

FÍSICA FUNDAMENTAL

Pablo García Abia (CIEMAT)

26 de junio de 2023

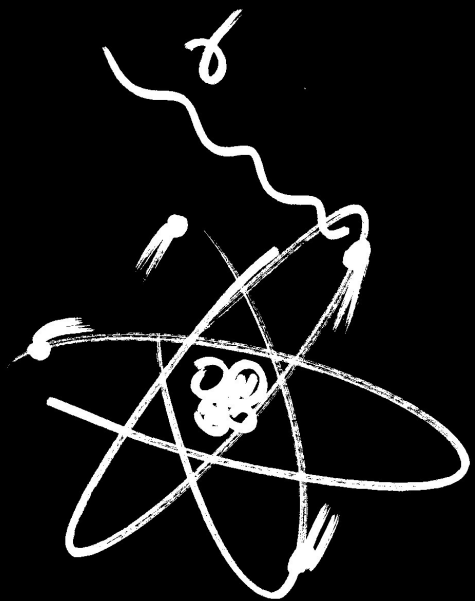


Ciemat
Centro de Investigaciones
Energéticas, Medioambientales
y Tecnológicas

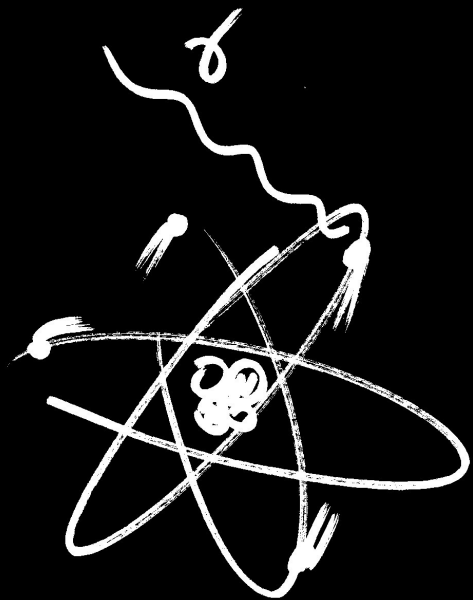




**1ª imagen de campo
profundo del JWST
julio 2022**



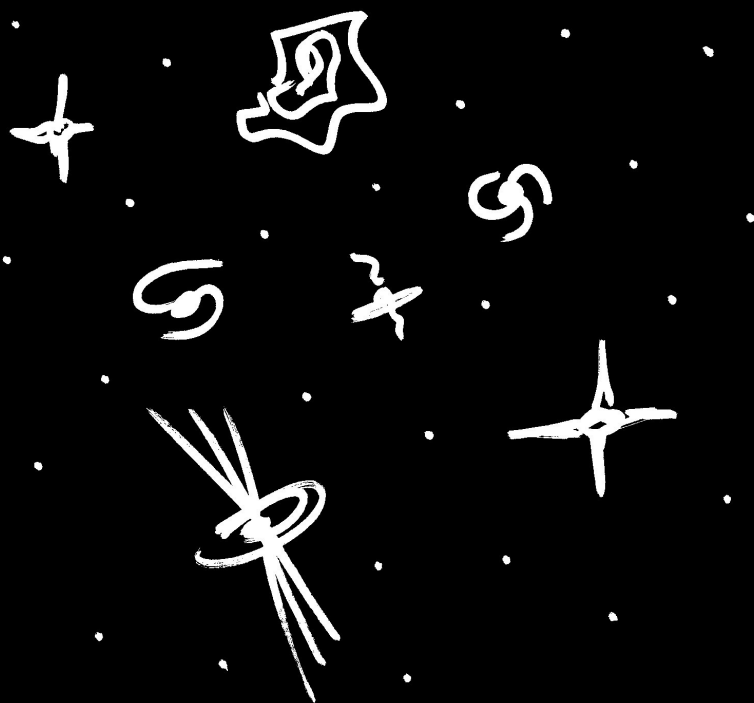
1900

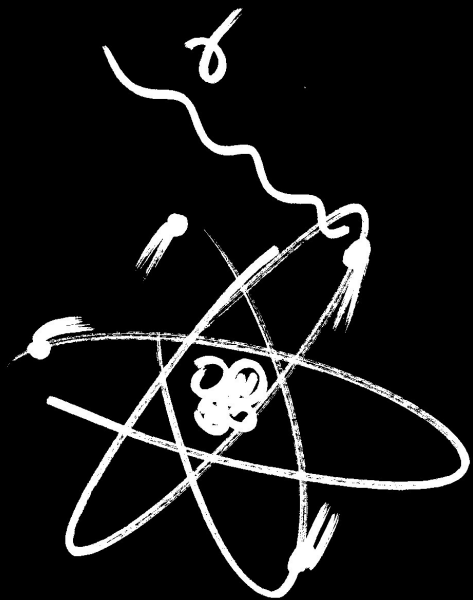


MC



1900





MC

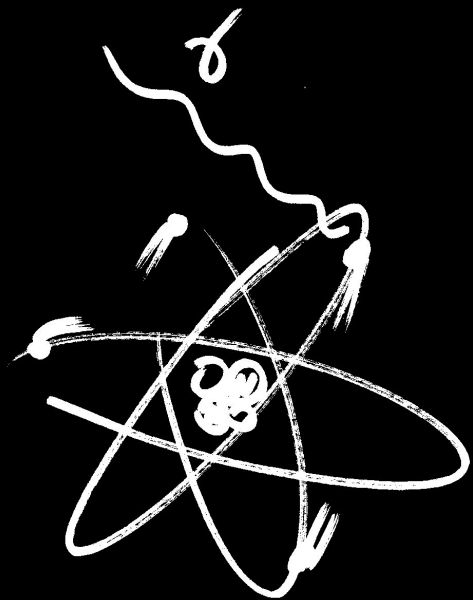


1900



RG





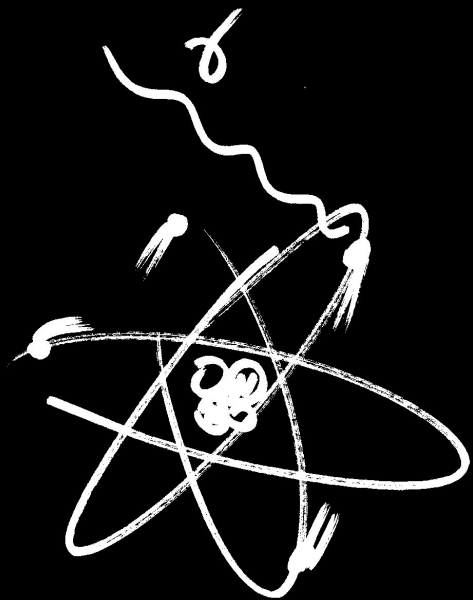
MC



RG



Teoría
unificada



MC

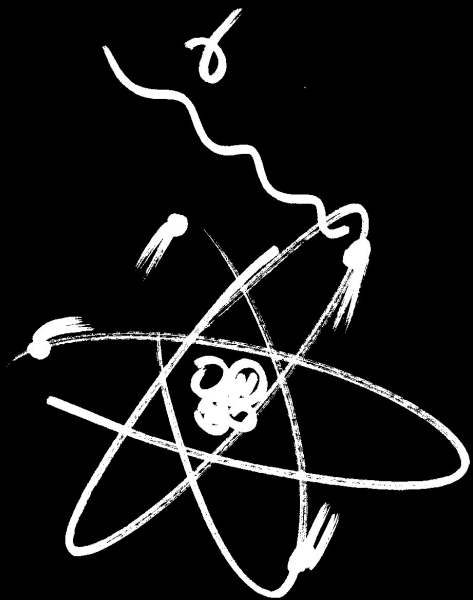


$\Delta E, \Delta x \approx 10^{40}$



RG





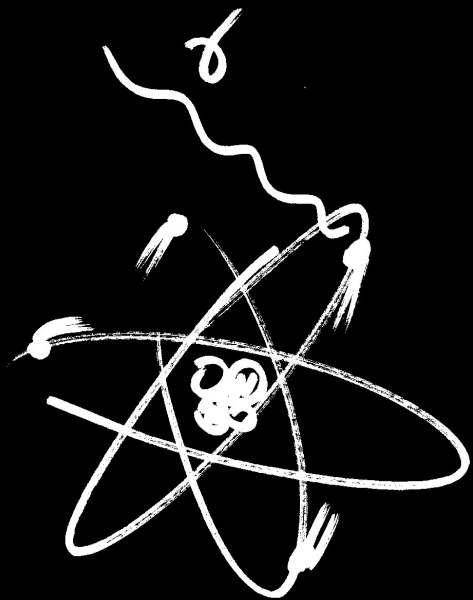
MC



Teoría ~~unificada~~

RG





MC



2000

RG



ERA DE PLANCK

$$t \approx 10^{-42} \text{ s}$$

$$E \approx 10^{28} \text{ eV}$$

¿Teoría
unificada?



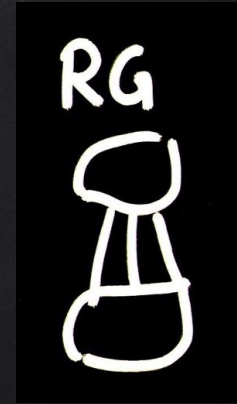
$$T_{\text{Planck}} \approx 10^{32} \text{ K}, \quad T_{\text{hoy}} \approx 2.7 \text{ K}$$

$$E_{\text{LHC}} \approx 10^{12} \text{ eV}, \quad t_{\text{LHC}} \approx 10^{-10} \text{ s}$$

SITUACIÓN ACTUAL DE LA FÍSICA FUNDAMENTAL



$\Delta E, \Delta x \approx 10^{40}$



Mecánica cuántica relativista:

física de partículas

Modelo Estándar

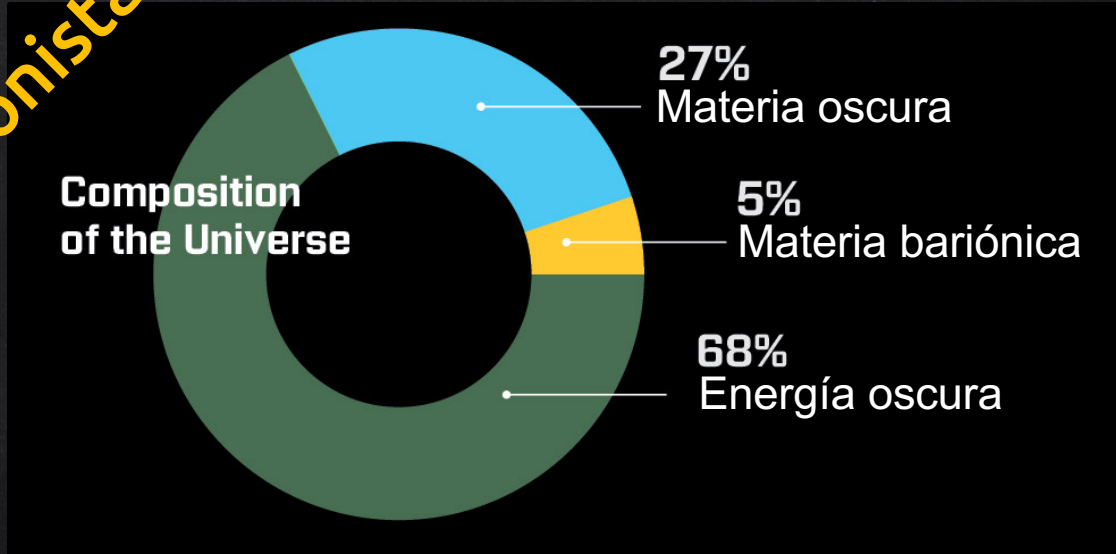
Relatividad General:

física del espacio-tiempo

Modelo Estándar Cosmológico

SITUACIÓN ACTUAL DE LA FÍSICA FUNDAMENTAL

Visión reduccionista



- X 95% del Universo es de naturaleza desconocida
- X Expansión acelerada del Universo: naturaleza de la energía oscura (RG)
- X Contenido del universo: naturaleza de la materia oscura (MC, ¿RG?)

IMPORTANCIA DE LA SIMETRÍA EN FÍSICA

- X La **mecánica lagrangiana** (L) es una formulación de la mecánica clásica basada en el principio de mínima **acción**:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_j} \right) = \frac{\partial L}{\partial q_j}$$

- X Teorema de Noether (Amalie Emmy), 1915:

Si un sistema tiene una propiedad de simetría continua, entonces hay cantidades correspondientes cuyos valores se conservan en el tiempo.

Lagrangiano simétrico bajo rotaciones: conservación del momento angular.

Lagrangiano simétrico bajo translaciones en el espacio y en el tiempo: conservación del momento lineal y la energía.

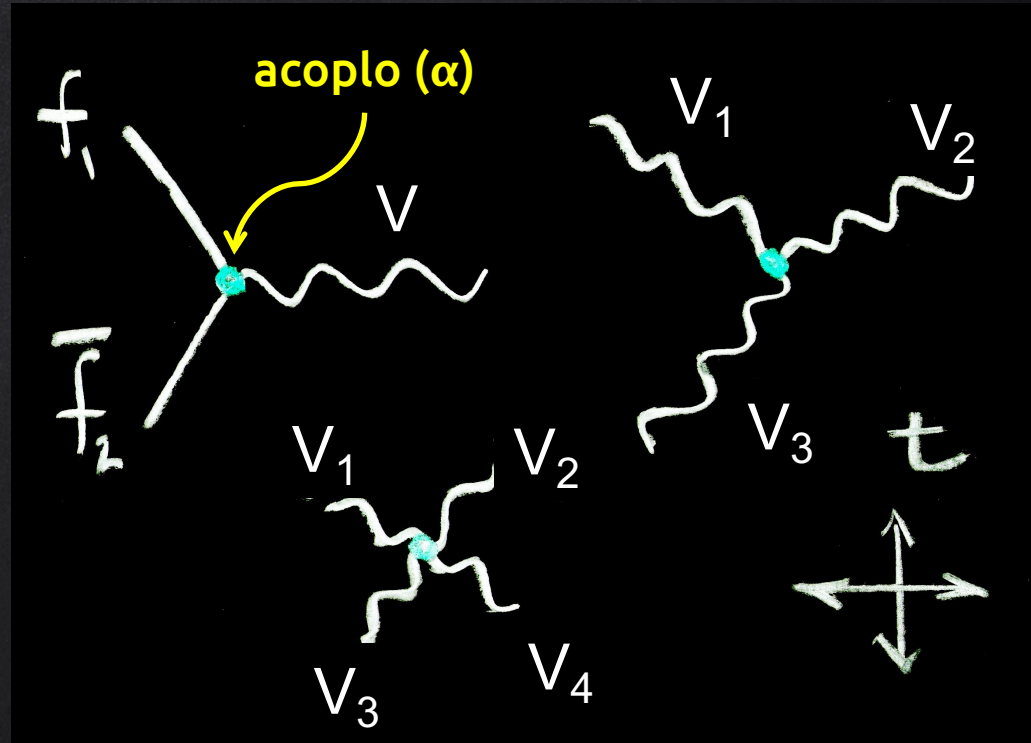
MODELO ESTÁNDAR DE LA FÍSICA DE PARTÍCULAS

Partículas de materia
e interacciones:
campos cuánticos.

Procesos fundamentales:
creación/aniquilación de
partículas (desintegración).

Simetrías → leyes de
conservación:

P, E, q, CPT, nc...



acoplo → probabilidad, números cuánticos



MODELO ESTÁNDAR DE LA FÍSICA DE PARTÍCULAS

Teoría cuántica de campos relativistas: $SU(3)_C \times SU(2)_L \times U(1)_Y$

X Fermiones ($s = 1/2$)

- quarks: u, d (L, R)
- leptones: e (L, R), ν_e (L)
- *antipartículas*: $L \leftrightarrow R$

X Bosones vectoriales ($s = 1$)

- EM: γ (α)
 - débil: W^\pm, Z (g_V, g_A)
 - fuerte: $g \times 8$ (α_s)
- } EW

La simetría EW está rota: $E \approx 10^{11}$ eV \rightarrow campo de Higgs: H ($s = 0$)

SIMETRÍA CPT

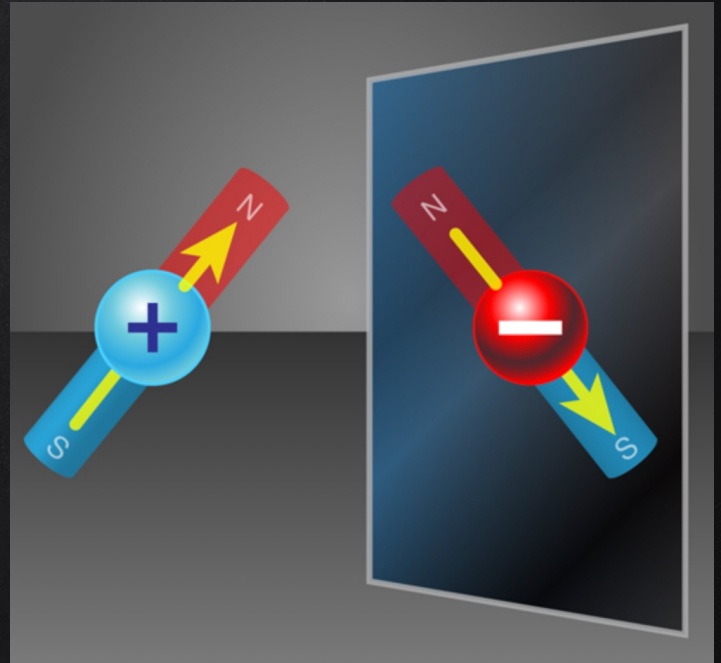
Simetría fundamental de las leyes físicas bajo las transformaciones simultáneas C, P y T:

C: carga

P: paridad (reflexión)

T: inversión temporal

Teorema CPT: cualquier teoría de campos cuánticos (ME) debe tener simetría CPT.



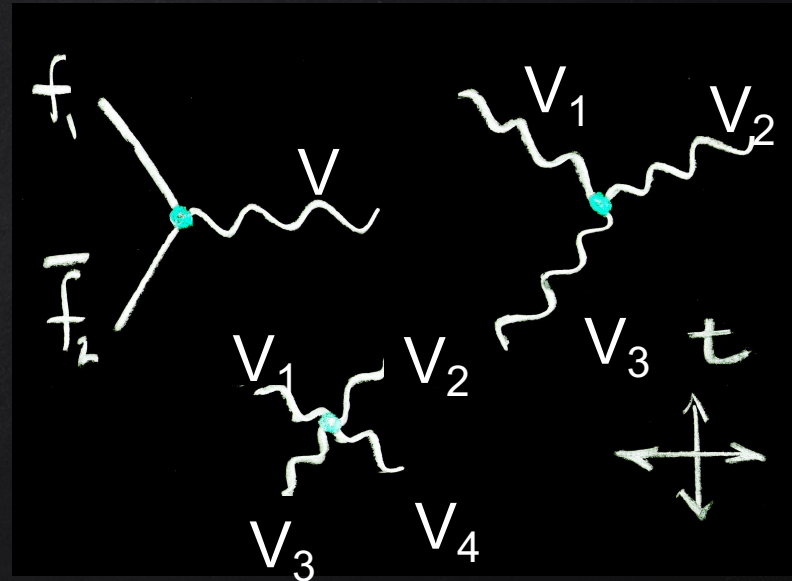
VIOLACIÓN DE CP

Las interacciones del Modelo Estándar son invariantes bajo transformaciones CPT.

Las **interacciones débiles** violan CP.

La violación de CP es uno de los problemas abiertos en física de partículas:

~ universo sin antimateria ~



VIOLACIÓN DE CP

Las interacciones del Modelo Estándar son invariantes bajo transformaciones CPT.

Las interacciones débiles violan CP.

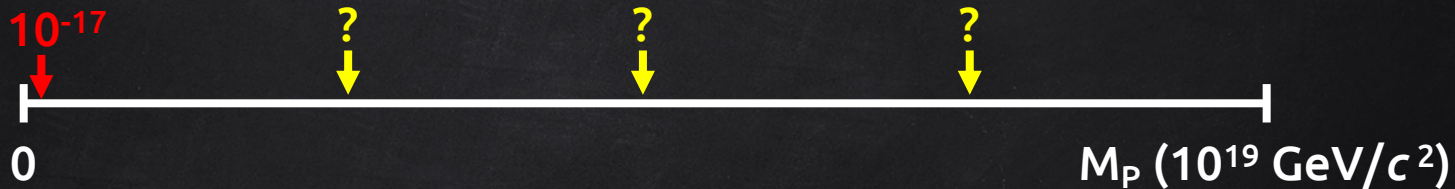
La violación de CP es uno de los problemas abiertos en física de partículas:

~ universo sin antimateria ~



EL PROBLEMA DE LA MASA EN FÍSICA DE PARTÍCULAS

En el ME, la **simetría gauge** se preserva de forma natural si $m_f = m_v = 0$.



Mecanismo de Higgs: campo escalar (ϕ) $\rightarrow \langle v \rangle \neq 0$

Transición de fase ($m_{EW}, \langle v \rangle = 0$) rompe la simetría EW: $m = 0 \rightarrow m \gg 0$

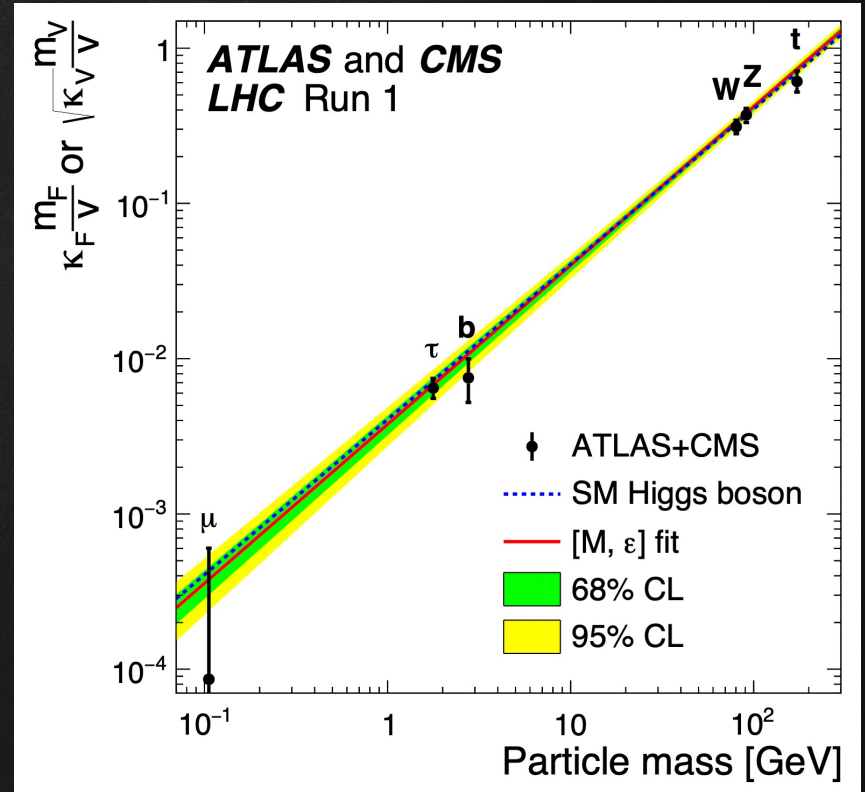
EL CAMPO DE HIGGS

La interacción con el campo H dota de masa a las partículas elementales:

X $m_f \propto k_f$ (acoplo de Yukawa)

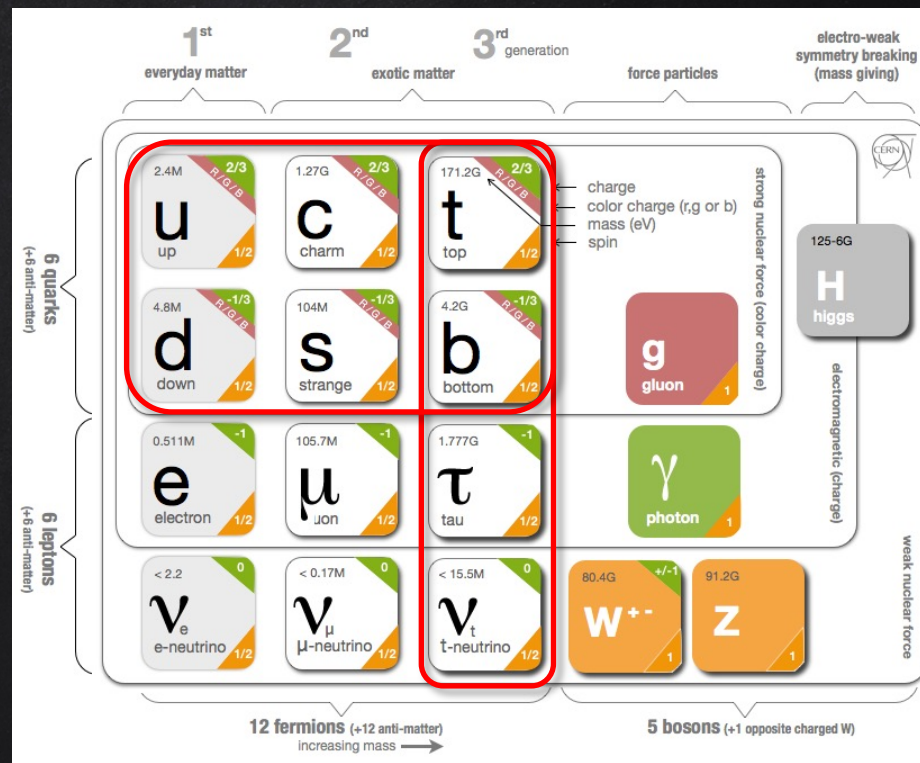
X $m_V \propto \sqrt{k_V}$

Puede haber otros mecanismos para adquirir masa: **neutrinos** (¿?)



EL SABOR EN EL MODELO ESTÁNDAR

- X En el ME hay 3 generaciones de quarks y leptones.
- X Las masas y la mezcla de sabores tienen un origen común en el ME: interacciones de Yukawa con el campo H.
- X El decaimiento de W^\pm viola P.
- X Las interacciones débiles violan CP.

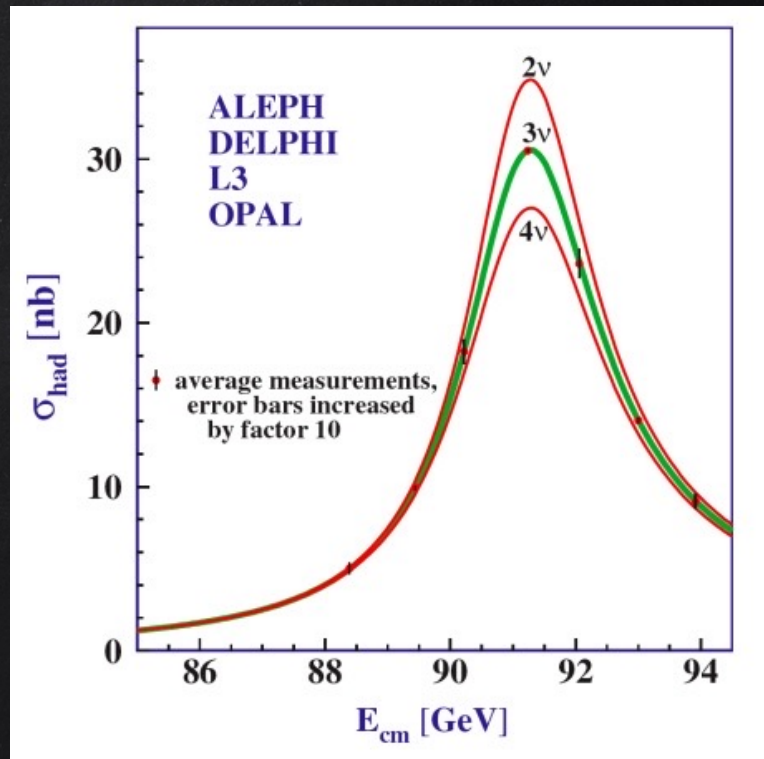


EL SABOR EN EL MODELO ESTÁNDAR

- X La matriz unitaria CKM (Cabibbo, Kobayashi y Maskawa, 1973) describe las desintegraciones débiles de las 3 generaciones de quarks.

$$\begin{bmatrix} d' \\ s' \\ b' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d \\ s \\ b \end{bmatrix}$$

matriz V_{CKM}

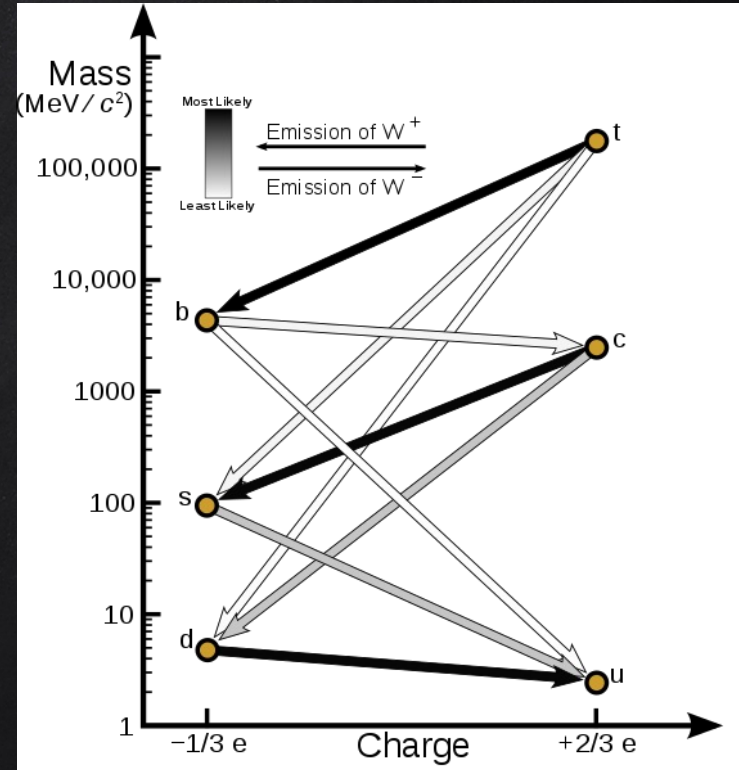


EL SABOR EN EL MODELO ESTÁNDAR

- X La matriz unitaria CKM (Cabibbo, Kobayashi y Maskawa, 1973) describe las desintegraciones débiles de las 3 generaciones de quarks.

$$\begin{bmatrix} d' \\ s' \\ b' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d \\ s \\ b \end{bmatrix}$$

matriz V_{CKM}



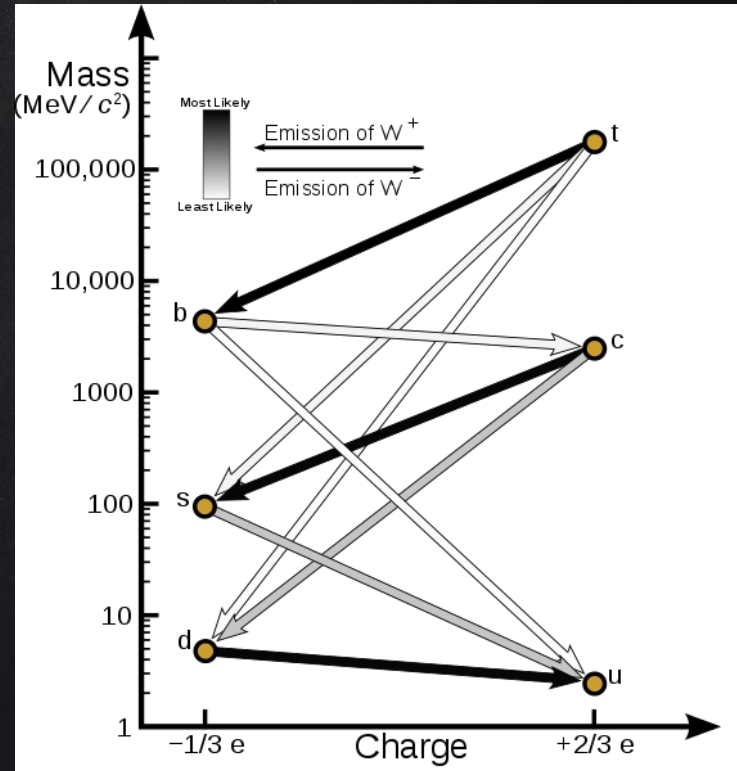
MEZCLA DE QUARKS Y VIOLACIÓN DE CP

- X Esta matriz contiene ángulos de rotación llamados **ángulos de mezcla de los quarks**.
- X Las fases complejas de la matriz CKM que inducen **violación de CP**.

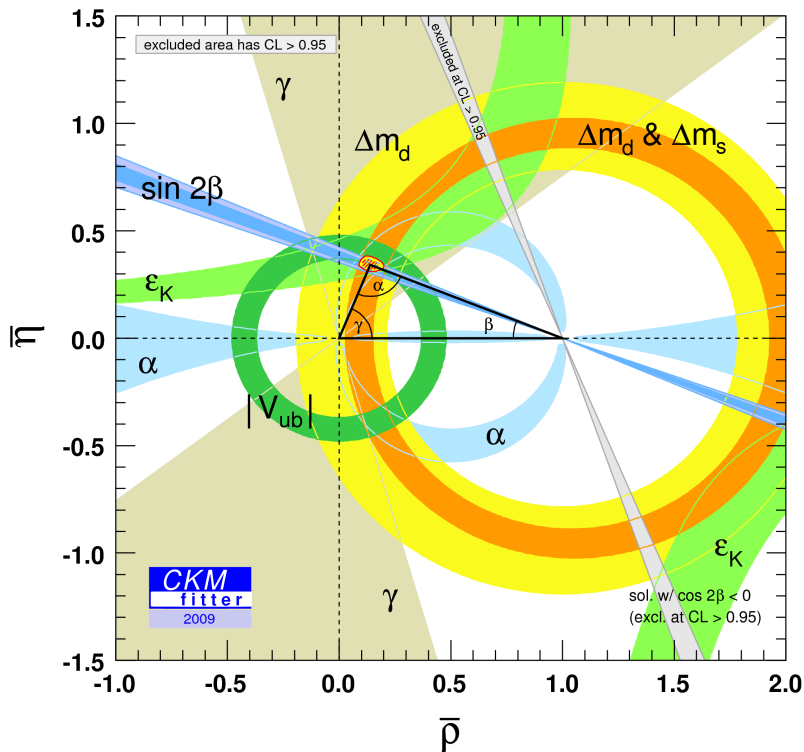
$$V_{CKM} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_{13} & 0 & s_{13} e^{-i\delta_{13}} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13} e^{i\delta_{13}} & 0 & c_{13} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$c_{jk} = \cos \vartheta_{jk}, \quad s_{jk} = \sin \vartheta_{jk}$$

Experimento: $s_{13} \ll s_{23} \ll s_{12} \ll 1$



MEZCLA DE QUARKS Y VIOLACIÓN DE CP



$$\begin{bmatrix} d' \\ s' \\ b' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d \\ s \\ b \end{bmatrix}$$

$$\sin \theta_{12} = 0.22650 \pm 0.00048,$$

$$\sin \theta_{13} = 0.00361^{+0.00011}_{-0.00009},$$

$$\sin \theta_{23} = 0.04053^{+0.00083}_{-0.00061},$$

$$\delta = 1.196^{+0.045}_{-0.043}$$

violación de CP

Medidas experimentales: **tensión de 3 σ con unitariedad**

VIOLACIÓN DE CP

- X La **violación de CP** en el sector de los **quarks** solo da cuenta de una parte ínfima de la esperada.
- X ¿Hay otras fuentes de violación de CP (**leptones**)?
- X Las interacciones fuertes **no violan CP**: axiones → materia oscura.
- X **CP no es una simetría de la naturaleza**: nuevas partículas e interacciones → nuevas fuentes de violación de CP.

FÍSICA DE NEUTRINOS

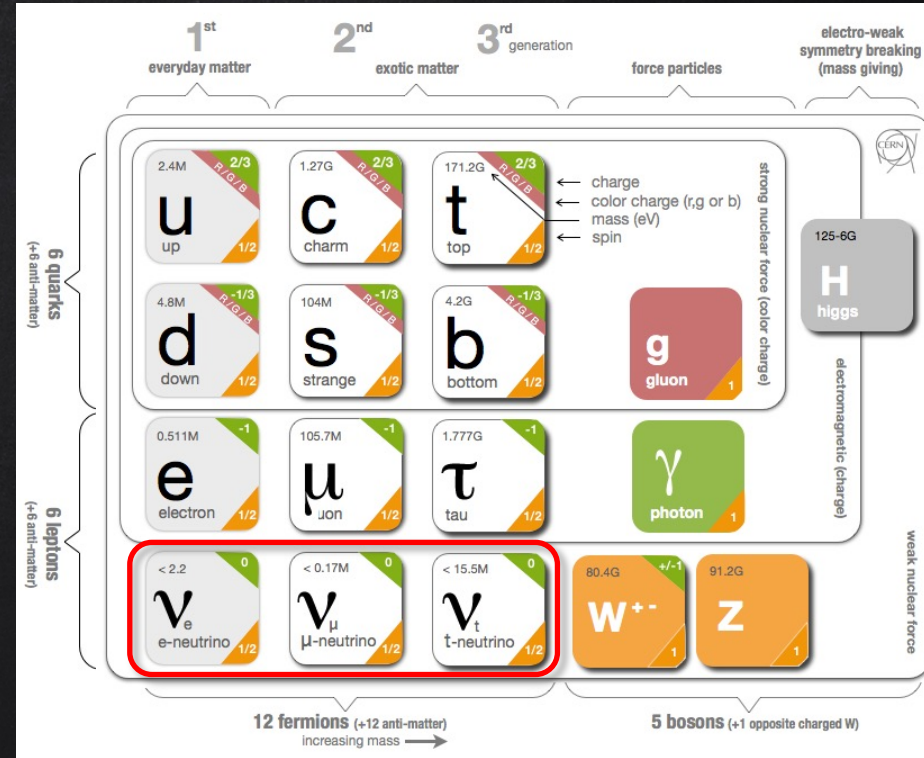
X Los neutrinos son fermiones L ($s = 1/2$) con masa ínfima ($m > 0$) y solo interactúan débilmente ($q = 0$).

X $\nu_R, \bar{\nu}_L$: ~~A~~ o $m_R \gg m_\nu$ o son **estériles**.

X Podría haber un 4º neutrino masivo:
 ν_s : **sterile** (candidato DM)

X Naturaleza de los neutrinos:

$\nu \equiv \bar{\nu}$? \rightarrow **Dirac** o **Majorana** (CPV)



FÍSICA DE NEUTRINOS

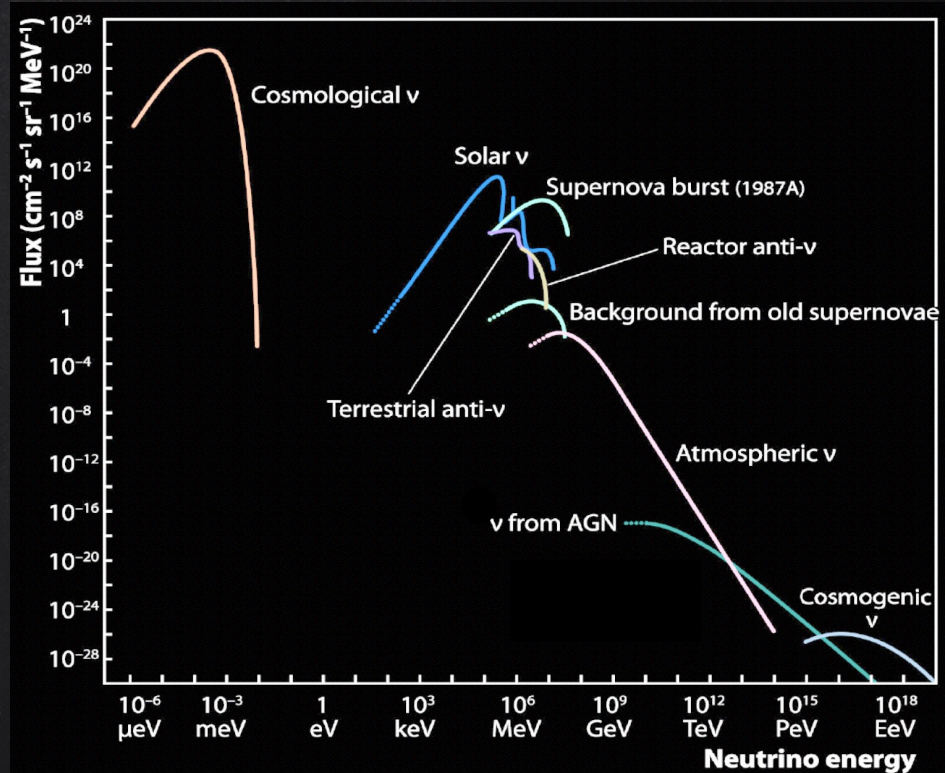
X Los neutrinos son fermiones **L** ($s = 1/2$) con masa ínfima ($m > 0$) y solo interaccionan débilmente ($q = 0$).

X $\nu_R, \bar{\nu}_L$: ~~A~~ o $m_R \gg m_\nu$ o son **estériles**.

X Podría haber un 4º neutrino masivo:
 ν_s : **sterile** (candidato DM)

X Naturaleza de los neutrinos:

¿ $\nu \equiv \bar{\nu}$? → **Dirac** o **Majorana** (CPV)



INTERACCIONES DE NEUTRINOS: MEZCLA

- X La matriz unitaria PMNS (Pontecorvo, Maki, Nakagawa y Sakata, 1962) describe los estados cuánticos de los neutrinos cuando se propagan libremente y en sus interacciones débiles:

$$V_{\text{PMNS}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_{13} & 0 & s_{13}e^{-i\delta_{13}} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13}e^{i\delta_{13}} & 0 & c_{13} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e^{i\alpha_1/2} & 0 & 0 \\ 0 & e^{i\alpha_2/2} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

- X Término adicional que **viola CP**.
- X Las **fases de Majorana**, α_1 y α_2 , son nulas para neutrinos de Dirac.

T2K ha reportado indicios de violación de CP, en fuerte tensión con Nova.

MÁS ALLÁ DEL MODELO ESTÁNDAR: BSM

- X Búsqueda de dimensiones extra
- X Búsqueda de bosones W' y Z'
- X **Supersimetría**
- X Axiones y partículas similares
- X Búsqueda de *compositeness* de quarks y leptones
- X Ruptura dinámica de la simetría electrodébil: implicaciones de H
- X Teorías de Gran Unificación (GUT)
- X Leptoquarks
- X Monopolos magnéticos

PROBLEMAS ABIERTOS DE LA FÍSICA FUNDAMENTAL

- X Naturaleza de la energía oscura: ¿ Λ ?
- X Naturaleza de la materia oscura: ¿ partículas, agujeros negros primordiales ?
- X Violación de CP: 10^{-10}
- X Naturaleza de los neutrinos
- X Jerarquía de masas: m_ν vs. $m_t \rightarrow 10^{11}$
- X Estabilidad cuántica de m_H
- X Estabilidad del vacío cuántico: H
- X Inflación cosmológica
- X Formulación cuántica de la gravedad

CONCLUSIONES

- X Hay dos teorías robustas capaces de describir con gran detalle el universo a escala **subatómica** y **cosmológica**.
- X En las últimas décadas, **multitud de experimentos** han puesto a prueba las predicciones de estas teorías, confirmándolas en la mayoría de los casos.
- X Pese a ello, existen **incógnitas fundamentales** en nuestra comprensión del universo a diferentes escalas.
- X Hay mucho y muy excitante trabajo por delante, tanto **experimental** como **observacional**.