

IFIC summer school
2019

Oscilaciones de Neutrinos

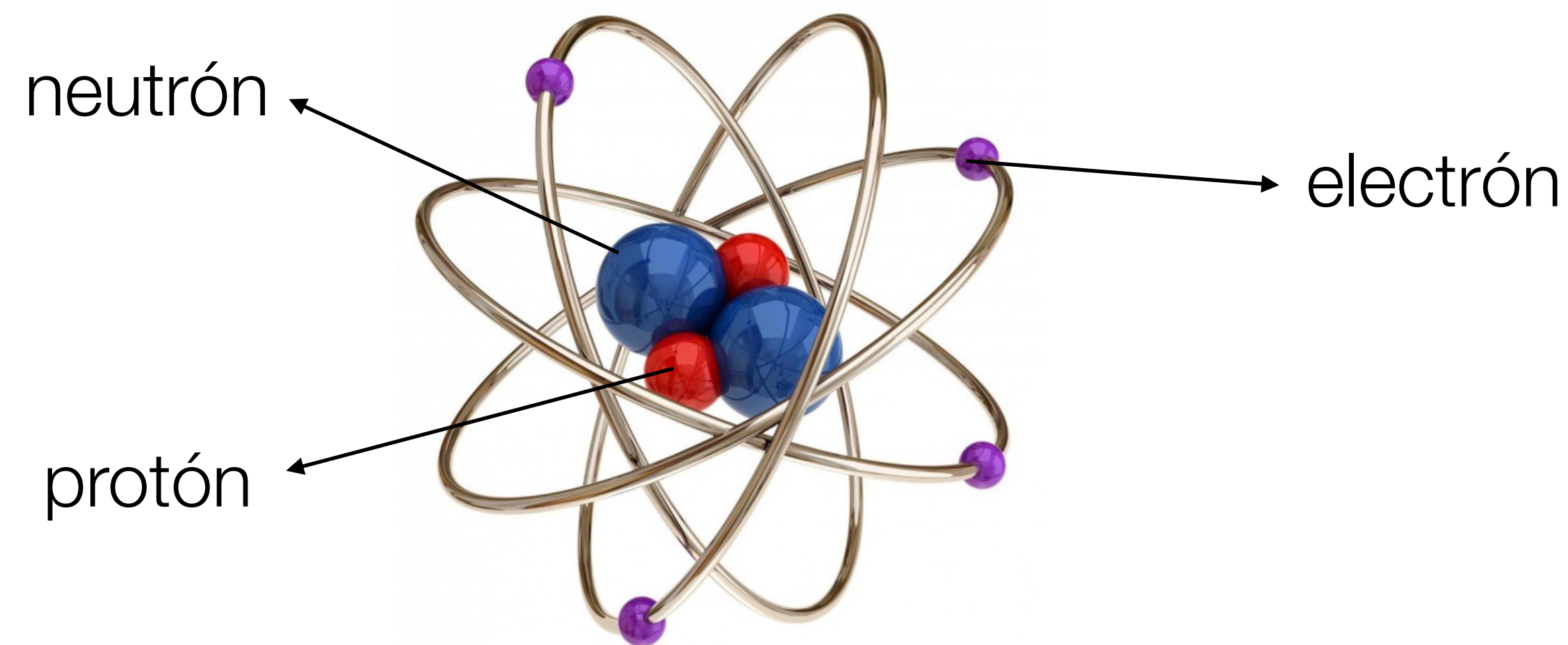
Anselmo Cervera Villanueva
IFIC (UV- CSIC)
Valencia

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



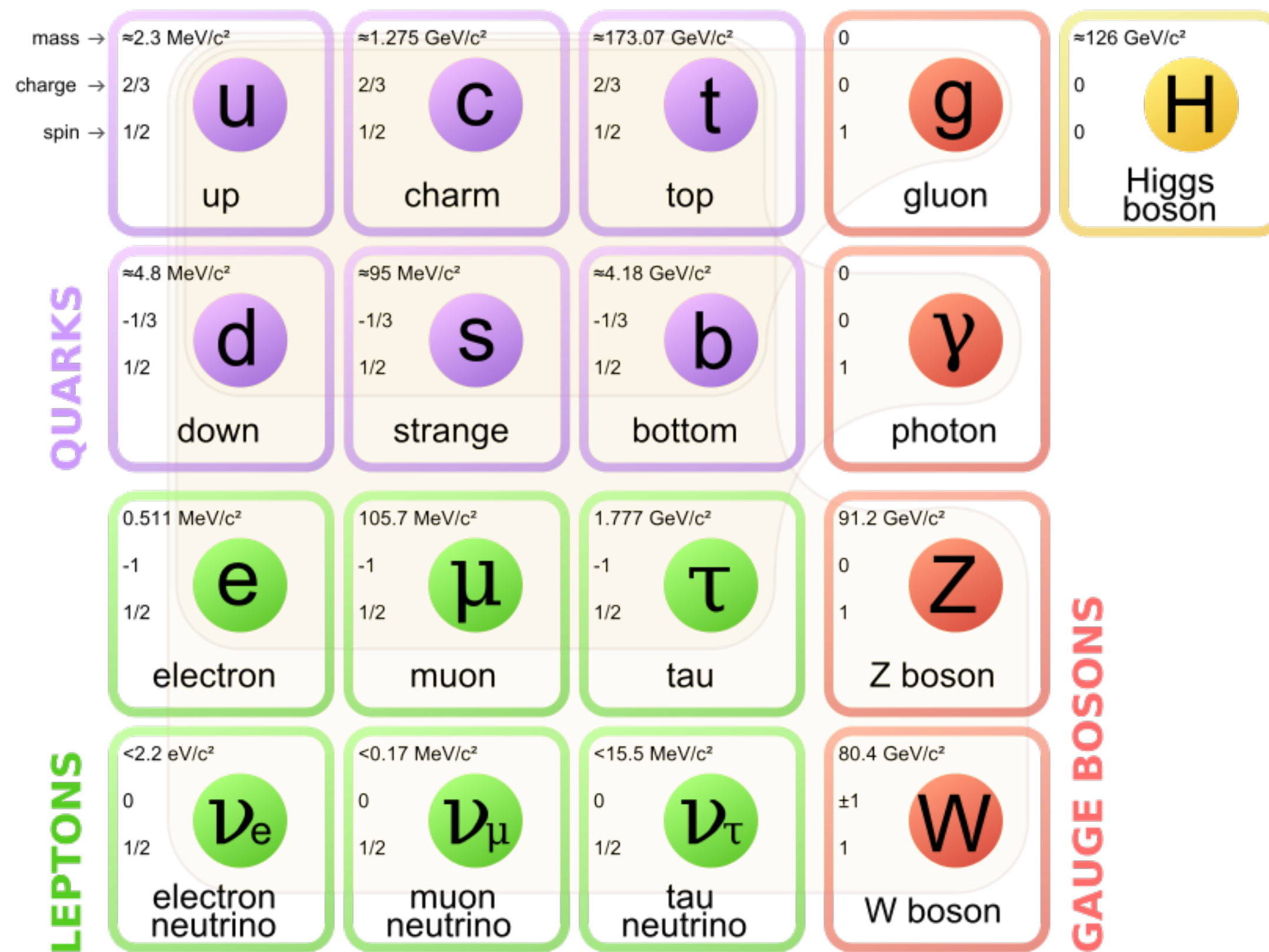
Edificios y ciudades



Nuestro planeta

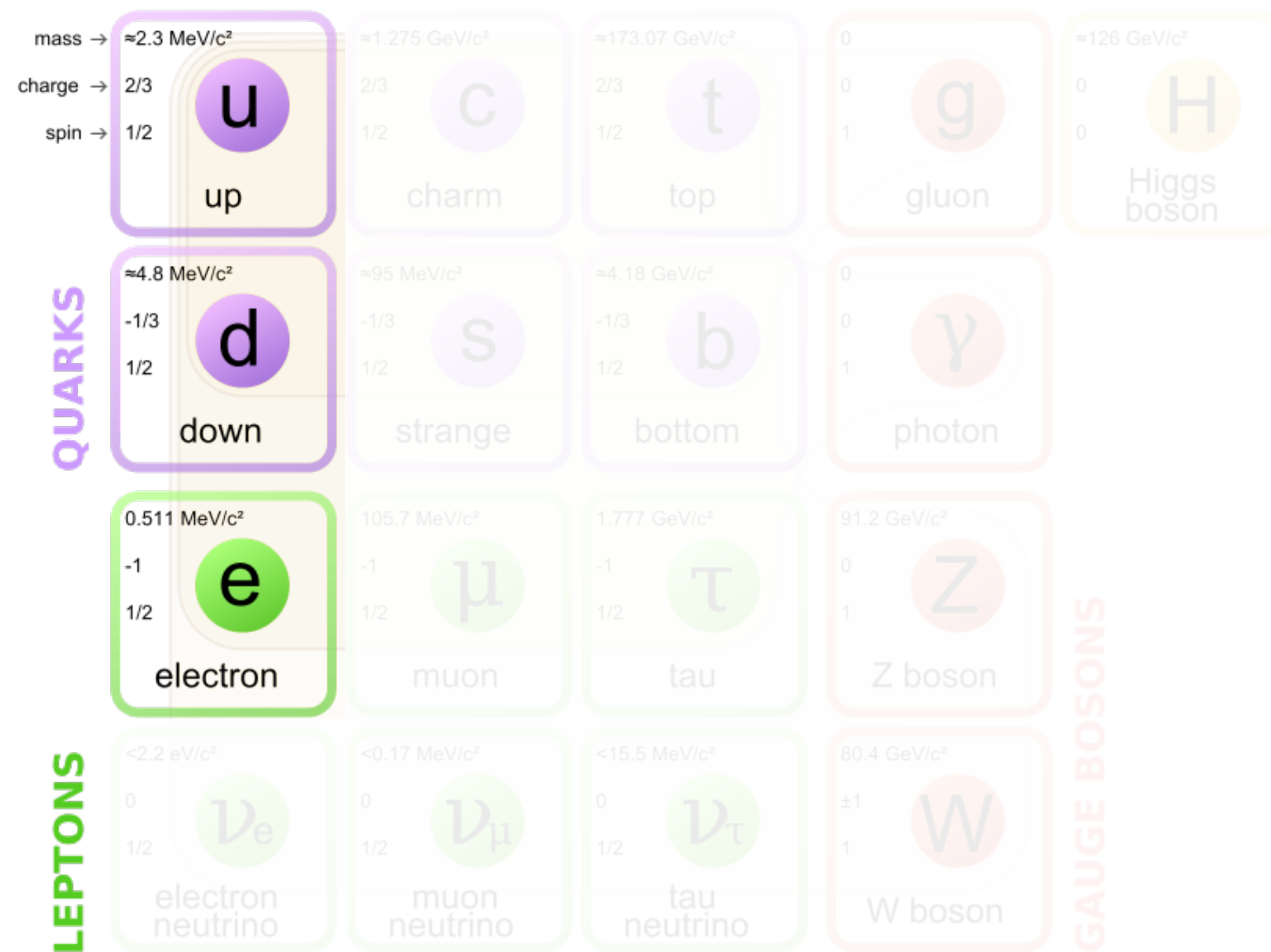
El universo de Arcadi

- Estás son las partículas fundamentales en el modelo standard



El universo de Arcadi

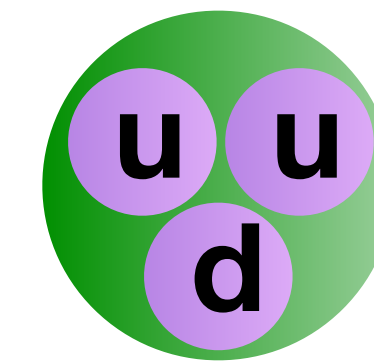
- Estás son las partículas fundamentales en el modelo standard



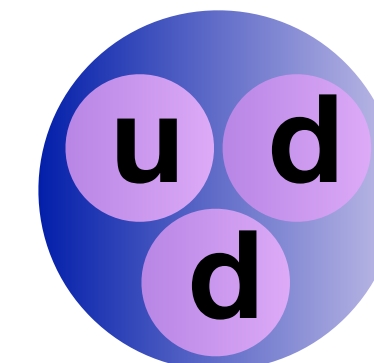
El universo de Arcadi

- Estás son las partículas fundamentales en el modelo standard

mass →	$\approx 2.3 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.275 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.07 \text{ GeV}/c^2$	0	$\approx 126 \text{ GeV}/c^2$
charge →	$2/3$	$2/3$	$2/3$	0	0
spin →	$1/2$	$1/2$	$1/2$	1	0
	u up	c charm	t top	g gluon	H Higgs boson
	$\approx 4.8 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 95 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$	0	
	$-1/3$	$-1/3$	$-1/3$	0	
	$1/2$	$1/2$	$1/2$	1	
QUARKS	d down	s strange	b bottom	γ 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	
	e electron	μ muon	τ tau	Z Z boson	
	$< 2.2 \text{ eV}/c^2$	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$	$< 15.5 \text{ MeV}/c^2$	$80.4 \text{ GeV}/c^2$	
	0	0	0	± 1	
	$1/2$	$1/2$	$1/2$	1	
LEPTONS	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	W W boson	GAUGE BOSONS



protón



neutrón



electrón

El anti-Universo

- Cada partícula tiene asociada una antipartícula

partículas

u

e⁻

ν_e

...

anti-partículas

$\bar{u}$

e⁺

$\bar{\nu}_e$

...

también para partículas compuestas

p⁺

p⁻

El anti-Universo

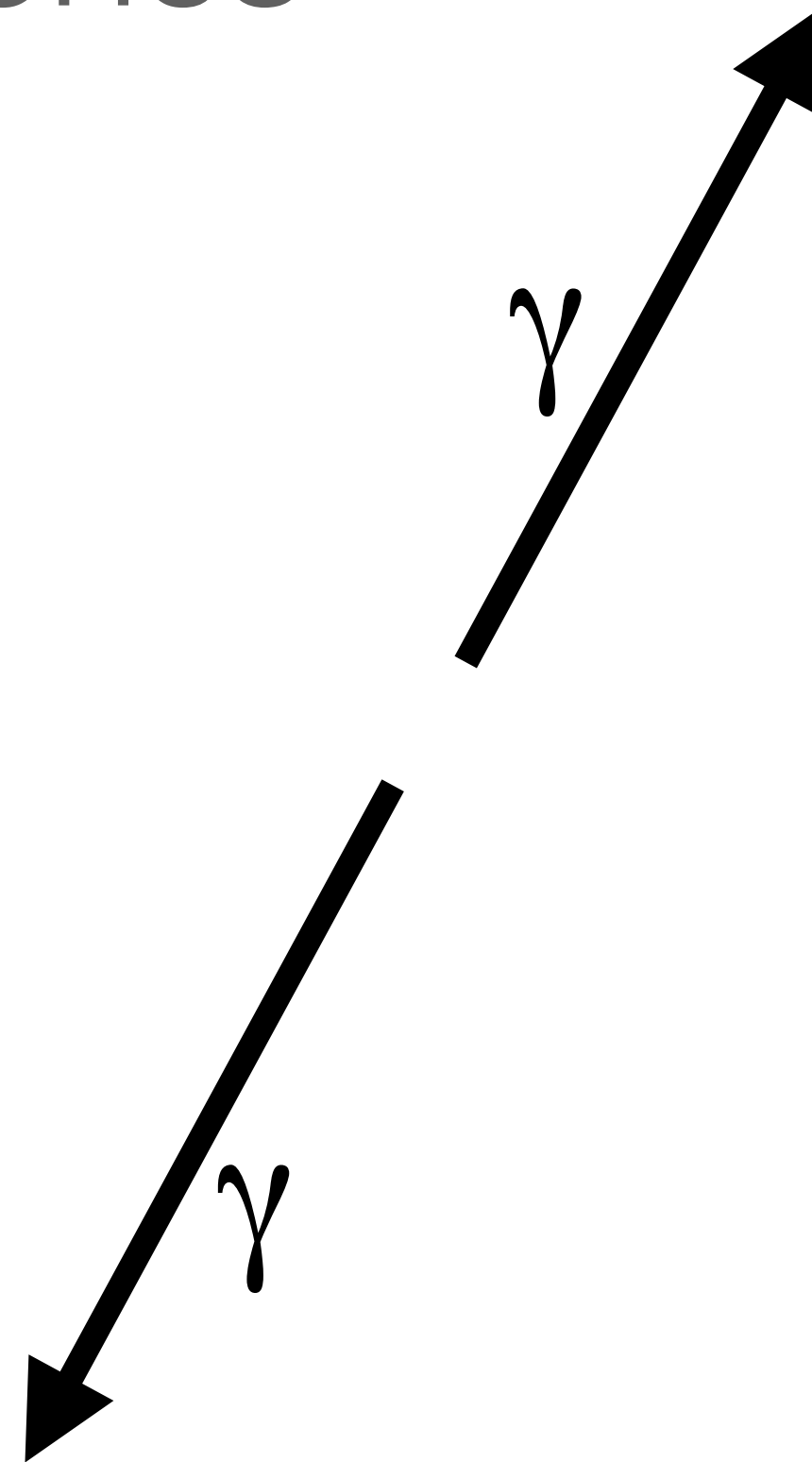
- Cuando una partícula se encuentra con su antipartícula hay una gran probabilidad de que se aniquilen, produciendo energía en forma de fotones

e^-

e^+

El anti-Universo

- Cuando una partícula se encuentra con su antipartícula hay una gran probabilidad de que se aniquilen, produciendo energía en forma de fotones



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**

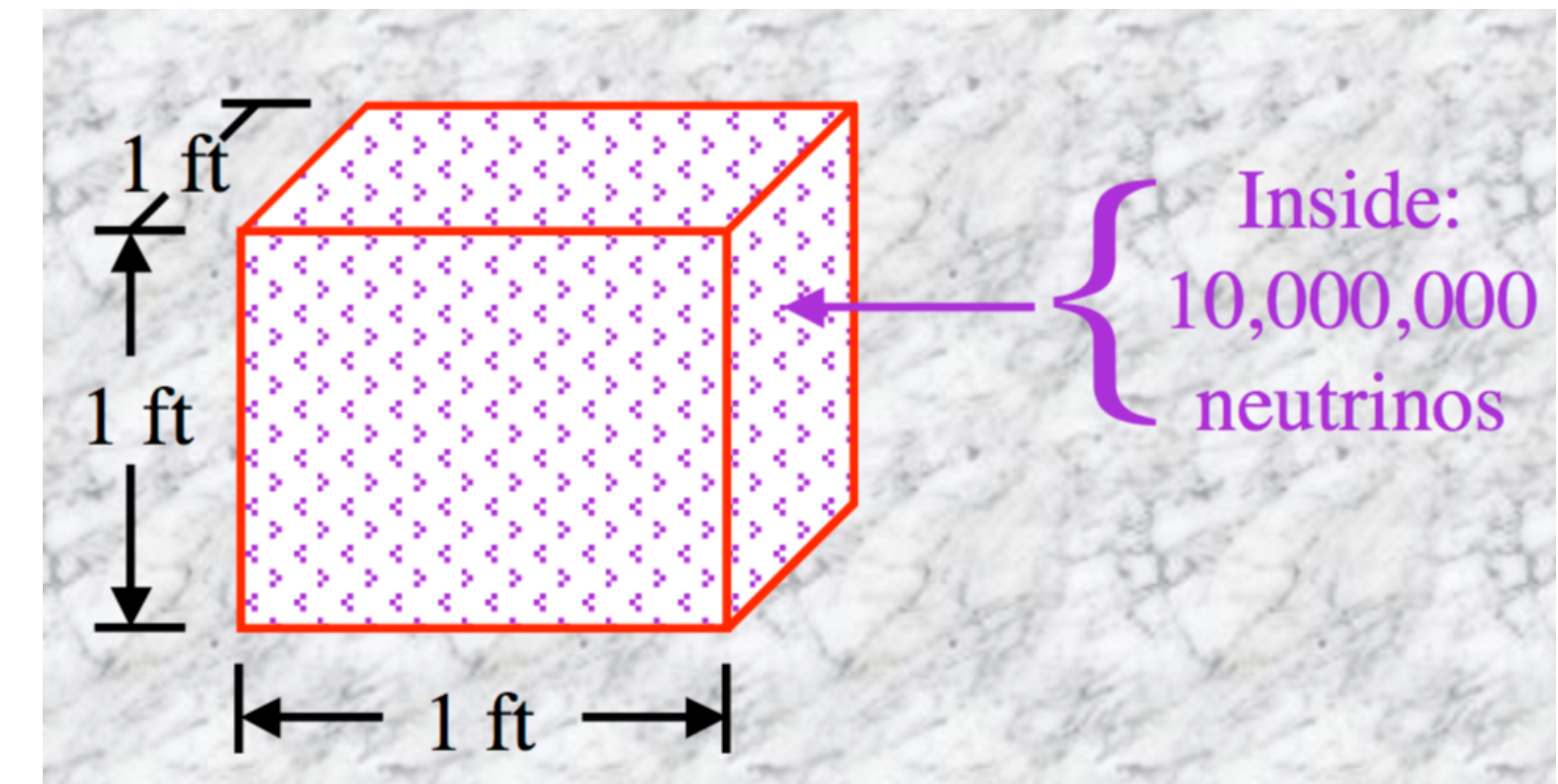
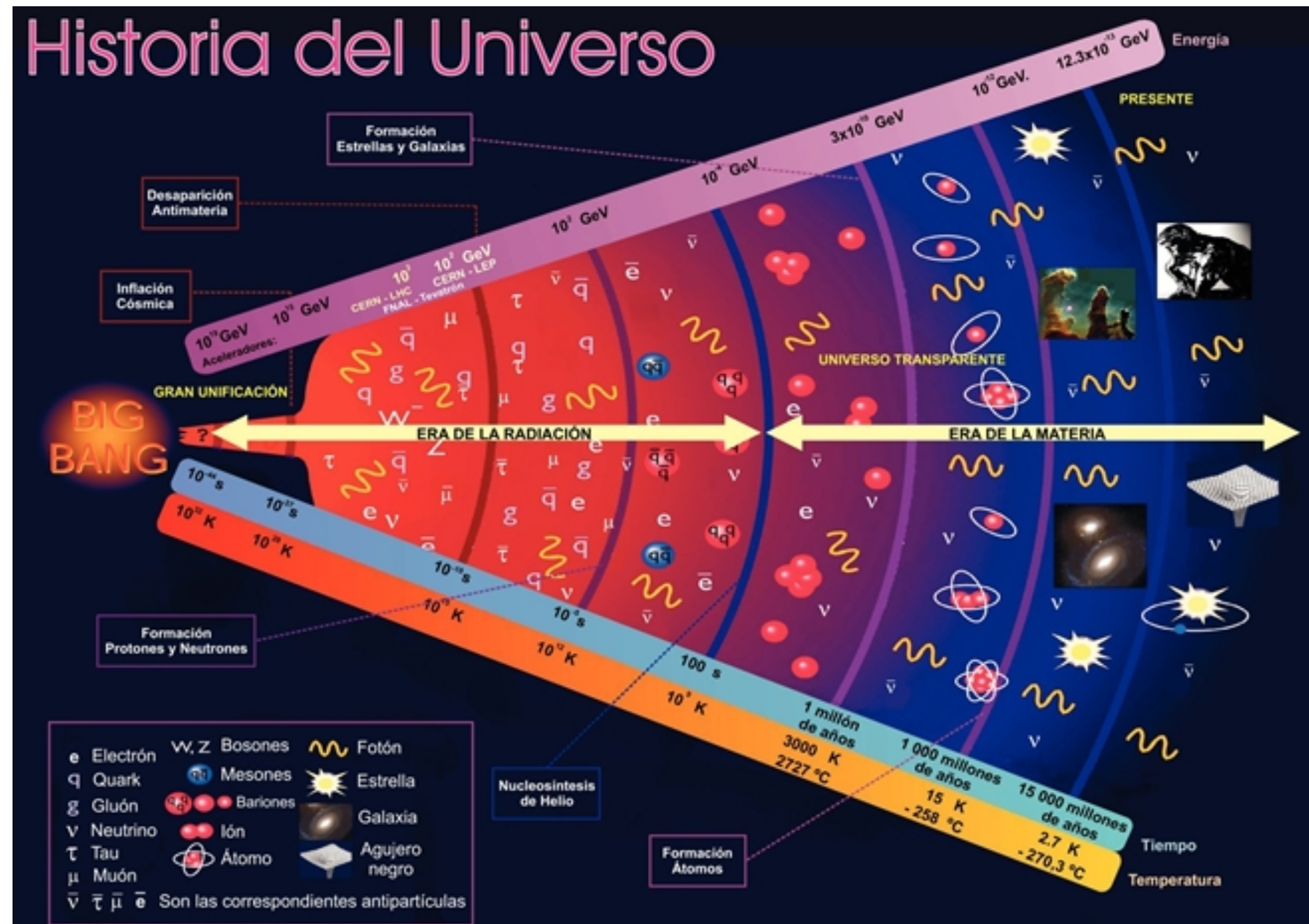
Simetría Carga-Paridad (CP)

- 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

El neutrino

Neutrinos por todas partes

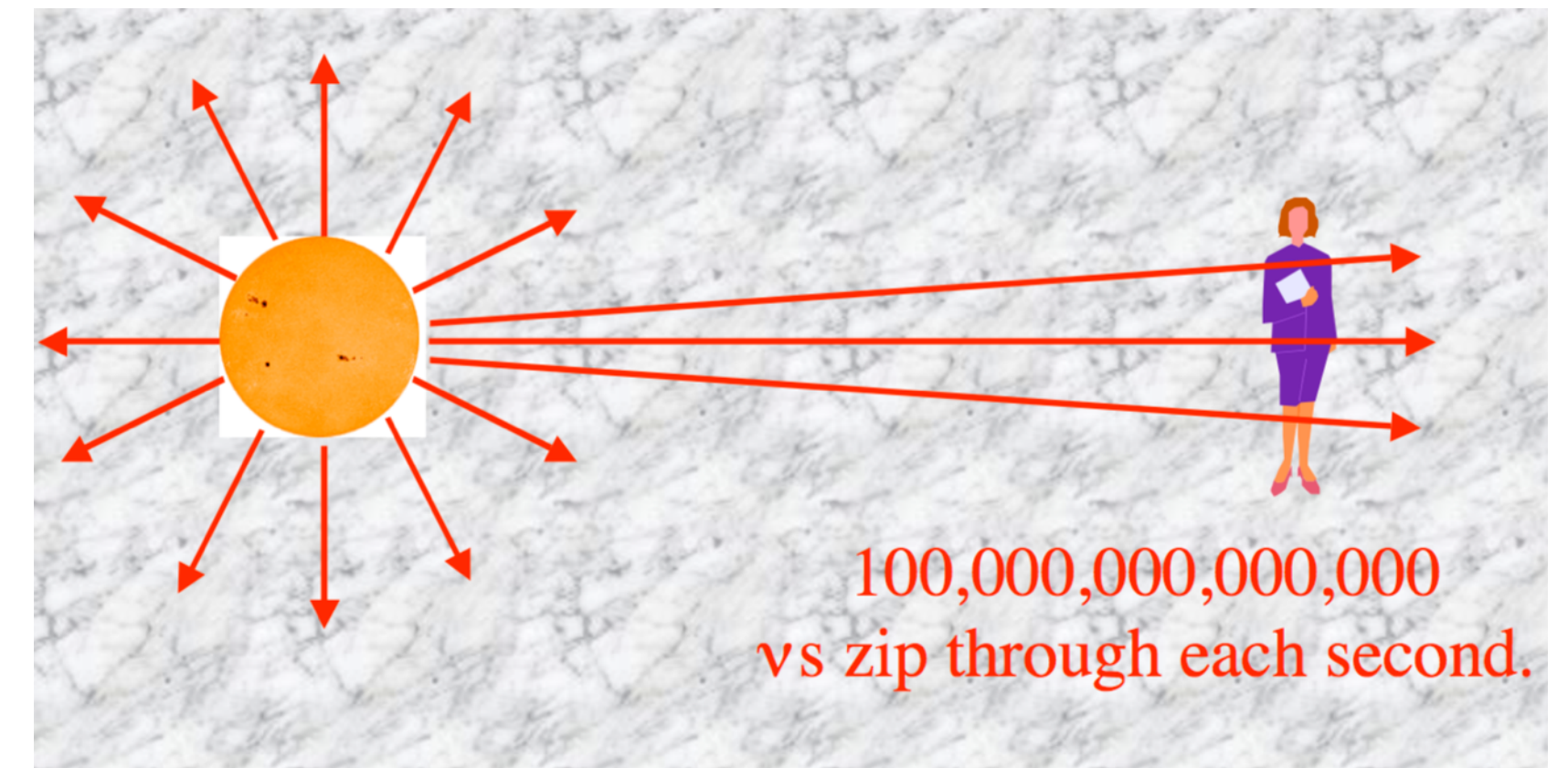
- Por cada proton, neutron o electron el universo contiene 1000 millones de neutrinos que provienen del Big Bang



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

¿ Son peligrosos ?

- El interior del sol funciona como un gran reactor nuclear
- Las reacciones nucleares producen neutrinos



- ¿Deberíamos estar preocupados ?

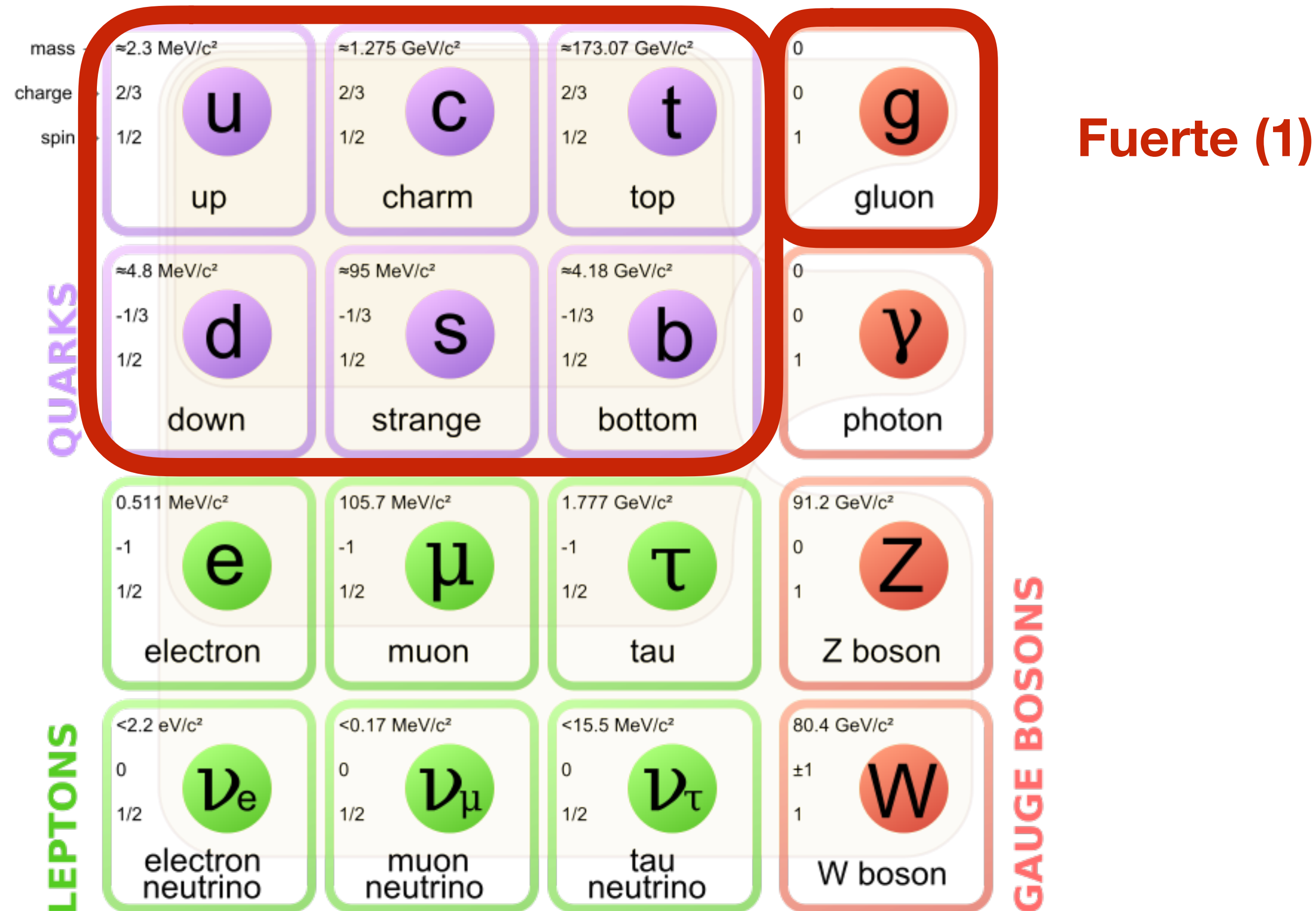
La timidez de los neutrinos

- 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 1956**, pese a ser las partículas más abundantes después del fotón (las partículas de luz)
- Además, hasta hace bien poco **se pensaba que no tenían masa**

Las cuatro fuerzas fundamentales

mass →	$\approx 2.3 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.275 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.07 \text{ GeV}/c^2$	0
charge →	$2/3$	$2/3$	$2/3$	0
spin →	$1/2$	$1/2$	$1/2$	1
QUARKS	u up	c charm	t top	g 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
	d down	s strange	b bottom	γ photon
LEPTONS	$0.511 \text{ MeV}/c^2$	$105.7 \text{ MeV}/c^2$	$1.777 \text{ GeV}/c^2$	$91.2 \text{ GeV}/c^2$
	-1	-1	-1	0
	$1/2$	$1/2$	$1/2$	1
	e electron	μ muon	τ tau	Z Z boson
	$< 2.2 \text{ eV}/c^2$	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$	$< 15.5 \text{ MeV}/c^2$	$80.4 \text{ GeV}/c^2$
	0	0	0	± 1
	$1/2$	$1/2$	$1/2$	1
	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	W W boson
				GAUGE BOSONS

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
		u up	c charm	t top	g 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
		d down	s strange	b bottom	γ 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
LEPTONS		$1/2$	$1/2$	$1/2$	1
		e electron	μ muon	τ tau	Z Z boson
		$< 2.2 \text{ eV}/c^2$	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$	$< 15.5 \text{ MeV}/c^2$	$80.4 \text{ GeV}/c^2$
		0	0	0	± 1
		$1/2$	$1/2$	$1/2$	1
		ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	W 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
		u up	c charm	t top	g 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
		d down	s strange	b bottom	γ photon
	LEPTONS		$0.511 \text{ MeV}/c^2$	$105.7 \text{ MeV}/c^2$	$1.777 \text{ GeV}/c^2$
		-1	-1	-1	0
		$1/2$	$1/2$	$1/2$	1
		e electron	μ muon	τ tau	Z Z boson
		$<2.2 \text{ eV}/c^2$	$<0.17 \text{ MeV}/c^2$	$<15.5 \text{ MeV}/c^2$	$80.4 \text{ GeV}/c^2$
		0	0	0	± 1
		$1/2$	$1/2$	$1/2$	1
		ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	W W boson
GAUGE BOSONS					

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

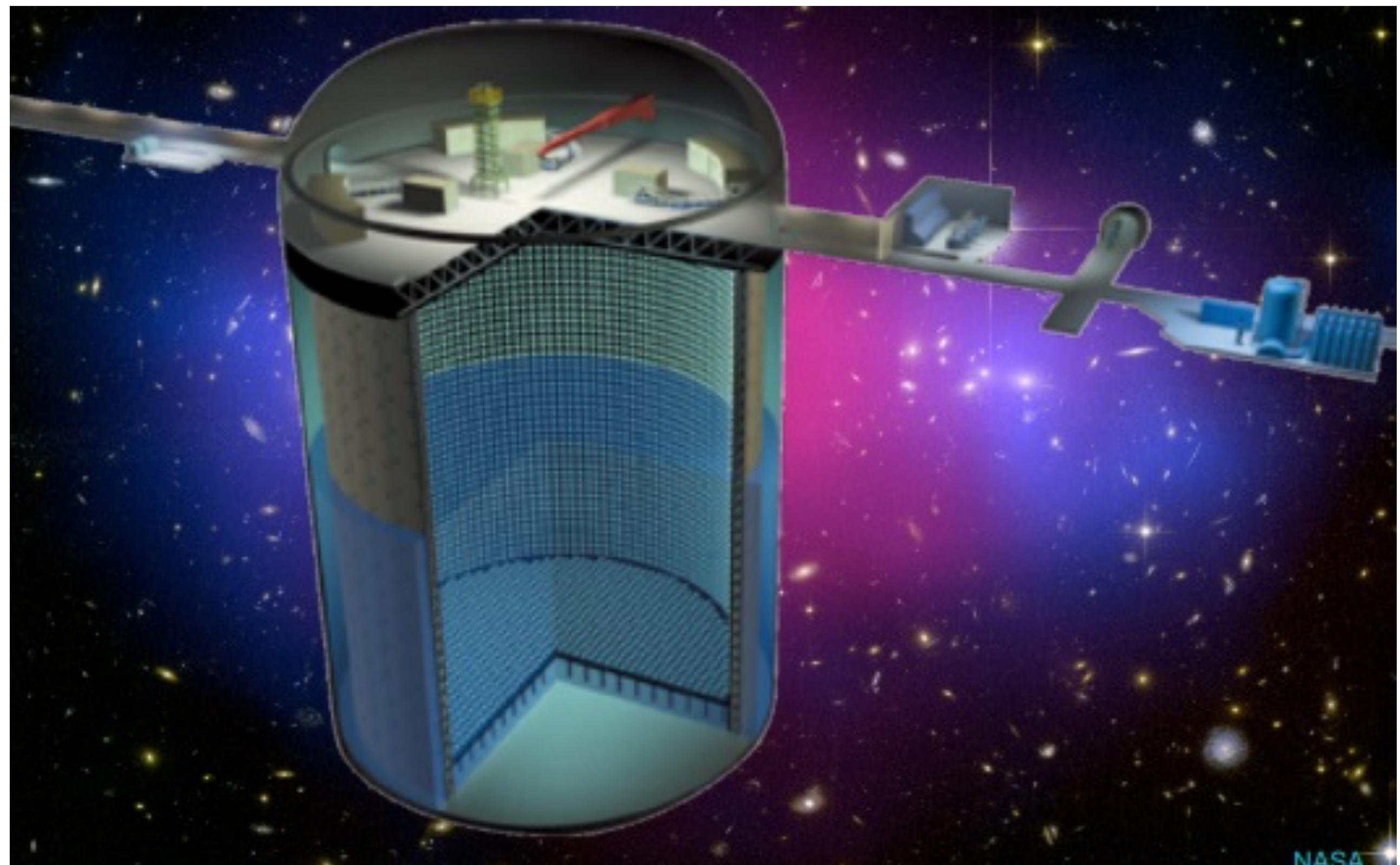
Débil (10^{-5})

Detectar neutrinos no es fácil

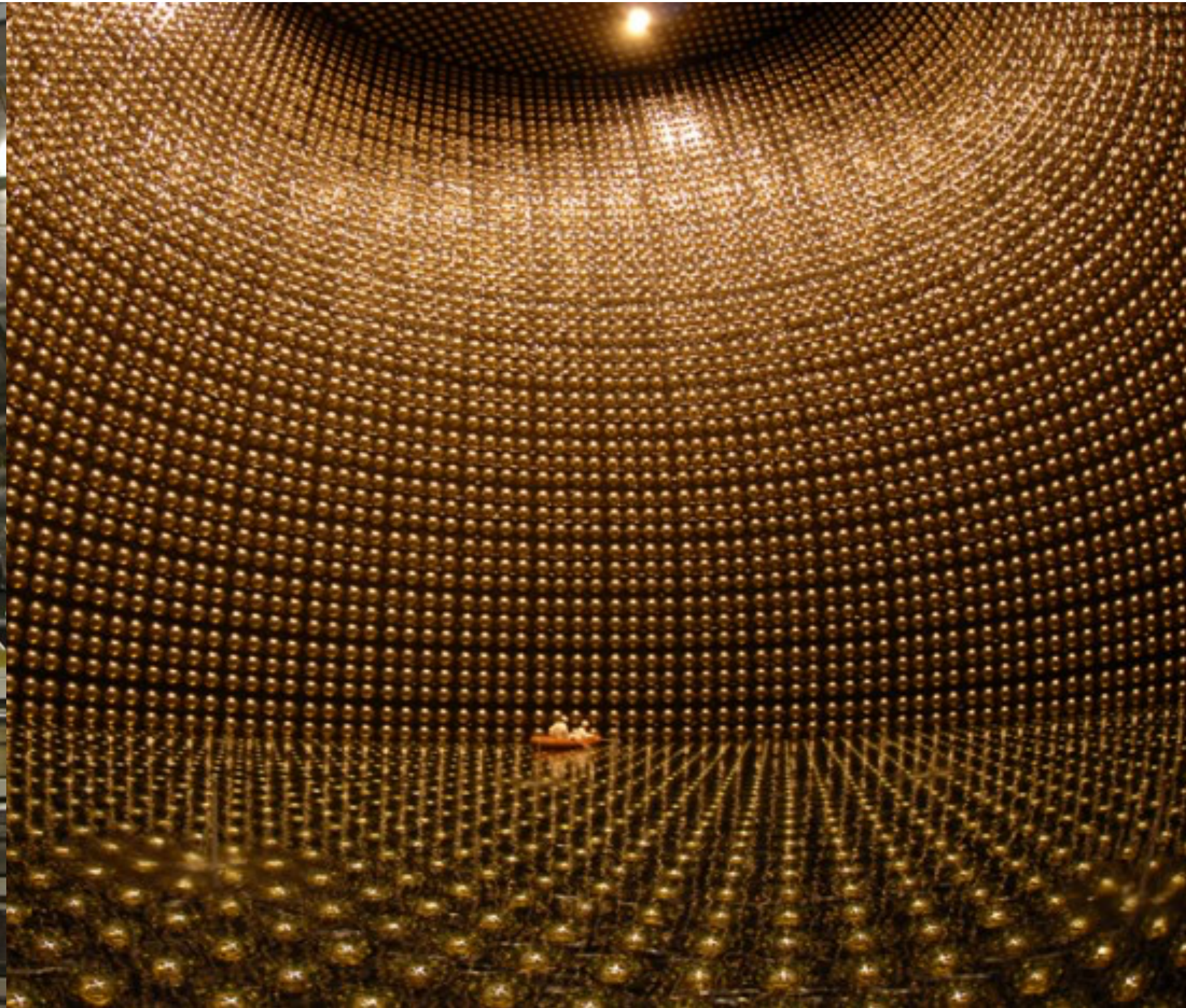
50 mill. de litros de agua bajo una montaña Japón

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

50.000 toneladas de agua

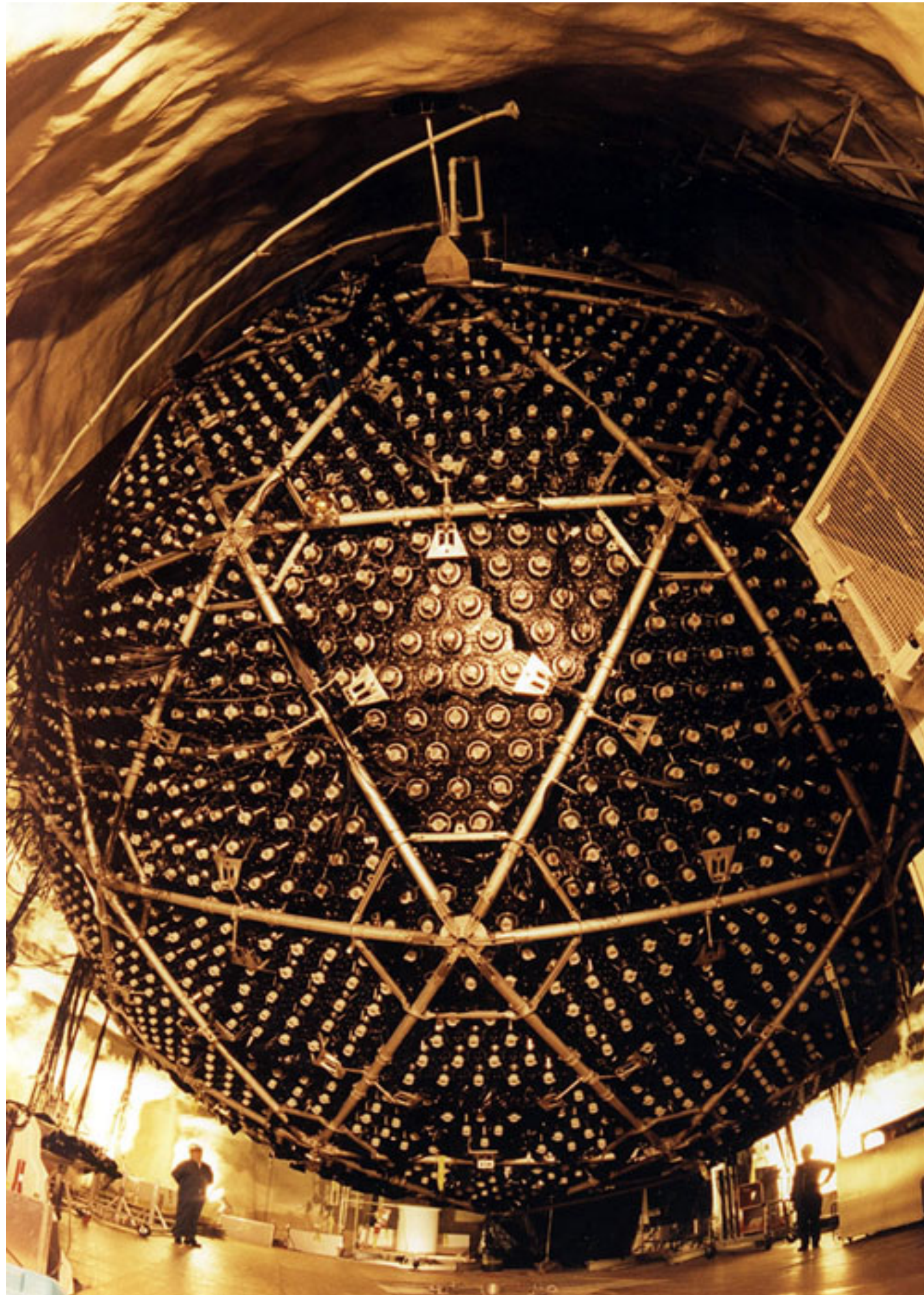


El ojo que todo lo vé

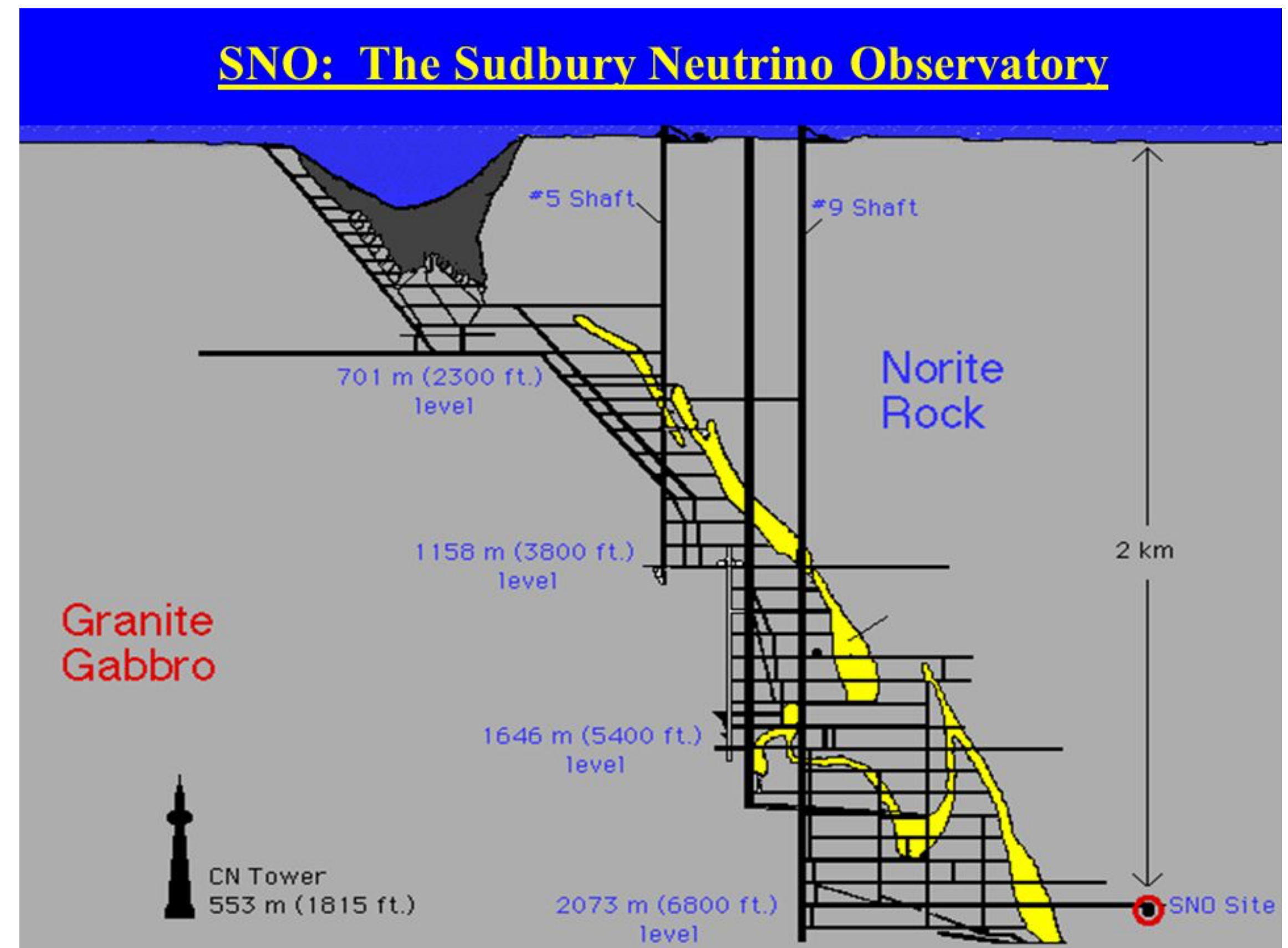


A 2 km de profundidad

Canadá

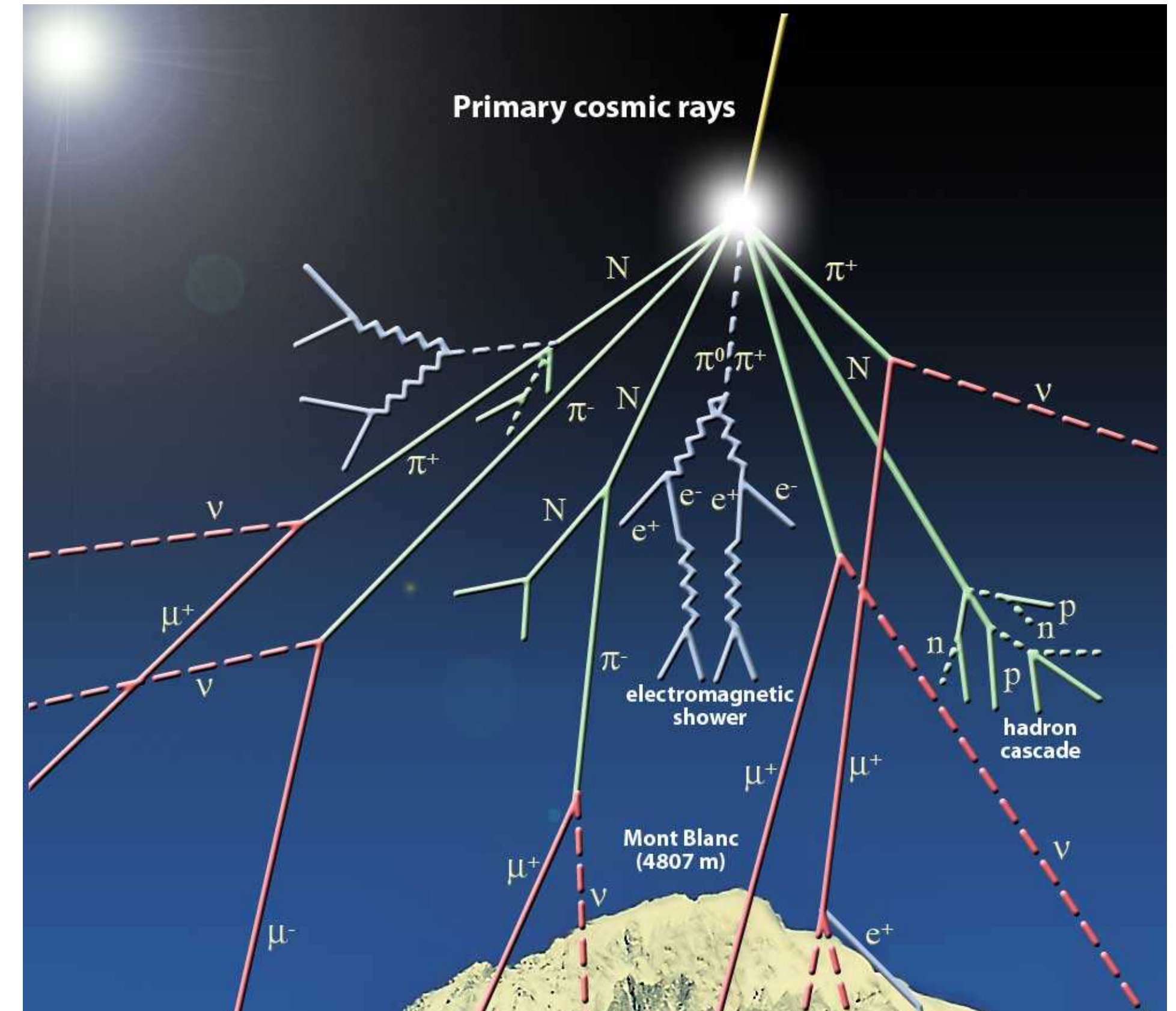


- SNO, un preciosa bola llena de agua pesada a 2 km de profundidad



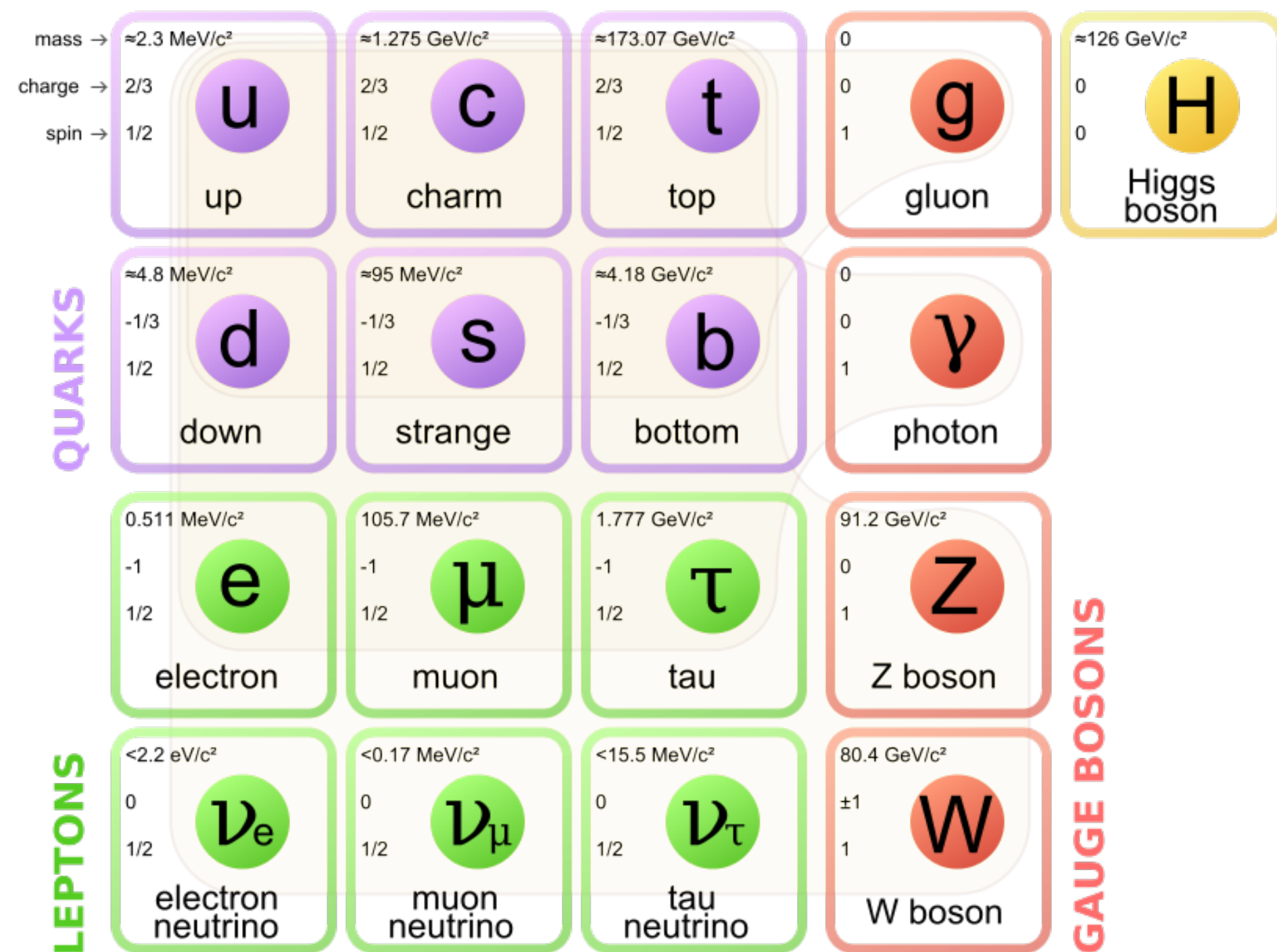
En las profundidades de la Tierra

- 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



Unica evidencia hasta la fecha de Física mas allá del Modelo Estándar

Modelo Estándar

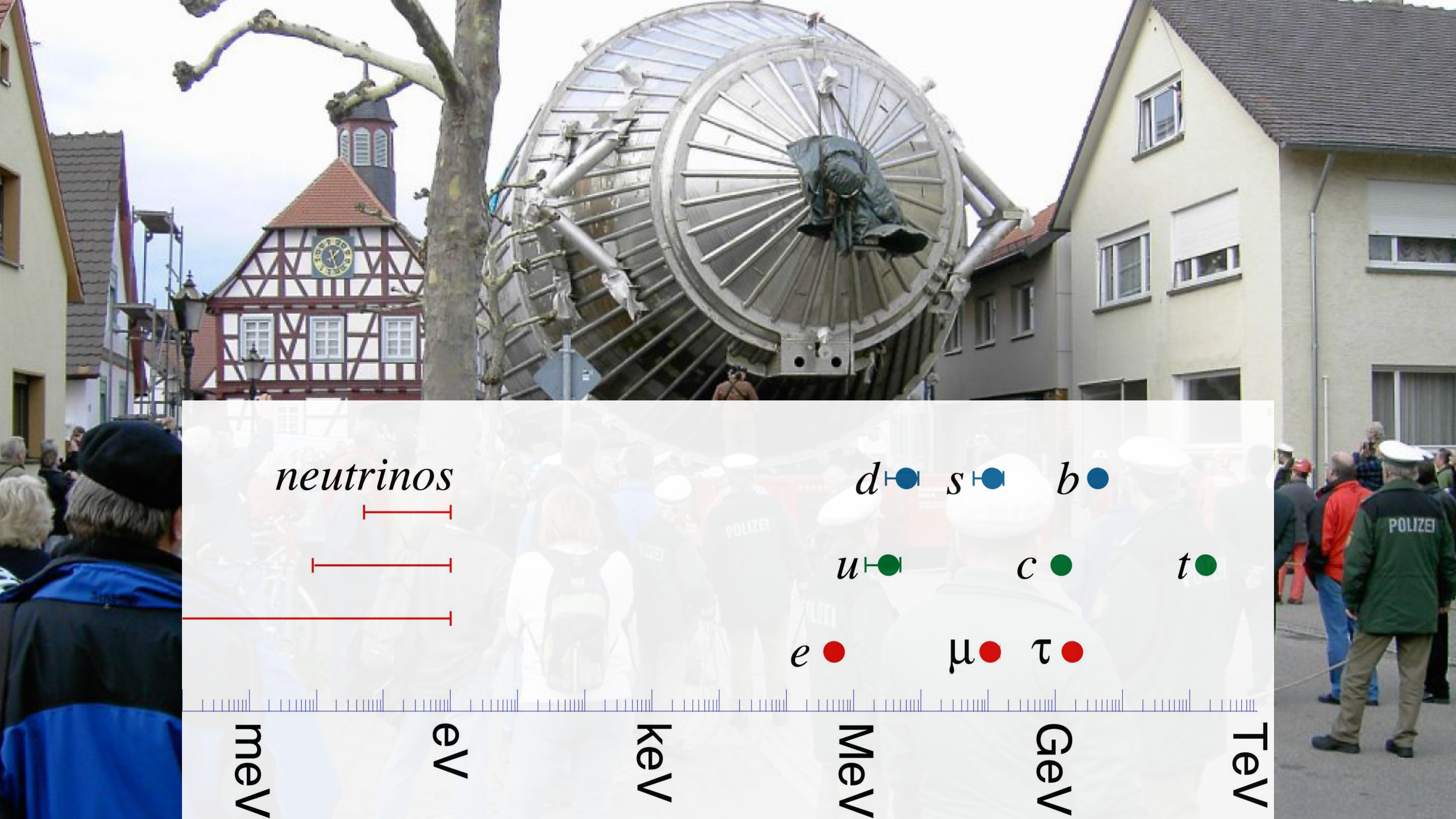


1973

Masa de los neutrinos



1998



neutrinos

d s b

u c t

e μ τ

meV

eV

keV

MeV

GeV

TeV



¿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**

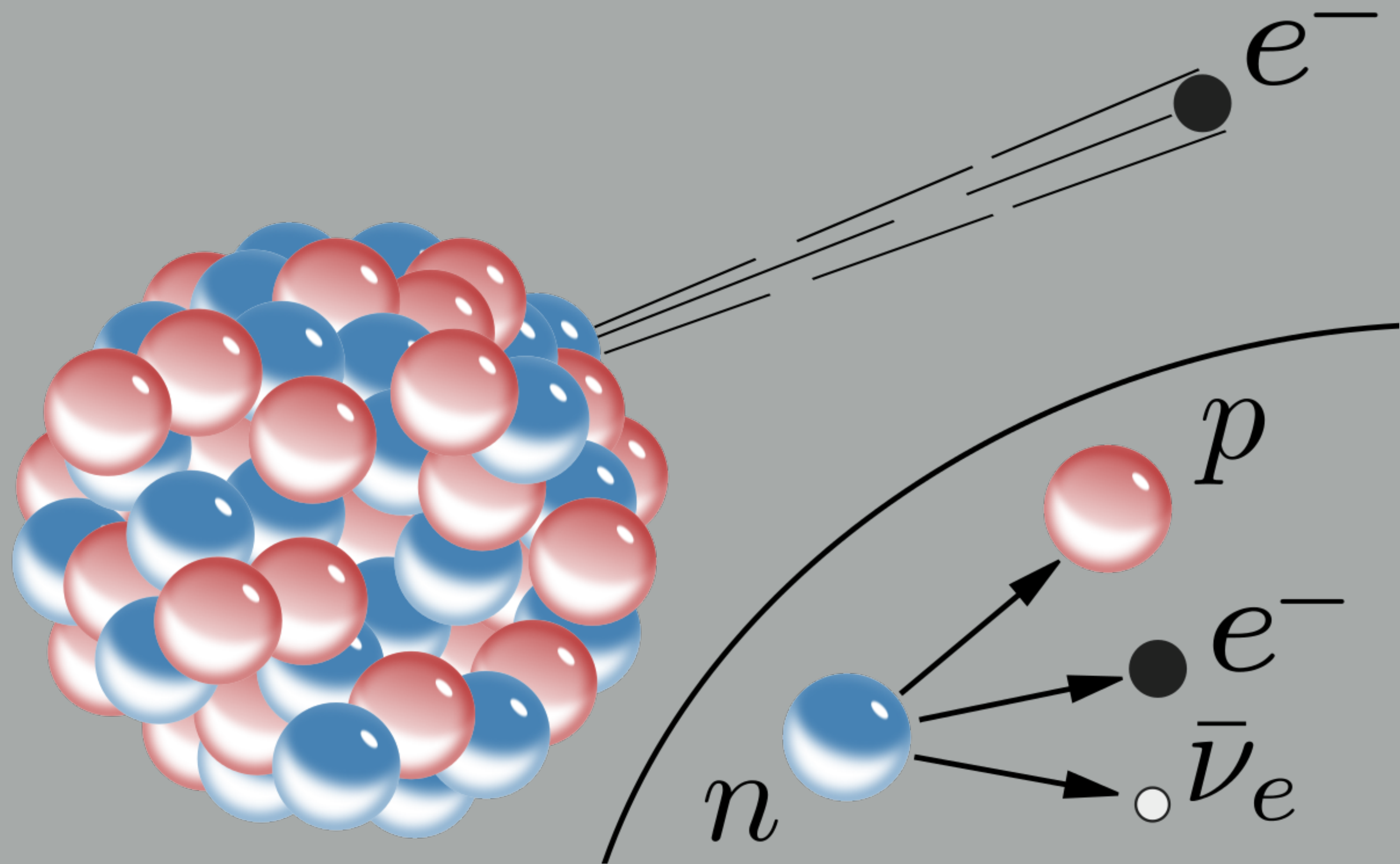
¿Cuál es la masa absoluta de los neutrinos ?

¿ Violan los neutrinos la simetría CP ?

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

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

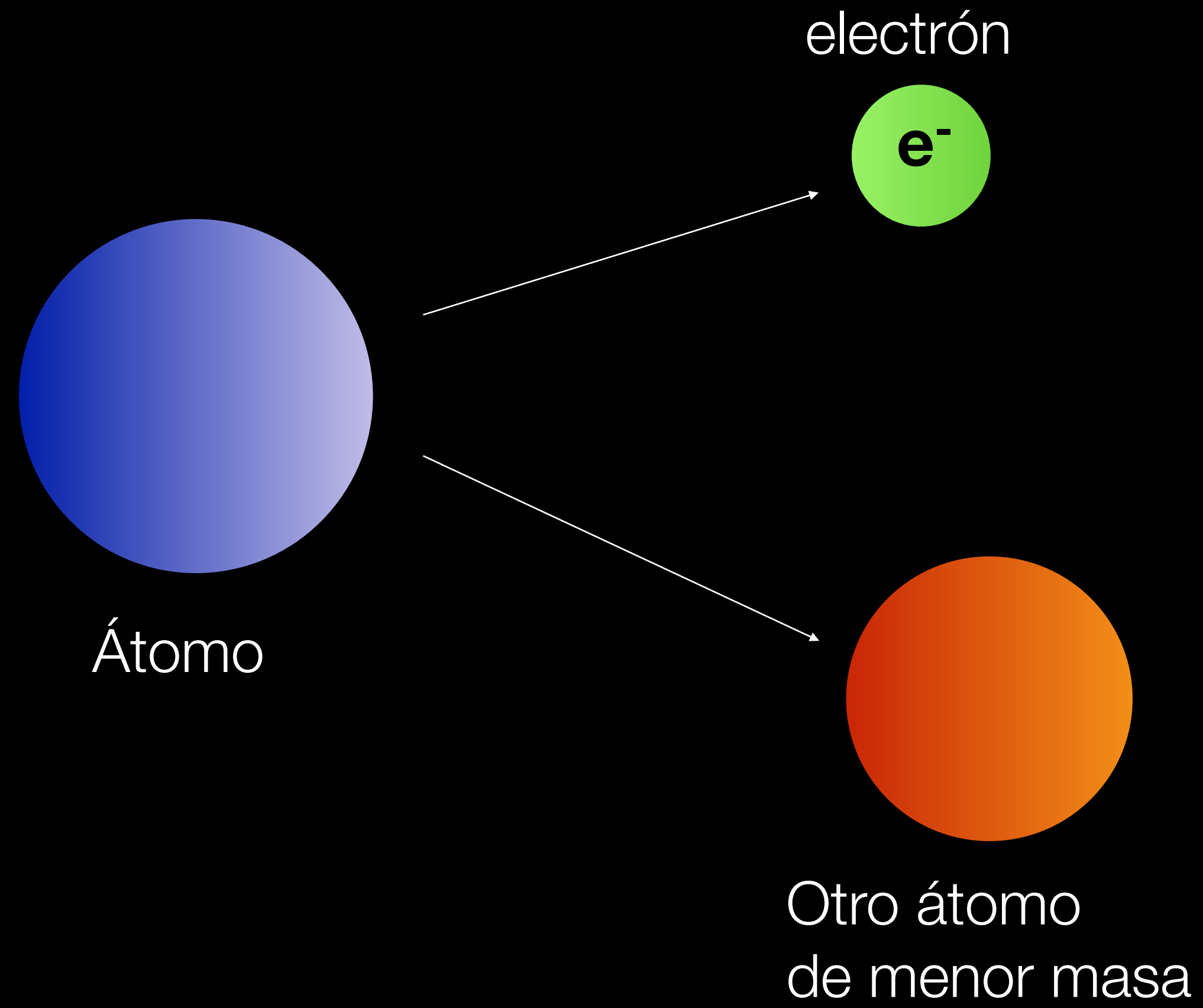
¿ De donde salen los neutrinos ?



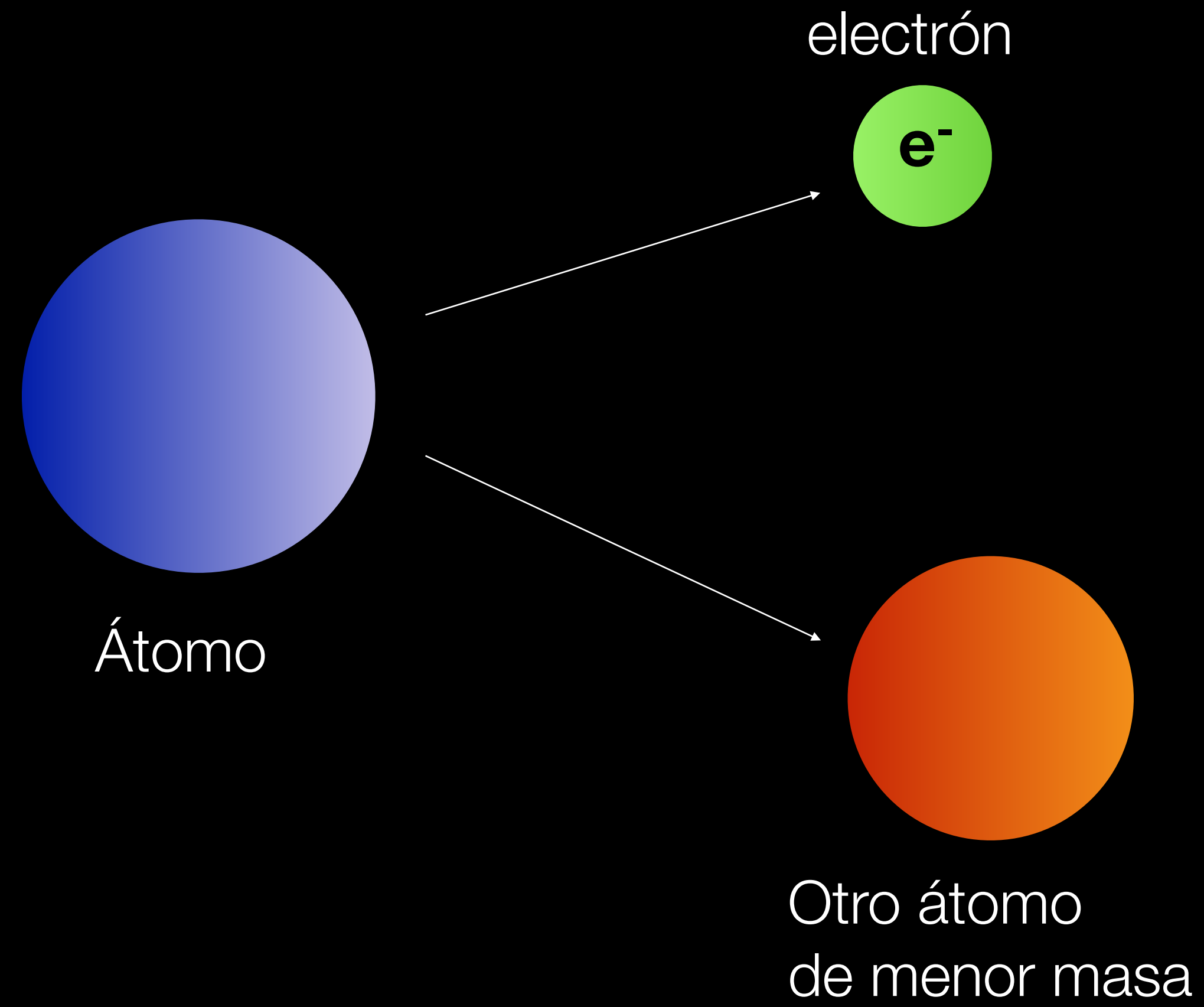


desintegración Beta

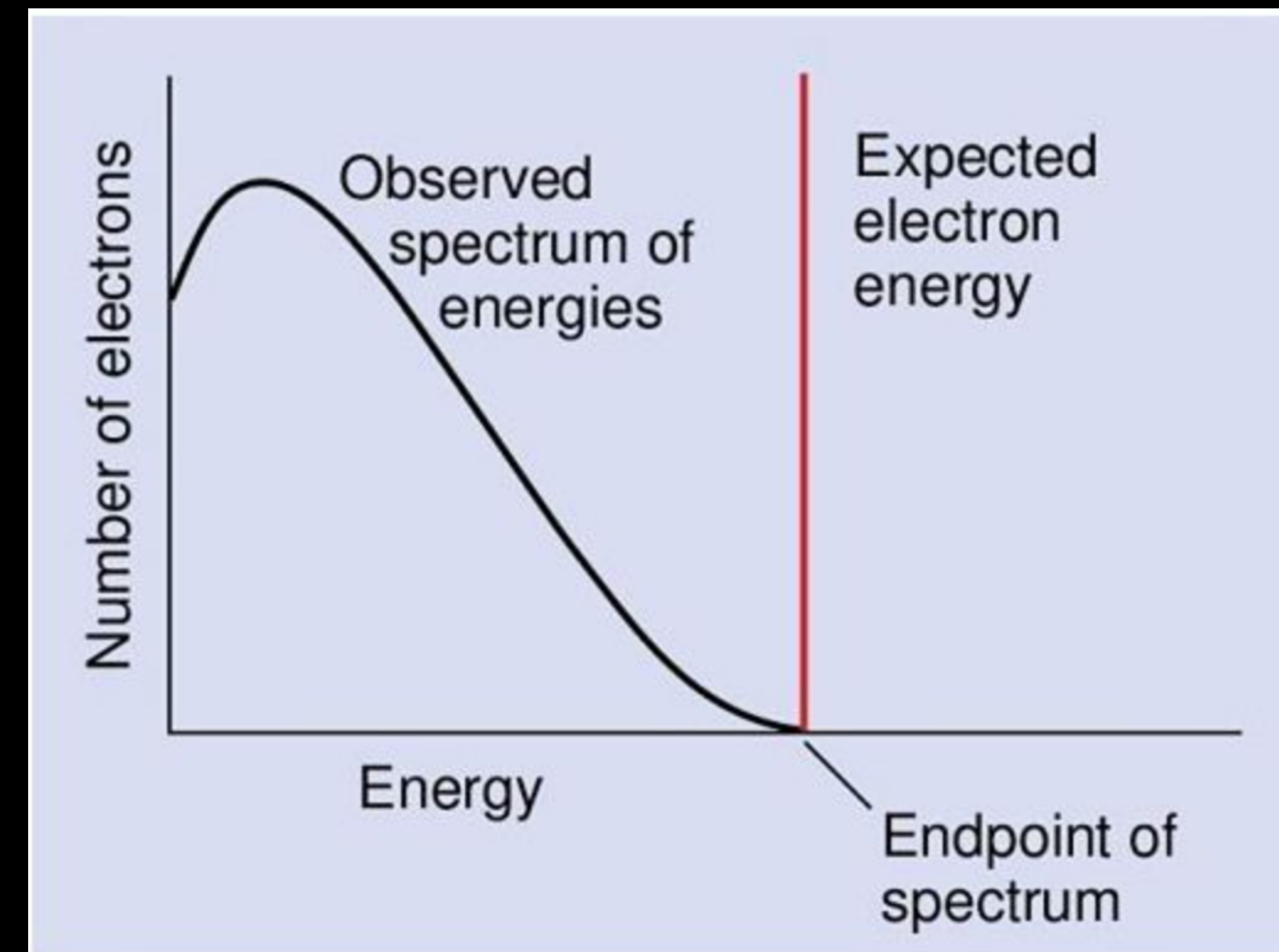
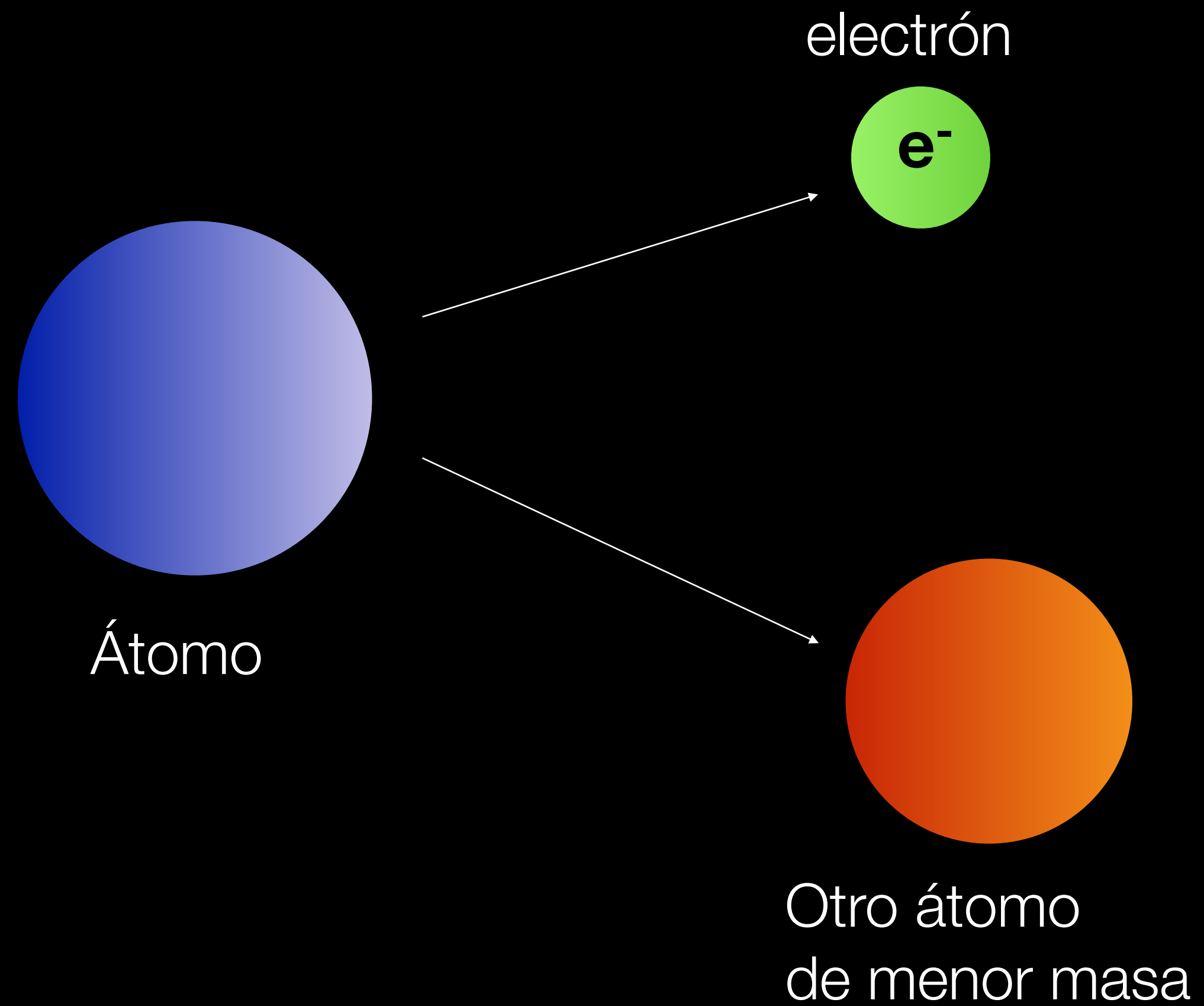
lo que se sabia de ella en 1920



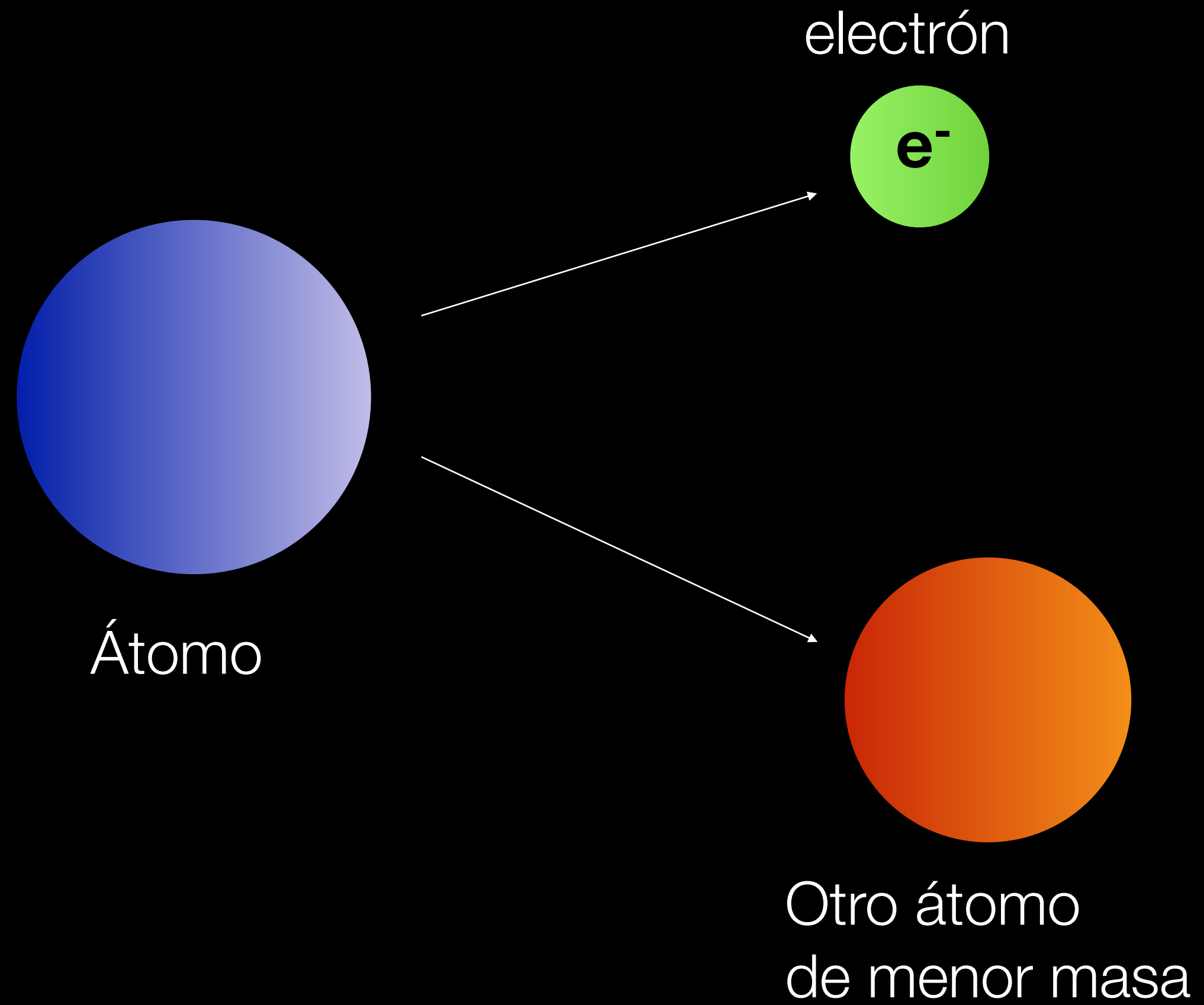
Hasta que empezaron a ver cosas extrañas ...



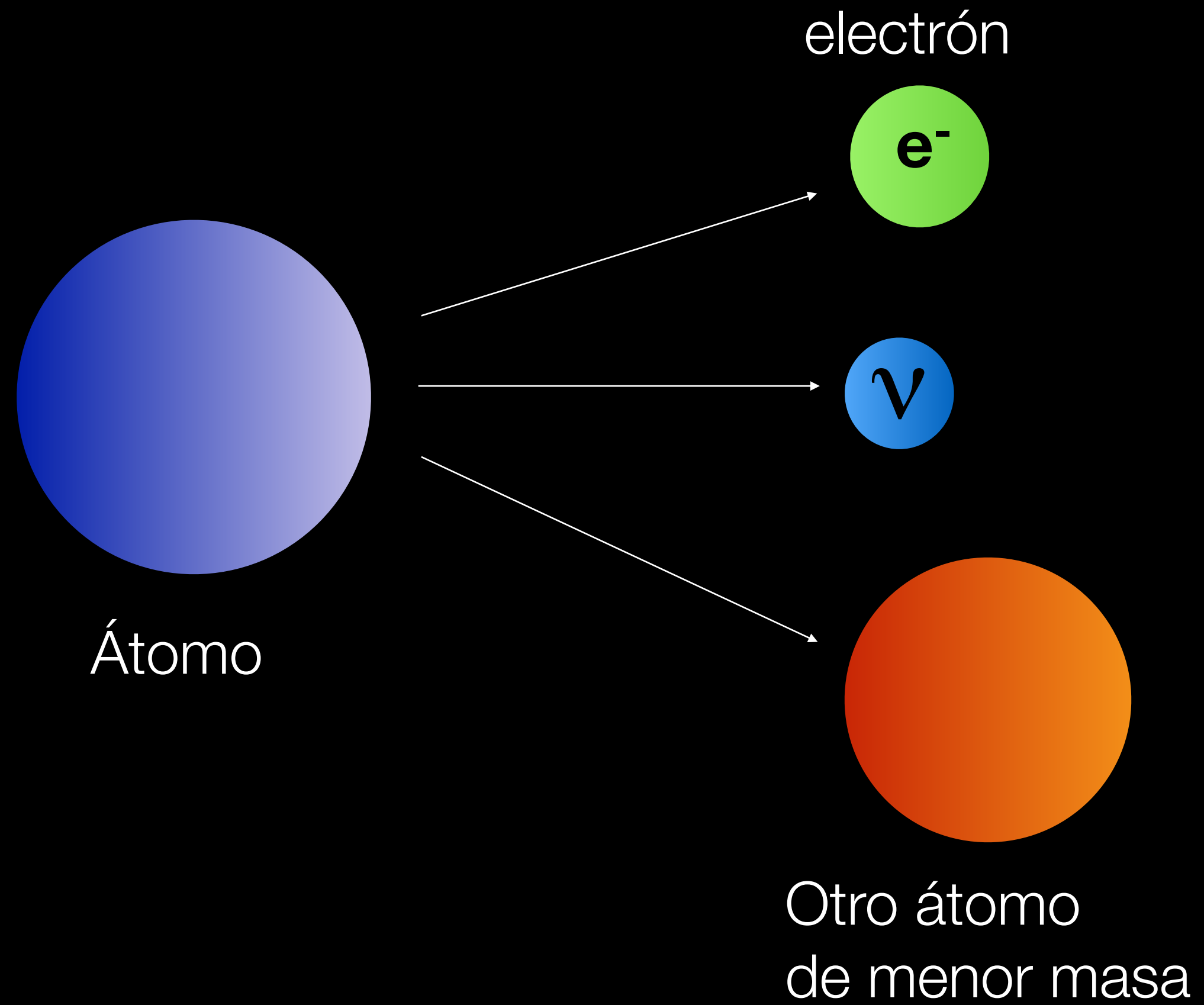
Hasta que empezaron a ver cosas extrañas ...



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



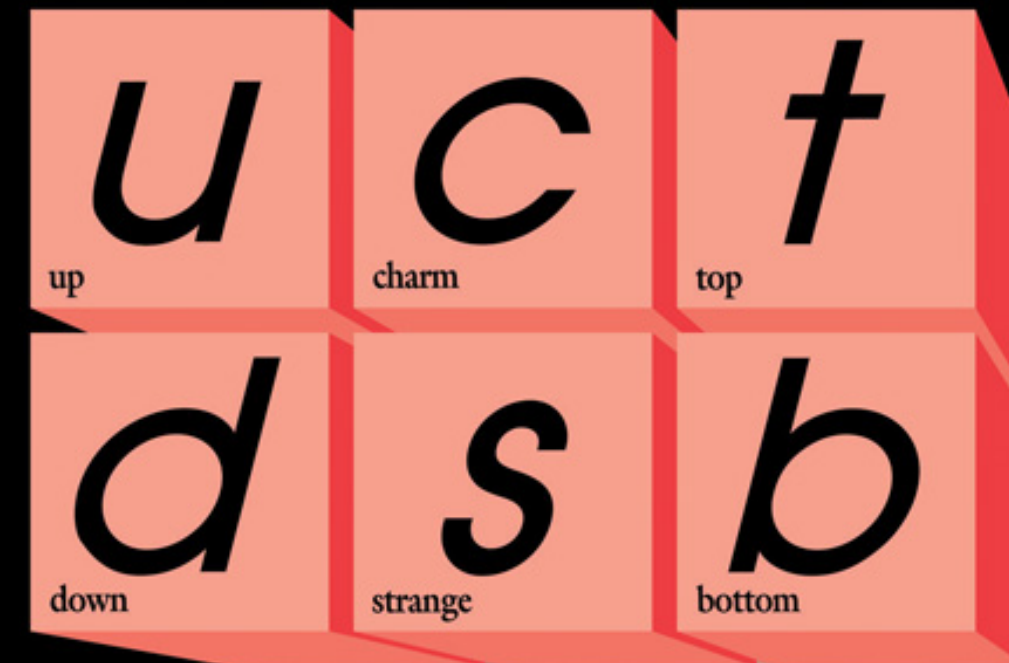
En 1930 Pauli postuló la existencia de una pequeña partícula neutra y sin masa, portadora de la energía perdida



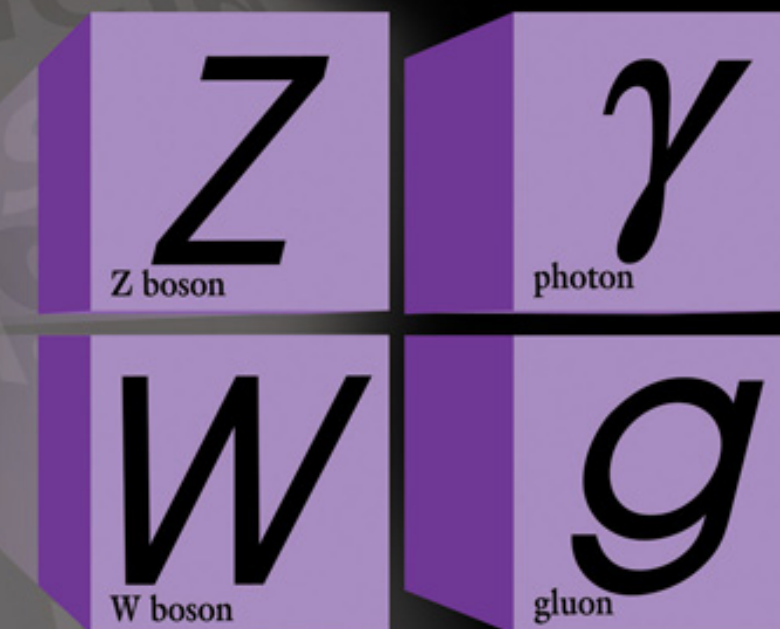


Reines y Cowan
1956

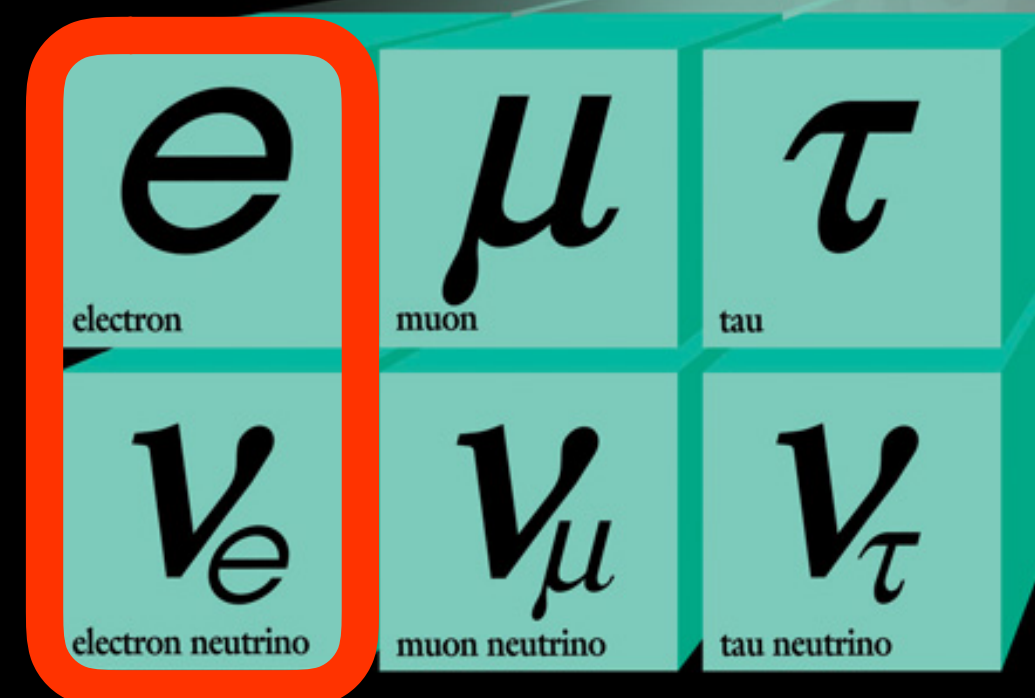
Quarks



Forces

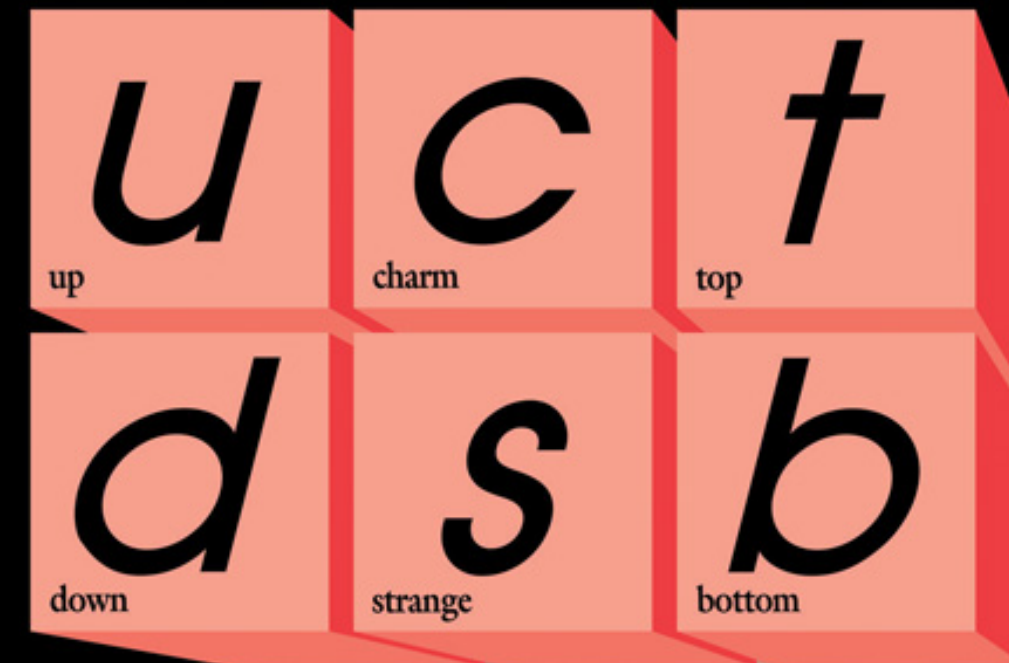


1897

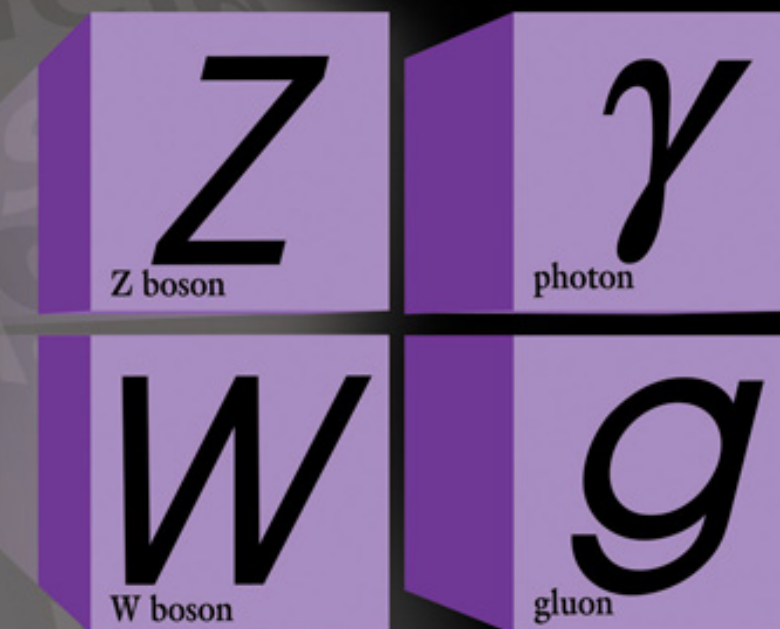


1956

Quarks



Forces



1897

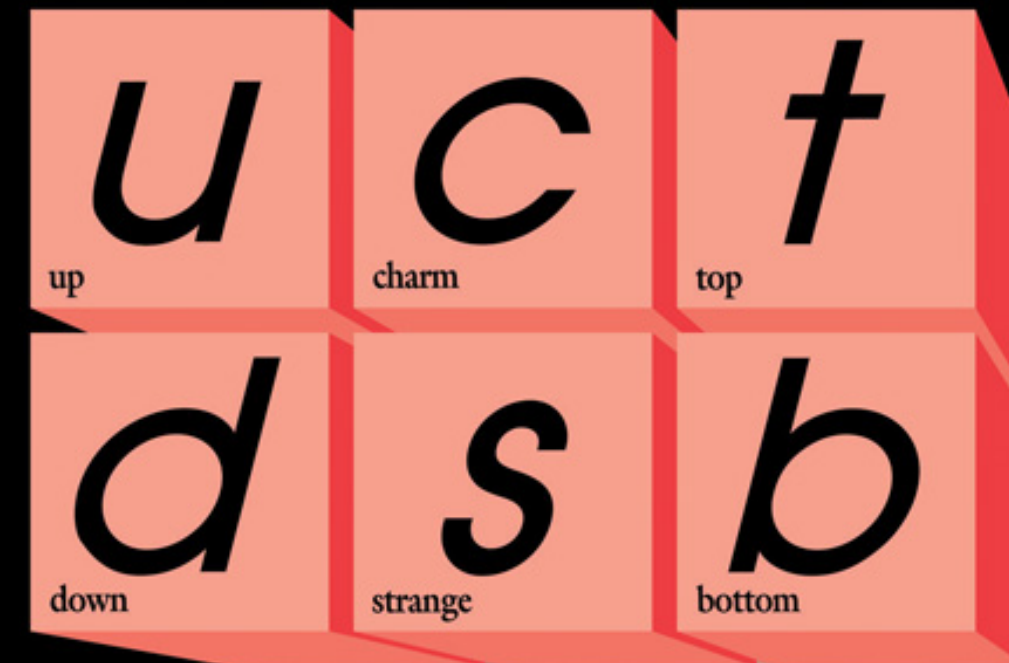
1936



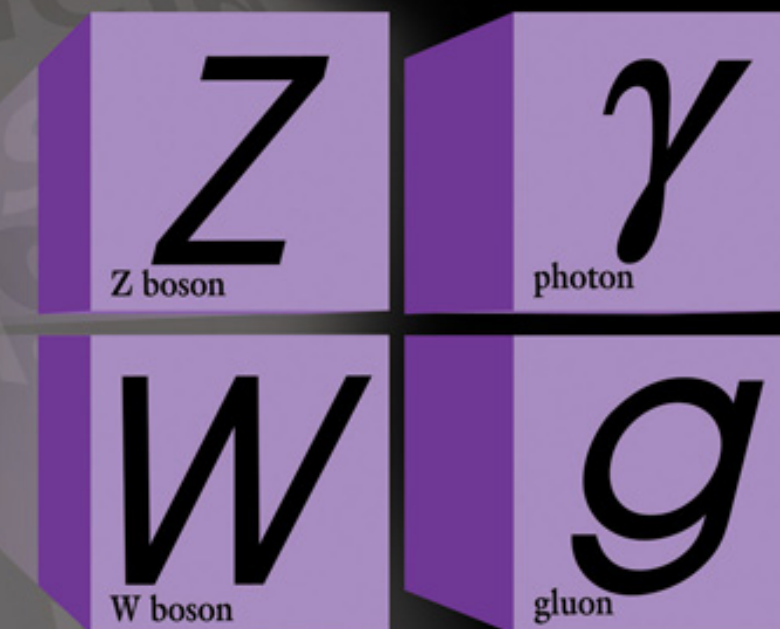
1956

Descubrimiento del muón
1936

Quarks

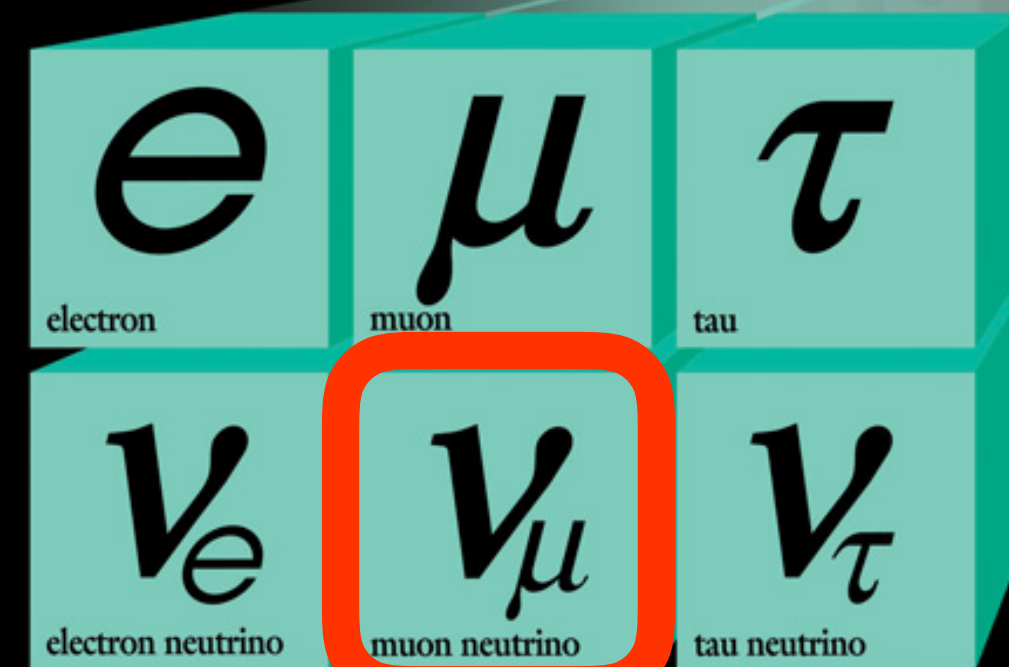


Forces



1897

1936



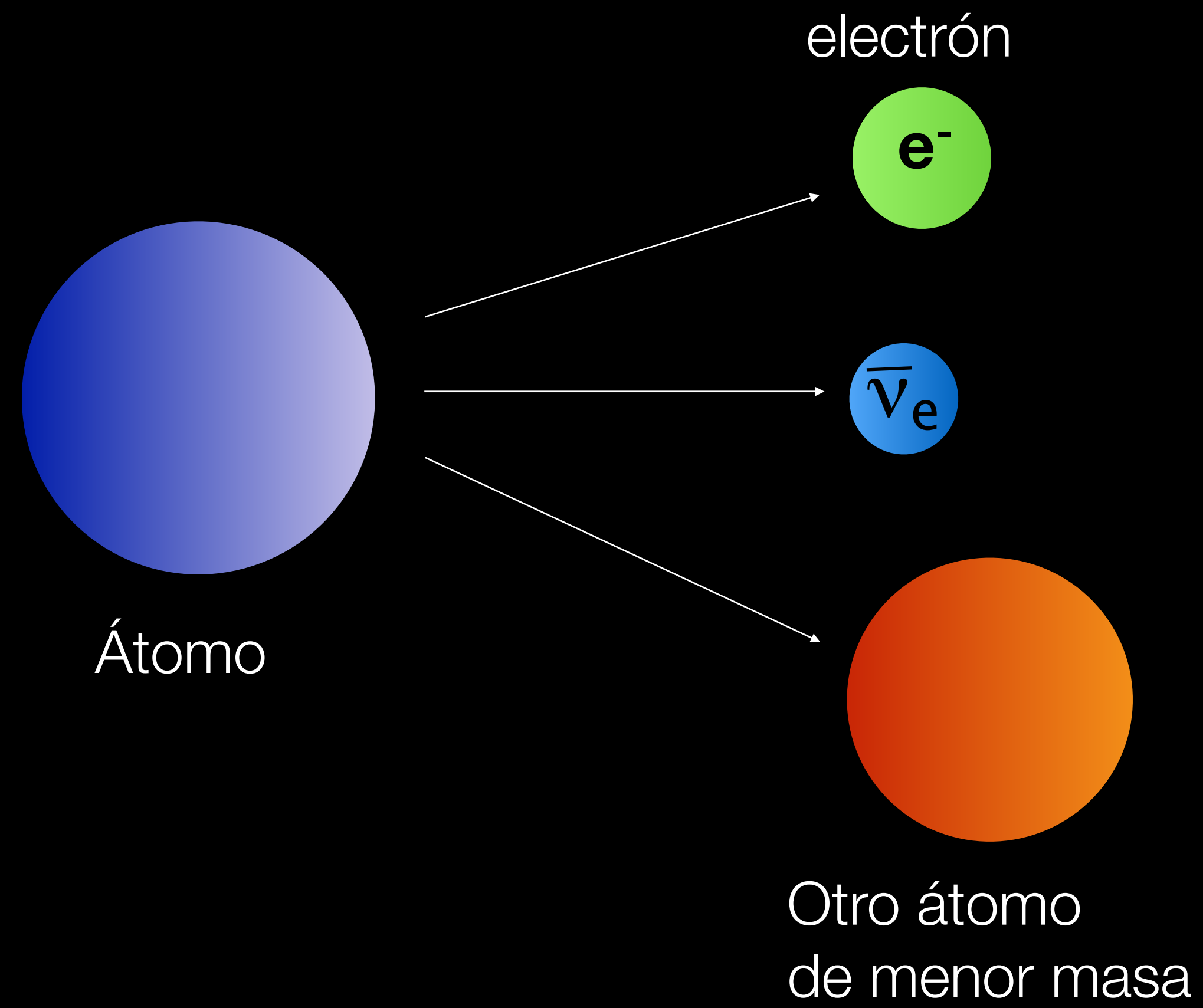
1956

1962

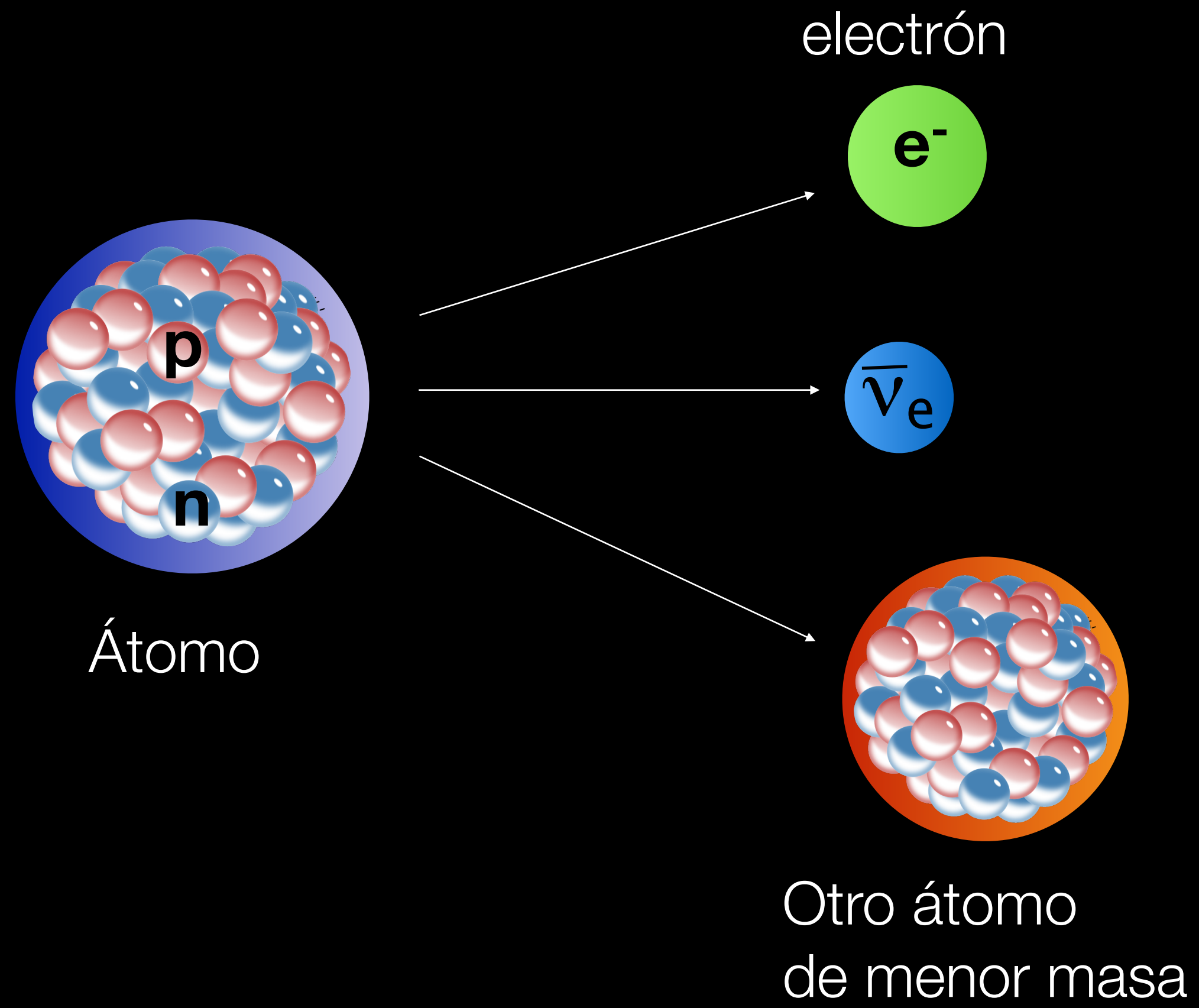
Descubrimiento del neutrino muónico
1962

desintegración Beta

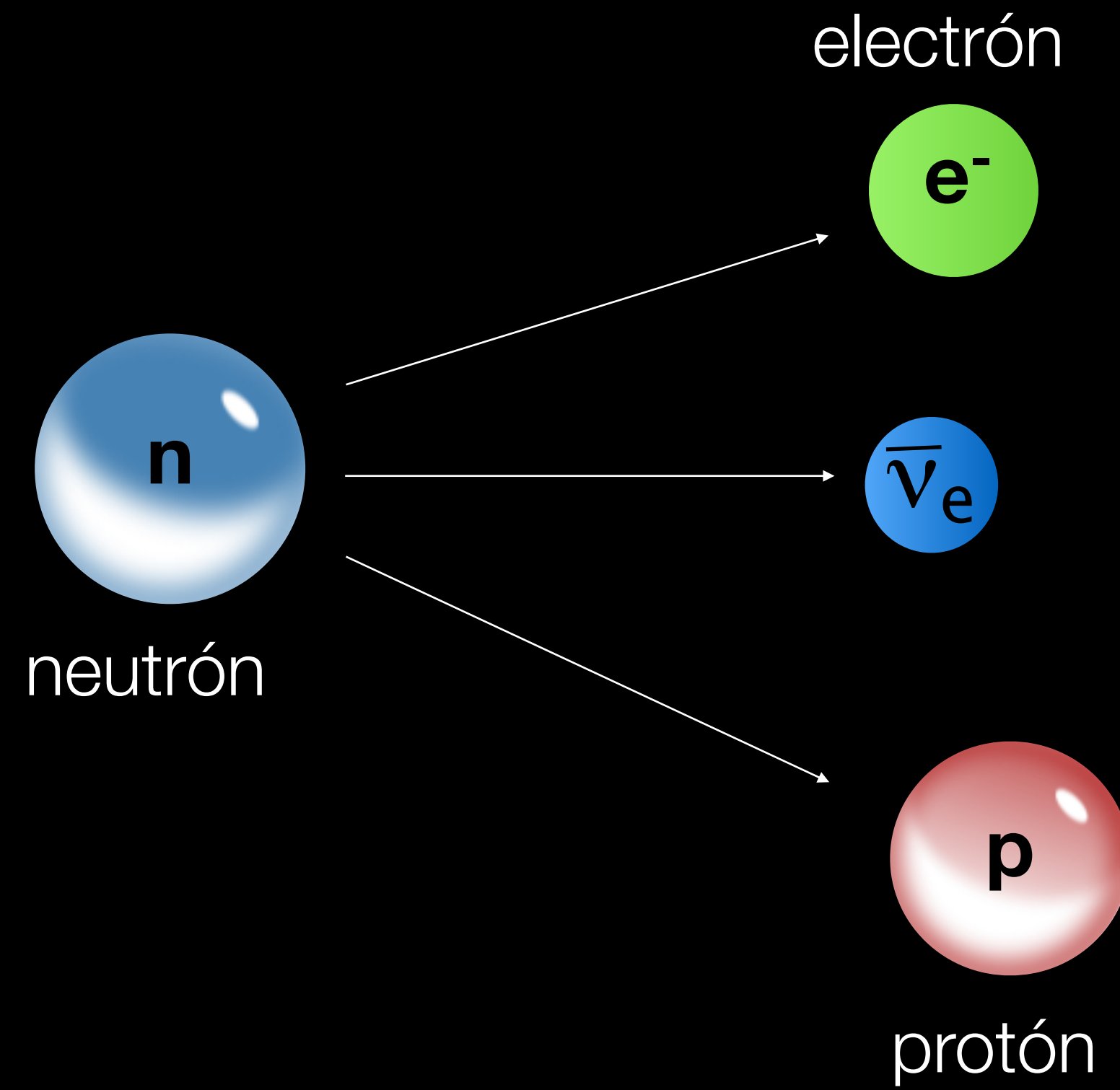
(en el siglo XXI)



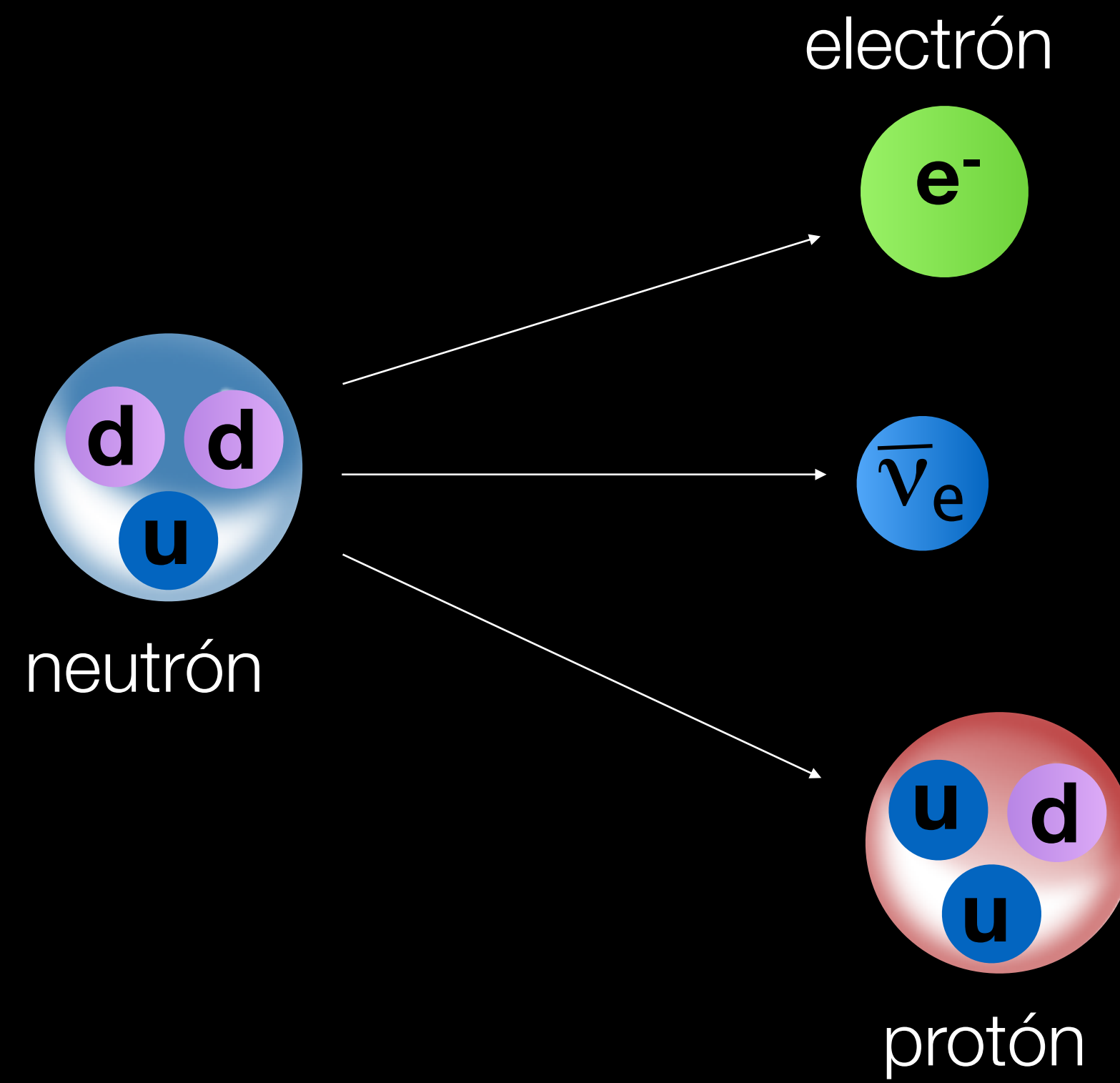
dentro del núcleo
atómico



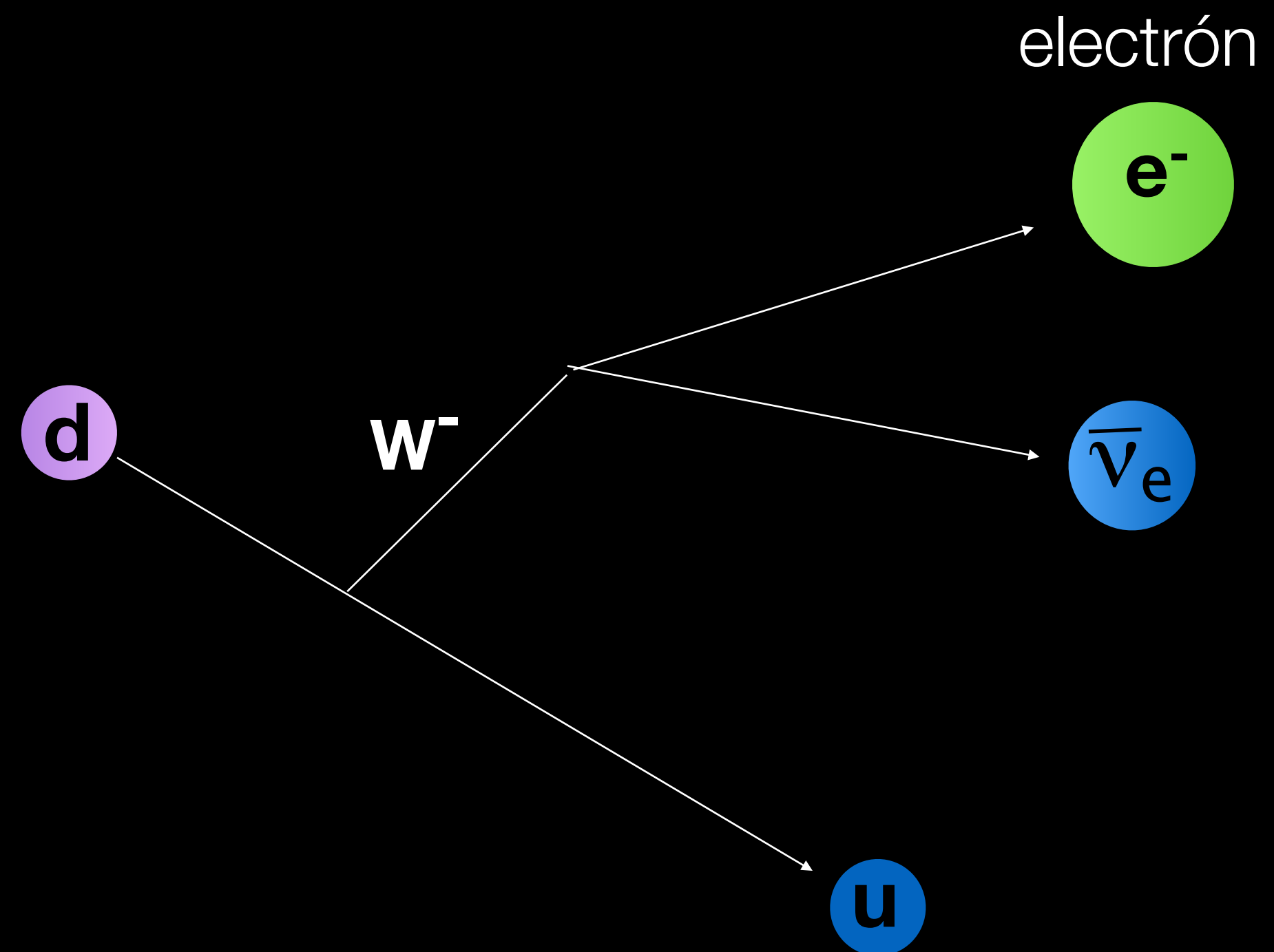
los nucleones protones y neutrones



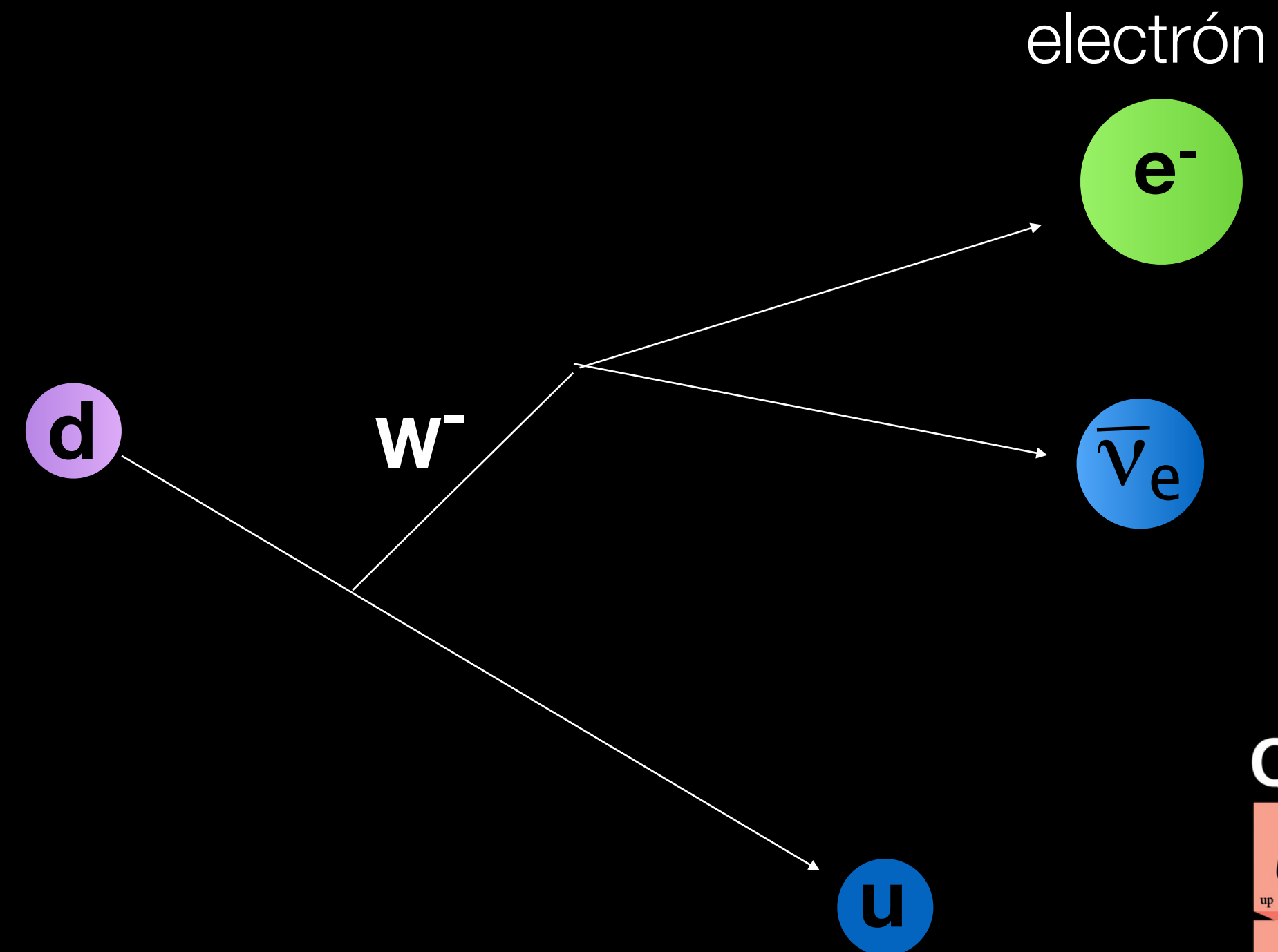
dentro de los nucleones



lo que en realidad ocurre



lo que en realidad ocurre



Quarks

u up	c charm	t top
d down	s strange	b bottom

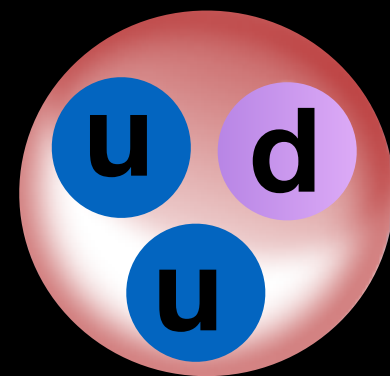
e electron	μ muon	τ tau
ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino

Forces

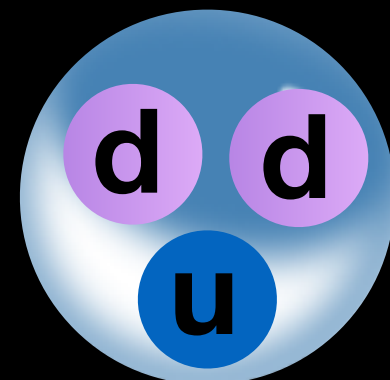
Z Z boson	γ photon
W W boson	g gluon



3 quarks (bariones)

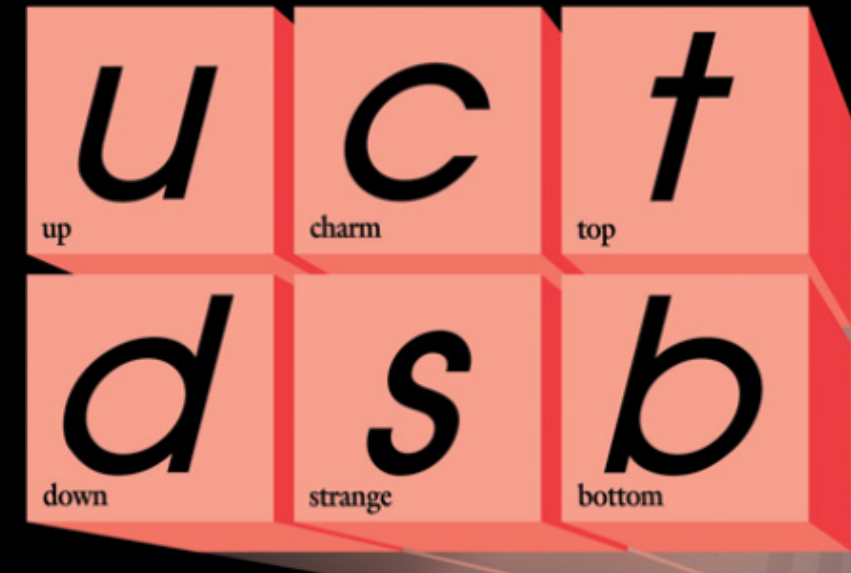


protón

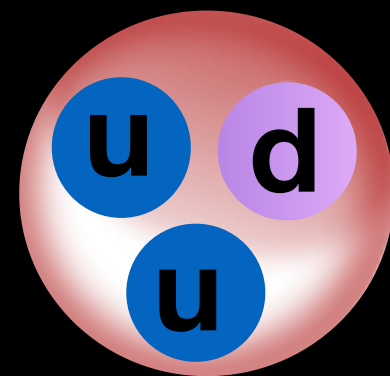


neutrón

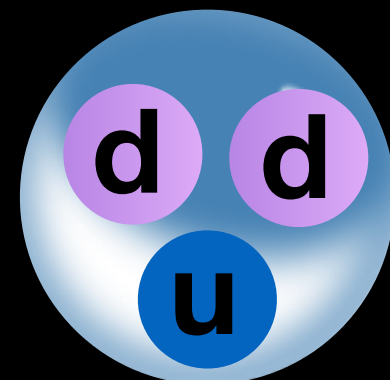
Quarks



3 quarks
(bariones)



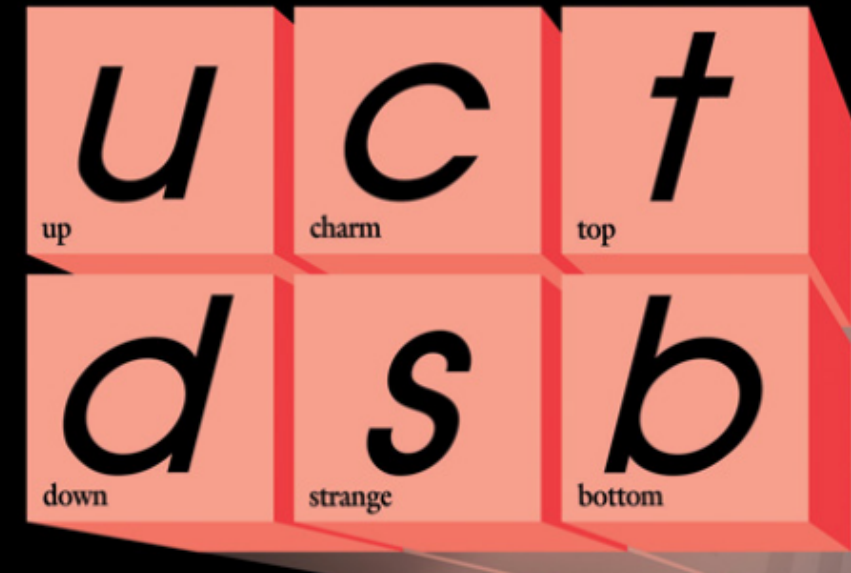
protón



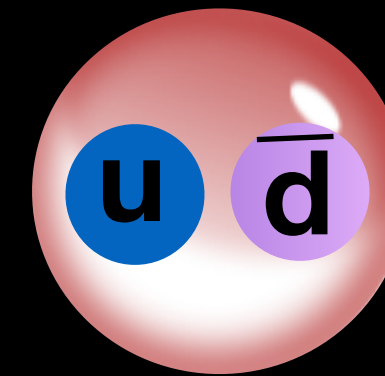
neutrón

$M \sim 1 \text{ GeV}$

Quarks



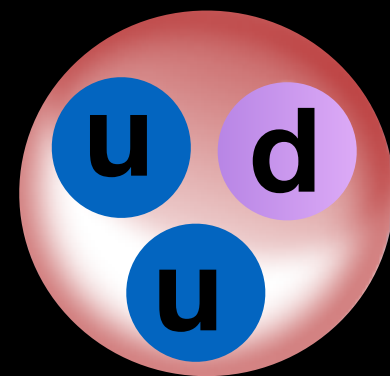
2 quarks
(mesones)



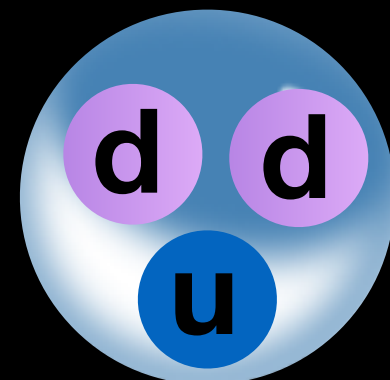
pión (π)

$M \sim 0.15 \text{ GeV}$

3 quarks
(bariones)

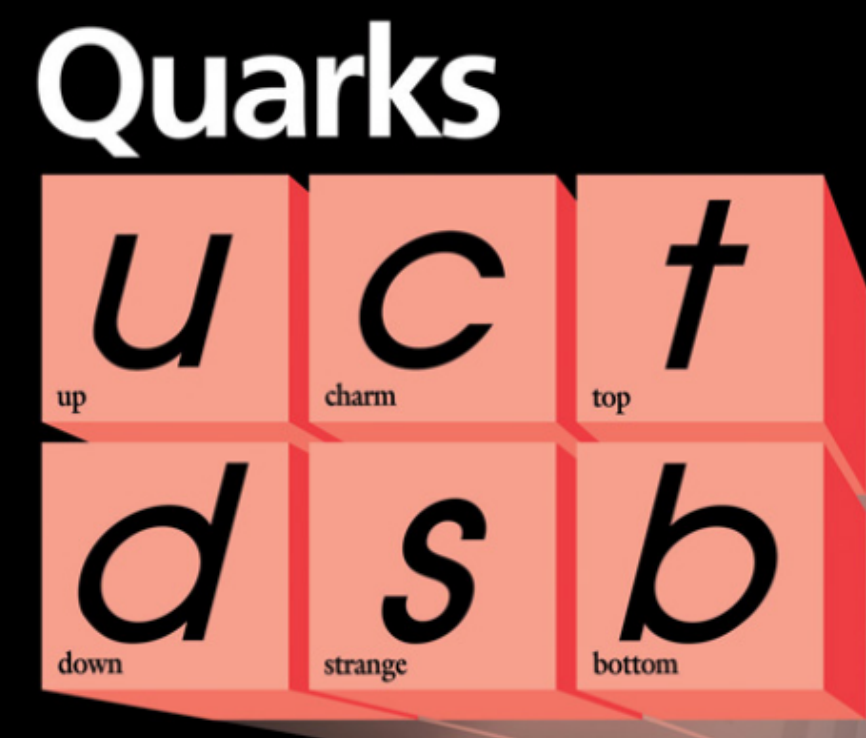


protón

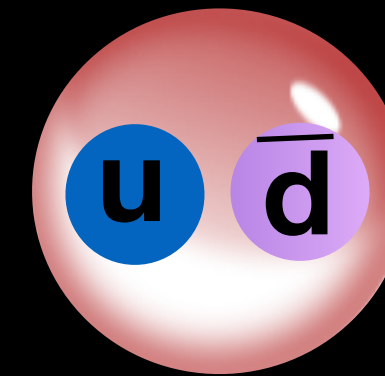


neutrón

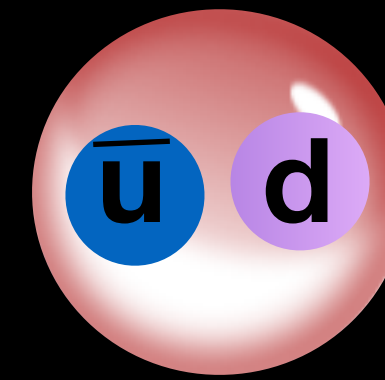
M ~ 1 GeV



2 quarks
(mesones)



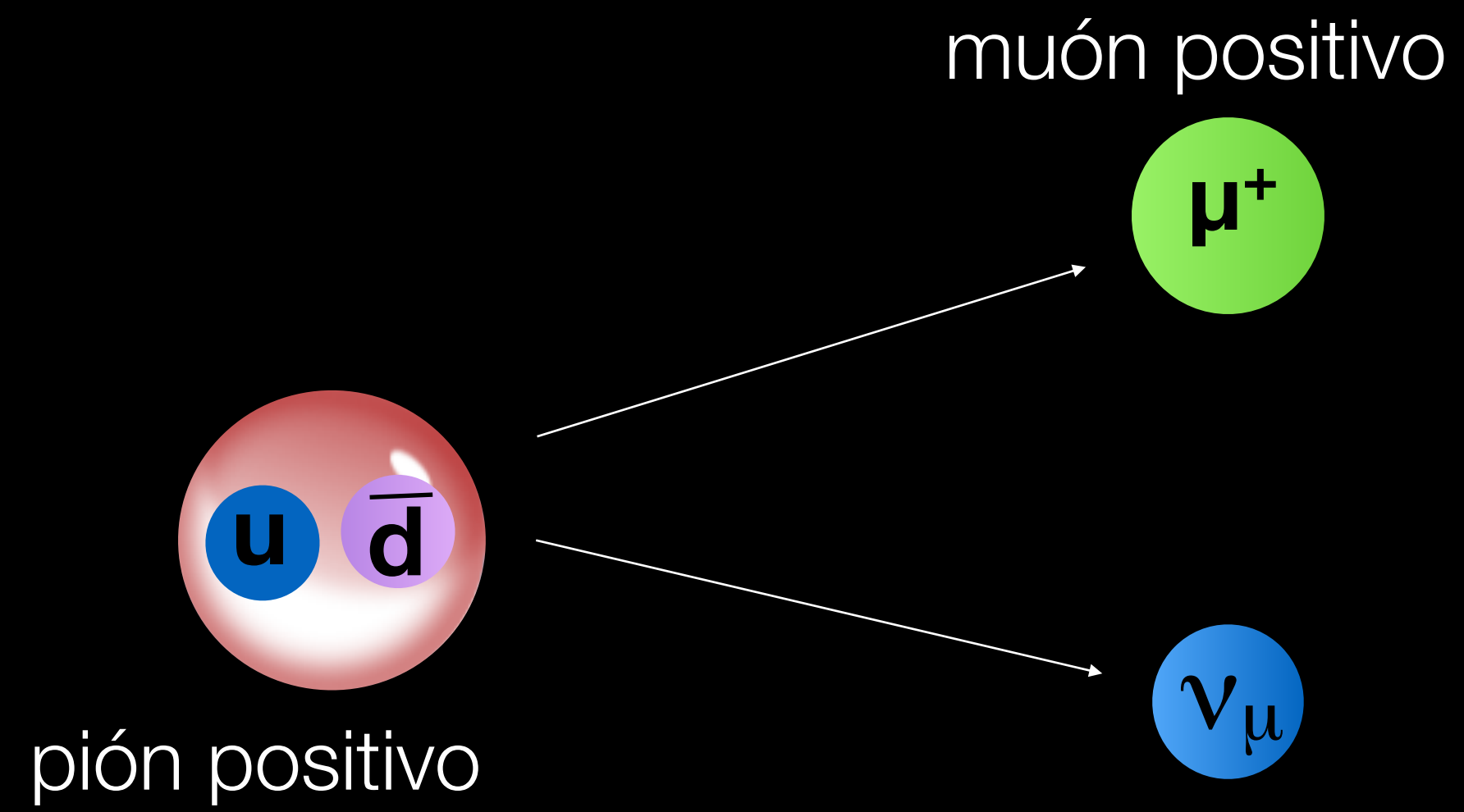
pión positivo (π^+)



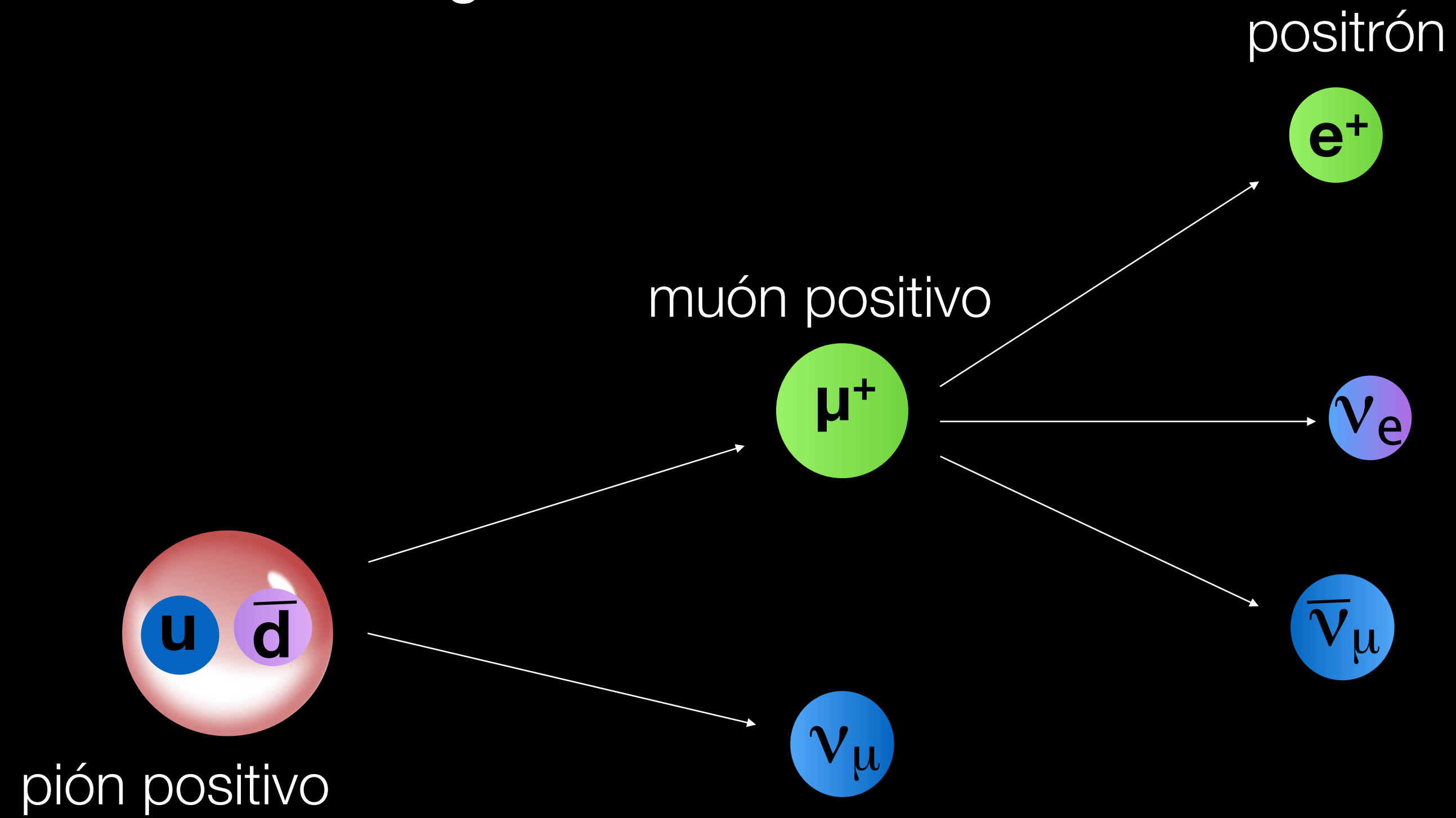
pión negativo (π^-)

M ~ 0.15 GeV

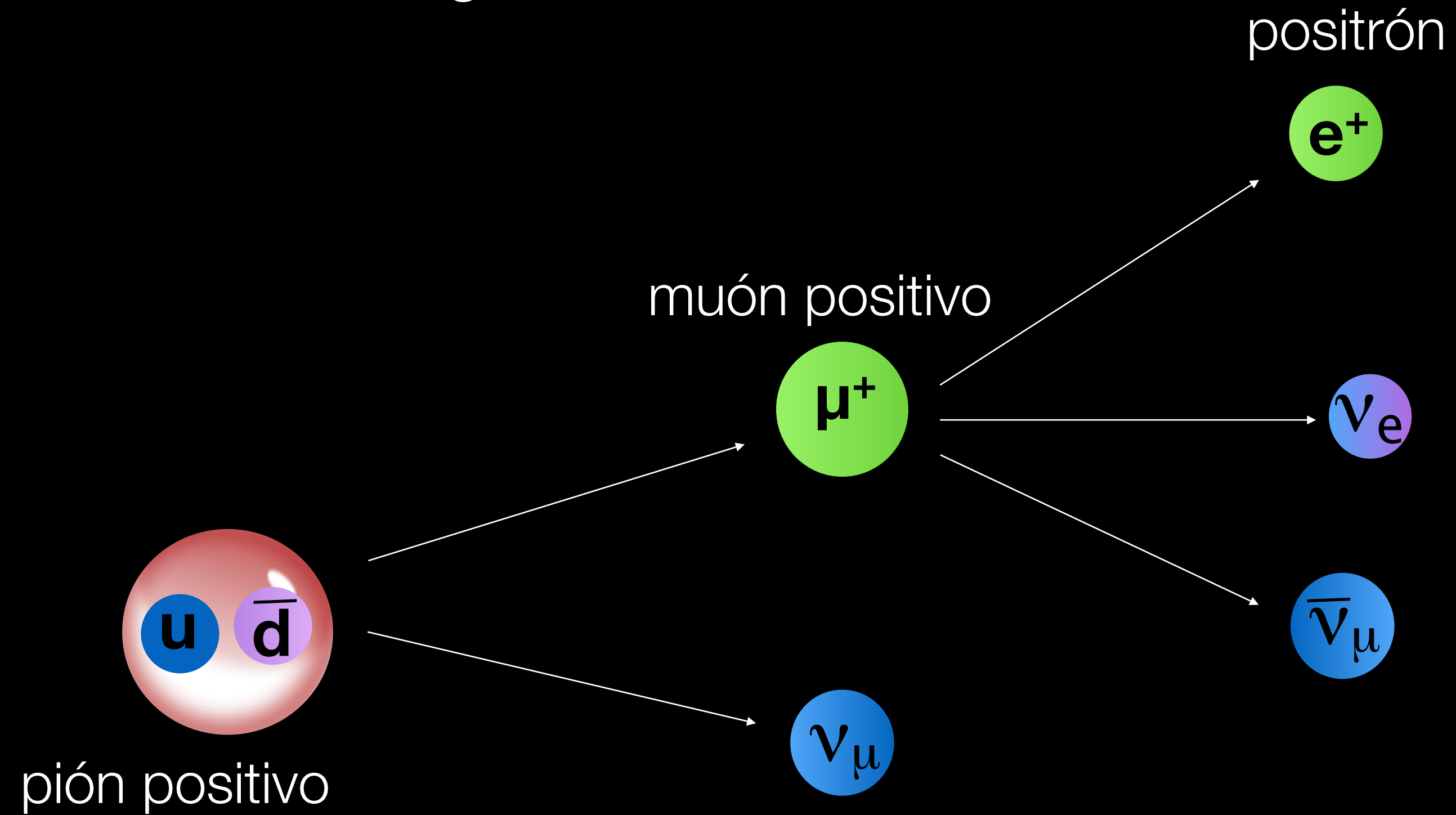
La desintegración del pión



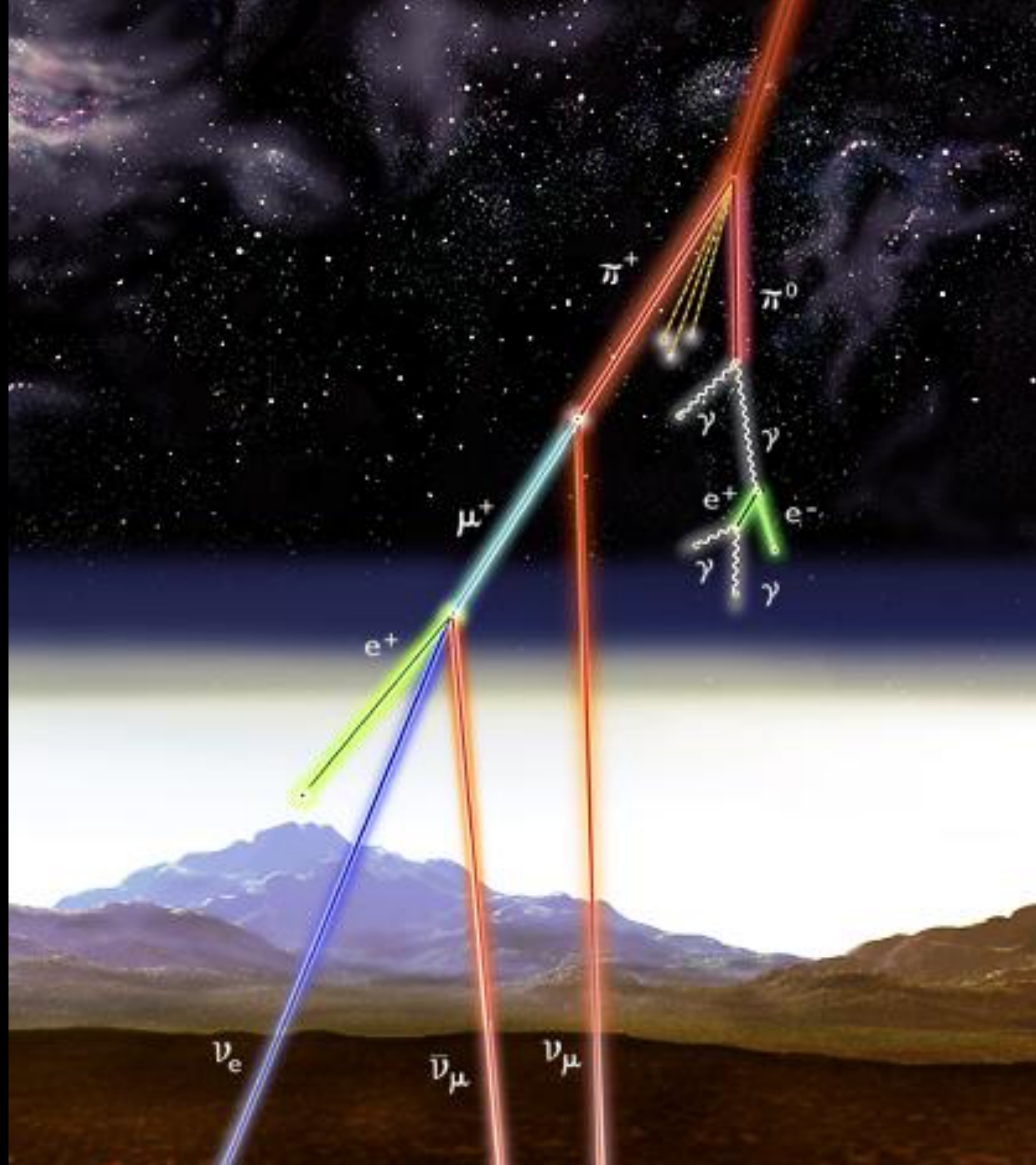
La desintegración del muón



La desintegración del muón



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



Neutrinos también se producen en la atmósfera

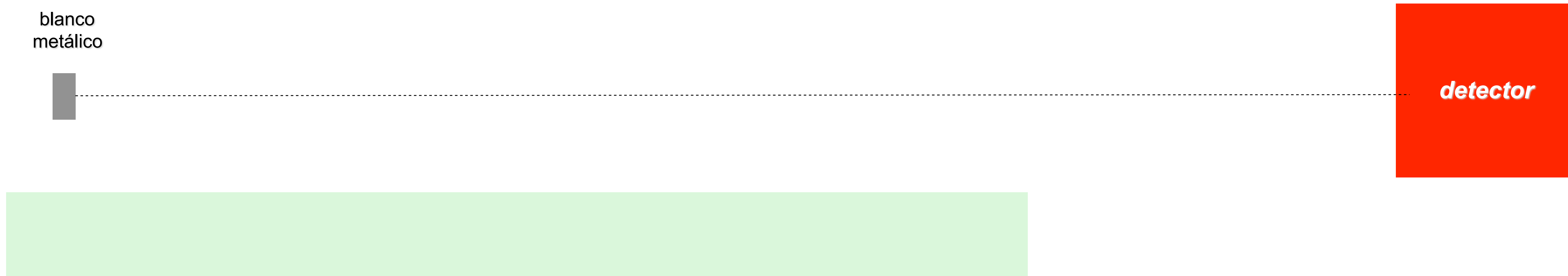


Haces de neutrinos

Haces de neutrinos

$$\theta_{23}, \theta_{13}, \theta_{12}, \delta_{CP} \quad \Delta m^2_{23}, \Delta m^2_{12}$$

- Todos los haces de neutrinos se producen así

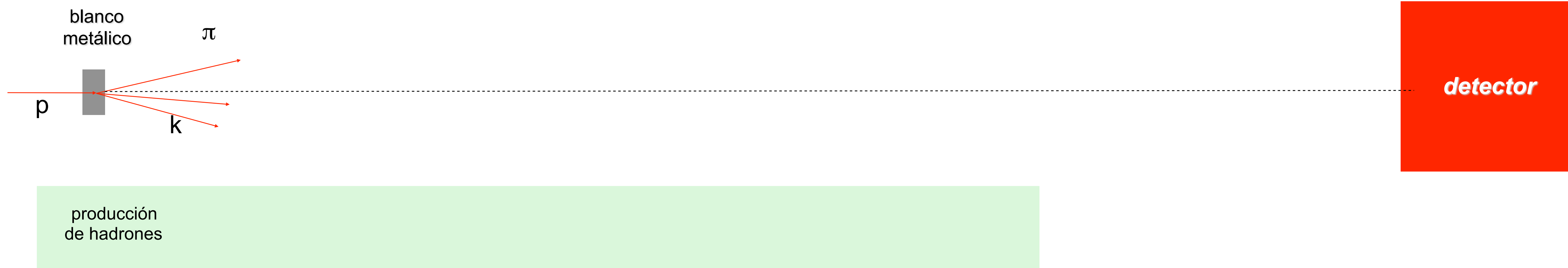


- Los experimentos de aceleradores buscan un exceso de neutrinos electrónicos en un detector lejano

Haces de neutrinos

$$\theta_{23}, \theta_{13}, \theta_{12}, \delta_{CP} \quad \Delta m^2_{23}, \Delta m^2_{12}$$

- Todos los haces de neutrinos se producen así

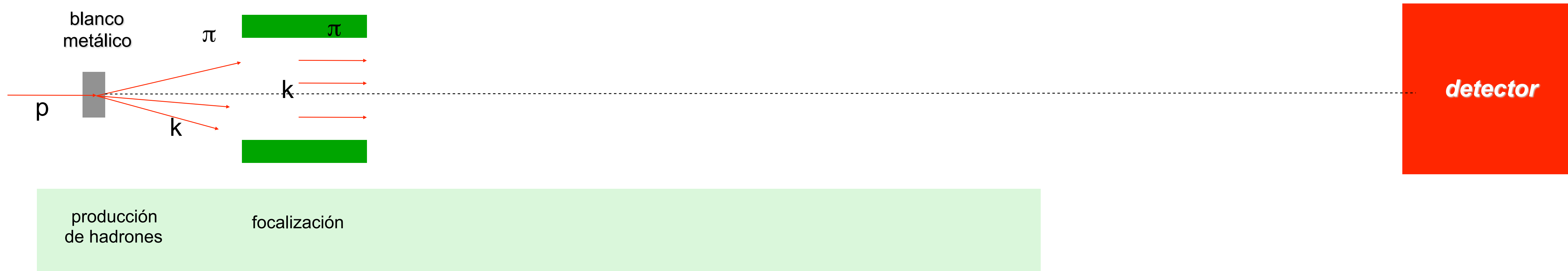


- Los experimentos de aceleradores buscan un exceso de neutrinos electrónicos en un detector lejano

Haces de neutrinos

$$\theta_{23}, \theta_{13}, \theta_{12}, \delta_{CP} \quad \Delta m^2_{23}, \Delta m^2_{12}$$

- Todos los haces de neutrinos se producen así

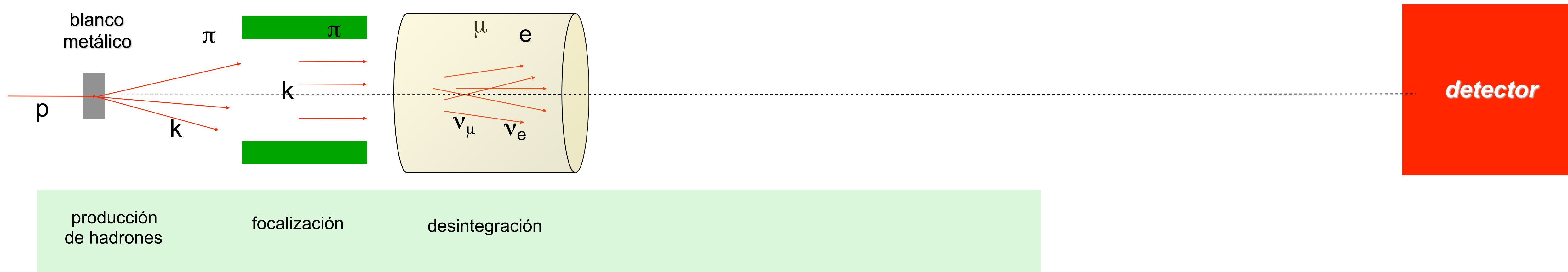


- Los experimentos de aceleradores buscan un exceso de neutrinos electrónicos en un detector lejano

Haces de neutrinos

$$\theta_{23}, \theta_{13}, \theta_{12}, \delta_{CP} \quad \Delta m^2_{23}, \Delta m^2_{12}$$

- Todos los haces de neutrinos se producen así

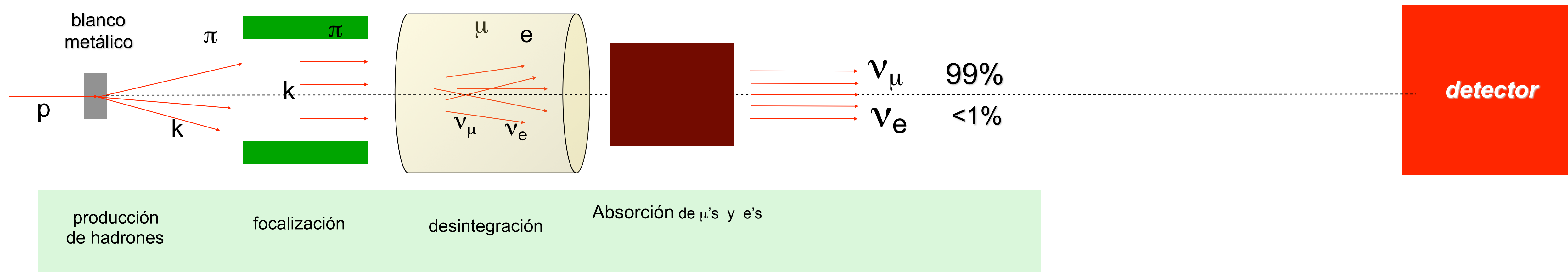


- Los experimentos de aceleradores buscan un exceso de neutrinos electrónicos en un detector lejano

Haces de neutrinos

$$\theta_{23}, \theta_{13}, \theta_{12}, \delta_{CP} \quad \Delta m^2_{23}, \Delta m^2_{12}$$

- Todos los haces de neutrinos se producen así



- Los experimentos de aceleradores buscan un exceso de neutrinos electrónicos en un detector lejano

Como hacer un haz de neutrinos

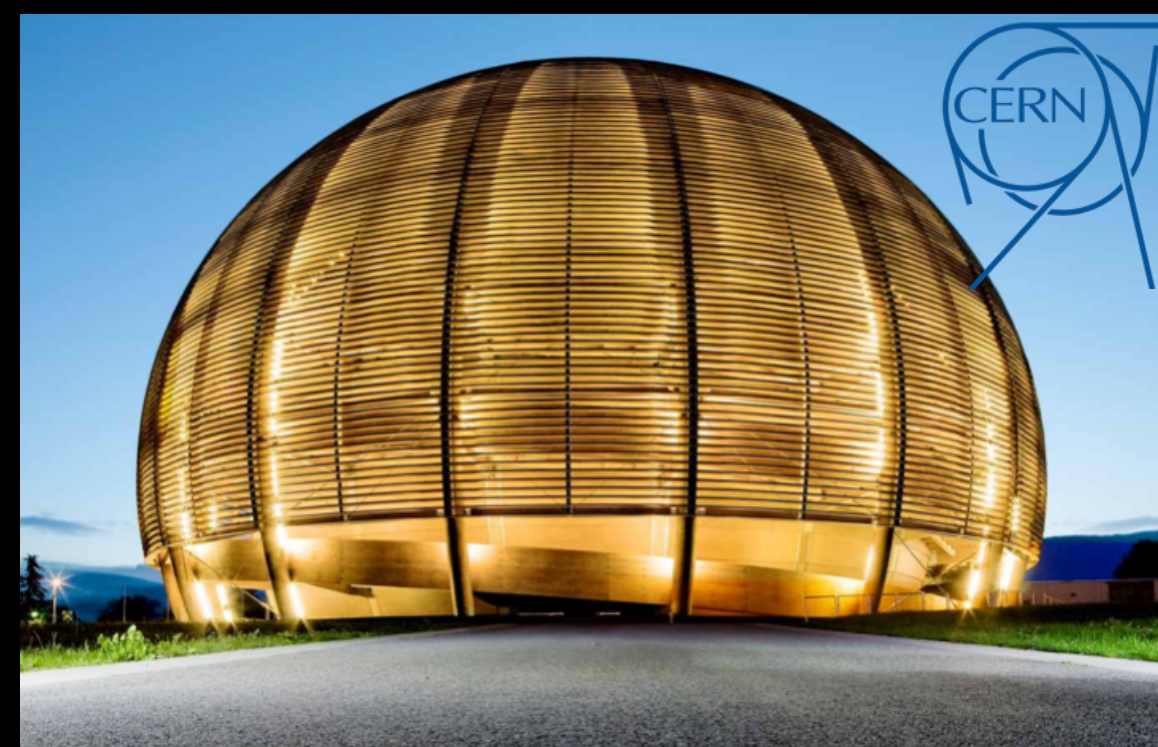


Produced by
Sandbox Studio, Chicago

for
symmetry magazine

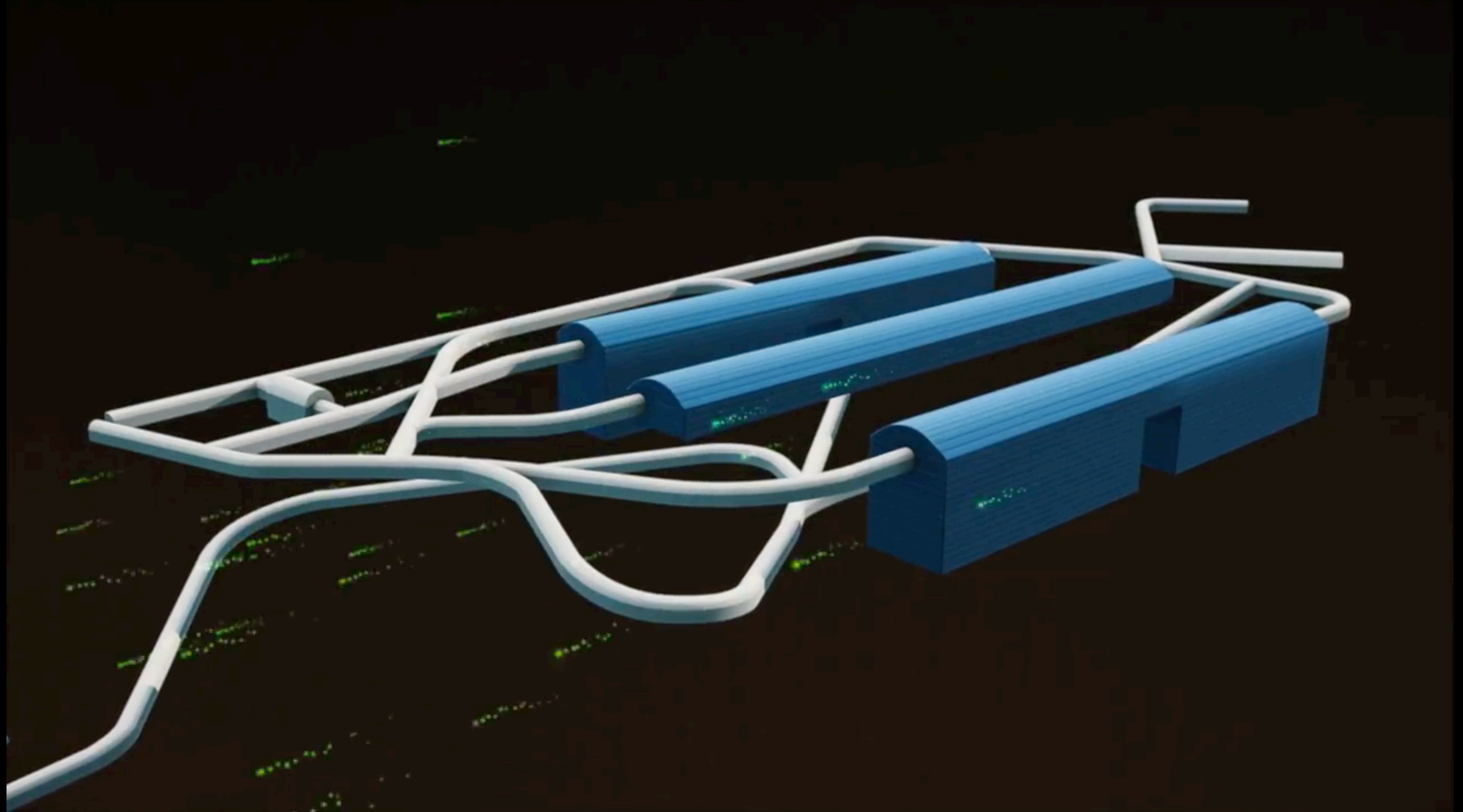
Como hacer un haz de neutrinos



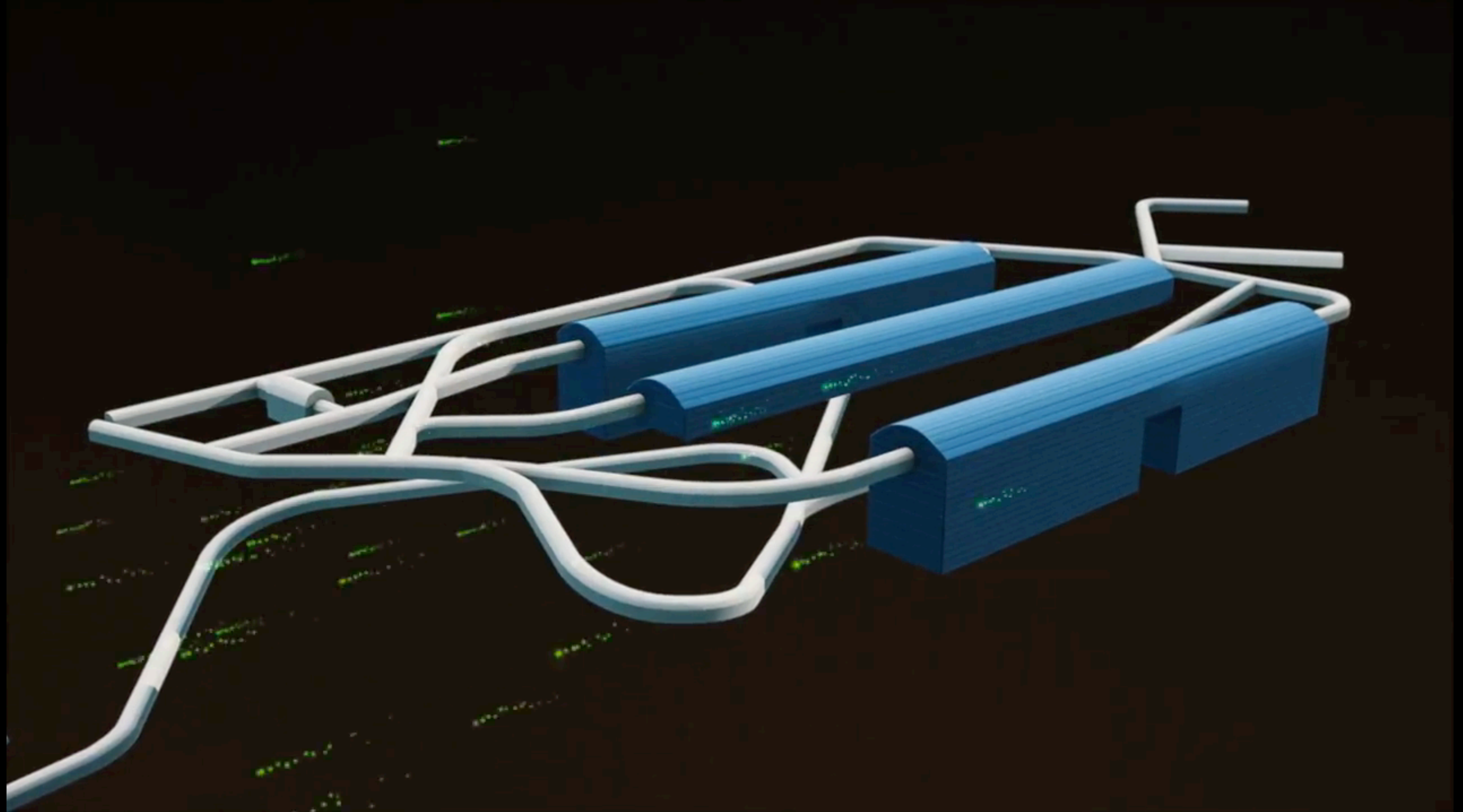


Interacciones de neutrinos

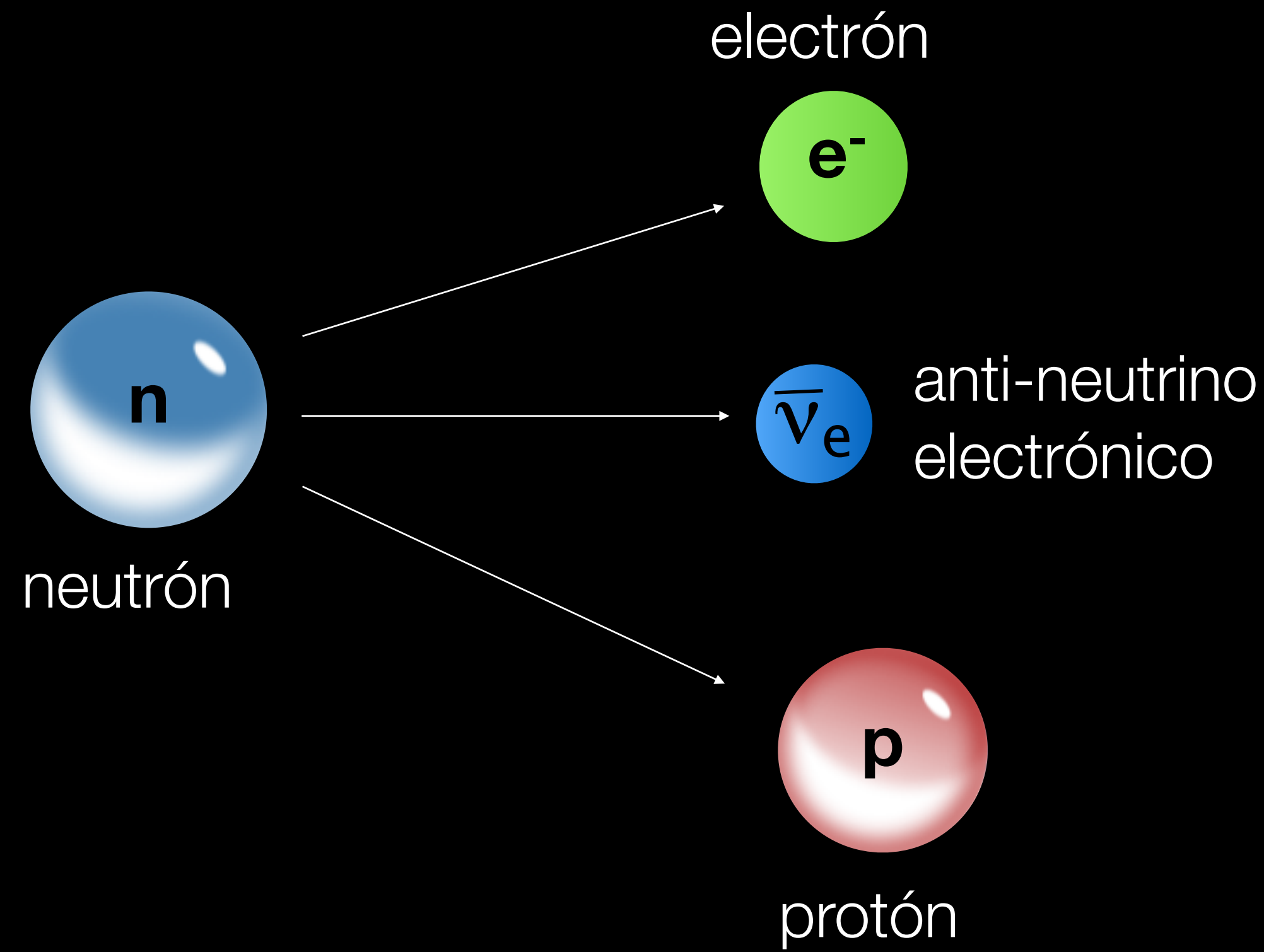
¿ COMO INTERACCIONAN LOS NEUTRINOS ?



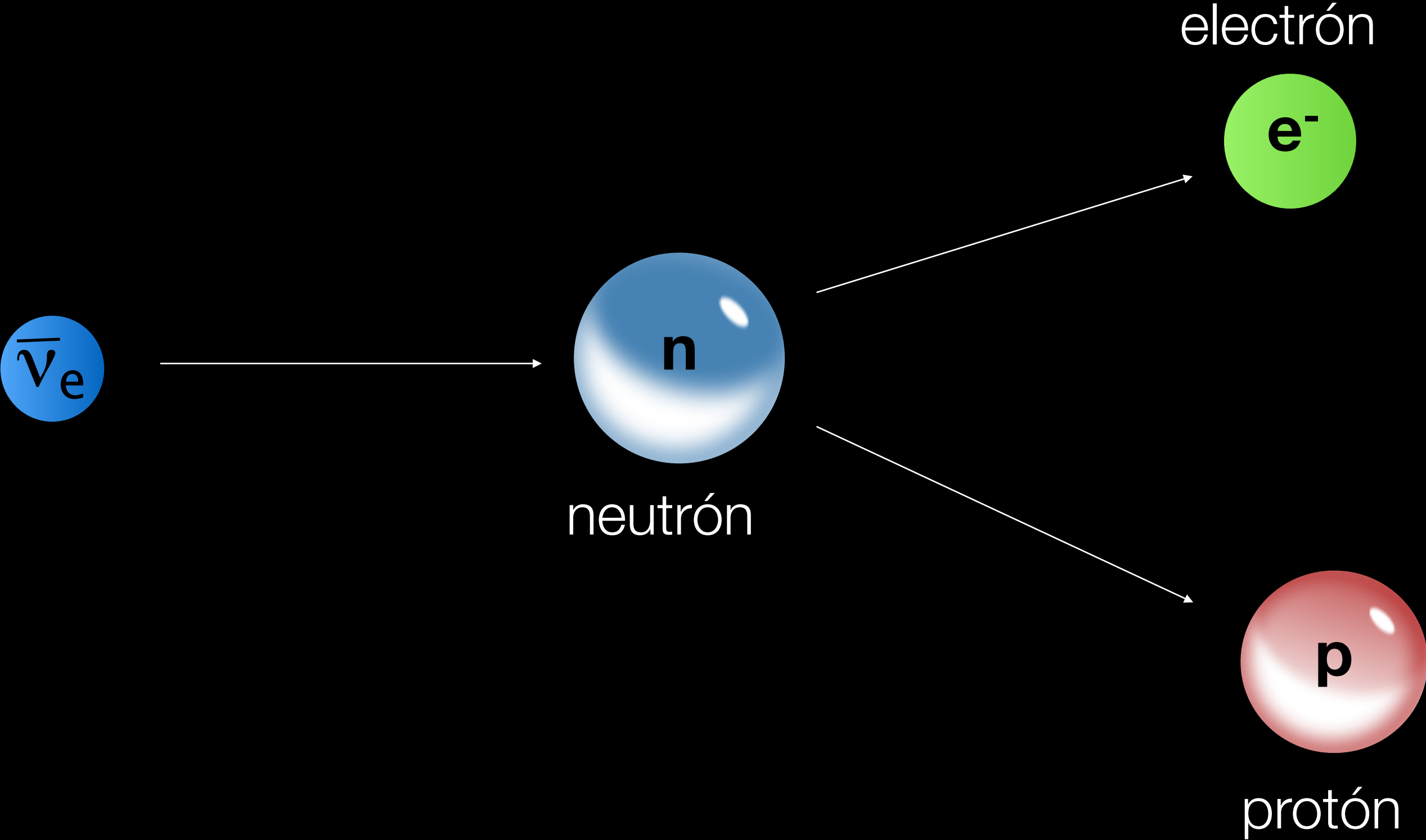
¿ COMO INTERACCIONAN LOS NEUTRINOS ?



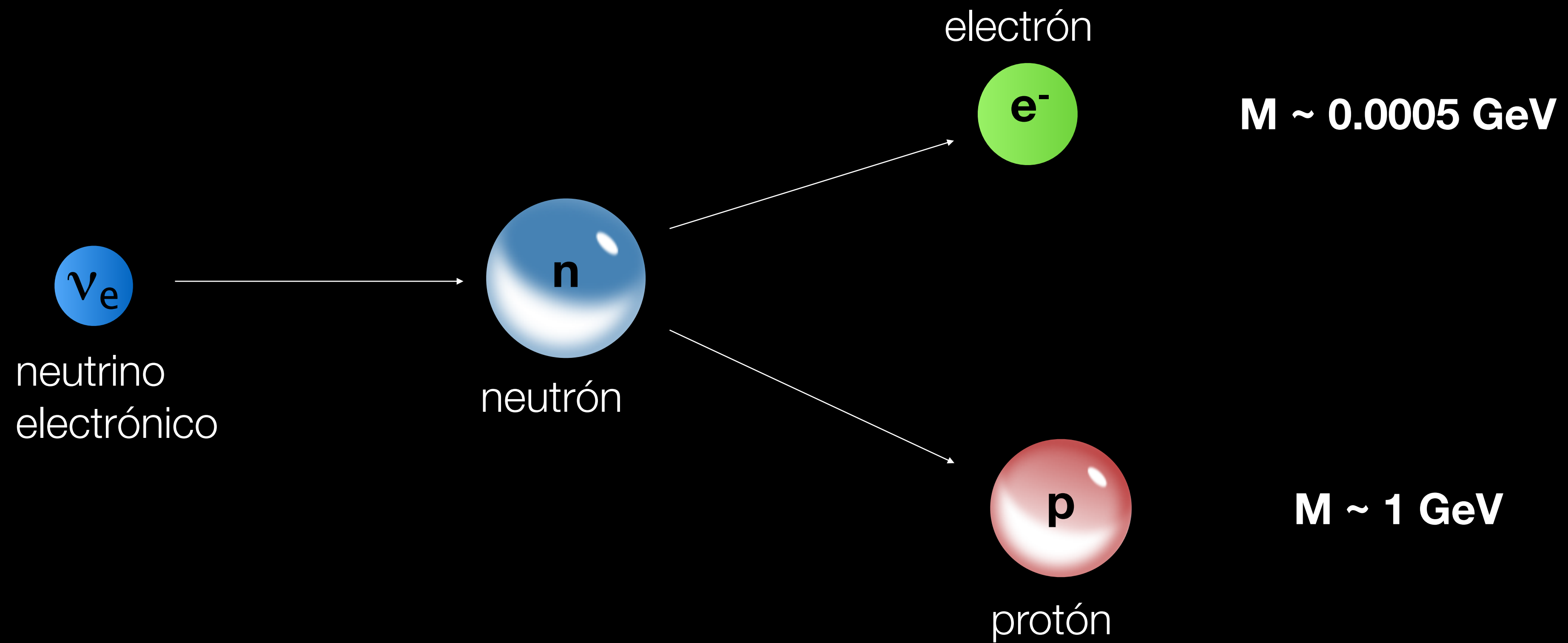
desintegración Beta



desintegración Beta

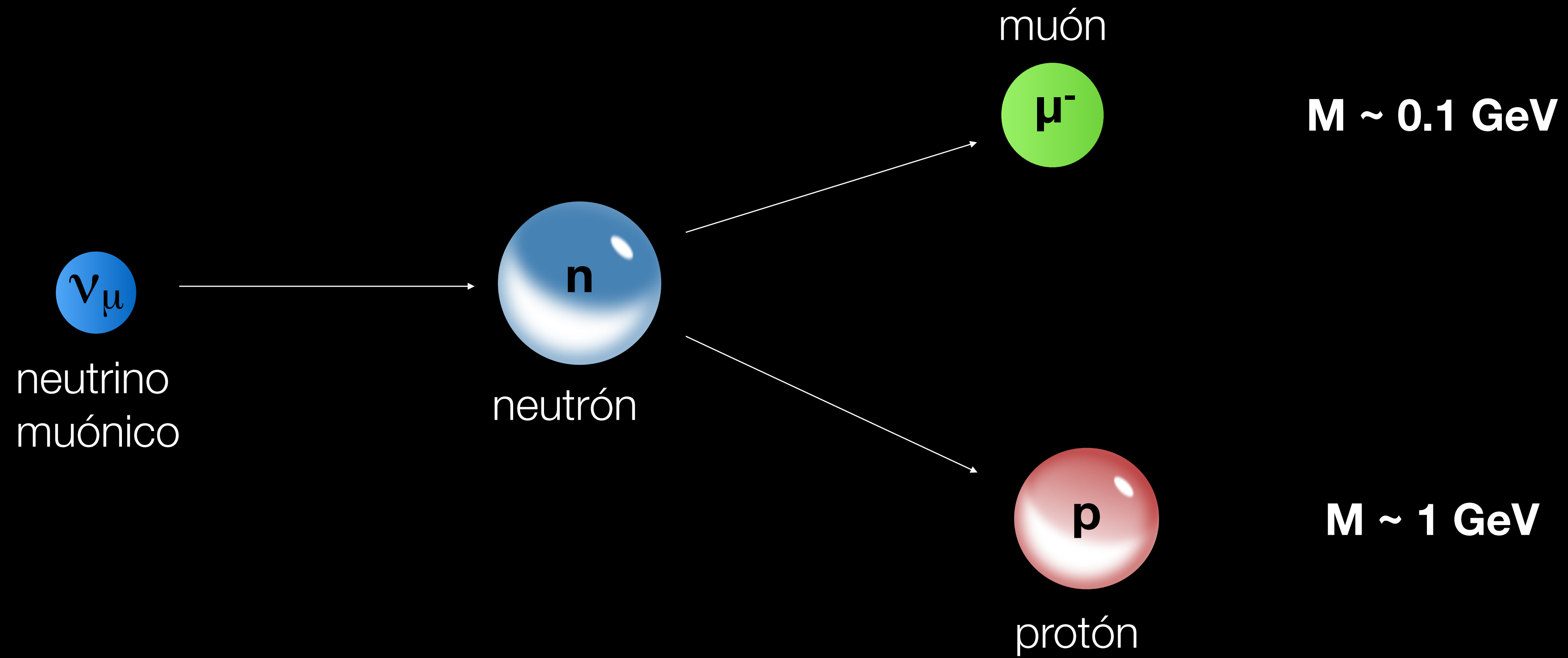


interacción quasi-elástica



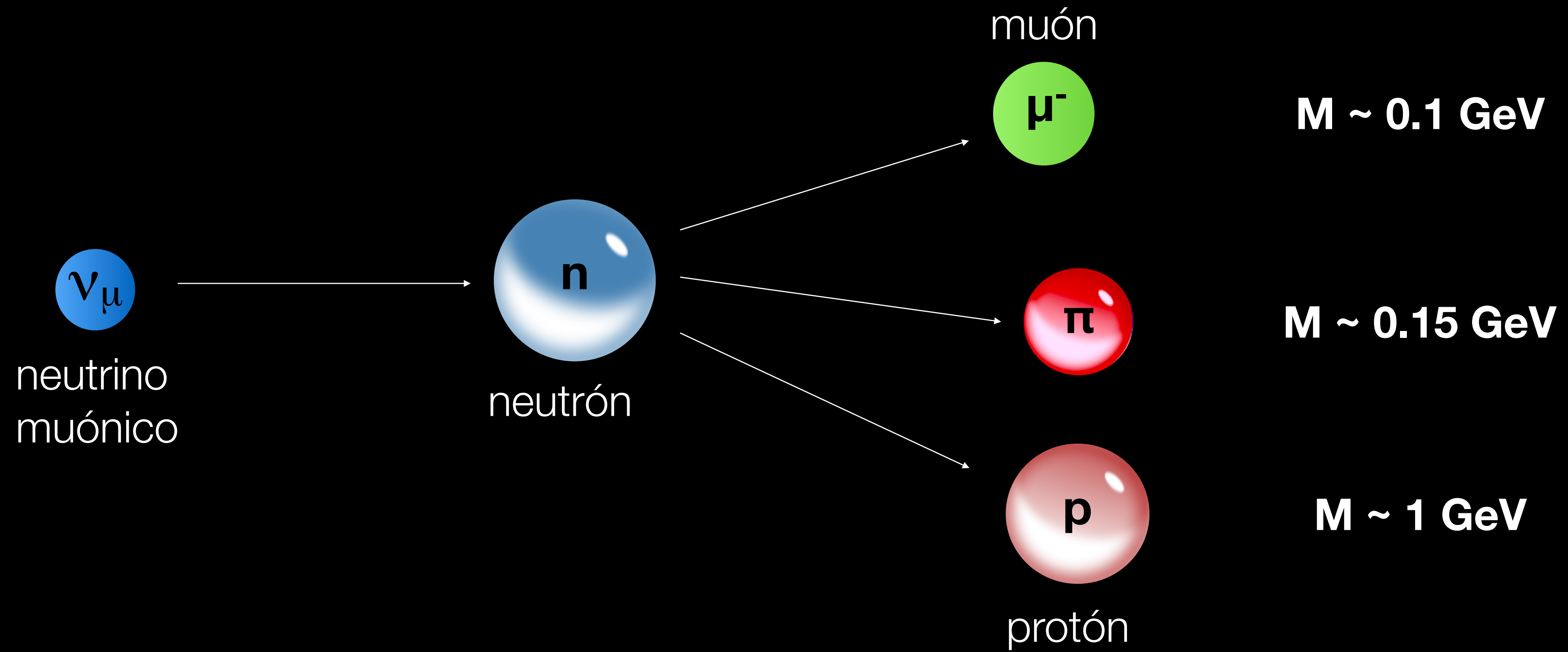
$E < 2 \text{ GeV}$

interacción quasi-elástica



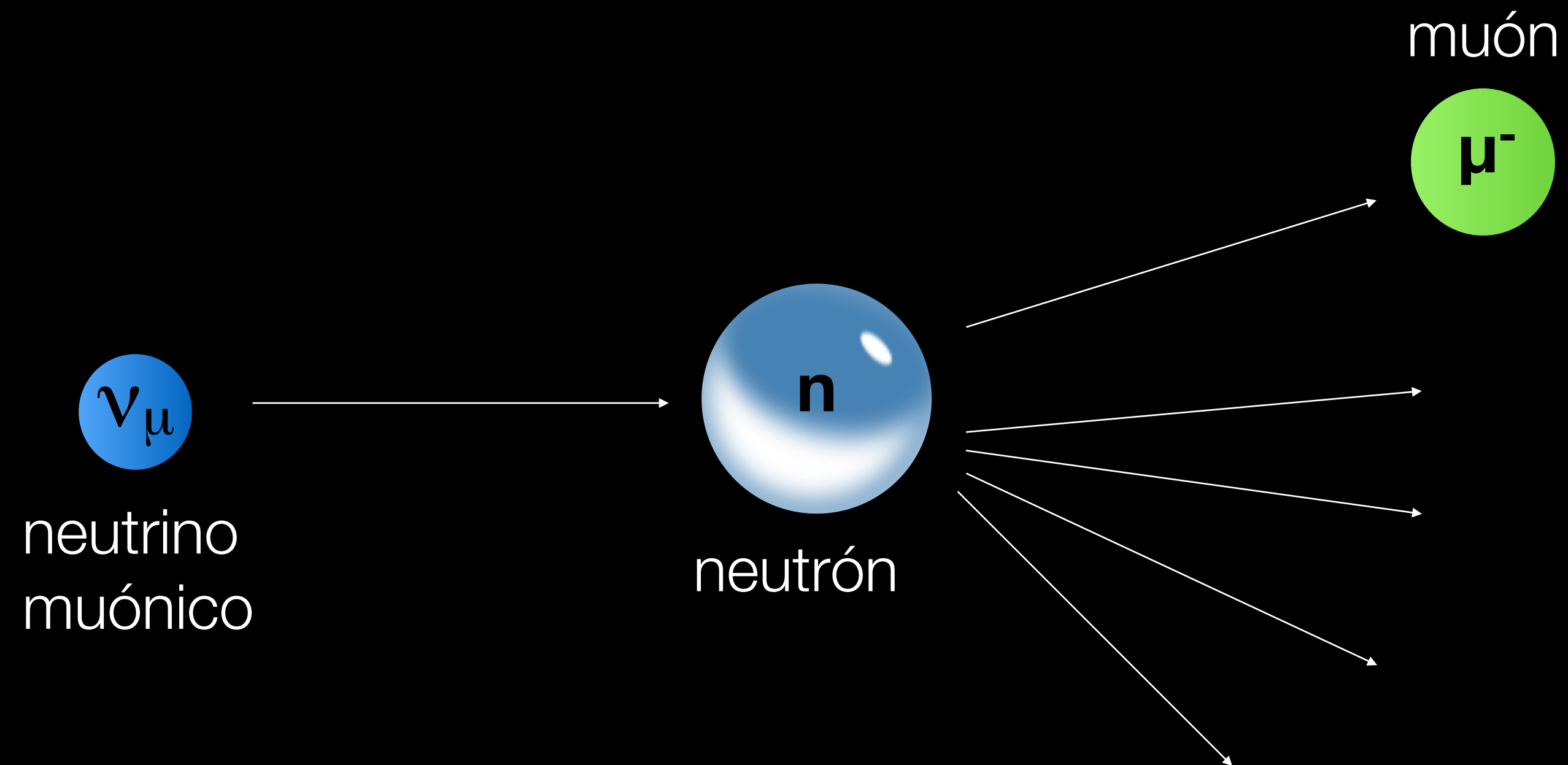
$E < 2 \text{ GeV}$

interacción inelástica



$E = 1\text{-}2 \text{ GeV}$

interacción profundamente inelástica

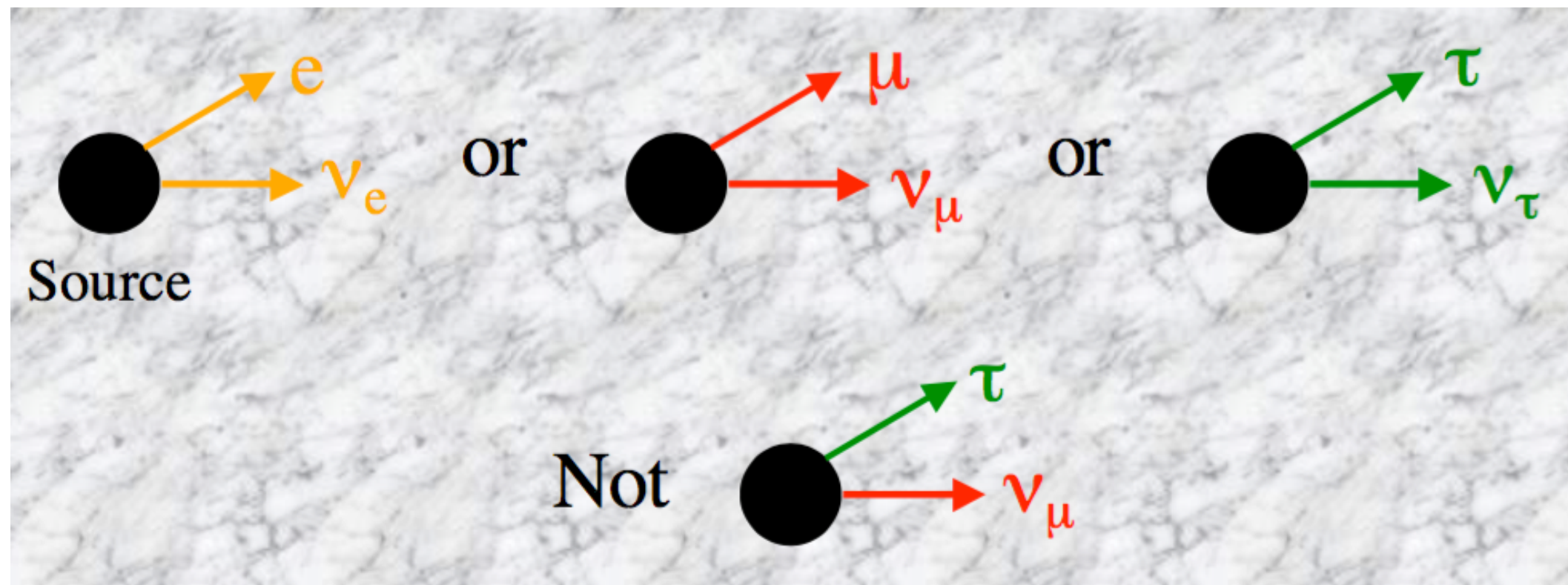


$E > 2 \text{ GeV}$

Oscilaciones 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

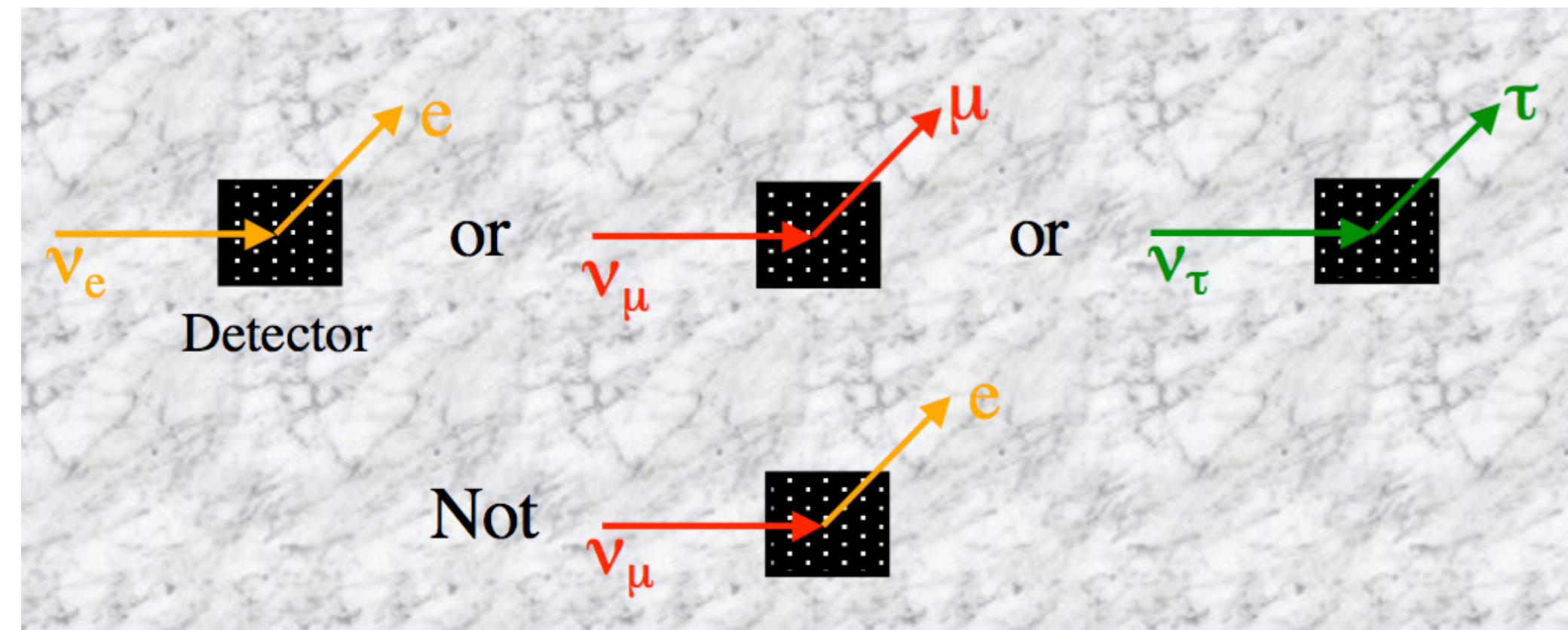


- **L** se conserva en cada familia de leptons

mass →	$\approx 2.3 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.275 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.07 \text{ GeV}/c^2$	0	$\approx 126 \text{ GeV}/c^2$
charge →	$2/3$	$2/3$	$2/3$	0	0
spin →	$1/2$	$1/2$	$1/2$	1	0
	u up	c charm	t top	g gluon	H Higgs boson
QUARKS					
	$\approx 4.8 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 95 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$	0	
	$-1/3$	$-1/3$	$-1/3$	0	
	$1/2$	$1/2$	$1/2$	1	
	d down	s strange	b bottom	γ 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	
	e electron	μ muon	τ tau	Z 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	± 1	
	$1/2$	$1/2$	$1/2$	1	
	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	W W boson	
					GAUGE BOSONS

Endogamia en los leptones

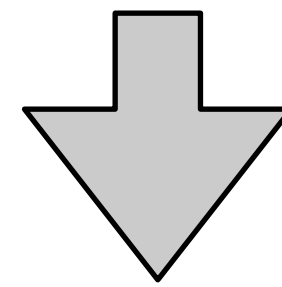
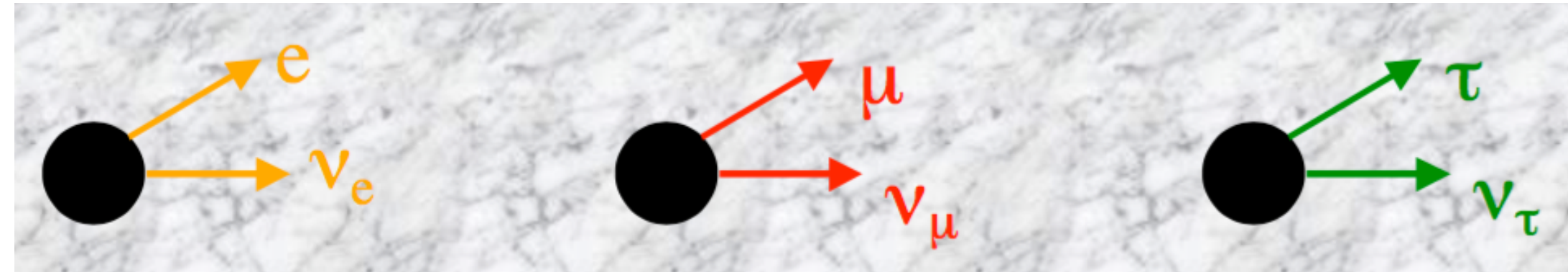
- De la misma forma, cuando un neutrino interacciona con un átomo de un detector produce un leptón de su misma familia



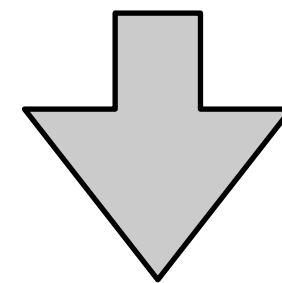
- Esta es precisamente la forma de diferenciar unos neutrinos de otros, por el lepton cargado que producen

Solo conocemos sus interacciones

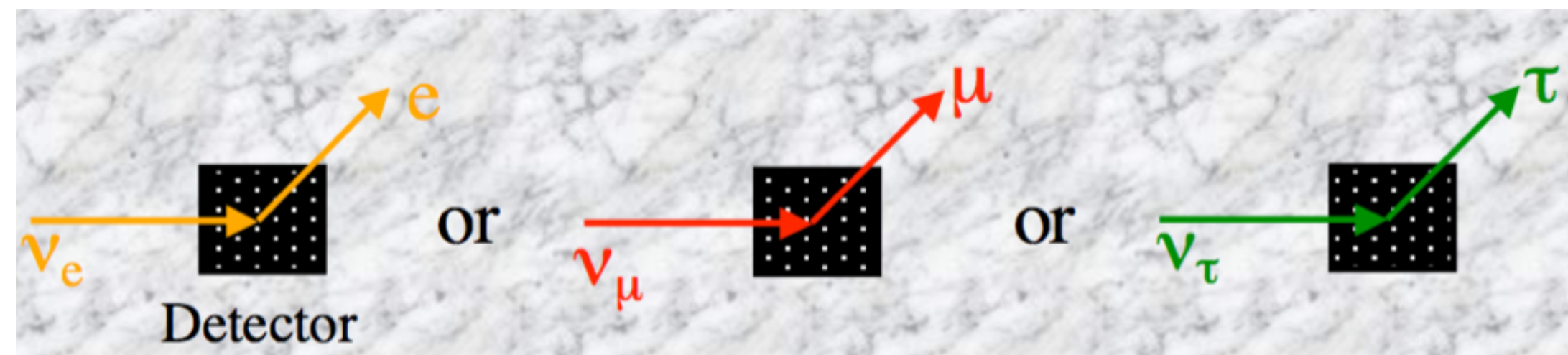
producción



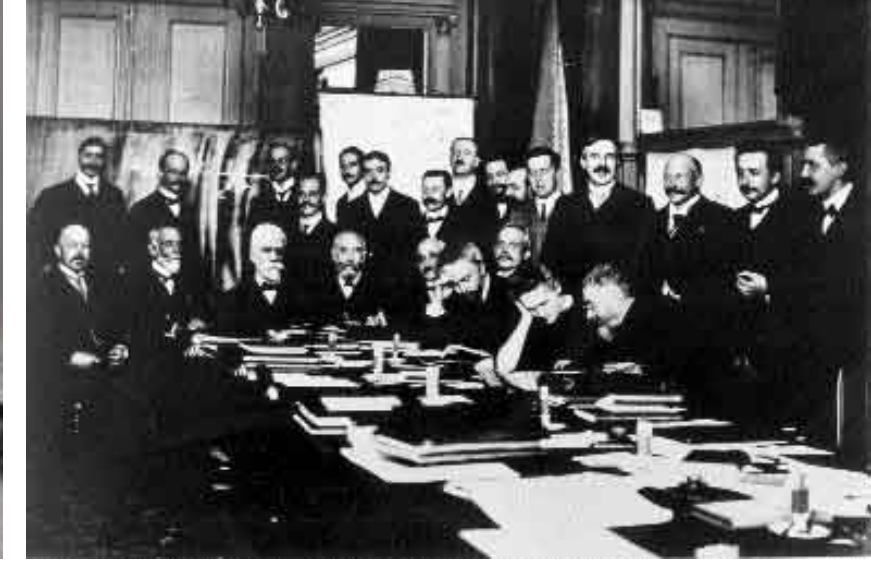
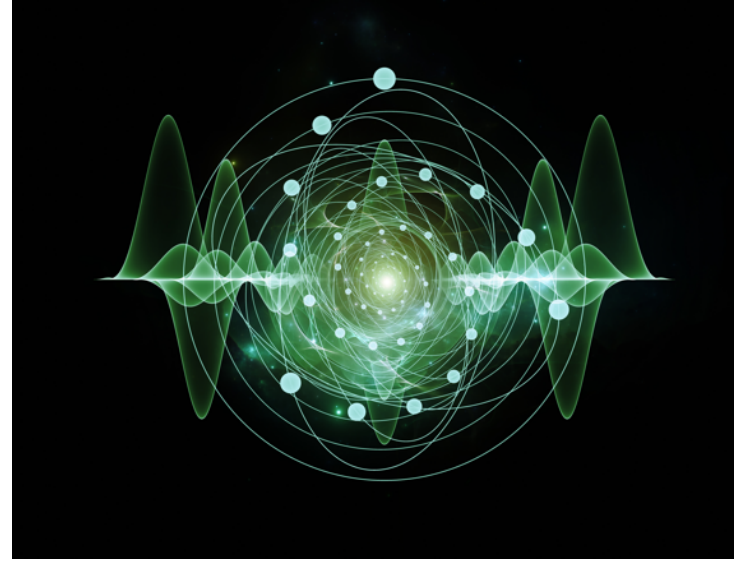
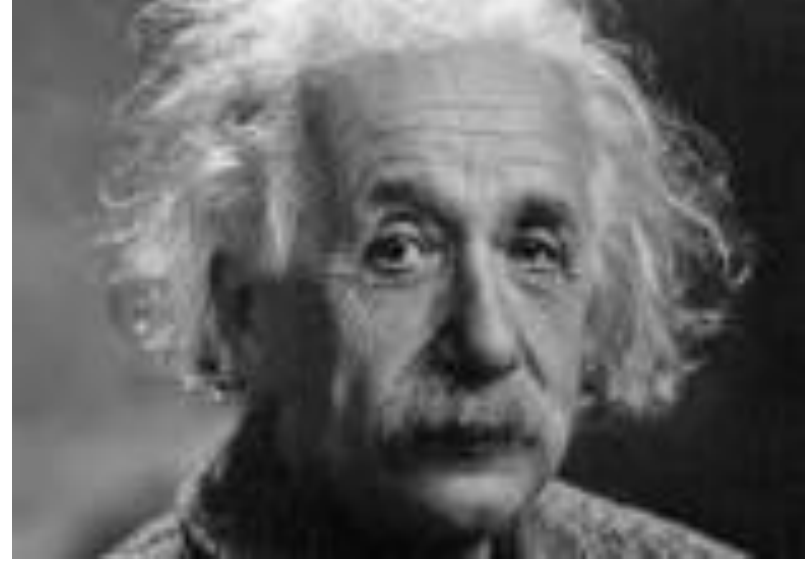
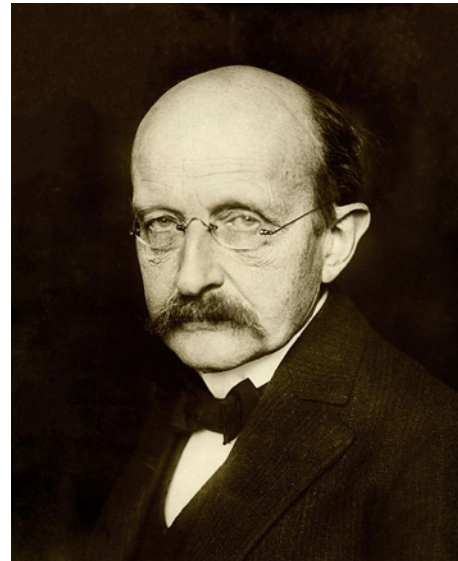
caja negra



detección



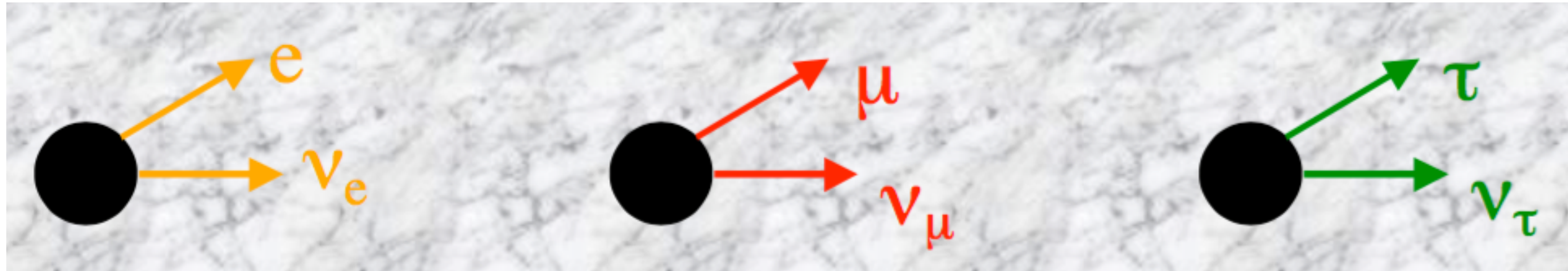
El mundo Mecano-Cuántico



- 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

¿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 ν_3

- De cada 100 reacciones  el ν_e

60% es ν_1
35% es ν_2
5% es ν_3

-
- En este caso lo que sucede es que los neutrinos que conocemos (ν_e, ν_μ, ν_τ) son combinaciones lineales de los neutrinos que son partículas (ν_1, ν_2, ν_3)
 - También se puede ver como un cambio de base, con una matriz de rotación

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

¿ Y si ν_1 ν_2 ν_3 tuvieran masa ?

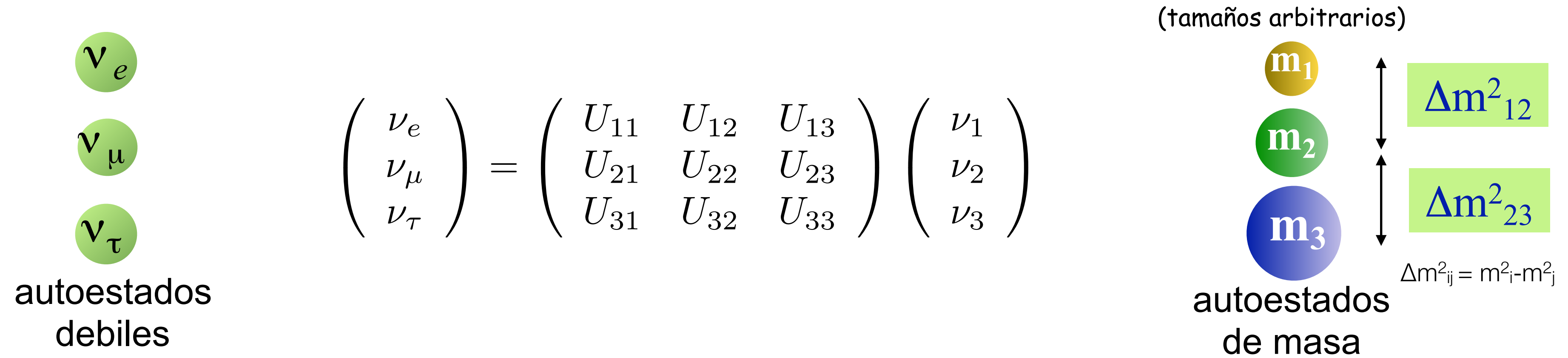
- Si los neutrinos ν_1 ν_2 ν_3 tuvieran masa, y sus **masas** fueran **diferentes**, viajarían a velocidades diferentes

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**

Mezcla de sabores



θ_{23} θ_{13} δ_{CP} θ_{12}

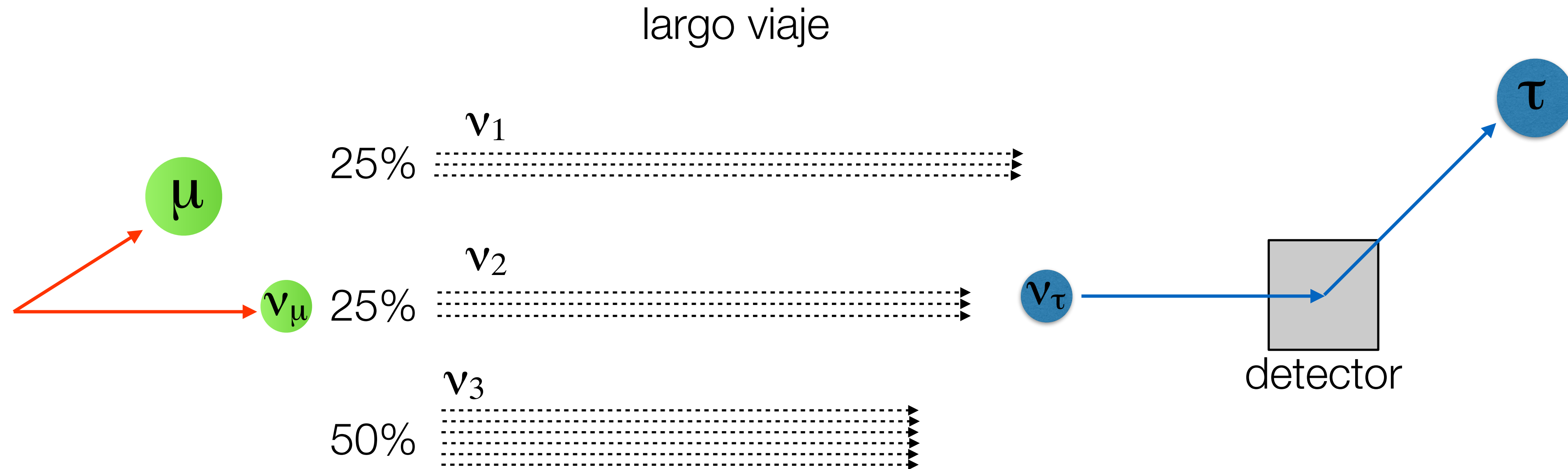
PMNS mixing matrix
Pontecorvo–Maki–Nakagawa–Sakata

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

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

Simplificación para dos neutrinos

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

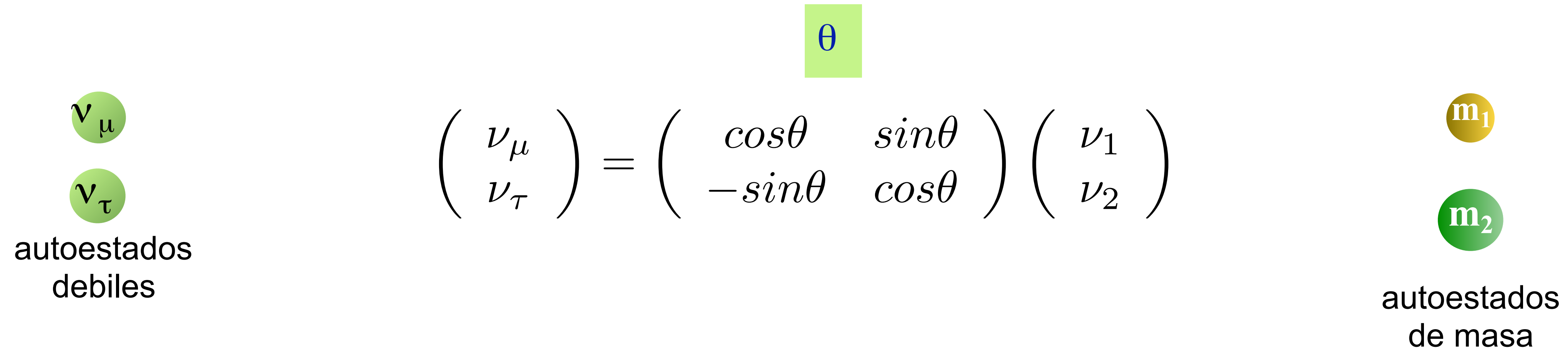
ν_μ
 ν_τ
autoestados
debiles

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

m_1
 m_2
autoestados
de masa

Simplificación para dos neutrinos

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


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

Simplificación para dos neutrinos

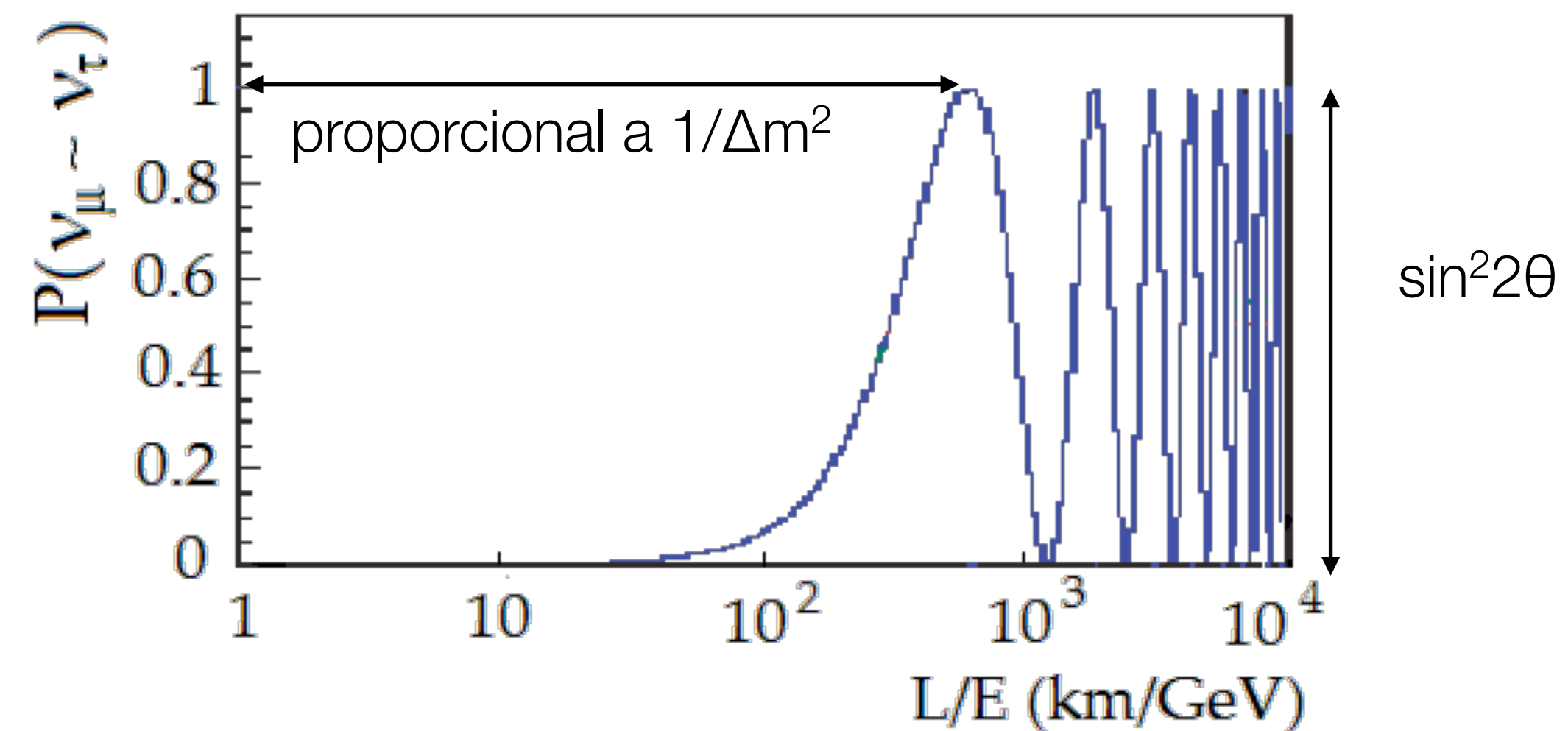
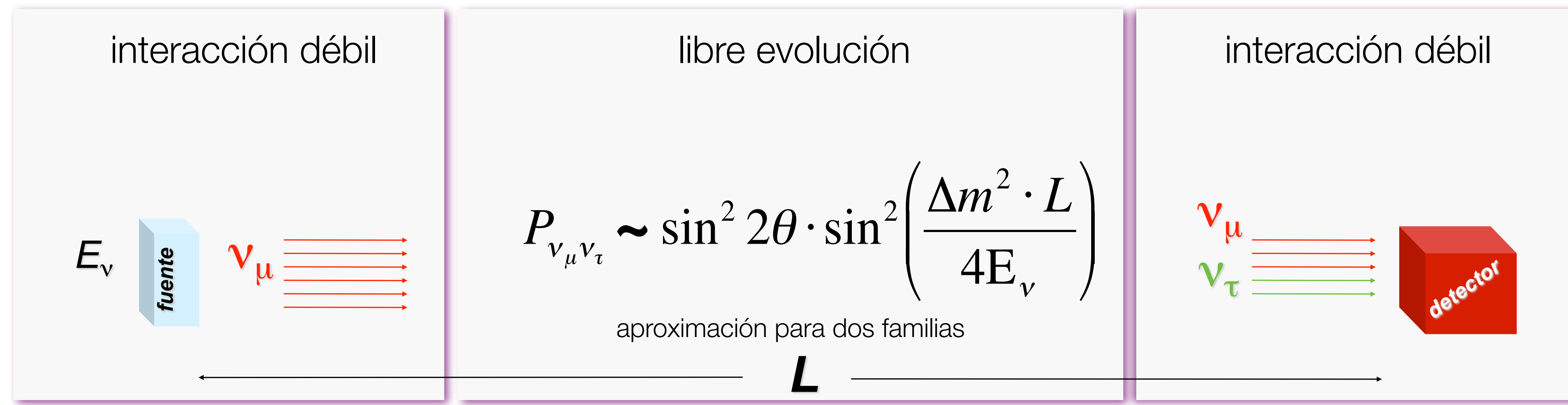
- Para dos neutrinos solo habría un ángulo de mezcla y una diferencia cuadrática de masas

ν_μ
 ν_τ
autoestados
debiles

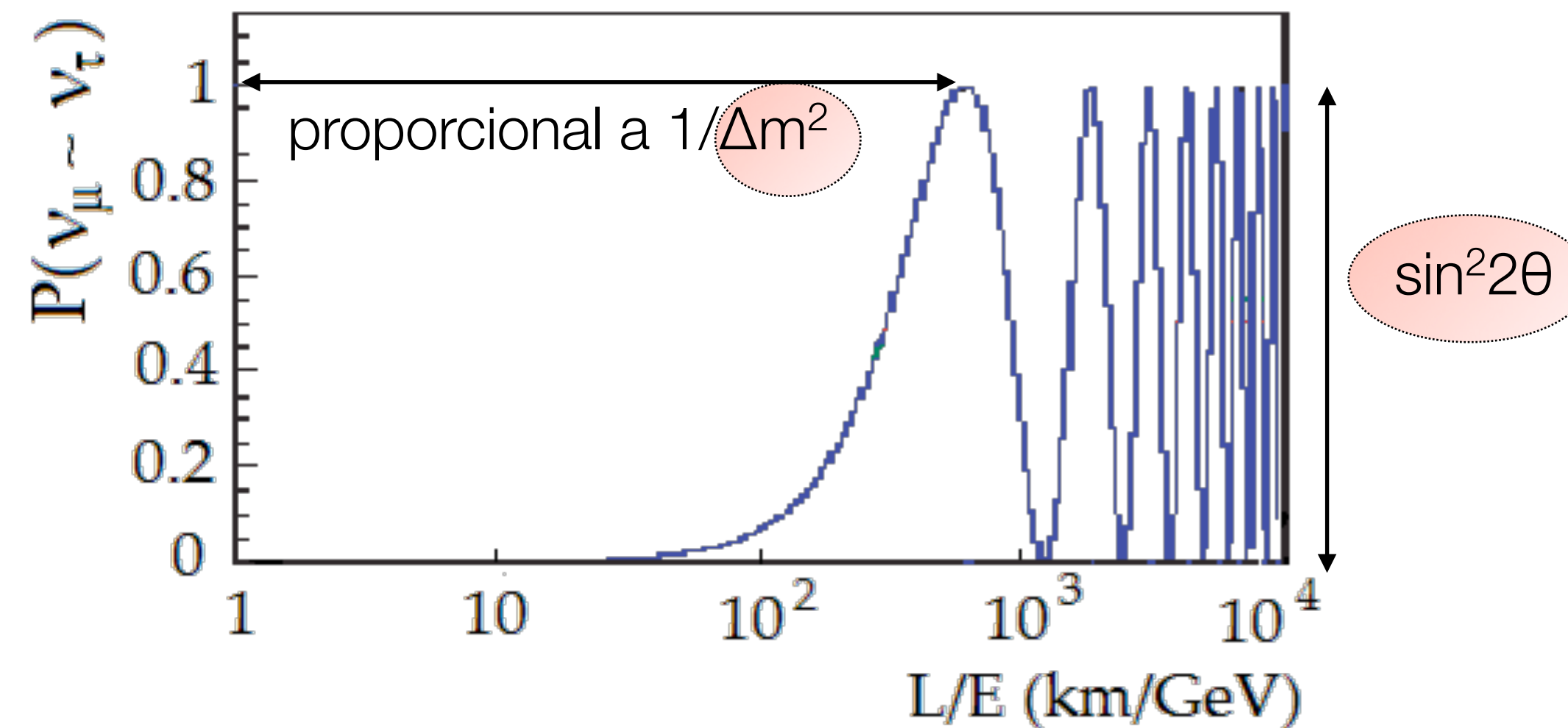
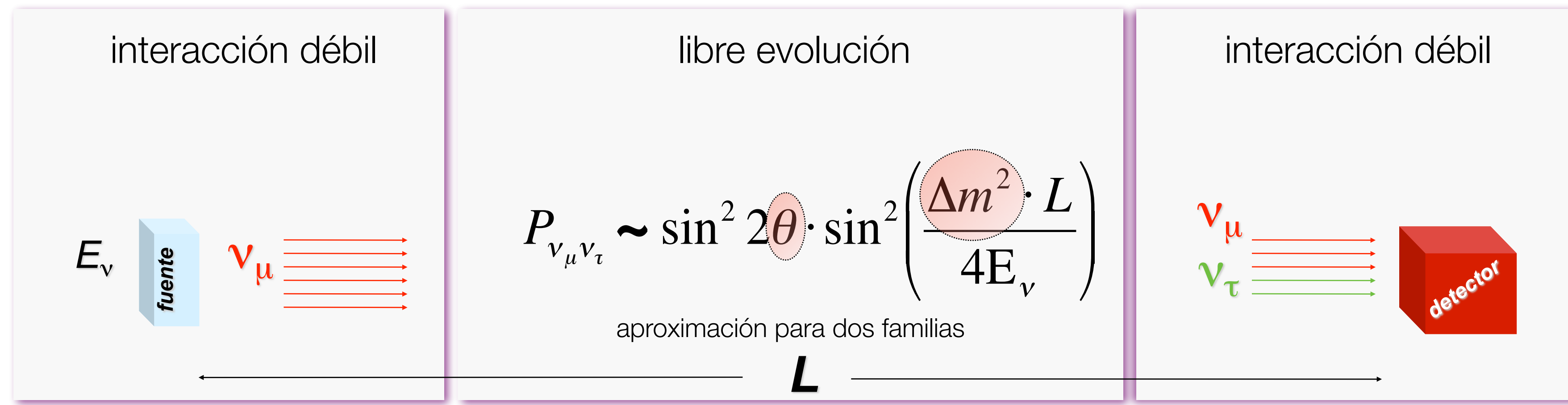
$$\begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \end{pmatrix}$$

m_1
 m_2
 Δm^2
autoestados
de masa

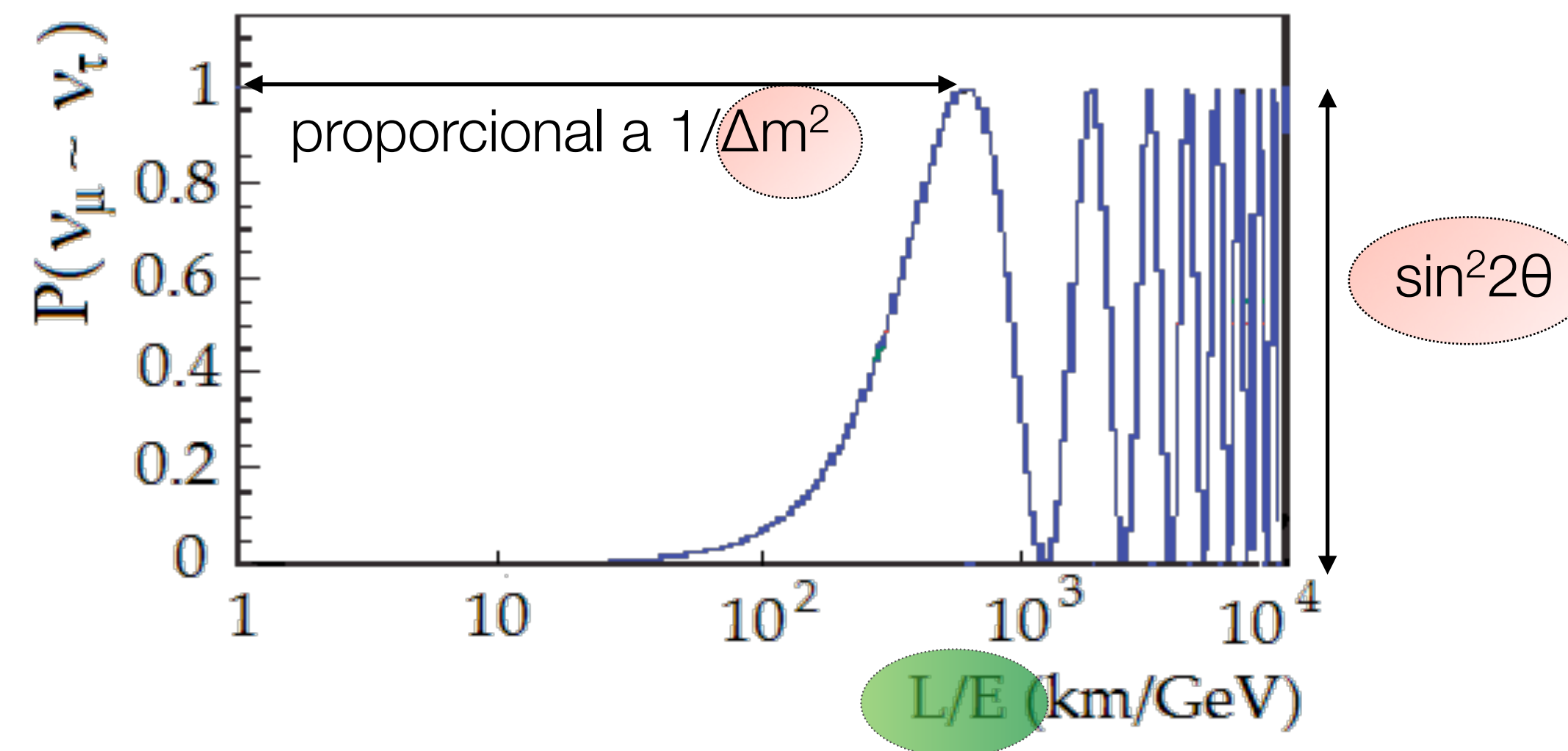
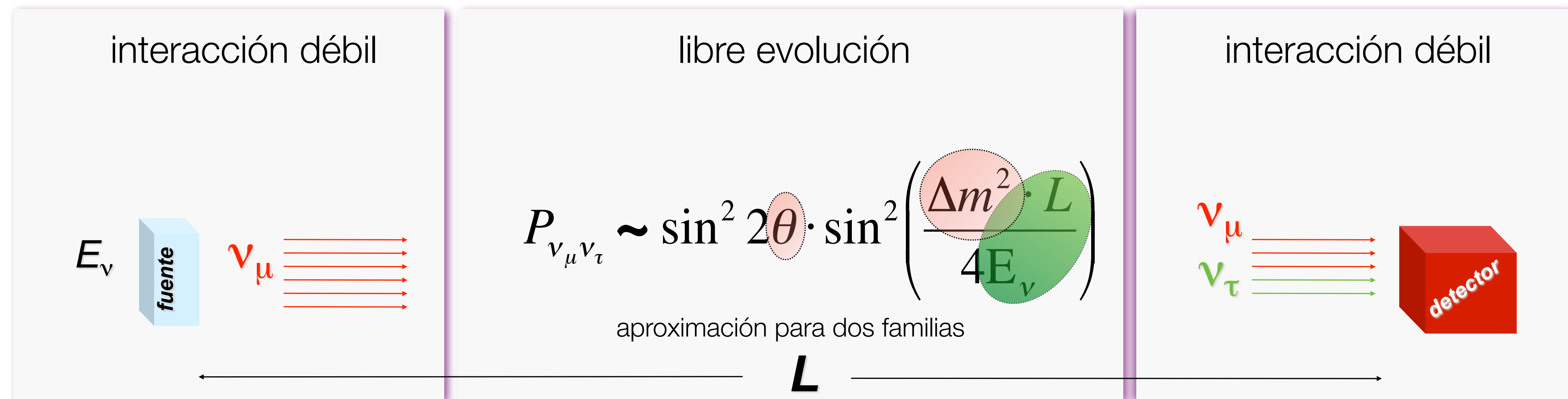
Probabilidad de oscilación



Probabilidad de oscilación



Probabilidad de oscilación



La búsqueda

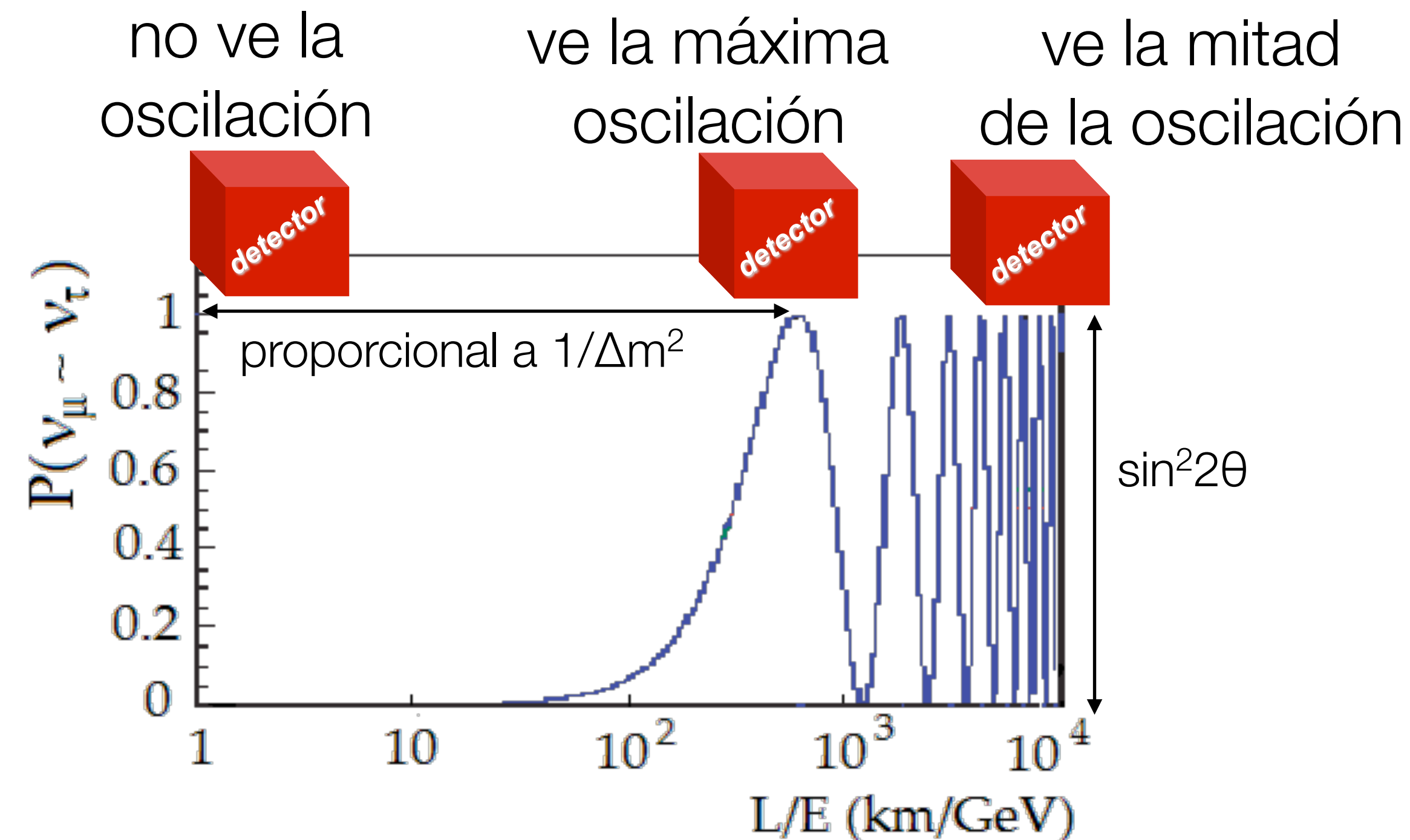
- El estudio de las oscilaciones requiere una fuente muy intensa de neutrinos y un detector muy masivo situado a la distancia correcta, que depende de Δm^2



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

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



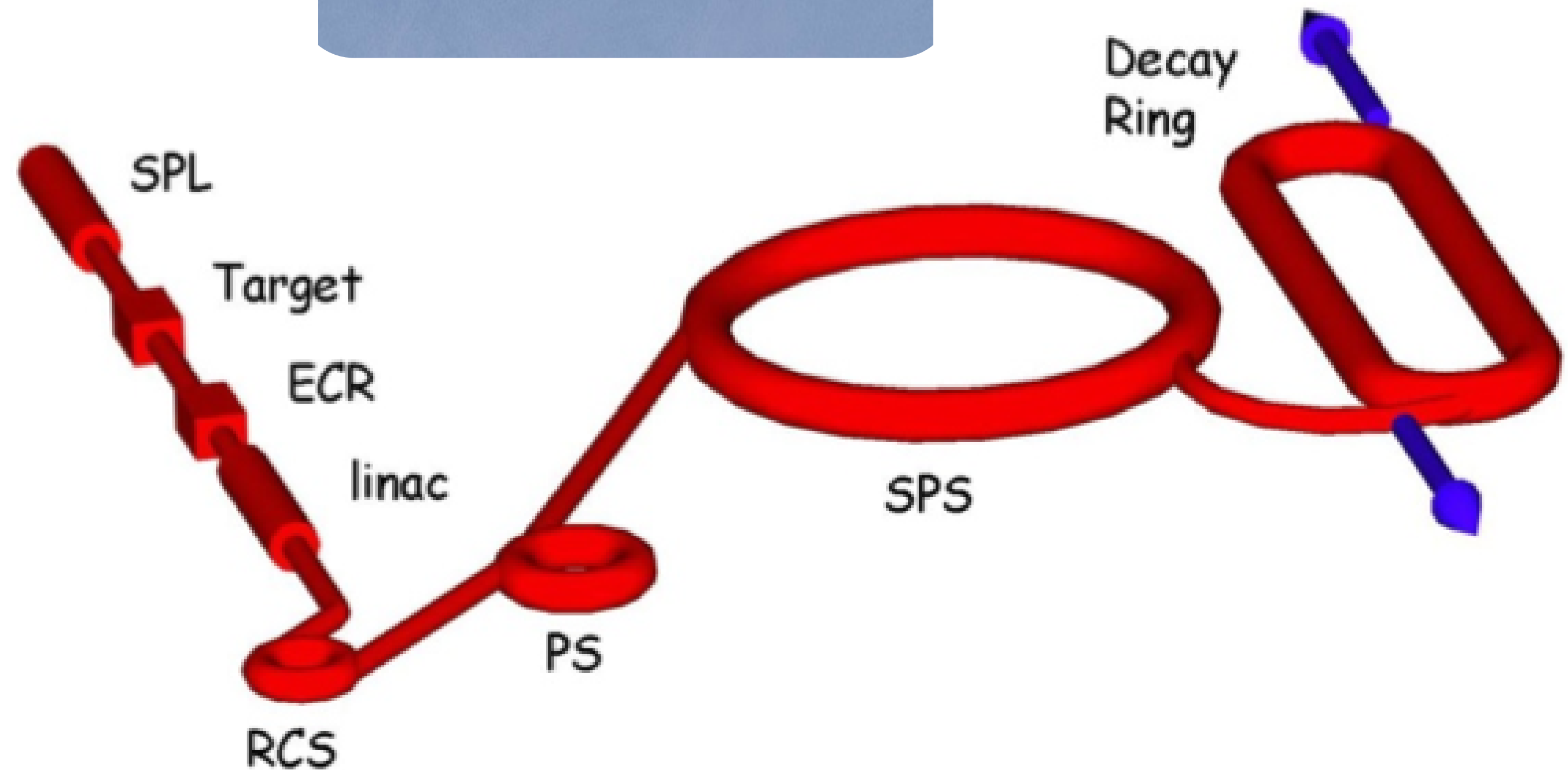
Fuentes artificiales

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

Reactores

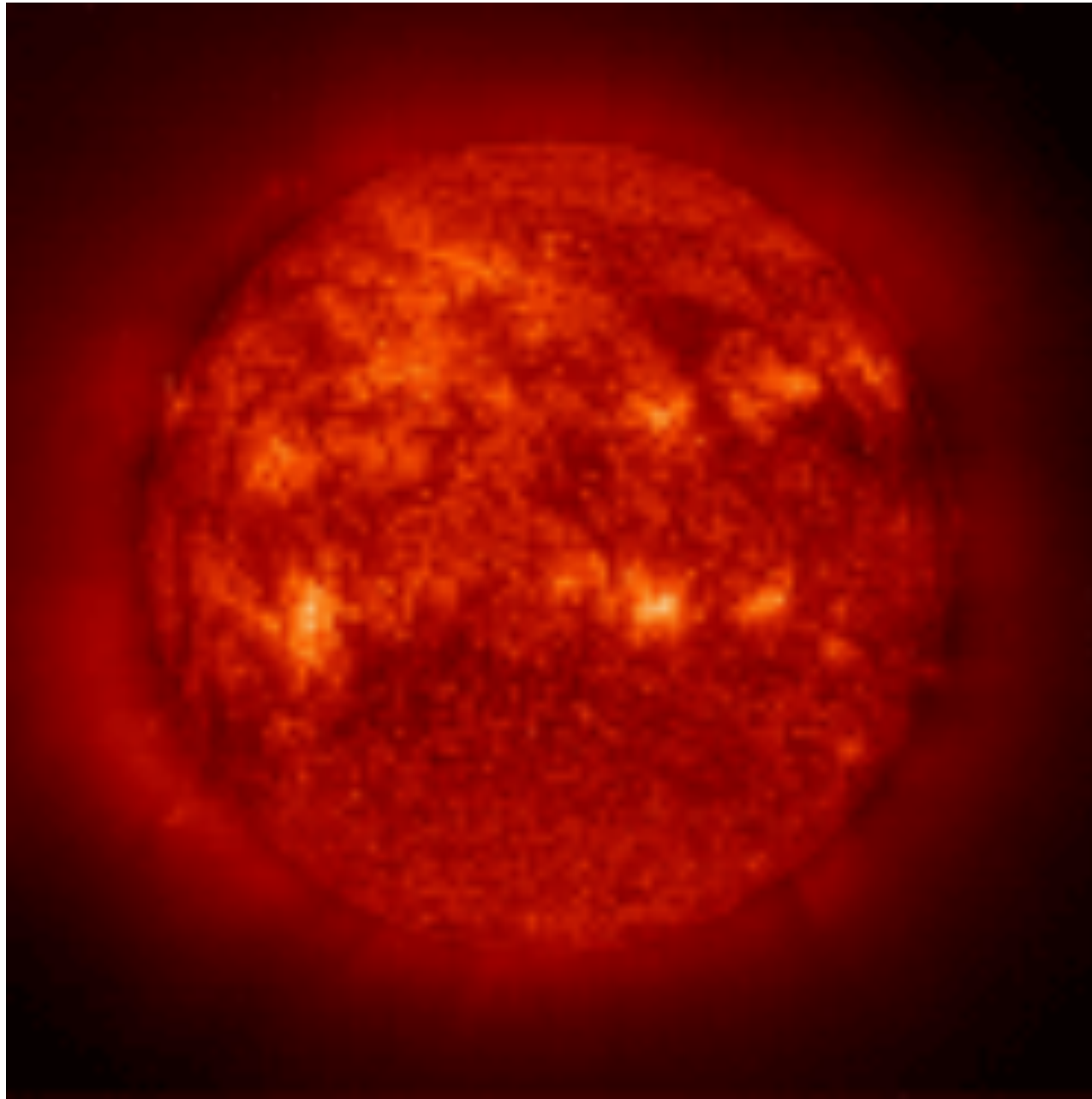


Acceleradores



Fuentes naturales de neutrinos

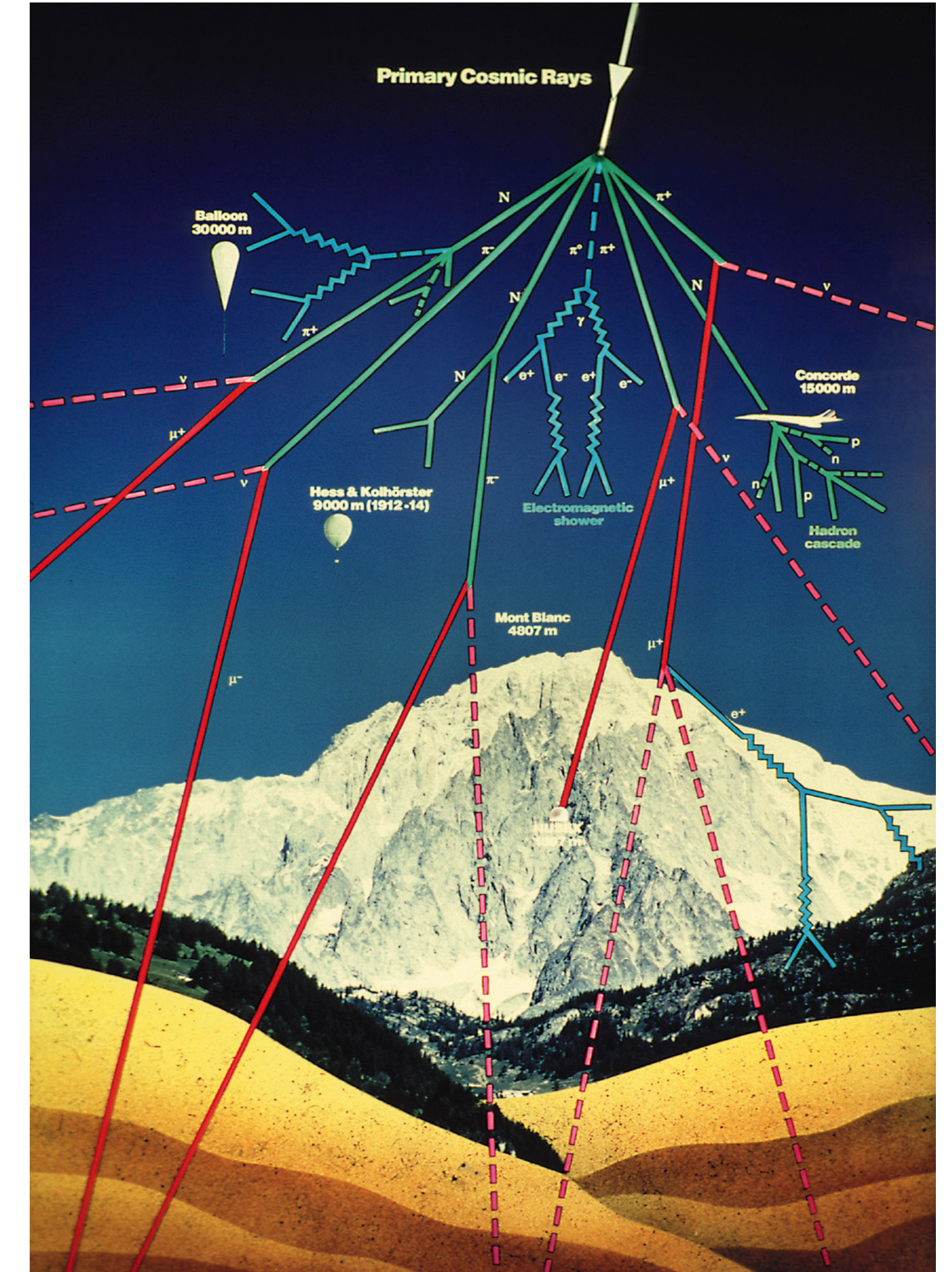
Sol



Supernova



Atmósfera



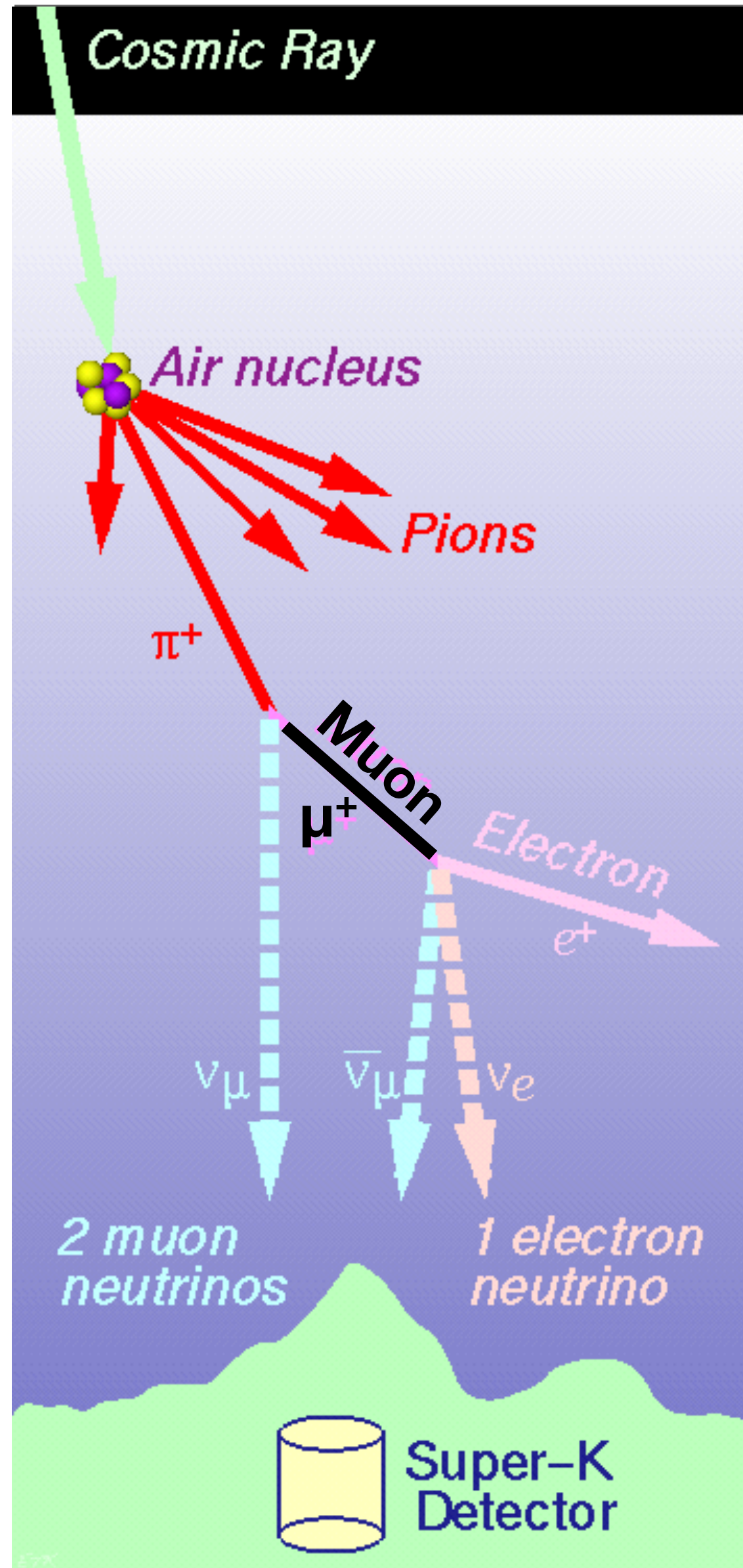
- Las fuentes naturales “son como son”, E y L nos vienen dadas. Pero tienen una gran ventaja ...

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 oscura con una linterna super potente ?



Neutrinos atmosféricos



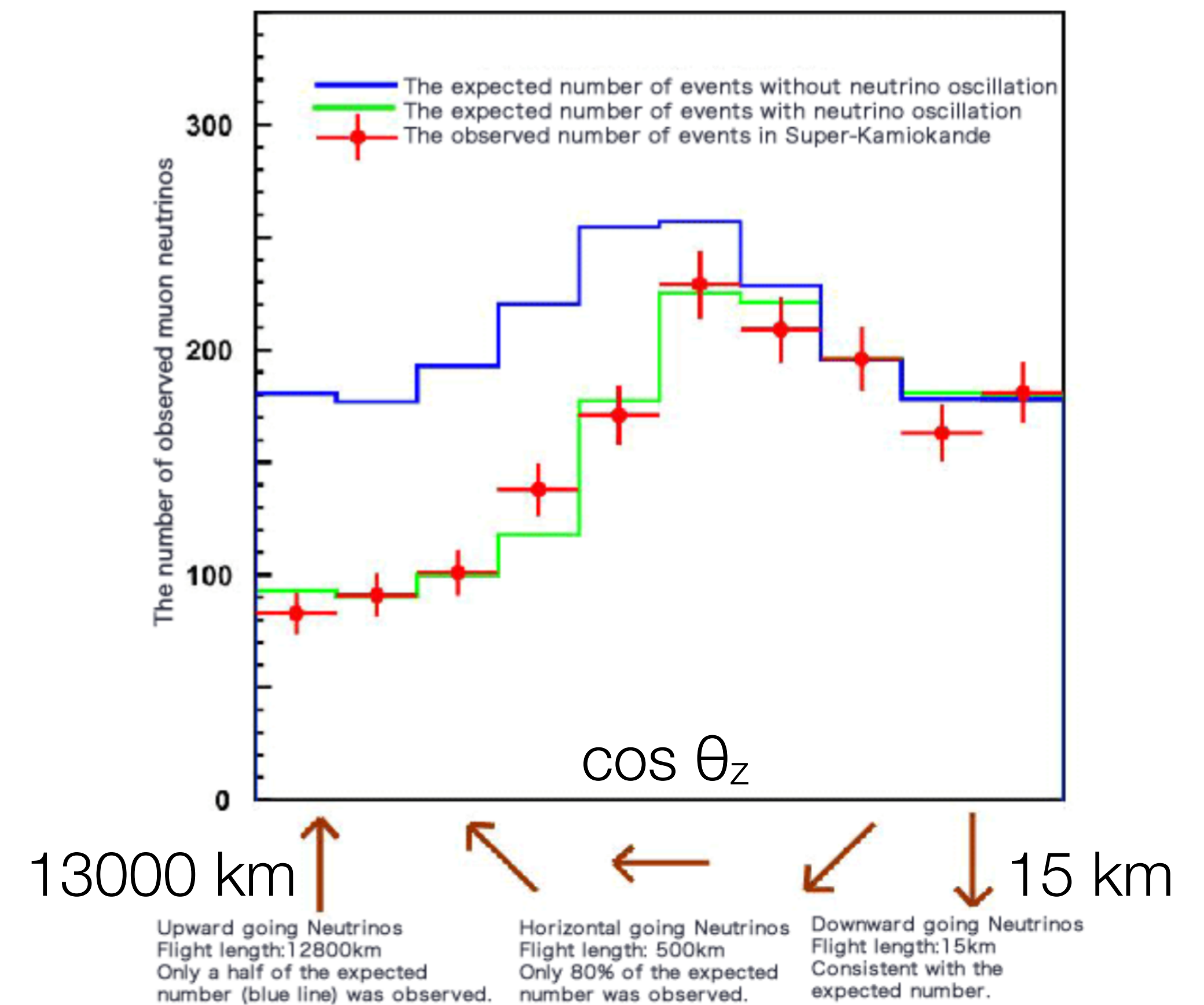
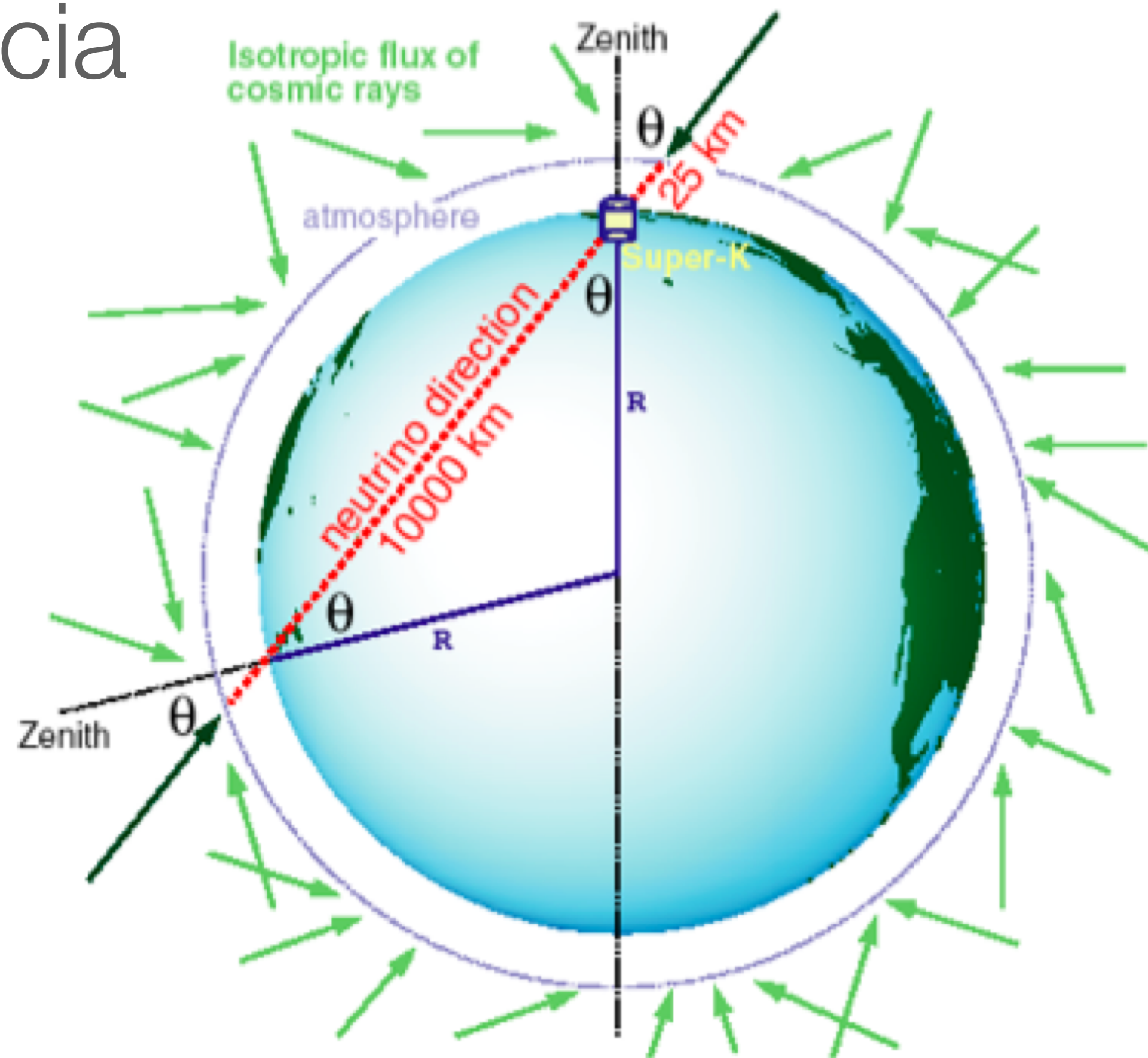
- Se producen en la desintegración de piones y muones en la atmósfera

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

El descubrimiento

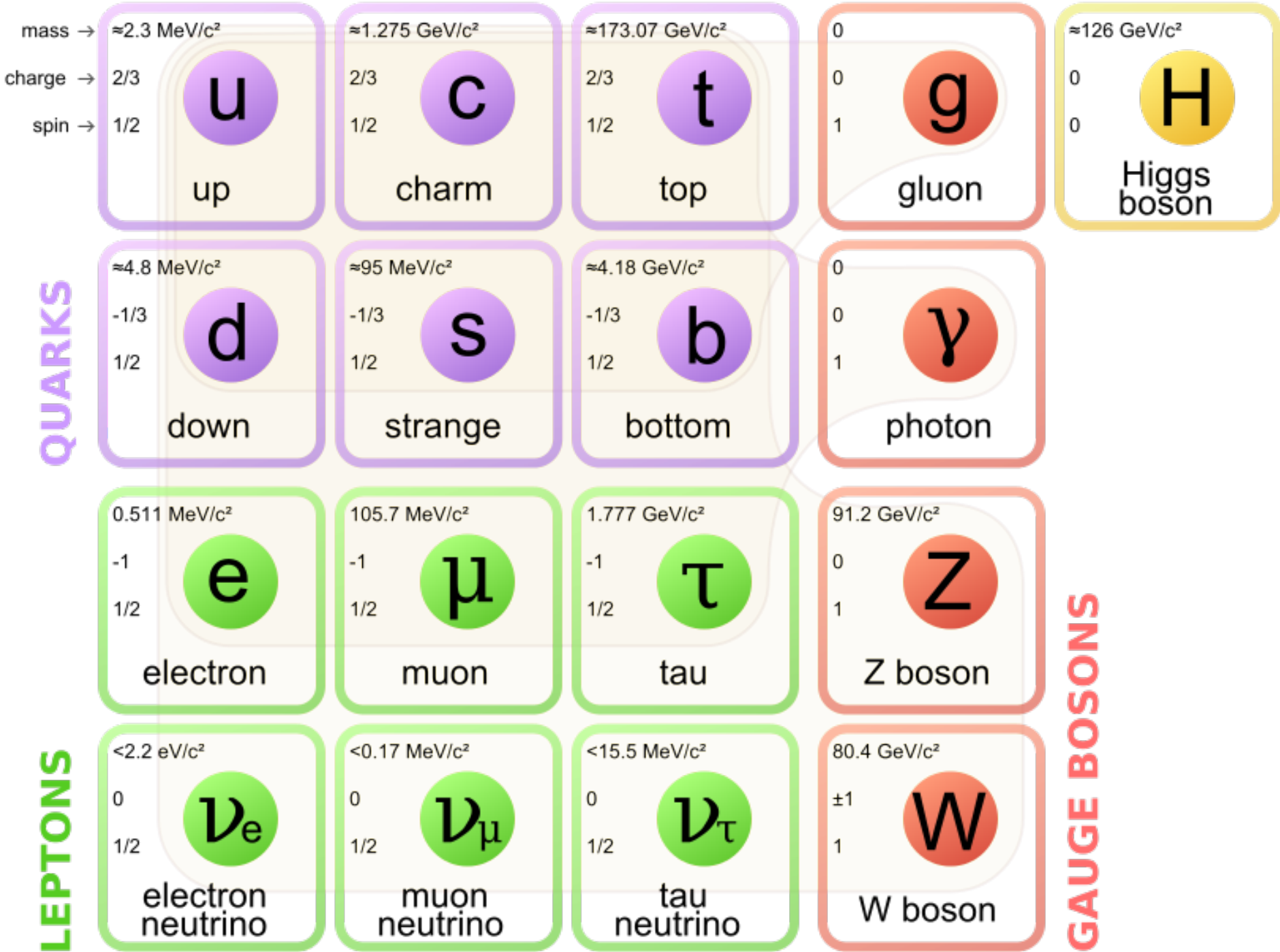
$$\theta_{23}, \theta_{13}, \theta_{12}, \delta_{CP} \quad \Delta m^2_{23}, \Delta m^2_{12}$$

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



Unica evidencia hasta la fecha de Física mas allá del Modelo Estándar

Modelo Estándar



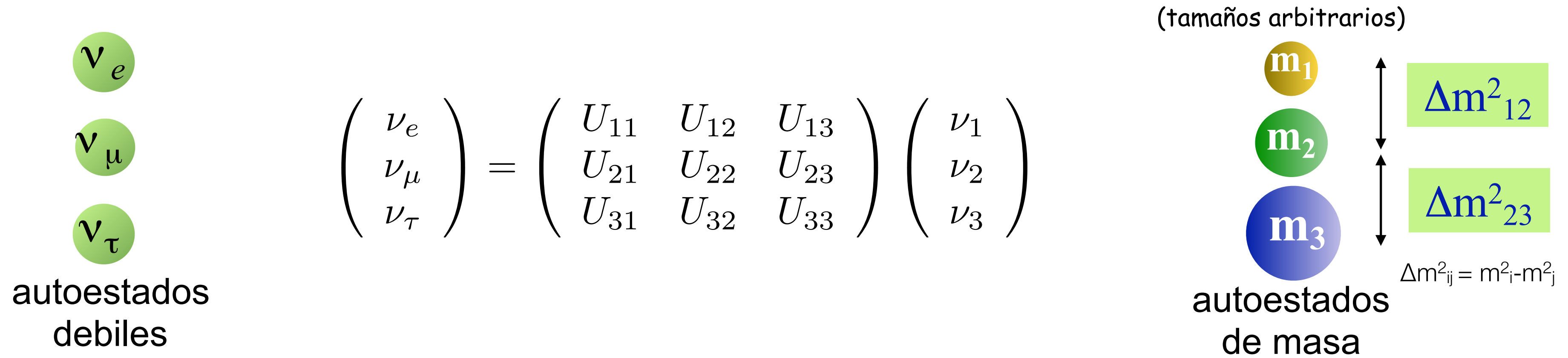
1973

Masa de los neutrinos



1998

Parámetros atmosféricos



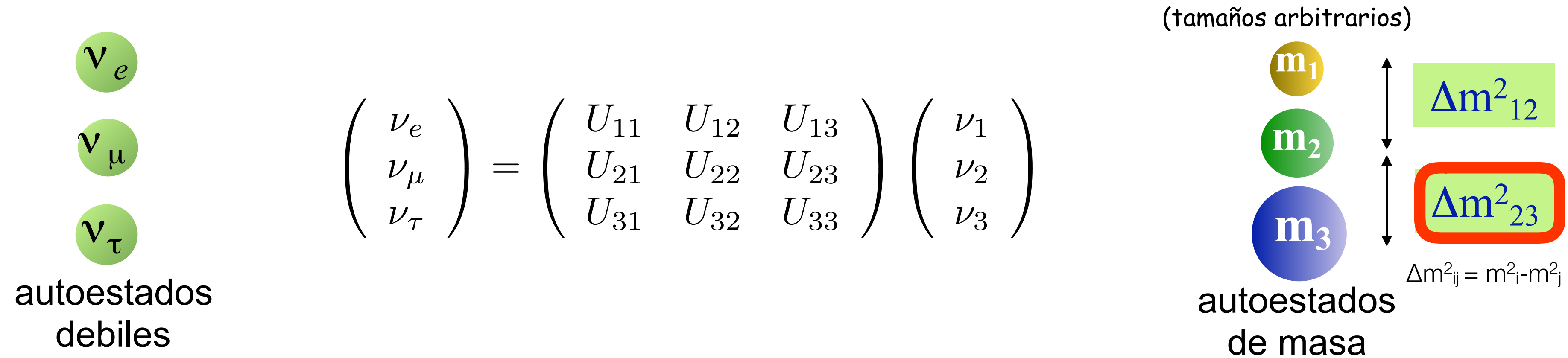
θ_{23} θ_{13} δ_{CP} θ_{12}

PMNS mixing matrix
Pontecorvo–Maki–Nakagawa–Sakata

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

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

Parámetros atmosféricos



Parameters defining the PMNS mixing matrix:

- θ_{23}
- θ_{13}
- δ_{CP}
- θ_{12}

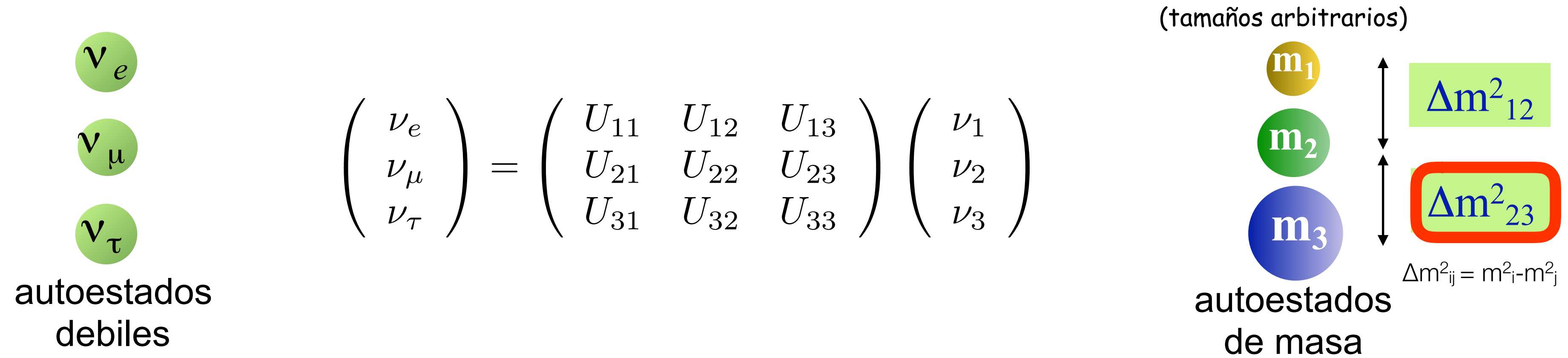
PMNS mixing matrix
Pontecorvo–Maki–Nakagawa–Sakata

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

Legend:

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

Parámetros atmosféricos



PMNS mixing matrix
Pontecorvo–Maki–Nakagawa–Sakata

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

Below the matrix, the sectors are identified:

- atmospheric sector (corresponding to the first matrix)
- connection between solar and atmospheric (corresponding to the second matrix)
- solar sector (corresponding to the third matrix)

Legend:

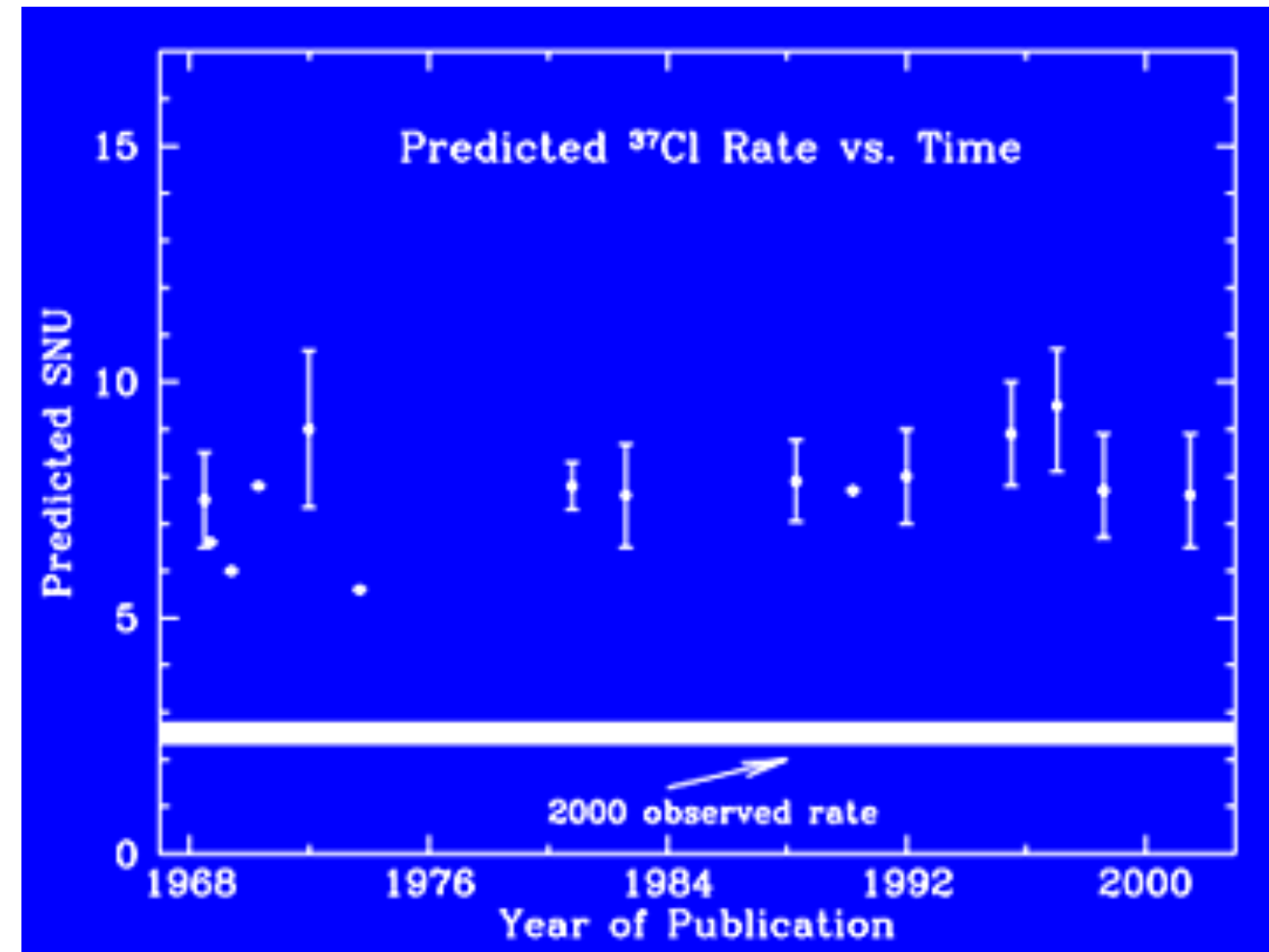
- $c_{ij} = \cos \theta_{ij}$
- $s_{ij} = \sin \theta_{ij}$

Neutrinos solares

- El sol produce una ingente cantidad de **neutrinos**, pero solamente neutrinos electrónicos

Solar Neutrino problem

- Existe un modelo teórico del Sol que permite predecir el flujo de neutrinos en la Tierra
- El flujo observado es casi 1/3 del observado. Dos opciones:
 1. El modelo solar es incorrecto
 2. Los neutrinos desaparecen



Neutrinos solares

$$\theta_{23}, \theta_{13}, \theta_{12}, \delta_{CP} \quad \Delta m^2_{23}, \Delta m^2_{12}$$

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

Una forma cuenta

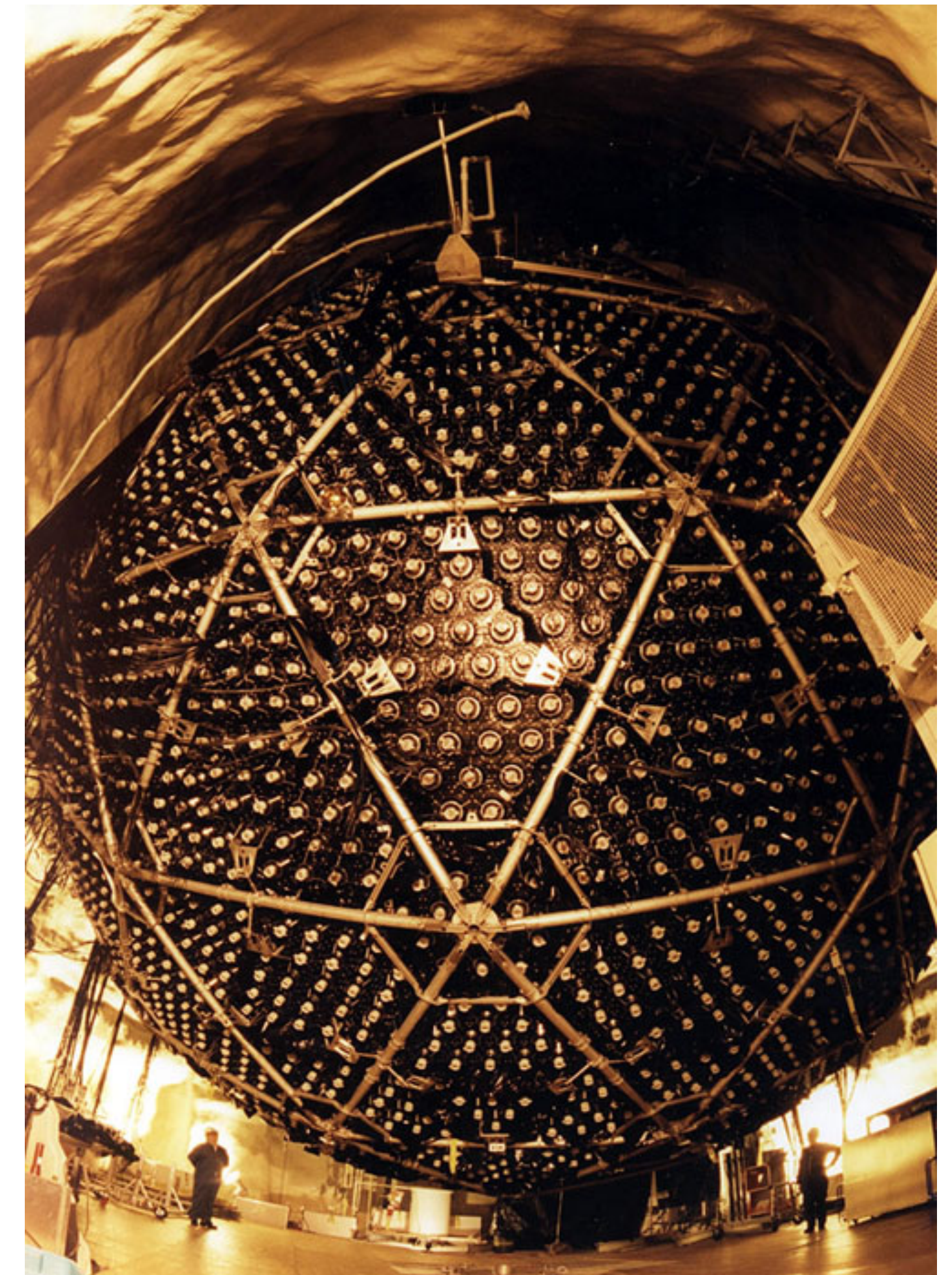
$$\text{Número}(\nu_e)$$

Otra forma cuenta el numero total de neutrinos

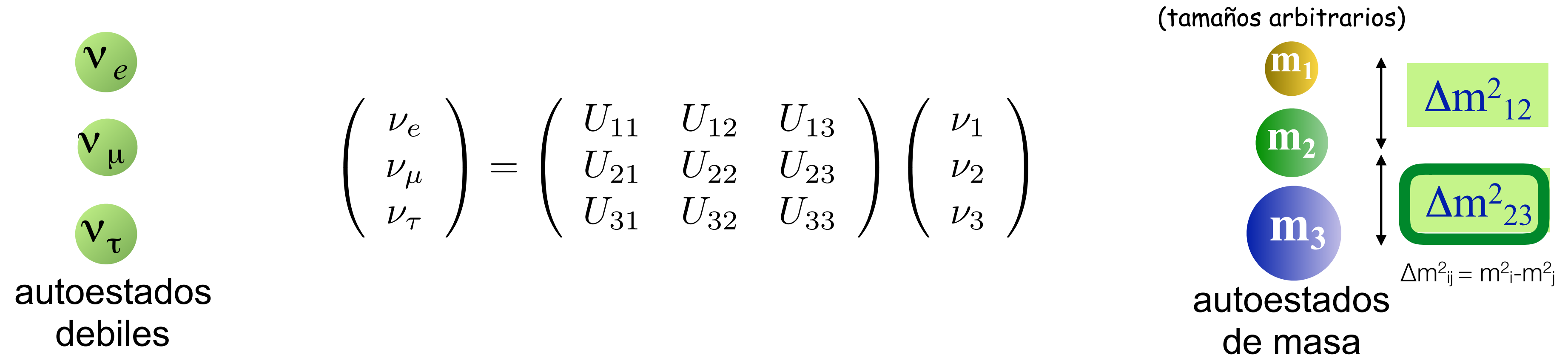
$$\text{Número}(\nu_e) + \text{Número}(\nu_\mu) + \text{Número}(\nu_\tau)$$

- SNO observa

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



Parámetros solares



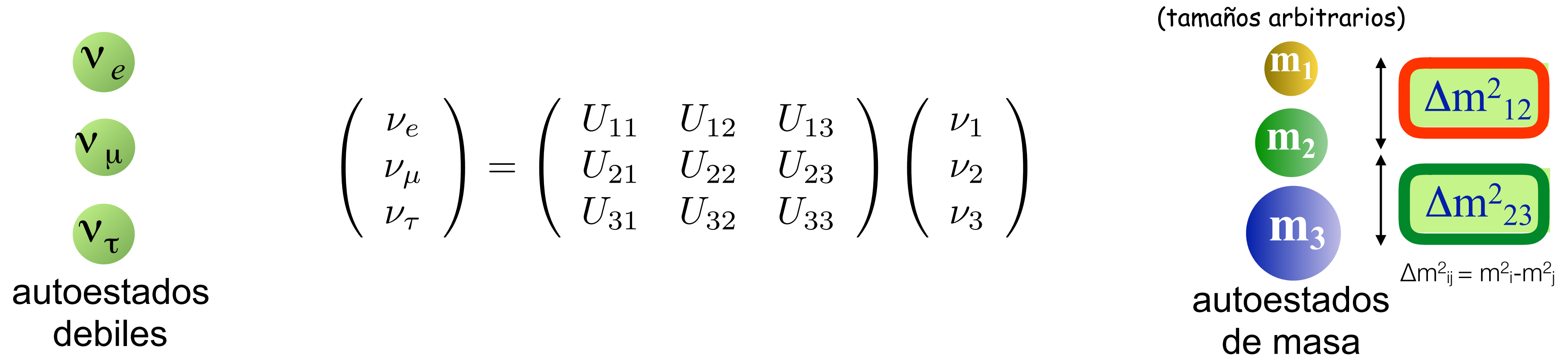
PMNS mixing matrix
Pontecorvo–Maki–Nakagawa–Sakata

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

Legend:

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

Parámetros solares



Parameters for the PMNS mixing matrix:

- θ_{23} (green box)
- θ_{13} (green box)
- δ_{CP} (green box)
- θ_{12} (green box)

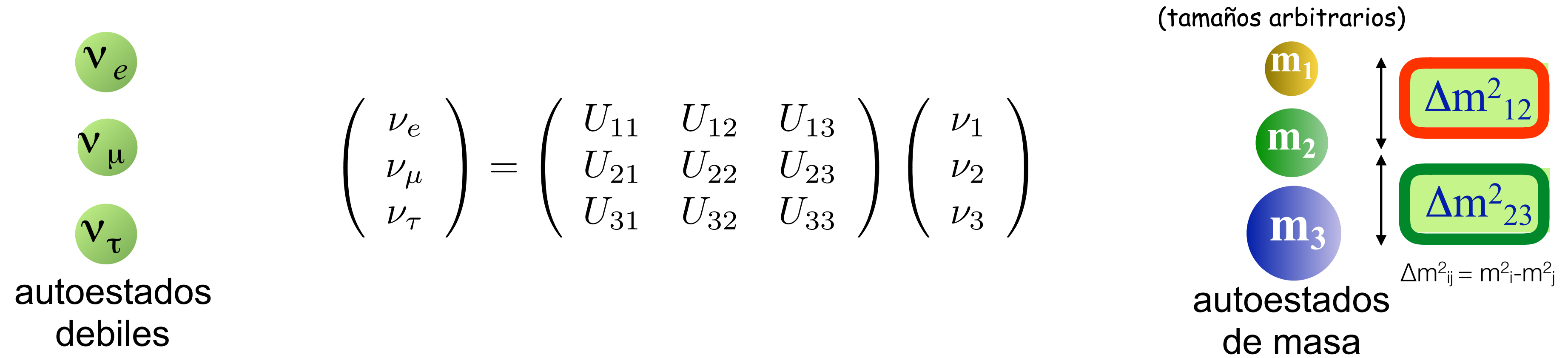
PMNS mixing matrix
Pontecorvo–Maki–Nakagawa–Sakata

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

Legend:

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

Parámetros solares



Parameters for the PMNS mixing matrix: θ_{23} , θ_{13} , δ_{CP} , and θ_{12} .

PMNS mixing matrix
Pontecorvo–Maki–Nakagawa–Sakata

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

Legend: $c_{ij} = \cos \theta_{ij}$, $s_{ij} = \sin \theta_{ij}$.

de nuevo en la playa

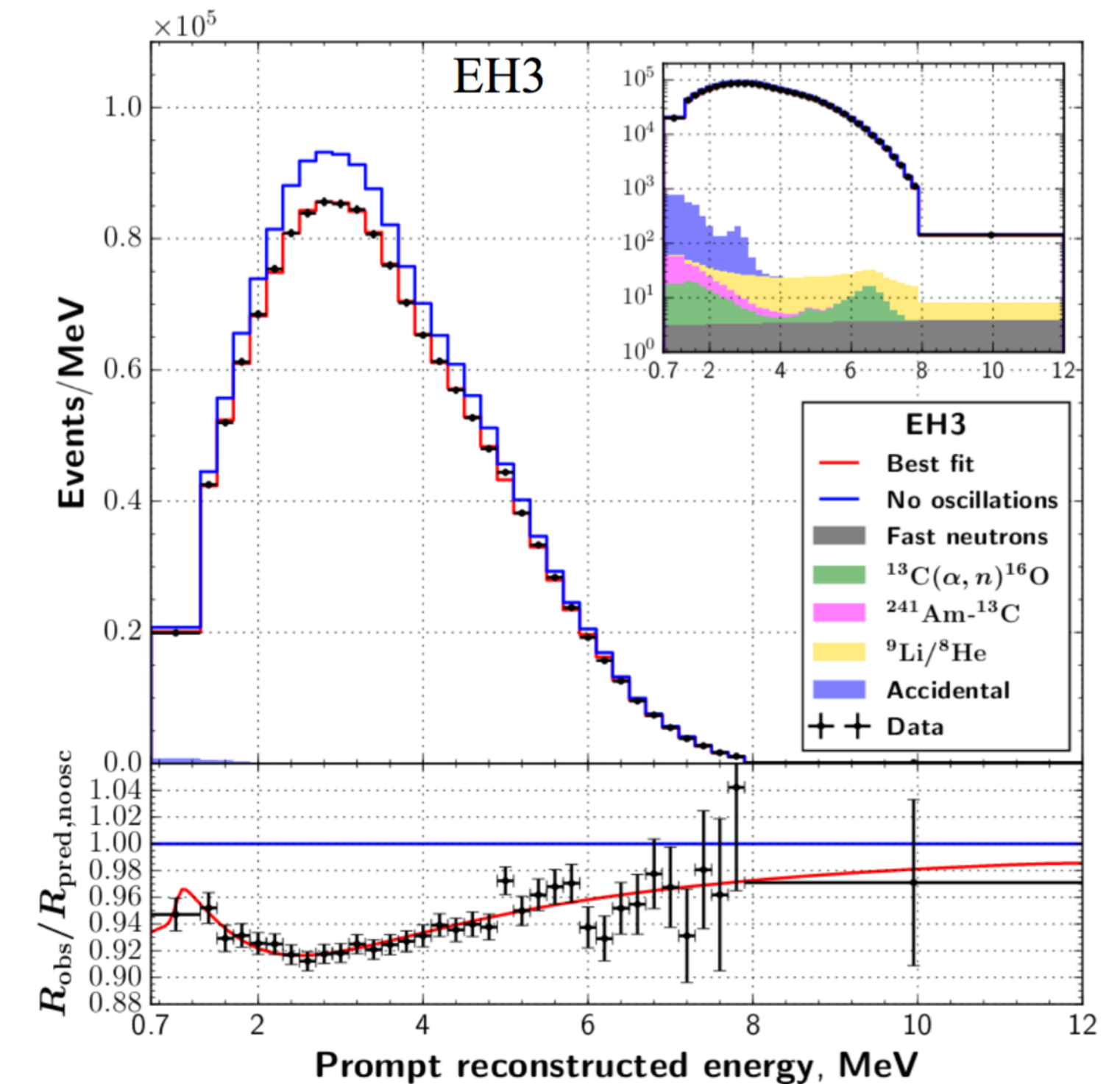
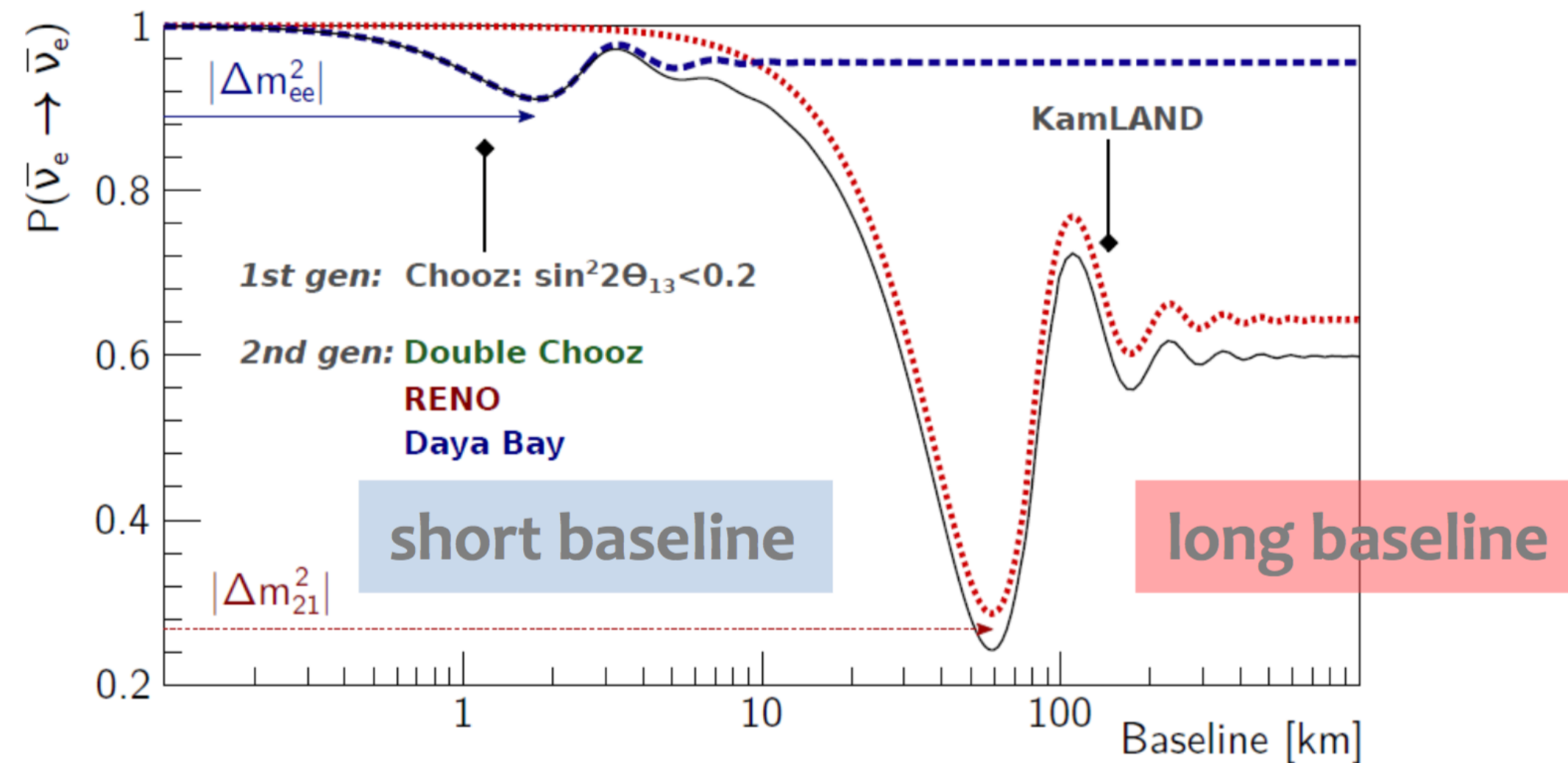
- Ahora que has encontrado a alguien en esa noche de luna llena, quieres saber algo más sobre esa persona: el color de su pelo, de sus ojos, etc
- Ahora si que te puede ser útil la linterna
- Las fuentes de neutrinos creadas por el hombre nos permiten estudiar sus propiedades en detalle, pues podemos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



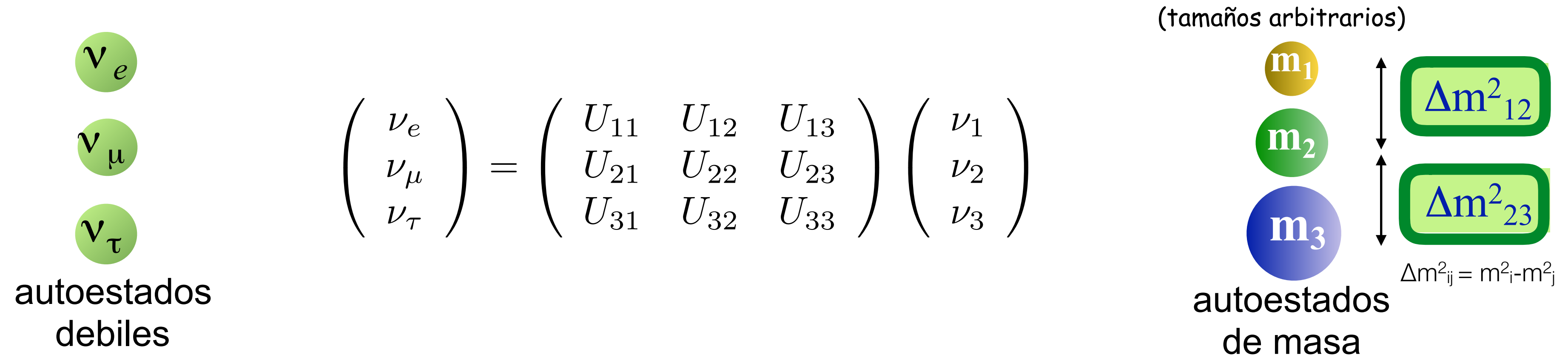
Reactores

$$\theta_{23}, \theta_{13}, \theta_{12}, \delta_{CP} \quad \Delta m_{23}^2, \Delta m_{12}^2$$

- Situados a poco más de un km, detectan los antineutrinos electrónicos producidos en la desintegración beta
- Se observa un déficit, que permite medir θ_{13}



Parámetros solares



PMNS mixing matrix
Pontecorvo–Maki–Nakagawa–Sakata

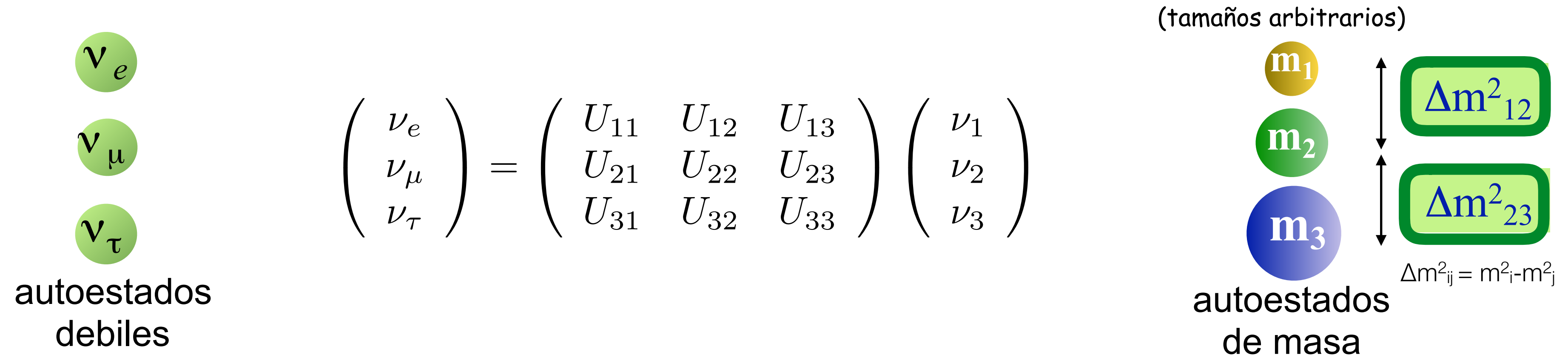
Parameters: θ_{23} , θ_{13} , δ_{CP} , θ_{12}

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

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

atmospheric sector connection between solar and atmospheric solar sector

Parámetros solares



θ_{23} θ_{13} δ_{CP} θ_{12}

PMNS mixing matrix
Pontecorvo–Maki–Nakagawa–Sakata

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

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

Oscilaciones de neutrinos en aceleradores

El experimento T2K

$$\theta_{23}, \theta_{13}, \theta_{12}, \delta_{CP} \quad \Delta m^2_{23}, \Delta m^2_{12}$$

Nuestro grupo
participa
en T2K desde
2006

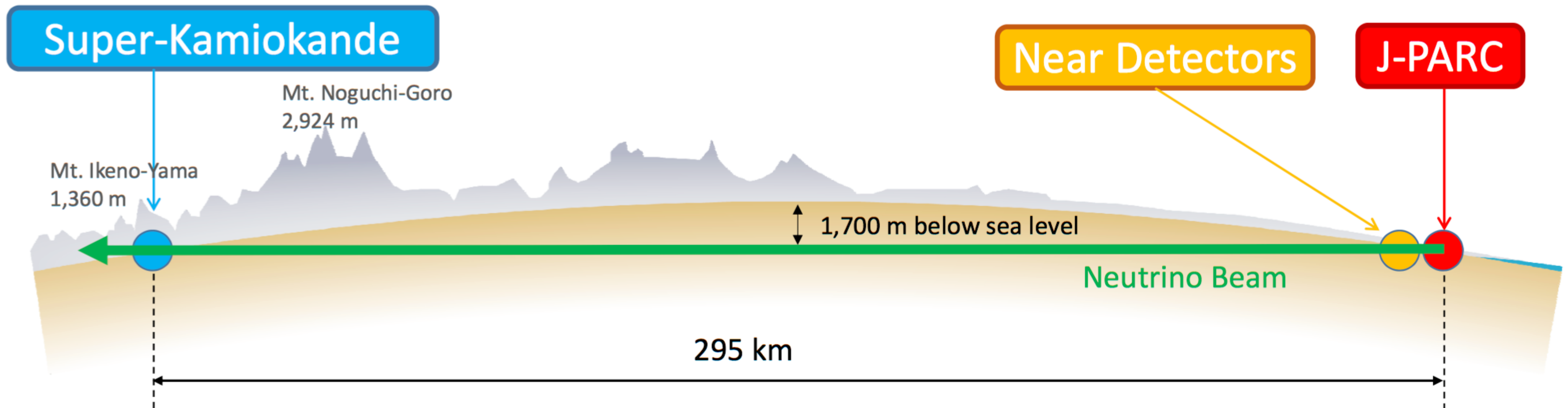


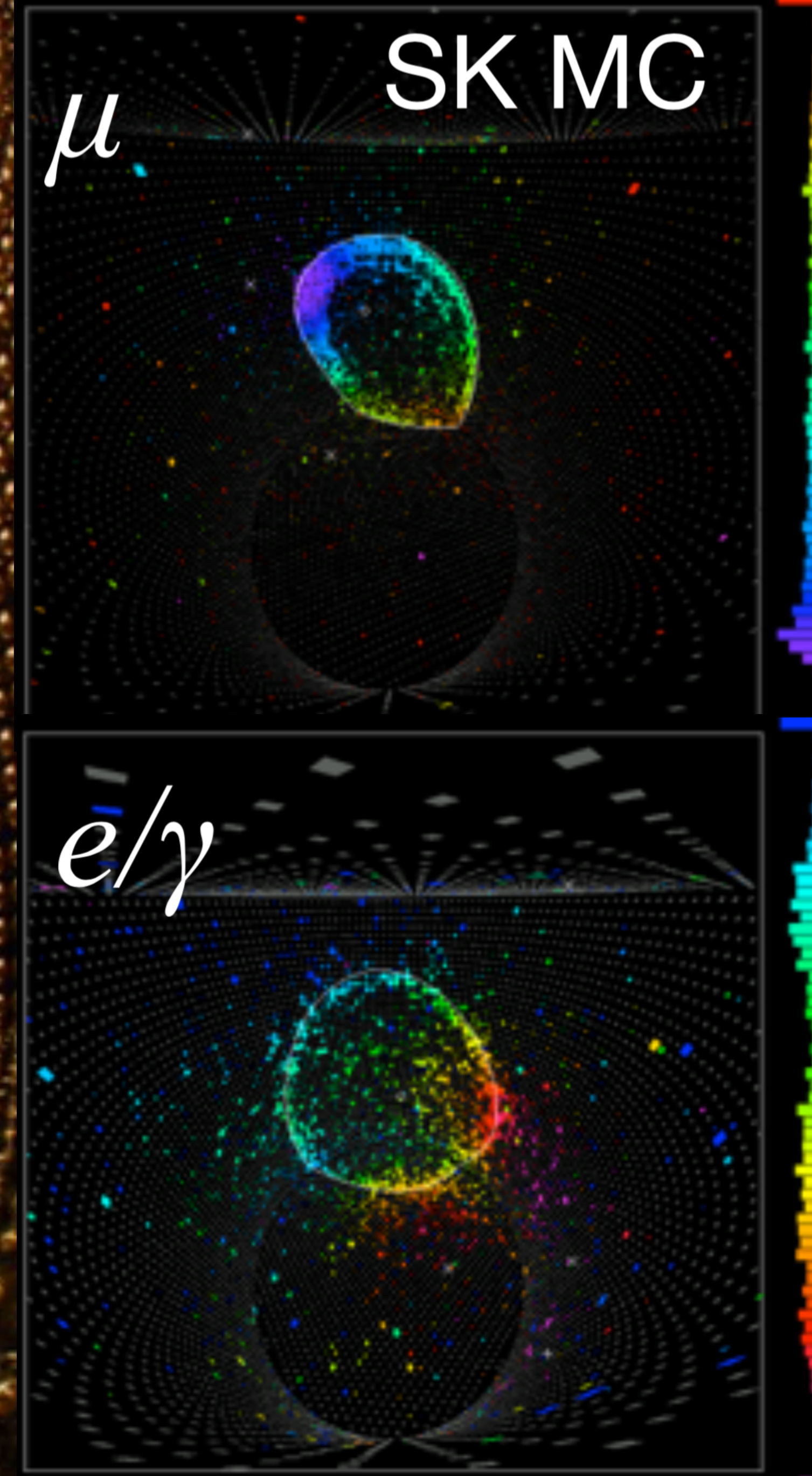
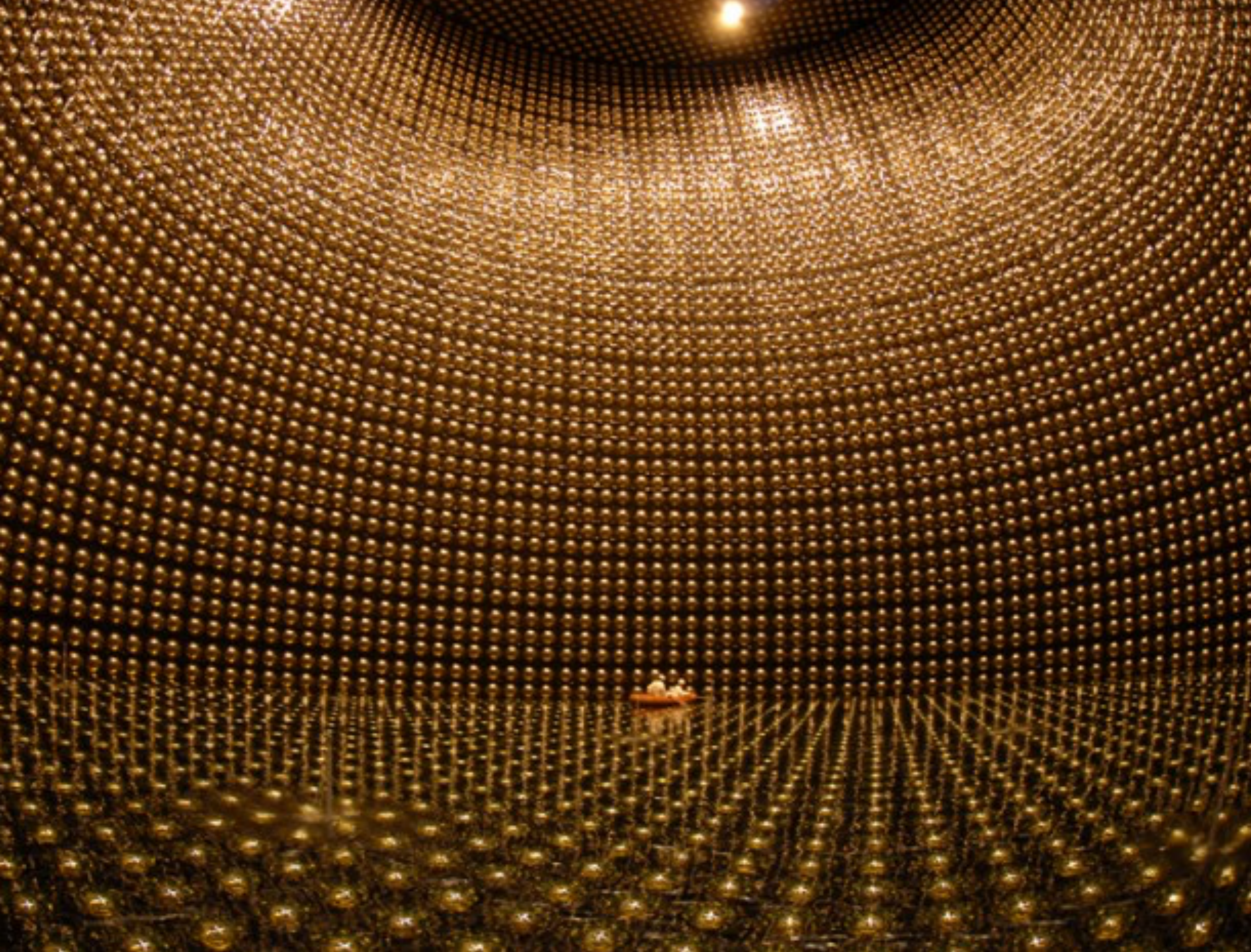
T2K = Tokai
to
Kamioka

No hay ningún túnel

$$\theta_{23}, \theta_{13}, \theta_{12}, \delta_{CP} \quad \Delta m^2_{23}, \Delta m^2_{12}$$

- No hay ningún túnel entre Tokai y Kamioka
- Recordad que para los neutrinos la materia ordinaria es casi vacío: el 99.999... % de los neutrinos llegarán a Super-Kamiokande, INTACTOS !!!!!





Violación de CP

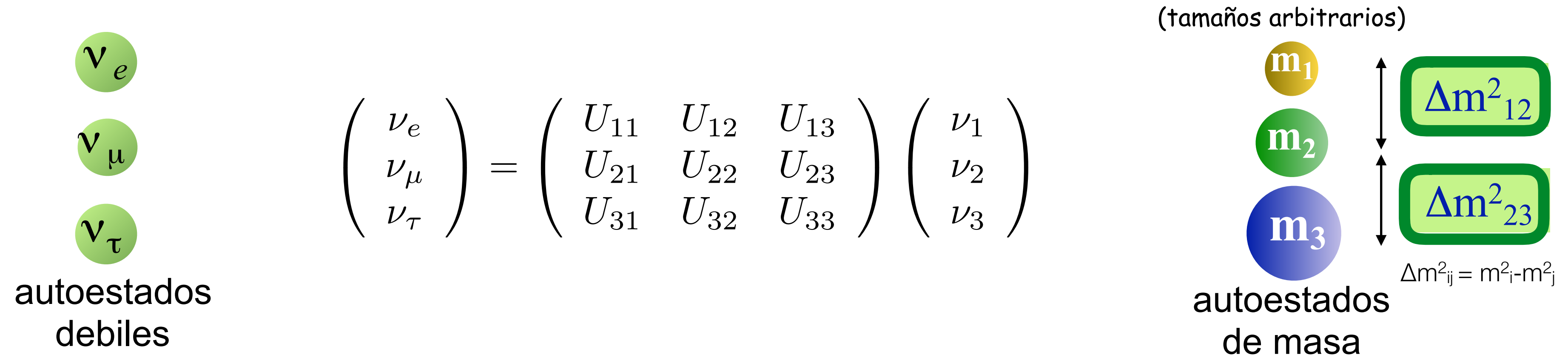


Diagram illustrating the PMNS mixing matrix (Pontecorvo–Maki–Nakagawa–Sakata) and its components.

The PMNS mixing matrix is shown as a product of three matrices:

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

The matrix is decomposed into three sectors:

- atmospheric sector:** The first matrix, involving θ_{23} .
- connection between solar and atmospheric:** The second matrix, involving θ_{13} and δ_{CP} .
- solar sector:** The third matrix, involving θ_{12} .

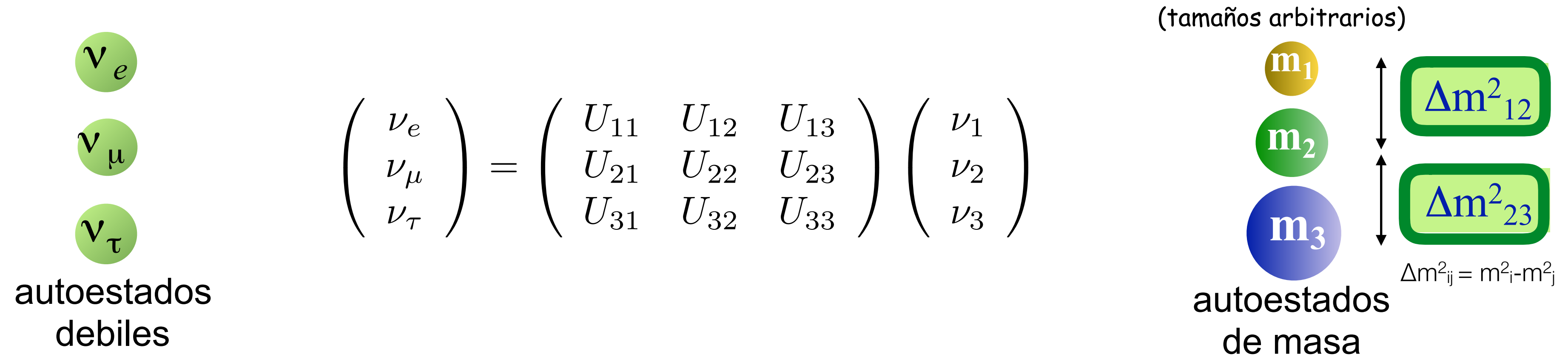
The parameters θ_{23} , θ_{13} , δ_{CP} , and θ_{12} are shown in green boxes above the matrix.

Legend:

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

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

Violación de CP



θ_{23} θ_{13} δ_{CP} θ_{12}

PMNS mixing matrix
Pontecorvo–Maki–Nakagawa–Sakata

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

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

Solo se puede estudiar CP en aceleradores ..

- Porque solo en un haz controlado de neutrinos se puede observar la **aparición** de un tipo de neutrinos diferente al original **con suficiente precisión**
- Los experimentos solares solo observan **desaparición** de neutrinos electrónicos
- Los experimentos atmosféricos solo observan **desaparición** de neutrinos muónicos
- Los experimentos con reactores solo observan **desaparición** de anti-neutrinos electrónicos

¿ 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 de neutrinos 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
- En la actualidad estamos desarrollando el primer análisis combinado de **T2K con reactores**

¿Que más?



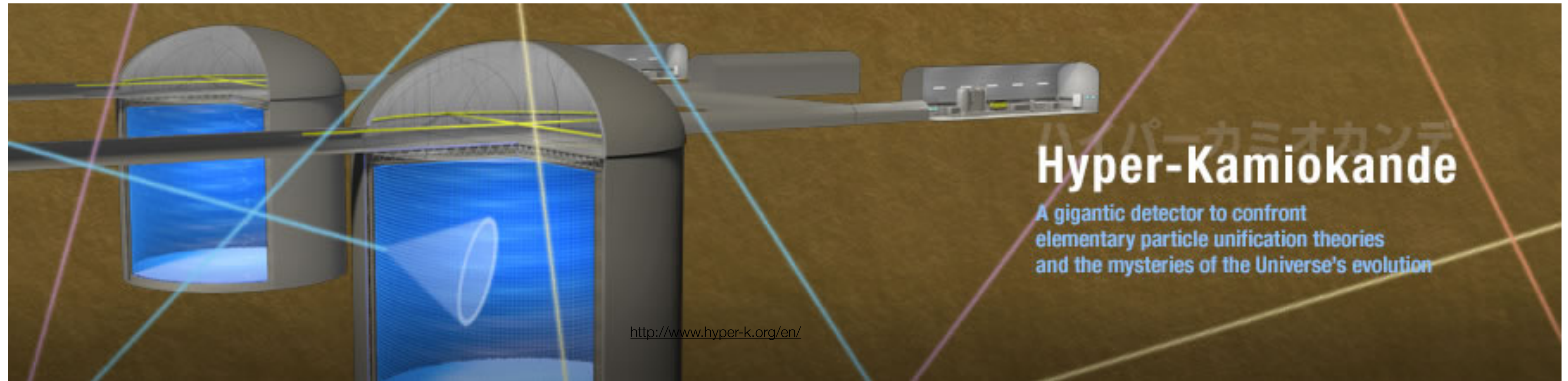
- La Física experimental no es solo esto:
 - Hemos participado en el diseño del detector
 - En los prototipos (en el CERN)
 - En la calibración del detector
 - En la elaboración del software de reconstrucción
 - En la elaboración del programa de análisis
 - En la toma de datos

¿Que viene después?

- T2K no es el final de la historia
- En los 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?

Hyper-Kamiokande (HK)

θ_{23} , θ_{13} , θ_{12} , δ_{CP} Δm^2_{23} , Δm^2_{12}

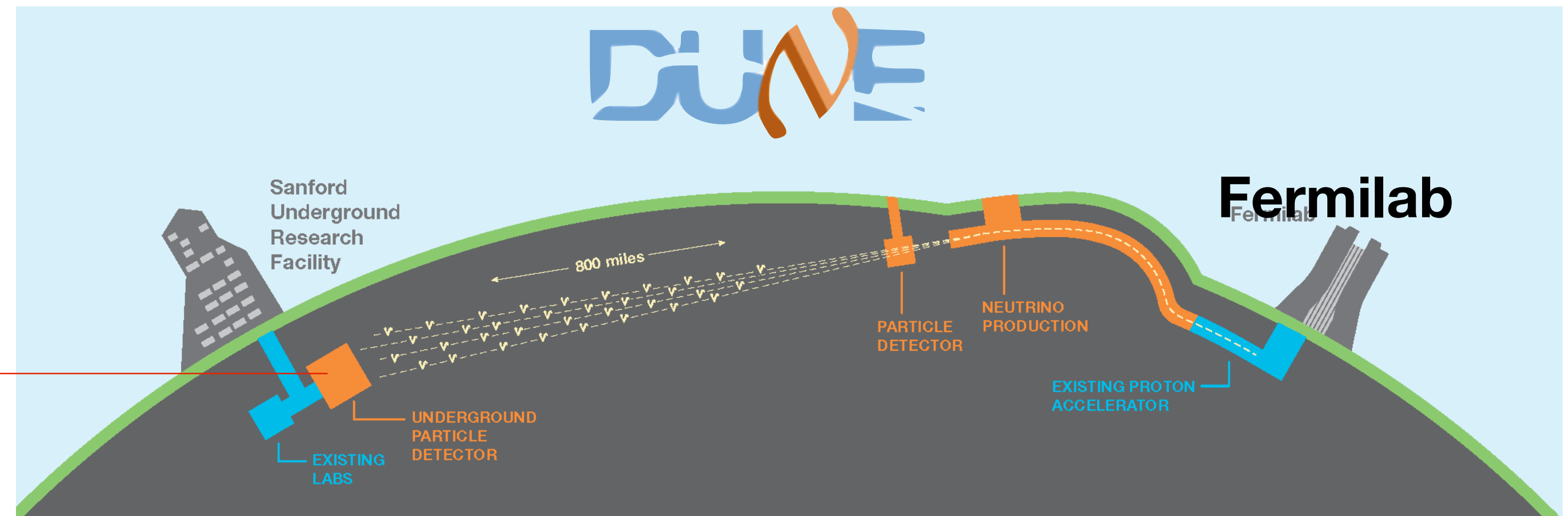
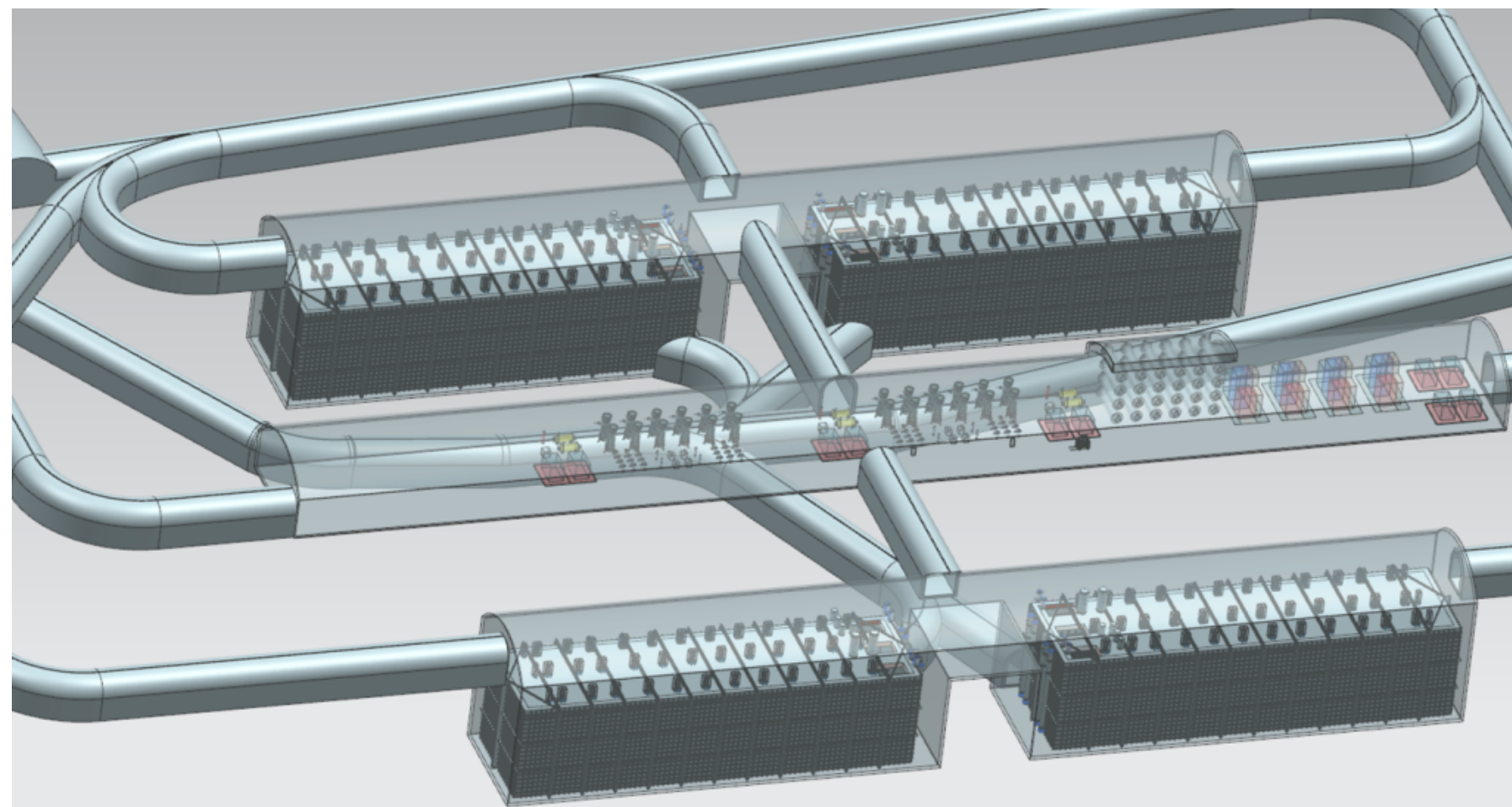


- En Japón. Similar a T2K pero:
 - 10 x Super-Kamiokande (millón de toneladas)
 - Un haz 5 veces más potente

- 560 Kiloton Water Cherenkov Detector with a high intensity beam from J-PARC
- Multipurpose machine with all of the physics topics of Super-K and T2K, plus a few more
 - Solar and Supernova Neutrinos
 - Atmospheric Neutrinos
 - Nucleon Decay
 - Far detector for T2K
 - Neutrino Geochemistry

Deep Underground Neutrino Experiment

- Un haz de neutrinos muónicos más potente
- Una técnica de detección diferente
- 4 detectores de 10.000 toneladas cada uno a 1.5 km de prof.
 - Similar en masa a Super-Kamiokande pero con una eficiencia de detección mucho mayor



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