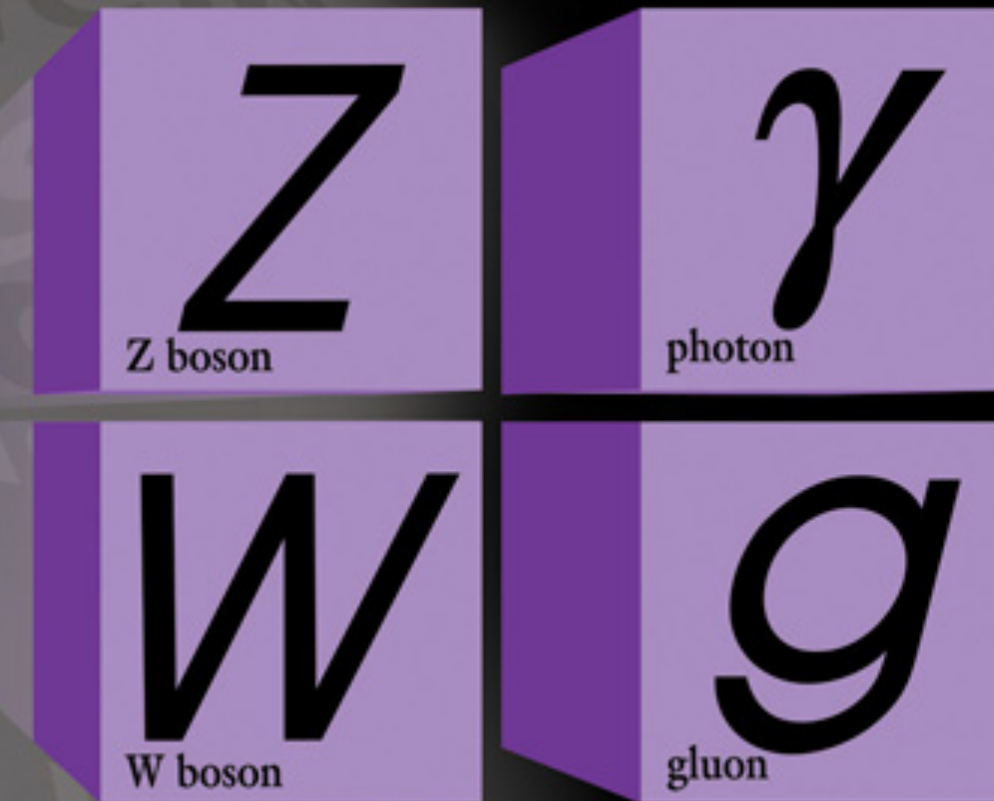
Una historia de neutrinos

Anselmo Cervera Villanueva
IFIC-Valencia

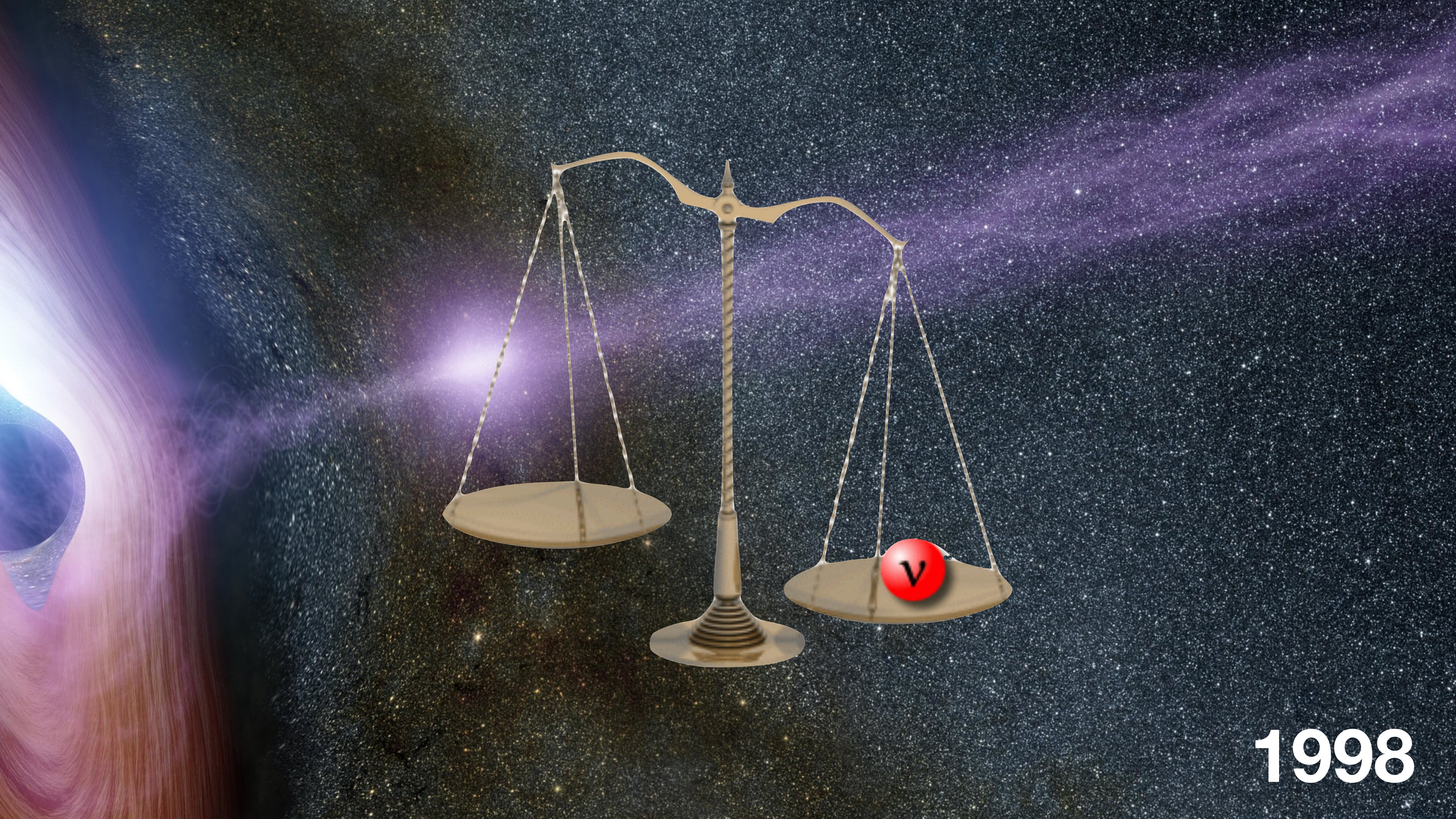
Quarks



Forces

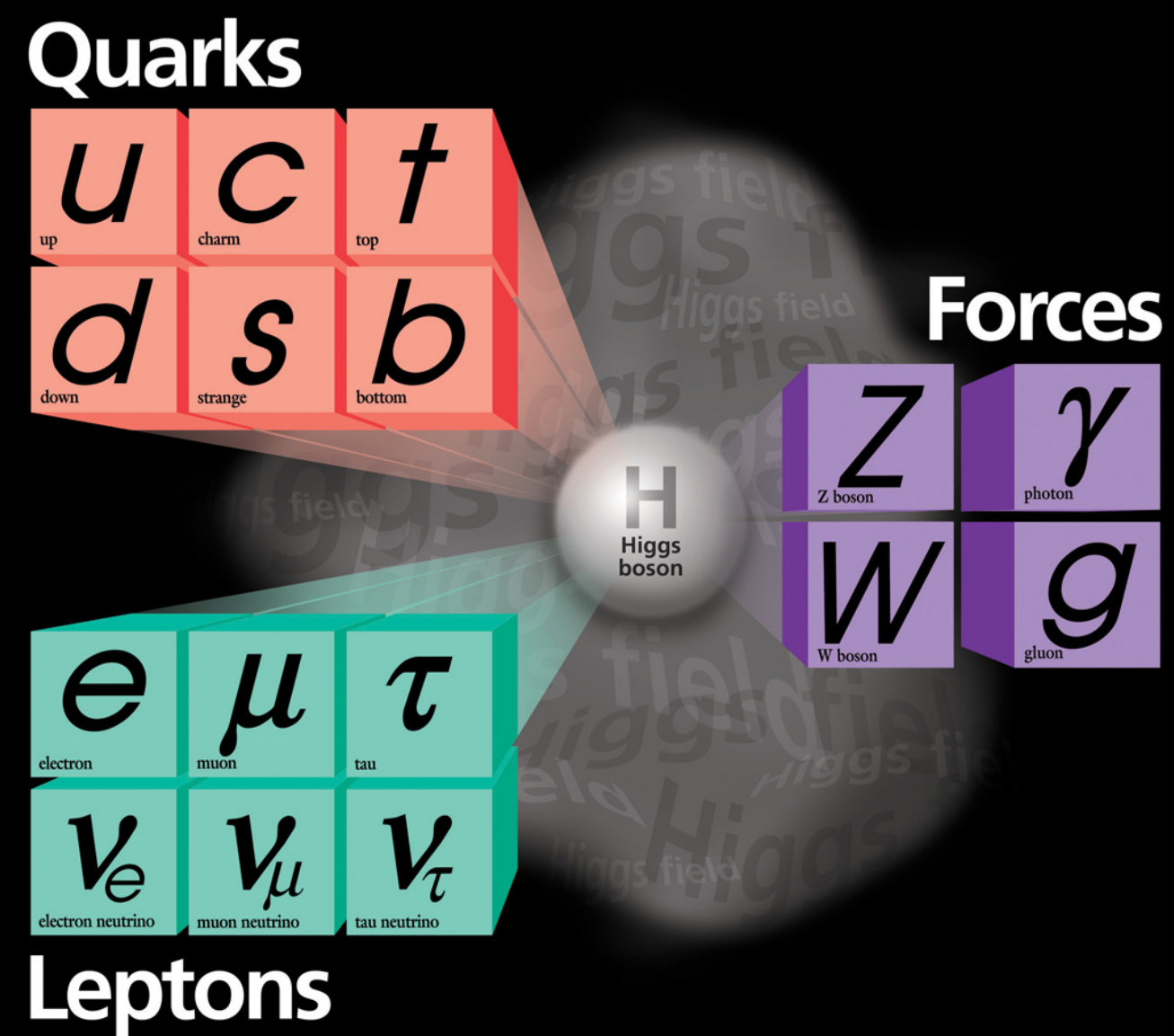


Leptons



1998

Unica prueba de Física más allá del Modelo Stándard

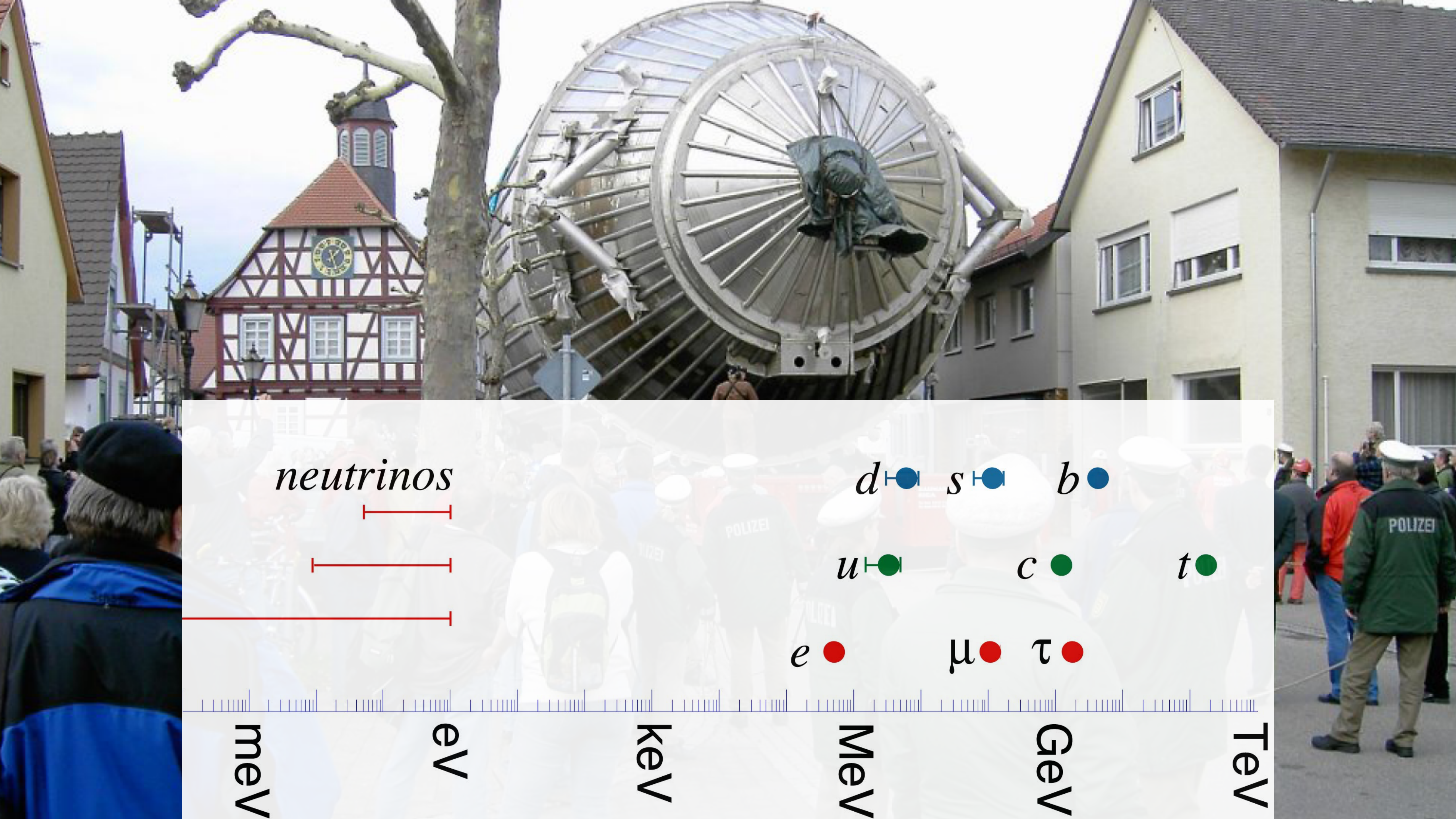


1973

+



1998



neutrinos

d s b

u c t

e μ τ

meV

eV

keV

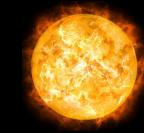
MeV

GeV

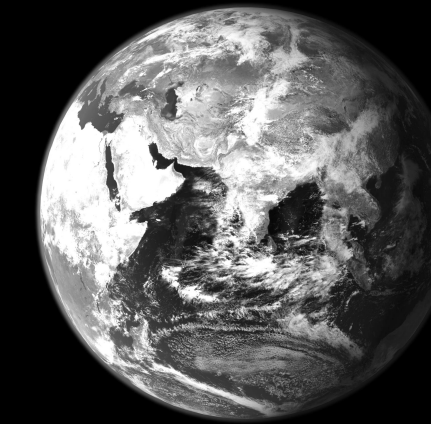
TeV



Hace 13000 millones de años el Big Bang produjo iguales cantidades de materia y antimateria



Hace 13000 millones de años el Big Bang produjo iguales cantidades de materia y antimateria



Hace 13000 millones de años el Big Bang produjo iguales cantidades de materia y antimateria



Pero por alguna razón la anti-materia fue aniquilada. Por qué ?

Hace 13000 millones de años el Big Bang produjo iguales cantidades de materia y antimateria



Pero por alguna razón la anti-materia fue aniquilada. Por qué ?

Los neutrinos podrían tener la respuesta: **violación de CP**

¿Cuál es la masa absoluta de los neutrinos ?

¿Cuál es la masa absoluta de los neutrinos ?

¿Violan los neutrinos la simetría CP ?

¿Cuál es la masa absoluta de los neutrinos ?

¿Violan los neutrinos la simetría CP ?

**¿Hay mas de tres neutrinos ?
neutrinos estériles**

¿Cuál es la masa absoluta de los neutrinos ?

¿ Violan los neutrinos la simetría CP ?

**¿ Hay mas de tres neutrinos ?
neutrinos estériles**

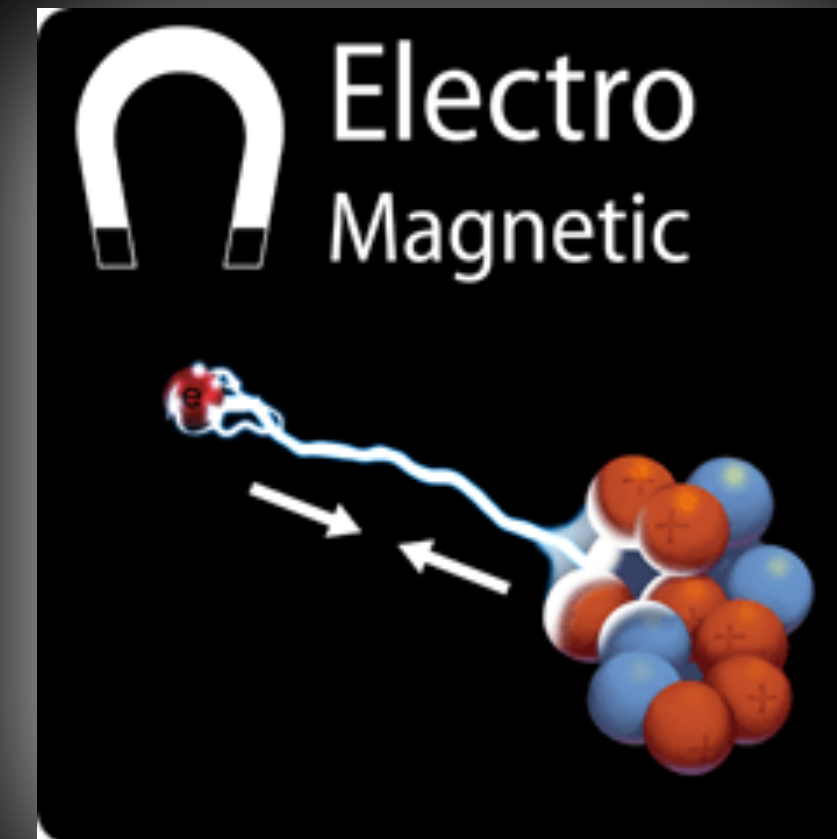
**¿ Es el neutrino su propia antipartícula ?
Dirac o Majorana**

Detectar neutrinos no es fácil

Gravedad



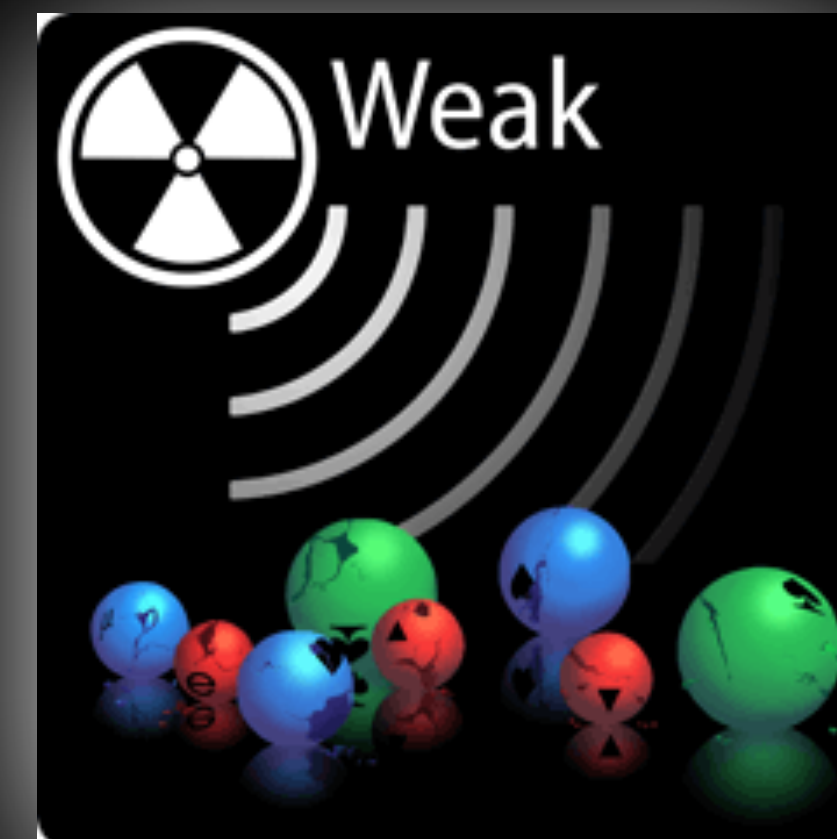
Electro-
magnetismo



Fuerza nuclear
fuerte



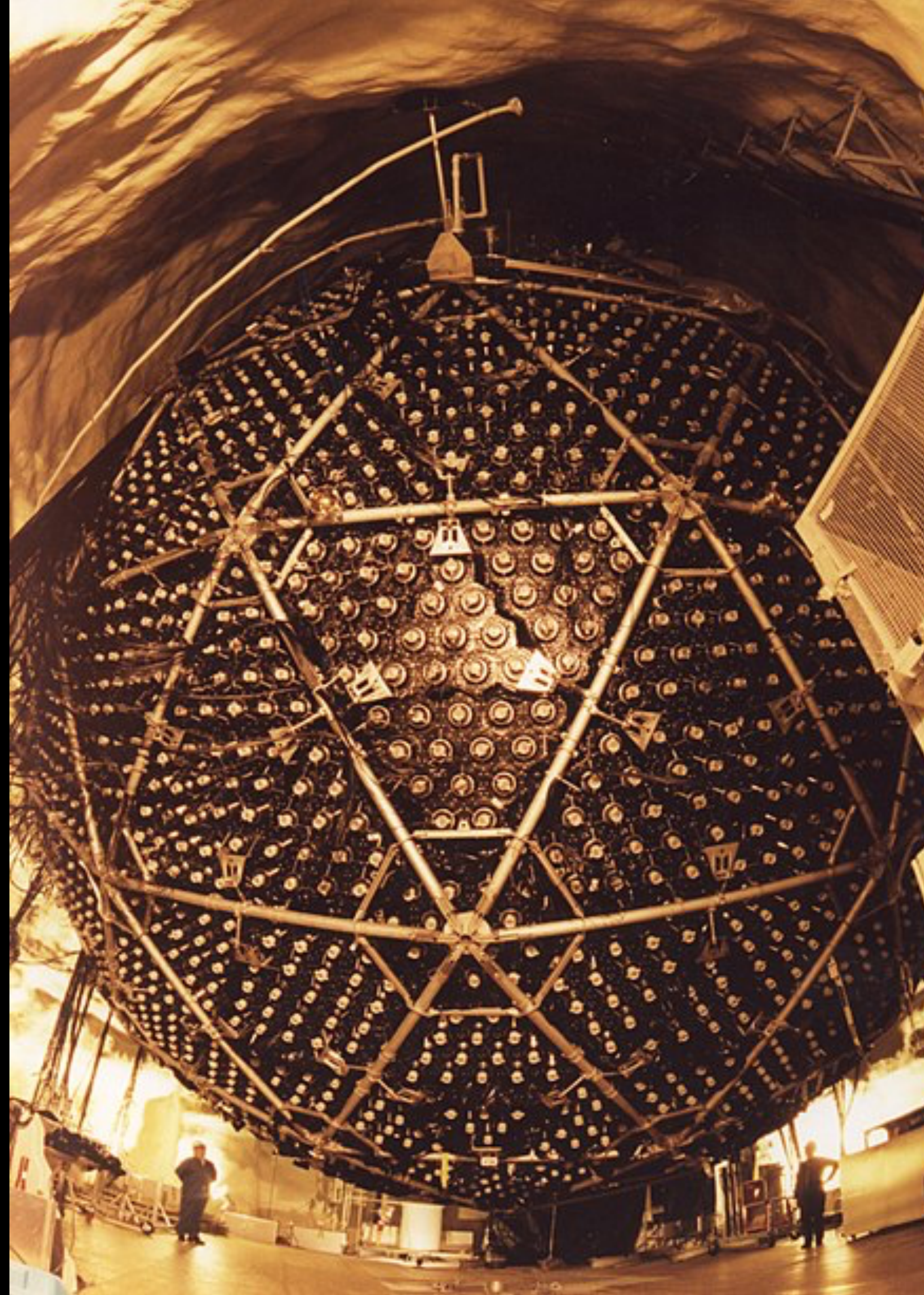
Fuerza nuclear **débil**



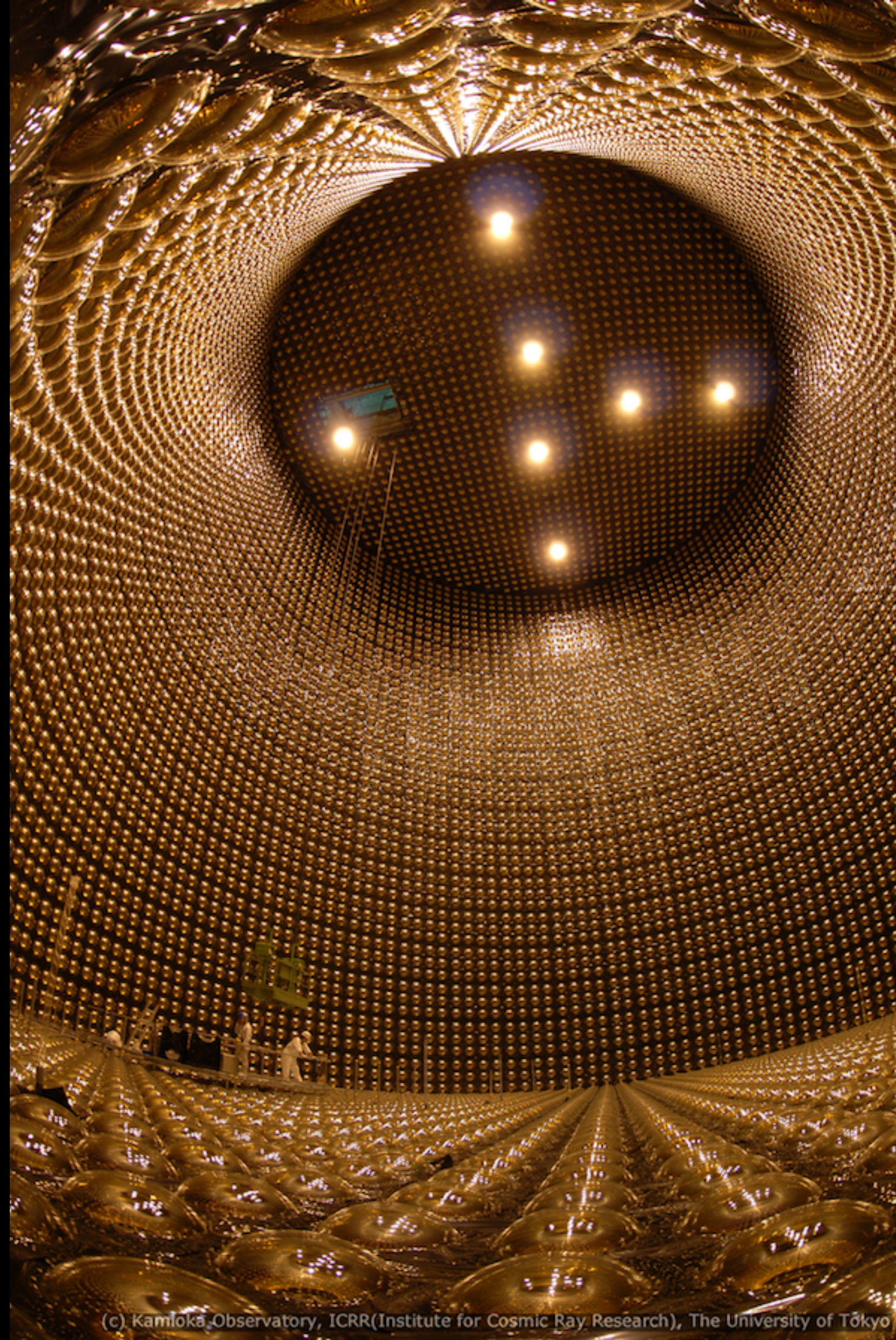
La timidez de los neutrinos

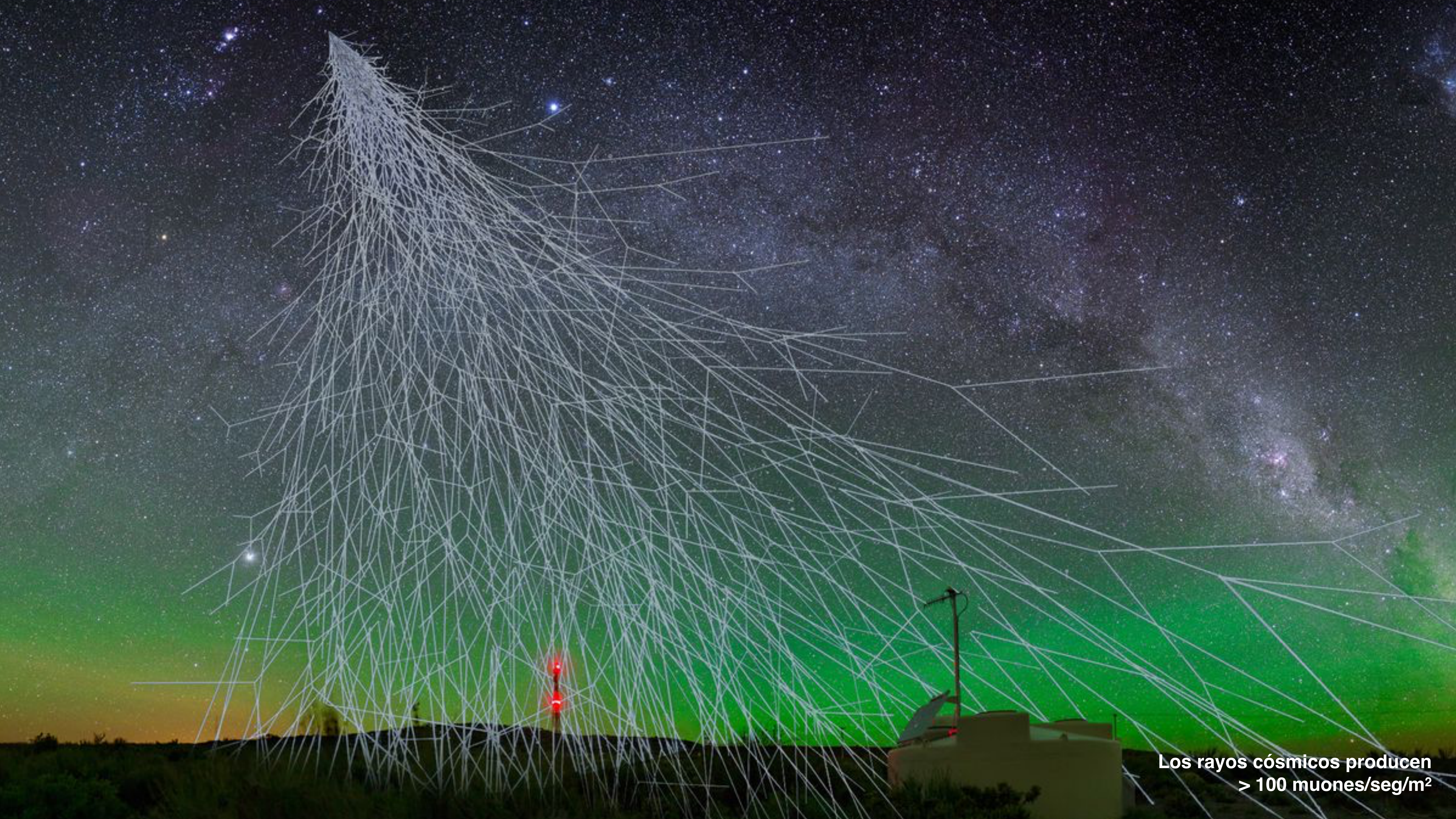
- Los neutrinos son muy tímidos y no interaccionan con nada ni con nadie
- Un neutrino solar tiene que cruzarse con 10,000,000,000,000,000,000,000 personas antes de interaccionar
- Por ello no fueron **descubiertos hasta 1956**, pese a ser las partículas más abundantes después del fotón (las partículas de luz)





**Super-Kamiokande
(Japón)**





Los rayos cósmicos producen
> 100 muones/seg/m²



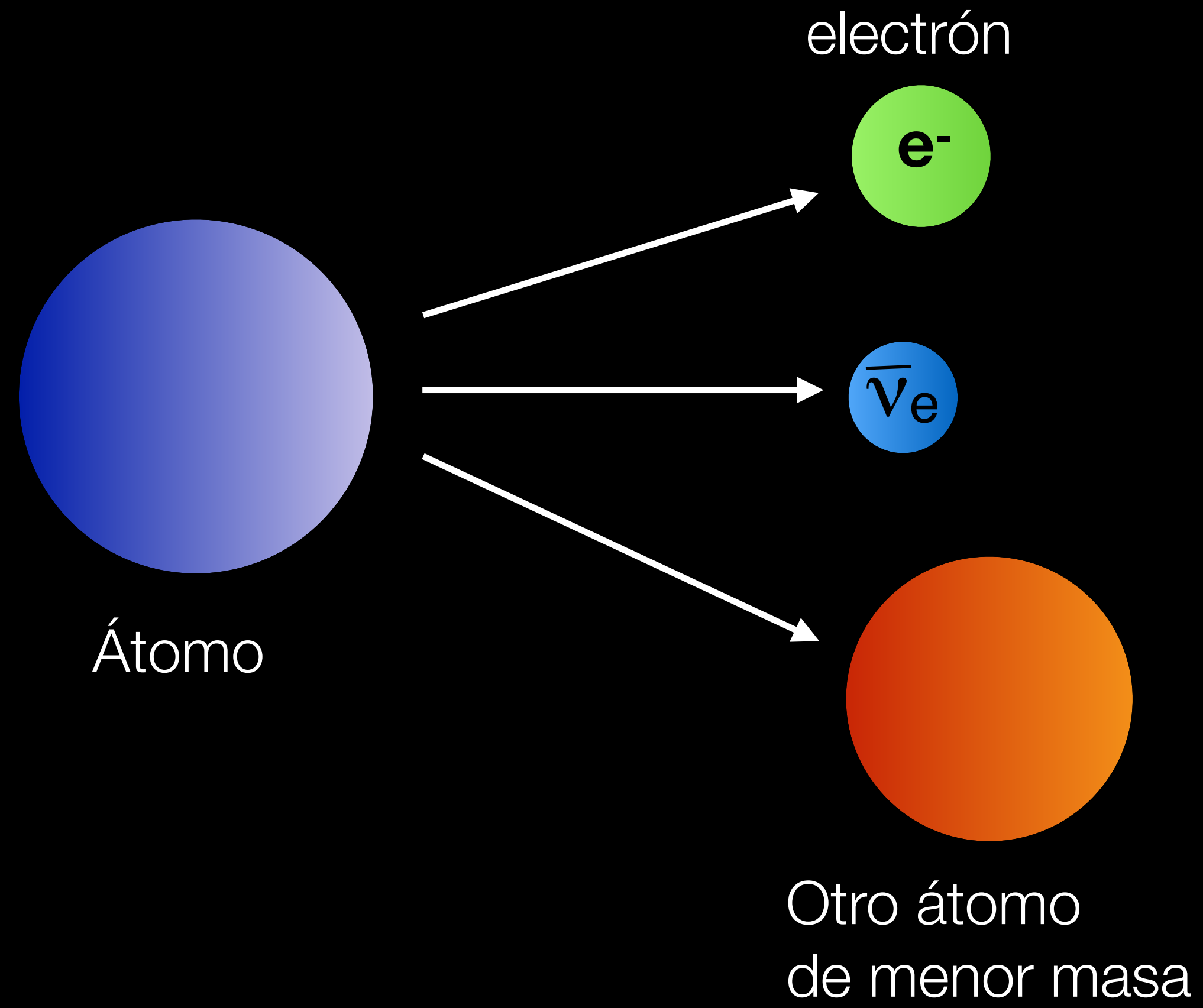
La mayoría de detectores de neutrinos se sitúan a gran profundidad bajo tierra para evitar los rayos cósmicos

reducción de 10^{-6} para DUNE, 1.5 km bajo tierra

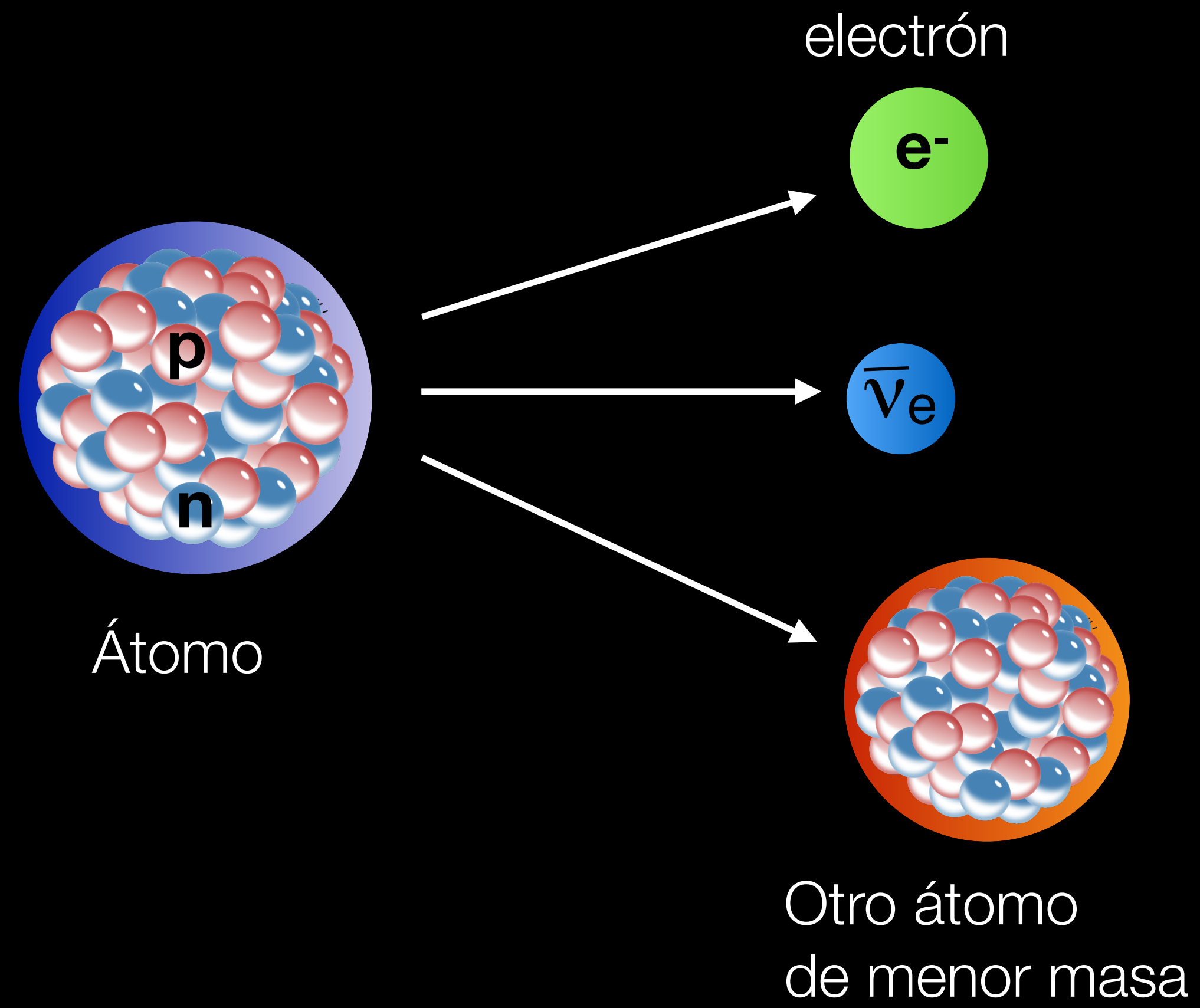
¿ Como se producen los neutrinos ?

desintegración Beta

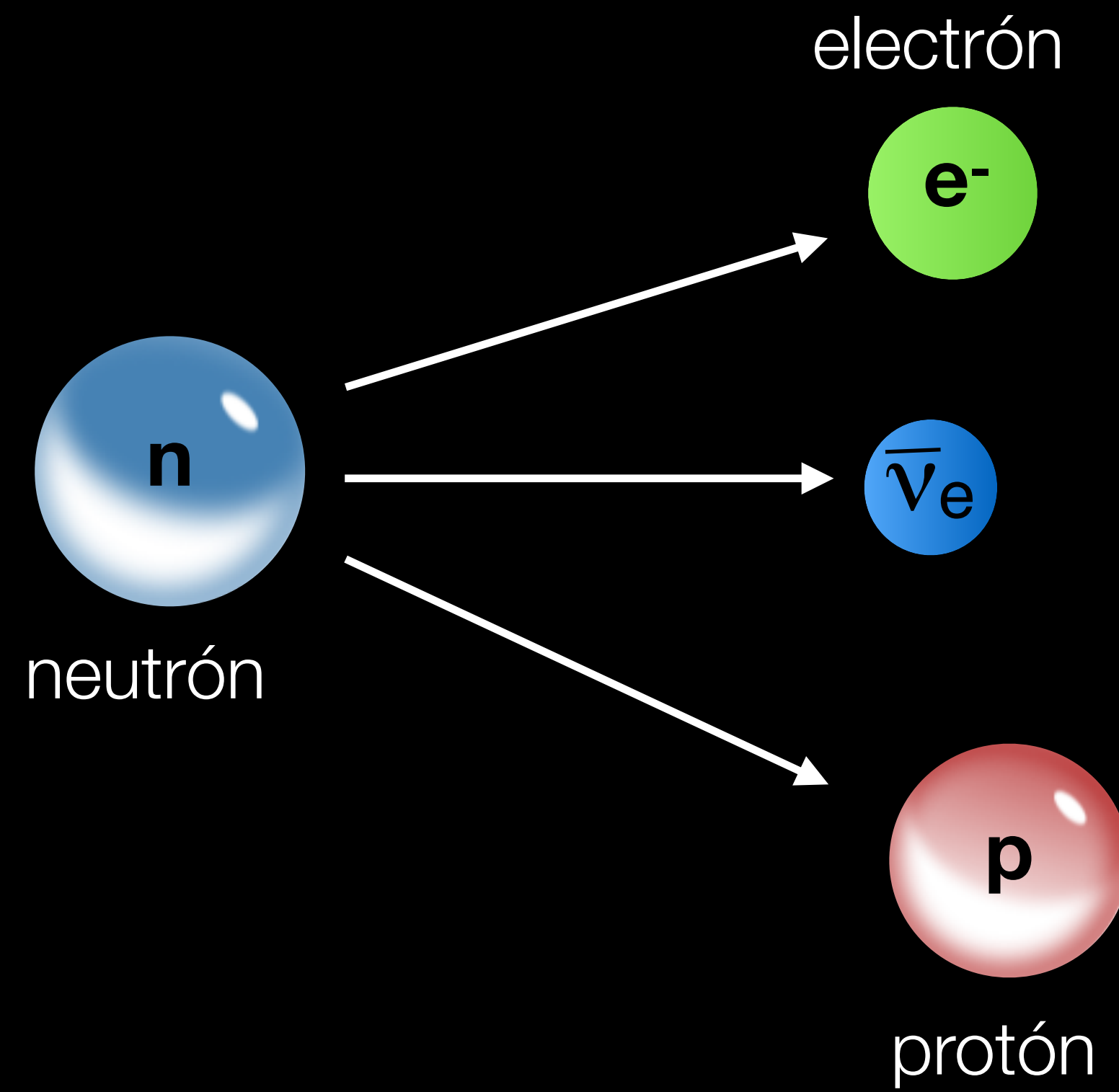
(en el siglo XXI)



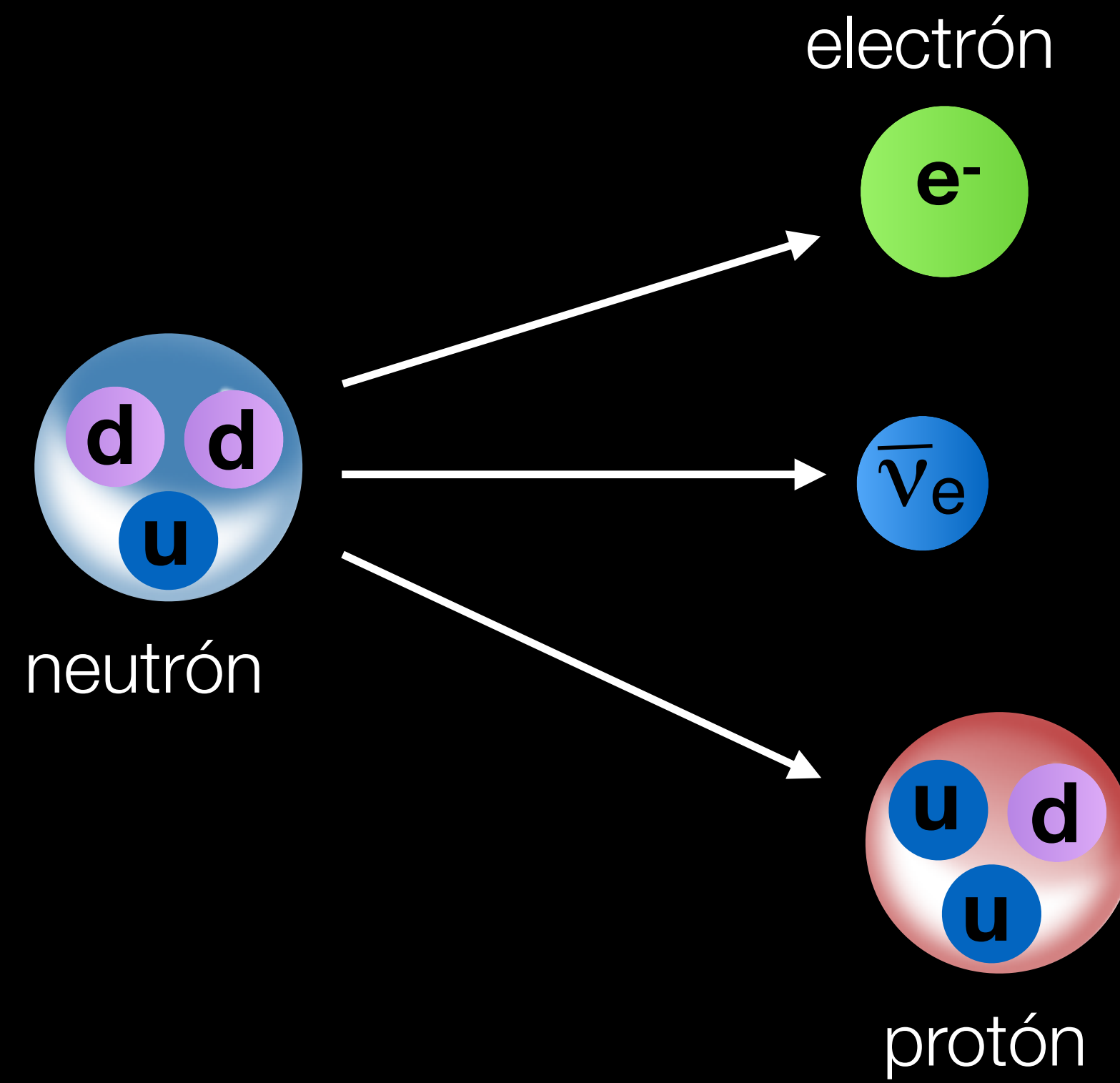
dentro del núcleo
atómico



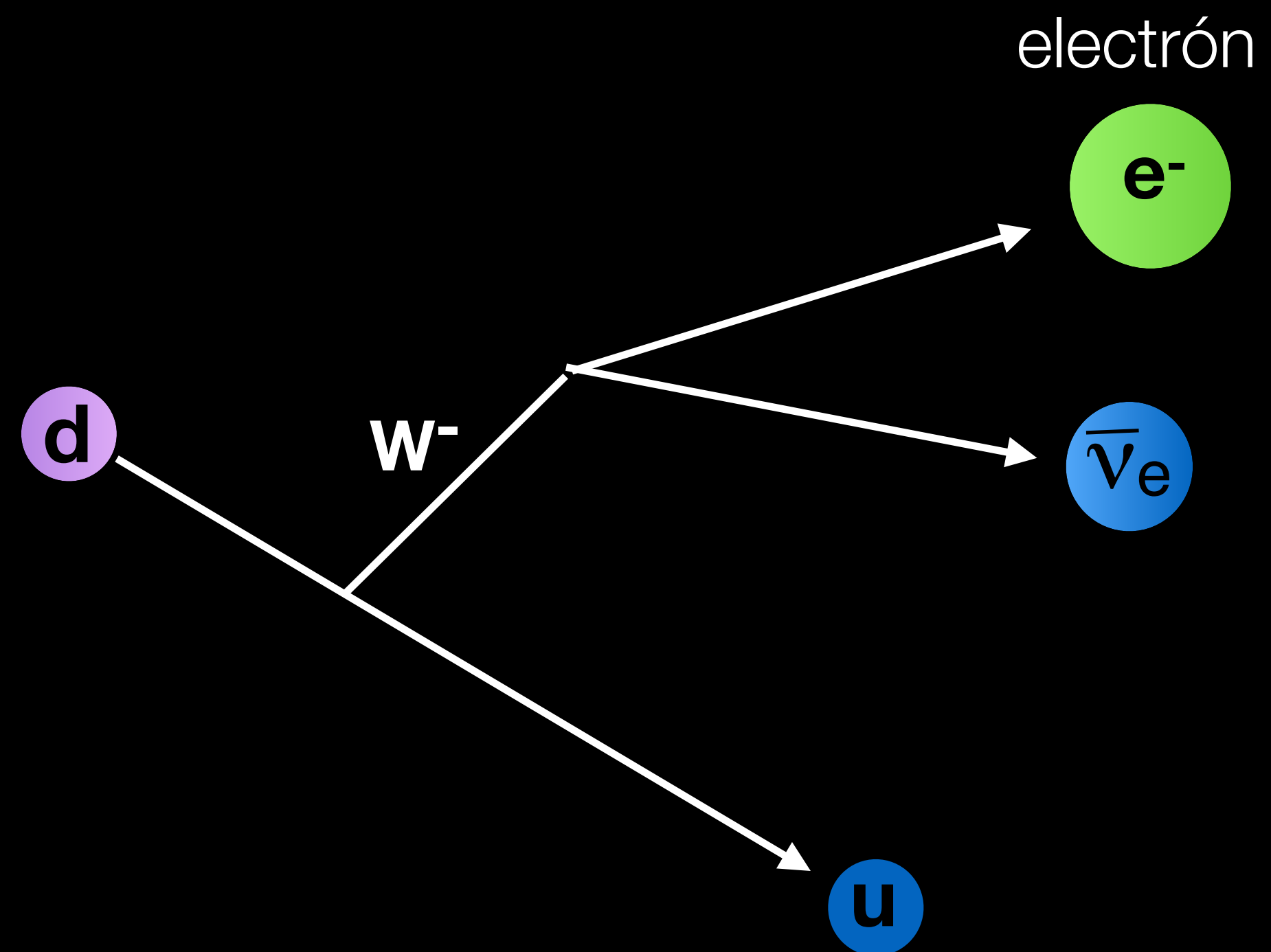
los nucleones protones y neutrones



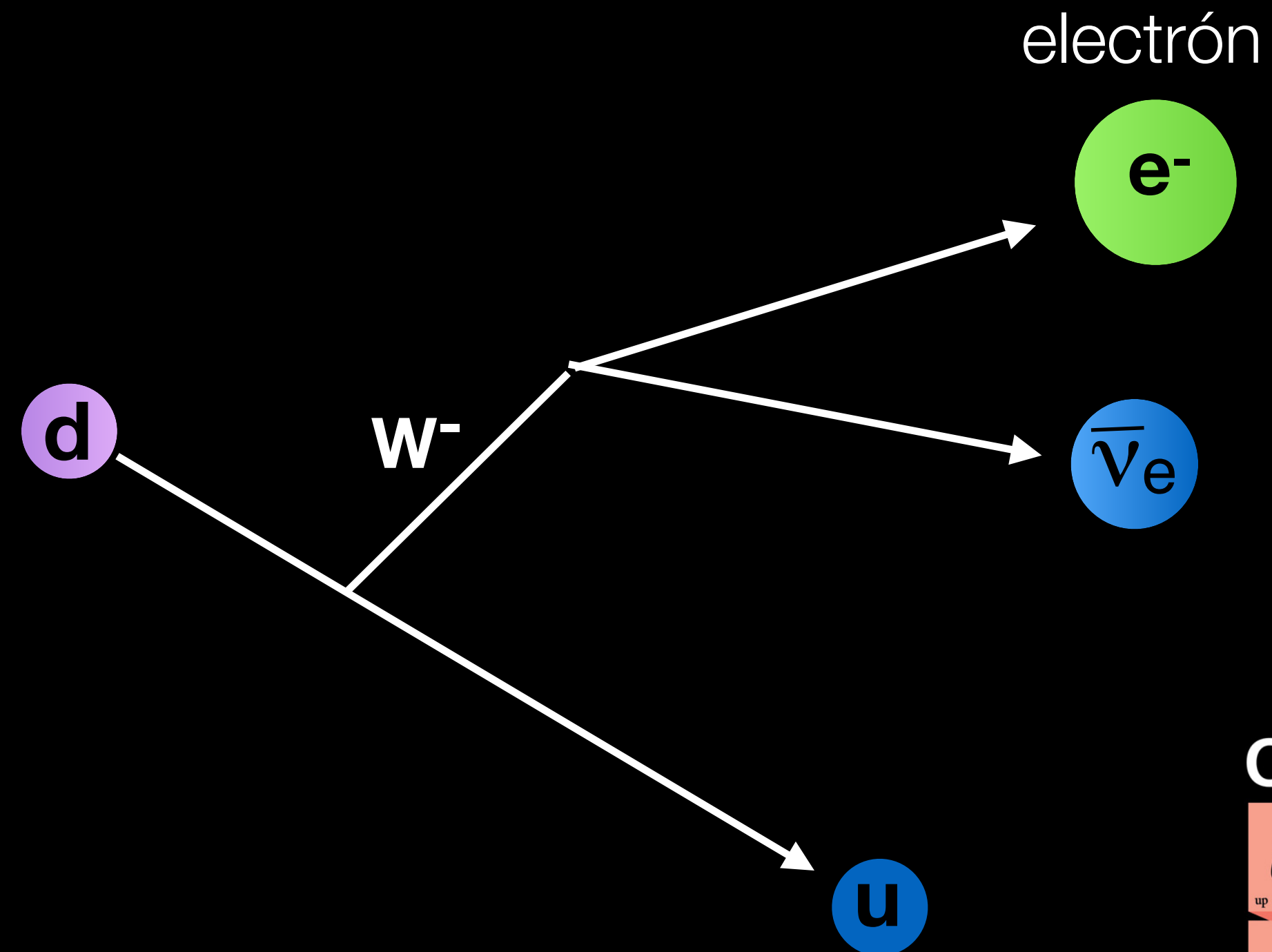
dentro de los nucleones



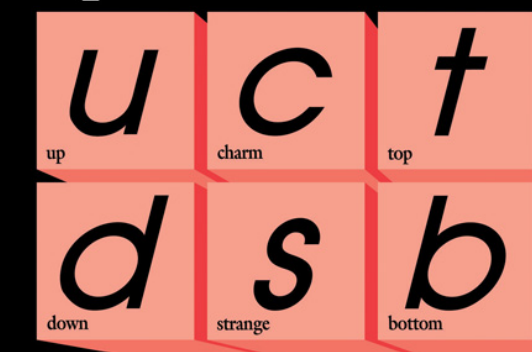
lo que en realidad ocurre



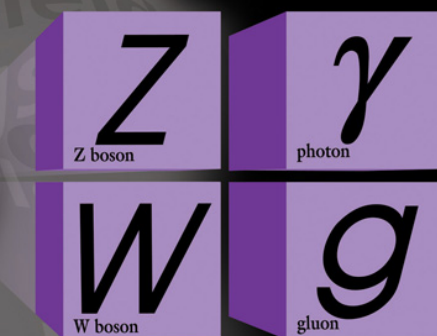
lo que en realidad ocurre



Quarks

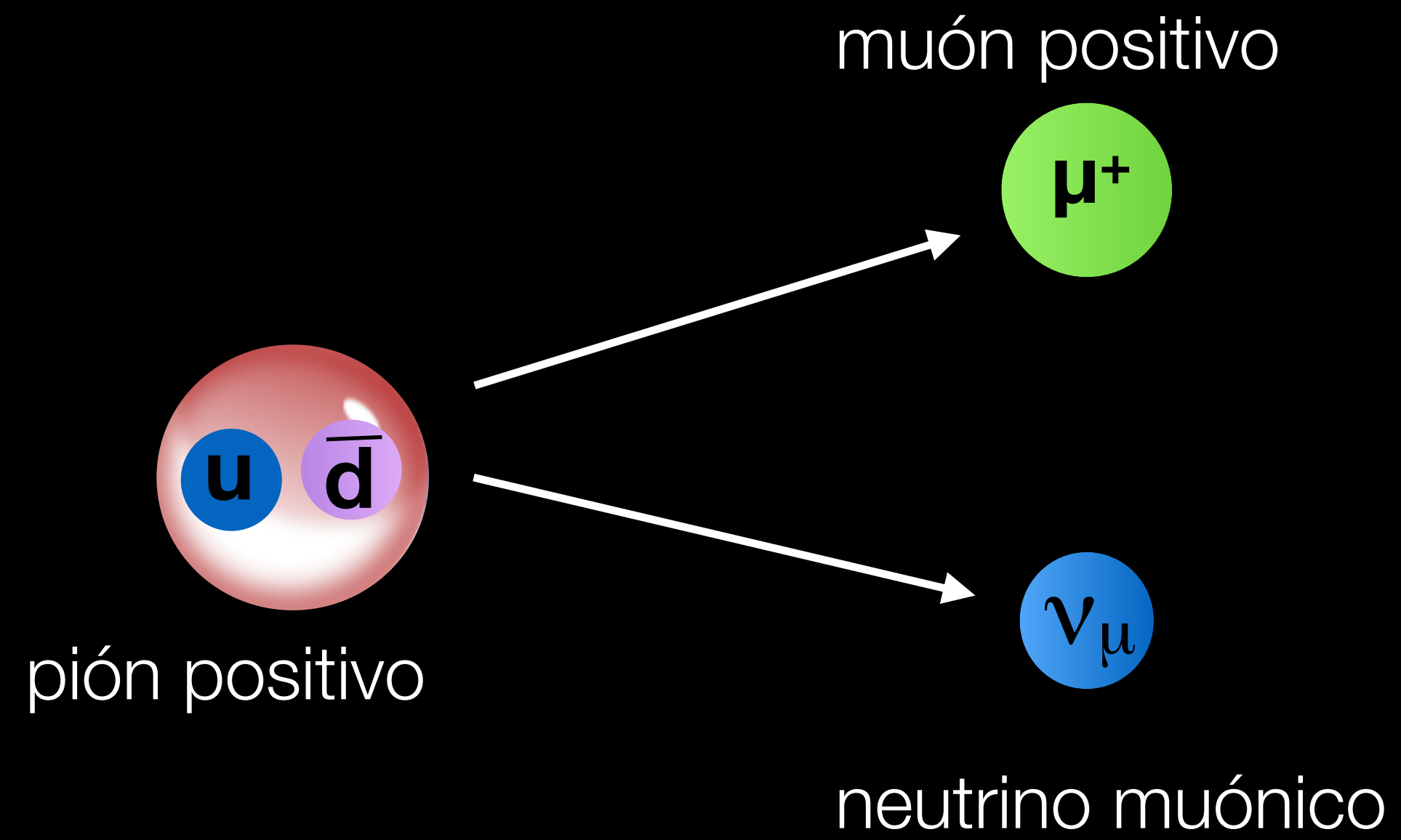


Forces

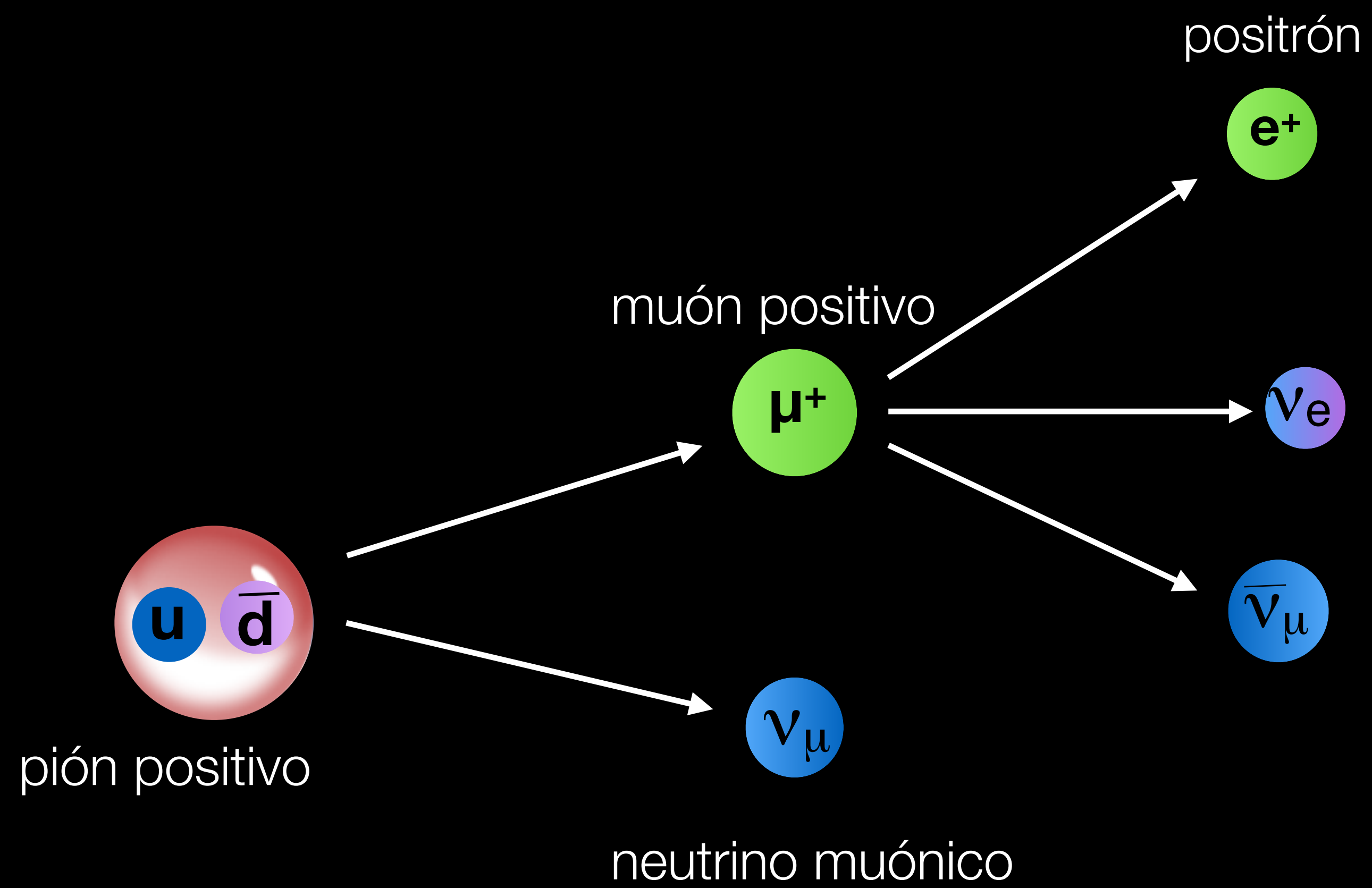


Otra forma de producir neutrinos

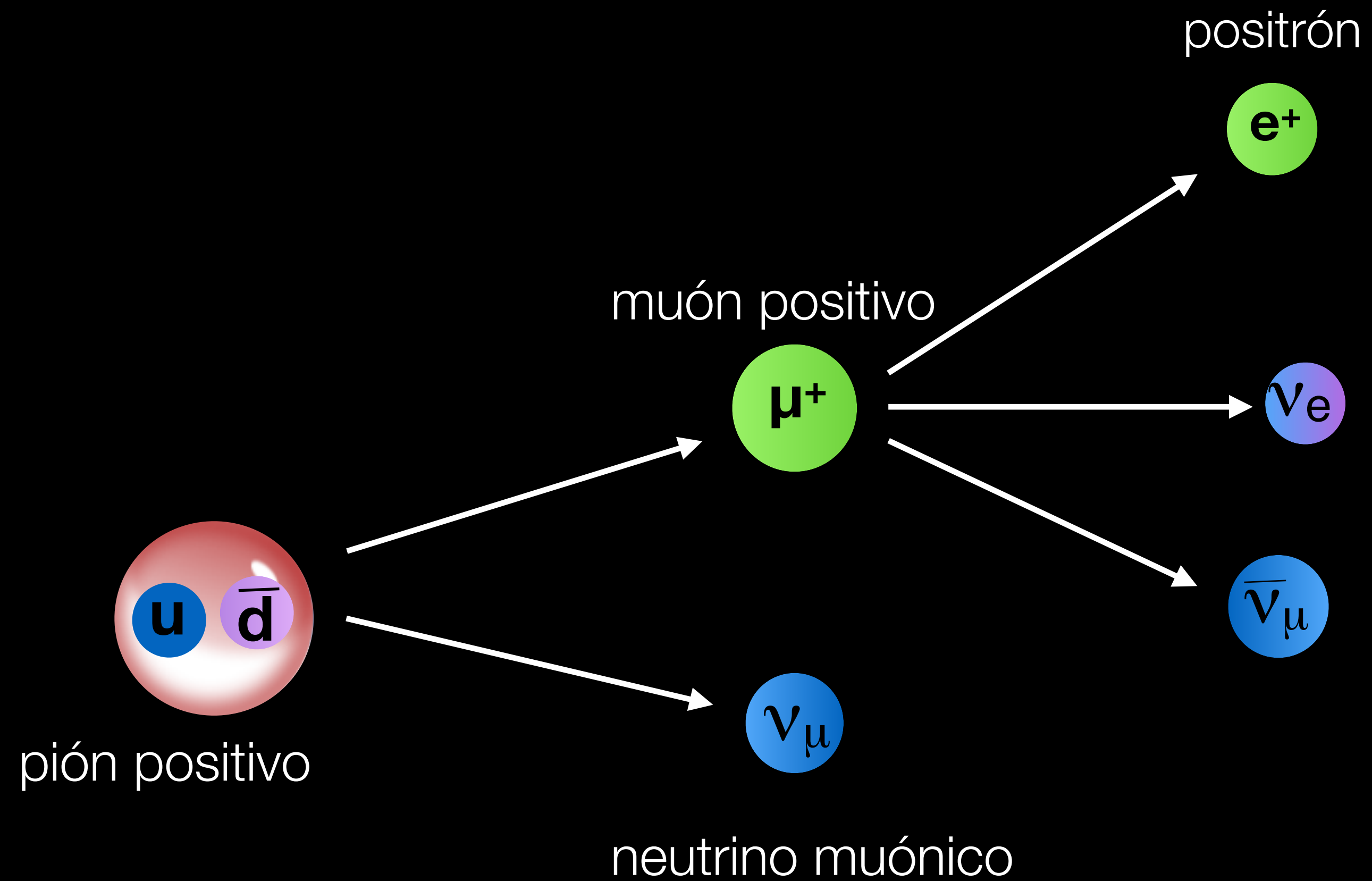
La desintegración del pión



La desintegración del muón



La desintegración del muón



En la desintegración de un pión finalmente se producen dos neutrinos muónicos y uno electrónico

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

¿ Como se detectan los neutrinos ?

No se pueden detectar

ν_μ CC inclusive

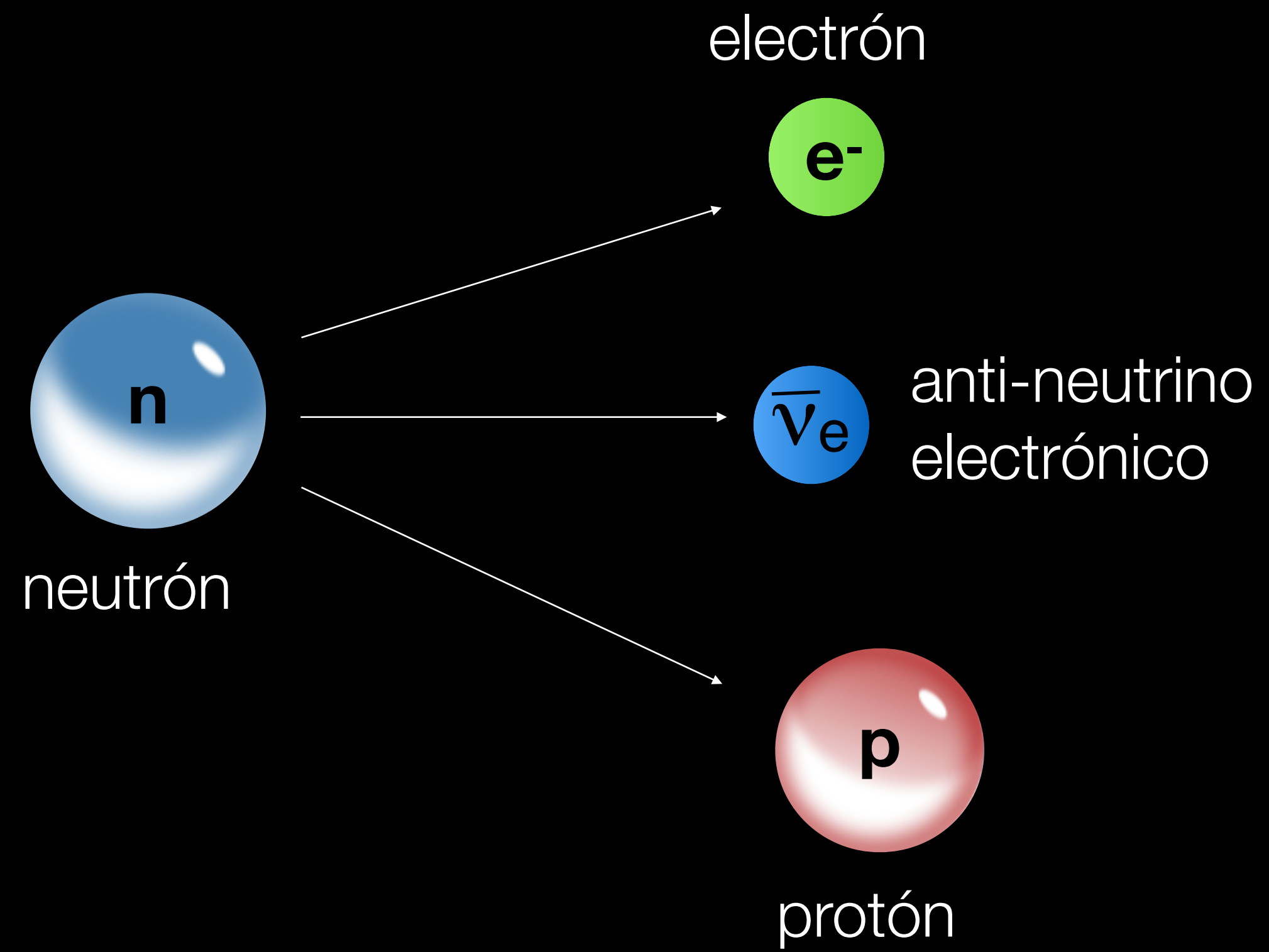


MICROBOONE-NOTE-1010-PUB

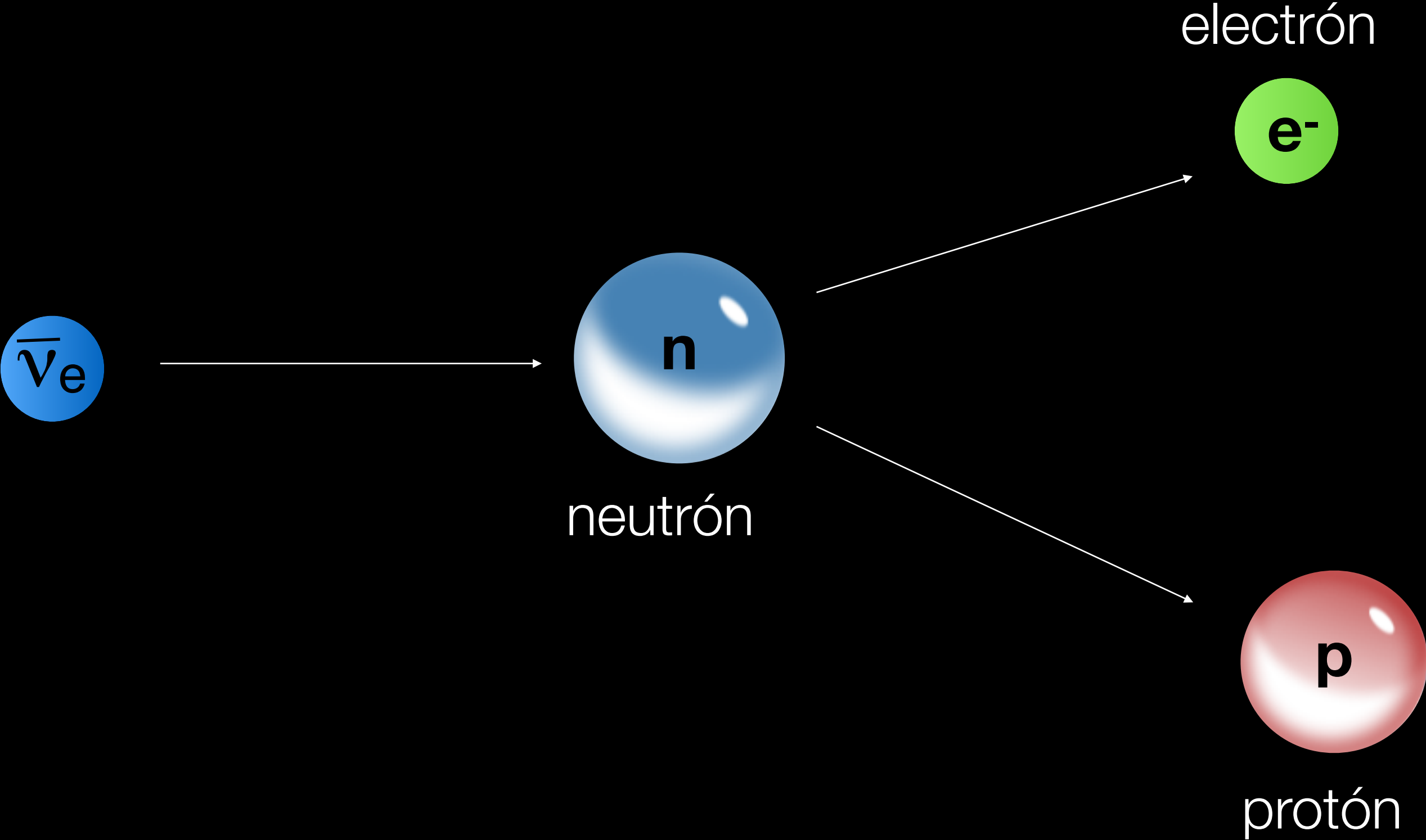
18 cm

Run 5326 Event 900, March 6th, 2016

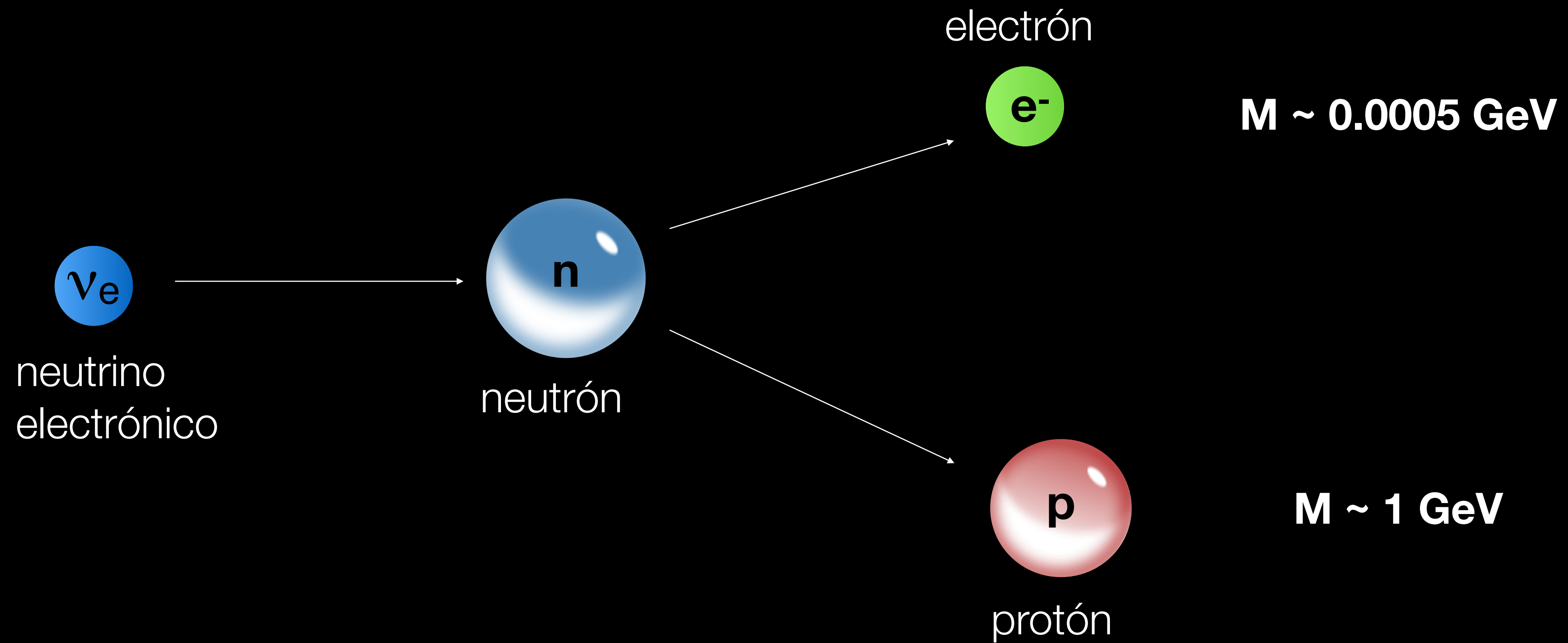
desintegración Beta



desintegración Beta

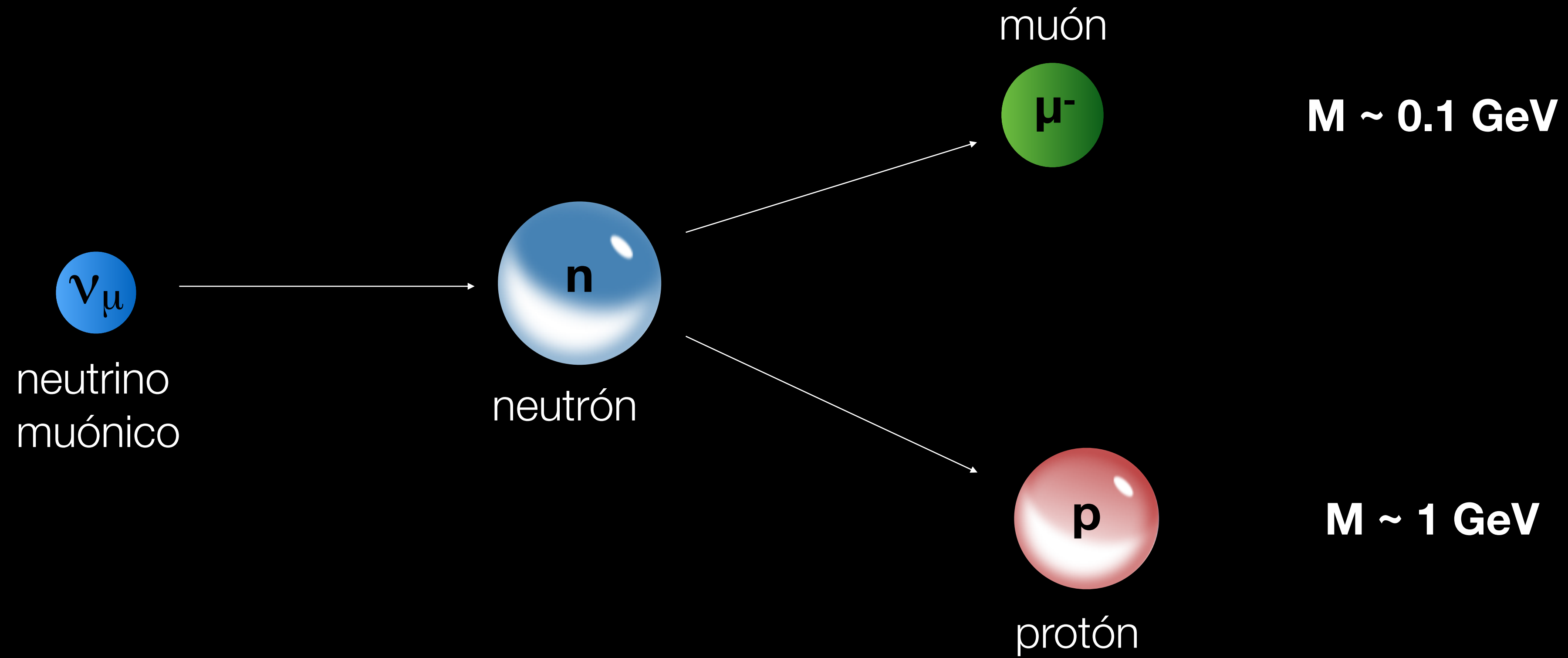


interacción quasi-elástica



$E < 2 \text{ GeV}$

interacción quasi-elástica

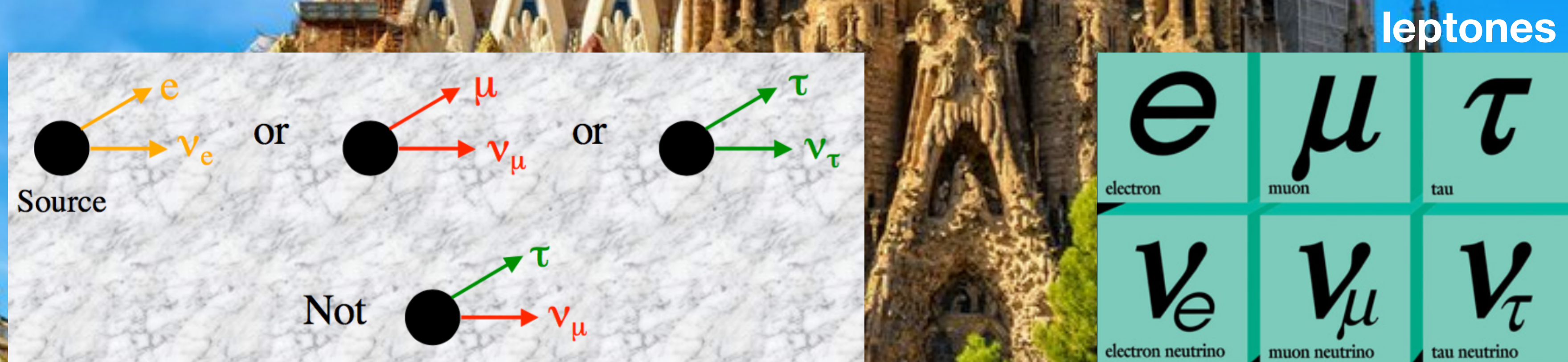


$E < 2 \text{ GeV}$

Oscilaciones de neutrinos

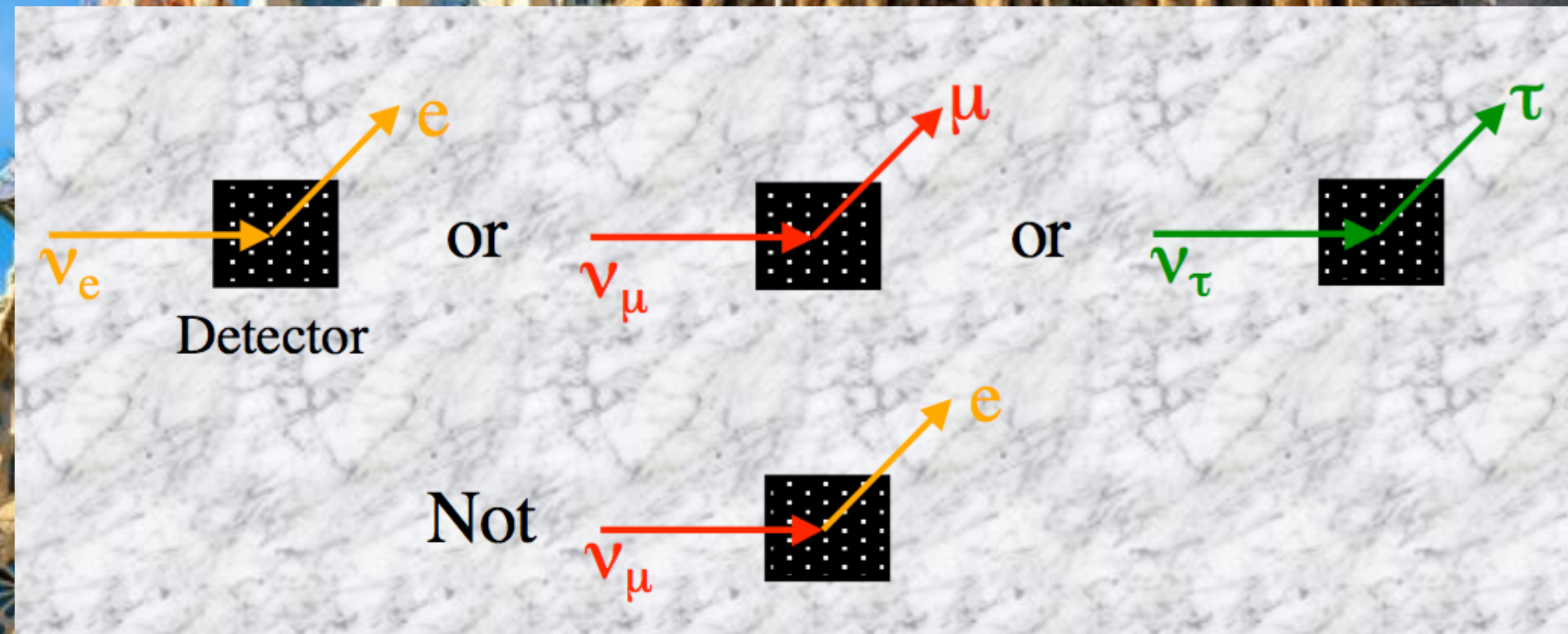
La sagrada familia

- En la naturaleza y en el laboratorio un neutrino siempre es producido junto a su compañero cargado

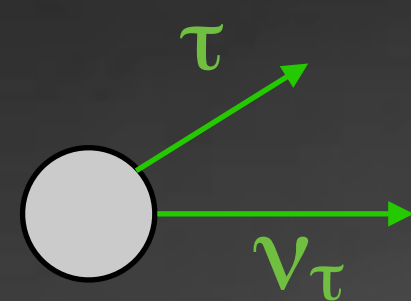
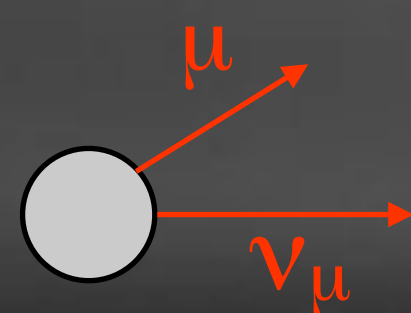
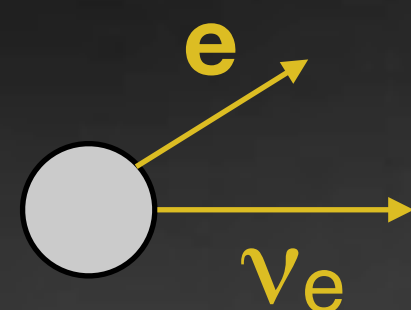


Endogamia en los leptones

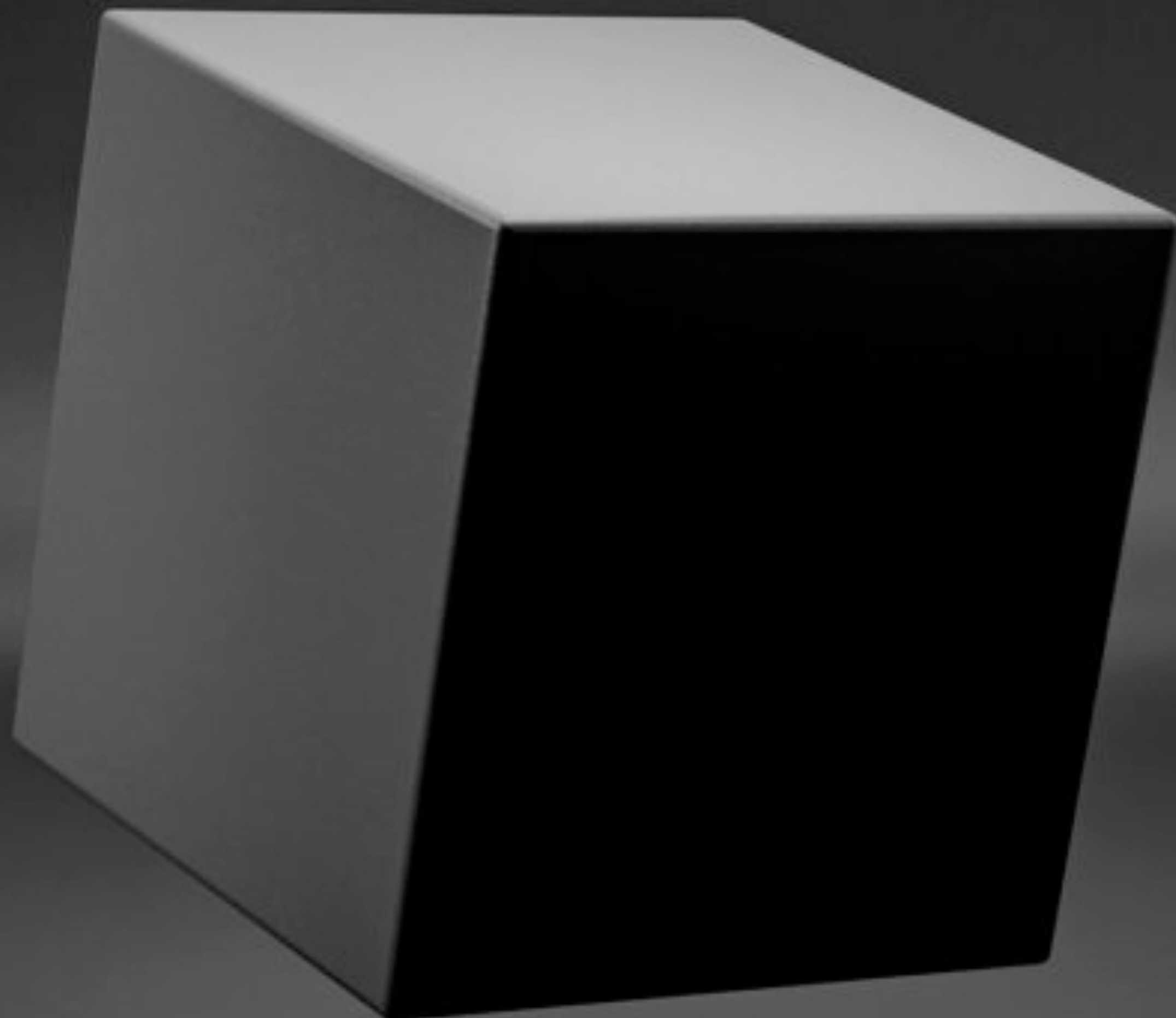
- cuando un neutrino interacciona con un átomo de un detector produce un leptón de su misma familia
- Distinguimos un neutrino de otro por el leptón cargado que produce



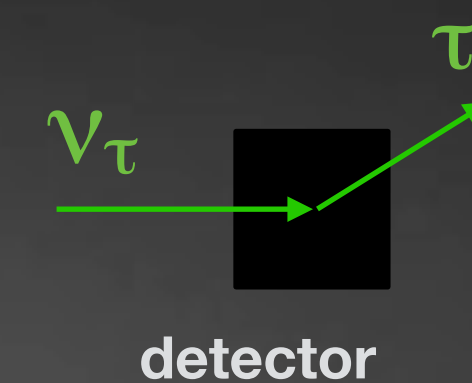
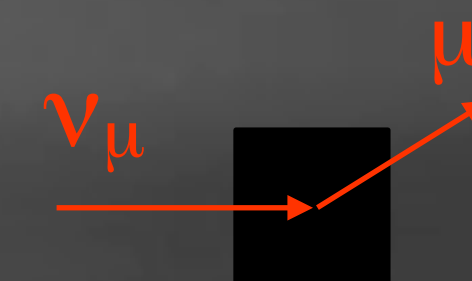
producción



propagación



detección



El mundo Mecano-Cuántico

- Es el mundo de lo muy pequeño

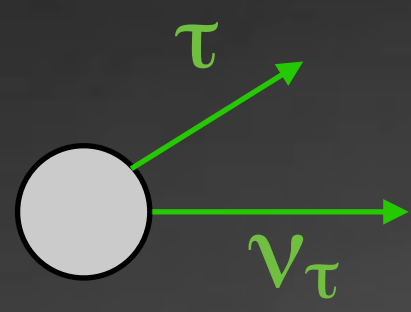
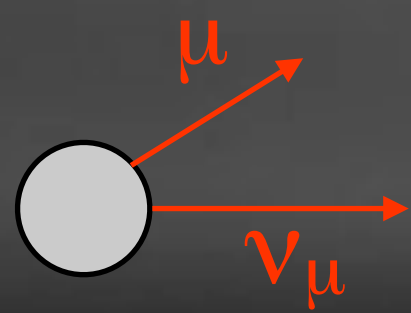
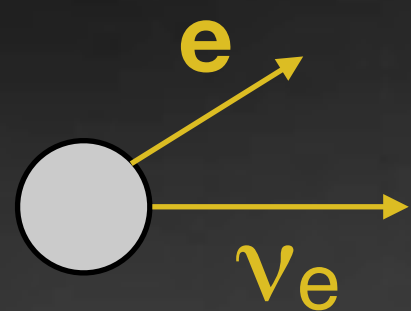


- En este mundo la **incertidumbre** es la clave
 - La posición, energía, e incluso la naturaleza de las partículas no está bien definida
 - Todo es cuestión de **probabilidad**
 - Una partícula tiene cierta probabilidad de estar aquí o allá, de ser de un tipo o de otro

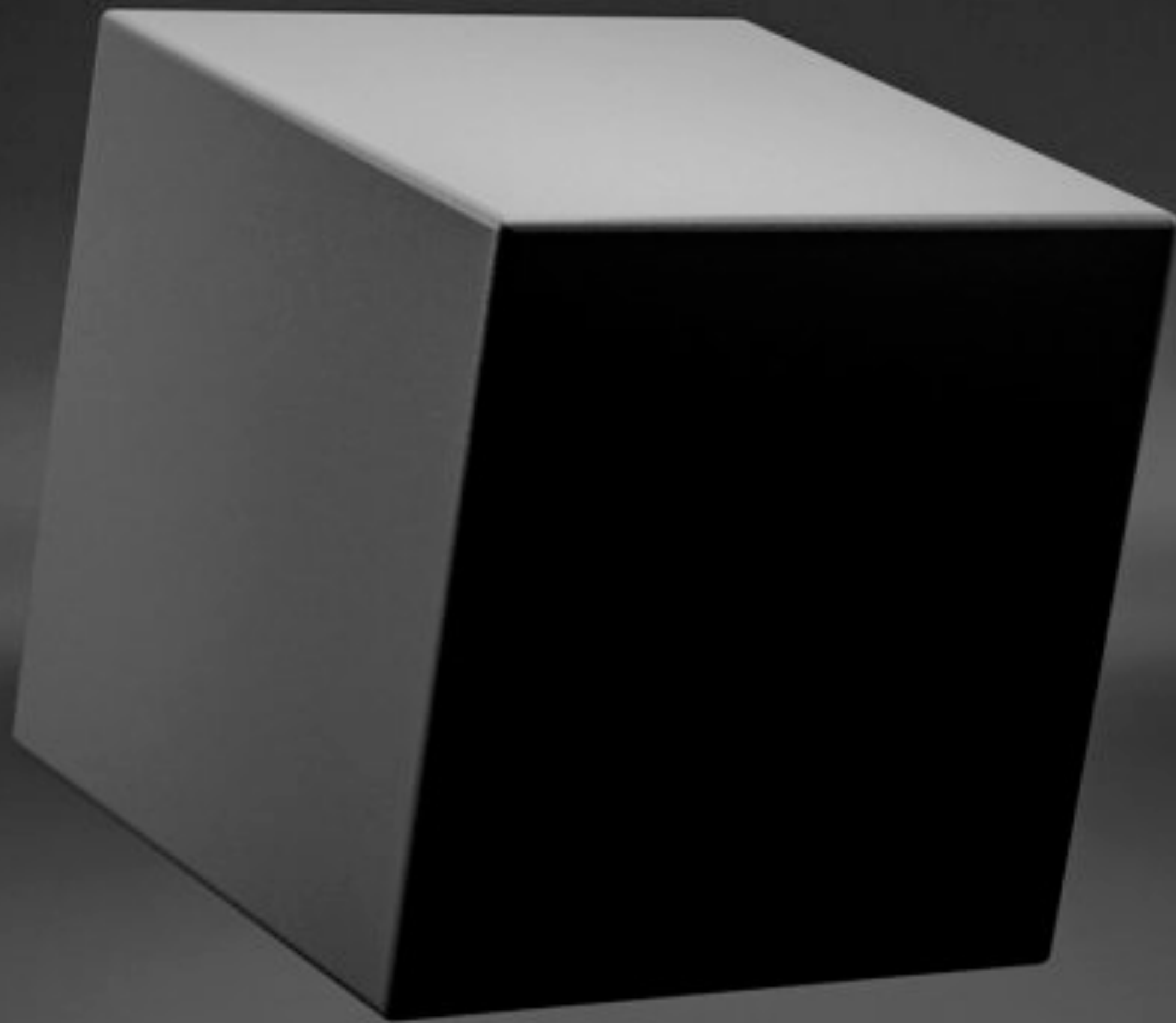


- Imaginemos que los neutrinos que somos capaces de producir o detectar son combinaciones lineales de otros neutrinos, que son los que se propagan por el espacio

producción



propagación

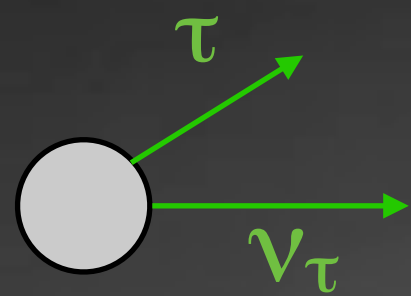
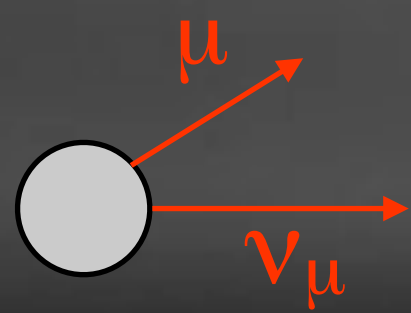
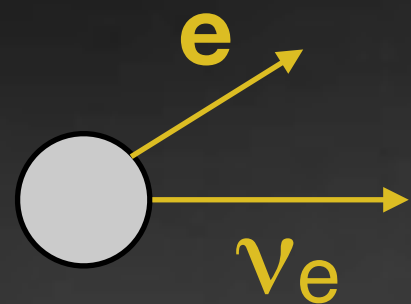


detección



detector

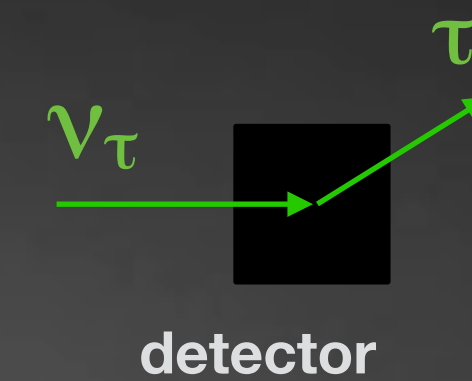
producción



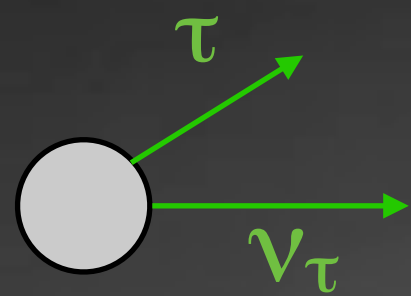
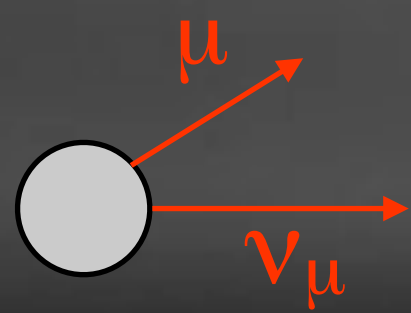
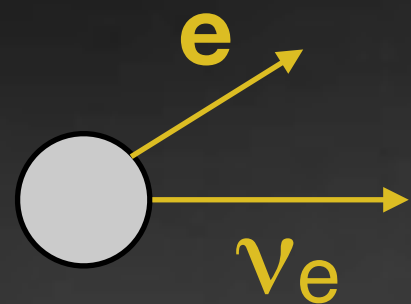
propagación

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

detección



producción

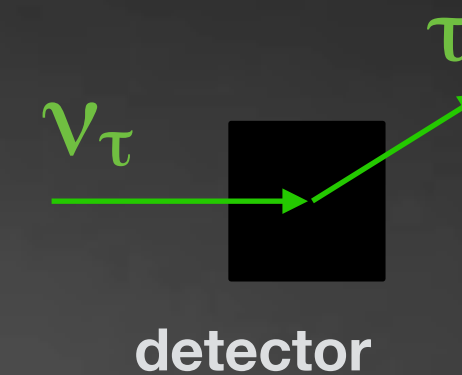


propagación

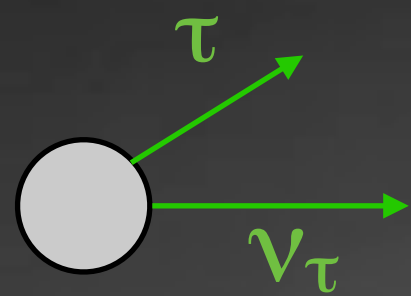
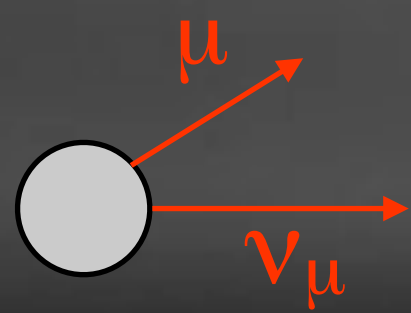
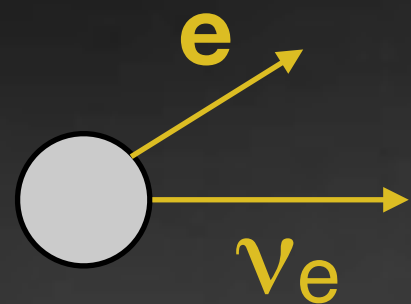
$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U_{11} & U_{12} & U_{13} \\ U_{21} & U_{22} & U_{23} \\ U_{31} & U_{32} & U_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

autoestados
débiles

detección



producción



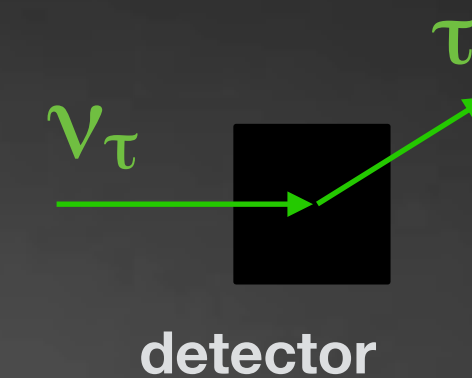
propagación

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

autoestados
débiles

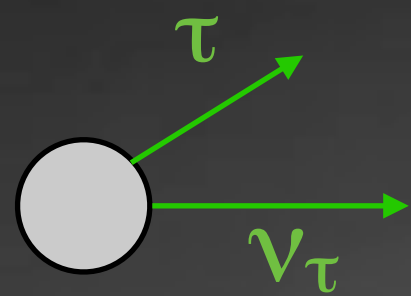
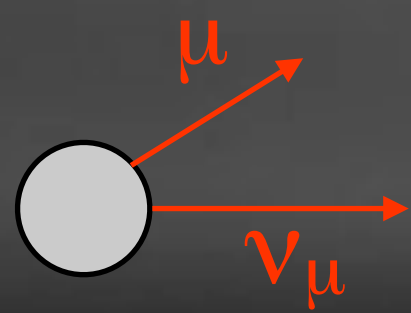
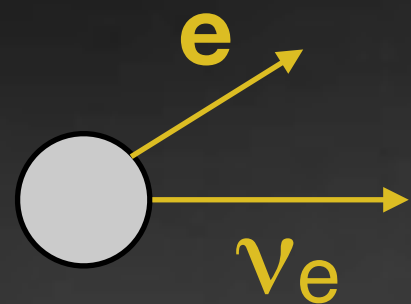
autoestados
de masa

detección



detector

producción



propagación

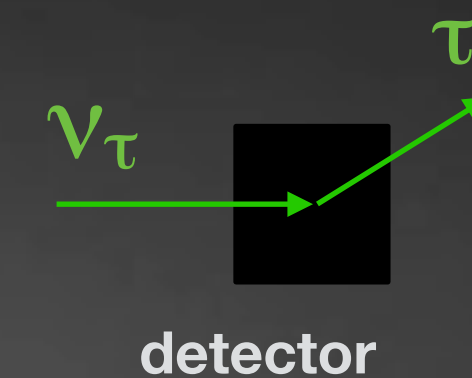
$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U_{11} & U_{12} & U_{13} \\ U_{21} & U_{22} & U_{23} \\ U_{31} & U_{32} & U_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

autoestados
débiles

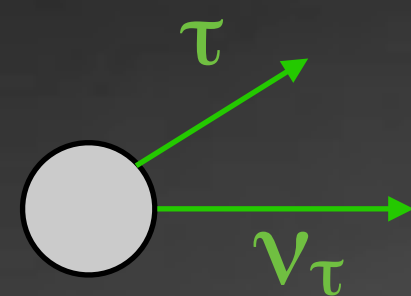
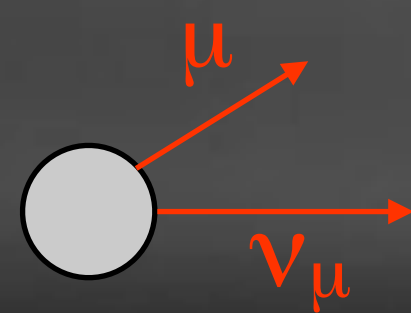
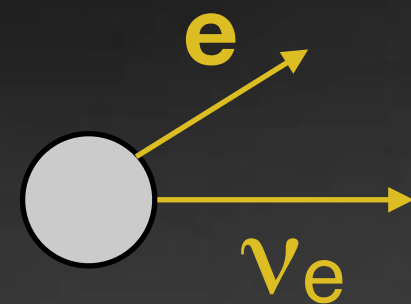
autoestados
de masa

Tienen masa definida
y son los que se
propagan por el
espacio

detección



producción



propagación

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

autoestados
débiles

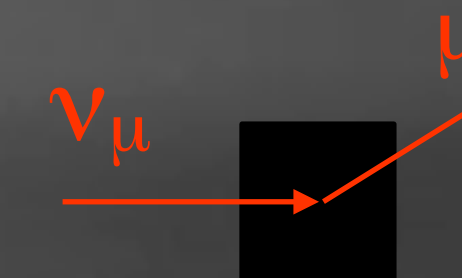
No tienen
una masa definida

pero saben interaccionar

autoestados
de masa

Tienen masa definida
y son los que se
propagan por el
espacio

detección



detector

¿Y si ν_1 ν_2 ν_3 tuvieran masa ?

- Si los neutrinos ν_1 ν_2 ν_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**

EL PROBLEMA DE LOS 3 CUERPOS



m_v

La matriz de mezcla

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

matriz de mezcla PMNS

Pontecorvo–Maki–Nakagawa–Sakata

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

sector atmosférico

interferencia

sector solar

La matriz de mezcla

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

θ_{23}

θ_{13}

θ_{12}

matriz de mezcla PMNS

Pontecorvo–Maki–Nakagawa–Sakata

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

sector atmosférico

interferencia

sector solar

La matriz de mezcla

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

θ_{12}

matriz de mezcla PMNS

Pontecorvo–Maki–Nakagawa–Sakata

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

sector atmosférico

interferencia

sector solar

La matriz de mezcla

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

autoestados débiles
autoestados de masa

Δm^2_{12}

Δm^2_{23}

$\Delta m^2_{ij} = m^2_i - m^2_j$

θ_{23}

θ_{13}

δ_{CP}

θ_{12}

matriz de mezcla PMNS

Pontecorvo–Maki–Nakagawa–Sakata

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

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

sector atmosférico

interferencia

sector solar

Simplificación para dos neutrinos

- Para dos neutrinos solo habría un ángulo de mezcla y una diferencia cuadrática de masas

$$\begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \end{pmatrix}$$

Simplificación para dos neutrinos

- Para dos neutrinos solo habría un ángulo de mezcla y una diferencia cuadrática de masas

$$\begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \end{pmatrix}$$

autoestados débiles
autoestados de masa

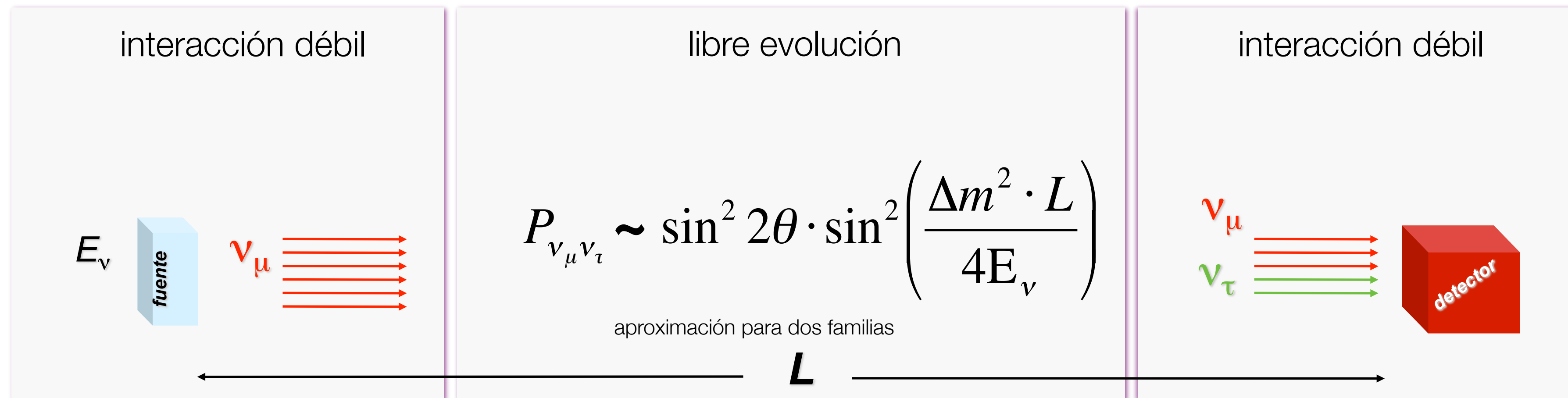
Simplificación para dos neutrinos

- Para dos neutrinos solo habría un ángulo de mezcla y una diferencia cuadrática de masas

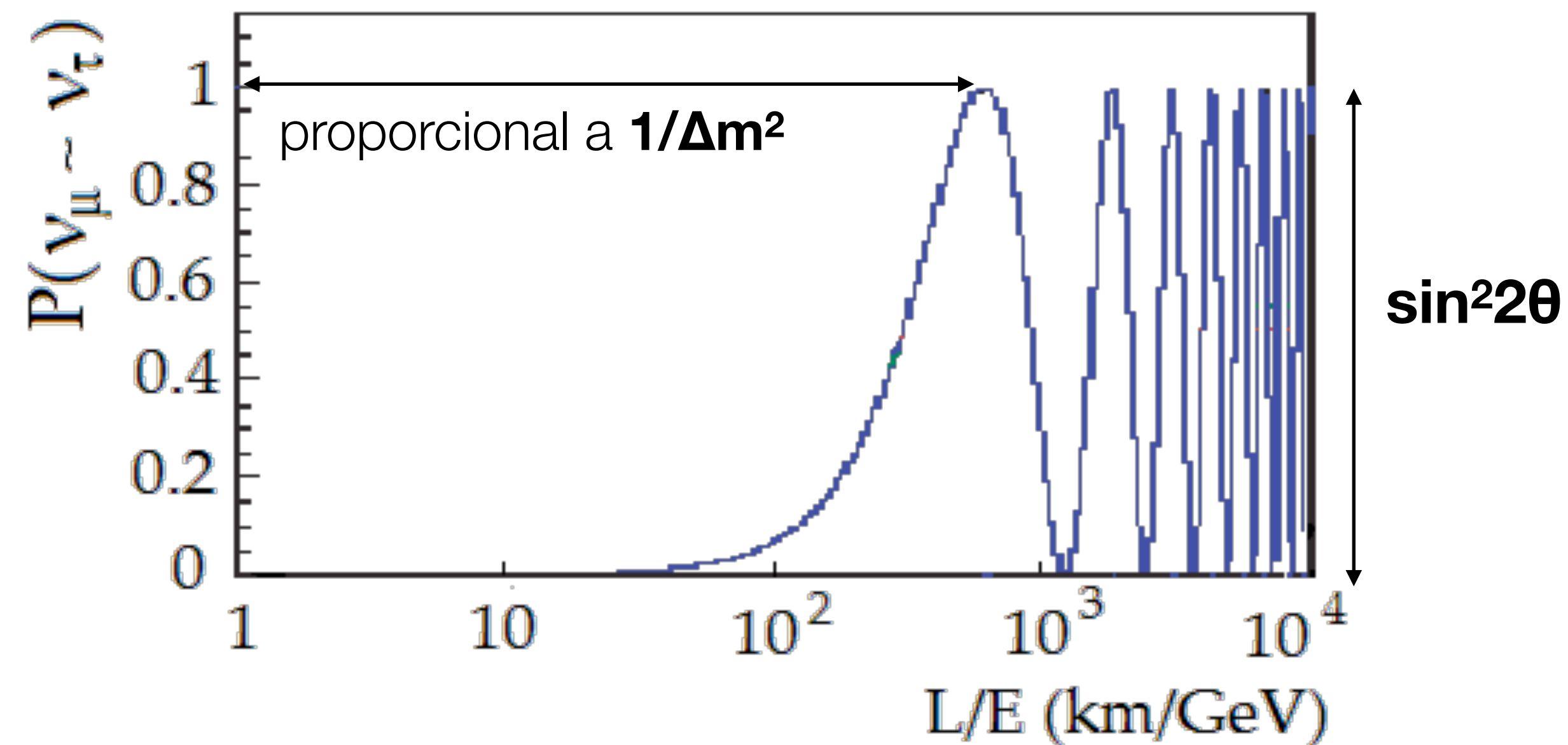
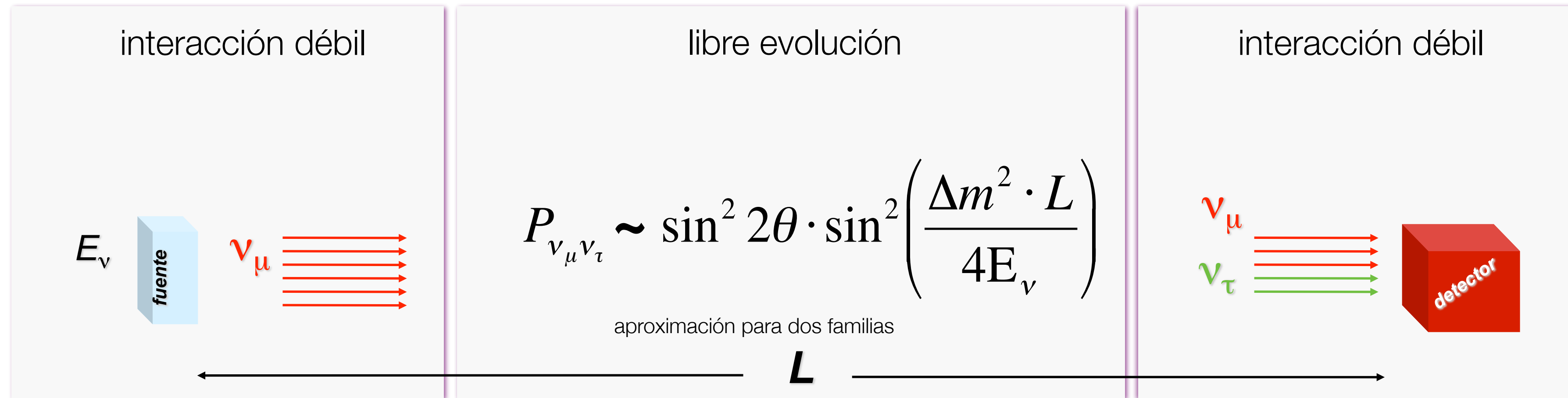
$$\begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \end{pmatrix} \quad \Delta m^2$$

autoestados débiles
autoestados de masa

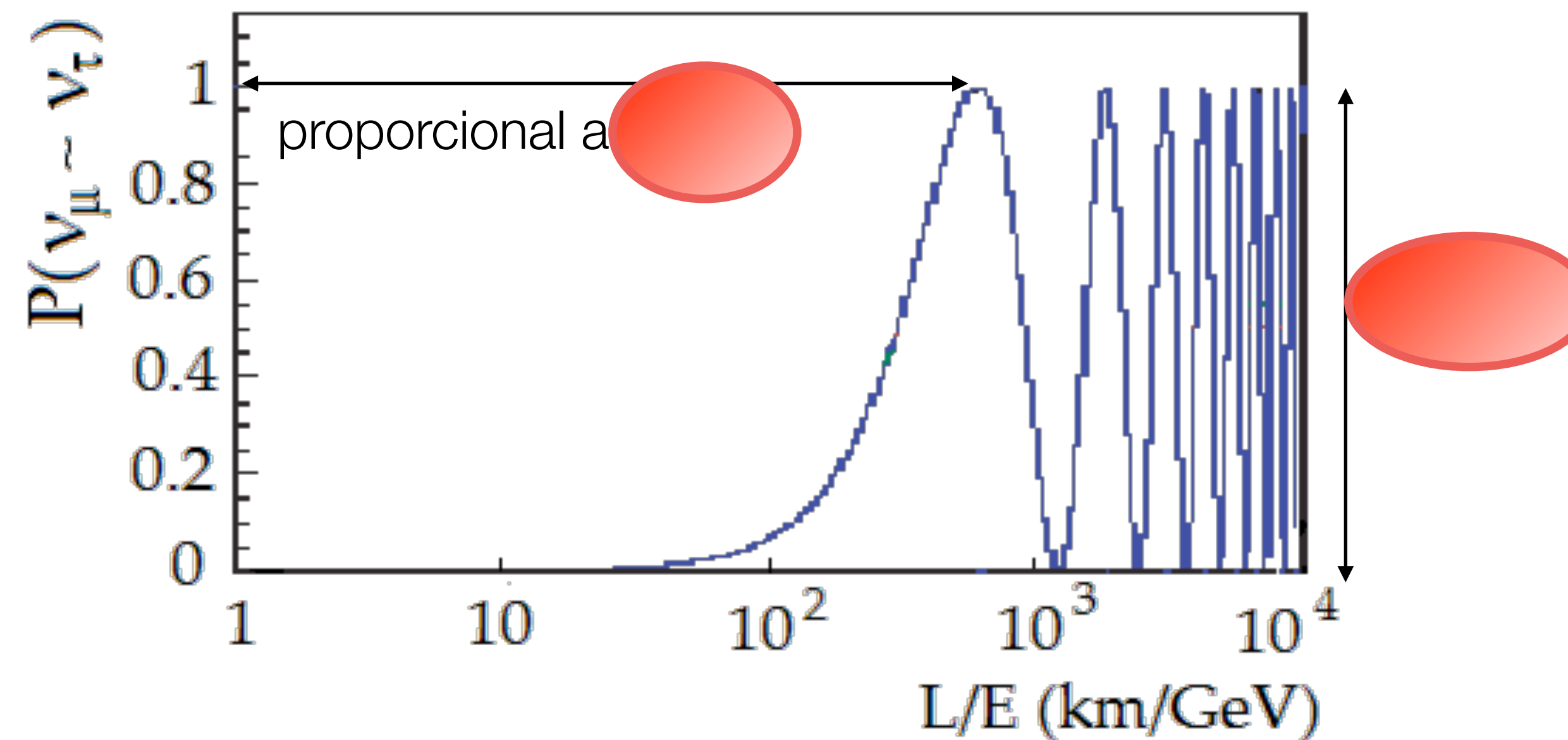
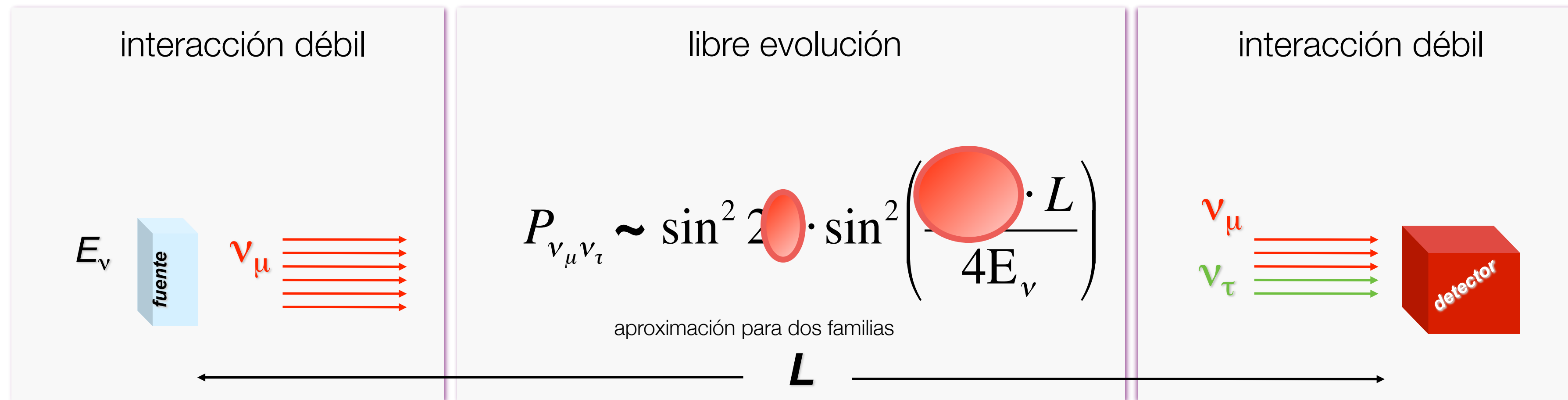
Probabilidad de oscilación



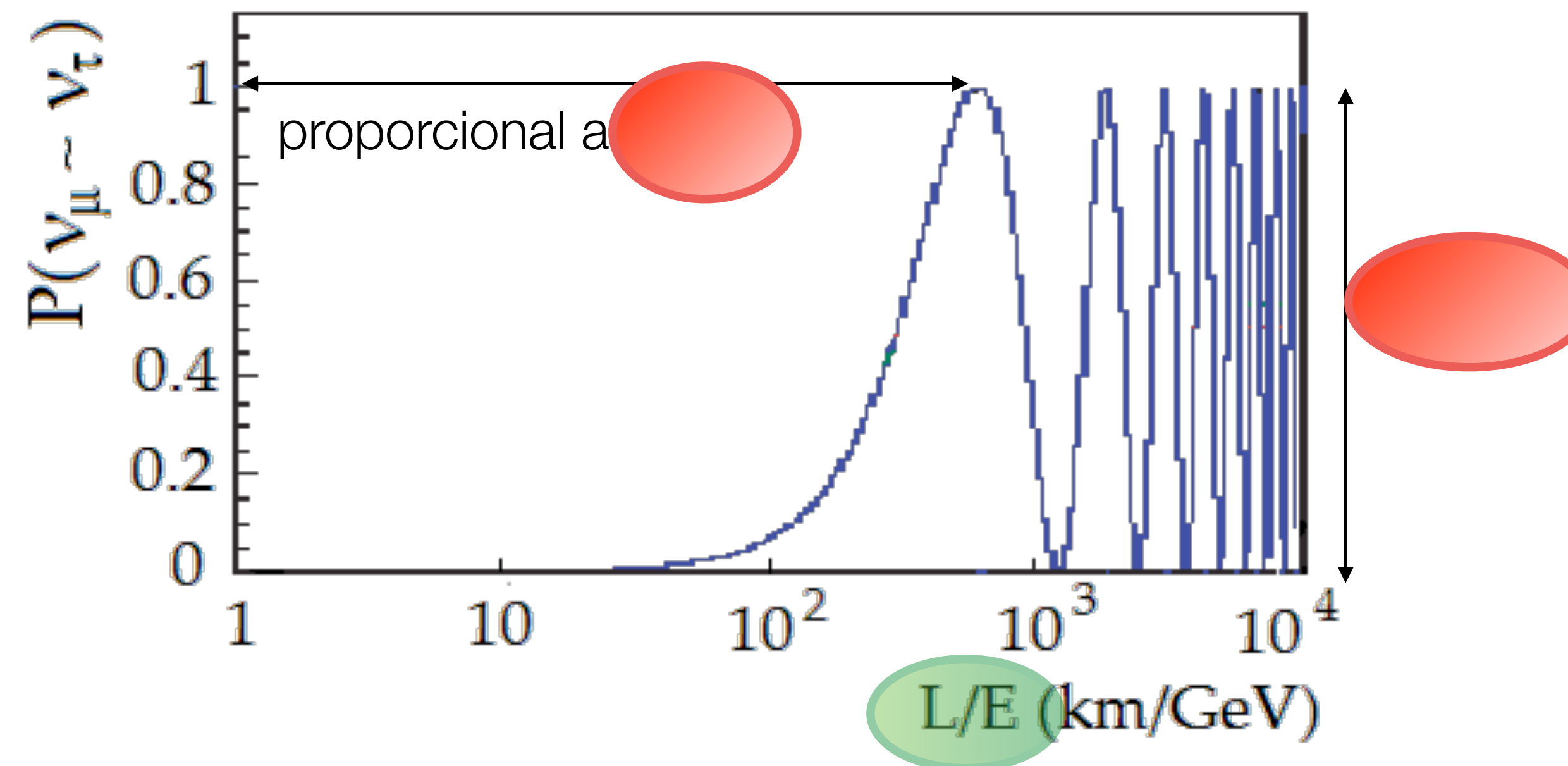
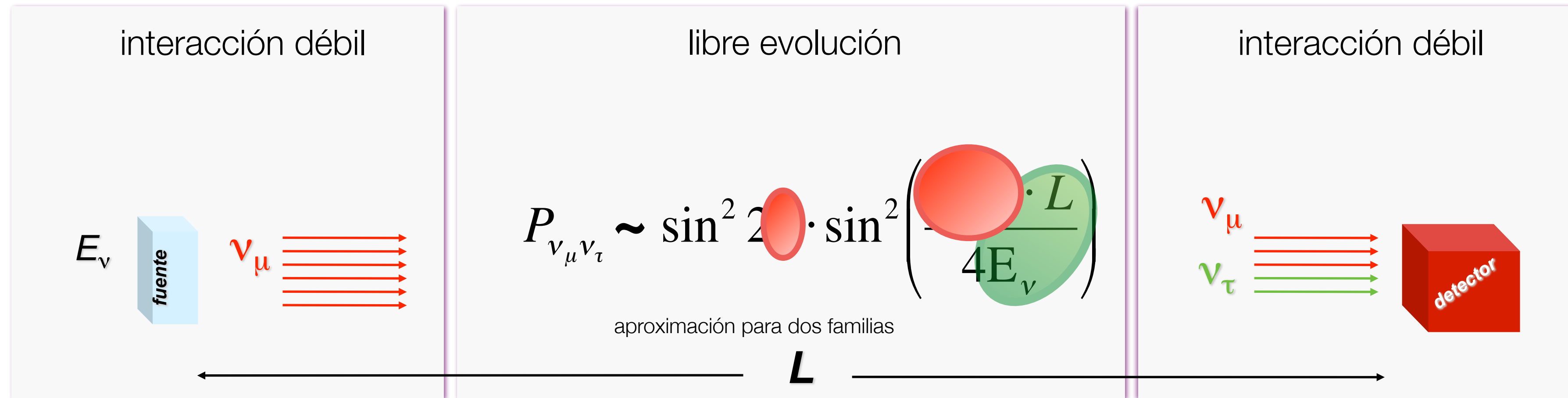
Probabilidad de oscilación



Probabilidad de oscilación

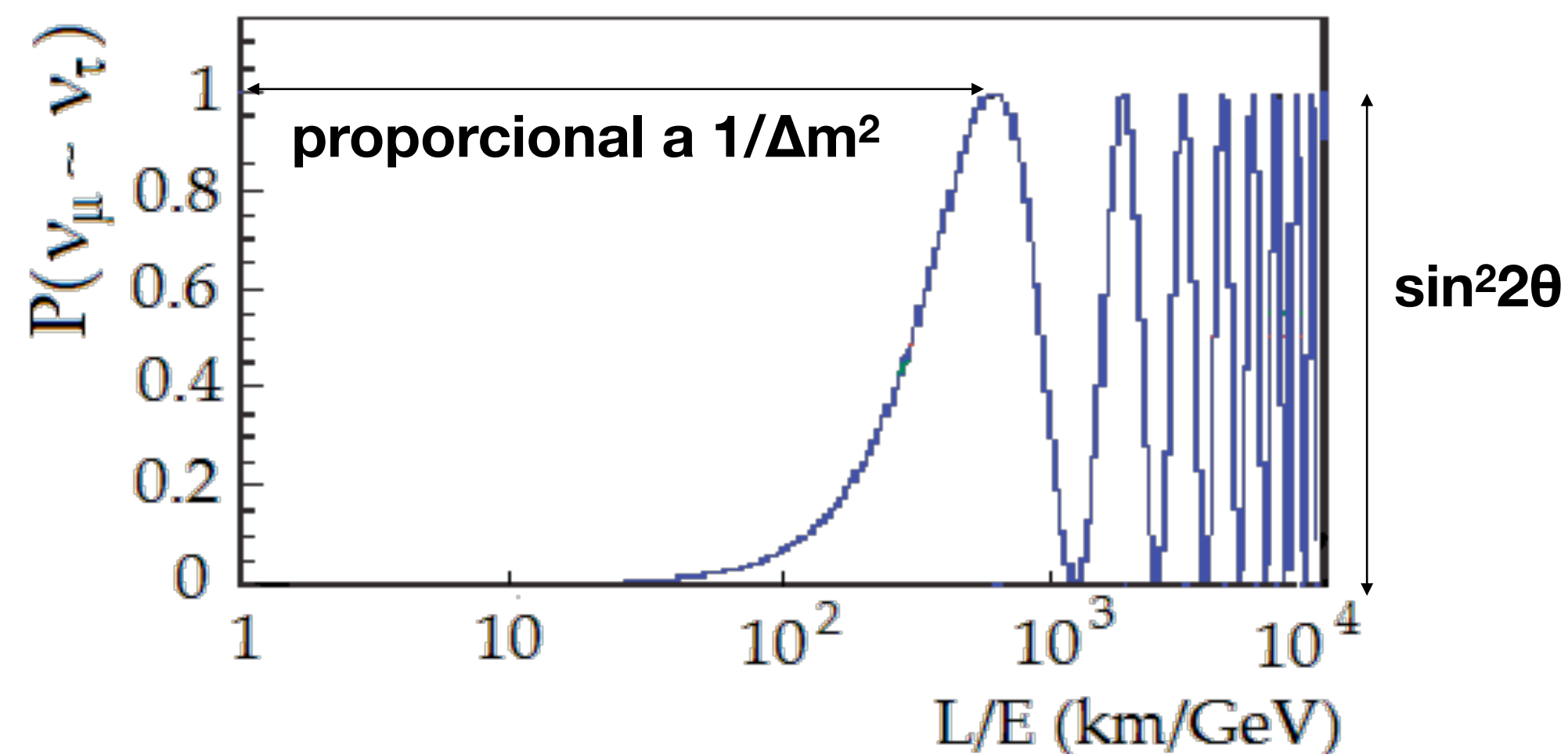


Probabilidad de oscilación



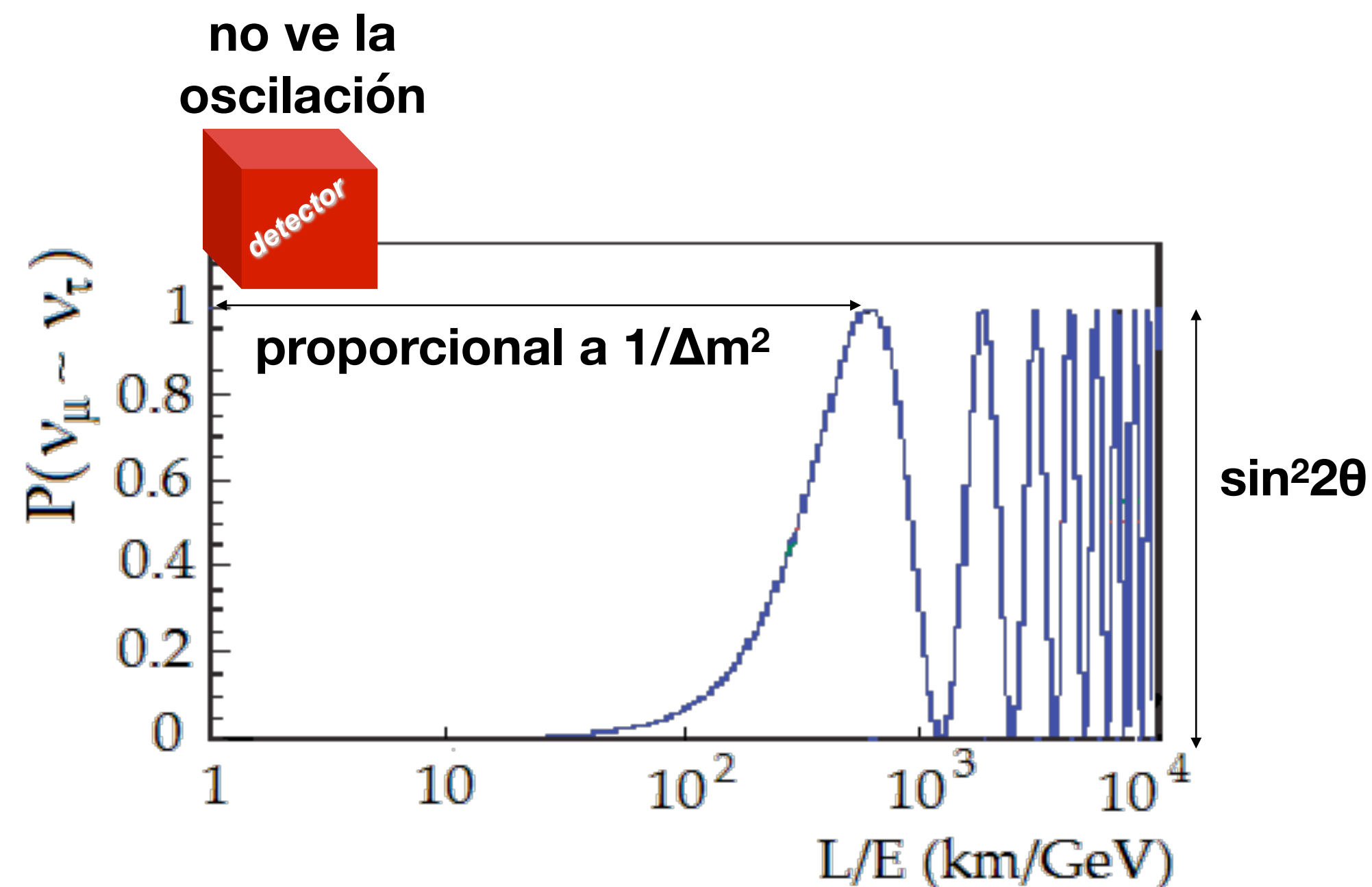
La búsqueda

- 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 Δm^2



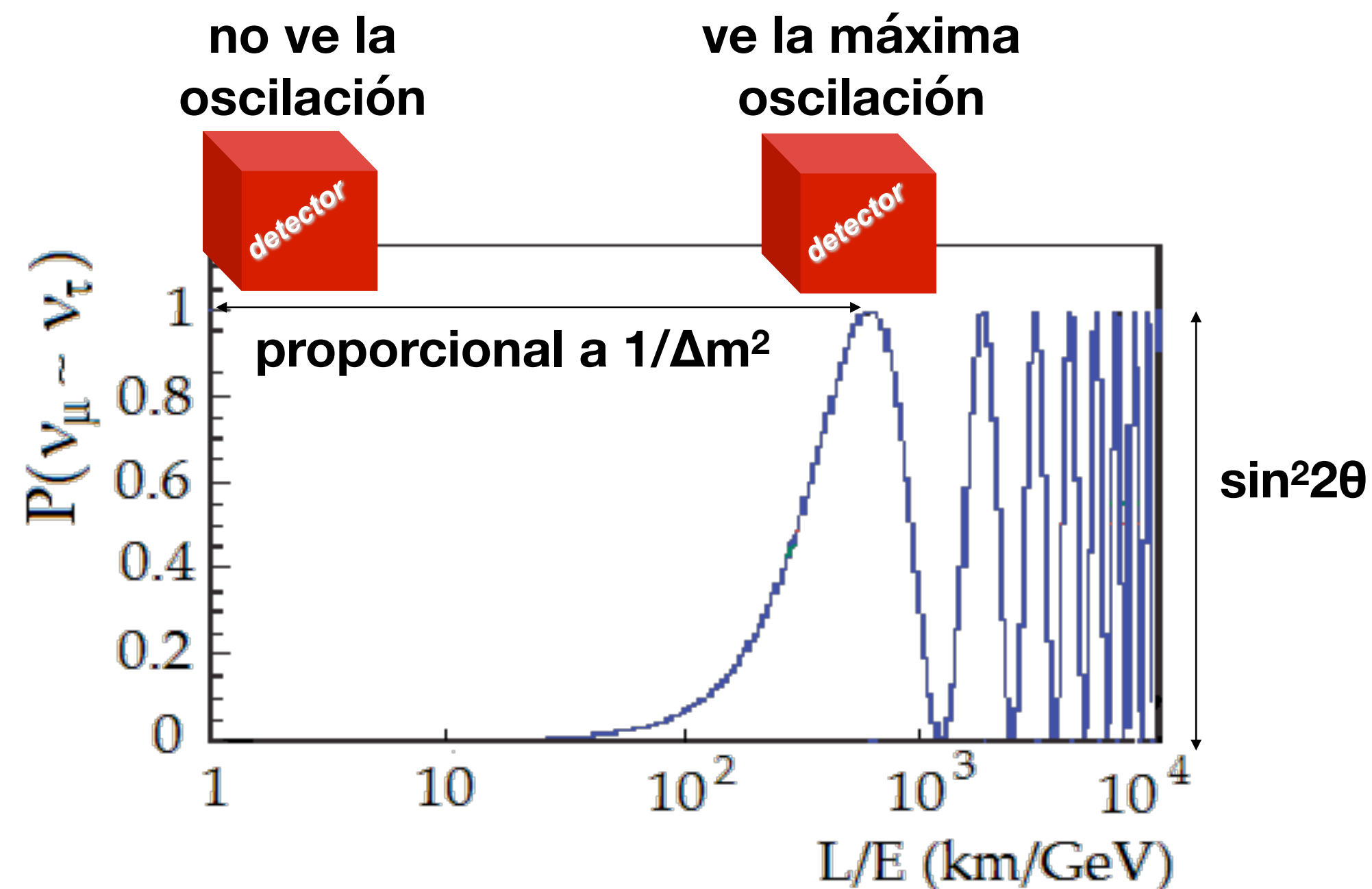
La búsqueda

- 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 Δm^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 Δm^2



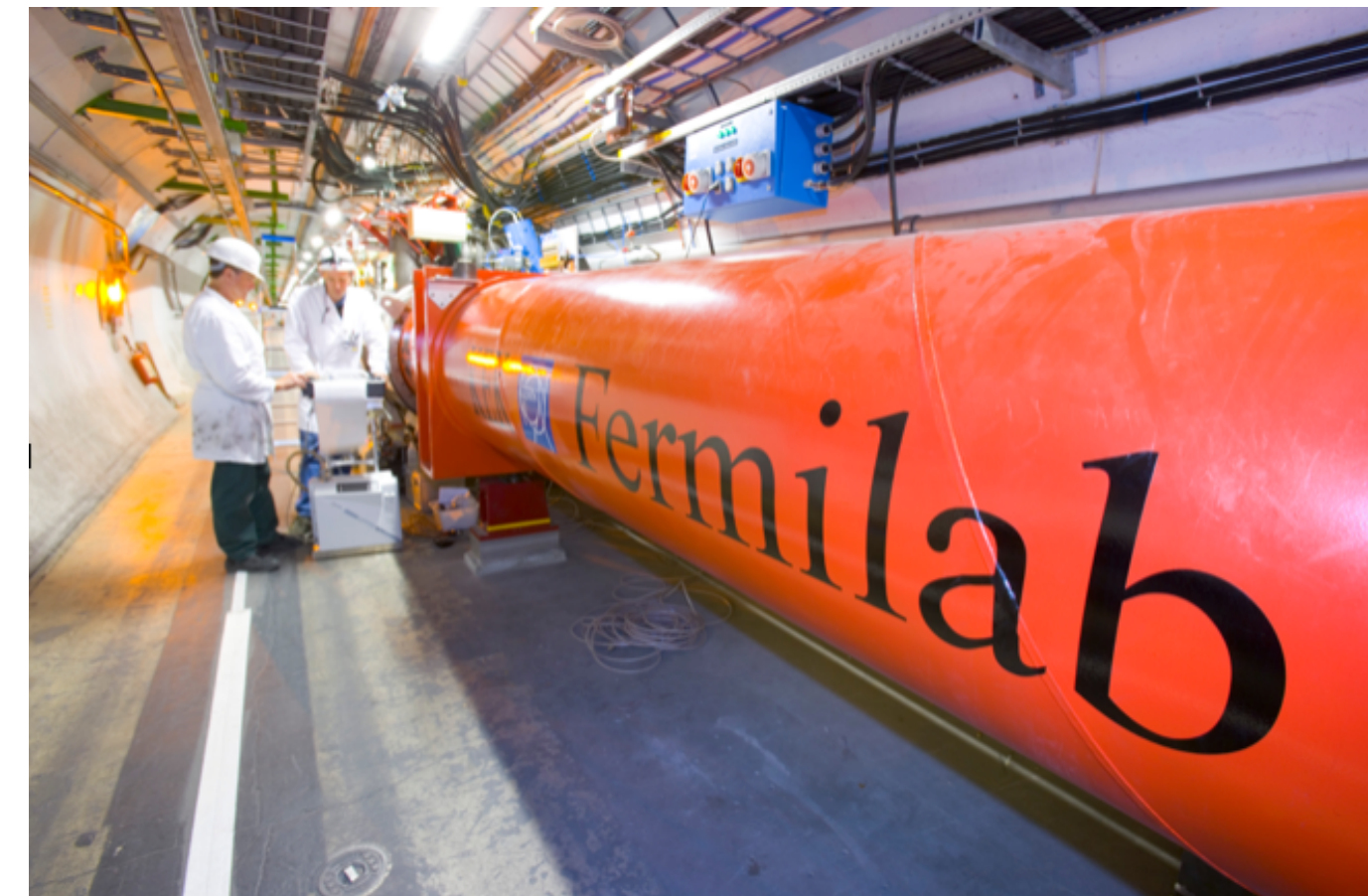
Fuentes artificiales

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

Reactores



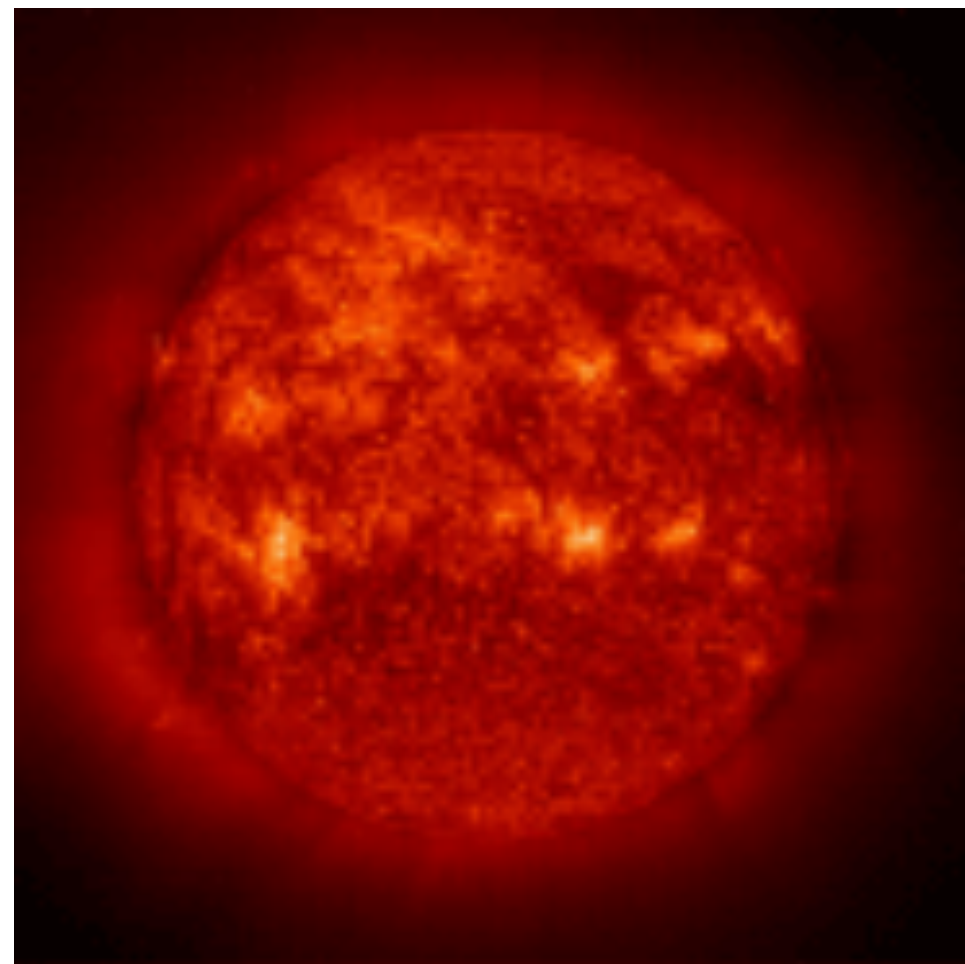
Aceleradores



Fuentes naturales de neutrinos

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

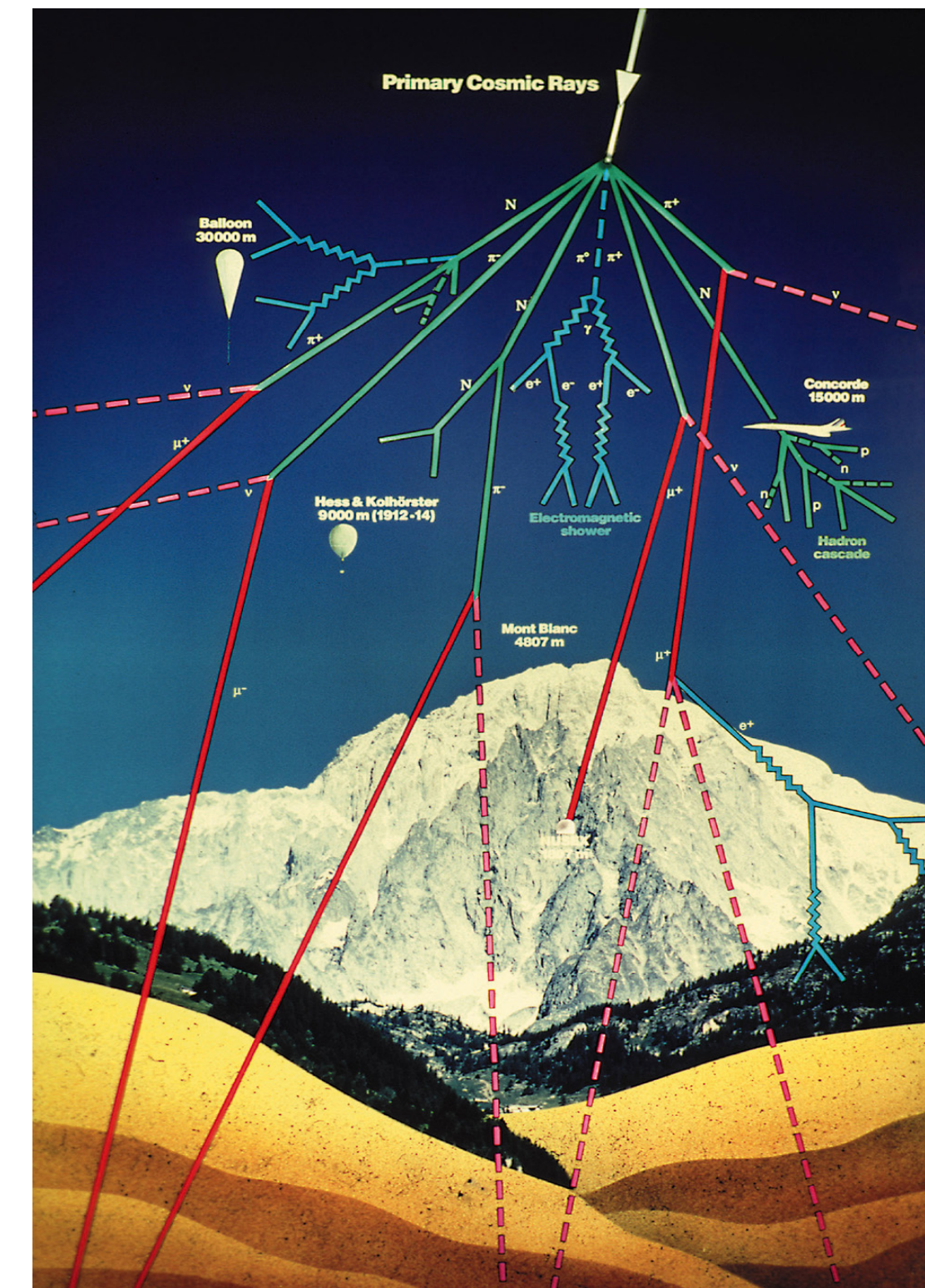
Sol



Supernova



Atmósfera

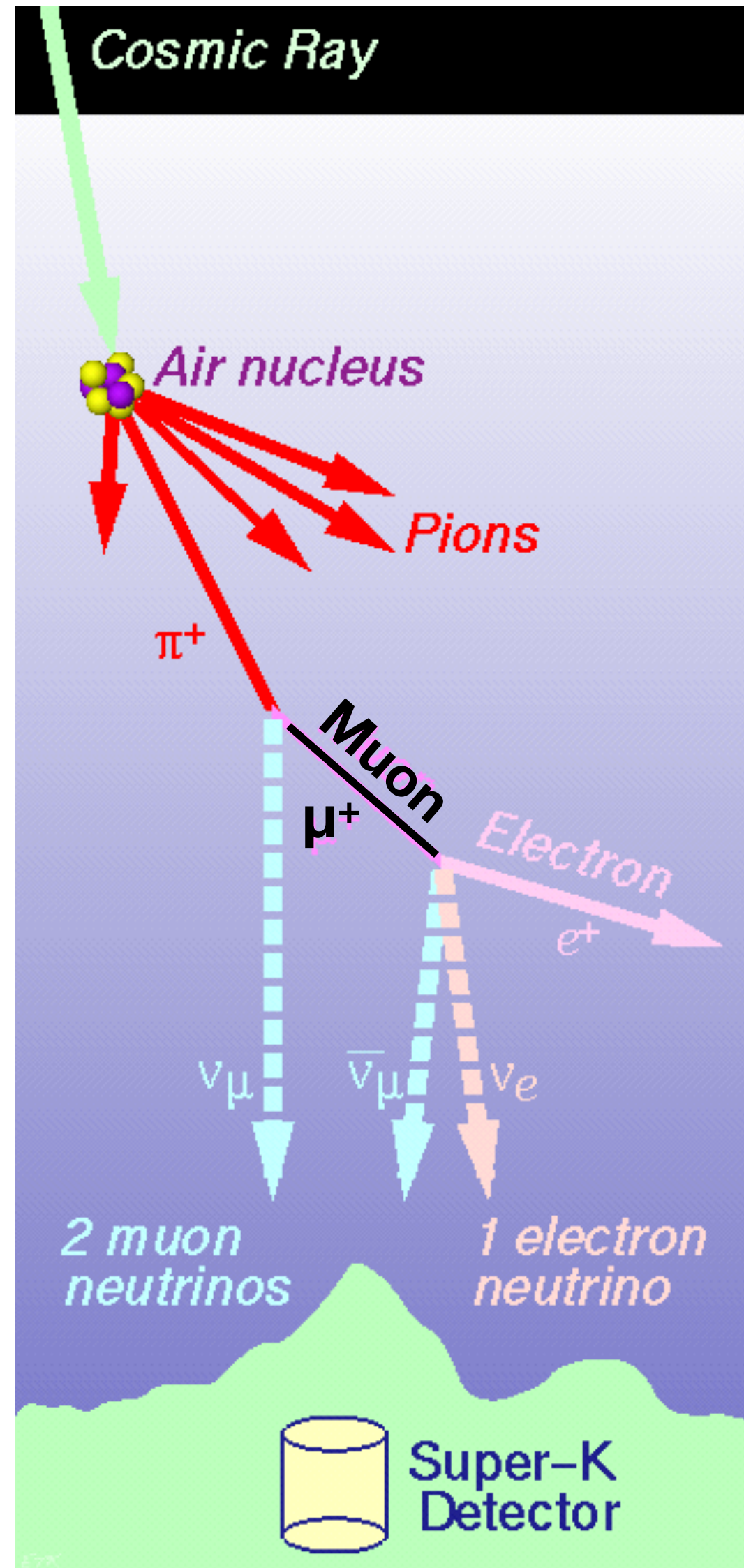


De noche en una playa ...

1996

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

Neutrinos atmosféricos



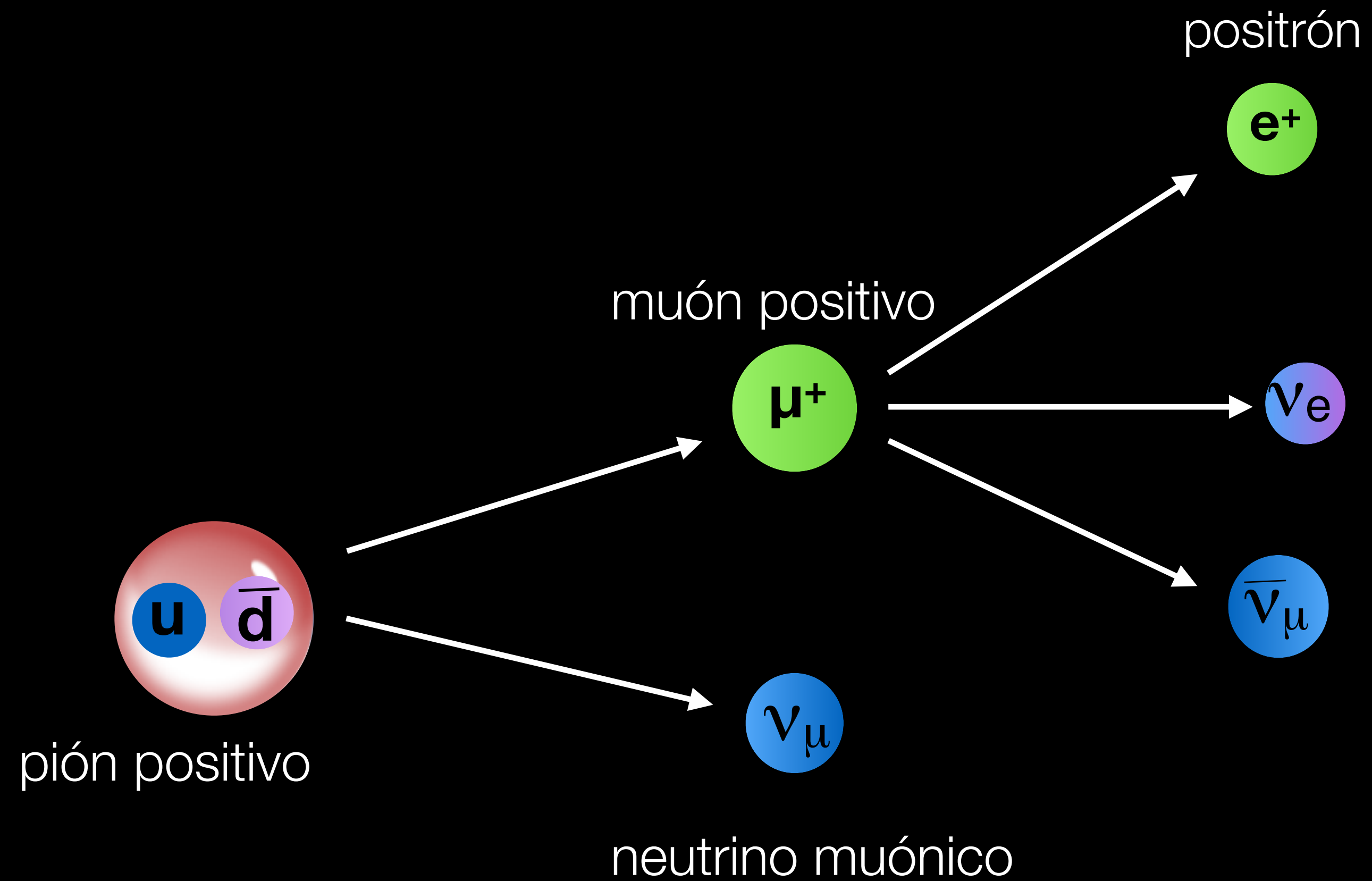
- Se producen en la desintegración de piones y muones en la atmósfera
- Los físicos esperan:

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

- Sin embargo, observan:

$$\nu_\mu/\nu_e \sim 1$$

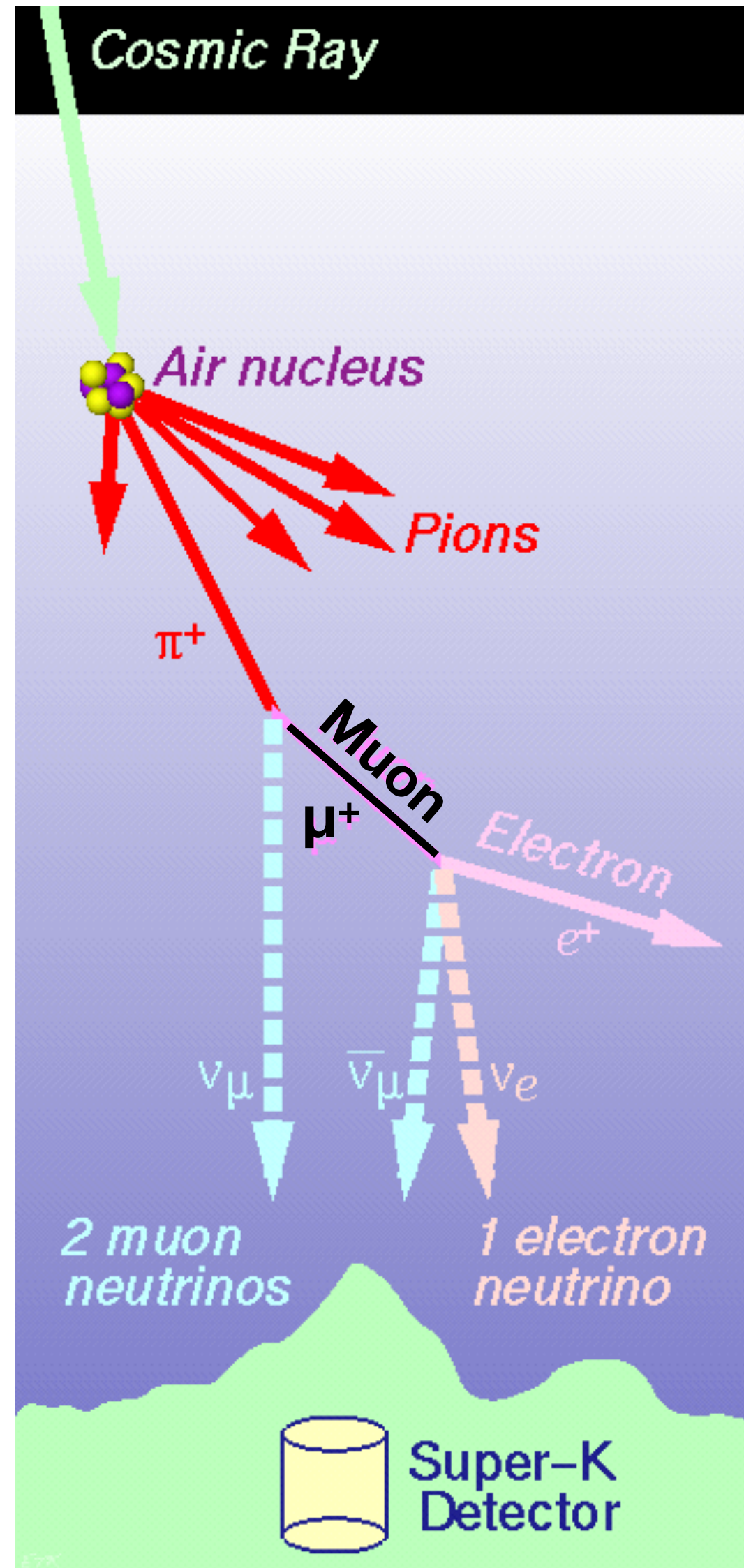
La desintegración del muón



En la desintegración de un pión finalmente se producen dos neutrinos muónicos y uno electrónico

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

Neutrinos atmosféricos



- Se producen en la desintegración de piones y muones en la atmósfera
- Los físicos esperan:

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

- Sin embargo, observan:

$$\nu_\mu/\nu_e \sim 1$$

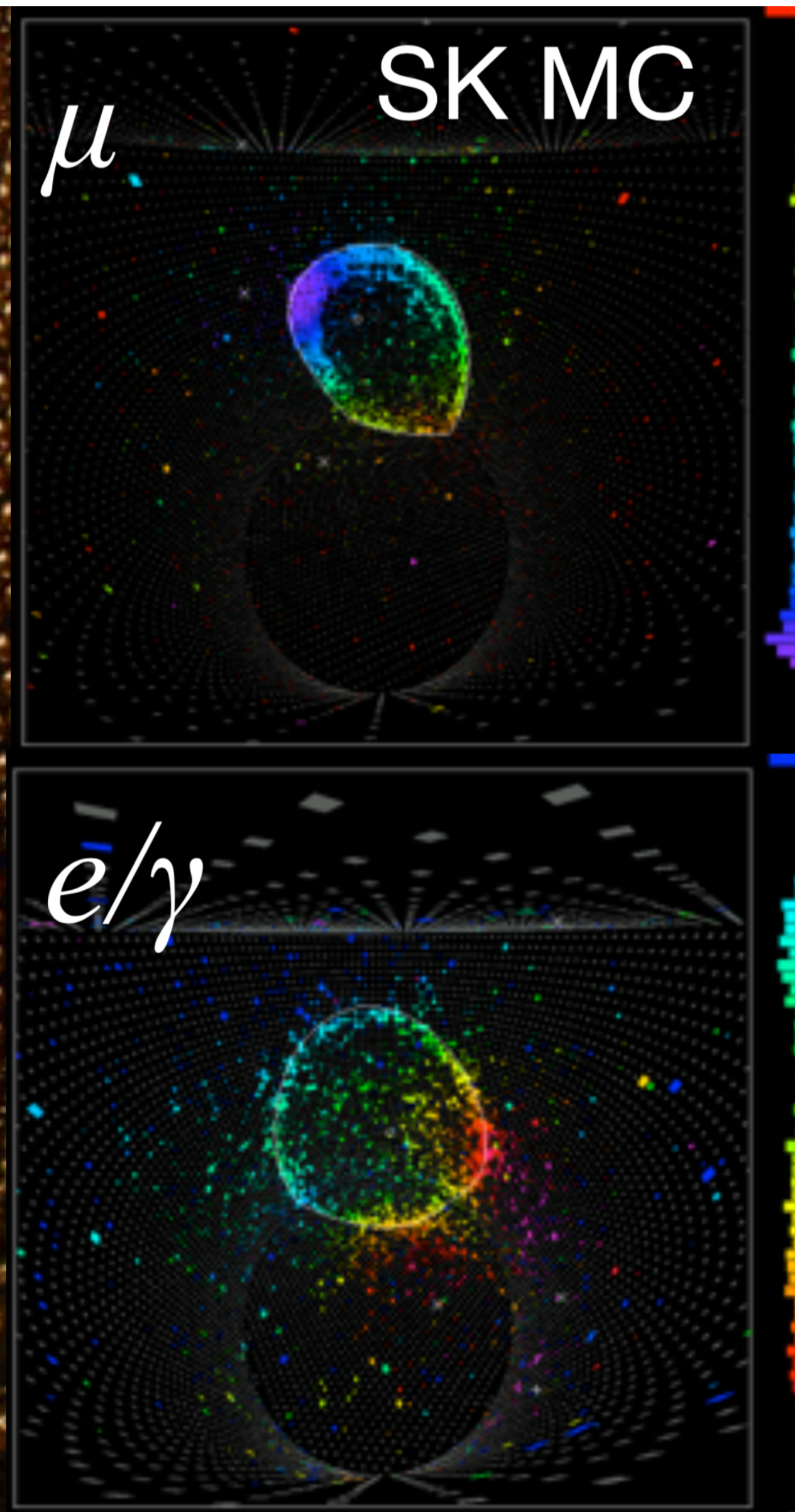
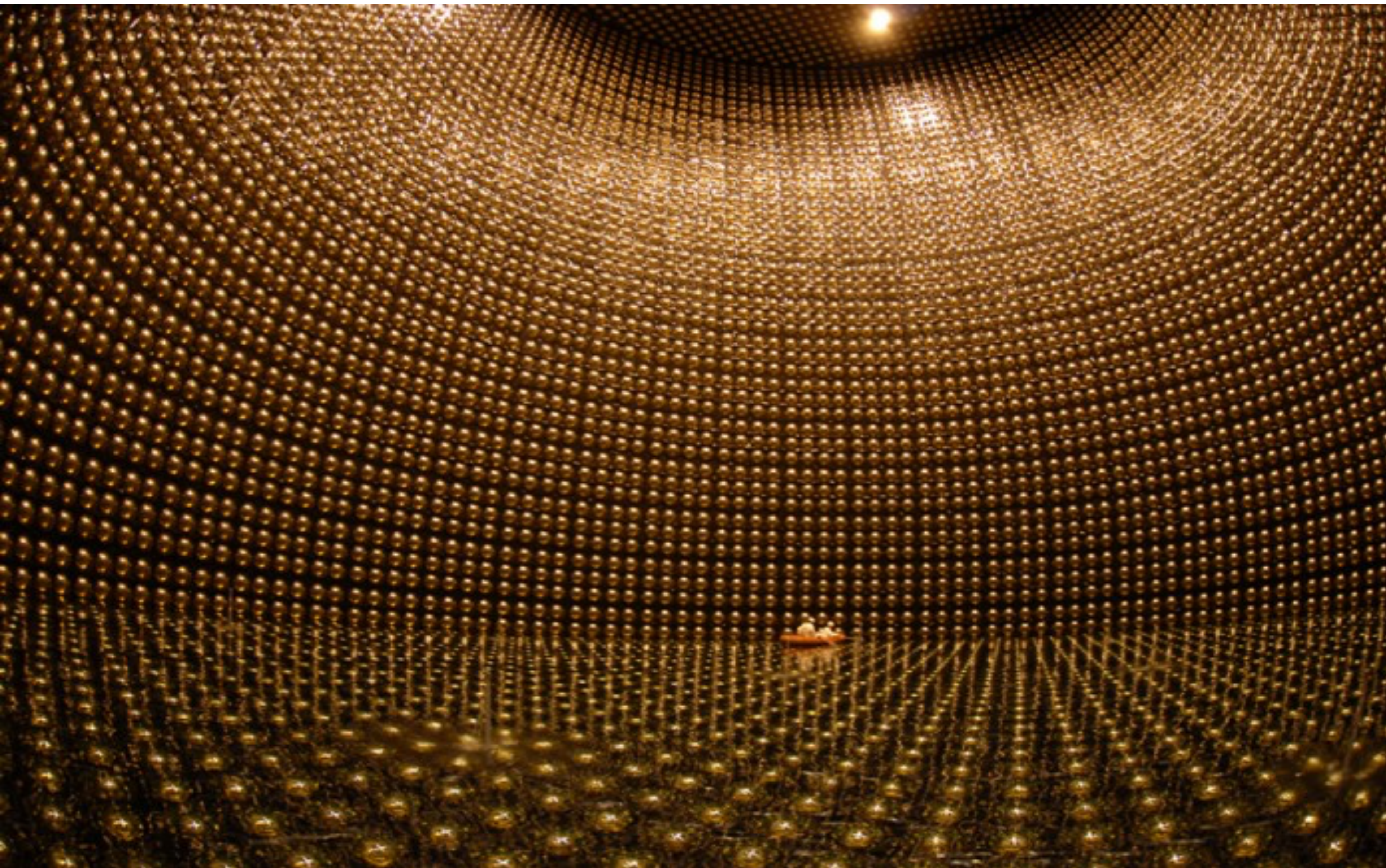


EL PROBLEMA DE LOS 3 CUERPOS



EL PROBLEMA DE LOS 3 CUERPOS

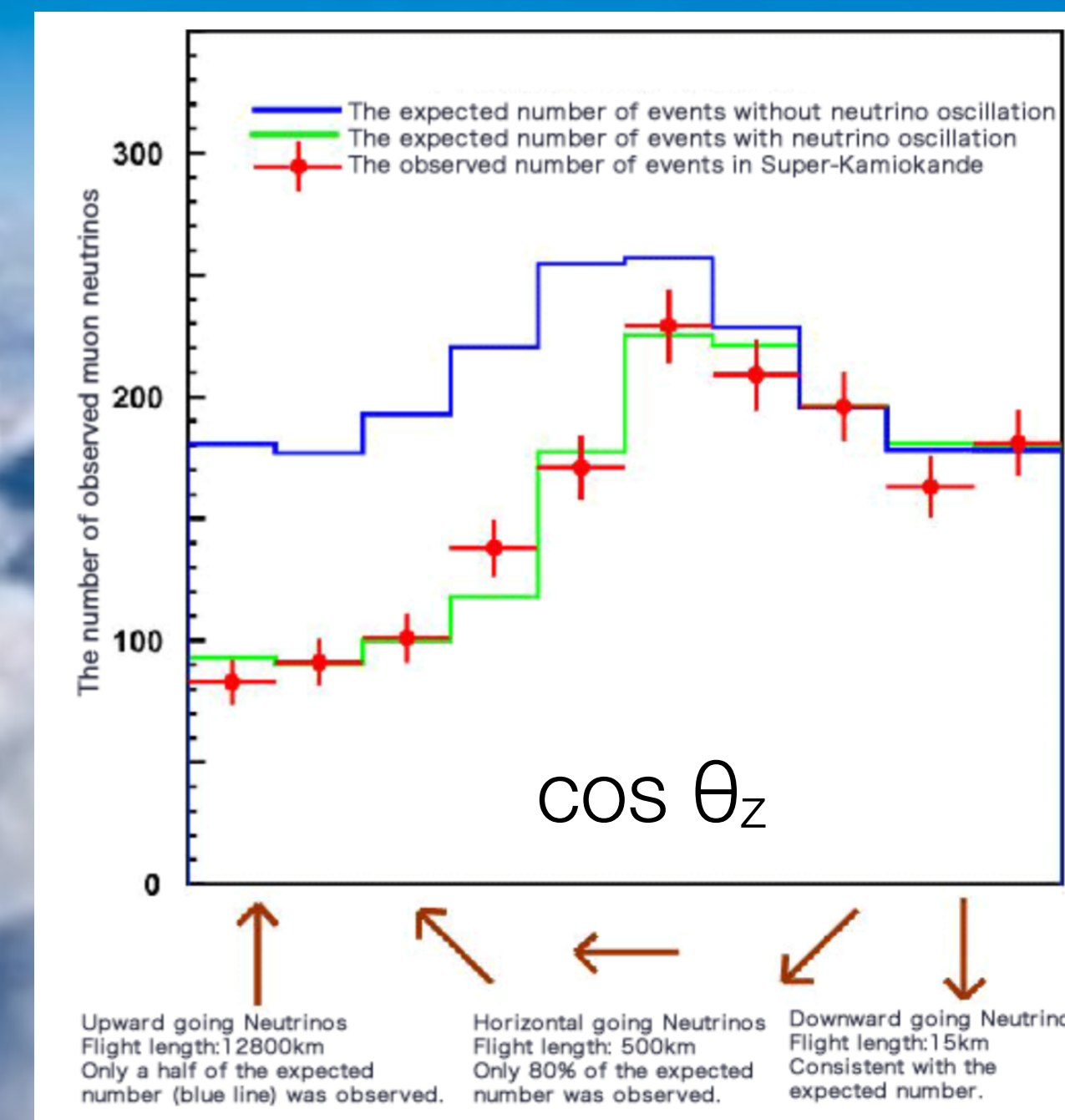
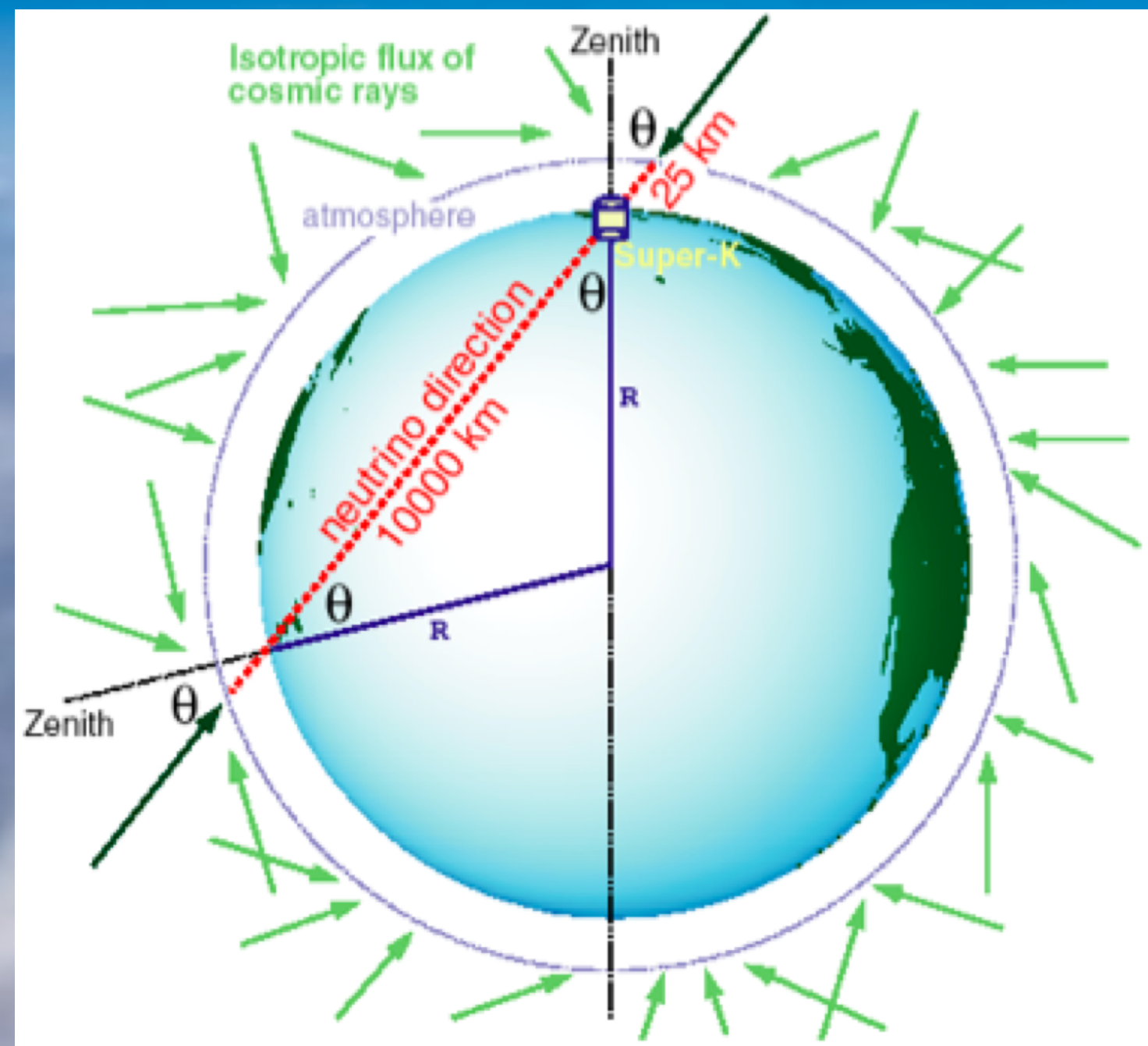
Super-Kamiokande



El descubrimiento

1998

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



13000 km

15 km

2015



2015



H A B I T U A L



Desde los años
sesenta se venían observando
 $1/3$ de los neutrinos esperados del
sol



En 2001 el experimento **SNO**, en
Canada, confirmó la validez del
modelo solar y descubrió un
segundo tipo de
oscilación

Desde los años
sesenta se venían observando
 $1/3$ de los neutrinos esperados del
sol



En 2001 el experimento **SNO**, en
Canada, confirmó la validez del
modelo solar y descubrió un
segundo tipo de
oscilación

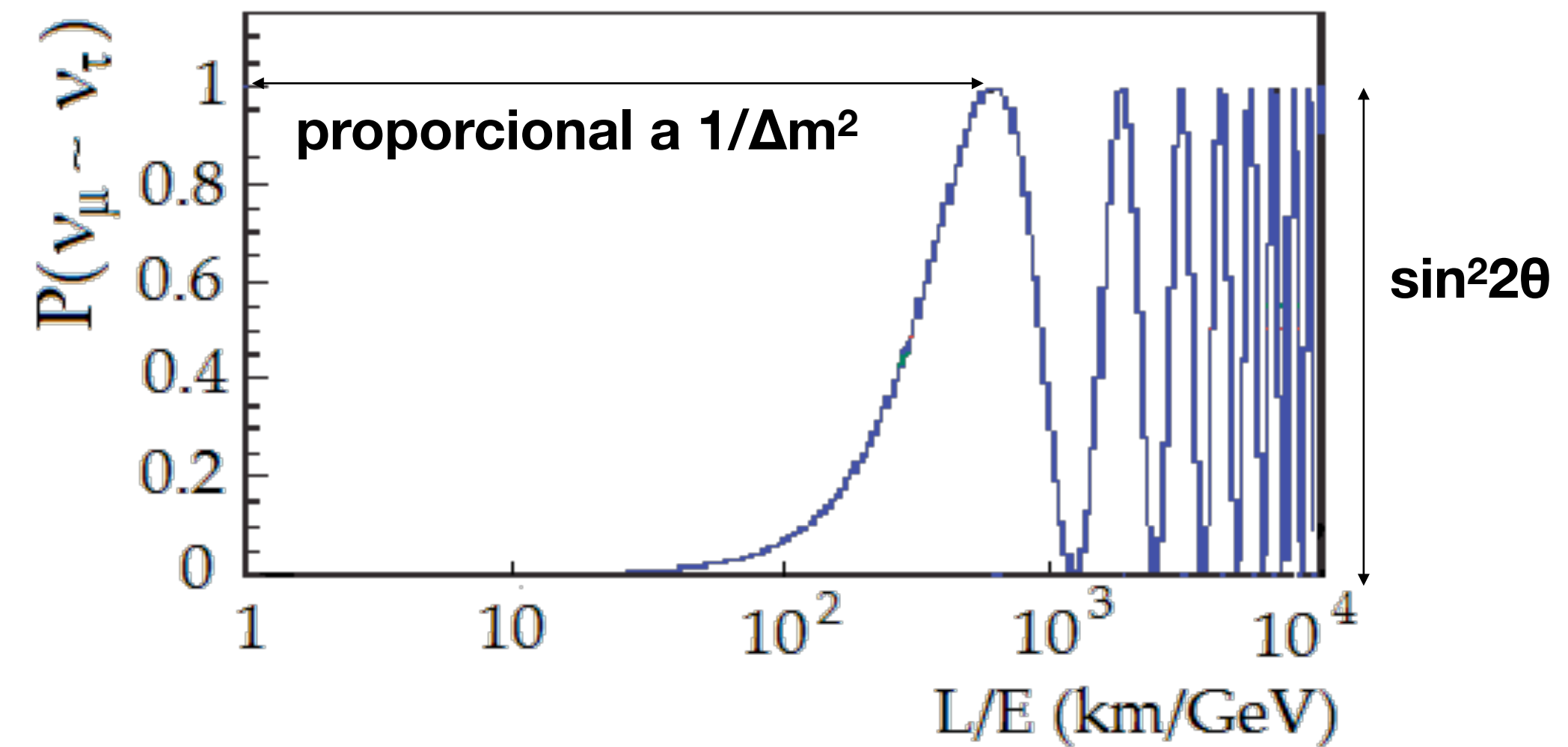
de nuevo en la playa

2002

- 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

¿A donde ponemos el foco? L/E

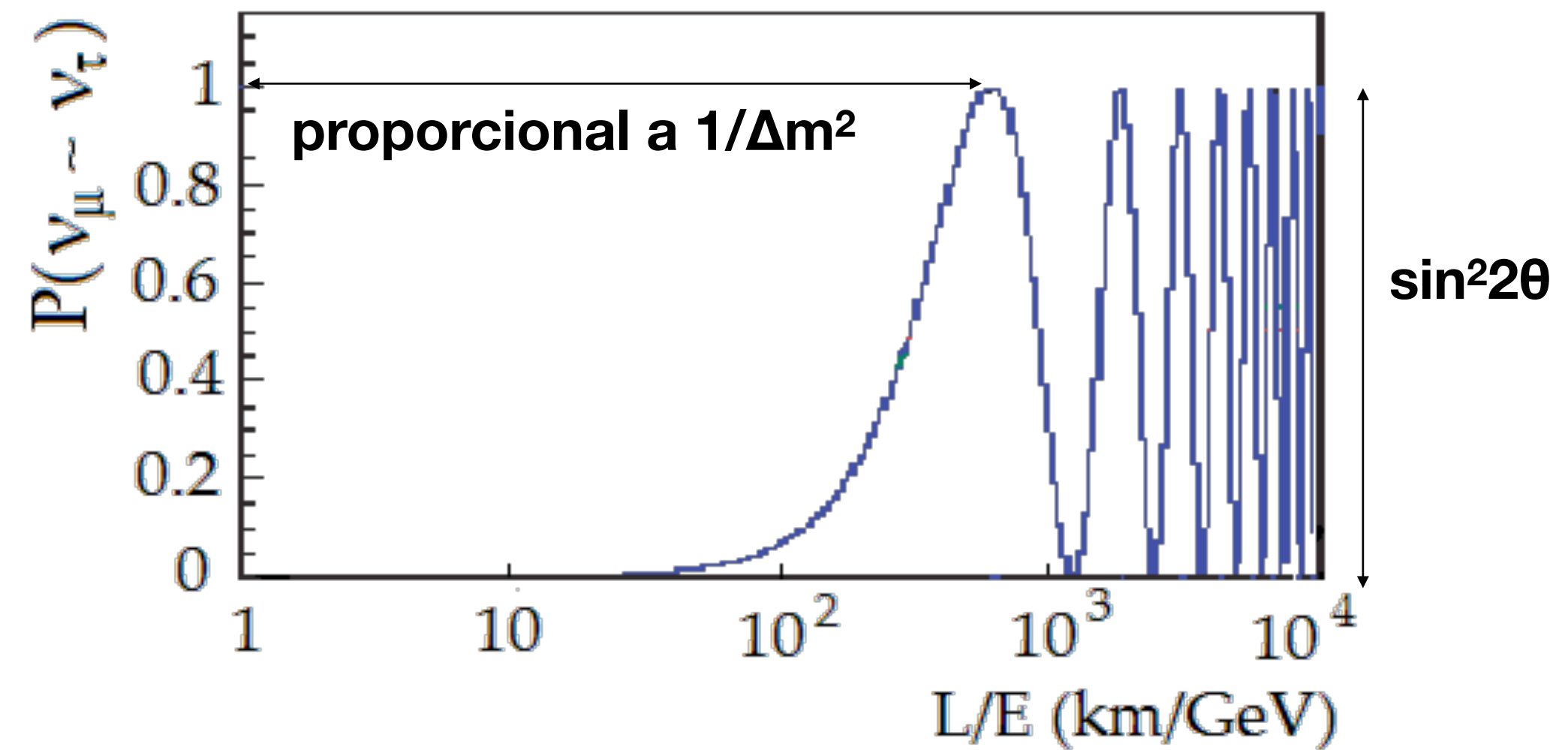
$$P_{\nu_\mu \nu_\tau} = \sin^2 2\theta \cdot \sin^2 \left(\frac{\Delta m^2 \cdot L}{4E_\nu} \right)$$



¿A donde ponemos el foco? L/E

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

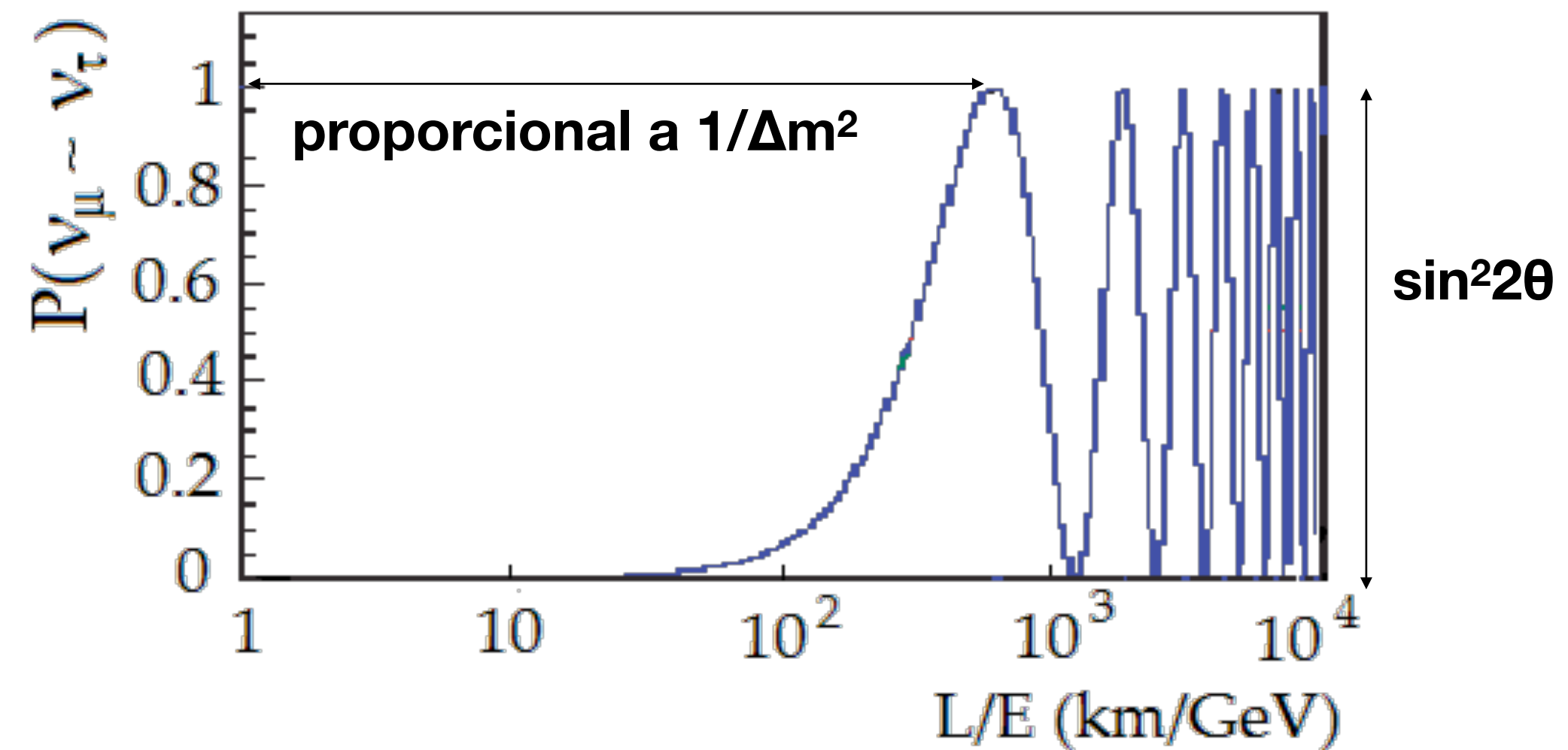
= 1



¿A donde ponemos el foco? L/E

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

= 1

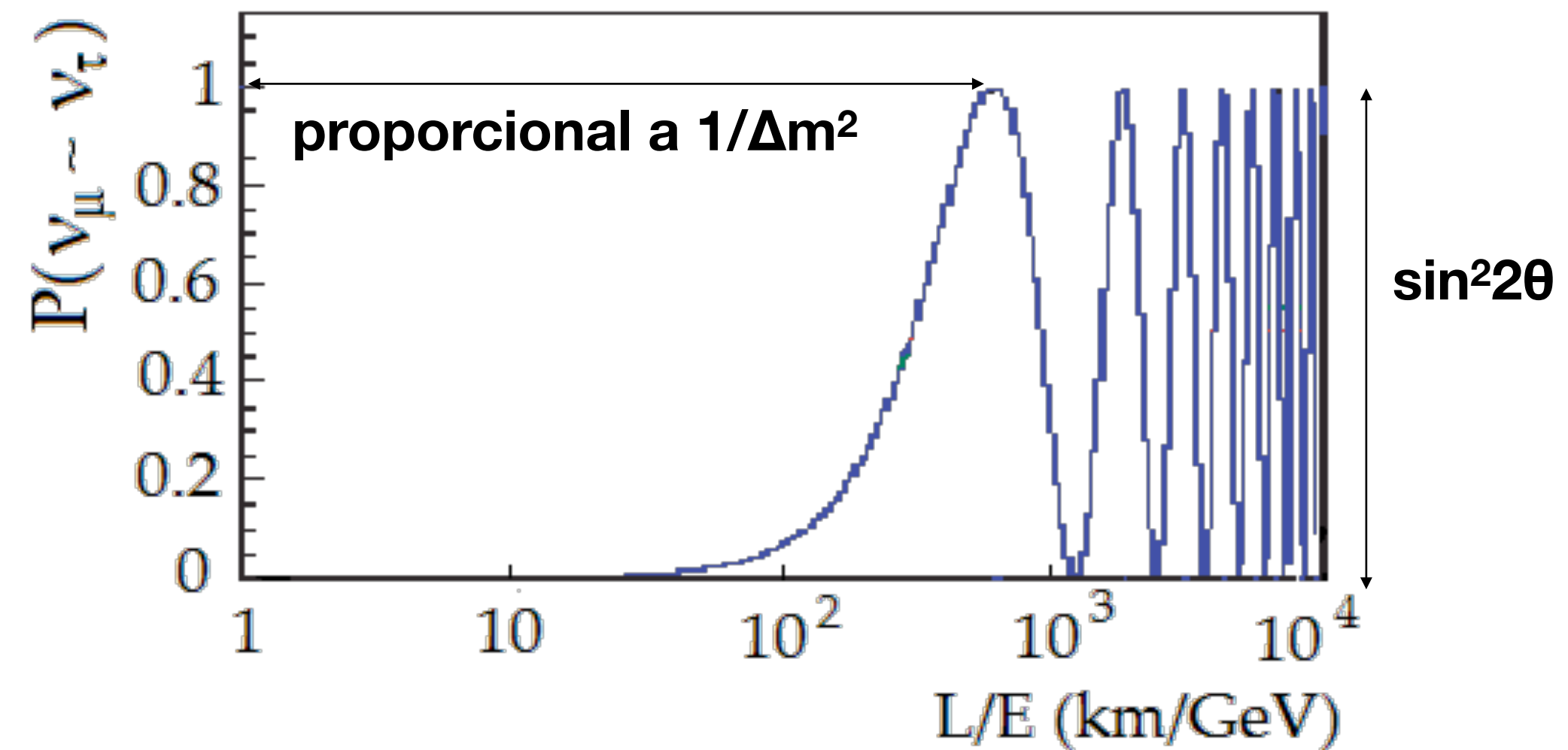


$$\frac{\Delta m_{23}^2 \cdot L}{4E} = \pi/2$$

¿A donde ponemos el foco? L/E

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

= 1

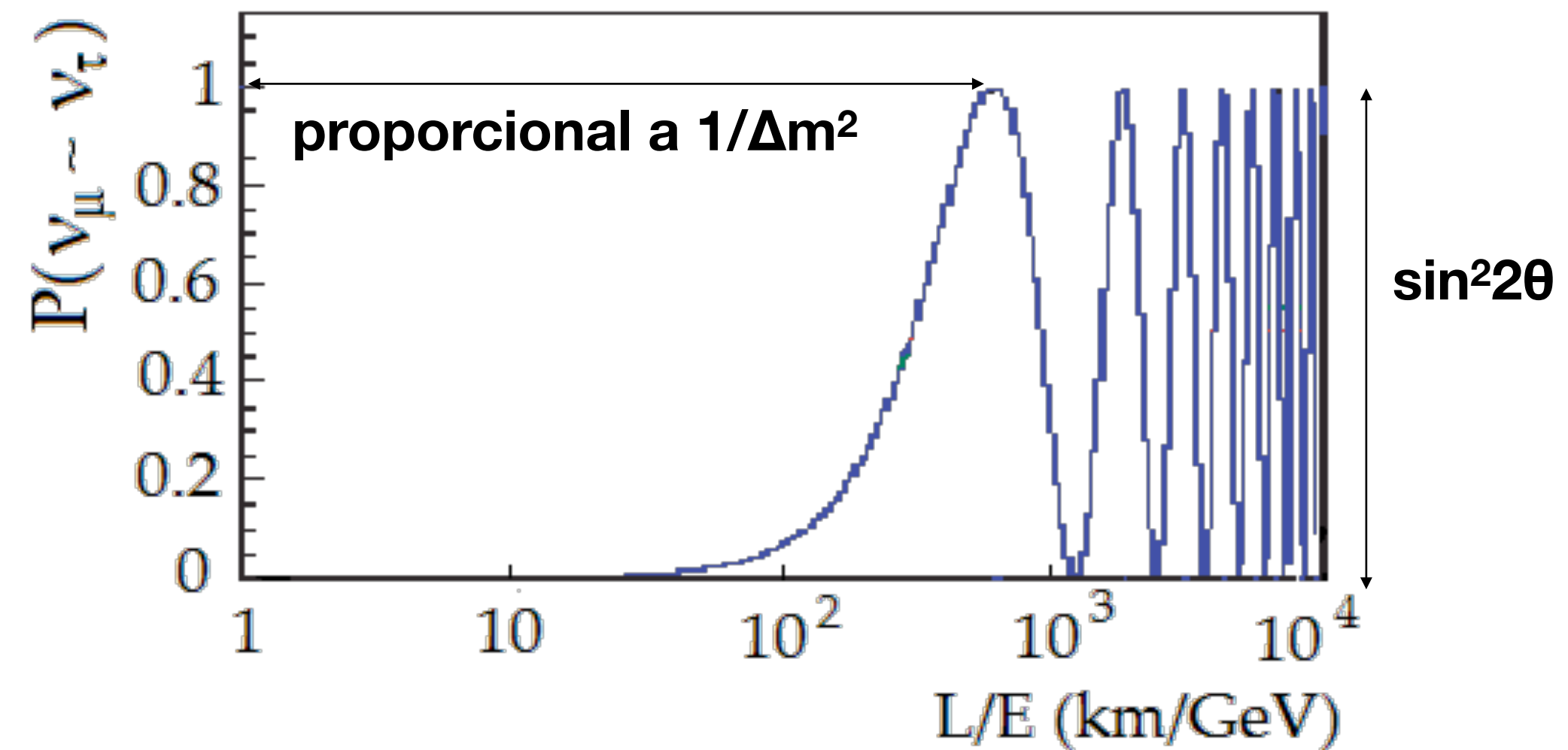


$$\frac{\Delta m_{23}^2 \cdot L}{4E} = \pi/2 \xrightarrow{\Delta m_{23}^2 = 2.45 \times 10^{-3} \text{ eV}^2} \frac{L}{E} \simeq 500 \text{ km/GeV}$$

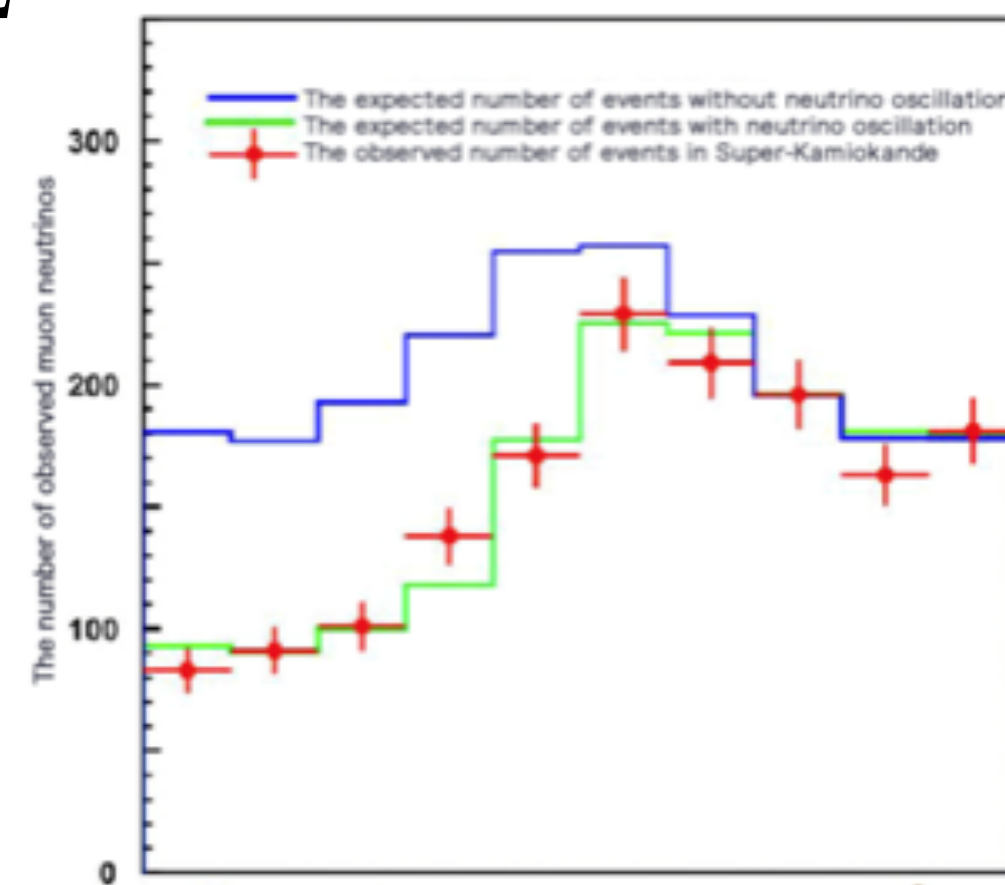
¿A donde ponemos el foco? L/E

$$P_{\nu_\mu \nu_\tau} = \sin^2 2\theta \cdot \boxed{\sin^2 \left(\frac{\Delta m^2 \cdot L}{4E_\nu} \right)}$$

= 1



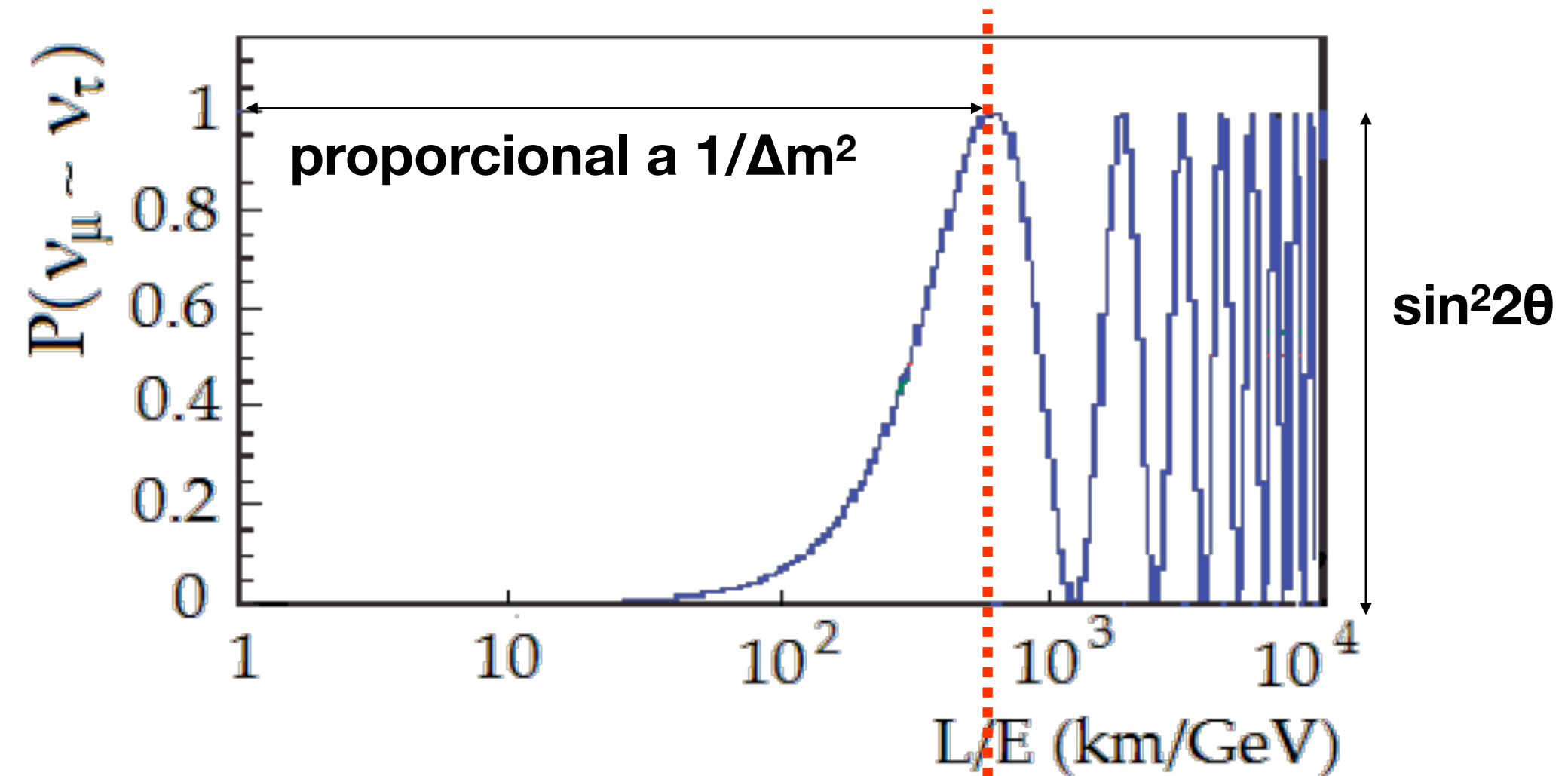
$$\frac{\Delta m_{23}^2 \cdot L}{4E} = \pi/2 \xrightarrow{\Delta m_{23}^2 = 2.45 \times 10^{-3} \text{ eV}^2} \frac{L}{E} \simeq 500 \text{ km/GeV}$$



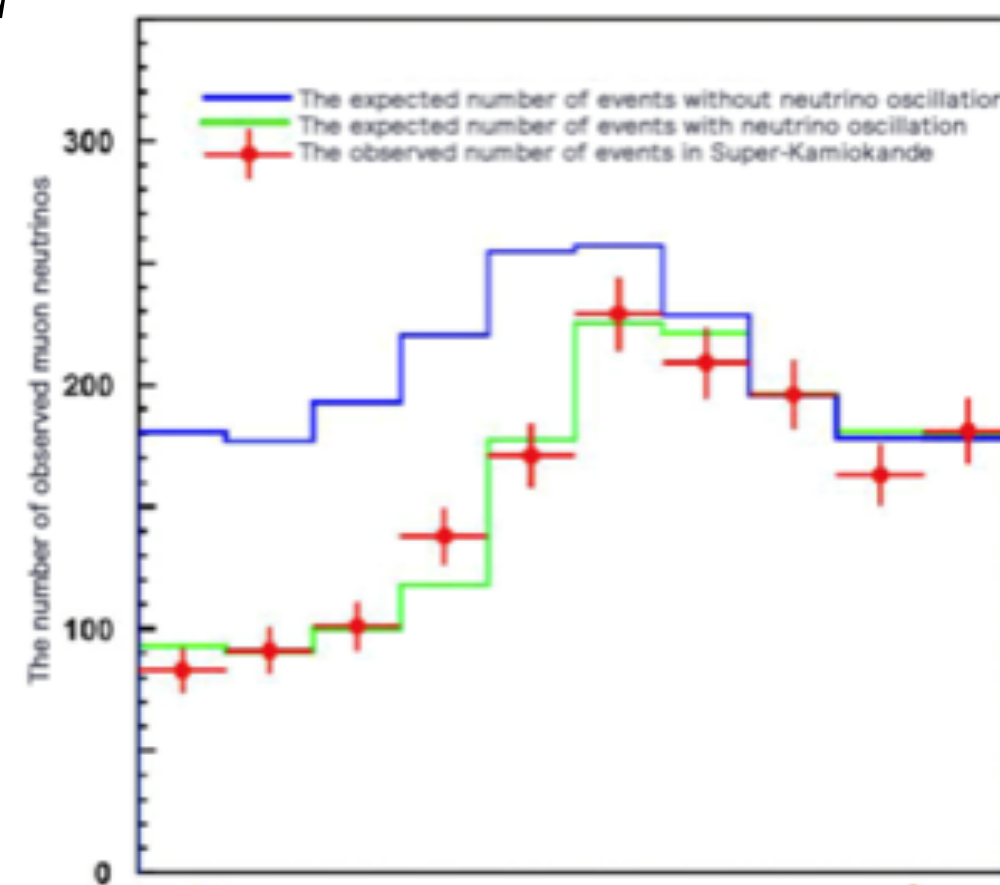
¿A donde ponemos el foco? L/E

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

= 1

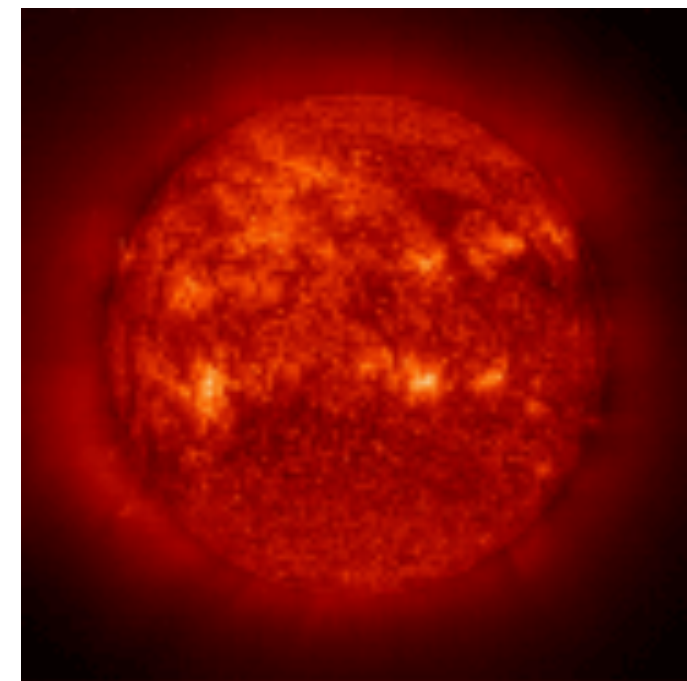


$$\frac{\Delta m_{23}^2 \cdot L}{4E} = \pi/2 \xrightarrow{\Delta m_{23}^2 = 2.45 \times 10^{-3} \text{ eV}^2} \frac{L}{E} \simeq 500 \text{ km/GeV}$$



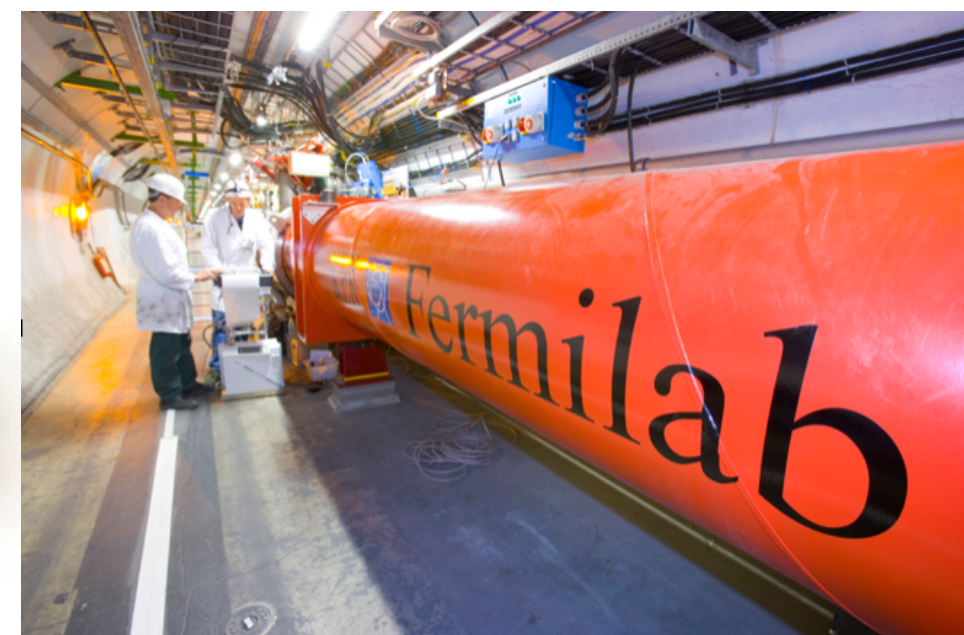
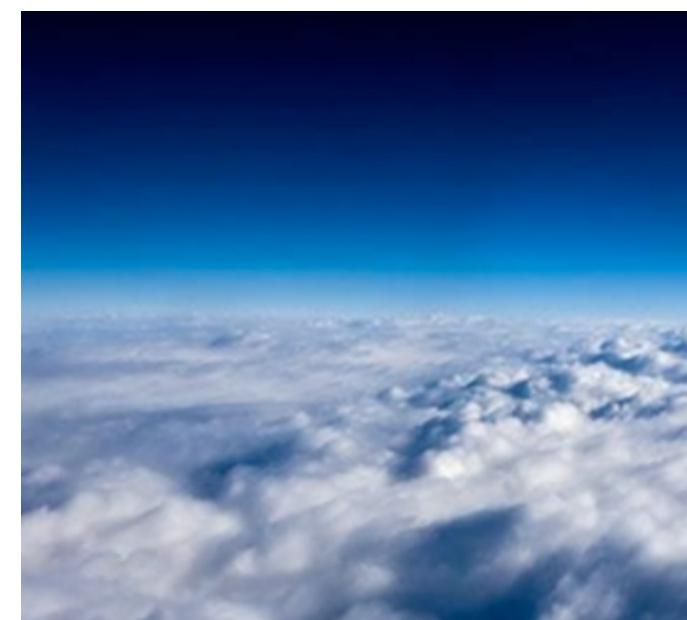
Fuentes artificiales

- Usando fuentes artificiales se han medido con precision las oscilaciones descubiertas mediante neutrinos atmosféricos y solares



$$\theta_{12}$$

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



$$\theta_{23}$$

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

Parámetros atmosféricos

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

autoestados débiles
autoestados de masa

Diagram illustrating the hierarchy of neutrino mass parameters:

- θ_{23} (highlighted in a red box)
- θ_{13}
- δ_{CP}
- θ_{12}

matriz de mezcla PMNS

Pontecorvo–Maki–Nakagawa–Sakata

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

sector atmosférico

interferencia

sector solar

Parámetros atmosféricos

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

autoestados débiles autoestados de masa

Δm^2_{12}
 Δm^2_{23}
 $2.45 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$

46°

θ_{23}

θ_{13}

δ_{CP}

θ_{12}

matriz de mezcla PMNS

Pontecorvo–Maki–Nakagawa–Sakata

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

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

sector atmosférico

interferencia

sector solar

Parámetros solares

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

autoestados débiles autoestados de masa

Δm^2_{12}
 Δm^2_{23}
 $2.45 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$

46°

θ_{23}

θ_{13}

δ_{CP}

θ_{12}

matriz de mezcla PMNS

Pontecorvo–Maki–Nakagawa–Sakata

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

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

sector atmosférico

interferencia

sector solar

Parámetros solares

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

autoestados débiles autoestados de masa

Δm^2_{12}
 Δm^2_{23}
 $2.45 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$

46°

θ_{23}

θ_{13}

δ_{CP}

θ_{12}

matriz de mezcla PMNS

Pontecorvo–Maki–Nakagawa–Sakata

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

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

sector atmosférico

interferencia

sector solar

Parámetros solares

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

autoestados débiles autoestados de masa

Δm^2_{12}
 Δm^2_{23}
 $2.45 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$

46°

θ_{23}

θ_{13}

δ_{CP}

θ_{12}

matriz de mezcla PMNS

Pontecorvo–Maki–Nakagawa–Sakata

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

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

sector atmosférico

interferencia

sector solar

Parámetros solares

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

autoestados débiles autoestados de masa

$7.53 \times 10^{-5} \text{ eV}^2$
 Δm^2_{12}
 $2.45 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$
 Δm^2_{23}

46°

θ_{23}

θ_{13}

δ_{CP}

θ_{12}

33°

matriz de mezcla PMNS

Pontecorvo–Maki–Nakagawa–Sakata

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

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

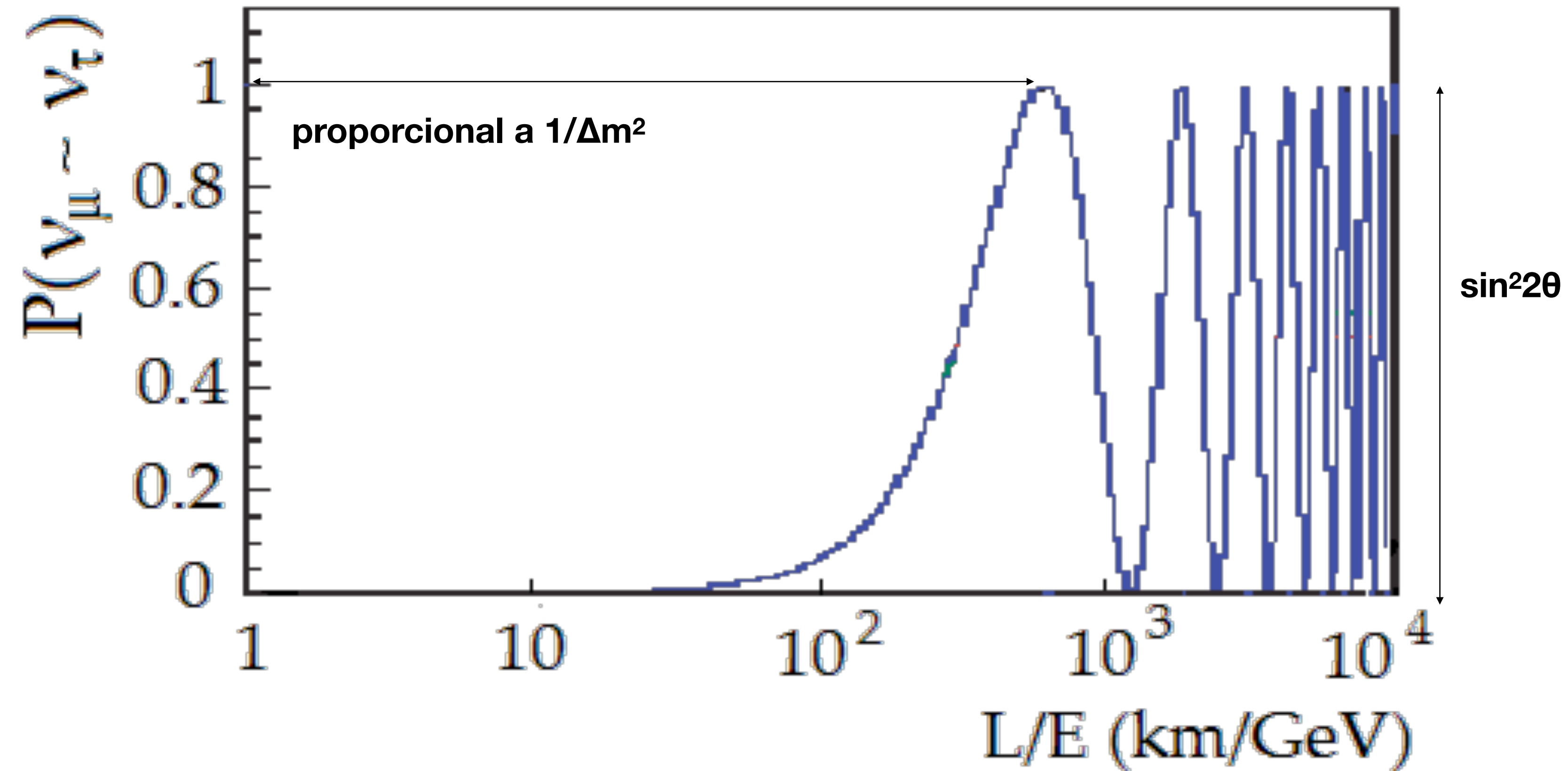
sector atmosférico

interferencia

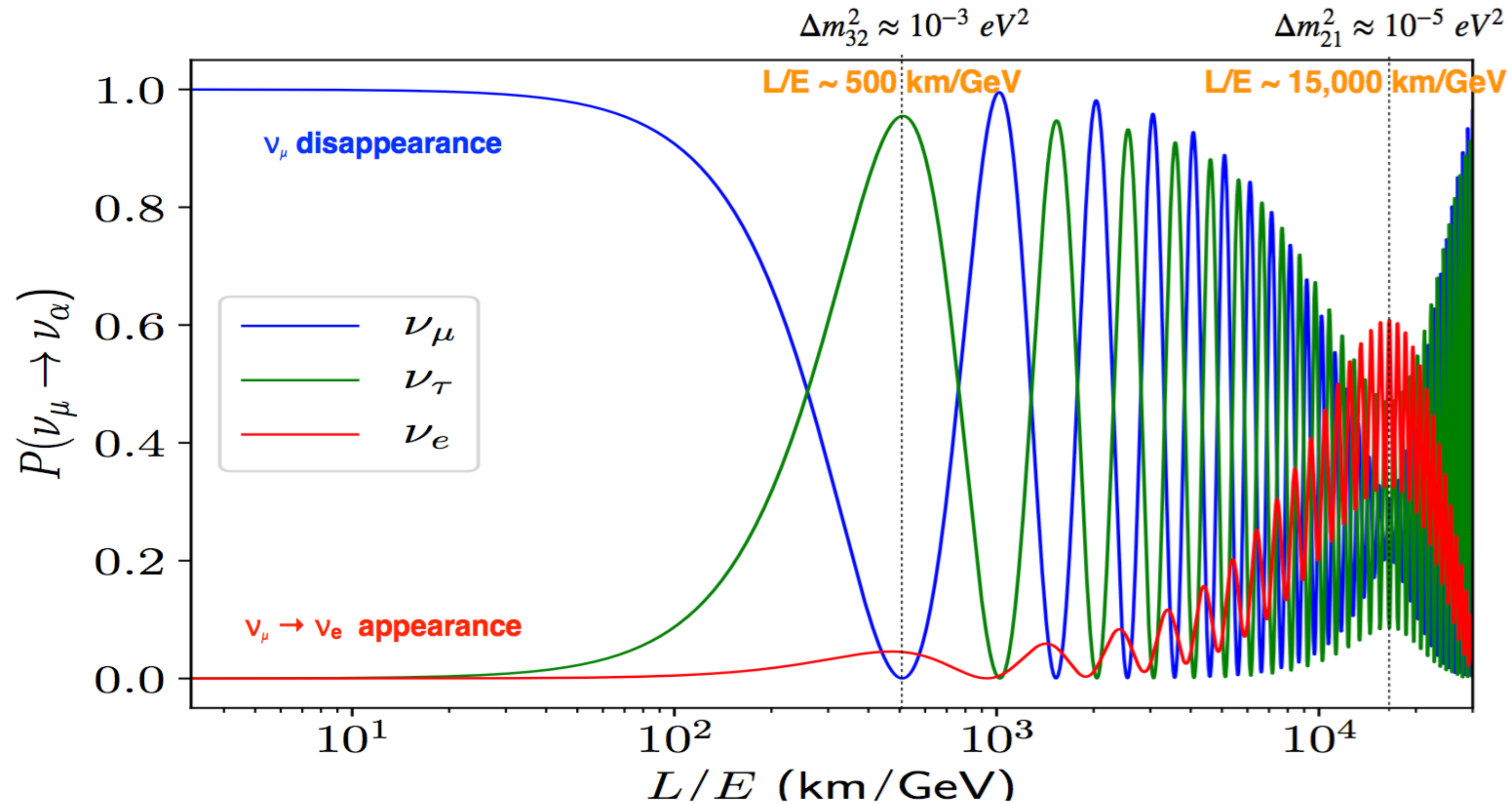
sector solar

Esta era la situación en 2011

Oscilación para dos neutrinos



Oscilación para tres neutrinos



- La información sobre θ_{13} y δ_{CP} está en la oscilación $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ (**la línea roja**)



Oscillation para tres neutrinos

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

autoestados débiles autoestados de masa

$7.53 \times 10^{-5} \text{ eV}^2$
 (2.4%)
 Δm^2_{12}
 $2.45 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$
 (2%)
 Δm^2_{23}

46° (8%)

θ_{23}

θ_{13}

δ_{CP}

θ_{12}

33° (4%)

matriz de mezcla PMNS

Pontecorvo–Maki–Nakagawa–Sakata

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

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

sector atmosférico

interferencia

sector solar

EL PROBLEMA DE LOS 3 CUERPOS

Oscillation para tres neutrinos

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

autoestados débiles autoestados de masa

$7.53 \times 10^{-5} \text{ eV}^2$
 (2.4%)
 Δm^2_{12}
 $2.45 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$
 (2%)
 Δm^2_{23}

46° (8%)

θ_{23}

θ_{13}

δ_{CP}

θ_{12}

33° (4%)

matriz de mezcla PMNS

Pontecorvo–Maki–Nakagawa–Sakata

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

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

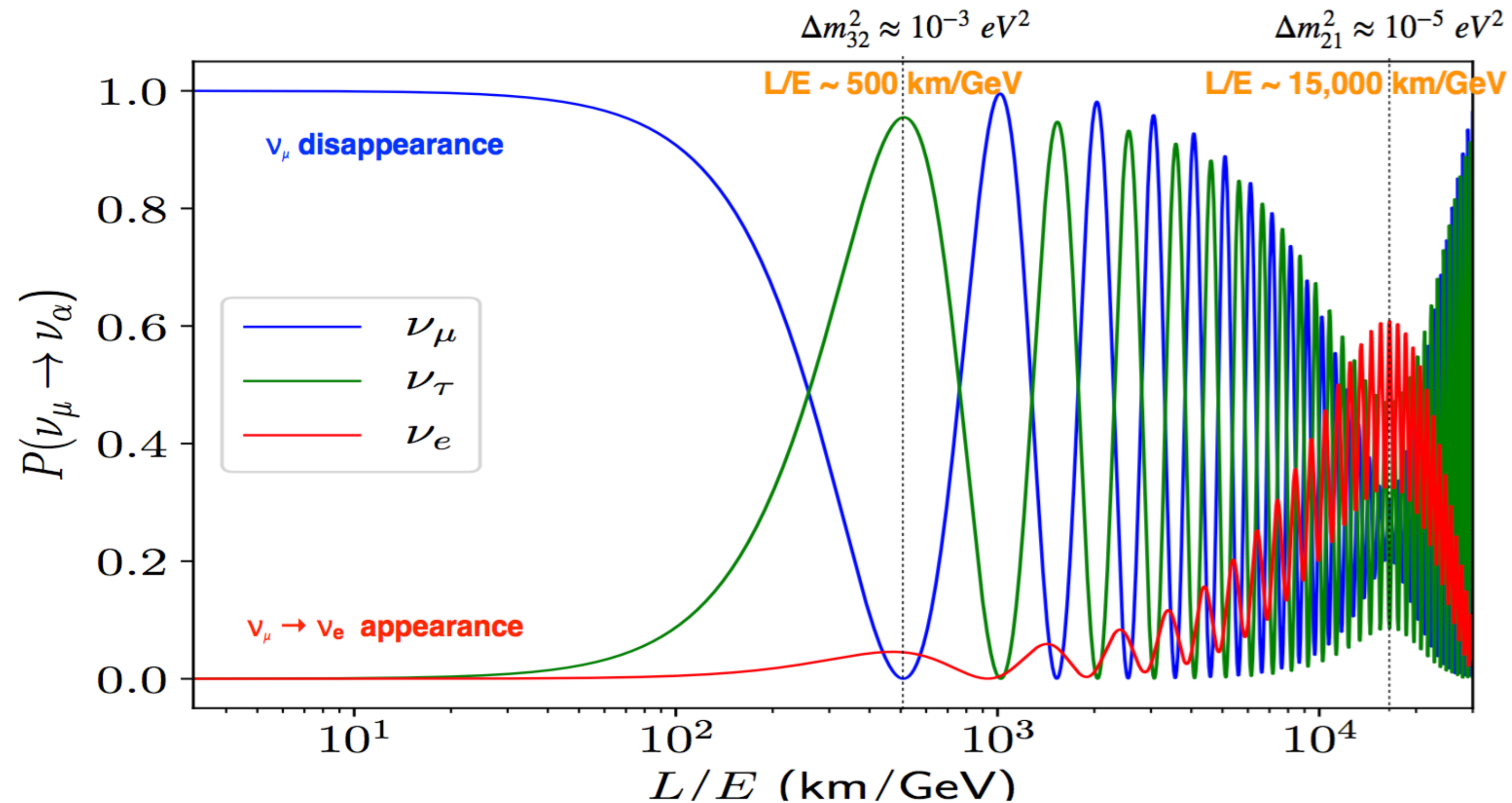
sector atmosférico

interferencia

sector solar

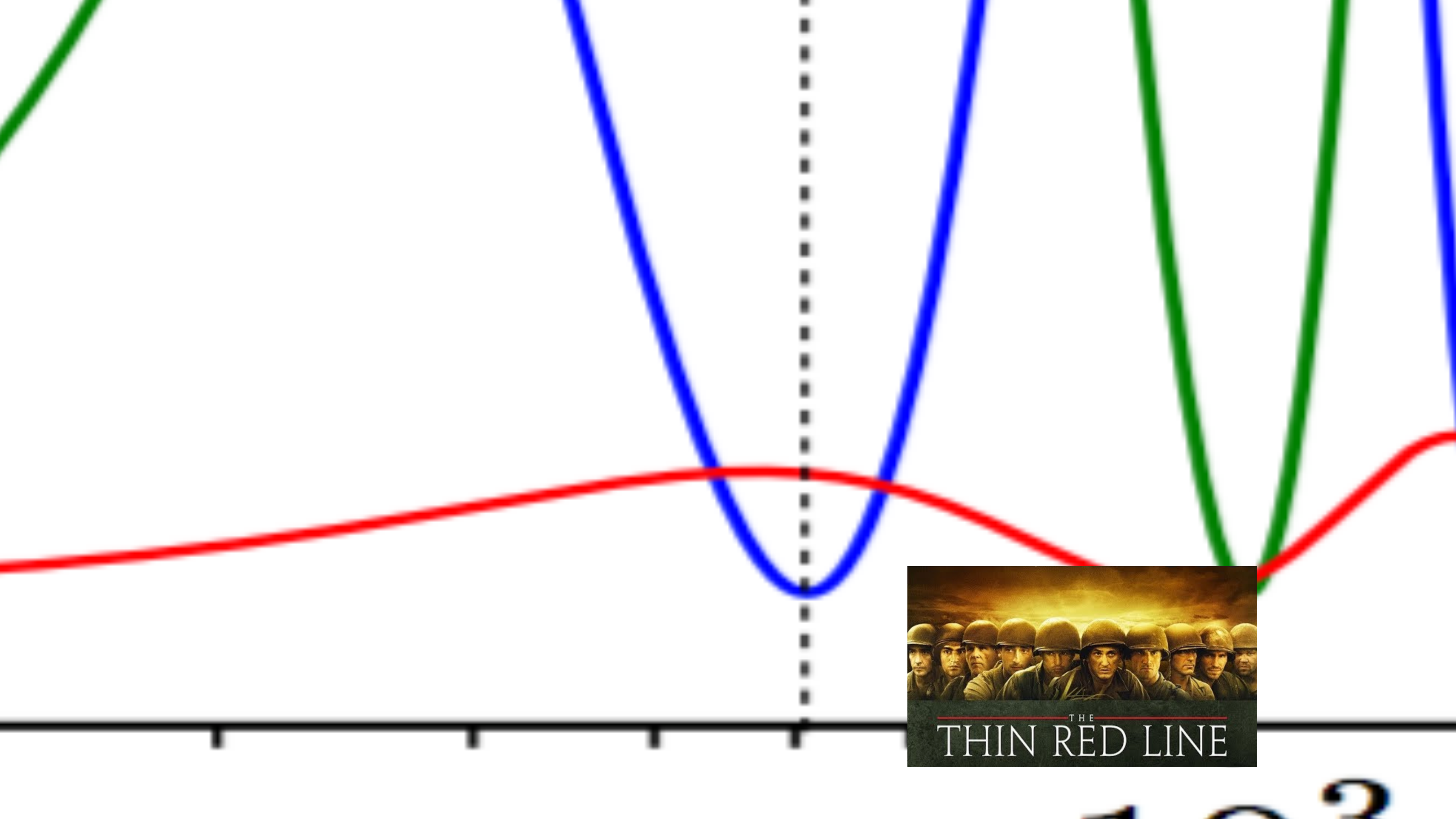
EL PROBLEMA DE LOS 3 CUERPOS

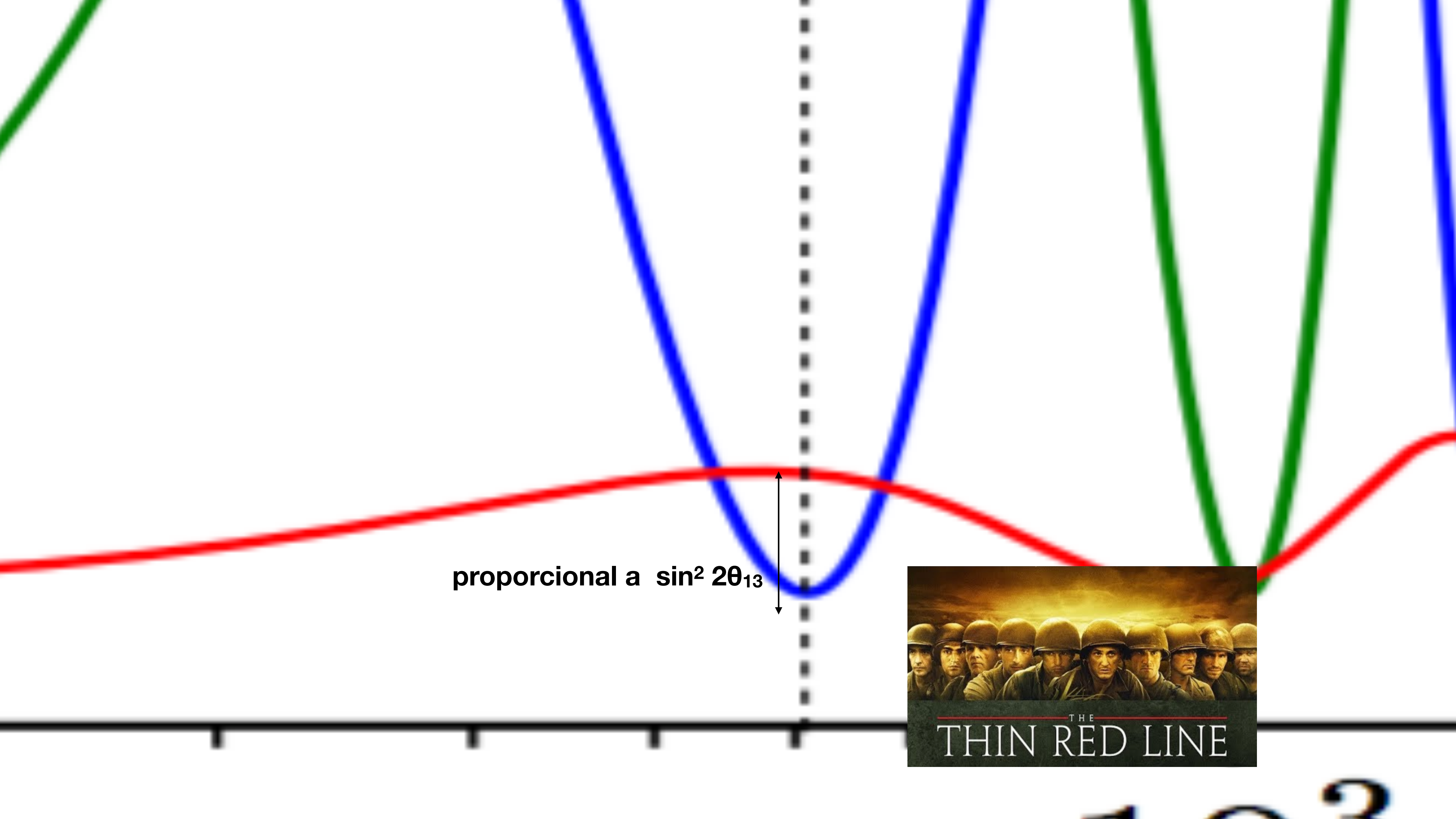
Oscilación para tres neutrinos



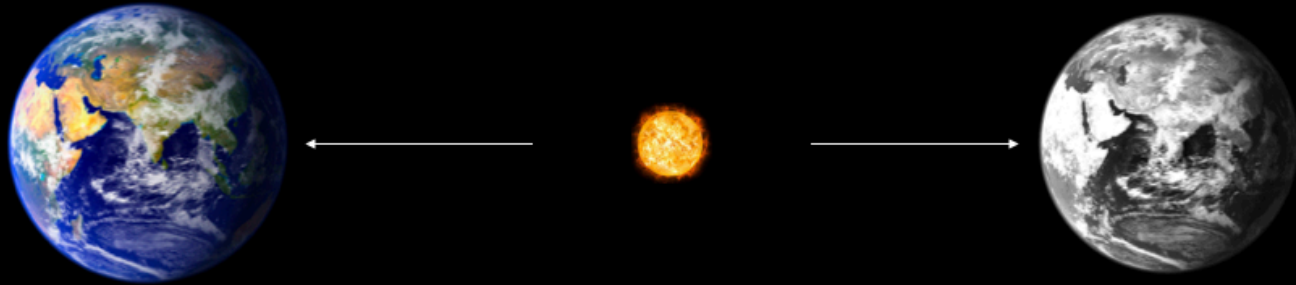
- La información sobre θ_{13} y δ_{CP} está en la oscilación $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ (**la línea roja**)







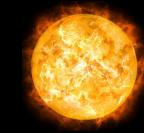
Los detalles de este pequeño
pico (posición y tamaño)
dependen también de δ_{CP}



proporcional a $\sin^2 2\theta_{13}$



Hace 13000 millones de años el Big Bang produjo iguales cantidades de materia y antimateria



Hace 13000 millones de años el Big Bang produjo iguales cantidades de materia y antimateria

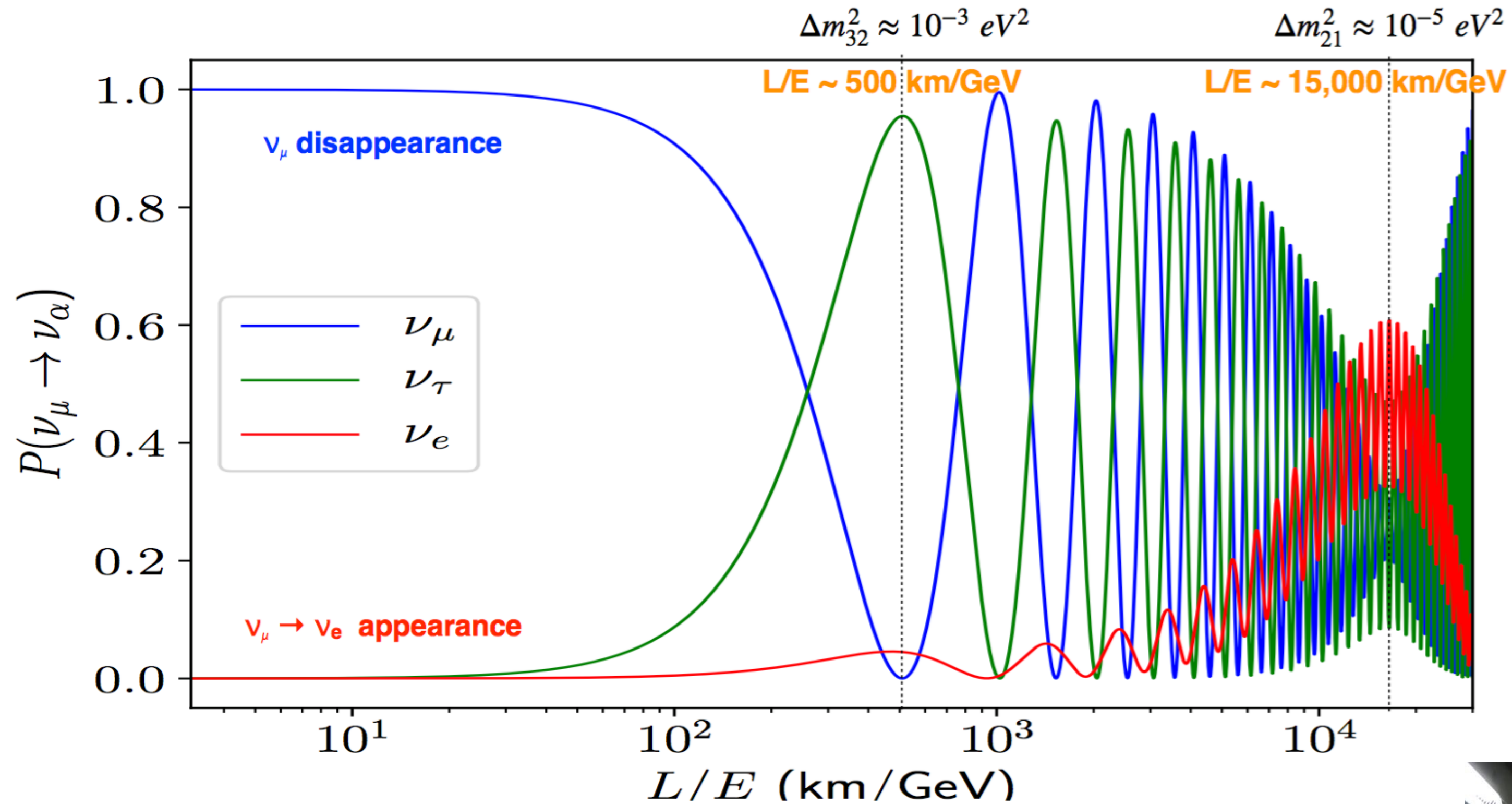
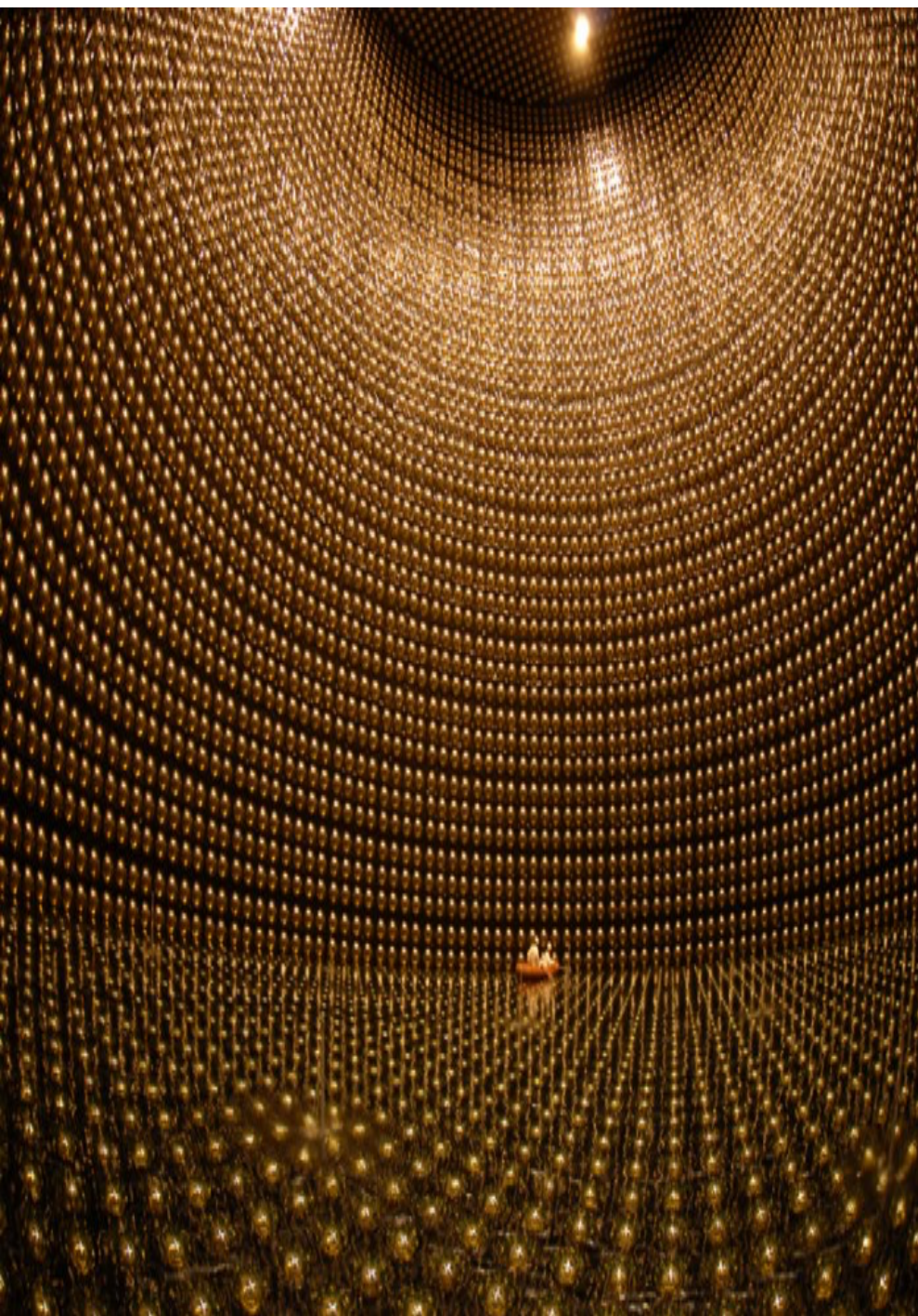


Pero por alguna razón la anti-materia fue aniquilada. Por qué ?

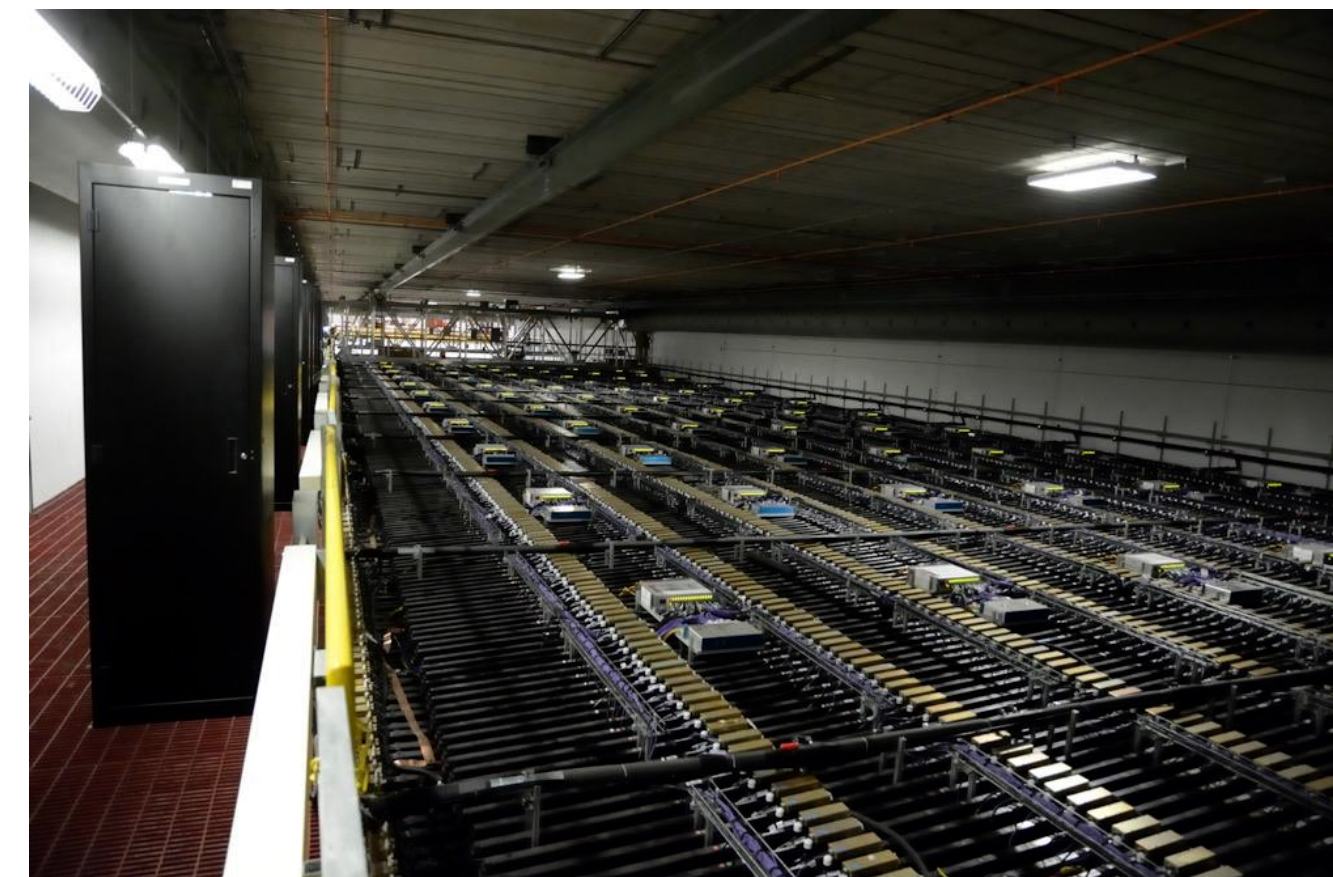
Los neutrinos podrían tener la respuesta: **violación de CP**

Necesitamos ir mas allá

T2K and SK



NOvA



- Los experiments actuales no son lo suficientemente precisos para estudiar estos detalles

... hacia el futuro

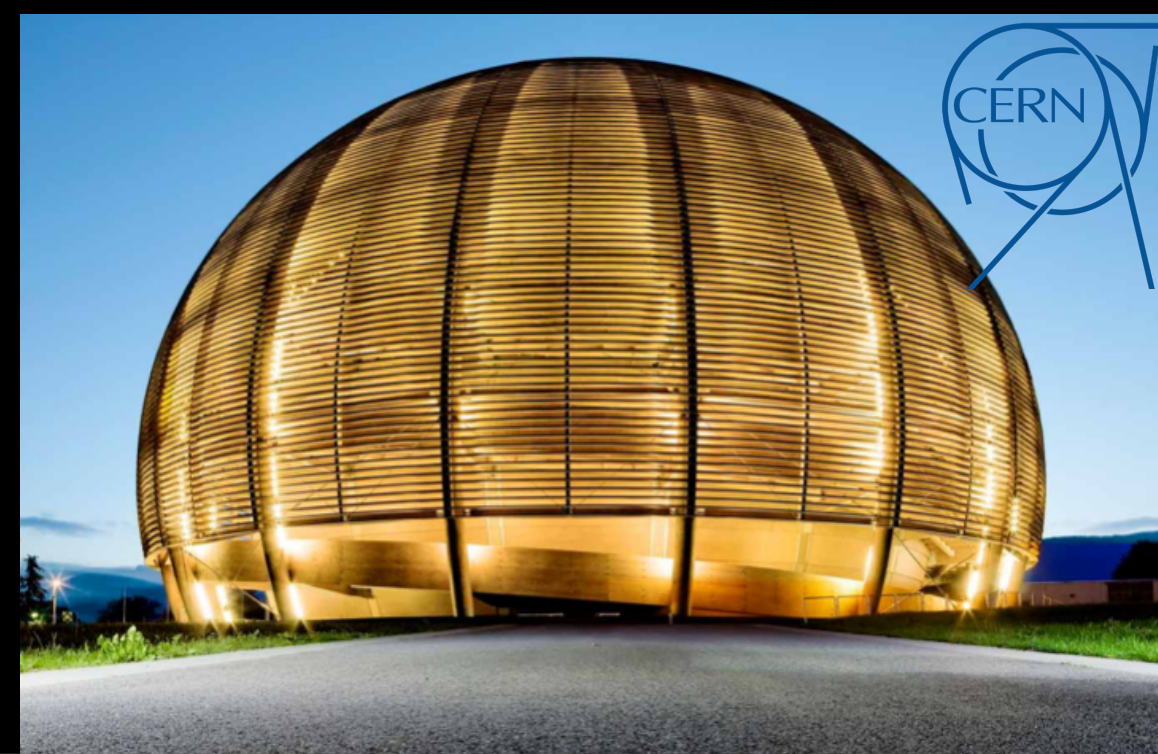
• Necesitamos haces
mas potentes.
• Y detectores mas
grandes y precisos

Como hacer un haz de neutrinos



Como hacer un haz de neutrinos







DEEP UNDERGROUND

NEUTRINO EXPERIMENT



SURF
(Dakota del Sur)

1300 km

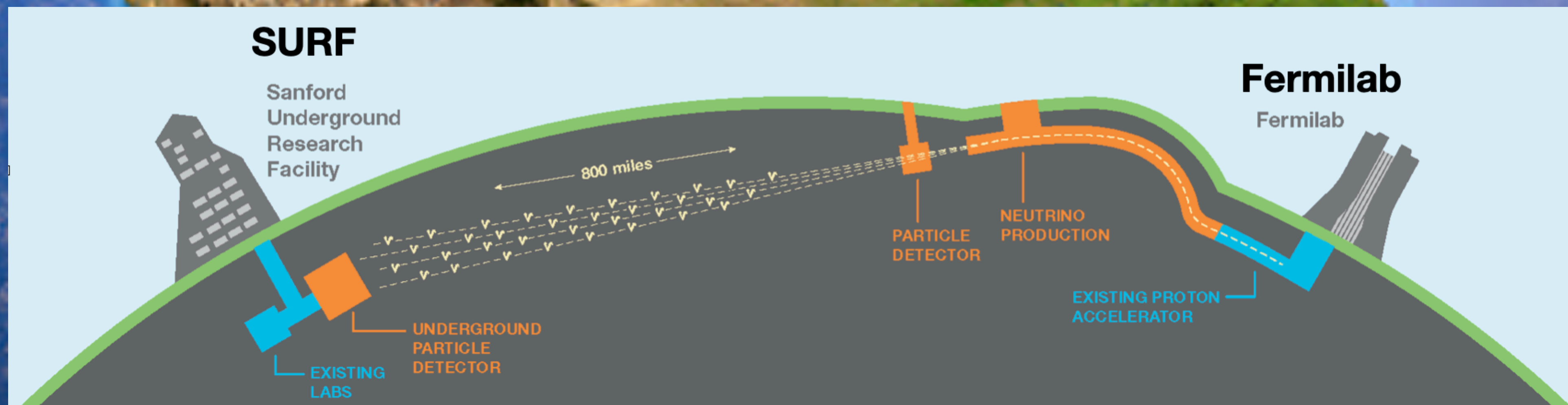
Fermilab
(cerca de Chicago)



SURF
(Dakota del Sur)

1300 km

Fermilab
(cerca de Chicago)



SURF

Sanford
Underground
Research
Facility

Fermilab

Fermilab

800 miles

PARTICLE
DETECTOR

NEUTRINO
PRODUCTION

EXISTING PROTON
ACCELERATOR

UNDERGROUND
PARTICLE
DETECTOR

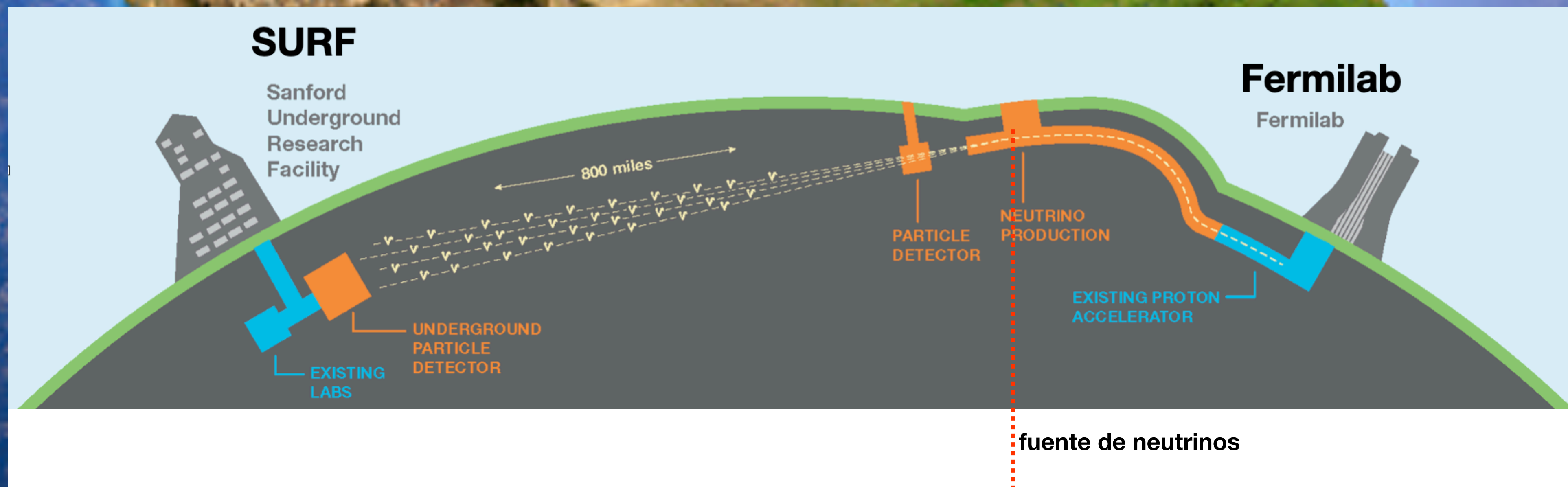
EXISTING
LABS



SURF
(Dakota del Sur)

1300 km

Fermilab
(cerca de Chicago)



SURF

Sanford
Underground
Research
Facility

Fermilab

Fermilab

800 miles

PARTICLE
DETECTOR

NEUTRINO
PRODUCTION

EXISTING PROTON
ACCELERATOR

UNDERGROUND
PARTICLE
DETECTOR

EXISTING
LABS

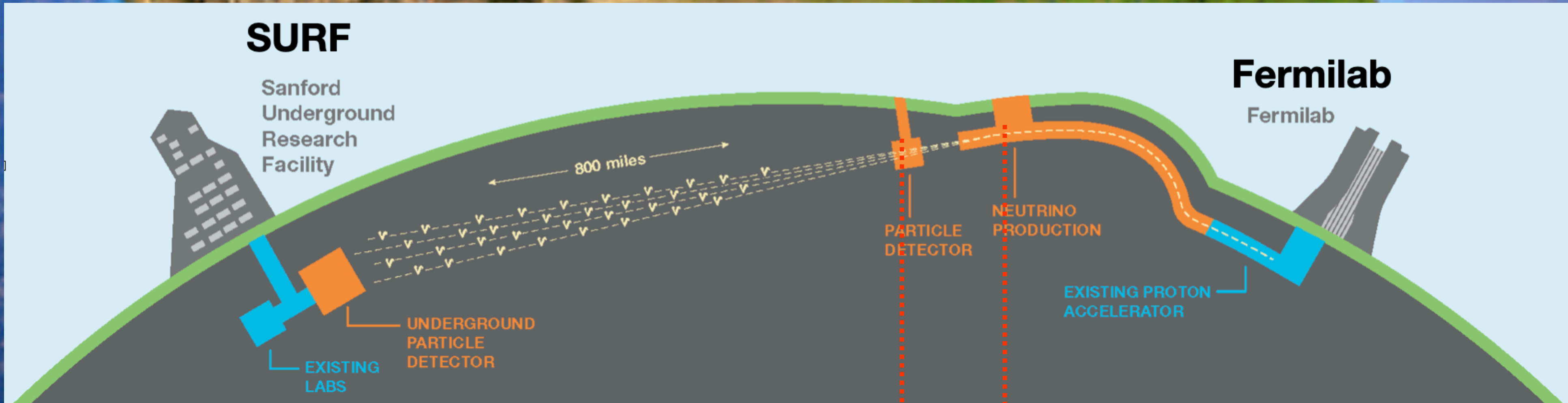
fuente de neutrinos



SURF
(Dakota del Sur)

1300 km

Fermilab
(cerca de Chicago)



SURF

Sanford
Underground
Research
Facility

Fermilab

Fermilab

800 miles

PARTICLE
DETECTOR

NEUTRINO
PRODUCTION

EXISTING PROTON
ACCELERATOR

UNDERGROUND
PARTICLE
DETECTOR

EXISTING
LABS

detector cercano

fuelle de neutrinos

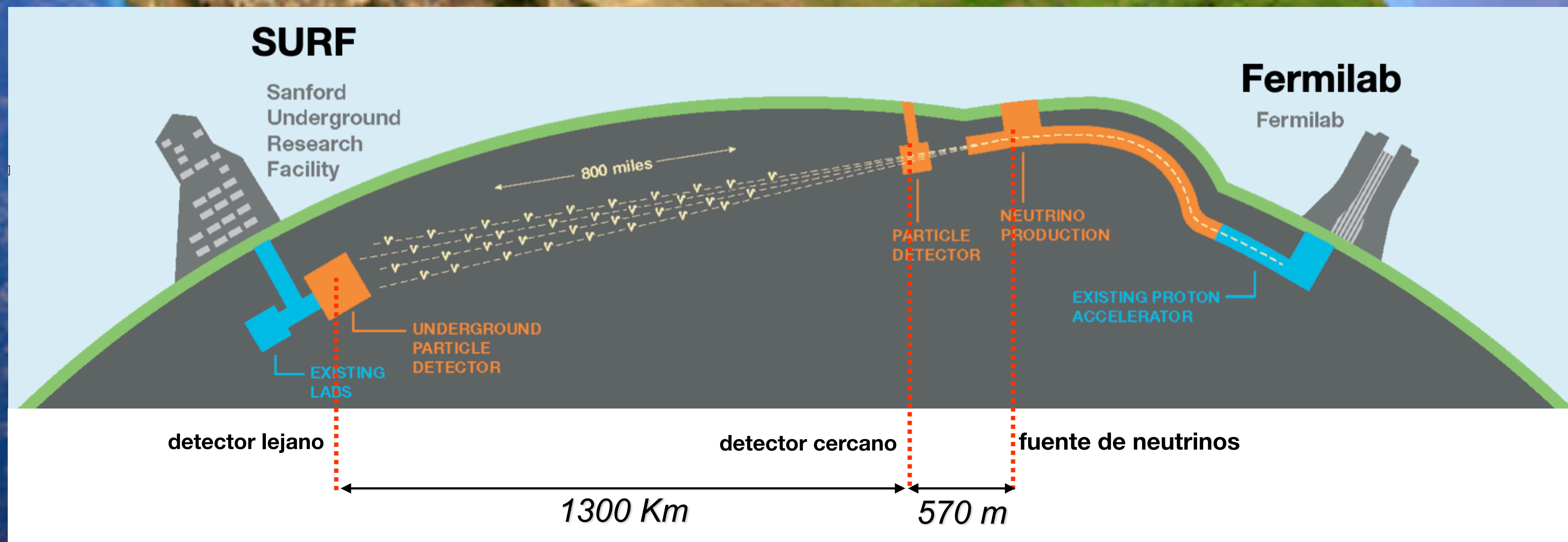
570 m



SURF
(Dakota del Sur)

1300 km

Fermilab
(cerca de Chicago)



SURF

Sanford
Underground
Research
Facility

Fermilab

Fermilab

800 miles

PARTICLE
DETECTOR

NEUTRINO
PRODUCTION

EXISTING PROTON
ACCELERATOR

EXISTING
LABS

UNDERGROUND
PARTICLE
DETECTOR

detector lejano

detector cercano

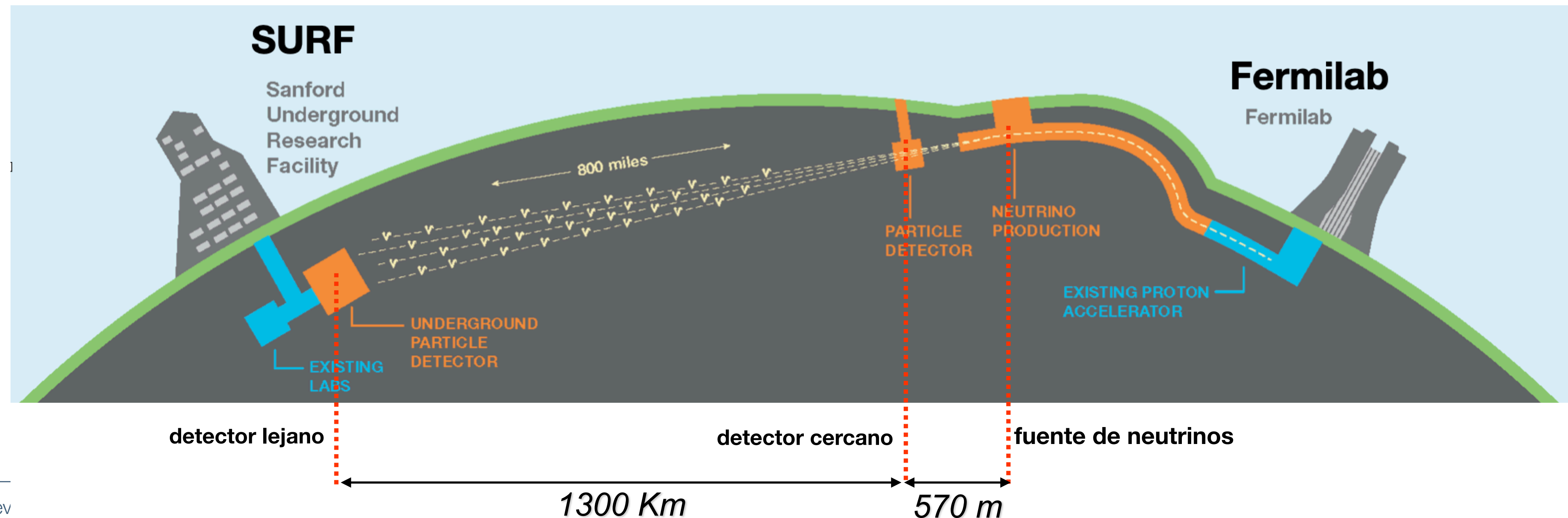
fuerza de neutrinos

1300 Km

570 m

Distancia y energía

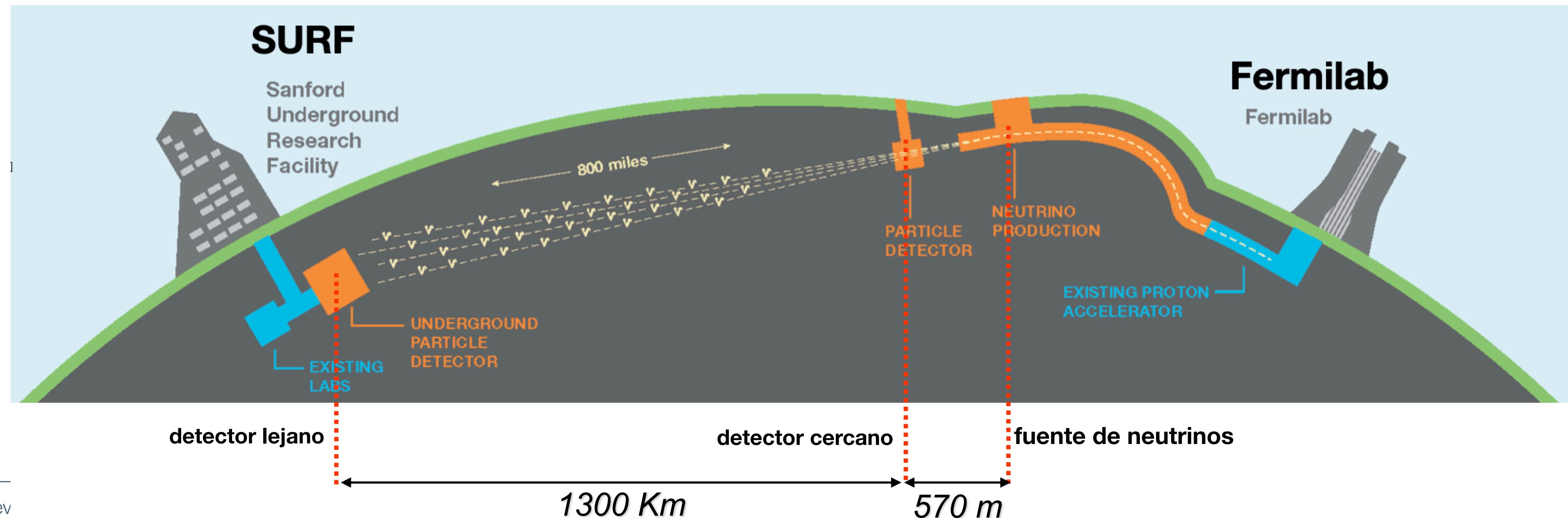
- Puesto que el valor de Δm^2_{23} es conocido, podemos calcular la energía del beam para situarnos en el máximo de la oscilación



Distancia y energía

- Puesto que el valor de Δm^2_{23} es conocido, podemos calcular la energía del beam para situarnos en el máximo de la oscilación

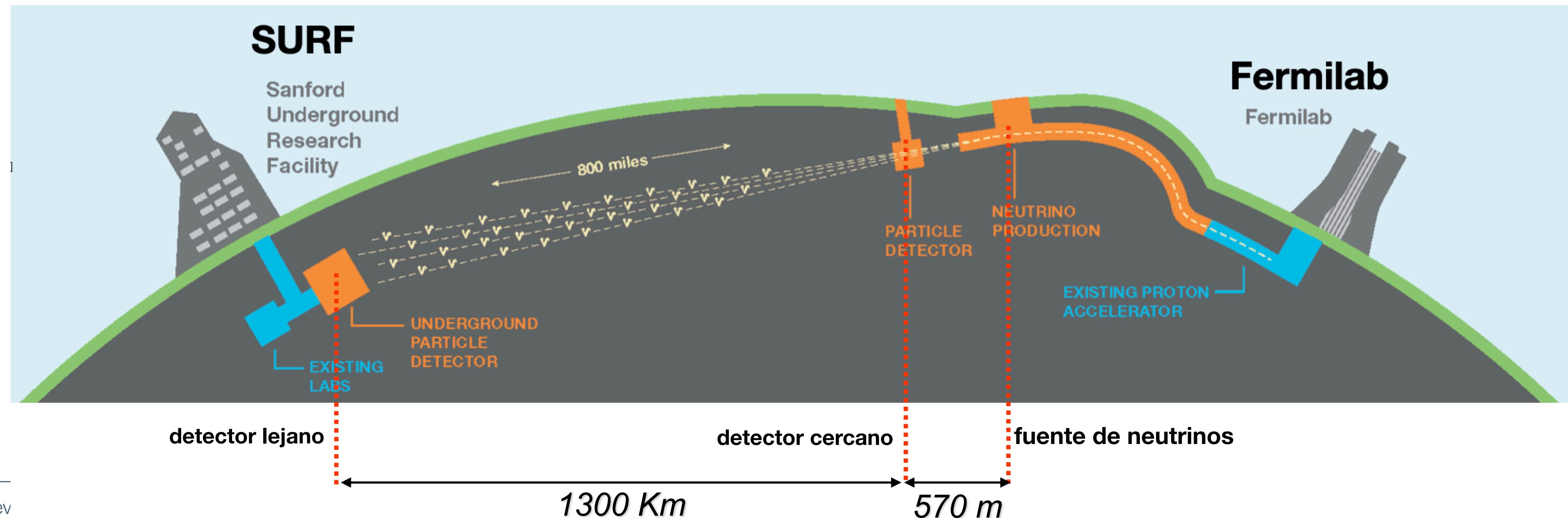
$$\frac{L}{E} \simeq 500 \text{ km/GeV}$$



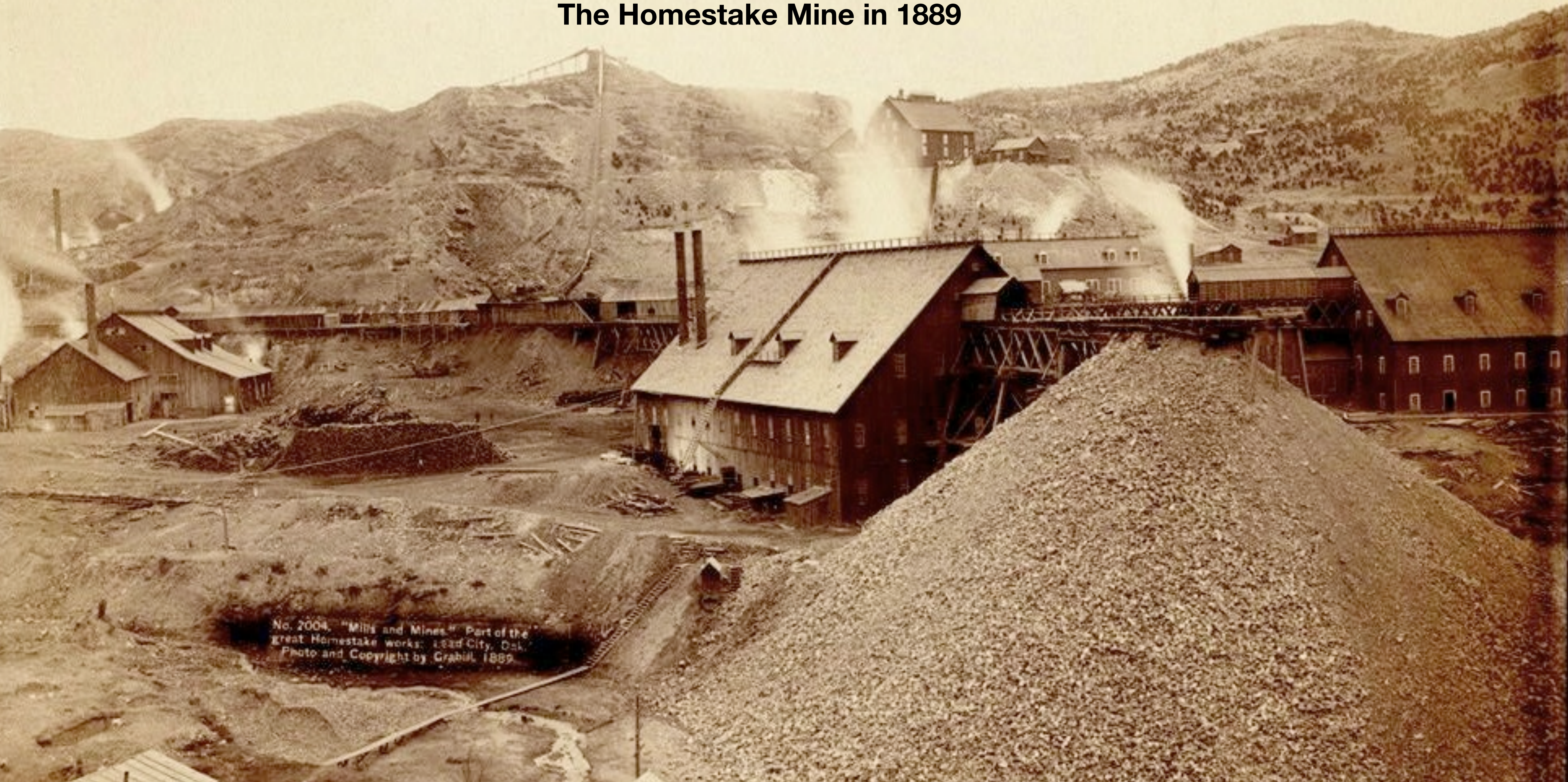
Distancia y energía

- Puesto que el valor de Δm^2_{23} es conocido, podemos calcular la energía del beam para situarnos en el máximo de la oscilación

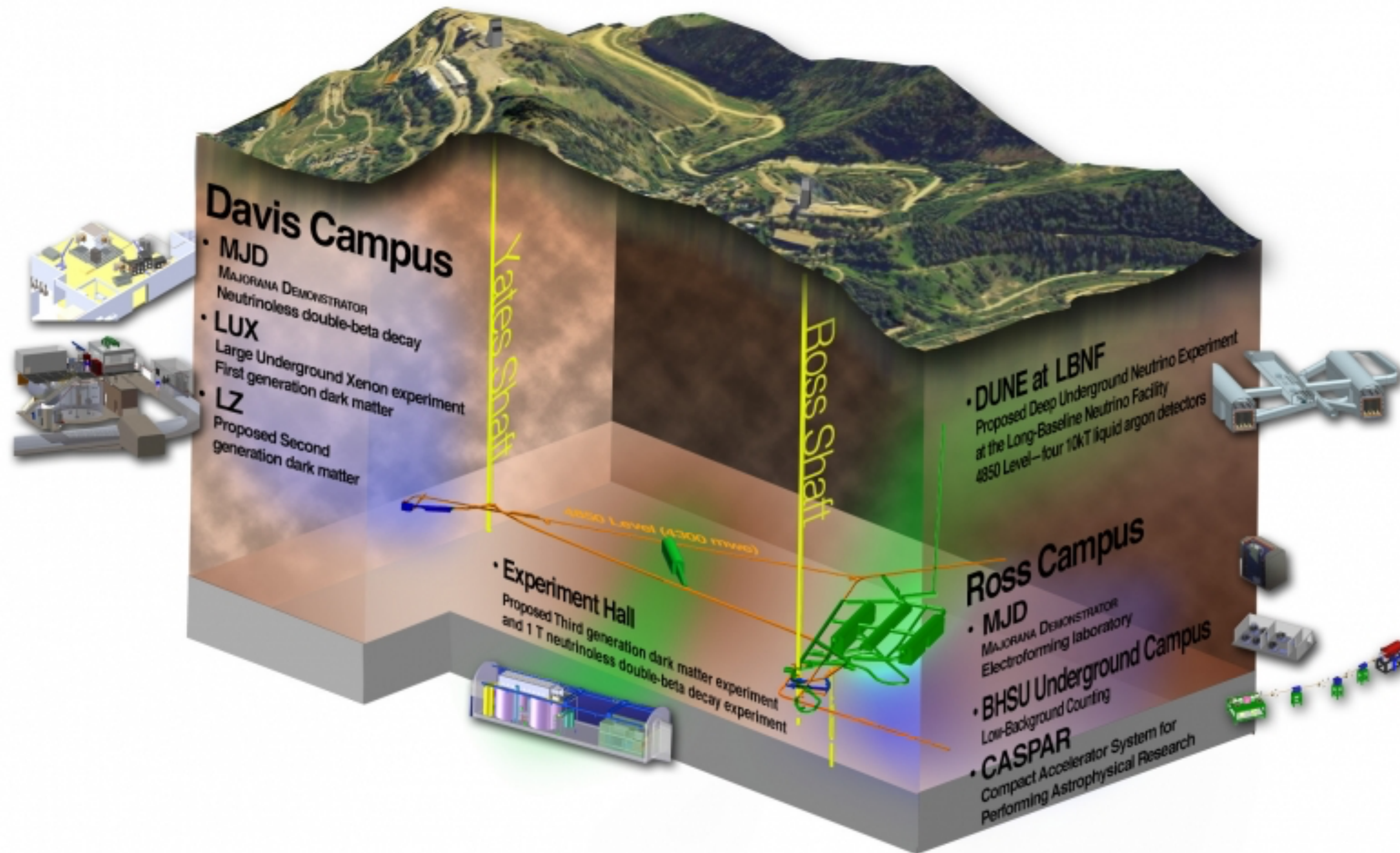
$$\frac{L}{E} \simeq 500 \text{ km/GeV} \longrightarrow E \sim 1300/500 = 2.6 \text{ GeV}$$



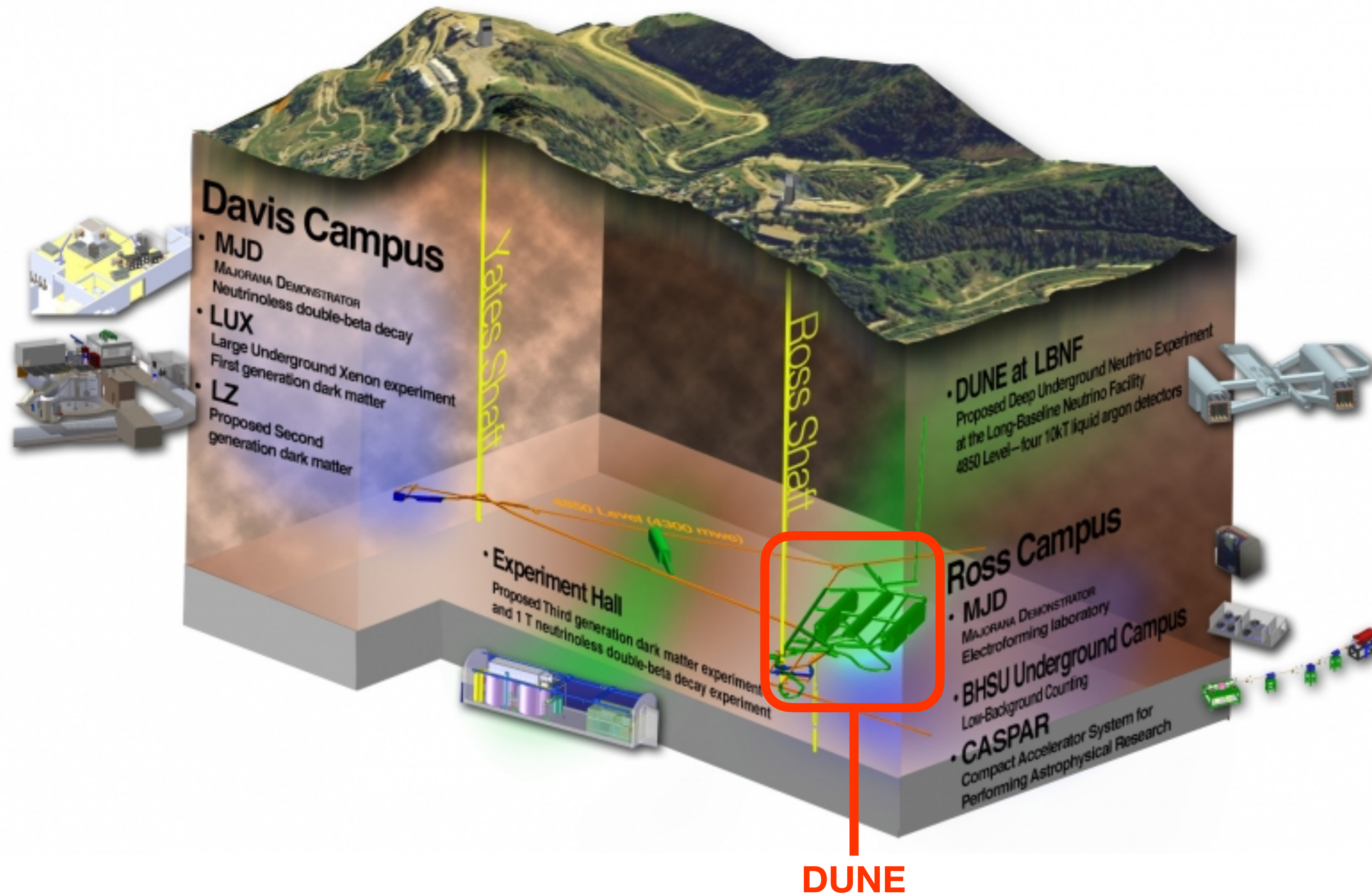
The Homestake Mine in 1889



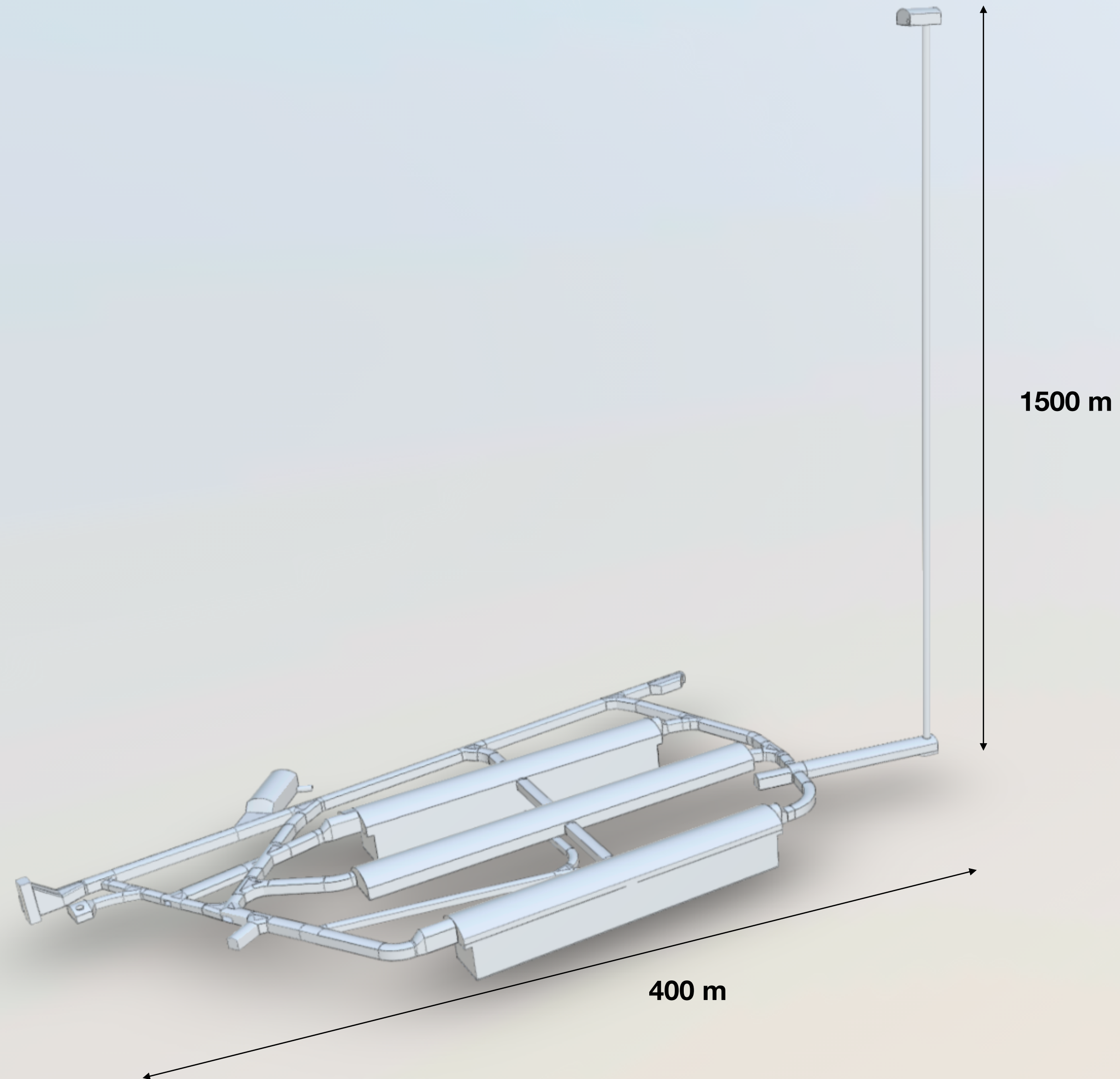
En la vieja mina de oro de Homestake 1.5 Km bajo tierra



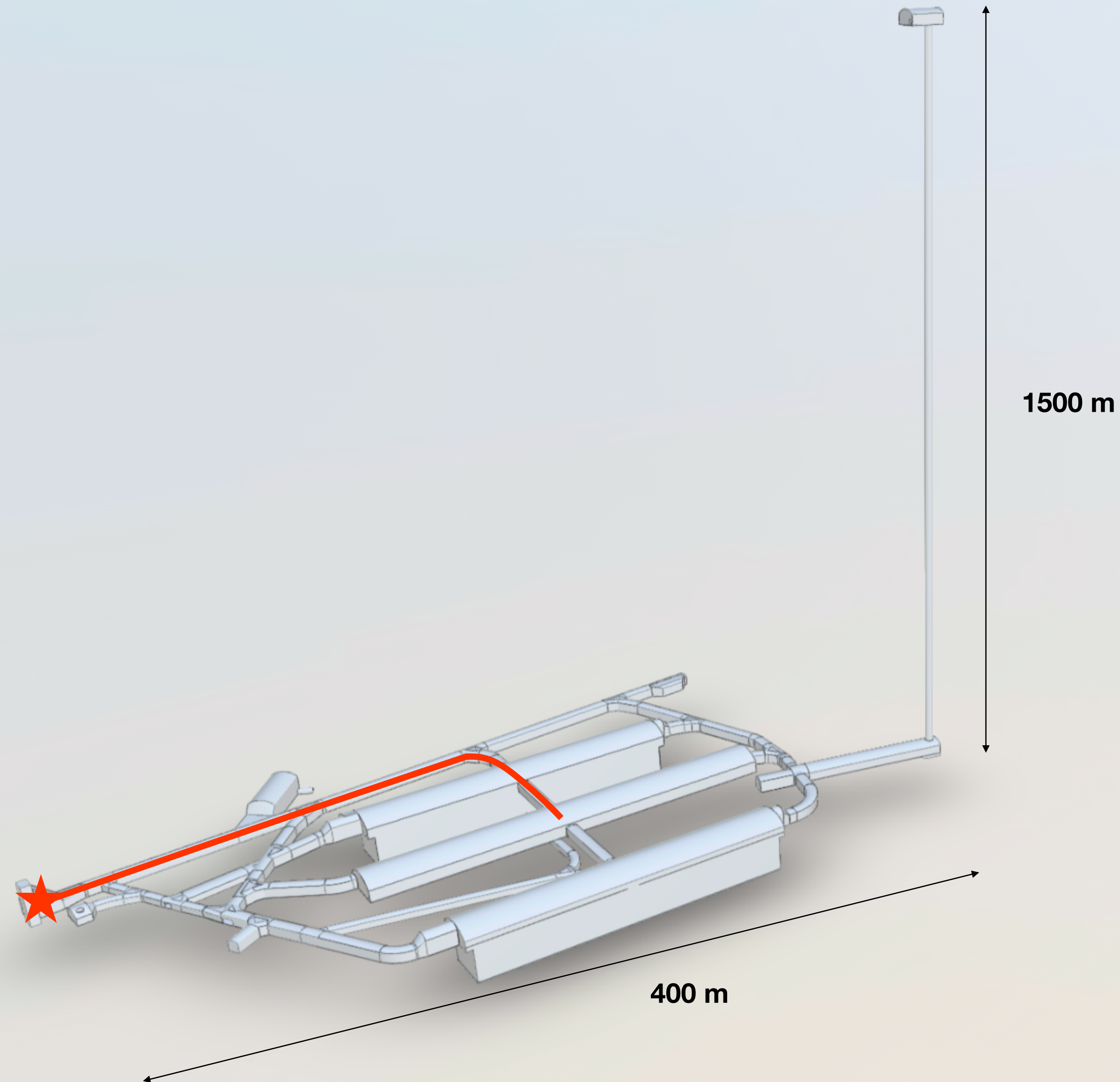
En la vieja mina de oro de Homestake 1.5 Km bajo tierra



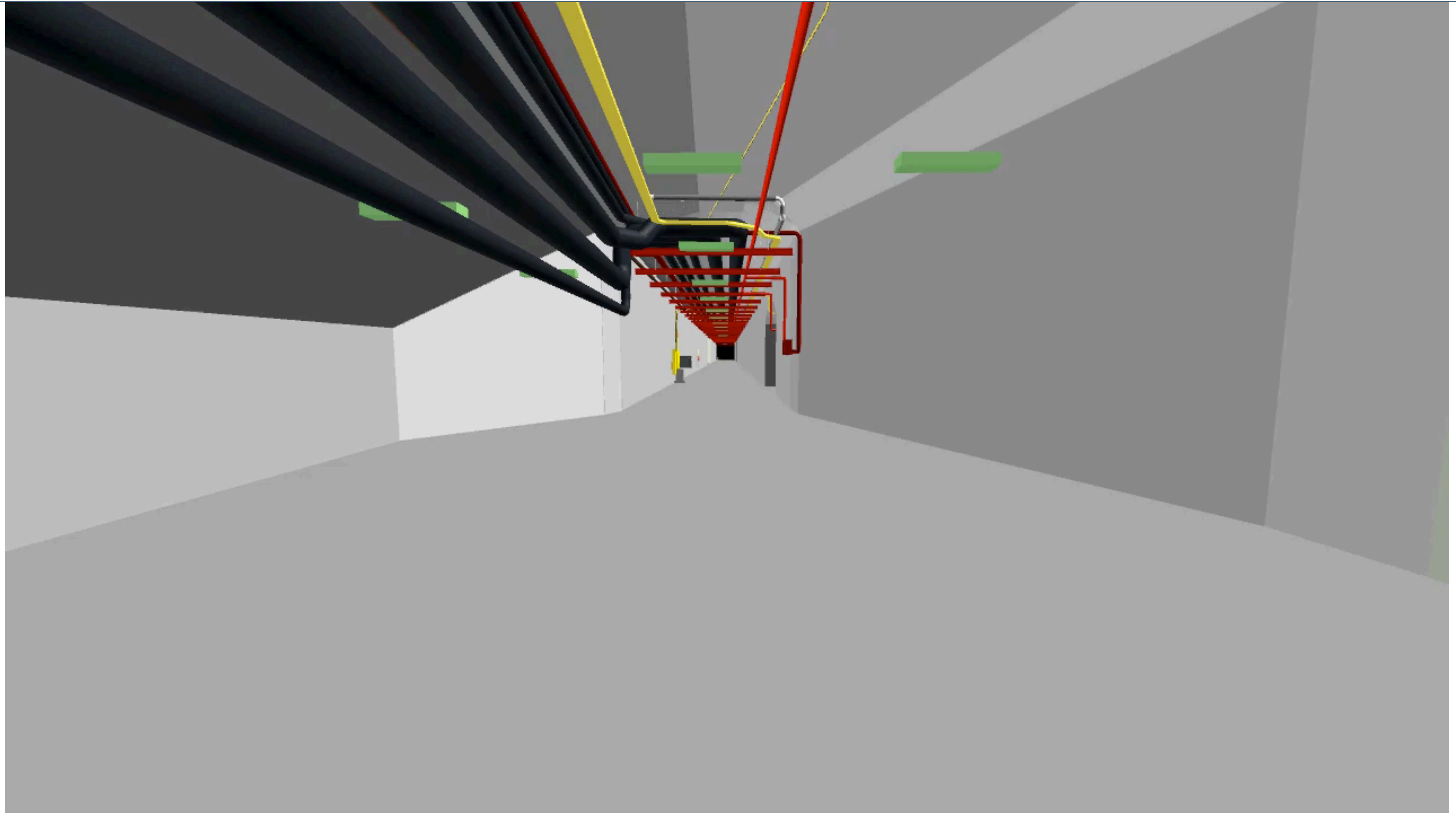
Detector lejano



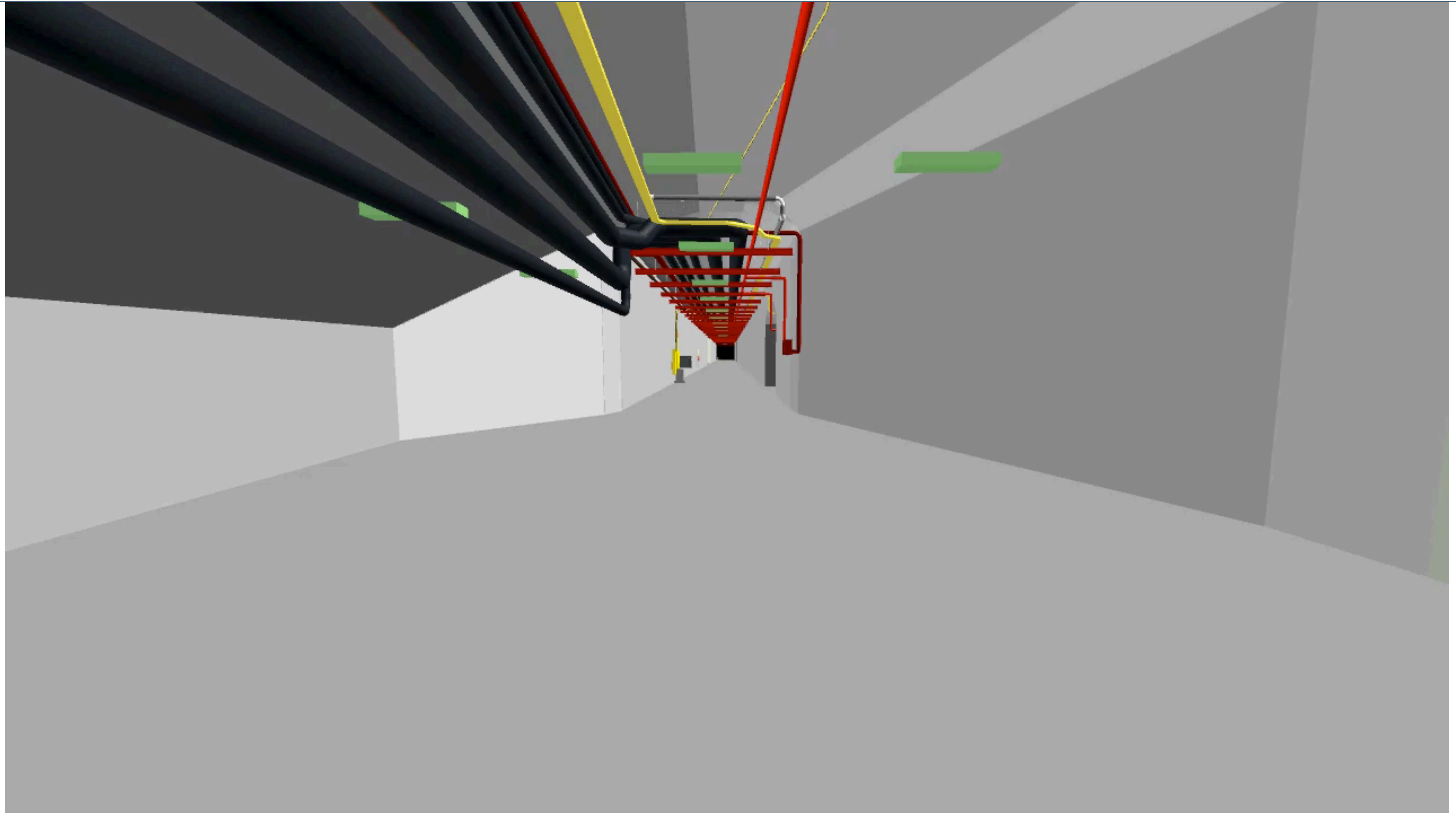
Detector lejano



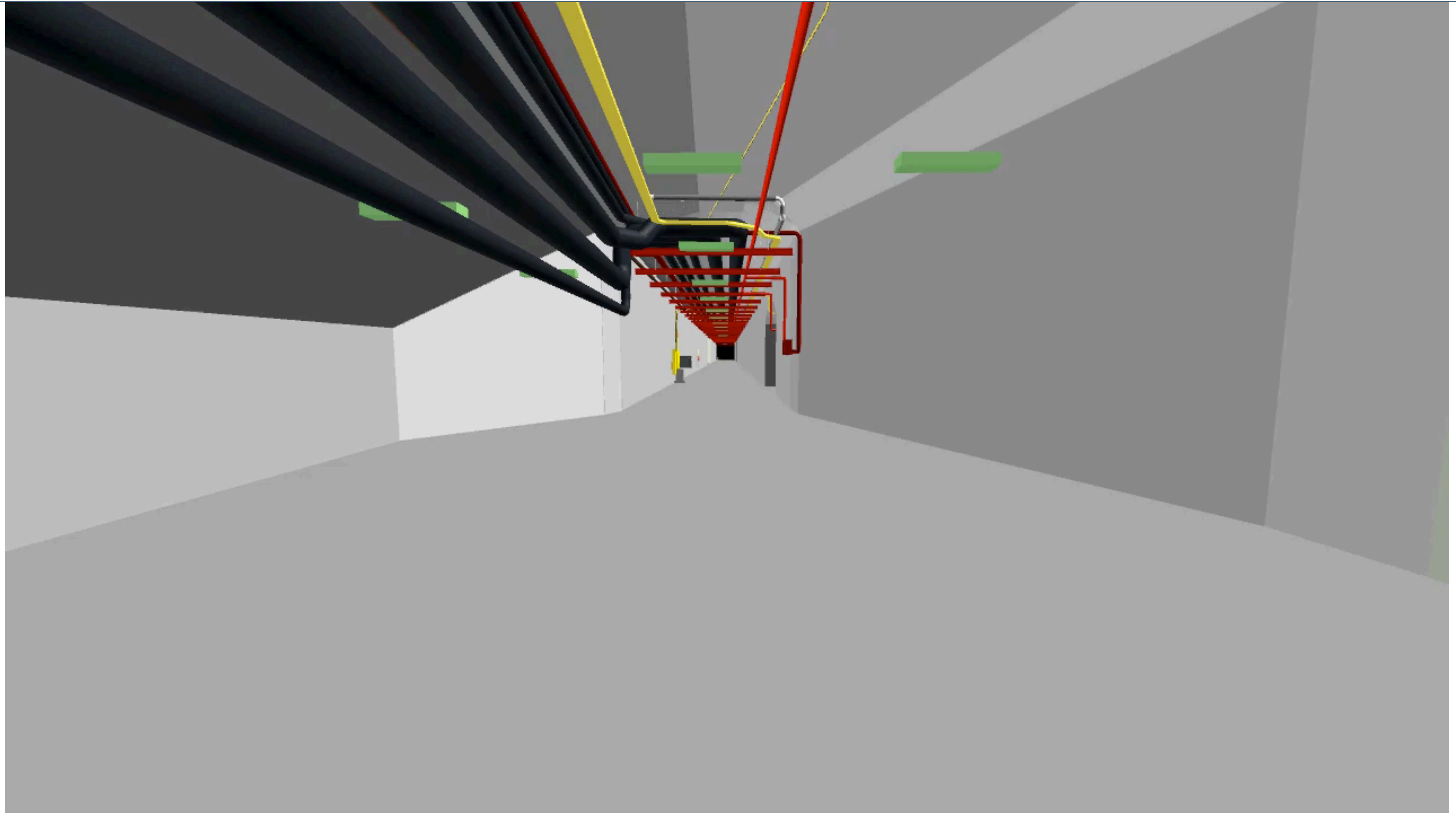
Un paseo por los túneles



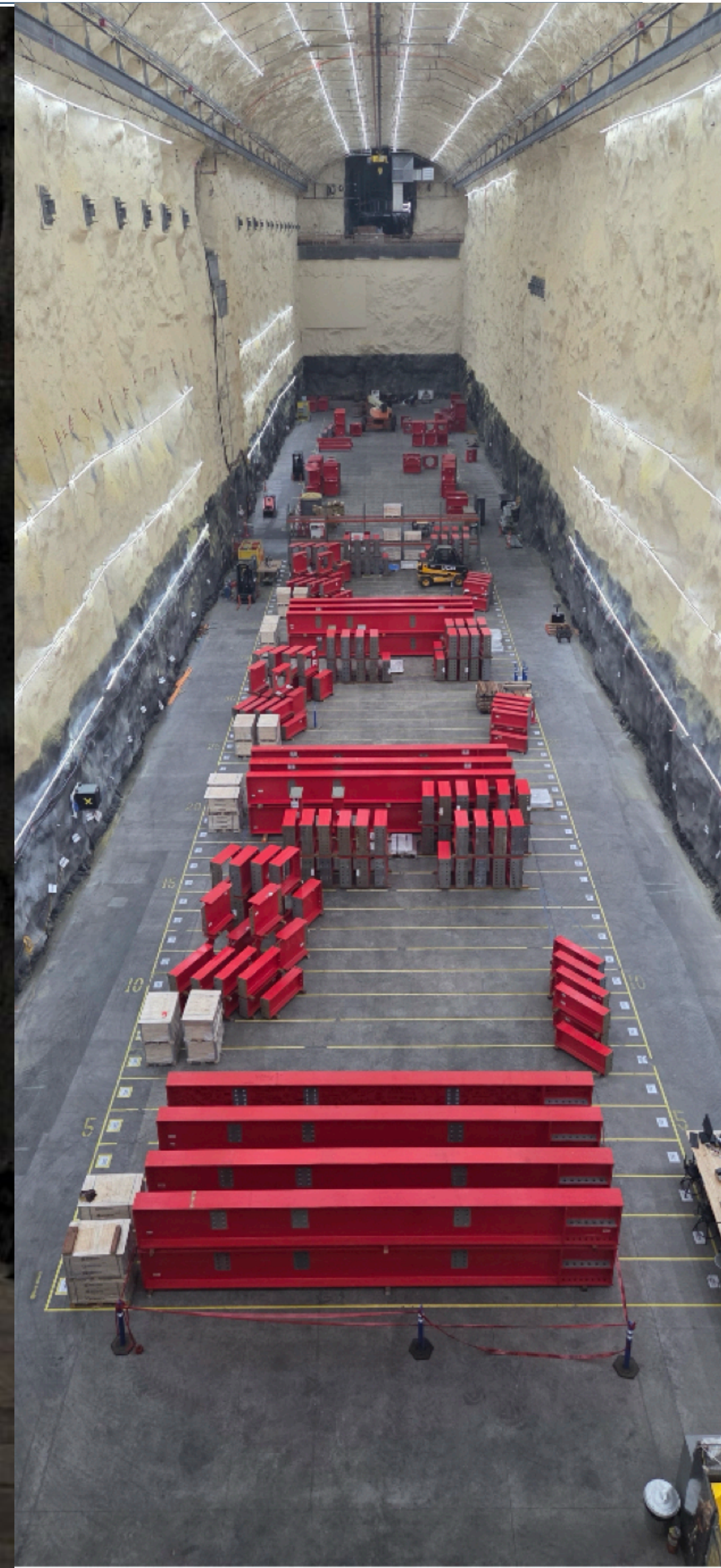
Un paseo por los túneles

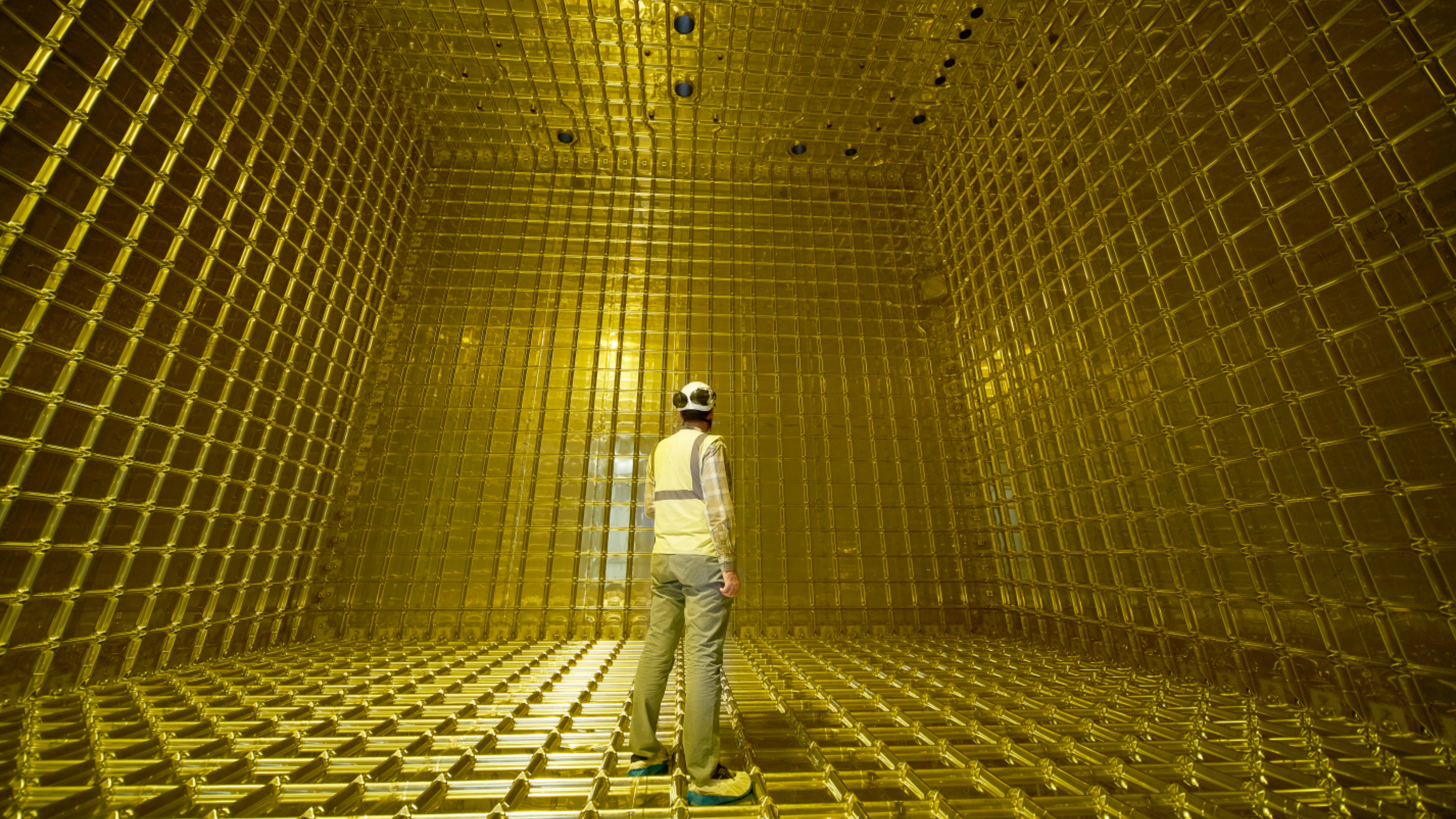


Un paseo por los túneles



Las cavernas de DUNE



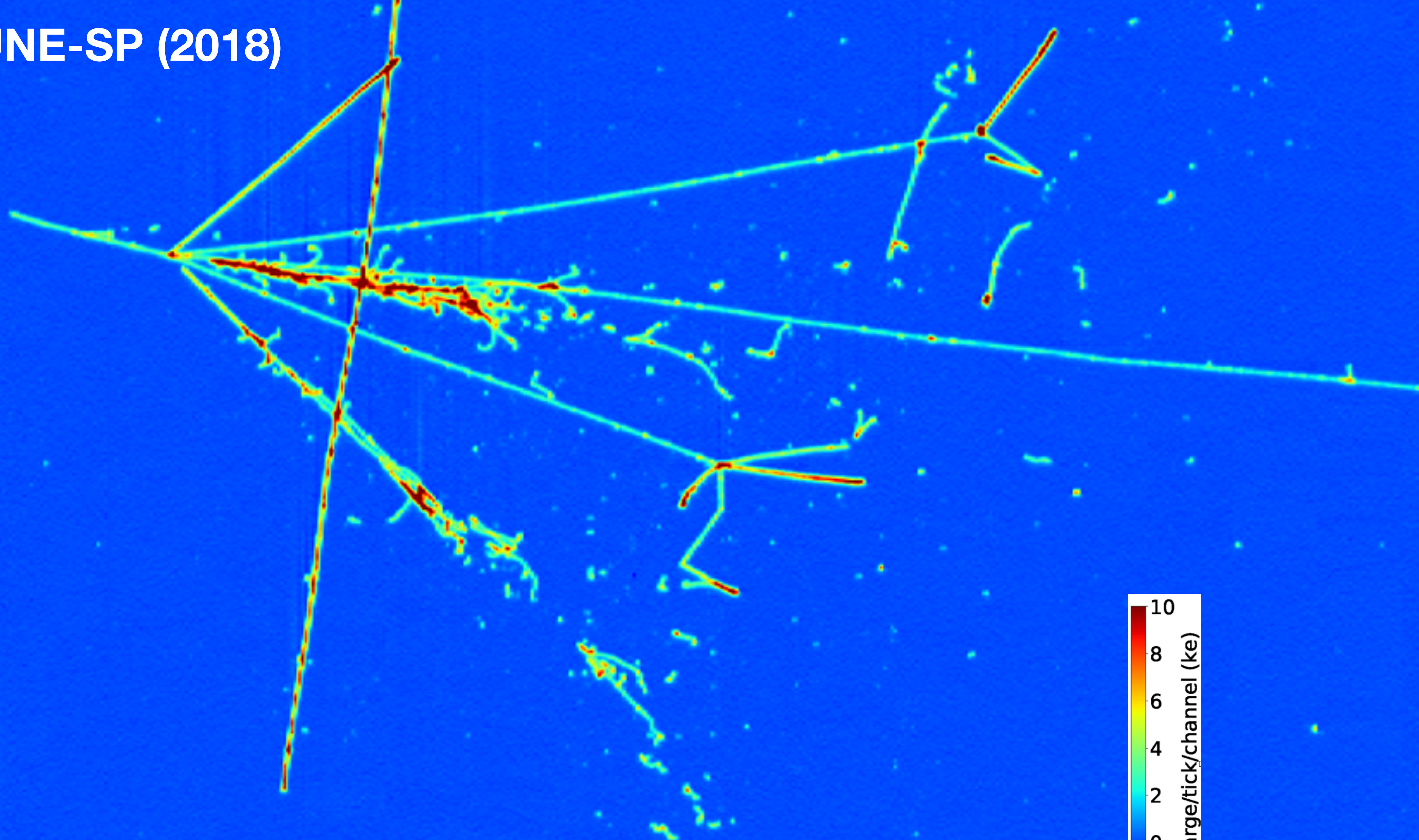




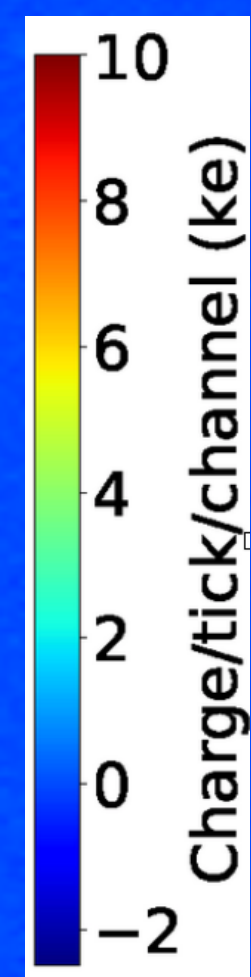


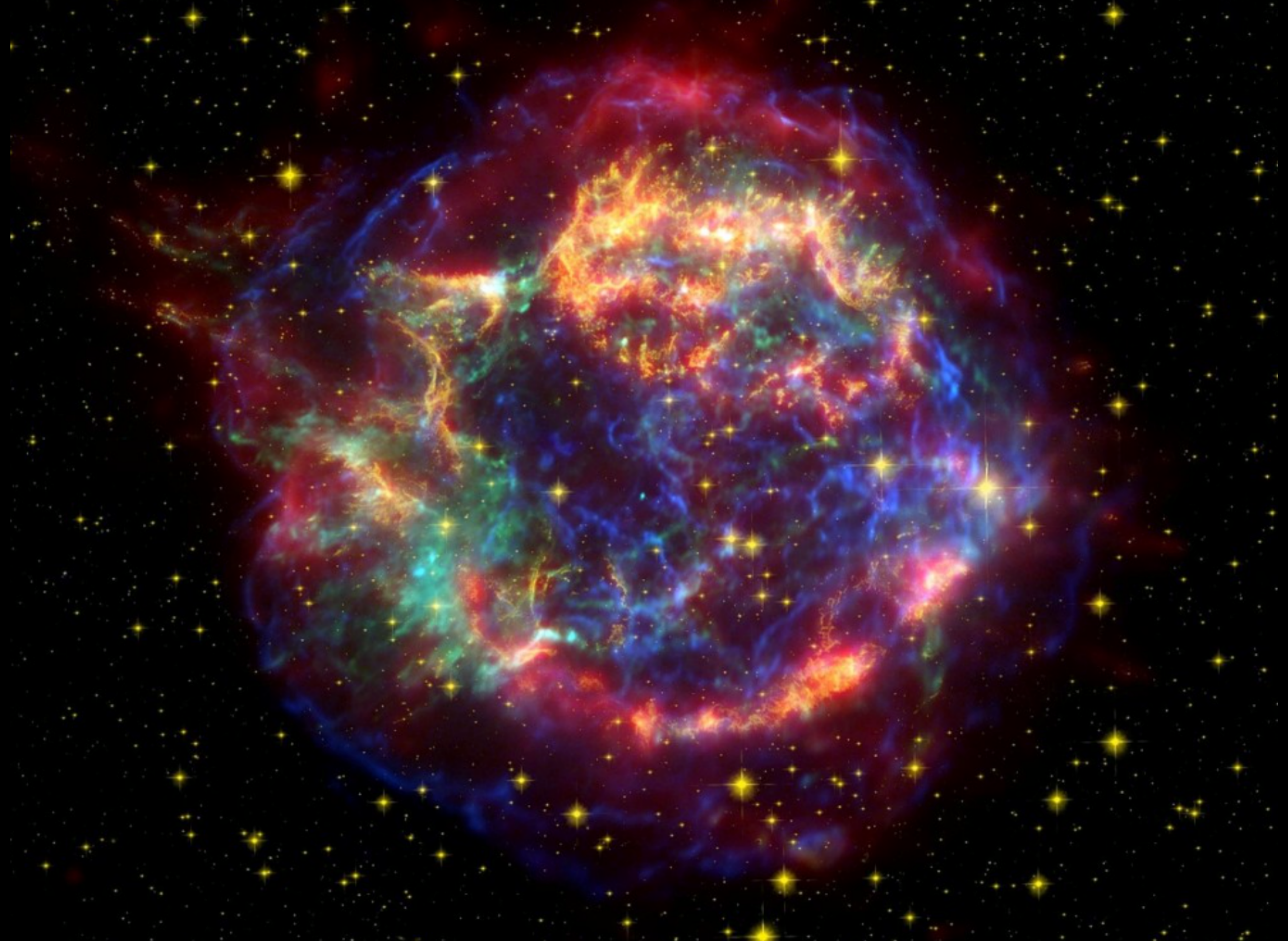
¿ Que es capaz de ver un detector como este ?

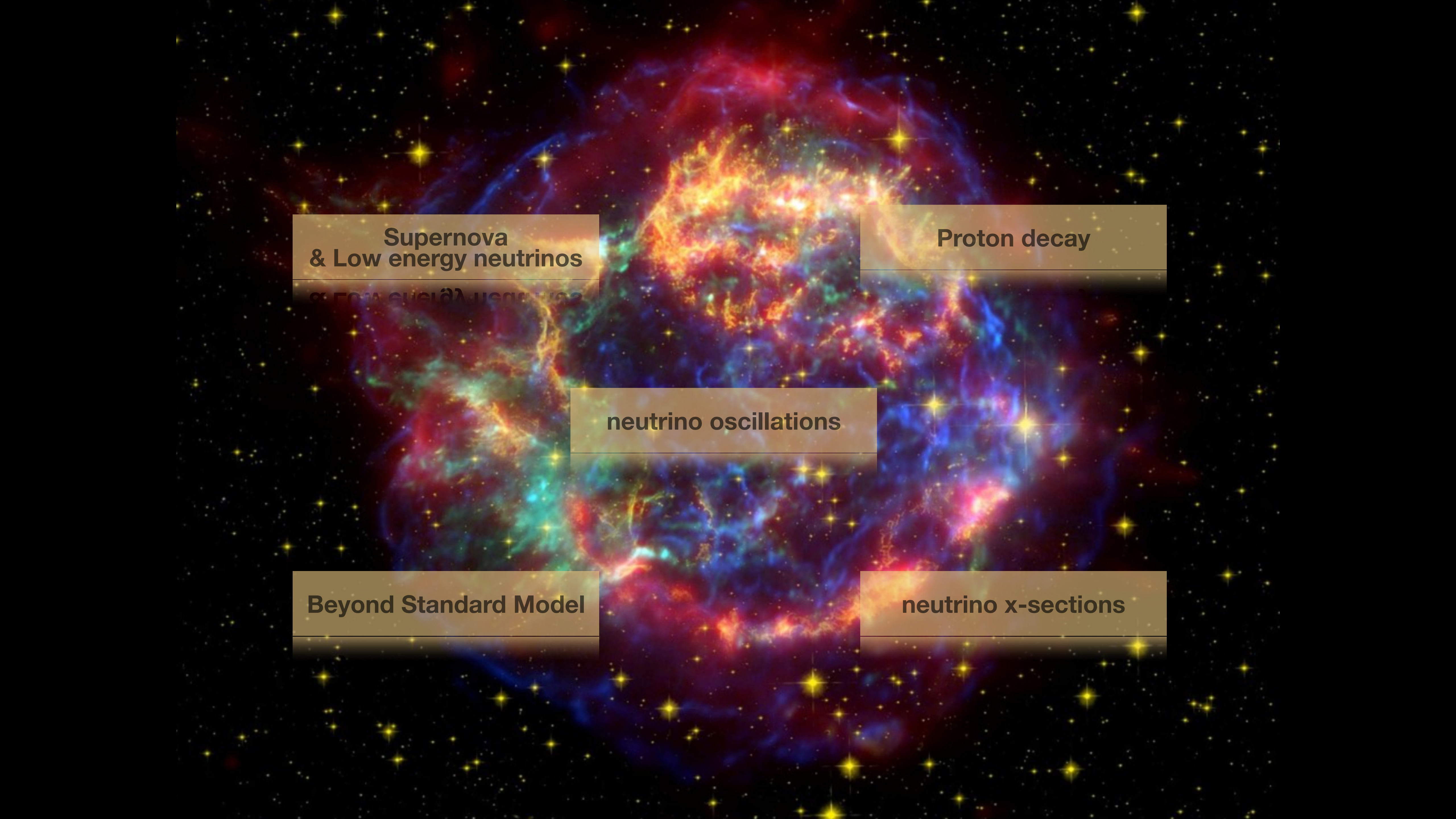
ProtoDUNE-SP (2018)



50 cm







**Supernova
& Low energy neutrinos**

$\propto E_{\nu}^2 \ln E_{\nu} \mu_{\nu}^2$

Proton decay

neutrino oscillations

Beyond Standard Model

neutrino x-sections

Situación actual

- Un primer prototipo tomó datos en el CERN en 2018
- Se han hecho varias mejoras y el nuevo prototipo está en operación ahora mismo
- Los detectores finales han empezado a construirse y se instalarán a 1.5 Km de profundidad a partir de 2028



El equipo de DUNE en el IFIC

Estudiantes de doctorado



Julio



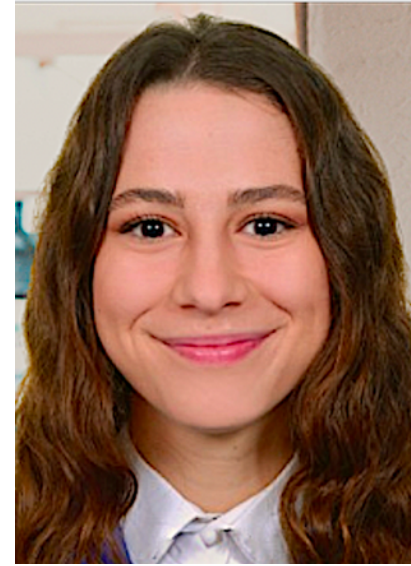
Mirald



Hamza



Jordi



Andrea



Vicky

Postdoc



Sara



Laura



Justo



Nadia



Anselmo



Michel

Permanentes

Ingeniero electrónico



Carlos

Ingeniero mecánico



Simón

Técnicos



Jesús



Higinio

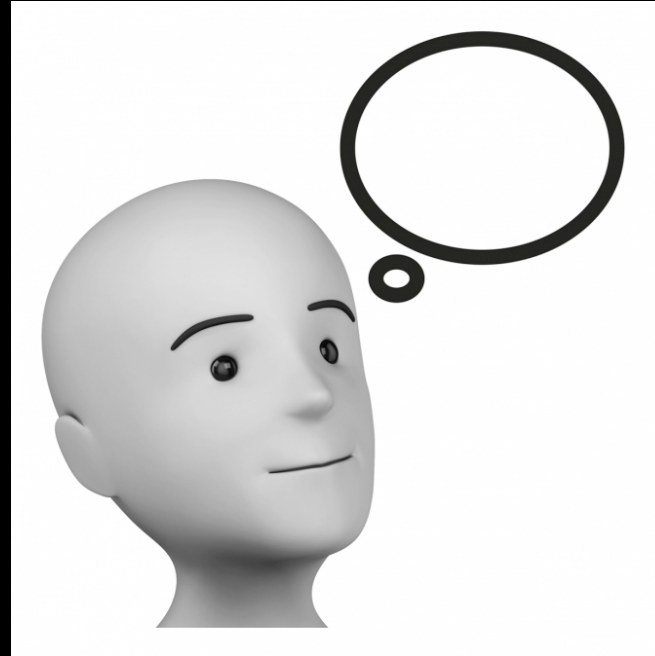
Estudiante de master



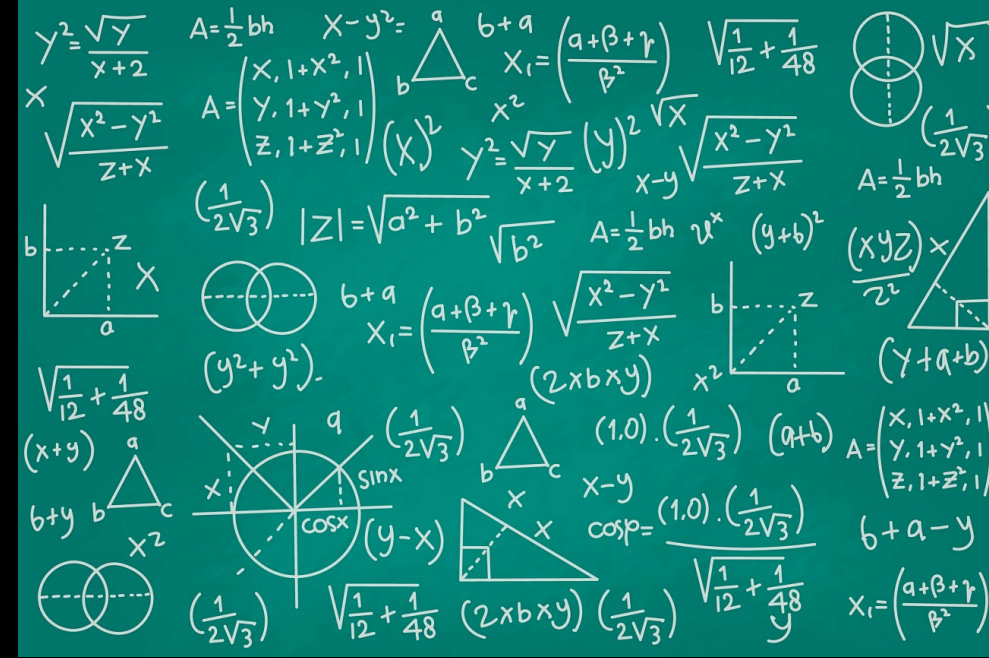
Xabier

¿ Que hacemos en DUNE ?

Pensar



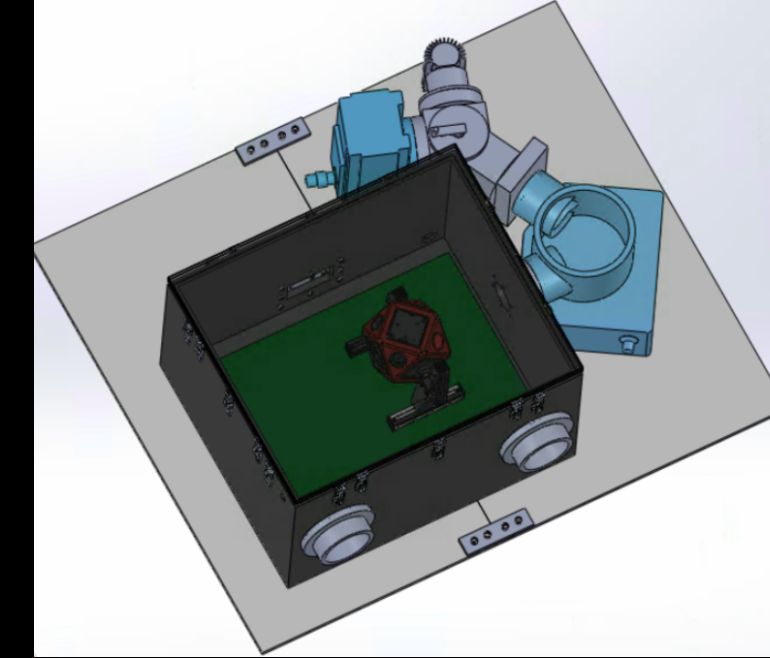
Matemáticas



Simulaciones



Diseño de experimentos



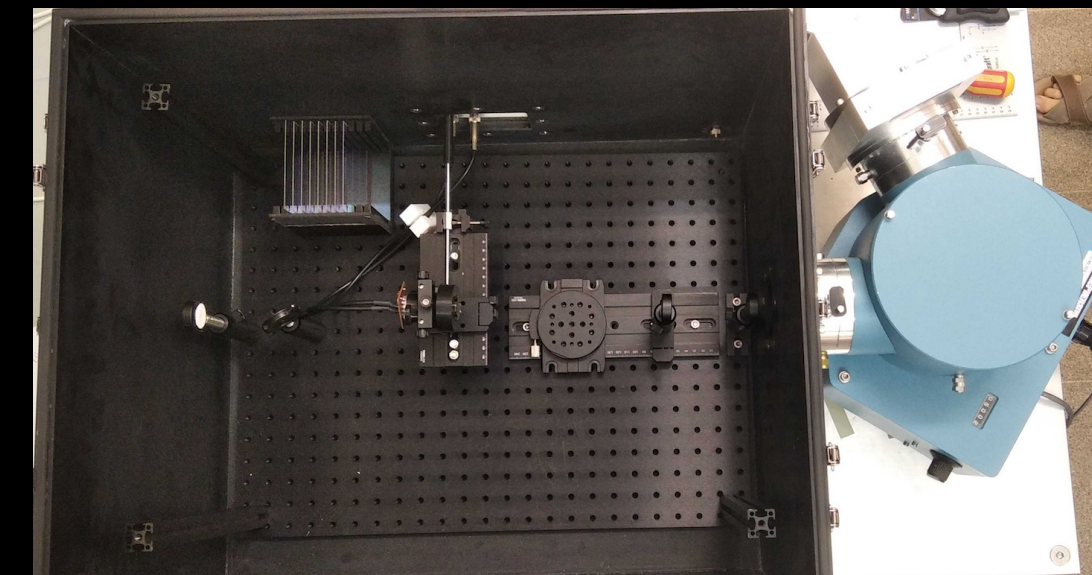
Software



Bricolaje



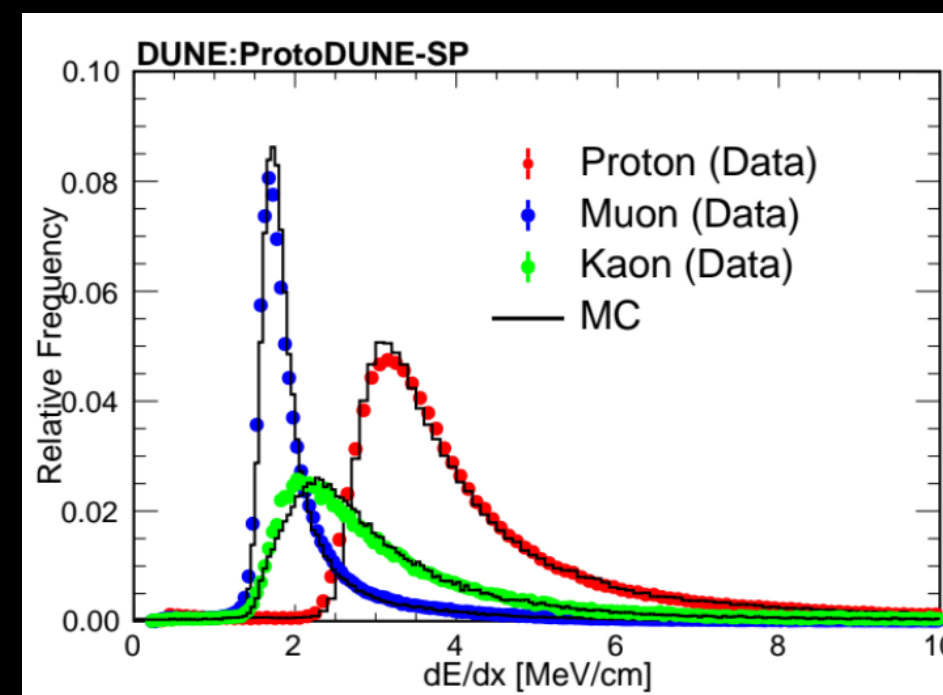
Medidas en el laboratorio



Prototipos a gran escala



Análisis de datos



Viajar



pero sobre todo ...

... nos divertimos



IFIC
INSTITUT DE FÍSICA
CORPUSCULAR

VALENCIA

Experimental Neutrino Physics

Welcome to the ***Experimental Neutrino Physics Group*** at ***IFIC***, where the mysteries of the universe are not just contemplated, but actively unraveled. Here, amidst the dance of elusive particles, we seek to understand the fundamental building blocks of reality. Our quest is driven by curiosity, fuelled by innovation, and anchored in rigorous scientific inquiry.

NEW article: *Millikelvin-precision temperature sensing for advanced cryogenic detectors*



Group members

Our group is composed of a diverse team, including physicists, engineers, technicians, and administrative staff, all working together to support and advance our research activities



Research

An outline of the physics topics we are investigating, the experiments we are actively involved in, and the associated technological developments both within our laboratory and through collaborations with industry



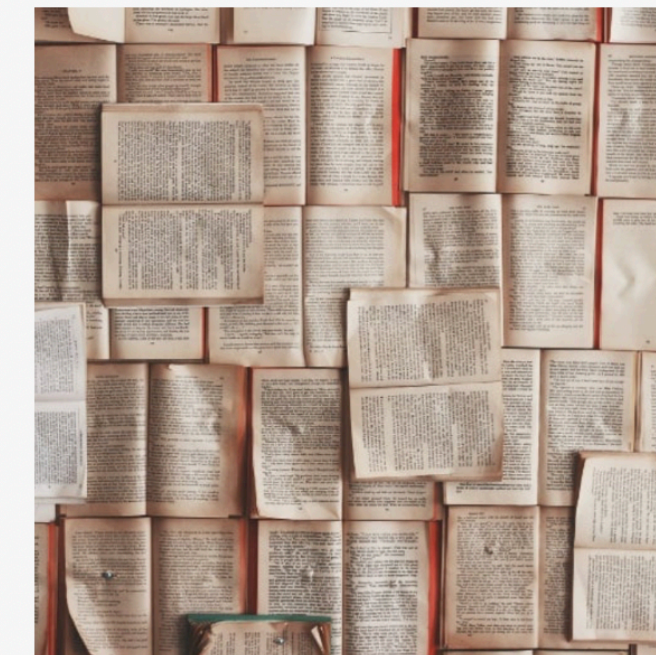
News

Stay up to date with the latest scientific results, project developments, significant events, and milestones from our group and the collaborative experiments we take part in



Join our group – Job offers

Details on how to become part of our research group—whether as a PhD student, research engineer, postdoctoral fellow, or tenure-track faculty member—including application procedures, requirements, and available positions



Selected results

A curated selection of scientific results spanning two decades, including doctoral theses, peer-reviewed articles, experimental findings, and other research outputs

<https://neutrinos.ific.uv.es/>

Contáctanos si estas interesado en hacer un **TFG**, **TFM** o un **doctorado**