

Interacciones fundamentales

Diego Restrepo¹

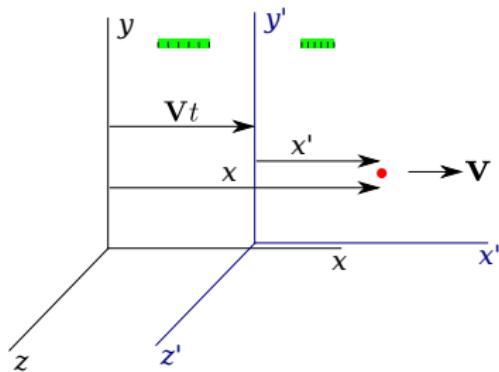
¹Instituto de Física
Universidad de Antioquia



GRUPO DE
FENOMENOLOGÍA DE INTERACCIONES FUNDAMENTALES



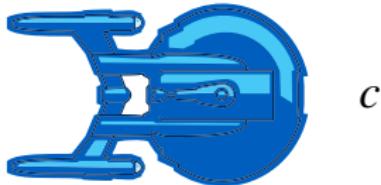
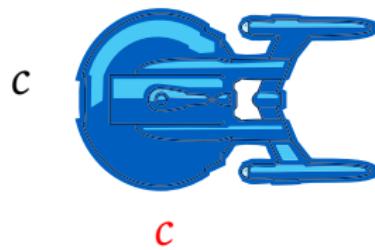
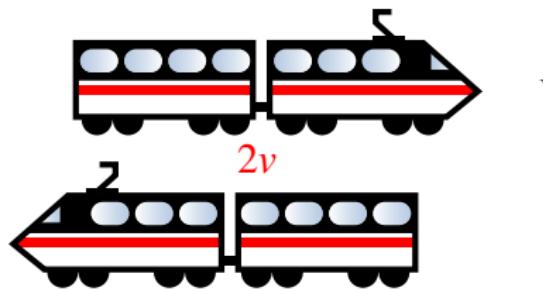
UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA
1803



Principio de relatividad + Homogeneidad + Isotropía
↓
Existencia de velocidad límite

Regla de adición de velocidades

- la velocidad relativa entre dos objetos moviéndose a la velocidad límite, es la velocidad límite.
- Todos los observadores ven moverse un objeto a la velocidad límite si dicho onjeto se mueve a la velocidad límite.



Interacciones

Cambio en la cantidad de movimiento

$$\mathbf{p} = \gamma m \mathbf{v}$$

donde

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

$$c = 299\,792\,458 \text{ ms}^{-1}$$



Teorema de Noether

Por cada **simetría** de la naturaleza hay una **cantidad que se conserva**.



Emmy Noether (1882-1935)

Simetrías externas

Simetría	Cantidad conservada
Las leyes de la física no cambian con el tiempo	Energía
Las leyes de la física son las mismas en todas partes	Cantidad de movimiento.

Por cada simetría **local** hay alguna partícula **sin masa**

El Grupo de Galileo es un grupo de Lie que incluye

- Traslaciones temporales

$$t \rightarrow t + \tau$$

$$\mathbf{x} \rightarrow \mathbf{x}$$

Conservación de la Energía

- Traslaciones espaciales

$$t \rightarrow t$$

$$\mathbf{x} \rightarrow \mathbf{x} + \mathbf{a}$$

Conservación del momento

- Impulsos

$$t \rightarrow t$$

$$\mathbf{x} \rightarrow \mathbf{x} + \mathbf{v}t$$

Movimiento uniforme del centro de masa

- Rotaciones

$$t \rightarrow t$$

$$\mathbf{x} \rightarrow \mathbf{x} + \mathbf{R}\mathbf{x}$$

Conservación del momento angular

\mathbf{R} una matriz ortogonal

El Grupo de Galileo es un grupo de Lie que incluye

- Traslaciones temporales

$$t \rightarrow t + \tau$$

$$\mathbf{x} \rightarrow \mathbf{x}$$

Conservación de la Energía

- Traslaciones espaciales

$$t \rightarrow t$$

$$\mathbf{x} \rightarrow \mathbf{x} + \mathbf{a}$$

Conservación del momento

- Impulsos

$$t \rightarrow t$$

$$\mathbf{x} \rightarrow \mathbf{x} + \mathbf{v}t$$

Movimiento uniforme del centro de masa

- Rotaciones

$$t \rightarrow t$$

$$\mathbf{x} \rightarrow \mathbf{x} + \mathbf{R}\mathbf{x}$$

Conservación del momento angular

\mathbf{R} una matriz ortogonal

Grupos

Considere $x, y, z \in G$

“*”: cualquier regla que combine los objetos en G

- Clausura: $z = x * y \in G$
- Asociatividad: $z * (x * y) = (z * x) * y$
- Identidad: $\exists I \text{ t.q } I * x = x$
- Inverso: $\exists x' \text{ t.q } x * x' = I$

Example

- El conjunto de enteros bajo la adición

Grupos de Lie

Informalmente es un grupo de simetrías donde las simetrías son continuas
Formalmente, un Grupo de Lie es un Grupo que también es un espacio matemático que localmente es lo suficientemente general a un espacio euclíadiano como para permitir hacer cálculo diferencial.

Example

Conjunto de números reales bajo la adición

Grupo de Lorentz

- Es un grupo de Lie que incluye además de las traslaciones espaciales, traslaciones temporales y rotaciones a las transformaciones de Lorentz. Es el único grupo compatible con el principio de relatividad que no genera paradojas (conocidas)
- Las ecuaciones de Maxwell nacieron invarias bajo transformaciones de Lorentz.

Libertad gauge

- Los campos electromagnéticos también son invariantes bajo transformaciones gauge:
Si $A(x)$ representa la energía potencial del campo de fuerza en cada punto x en el espacio. Si uno cambia $A(x)$ por otra función en la forma dictada por la transformación gauge, esta nueva función sigue describiendo el *mismo* campo de fuerza electromagnético.
La libertad para escoger la función de energía potencial de un campo se llama libertad gauge.

Qué ley de conservación esta asociada a esta simetría?

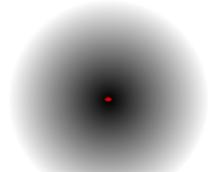
Campos

<https://www.youtube.com/watch?v=GhtAwQXVsuk>

Radiación débil

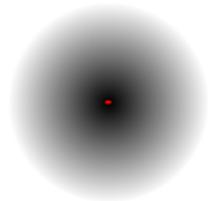
600 millones de millones de neutrinos provenientes del sol atraviesan cada segundo nuestro cuerpo, cuyo contenido en Postasio 40 emite 10000 millones de neutrinos cada segundo.

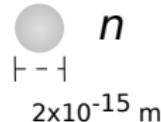
H



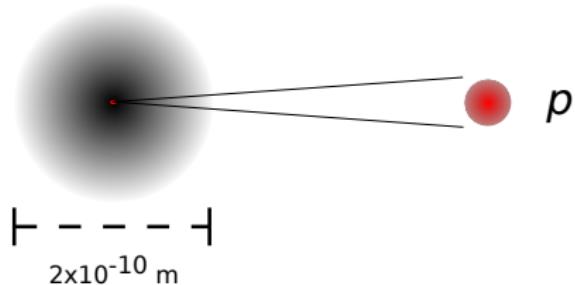
| - - - |
 2×10^{-10} m

He



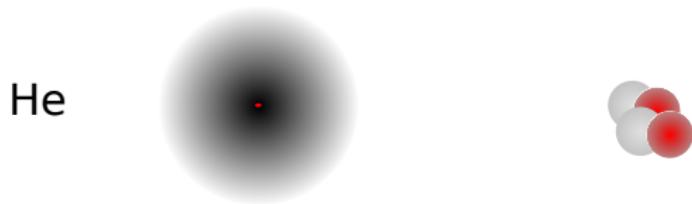
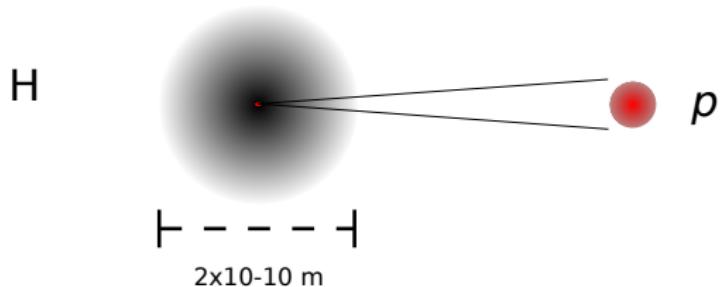
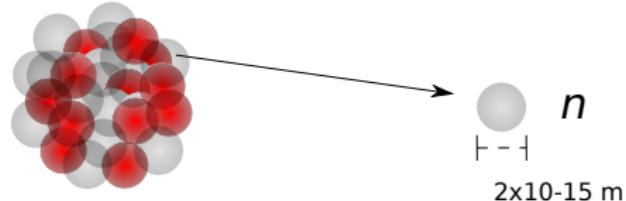


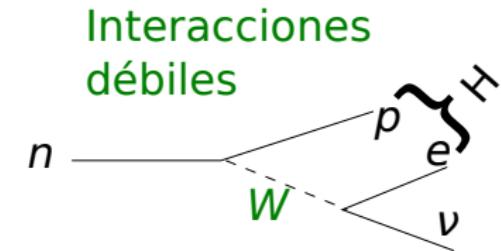
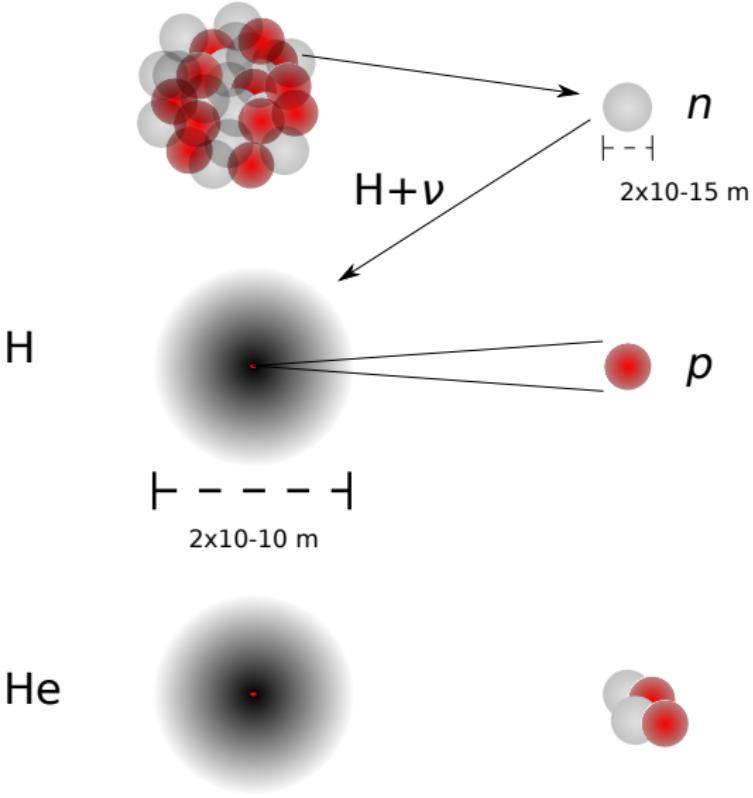
H



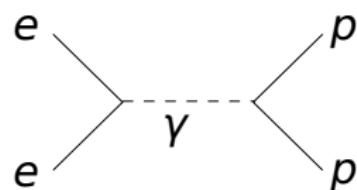
He



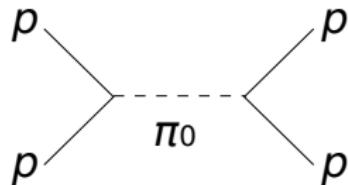


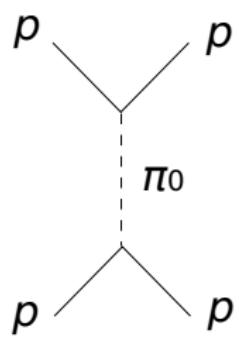


Interacciones electromagnéticas

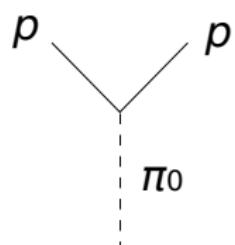


Interacciones nucleares

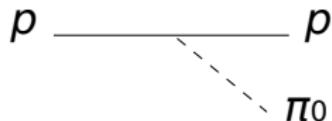




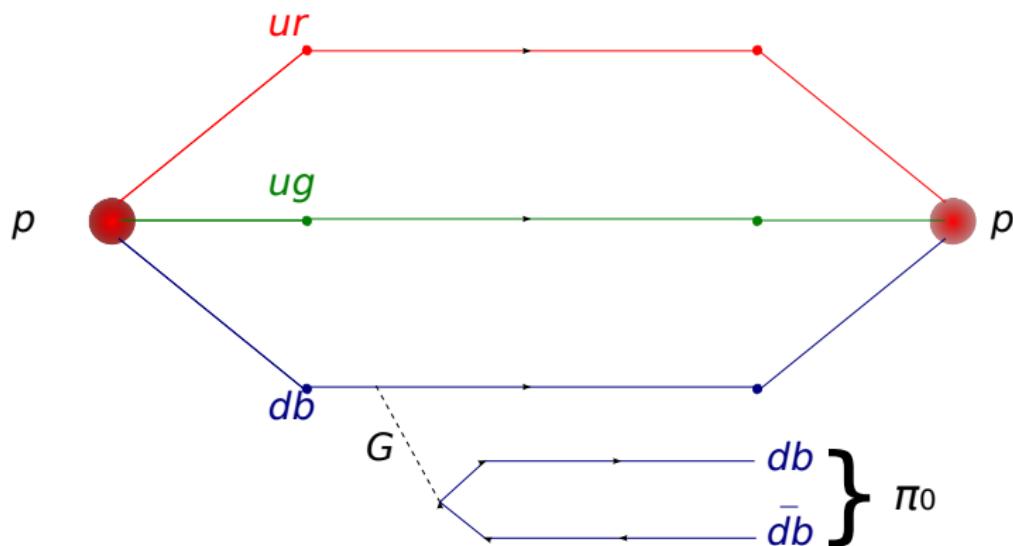
Interacciones
nucleares



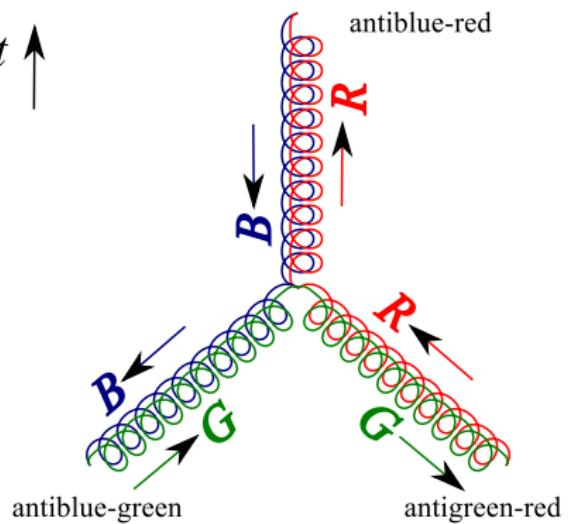
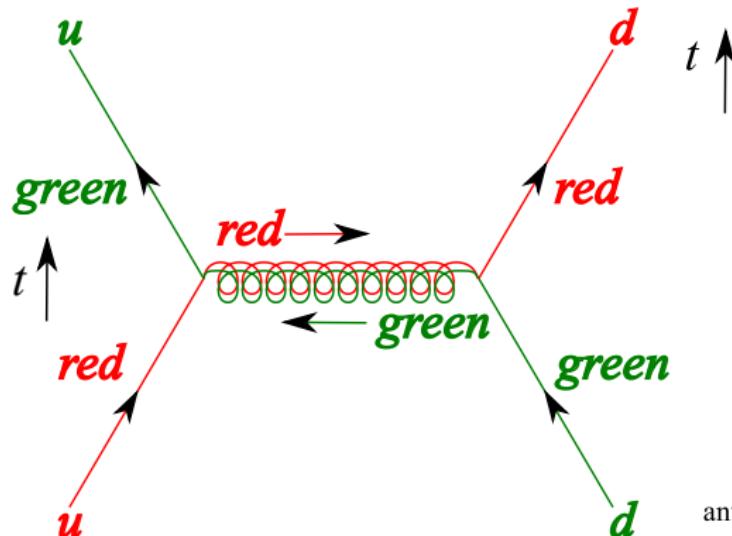
Interacciones
nucleares



Interacciones fuertes



$$\begin{pmatrix} r\bar{r} & r\bar{b} & r\bar{g} \\ b\bar{r} & b\bar{b} & b\bar{g} \\ g\bar{r} & g\bar{b} & g\bar{g} \end{pmatrix}, \quad \text{with} \quad r\bar{r} + b\bar{b} + g\bar{g} = 0$$



Conservación de la carga eléctrica

electrón

Conservación de la carga eléctrica

electrón

Conservación de la carga eléctrica

electrón

Conservación de la carga eléctrica

\xrightarrow{c} electrón
fotón sin masa

Números complejos

Números imaginarios: $i^2 = -1$; $(ib)^2 = -b$

Número complejo: $z = a + ib$, con a y b reales

$$|z| = \sqrt{a^2 + b^2}$$

Fórmula de euler: $z = |z|e^{i\theta} = |z|(\cos\theta + i\sin\theta)$

$$a = |z|\cos\theta$$

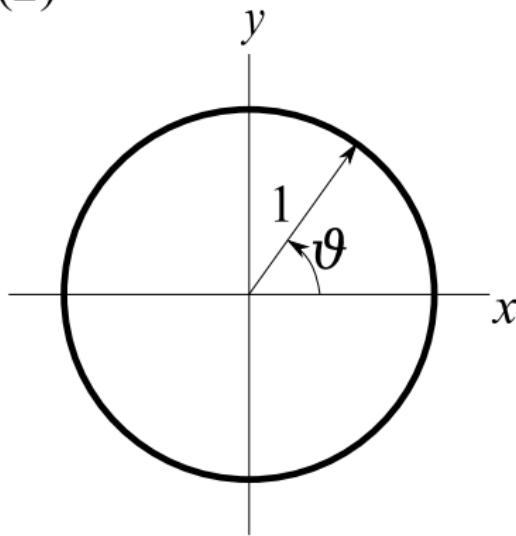
$$b = |z|\sin\theta$$

Cambio de fase: $z \rightarrow z' = |z|e^{i(\theta+\alpha)} = e^{i\alpha}|z|e^{i\theta} = e^{i\alpha}z$

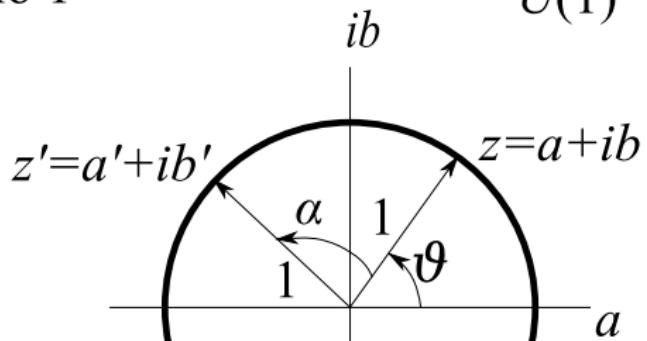
t.q: $|z'| = |z|$

círculo de
radio 1

$R(2)$



$U(1)$



$$\sqrt{x^2 + y^2} = 1$$

$$|z| = \sqrt{a^2 + b^2} = 1$$

La función de onda

La escogencia de la fase de la función de onda es arbitraria:

$$-\frac{\hbar^2}{8\pi^2 m} \frac{d^2}{dx^2} \psi(x) = E\psi(x)$$

$$|\psi(x)|^2 = 1$$

Invarianza bajo $U(1)$, $\alpha = \text{constante}$:

$$\psi(x) \rightarrow e^{i\alpha} \psi(x)$$

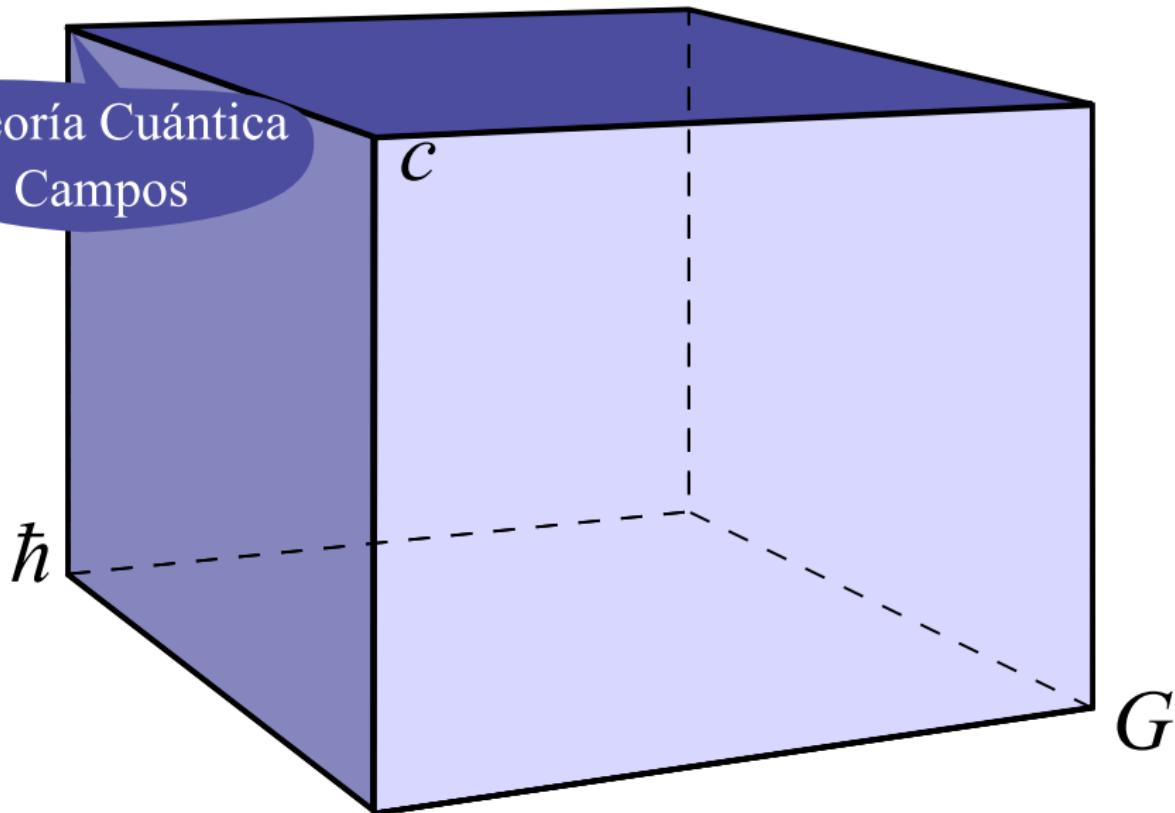
La cantidad conservada es la probabilidad.

$$\psi(x) = \text{probabilidad} \times \exp(ix \cdot p)$$

y para $x = (t, \mathbf{x})$ homogéneo:

\Rightarrow La energía y el momentum en mecánica cuántica

Teoría Cuántica
de Campos



Como se concibe usualmente, sin embargo, esta arbitrariedad esta sujeta a las siguientes limitaciones: una vez se escoge [la fase de la función de onda] en un punto del espacio tiempo, entonces ya no se tiene la libertad de hacer alguna escogencia en otros puntos del espacio-tiempo.

Parece ser que esto no es consistente con el concepto de campo localizado que subyace a las teorías física usuales. En el presente artículo deseamos explorar la posibilidad de requerir que todas las interacciones sean invariantes bajo [cambios de fase] independientes en todos los puntos del espacio tiempo

Yang-Mills, *Physical Review*, 1954

Cambios locales en la función de onda: $\psi(x) \rightarrow e^{\alpha(x)}\psi(x)$

$$-\frac{\hbar^2}{8\pi^2 m} \frac{d^2}{dx^2} \psi(x) = E\psi(x)$$

Cada vez que la función de onda cambia localmente, el resultado de la operación derivada cambia, introduciendo algún error que causa que la función de onda no siga satisfaciendo la ecuación de onda.

Yang y Mills entonces propusieron una trampa: adicionar un nuevo término que cancelara el efecto de la operación de rata de cambio:

$$qA(x)\psi(x)$$

Cualquier daño que el término de rata de cambio en la ecuación de onda cause cuando la fase de la función de onda es cambiada localmente, $A(x)$ debe ser lo que sea para reparar el daño.

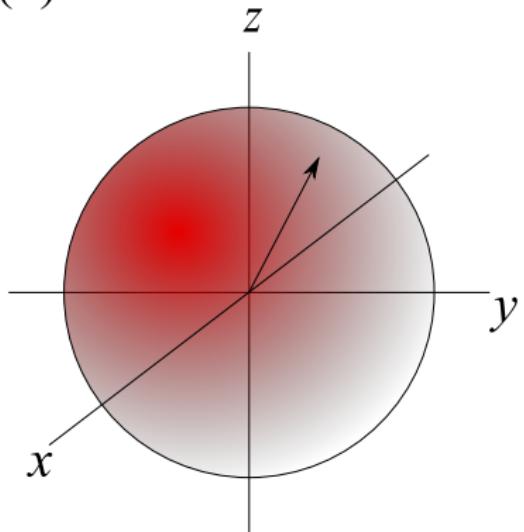
El efecto neto es que la ecuación de onda cambia, y la nueva ecuación debe estar describiendo una situación física diferente a la de la función de onda original.

El cambio requerido en $A(x)$ es justo el tipo de cambio que deja el campo electromagnético invariante.

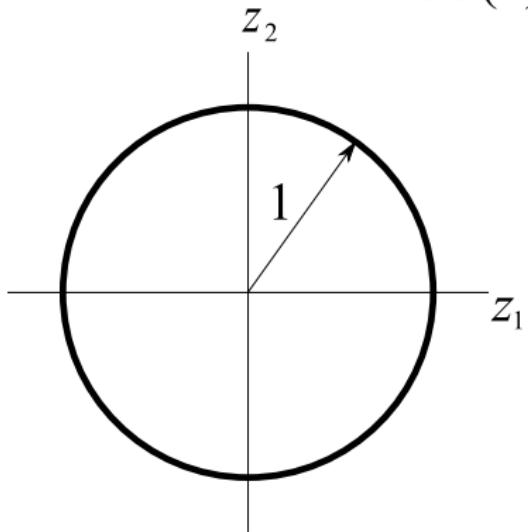
- La nueva situación física que surge de la nueva ecuación de onda que es invariante bajo cambios locales de fase es la que combina satisfactoriamente la mecánica cuántica con el electromagnetismo:
- Para compensar los cambios locales de fase, debemos cambiar $A(x)$ en una forma particular, dependiendo en como se cambio la fase a través del espacio tiempo. Los cambios en $A(x)$ no tienen significado físico.
- El requerimiento de que la función de onda sea invariante bajo cambios locales de fase ha necesitado la introducción del electromagnetismo.

3 generadores

$R(3)$



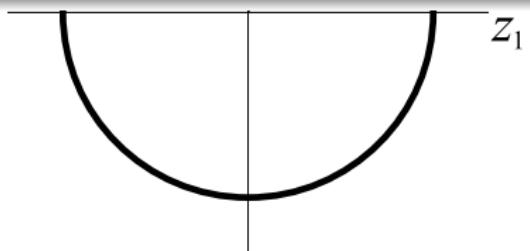
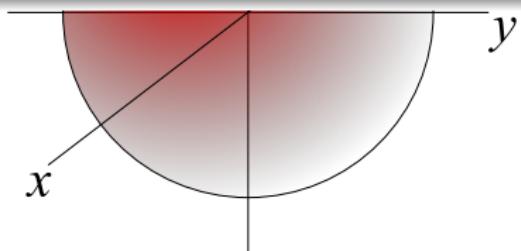
$SU(2)$



Isospin fuerte

$$p \rightarrow \psi_1(x)$$

$$n \rightarrow \psi_2(x)$$



Isospin fuerte

$$p \rightarrow \psi_1(x)$$

$$n \rightarrow \psi_2(x)$$



Isospin débil

$$\nu \rightarrow \psi_1(x)$$

$$e \rightarrow \psi_2(x)$$

$SU(3)$

Considere el quark up: u

$$u_1 = u_{\text{red}} \rightarrow \psi_1(x)$$

$$u_2 = u_{\text{green}} \rightarrow \psi_2(x)$$

$$u_3 = u_{\text{blue}} \rightarrow \psi_3(x)$$

Conservación del isospín débil

electrón \longleftrightarrow neutrino

Conservación del isospín débil

Conservación del isospín débil

electrón(L) \longleftrightarrow neutrino
electrón sin masa

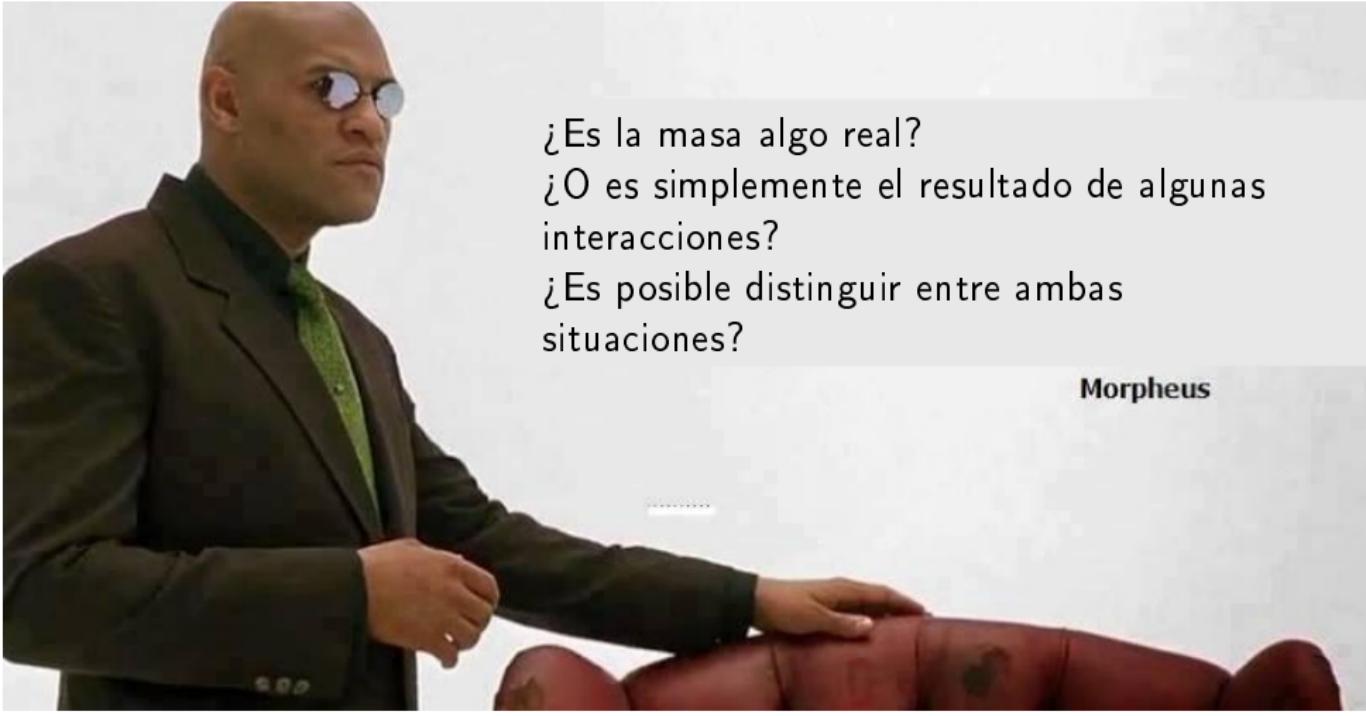
Conservación del isospín débil

electrón(L) \longleftrightarrow neutrino

electrón sin masa

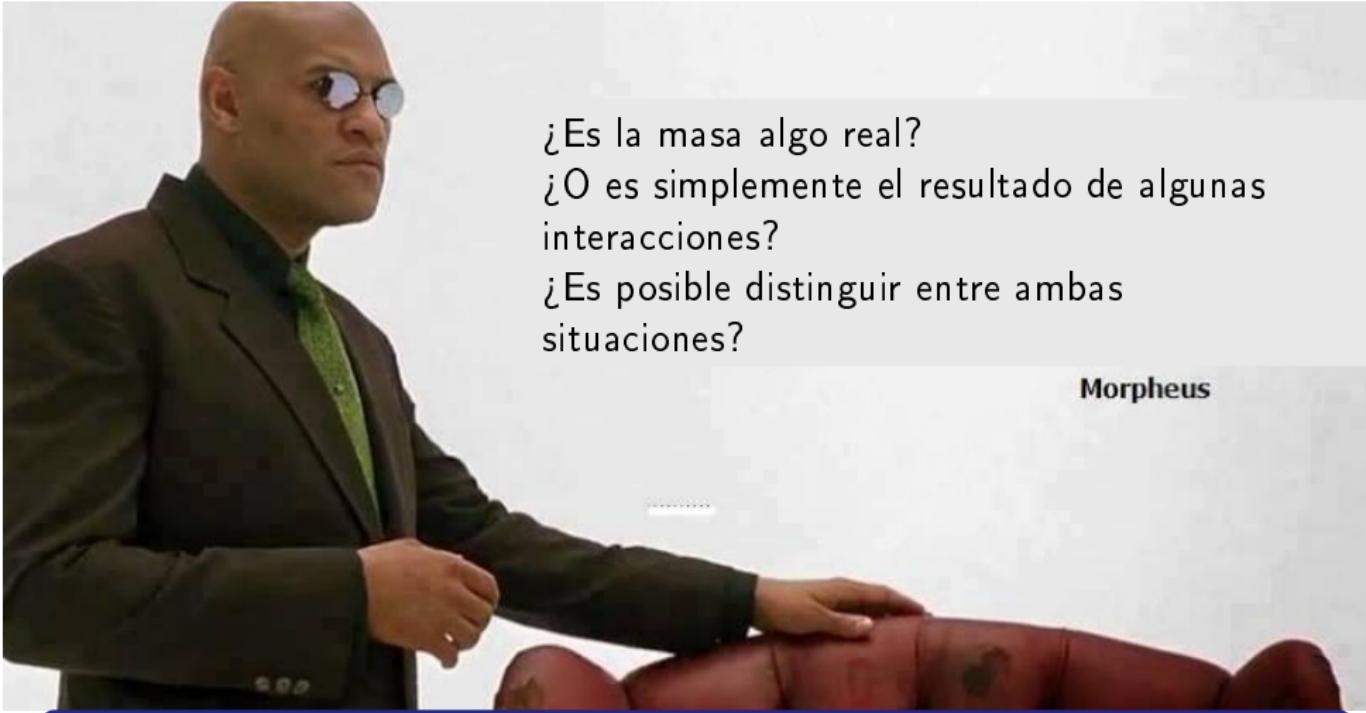
quark u(L) \longleftrightarrow quark d(L)

quark sin masa



¿Es la masa algo real?
¿O es simplemente el resultado de algunas interacciones?
¿Es posible distinguir entre ambas situaciones?

Morpheus



¿Es la masa algo real?
¿O es simplemente el resultado de algunas interacciones?
¿Es posible distinguir entre ambas situaciones?

Morpheus

Respuesta

Hasta ahora toda la masa parece ser pura apariencia

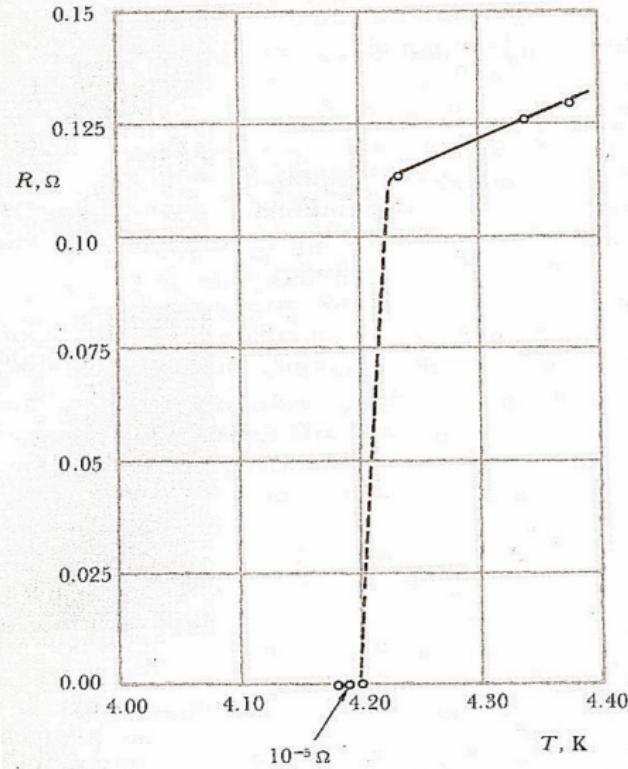
Resurgimiento del éter

In 1911

H. Kamerlingh-Onnes
midió la resistencia
del mercurio a bajas
temperaturas y
encontró que está se
desvanecía por
debajo de cierta
temperatura crítica.

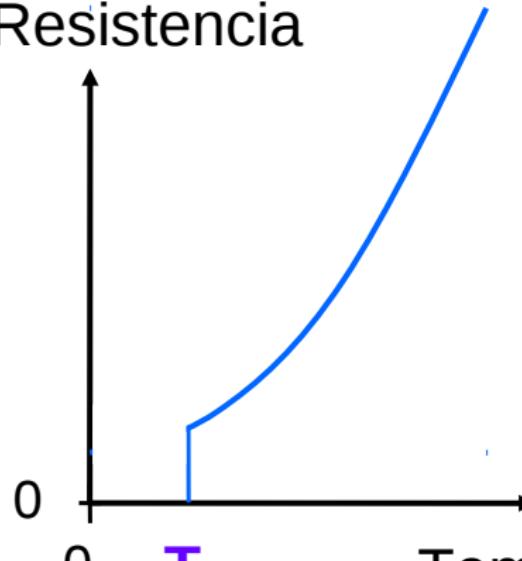


Superconductividad



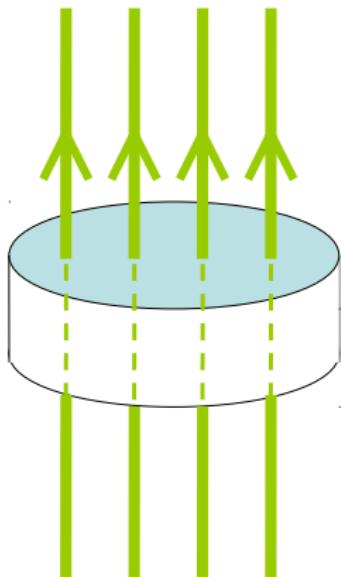
Superconductivity

Resistencia

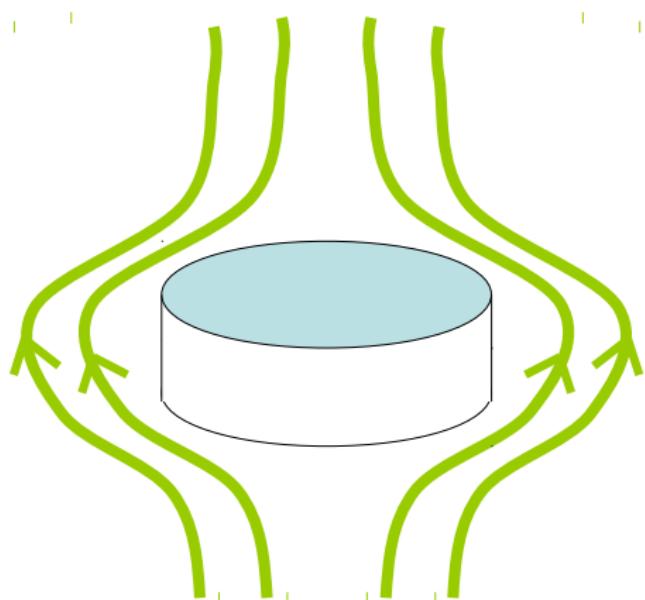


Material	T_c (K)
Al	1.2
Hg	4.2
Pb	1.4
Sn	3.7
$\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$	90 !

El efecto Meissner



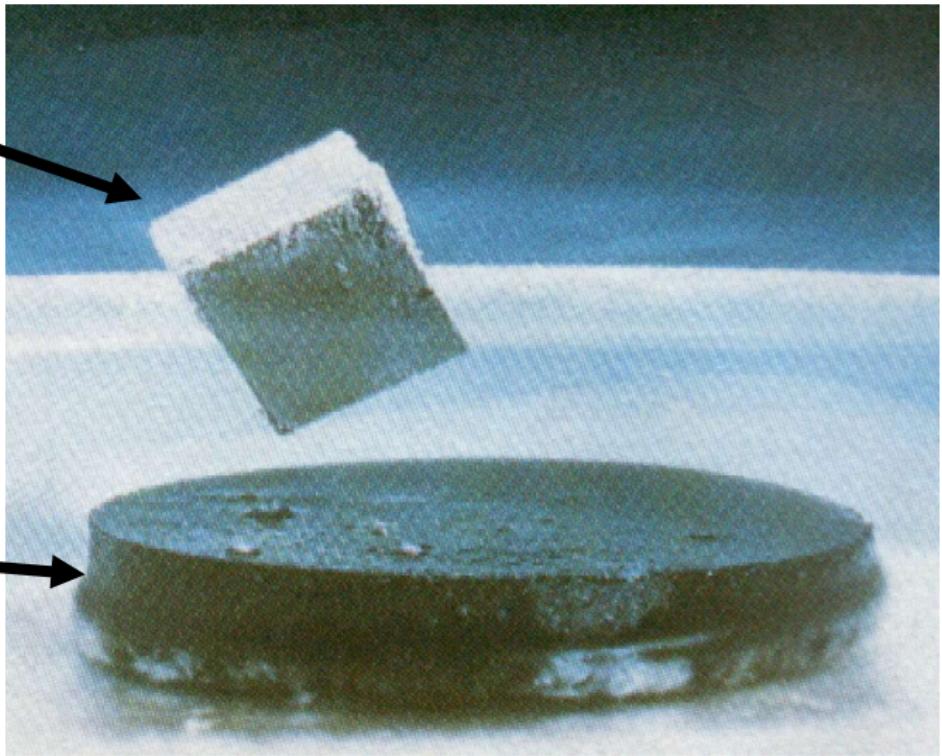
$T > T_c$
Estado Normal



$T < T_c$
Estado
superconductor

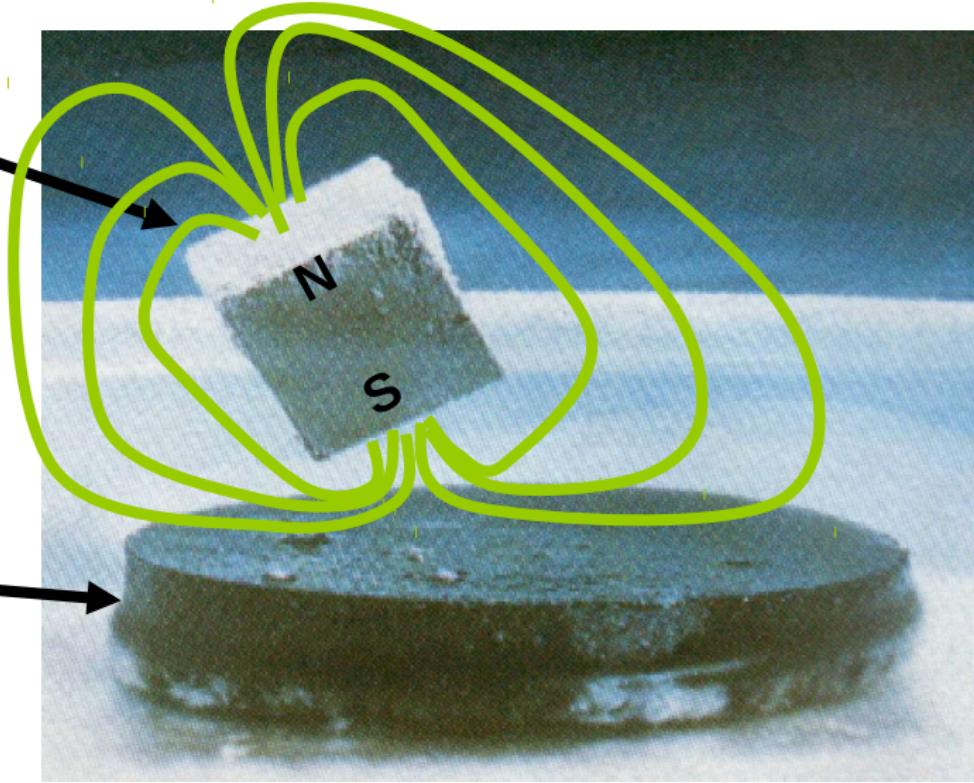
The Meissner Effect

Magneto



The Meissner Effect

Magneto



La superconductividad fue un gran misterio desde el momento de su descubrimiento (1911).

La dilucidación de sus secretos tuvo que esperar el descubrimiento de la mecánica cuántica (~1928).

Aún así, tomó ~30 años más para llegar a la respuesta definitiva...

Tipos de partículas

Un sistema cuántico tiene niveles de energía discretos que pueden ser ocupados secuencialmente dependiendo de si las partículas son:

fermiones

espín, en unidades semienteras de la constante de Planck reducida, denotada por \hbar

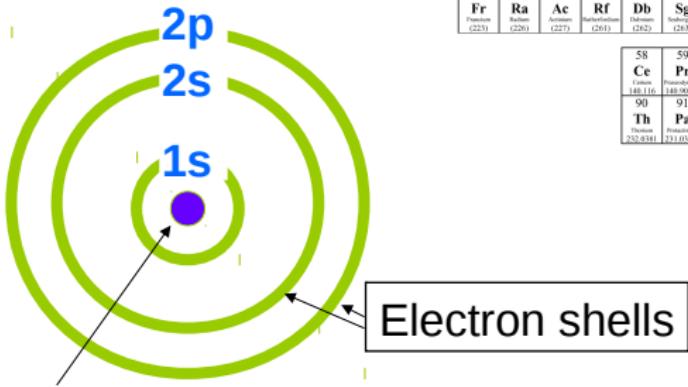
bosones

espín en unidades enteras de \hbar .^a

^aEl “espín” de la tierra es del orden de $10^{67}\hbar$.

Principio de Exclusión y la Tabla Periódica

El átomo

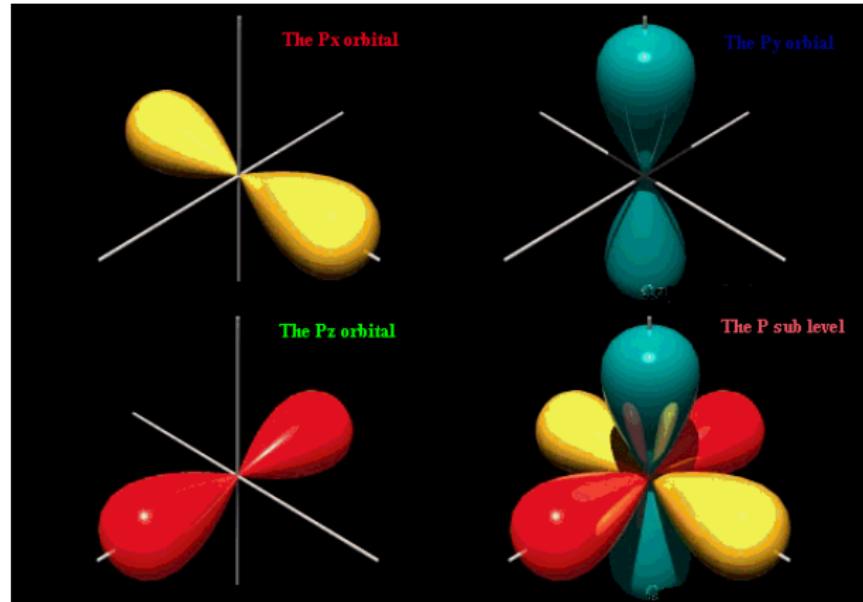


Nucleus (Protons & Neutrons)

H	Hydrogen	He	Helium	Li	Boron	C	N	O	F	Ne	Na	Mg	Aluminum	Si	P	S	Cl	Ar	Neon																
1 H 1.00794	2 He 4.00260	3 Li 6.941	4 Be 9.012182	5 B 10.811	6 C 12.0107	7 N 14.0094	8 O 16.0000	9 F 19.998403	10 Ne 20.1797	11 Na 22.98770	12 Mg 24.930	13 Al 26.991535	14 Si 28.0555	15 P 30.973761	16 S 32.066	17 Cl 35.4527	18 Ar 39.948	19 K 39.983	20 Ca 40.078	21 Sc 44.955910	22 Ti 47.887	23 V 50.9415	24 Cr 51.9961	25 Mn 54.030049	26 Fe 55.845	27 Co 58.93208	28 Ni 58.6934	29 Cu 61.546	30 Zn 65.39	31 Ga 68.723	32 Ge 72.61	33 Br 74.951160	34 Kr 78.06	35 Sr 79.984	36 Ba 83.80
37 Rb 84.998	38 Sr 87.62	39 Y 87.92	40 Zr 91.21	41 Nb 92.906	42 Mo 95.94	43 Tc 97.907	44 Ru 101.07	45 Rh 102.905	46 Pd 103.902	47 Ag 107.892	48 Cd 112.411	49 In 114.8115	50 Sn 118.710	51 Sb 120.6447	52 Te 122.8000	53 I 126.9329	54 Xe 131.922																		
55 Cs 130.90545	56 Sr 132.90545	57 Ba 133.90545	58 La 134.90545	59 Hf 136.90545	60 Ta 138.90545	61 W 138.90545	62 Re 140.90545	63 Os 141.90545	64 Ir 143.90545	65 Pt 145.90545	66 Au 146.90545	67 Hg 148.90545	68 Tl 150.90545	69 Bi 152.90545	70 Pb 157.90545	71 At (209)	72 Rn (210)																		
87 Fr (223)	88 (220)	89 (221)	90 (222)	91 (223)	92 (224)	93 (225)	94 (226)	95 (227)	96 (228)	97 (229)	98 (230)	99 (231)	100 (232)	101 (233)	102 (234)	103 (235)	104 (236)																		
58 Ce 140.9341	59 Pr 140.93765	60 Nd 141.93765	61 Pm 142.93765	62 Sm 144.93765	63 Europium 145.93765	64 Gadolinium 147.93765	65 Dysprosium 148.93765	66 Holmium 149.93765	67 Dysprosium 151.9464	68 Thulium 152.9464	69 Dysprosium 153.95735	70 Ytterbium 154.95735	71 Dysprosium 155.96735	72 Yttrium 156.96735	73 Dysprosium 157.97735	74 Yttrium 158.97735	75 Dysprosium 159.98735	76 Yttrium 160.98735																	
90 Th 270.9341	91 Pa 271.03588	92 U 278.0269	93 Np (277)	94 Pu (278)	95 Am (279)	96 Cm (280)	97 Bk (281)	98 Cf (282)	99 Es (283)	100 Fm (284)	101 Md (285)	102 No (286)	103 Lr (287)	104 Ts (288)	105 Yb (289)	106 Lu (290)																			

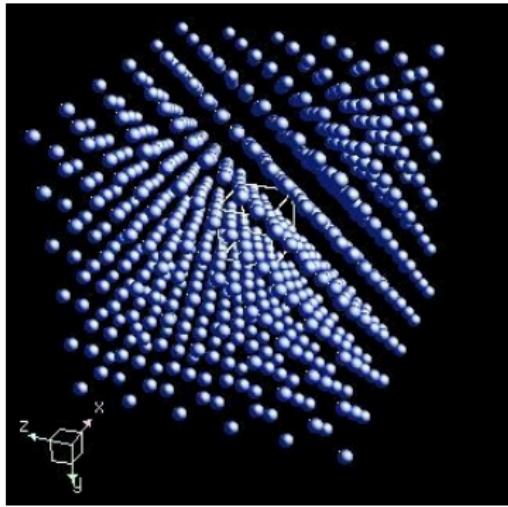
Principio de exclusión para fermiones

Tres o más electrónes no pueden ocupar el mismo estado

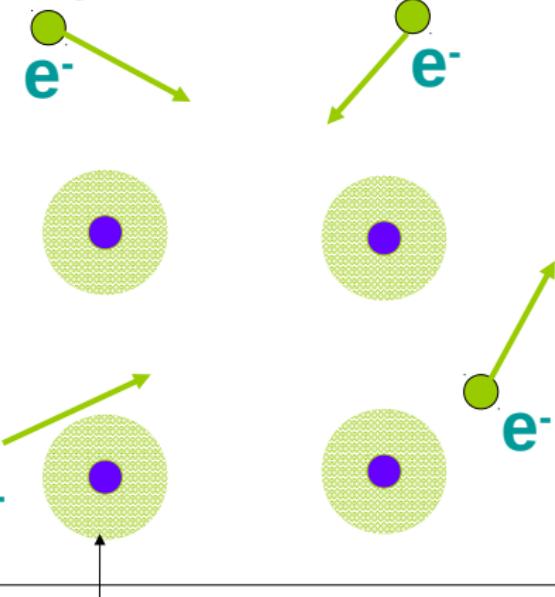


Metal de cobre

Red Cristalina



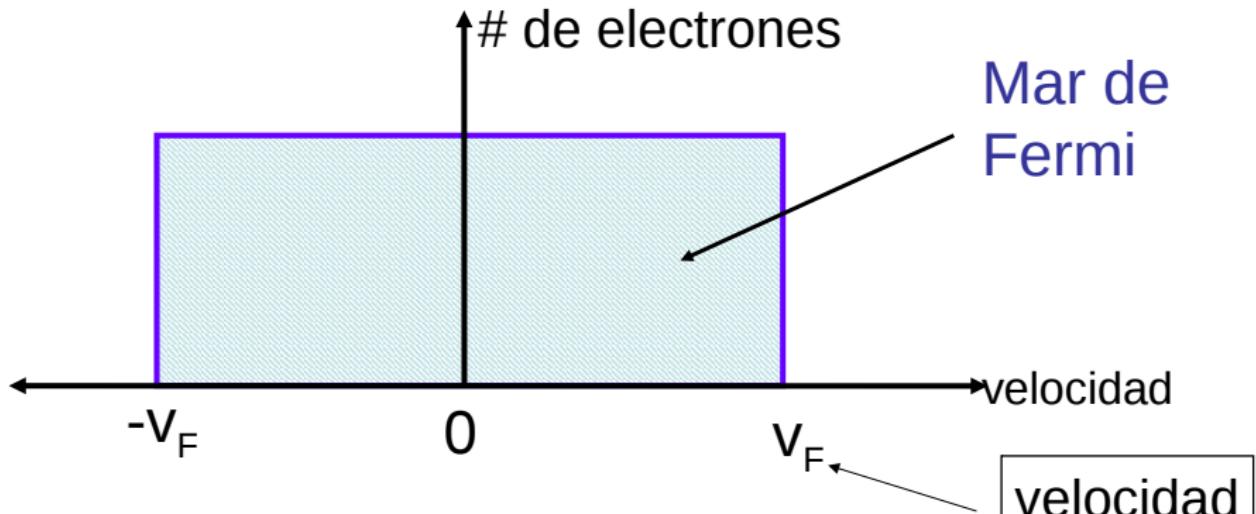
Electrones de conducción



Redes de iones: electrones de valencia (carga $-e$) + átomos (charge $+e$).

Mar de Fermi de electrones

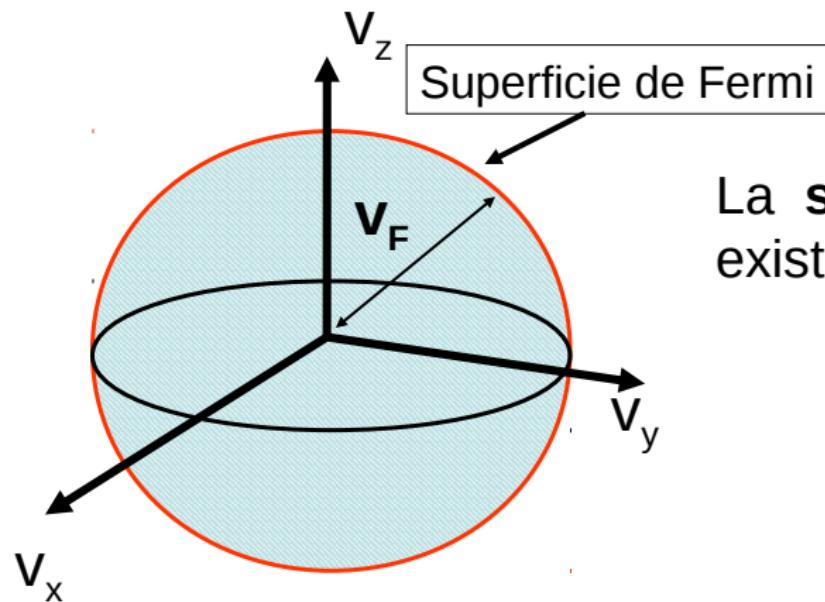
Debido al principio de exclusión de Pauli, dos electrones de valencia no se pueden mover a la misma velocidad.



Tipicamente v_F es $\sim 1/100$ la velocidad de luz !

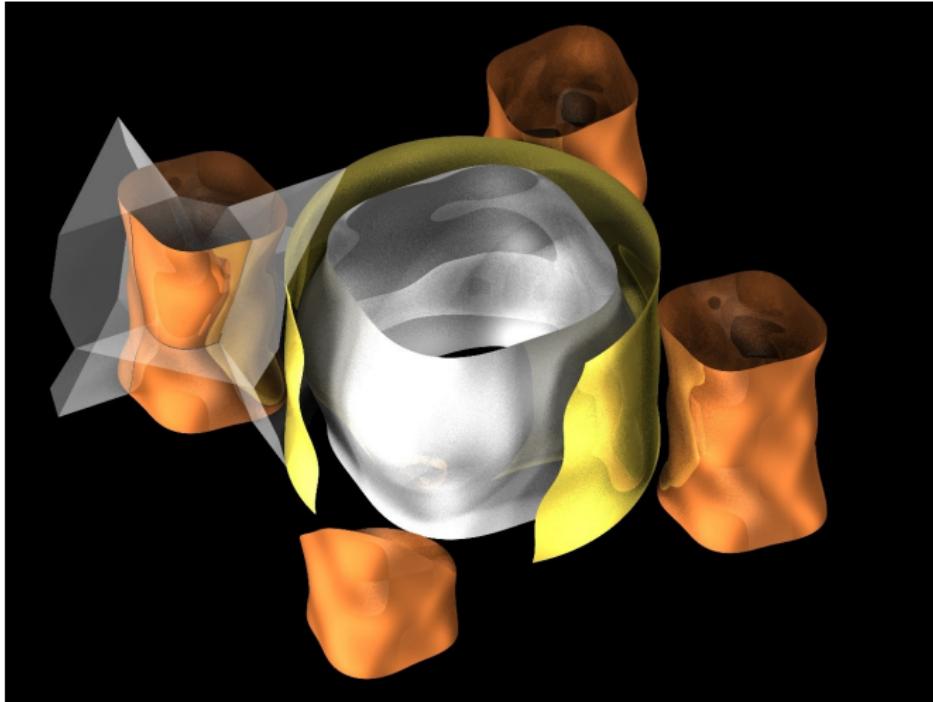
velocidad
De Fermi

Para un mar tridimensional de electrónes, existe una **esfera de Fermi**.



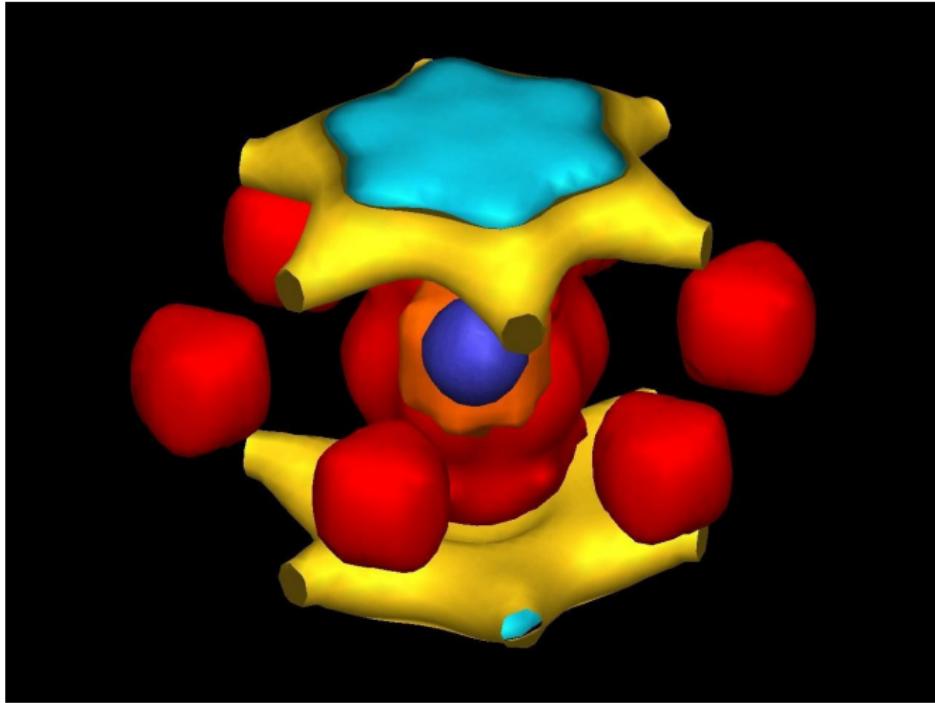
La **superficie de Fermi** existe en metales reales.

Some Fermi Surfaces



<http://www-qm.phy.cam.ac.uk/FSgallery.php>

Some Fermi Surfaces



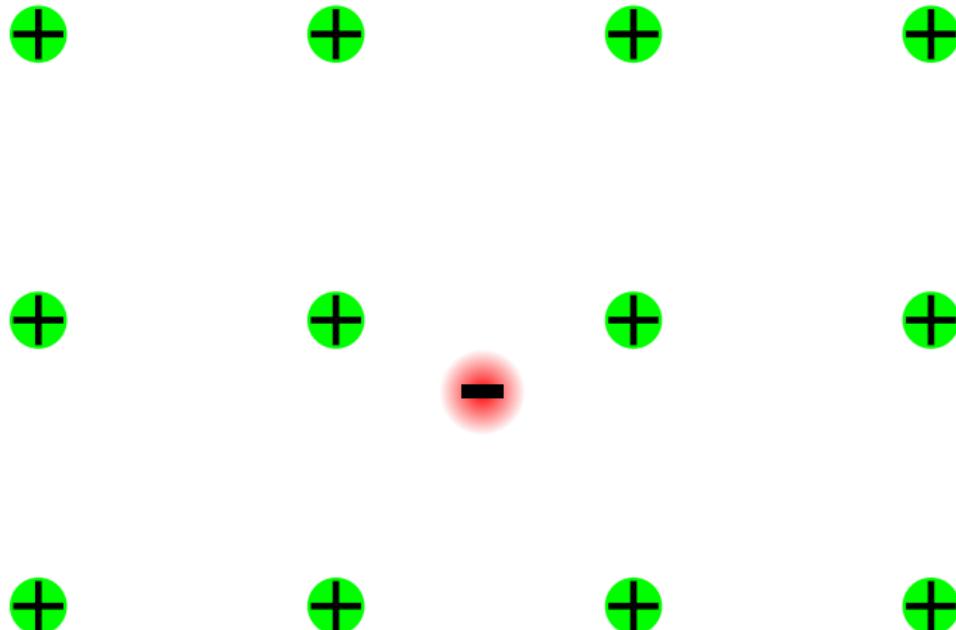
UPt₃

<http://www-qm.phy.cam.ac.uk/FSgallery.php>

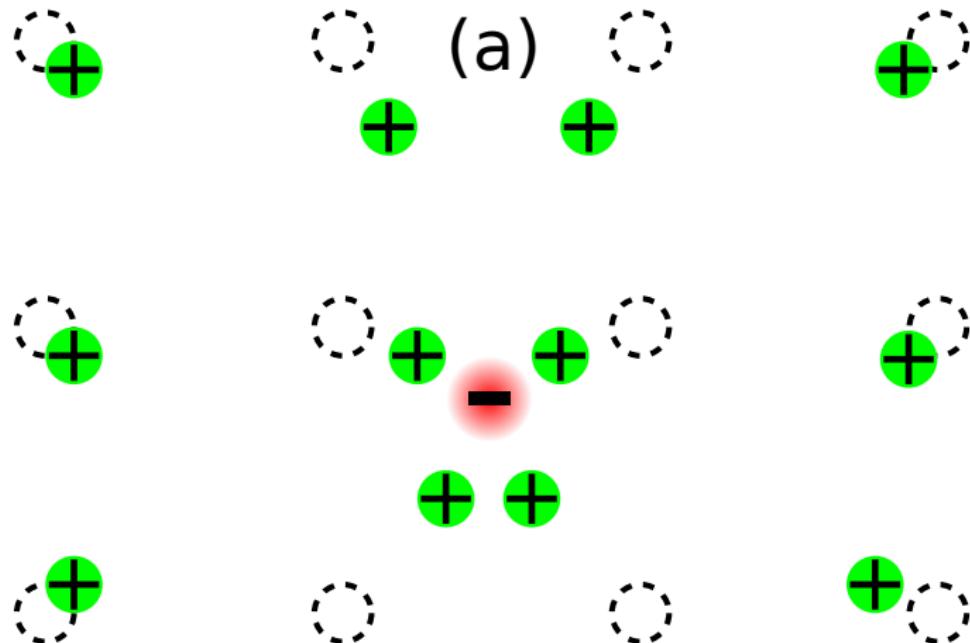
Par de Cooper



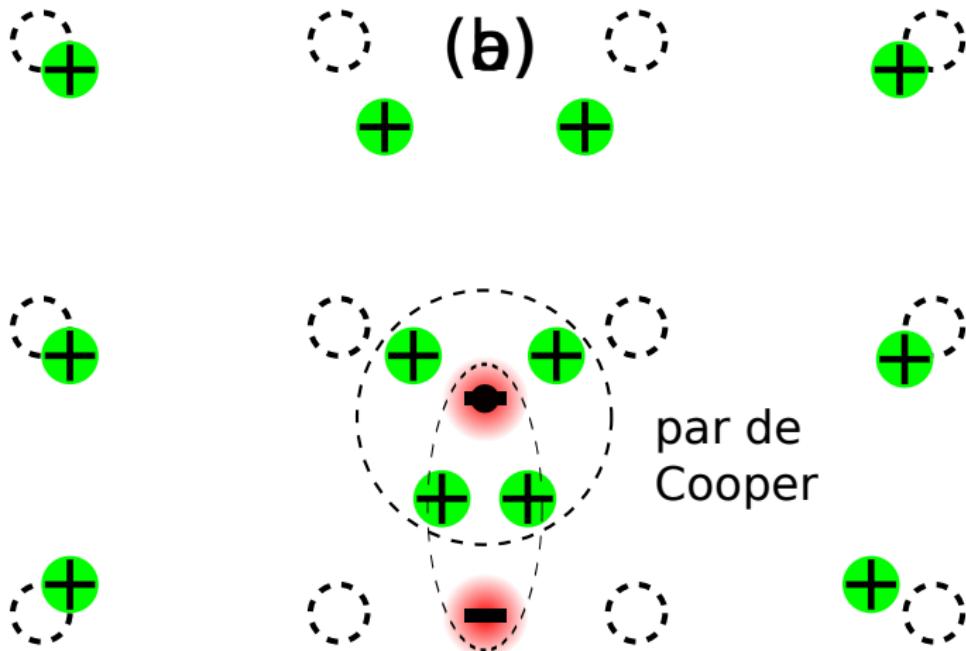
Par de Cooper



Par de Cooper



Par de Cooper

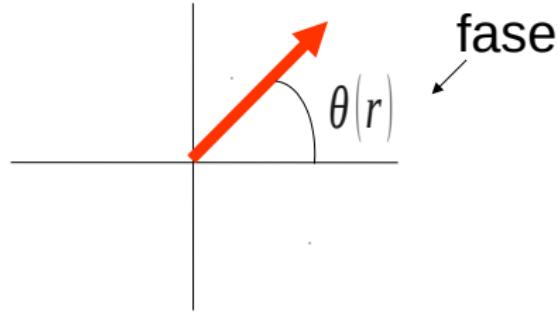


Los Pares de electrones no necesitan satisfacer el principio de exclusión. Los pares de Cooper se pueden “condensar” en un sólo estado cuántico.

Electrodinámica escalar

Este estado “condensado” se describe por una “función de onda macroscópica” que representaremos usando una flecha naranja.

$$\Phi(r) = |\Phi(r)| e^{i\theta(r)}$$



Ruptura espontánea de la simetría

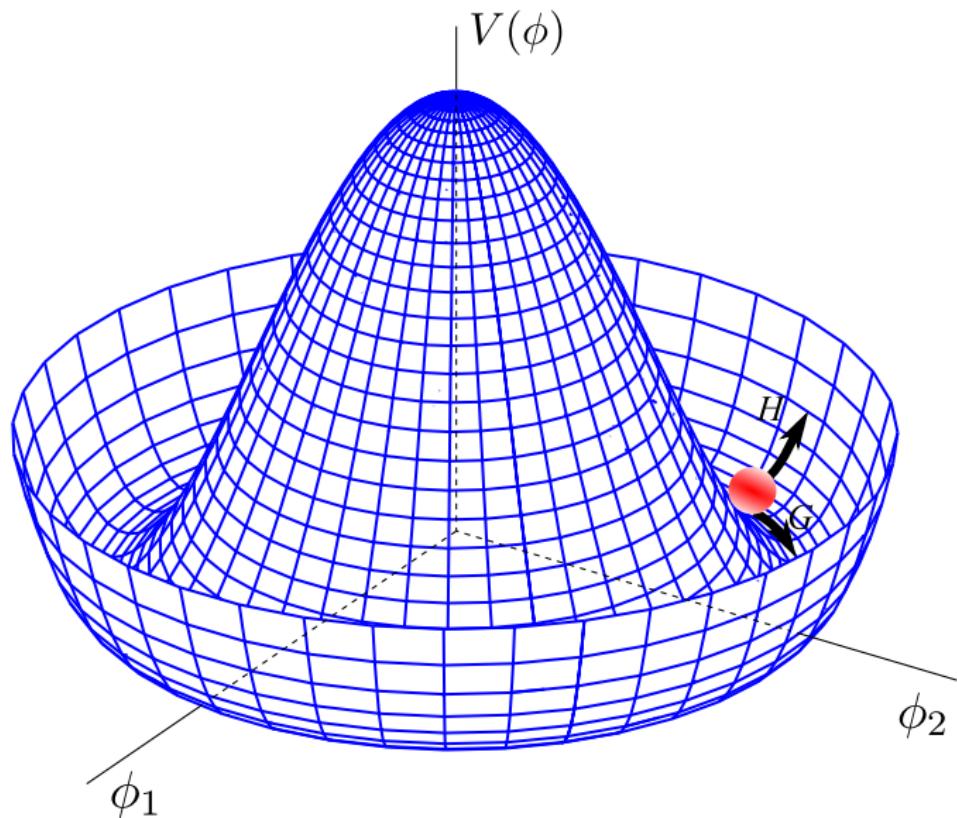
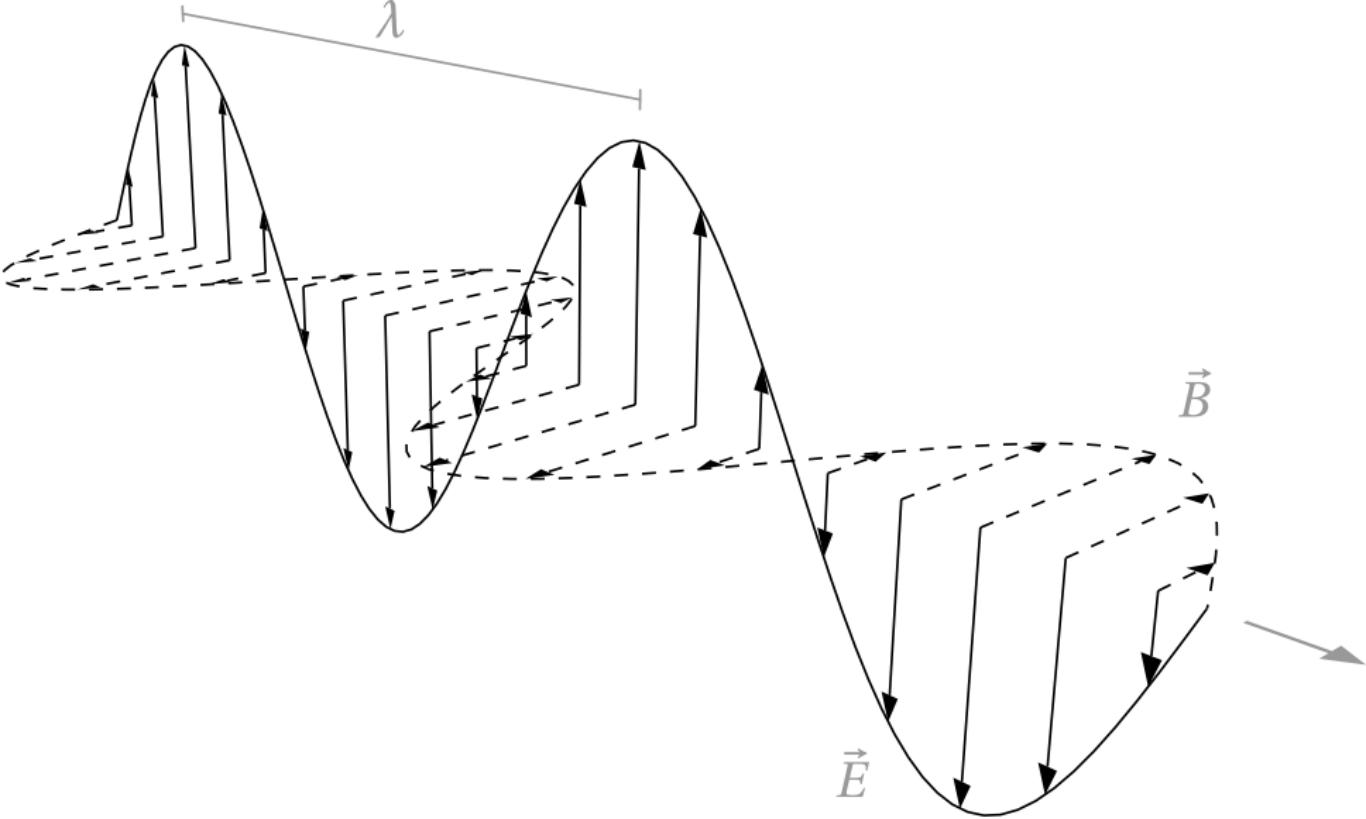
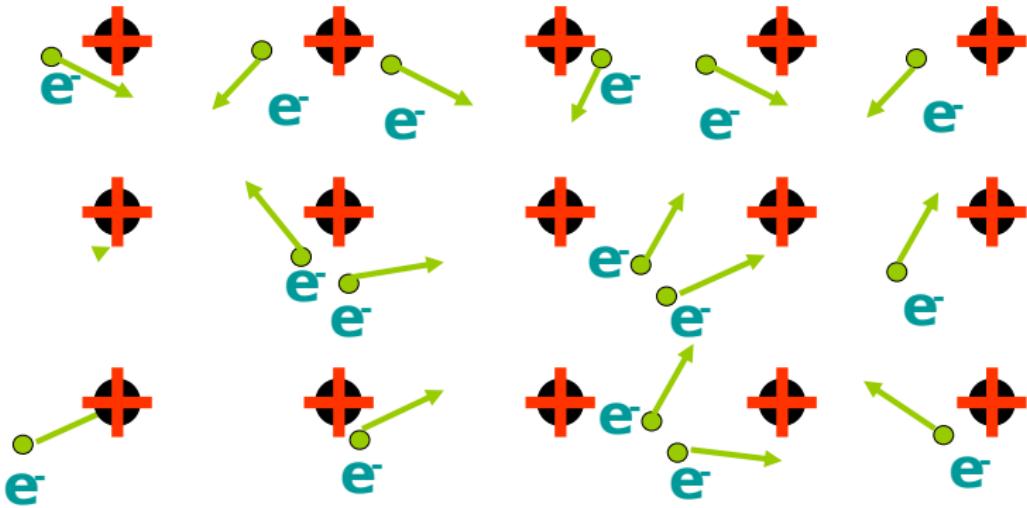


Figura: Potencial para un campo escalar complejo



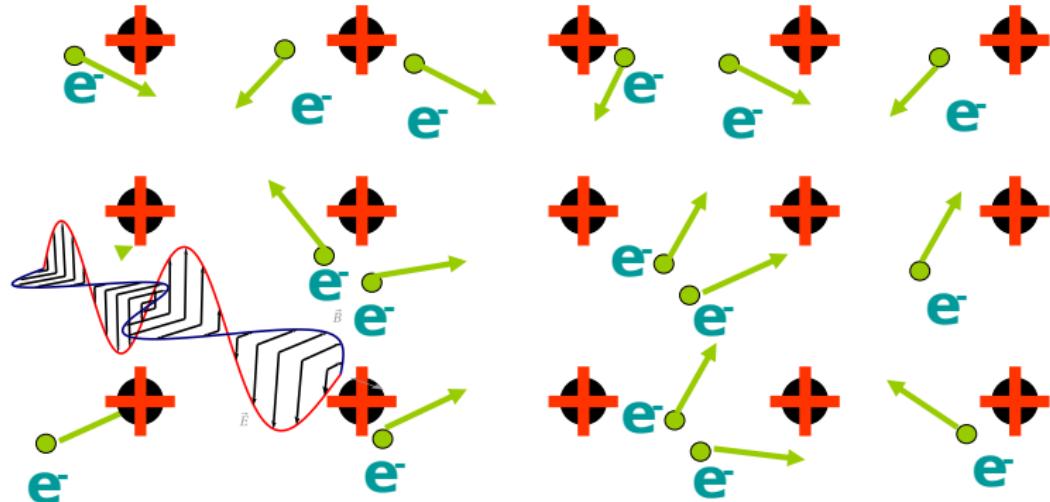
Metal Normal



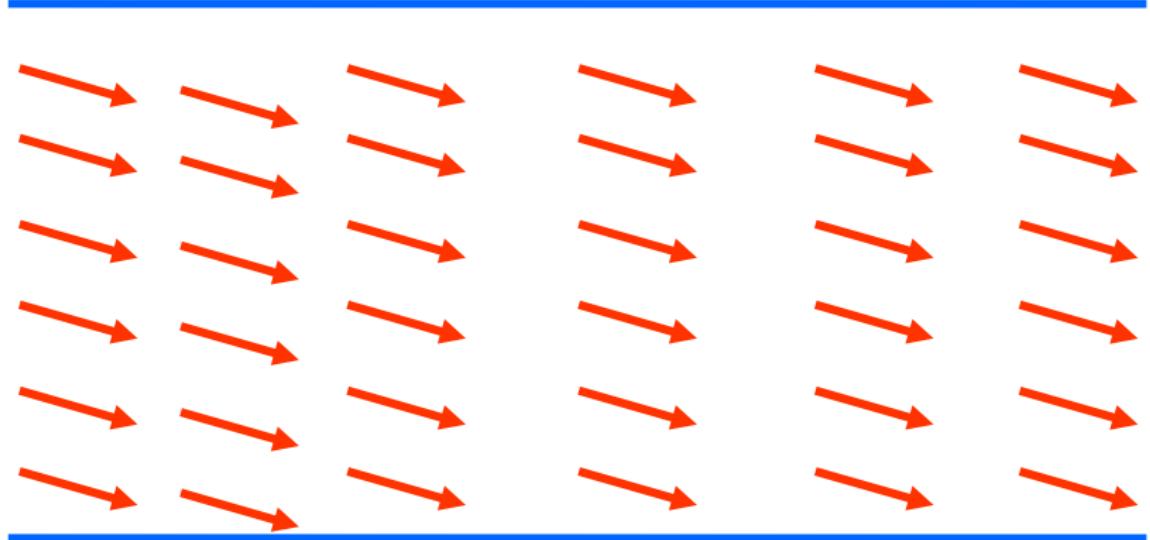
Metal Normal

$v=c$

masa del fotón cero

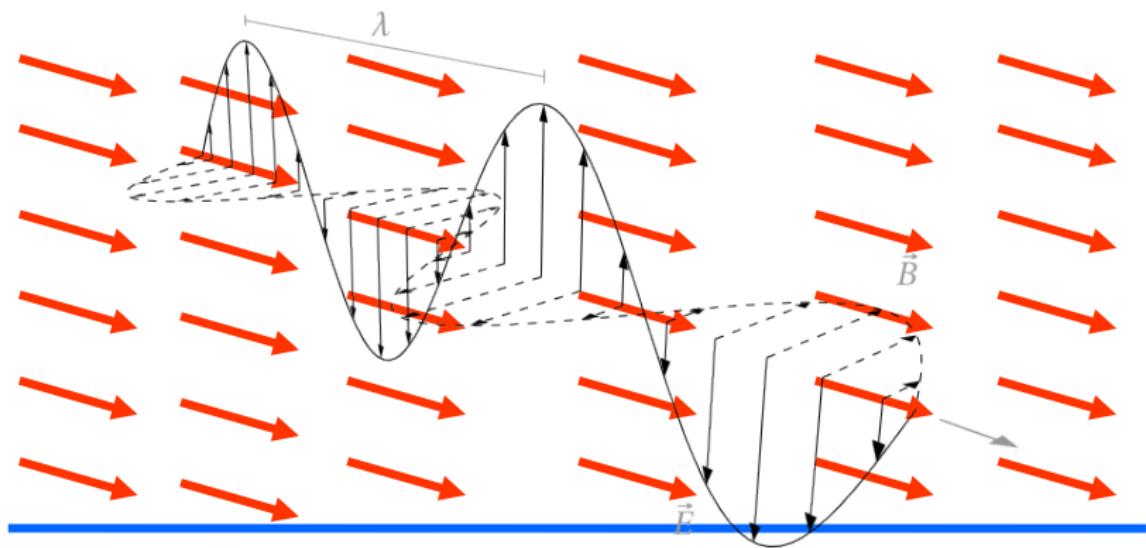


Superconductor



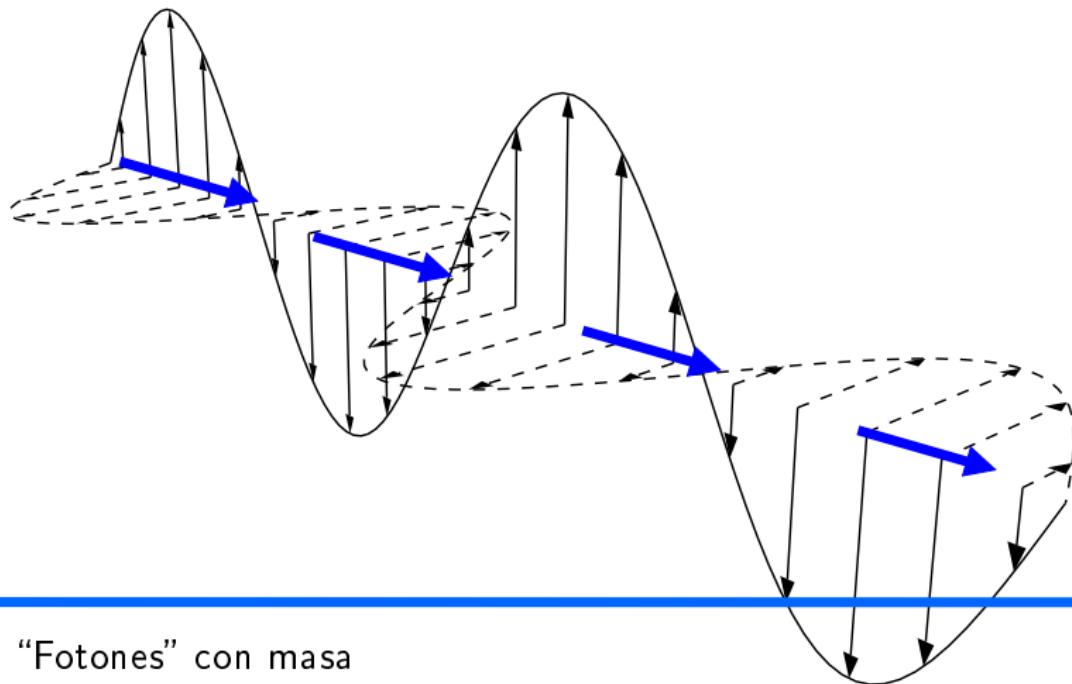
Un superconductor es un metal lleno de flechas!

Superconductor



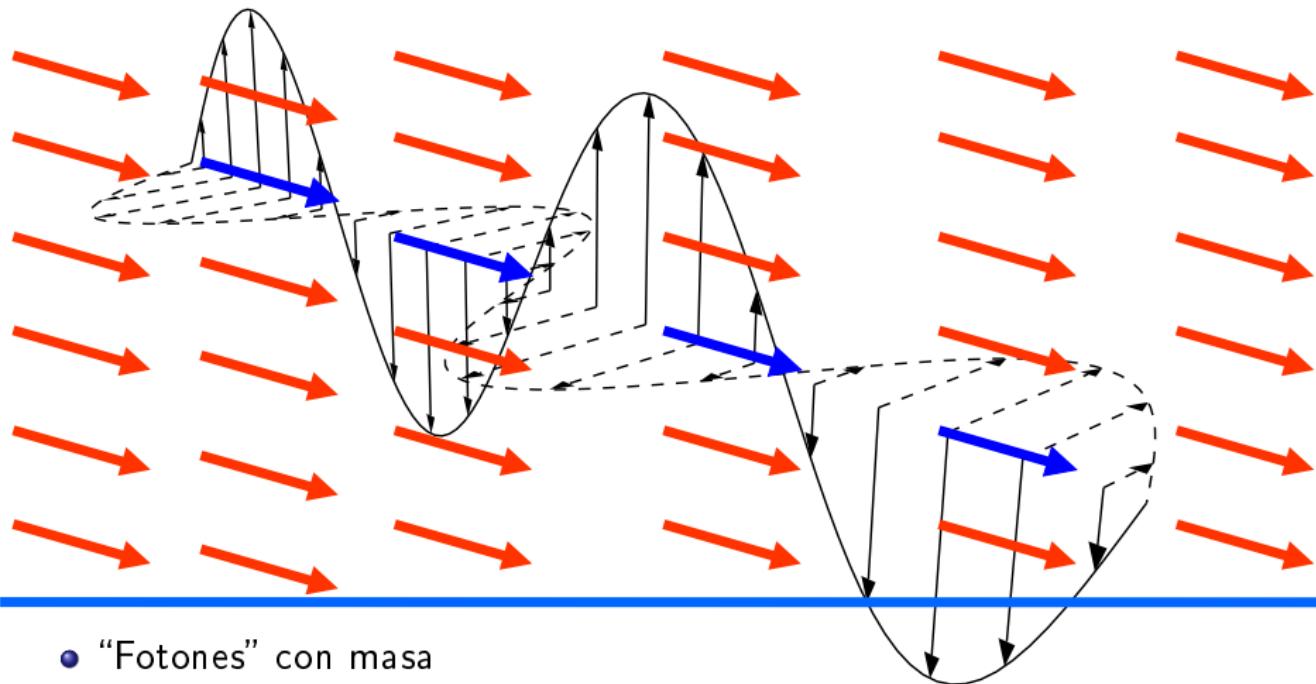
- * Fotón con masa
- * Fuerza de rango restringido
- * Éter electromagnético!!!!

W^\pm , Z^0 : Masa **real** o emergente?



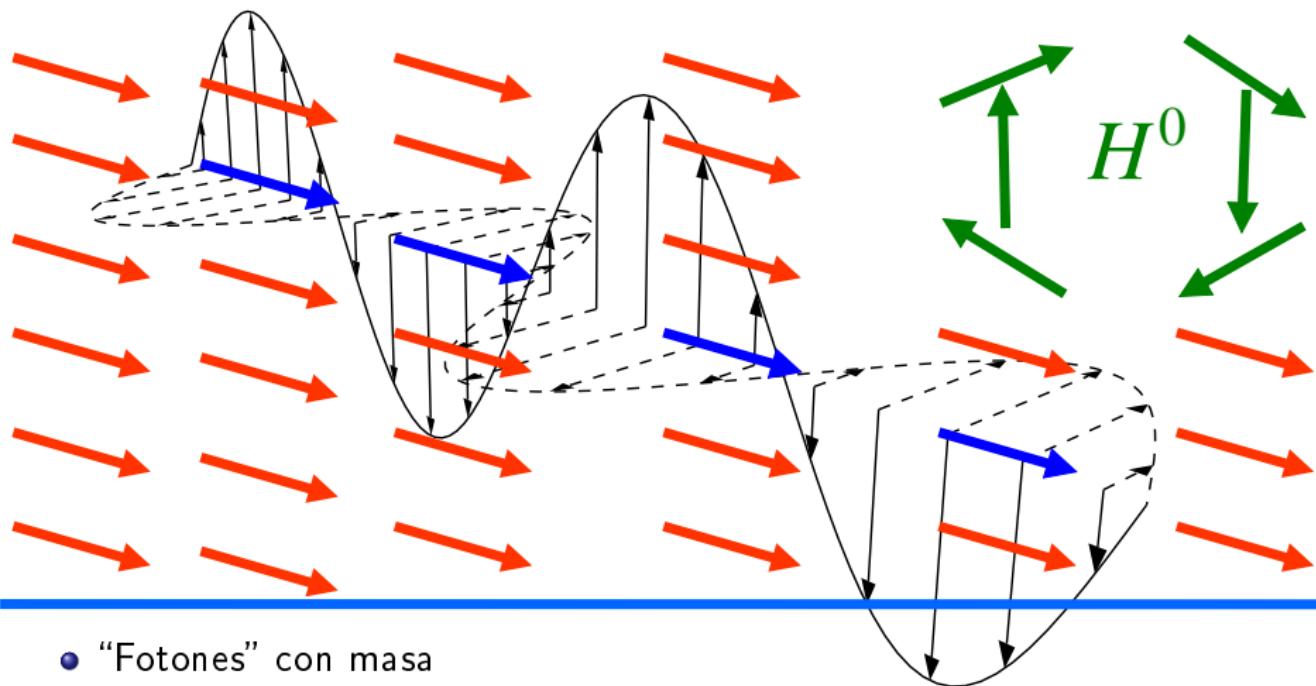
- “Fotones” con masa
- Interacción de corto alcance
- Éter electrodébil

W^\pm , Z^0 : Masa real o emergente?



- “Fotones” con masa
- Interacción de corto alcance
- Éter electrodébil

W^\pm , Z^0 : Masa real o emergente?, Higgs or not Higgs?



- “Fotones” con masa
- Interacción de corto alcance
- Éter electrodébil

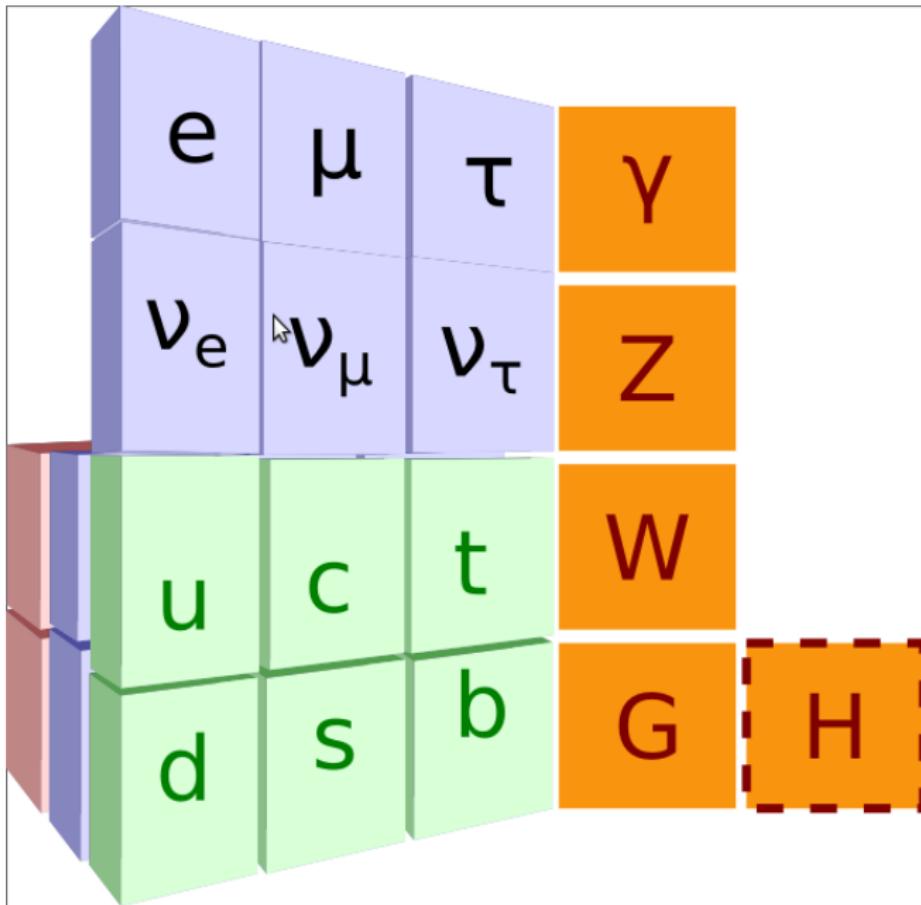
Superconductividad electrodébil

- Las interacciones débiles han resultado ser fuerzas de corto alcance, mediadas por nuevos fotones llamados W y Z que son bastante masivos
- Interpretadas como masas emergentes implican que:
 - Vivimos en un estado de superconductividad electrodébil!
 $T_c = 10^{15}$ GeV.
 - Existe un éter electrodébil que permea todo el universo
 - No entendemos el origen de las flechas (al igual que en superconductividad electromagnética a altas temperaturas)

Predicción

Aunque no podemos acceder directamente a las componentes del condensado que se comen el W y el Z para adquirir masa, existe al menos otra componente del condensado que se debe materializar como partícula independiente y nueva

La partícula de Higgs!



Standard Model: particles

$$SU(3)_c$$

$$d_L^1 \quad d_L^2 \quad d_L^3$$

$$d_R^1 \quad d_R^2 \quad d_R^3$$

Standard Model: particles

$$SU(3)_c$$

$$\begin{array}{ccc} d_L^1 & d_L^2 & d_L^3 \\ u_L^1 & u_L^2 & u_L^3 \\ d_R^1 & d_R^2 & d_R^3 \\ u_R^1 & u_R^2 & u_R^3 \end{array}$$

Standard Model: particles

$$SU(3)_c$$

$$\begin{array}{cccccccccc} d_L^1 & d_L^2 & d_L^3 & s_L^1 & s_L^2 & s_L^3 & b_L^1 & b_L^2 & b_L^3 \\ u_L^1 & u_L^2 & u_L^3 & c_L^1 & c_L^2 & c_L^3 & t_L^1 & t_L^2 & t_L^3 \\ d_R^1 & d_R^2 & d_R^3 & s_R^1 & s_R^2 & s_R^3 & b_R^1 & b_R^2 & b_R^3 \\ u_R^1 & u_R^2 & u_R^3 & c_R^1 & c_R^2 & c_R^3 & t_R^1 & t_R^2 & t_R^3 \end{array}$$

Standard Model: particles

$$SU(3)_c$$

$$\begin{array}{l} G_1 \\ G_2 \\ \vdots \\ G_8 \end{array} \left\{ \begin{array}{ccccccccccccc} d_L^1 & d_L^2 & d_L^3 & s_L^1 & s_L^2 & s_L^3 & b_L^1 & b_L^2 & b_L^3 & \rightarrow & d_L^\alpha & s_L^\alpha & b_L^\alpha \\ u_L^1 & u_L^2 & u_L^3 & c_L^1 & c_L^2 & c_L^3 & t_L^1 & t_L^2 & t_L^3 & \rightarrow & u_L^\alpha & c_L^\alpha & t_L^\alpha \\ d_R^1 & d_R^2 & d_R^3 & s_R^1 & s_R^2 & s_R^3 & b_R^1 & b_R^2 & b_R^3 & \rightarrow & d_R^\alpha & s_R^\alpha & b_R^\alpha \\ u_R^1 & u_R^2 & u_R^3 & c_R^1 & c_R^2 & c_R^3 & t_R^1 & t_R^2 & t_R^3 & \rightarrow & u_R^\alpha & c_R^\alpha & t_R^\alpha \end{array} \right.$$

Standard Model: particles

$$SU(3)_c$$

$$\begin{array}{l}
 e_R \quad \mu_R \quad \tau_R \\
 e_L \quad \mu_L \quad \tau_L \\
 \nu_L^e \quad \nu_L^\mu \quad \nu_L^\tau \\
 \\
 G_1 \quad \left\{ \begin{array}{cccccccc} d_L^1 & d_L^2 & d_L^3 & s_L^1 & s_L^2 & s_L^3 & b_L^1 & b_L^2 \\ u_L^1 & u_L^2 & u_L^3 & c_L^1 & c_L^2 & c_L^3 & t_L^1 & t_L^2 \\ d_R^1 & d_R^2 & d_R^3 & s_R^1 & s_R^2 & s_R^3 & b_R^1 & b_R^2 \\ u_R^1 & u_R^2 & u_R^3 & c_R^1 & c_R^2 & c_R^3 & t_R^1 & t_R^2 \end{array} \right. \rightarrow \begin{array}{ccc} d_L^\alpha & s_L^\alpha & b_L^\alpha \\ u_L^\alpha & c_L^\alpha & t_L^\alpha \\ d_R^\alpha & s_R^\alpha & b_R^\alpha \\ u_R^\alpha & c_R^\alpha & t_R^\alpha \end{array}
 \end{array}$$

Standard Model: particles

$$SU(3)_c \times SU(2)_L$$

$$\begin{array}{l}
W^\pm \quad \left\{ \begin{array}{l} e_R \quad \mu_R \quad \tau_R \\ e_L \quad \mu_L \quad \tau_L \\ \nu_L^e \quad \nu_L^\mu \quad \nu_L^\tau \end{array} \right\} \quad L_1 \quad L_2 \quad L_3 \\
G_1 \quad \left\{ \begin{array}{l} W^\pm \quad \left\{ \begin{array}{cccccccc} d_L^1 & d_L^2 & d_L^3 & s_L^1 & s_L^2 & s_L^3 & b_L^1 & b_L^2 & b_L^3 \\ u_L^1 & u_L^2 & u_L^3 & c_L^1 & c_L^2 & c_L^3 & t_L^1 & t_L^2 & t_L^3 \end{array} \right\} \rightarrow \begin{array}{ccc} d_L^\alpha & s_L^\alpha & b_L^\alpha \\ u_L^\alpha & c_L^\alpha & t_L^\alpha \end{array} \\ \vdots \\ G_8 \quad \left\{ \begin{array}{cccccccc} d_R^1 & d_R^2 & d_R^3 & s_R^1 & s_R^2 & s_R^3 & b_R^1 & b_R^2 & b_R^3 \\ u_R^1 & u_R^2 & u_R^3 & c_R^1 & c_R^2 & c_R^3 & t_R^1 & t_R^2 & t_R^3 \end{array} \right\} \rightarrow \begin{array}{ccc} d_R^\alpha & s_R^\alpha & b_R^\alpha \\ u_R^\alpha & c_R^\alpha & t_R^\alpha \end{array} \end{array} \right\} \quad Q_1^\alpha \quad Q_2^\alpha \quad Q_3^\alpha
\end{array}$$

$$m_i = 0$$

Standard Model: particles

$$SU(3)_c \times SU(2)_L \times U(1)_Y$$

$$\begin{aligned}
Z^0 \gamma & \left\{ \begin{array}{l} W^\pm \\ G_1 \\ G_2 \\ \vdots \\ G_8 \end{array} \right\} \left\{ \begin{array}{l} W^\pm \\ \begin{array}{ccccccccccccc} d_L^1 & d_L^2 & d_L^3 & s_L^1 & s_L^2 & s_L^3 & b_L^1 & b_L^2 & b_L^3 \\ u_L^1 & u_L^2 & u_L^3 & c_L^1 & c_L^2 & c_L^3 & t_L^1 & t_L^2 & t_L^3 \\ d_R^1 & d_R^2 & d_R^3 & s_R^1 & s_R^2 & s_R^3 & b_R^1 & b_R^2 & b_R^3 \\ u_R^1 & u_R^2 & u_R^3 & c_R^1 & c_R^2 & c_R^3 & t_R^1 & t_R^2 & t_R^3 \end{array} \end{array} \right\} \rightarrow \begin{array}{l} e_R \\ e_L \\ \nu_L^e \end{array} \begin{array}{l} \mu_R \\ \mu_L \\ \nu_L^\mu \end{array} \begin{array}{l} \tau_R \\ \tau_L \\ \nu_L^\tau \end{array} \begin{array}{l} L_1 \\ L_2 \\ L_3 \end{array} \\
& Q_1^\alpha \quad Q_2^\alpha \quad Q_3^\alpha
\end{aligned}$$

$$m_i = 0$$

$$Y_{u_L} = Y_{d_L}$$

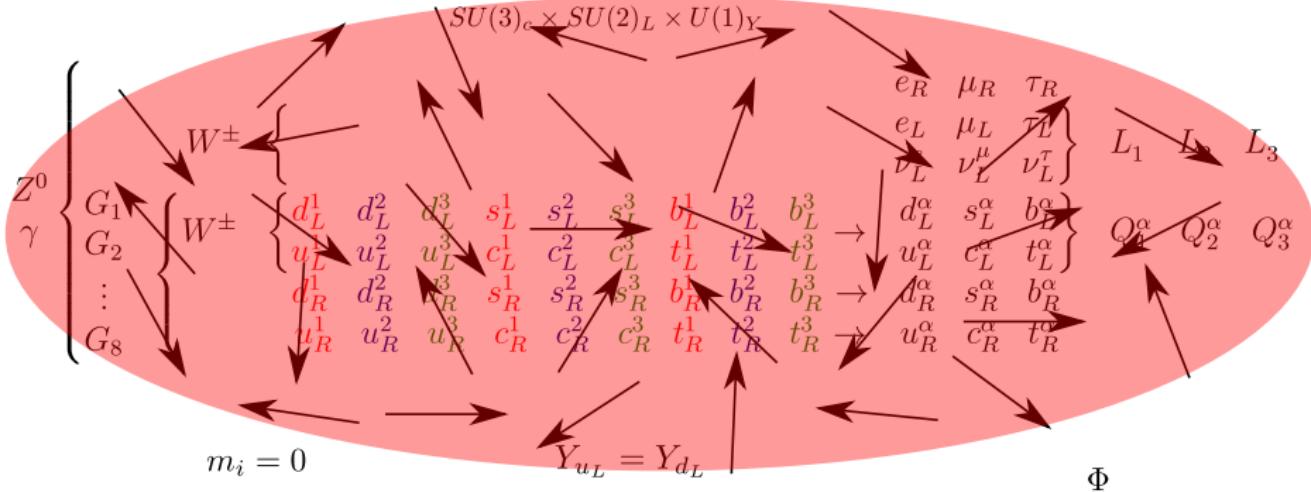
Standard Model: particles

$$SU(3)_c \times SU(2)_L \times U(1)_Y$$

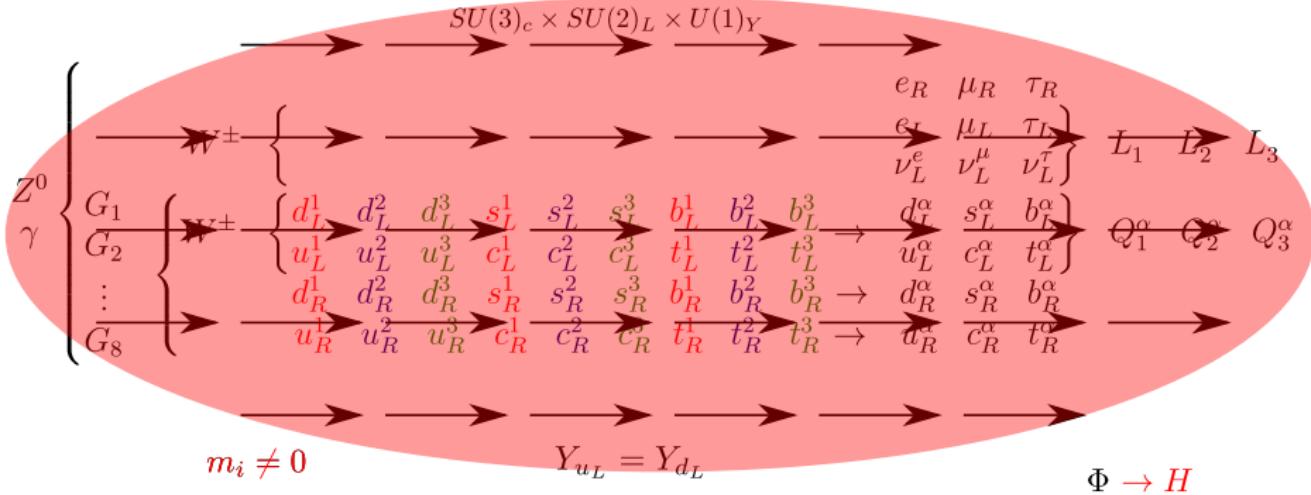
Z^0	γ	W^\pm	$\left\{ \begin{array}{l} e_R \\ \mu_R \\ \tau_R \\ e_L \\ \mu_L \\ \tau_L \\ \nu_L^e \\ \nu_L^\mu \\ \nu_L^\tau \end{array} \right\}$	L_1	L_2	L_3	3
G_1	G_2	W^\pm	$\left\{ \begin{array}{l} d_L^1 \\ u_L^1 \\ d_L^2 \\ u_L^2 \\ d_L^3 \\ u_L^3 \\ c_L^1 \\ c_L^2 \\ c_L^3 \\ b_L^1 \\ t_L^1 \\ t_L^2 \\ t_L^3 \end{array} \right\} \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} d_L^\alpha \\ u_L^\alpha \\ d_L^2 \\ u_L^2 \\ d_L^3 \\ u_L^3 \\ c_L^1 \\ c_L^2 \\ c_L^3 \\ b_L^2 \\ t_L^2 \\ t_L^3 \\ b_L^\alpha \end{array} \right\}$	Q_1^α	Q_2^α	Q_3^α	3
\vdots							3
G_8			$\left\{ \begin{array}{l} d_R^1 \\ u_R^1 \\ d_R^2 \\ u_R^2 \\ d_R^3 \\ u_R^3 \\ c_R^1 \\ c_R^2 \\ c_R^3 \\ b_R^1 \\ t_R^1 \\ t_R^2 \\ t_R^3 \end{array} \right\} \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} d_R^\alpha \\ u_R^\alpha \\ d_R^2 \\ u_R^2 \\ d_R^3 \\ u_R^3 \\ c_R^1 \\ c_R^2 \\ c_R^3 \\ b_R^2 \\ t_R^2 \\ b_R^\alpha \end{array} \right\}$				3
2	8	2=12					15

$$m_i = 0 \quad Y_{u_L} = Y_{d_L}$$

Standard Model: particles



Standard Model: particles



SM particles

+Gauge invariance+Lorentz Invariance \rightarrow Lagrangian (interactions)

La luz penetrando en un metal que a nivel microscópio corresponde a rayos dispersandoes a la velocidad de la luz, se puede entender como un efecto macróscopico de un fotón masivo. Igual la luz viaja en el vacío

Pero el vacío podría estar lleno de campos

El campo es un concepto difícil, Es algo que ocupa lugar y transporta energía. Pero ante de todo ...

Discutir la masa del protón

Hablar de superconductivada

Mecanismo de Higgs

Standard Model Lagrangian (simplified version)

$$\begin{aligned}\mathcal{L} = & -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} \\& + i \bar{\psi} D^\mu \psi + h.c. \\& + \bar{\chi}_i Y_{ij} \chi_j \phi + h.c. \\& + |D_\mu \phi|^2 - V(\phi)\end{aligned}$$



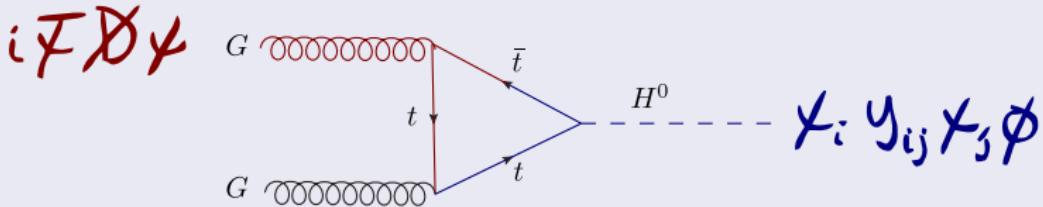
Standard Model Lagrangian (simplified version)

$$\begin{aligned}\mathcal{L} = & -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} \\ & + i \bar{\psi} \not{D} \psi + h.c. \\ & + \bar{\chi}_i Y_{ij} \chi_j \phi + h.c. \\ & + |\partial_\mu \phi|^2 - V(\phi)\end{aligned}$$

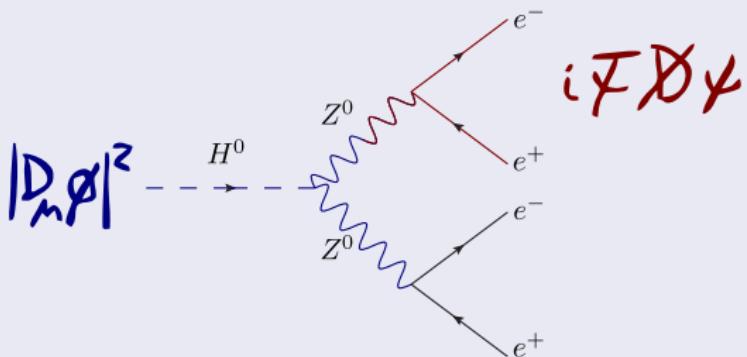


Higgs production and decay

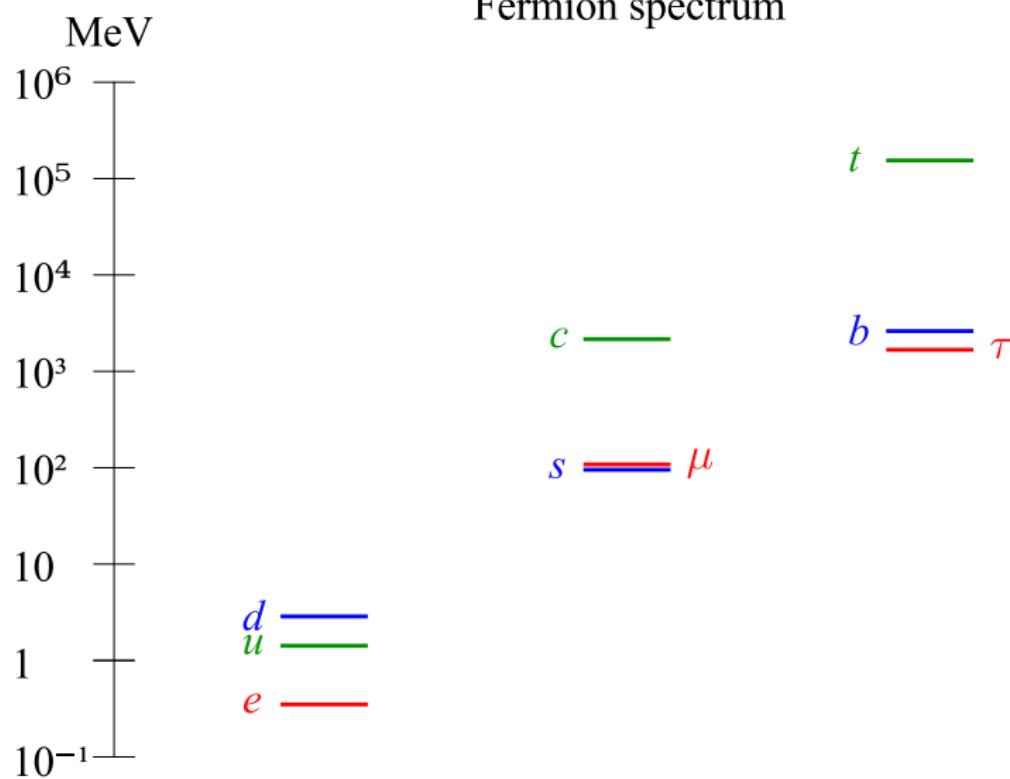
Gluon fusion



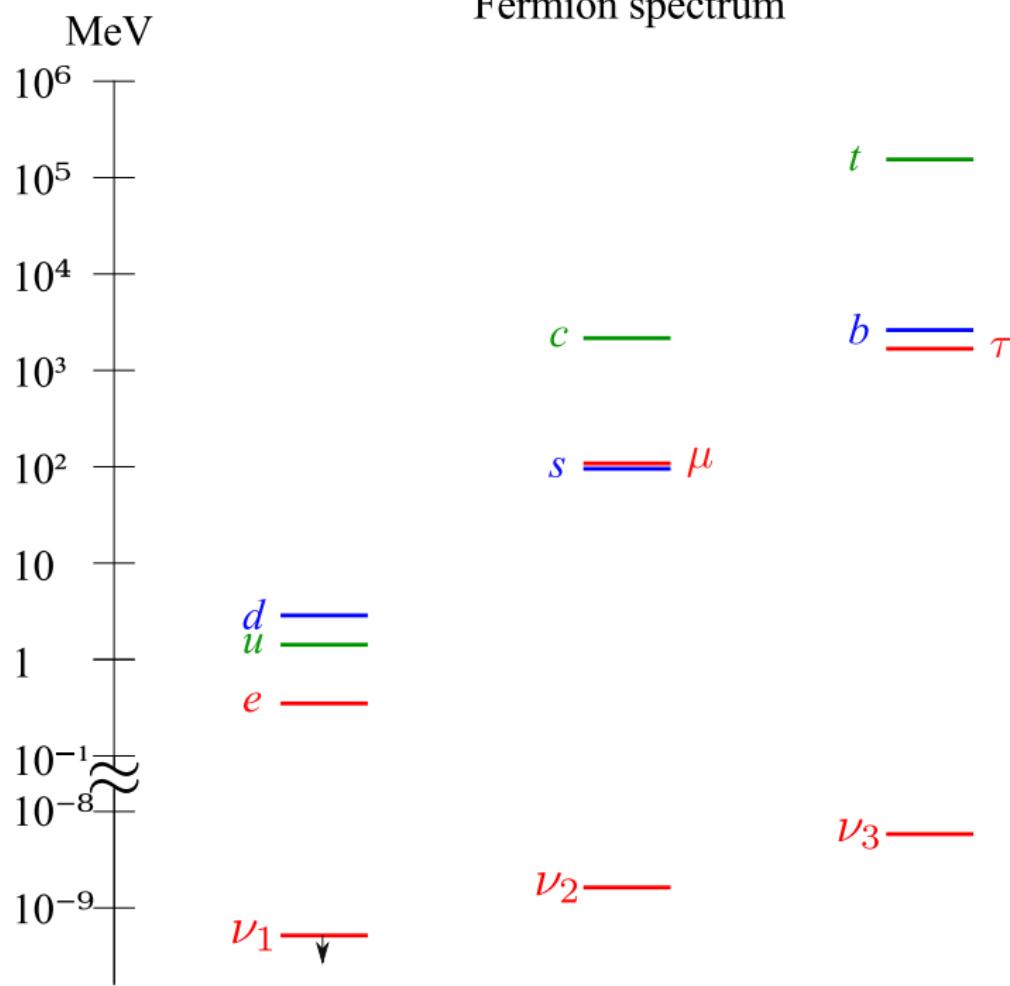
Golden channel



Fermion spectrum



Fermion spectrum



Energy budget of the Universe

Λ CDM: Cosmological Constant + Cold Dark Matter:

- Stars and galaxies are only $\sim 0.4\%$

- Stars
- Nonluminous
- Dark Matter
- Dark Energy



Energy budget of the Universe

Λ CDM: Cosmological Constant + Cold Dark Matter:

- Stars y galaxies are only $\sim 0.4\%$
- Rest of ordinary matter $\sim 3.5\%$
 - neutrinos $\sim 0.1 - 1\%$
 - electrones, protones, y neutrones

- Stars
- Nonluminous
- Dark Matter
- Dark Energy

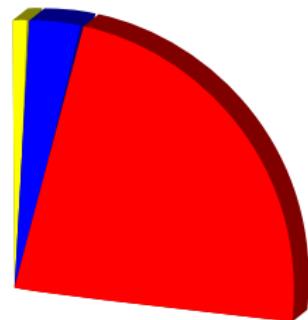


Energy budget of the Universe

Λ CDM: Cosmological Constant + Cold Dark Matter:

- Stars y galaxies are only $\sim 0.4\%$
- Rest of ordinary matter $\sim 3.5\%$
 - neutrinos $\sim 0.1 - 1\%$
 - electrones, protones, y neutrones
- Dark Matter $\sim 23\%$

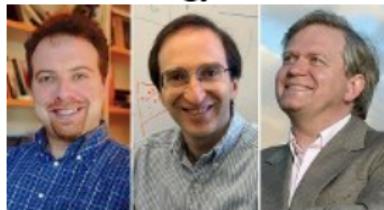
- Stars
- Nonluminous
- Dark Matter
- Dark Energy



Energy budget of the Universe

Λ CDM: Cosmological Constant + Cold Dark Matter:

- Stars y galaxies are only $\sim 0.4\%$
- Rest of ordinary matter $\sim 3.5\%$
 - neutrinos $\sim 0.1 - 1\%$
 - electrones, protones, y neutrones
- Dark Matter $\sim 23\%$
- Dark Energy $\sim 73\%$



A. Riess, S. Perlmutter, B. Schmidt

- Stars
- Nonluminous
- Dark Matter
- Dark Energy 



Energy budget of the Universe

Λ CDM: Cosmological Constant + Cold Dark Matter:

- Stars y galaxies are only $\sim 0.4\%$
- Rest of ordinary matter $\sim 3.5\%$
 - neutrinos $\sim 0.1 - 1\%$
 - electrones, protones, y neutrones
- Dark Matter $\sim 23\%$
- Dark Energy $\sim 73\%$



A. Riess, S. Perlmutter, B. Schmidt

- Anti-Matter $\sim 0\%$

- Stars
- Nonluminous
- Dark Matter
- Dark Energy 



Bullet cluster 1E 0657-558 (2006)

two colliding clusters of galaxies



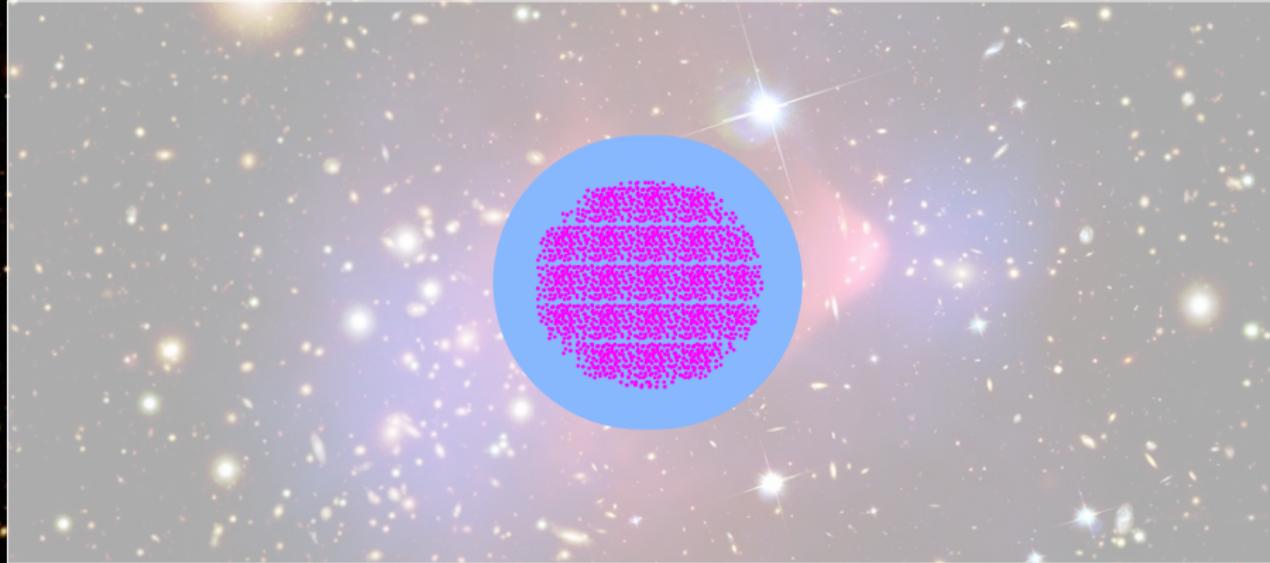
Bullet cluster 1E 0657-558 (2006)

two colliding clusters of galaxies



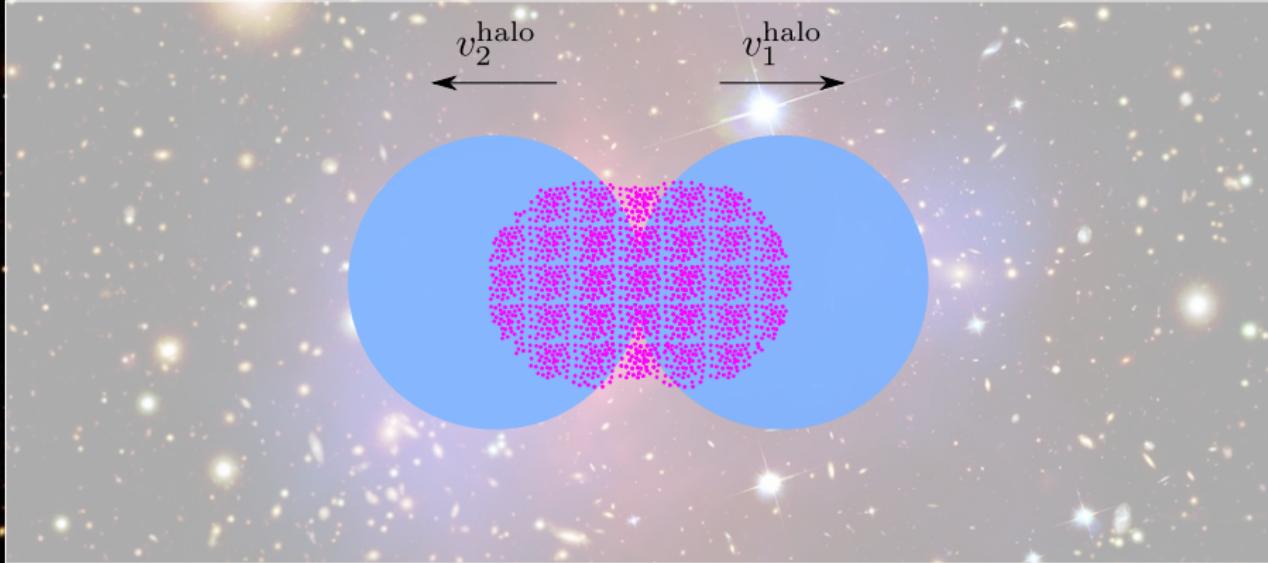
Bullet cluster 1E 0657-558 (2006)

two colliding clusters of galaxies



Bullet cluster 1E 0657-558 (2006)

two colliding clusters of galaxies



Bullet cluster 1E 0657-558 (2006)

two colliding clusters of galaxies



Bullet cluster 1E 0657-558 (2006)

two colliding clusters of galaxies

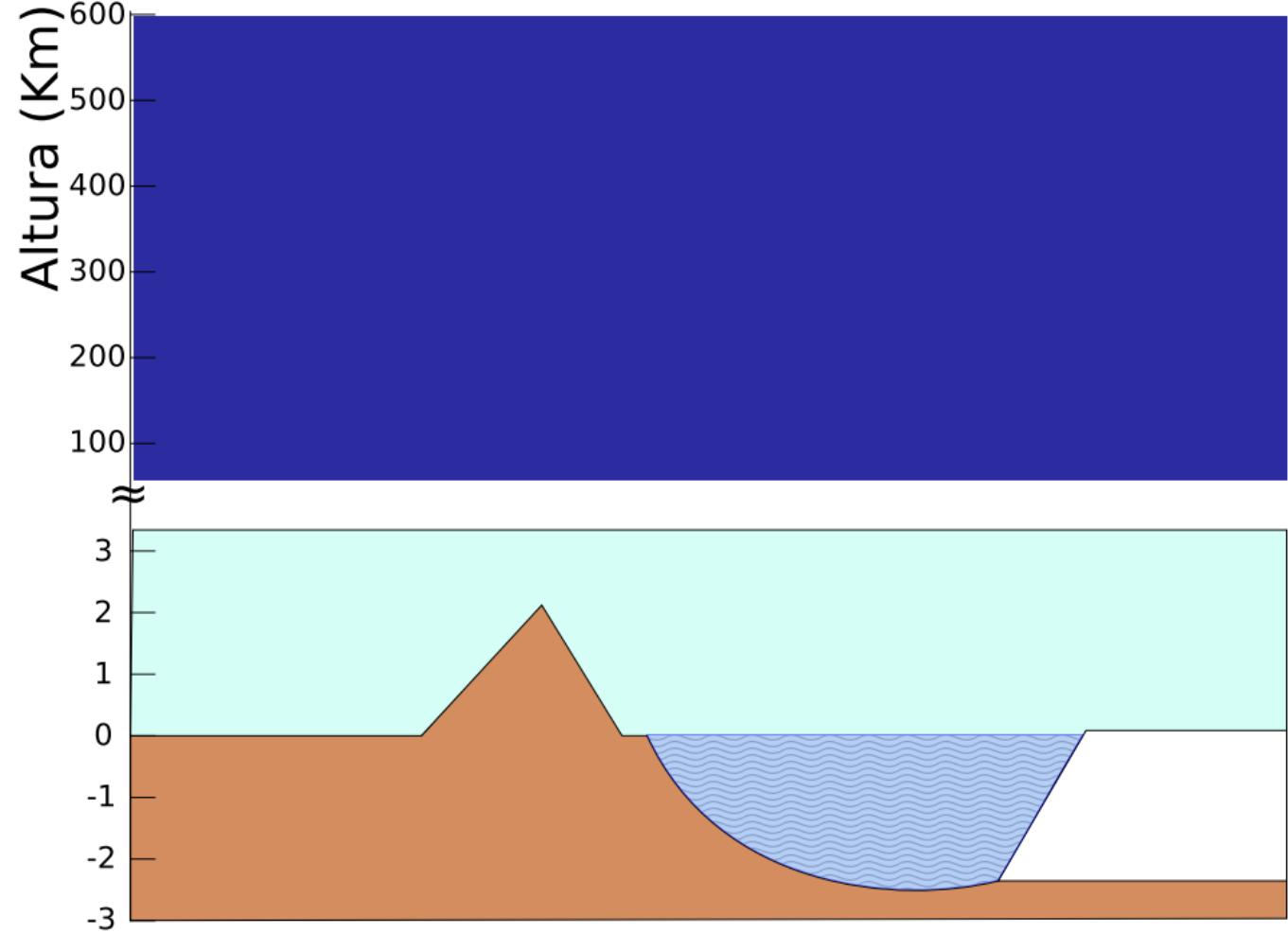
WIMP Dark Matter

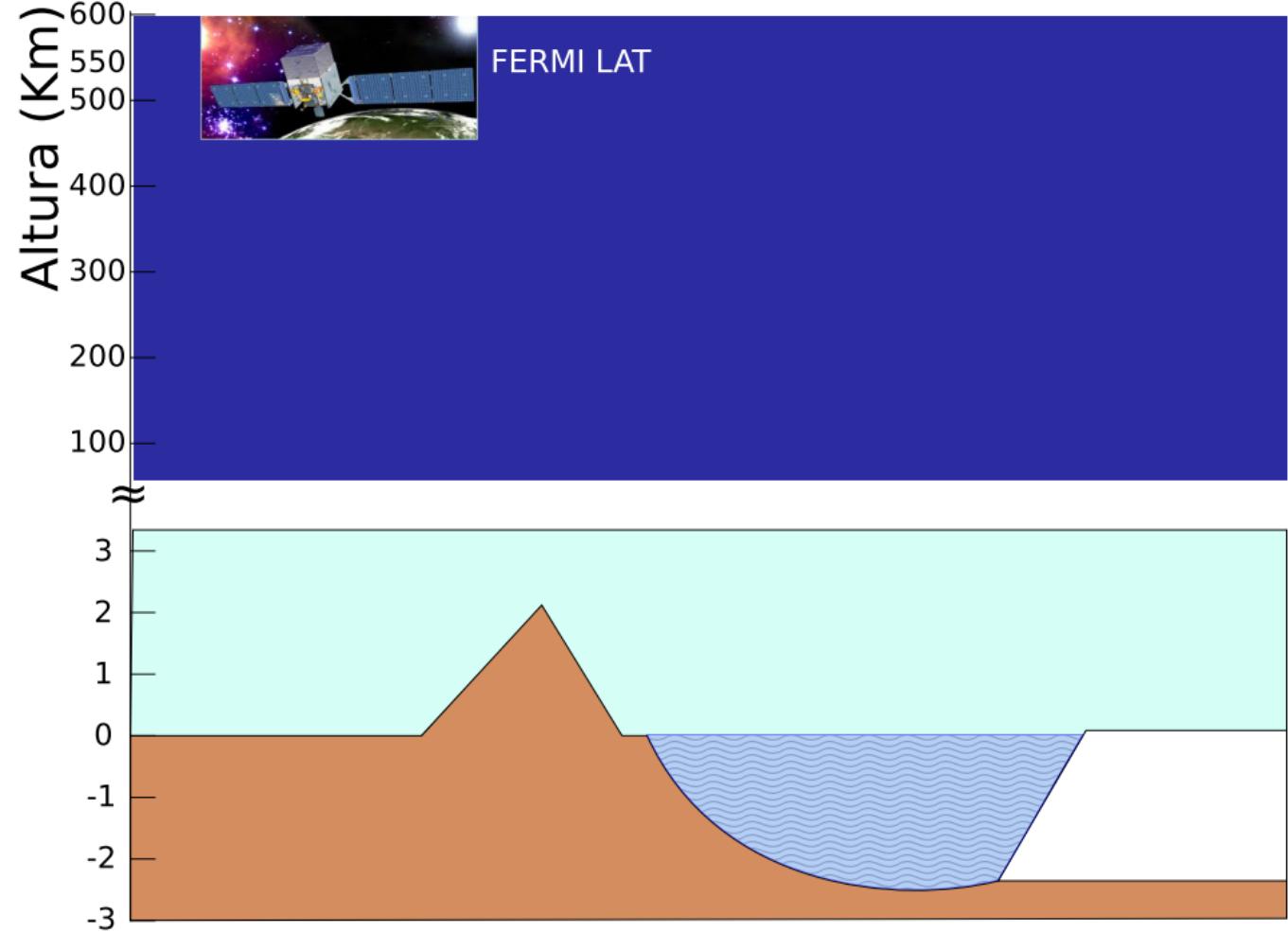
Weakly Interacting Massive Particle

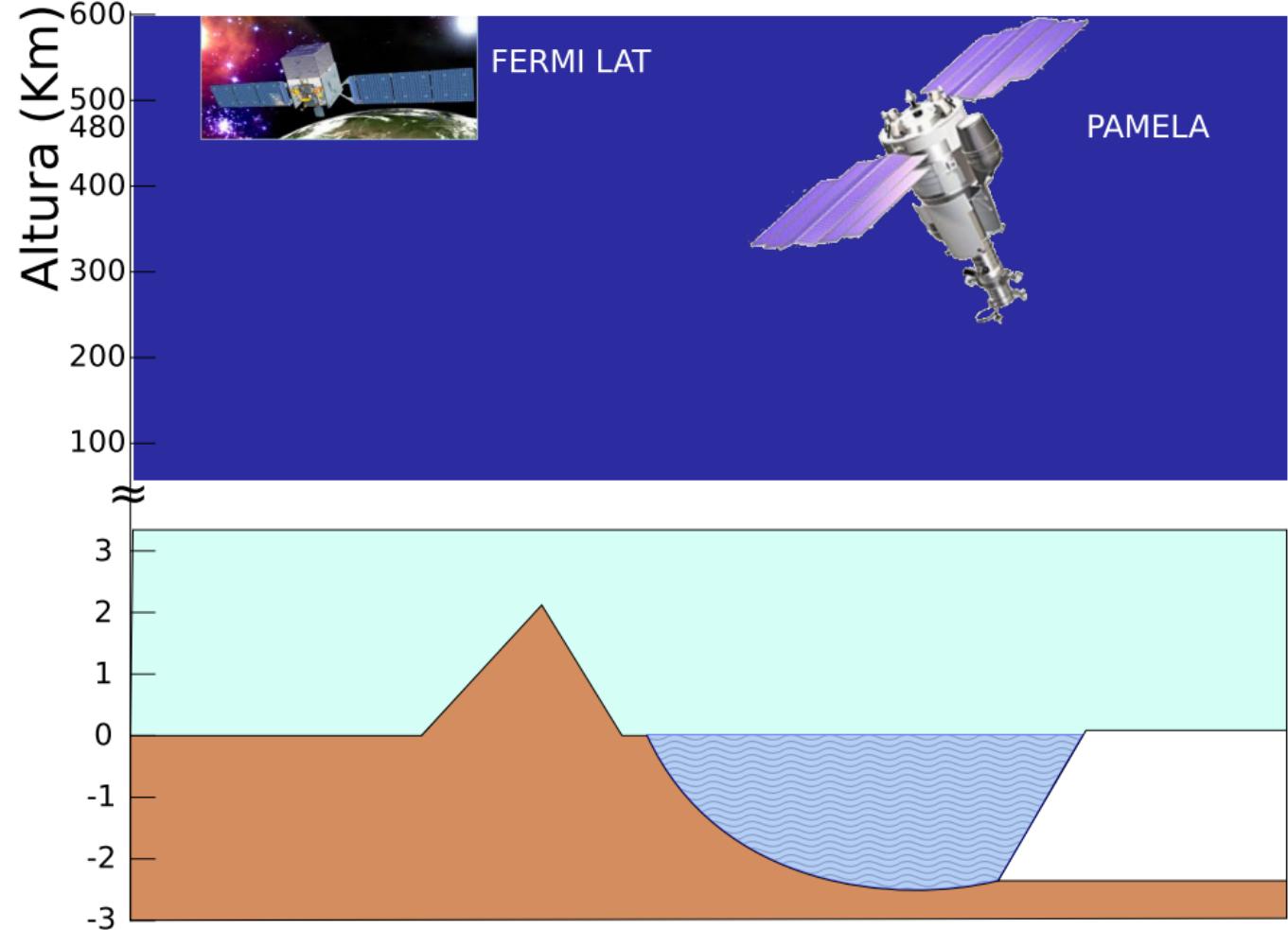
Stable heavy particle produced in early universe, left over from near-complete annihilation

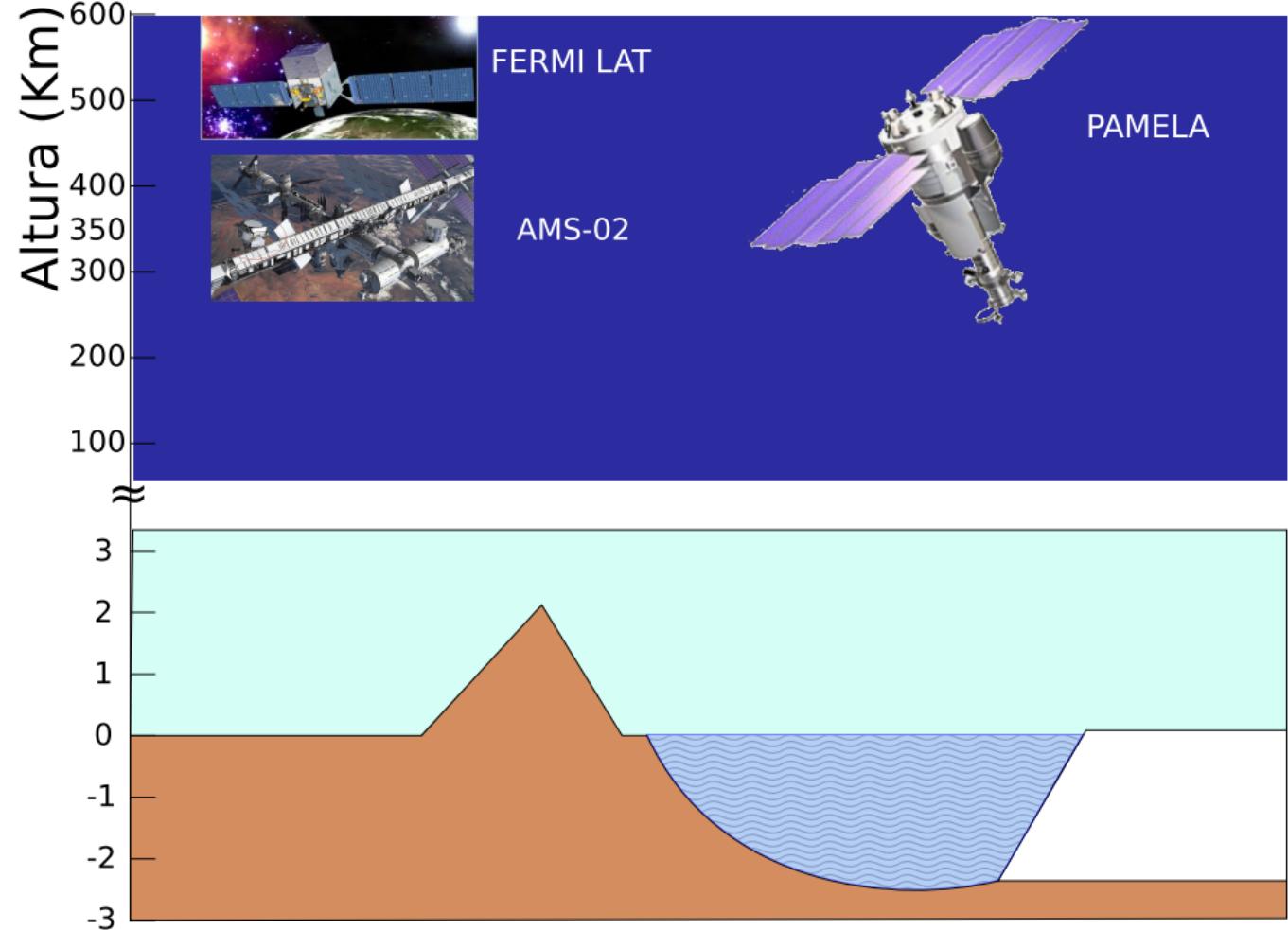
- WIMP miracle

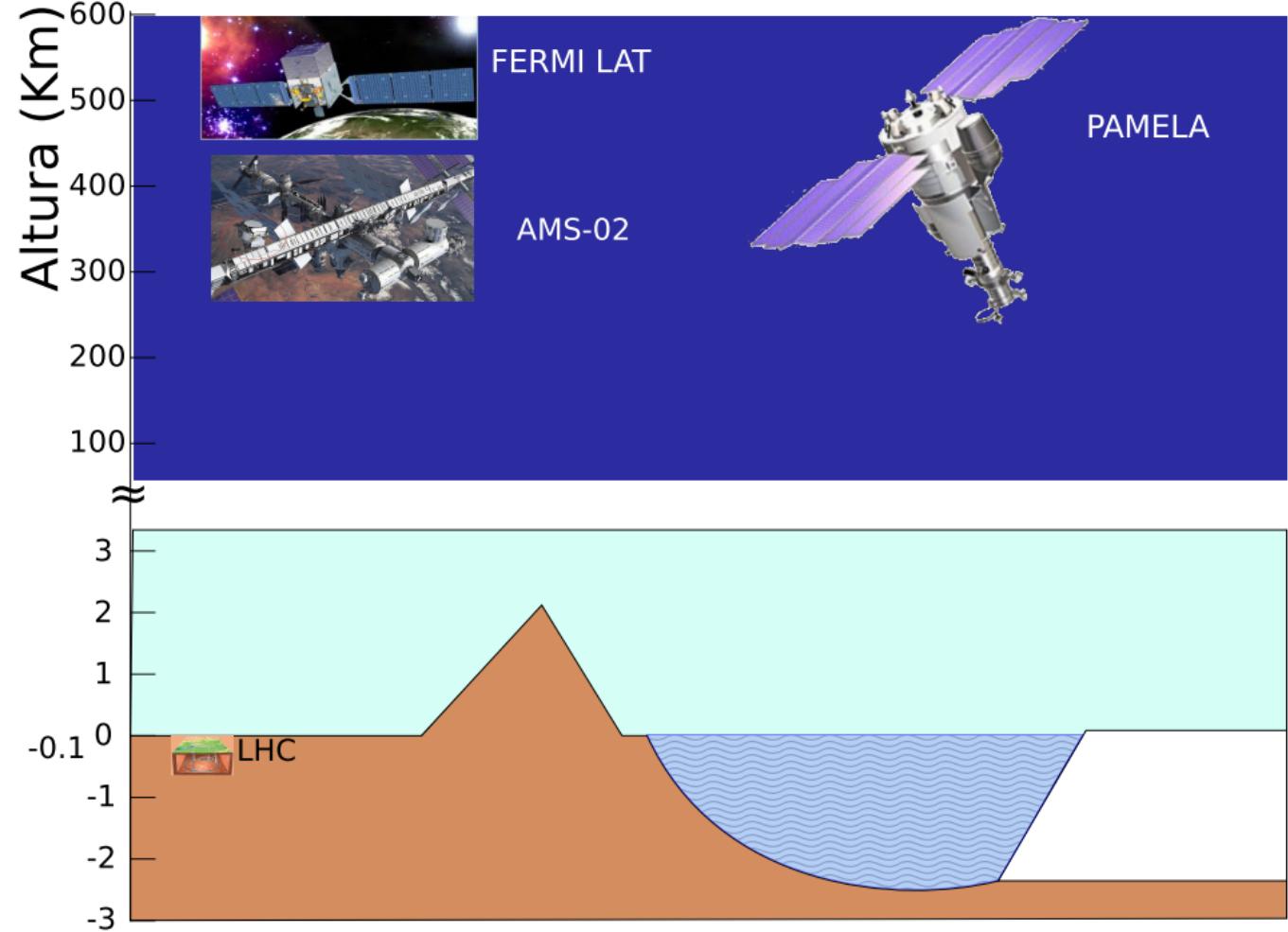
$$\Omega_{\text{DM}} = \frac{0.756(n+1)x_f^{n+1}}{g^{1/2}\sigma_{\text{ann}}} \frac{3s_0}{8\pi H_0^2} \approx \frac{\alpha^2/(1 \text{ TeV})}{\sigma_{\text{ann}}}$$

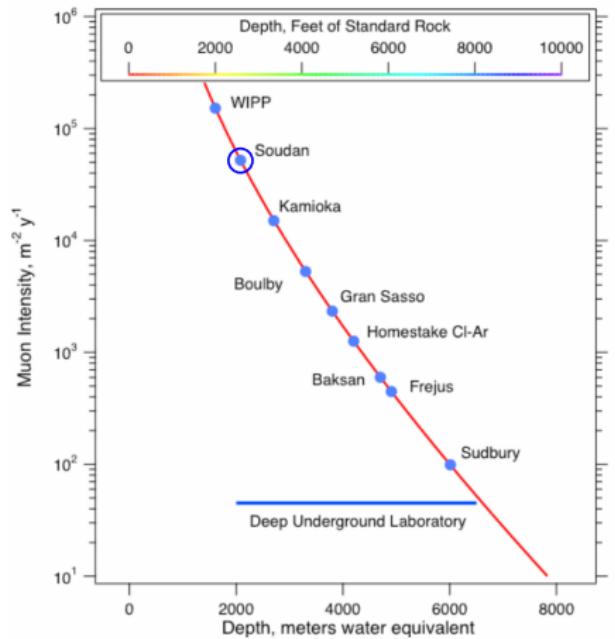
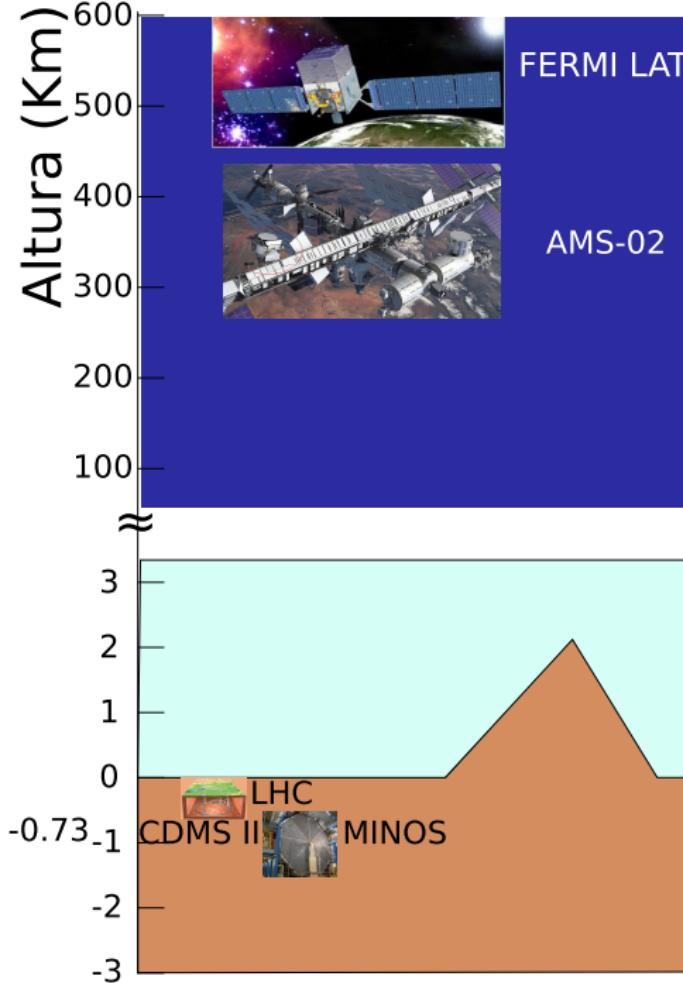


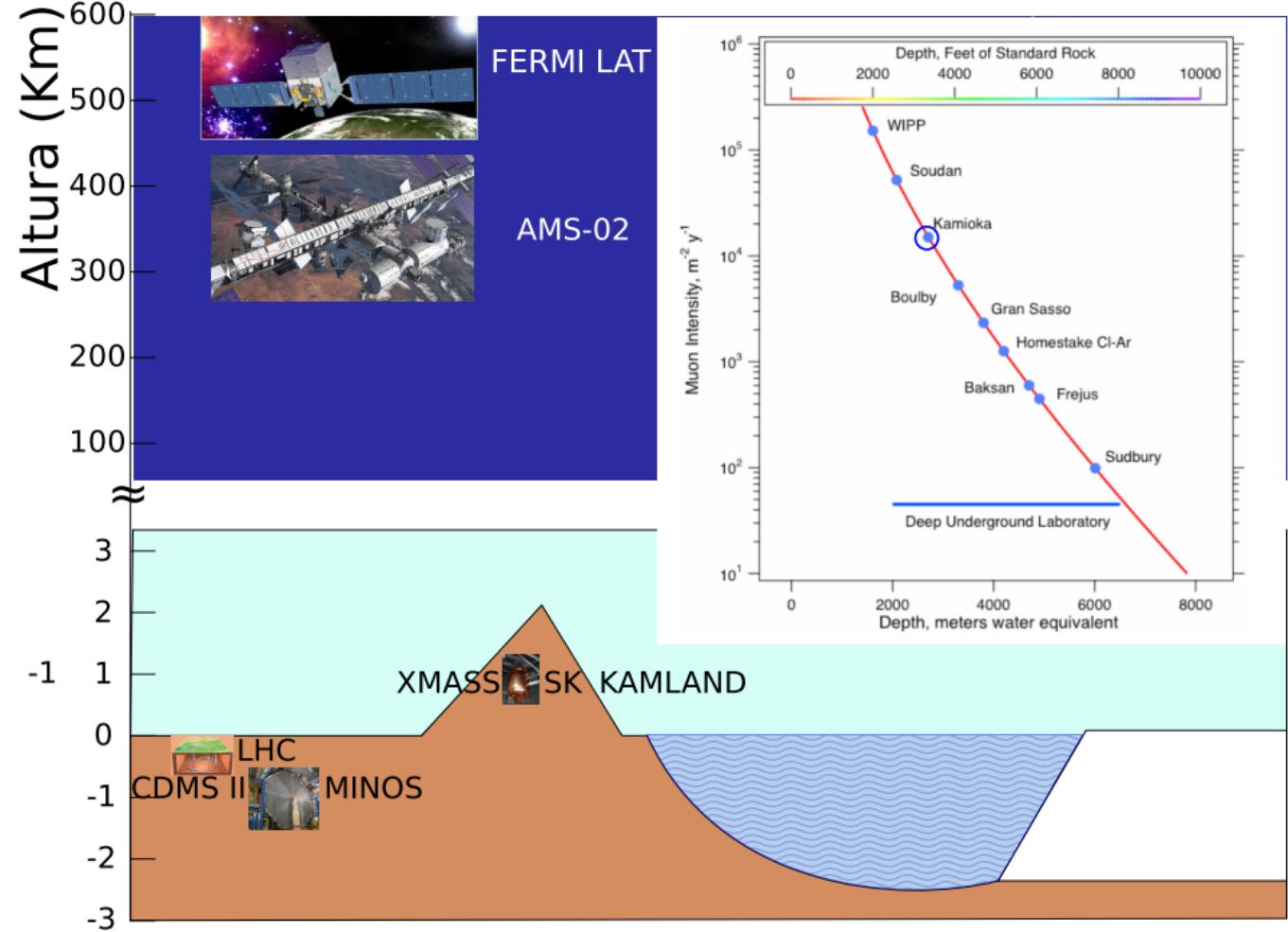


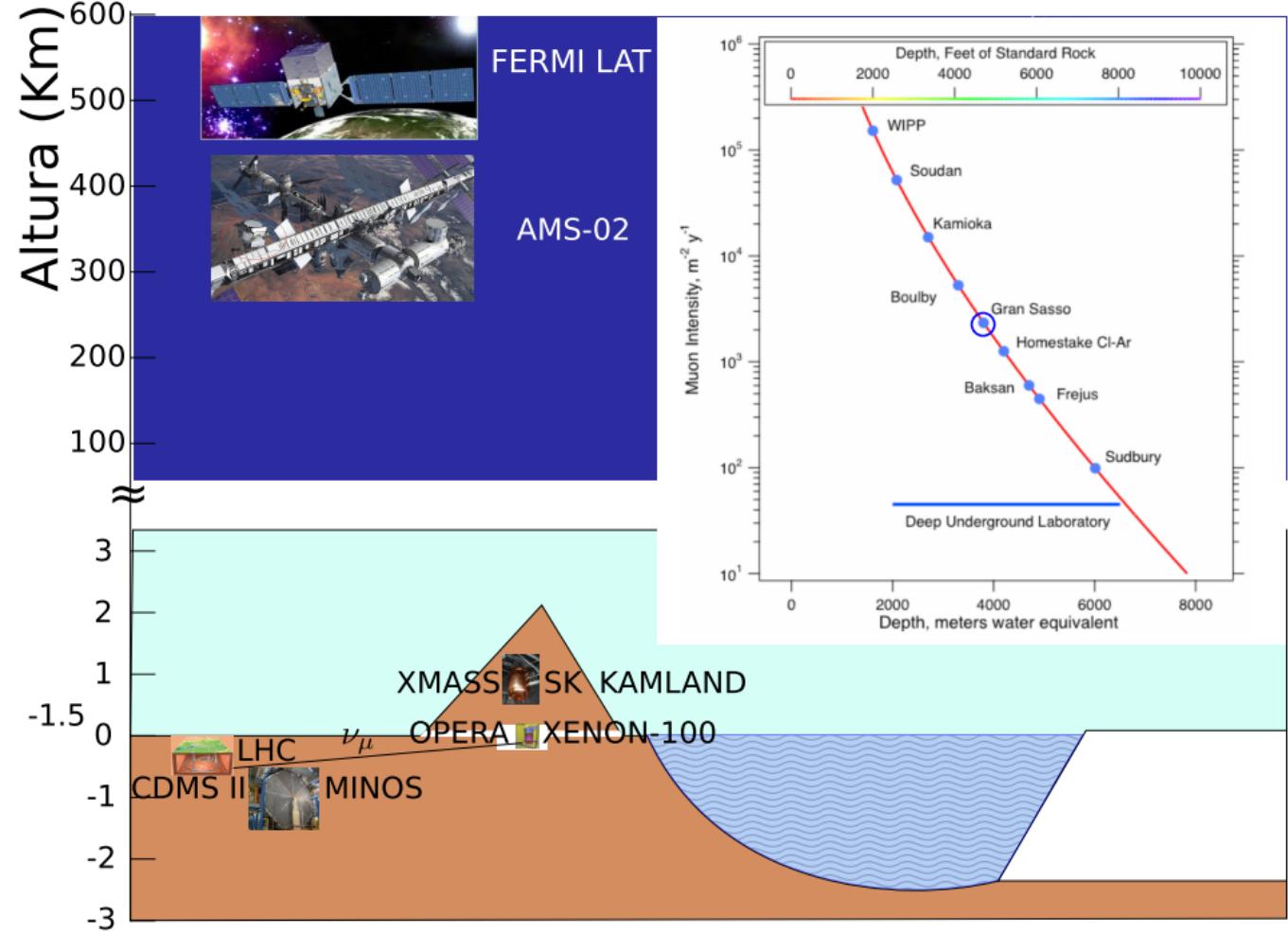


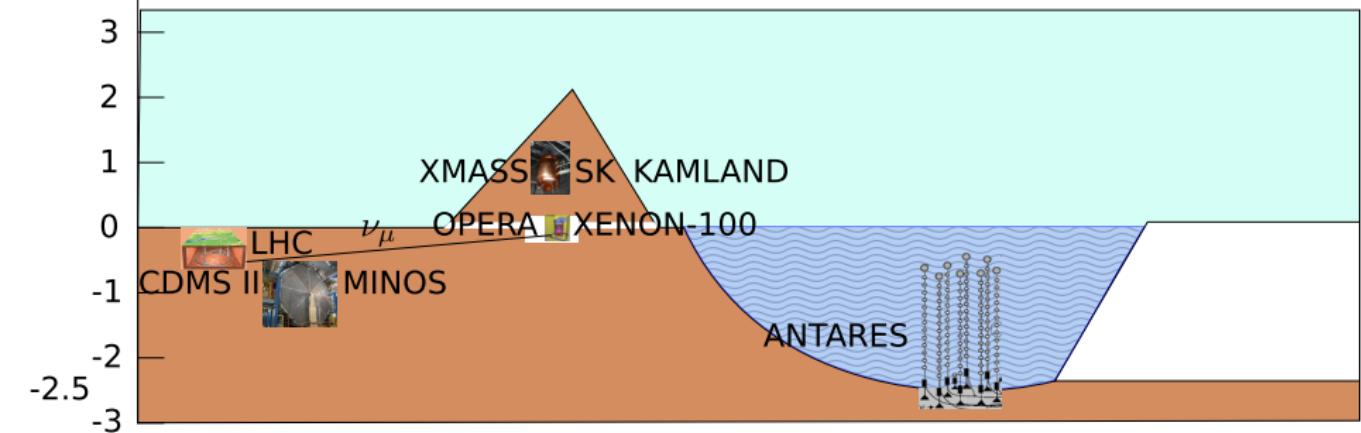
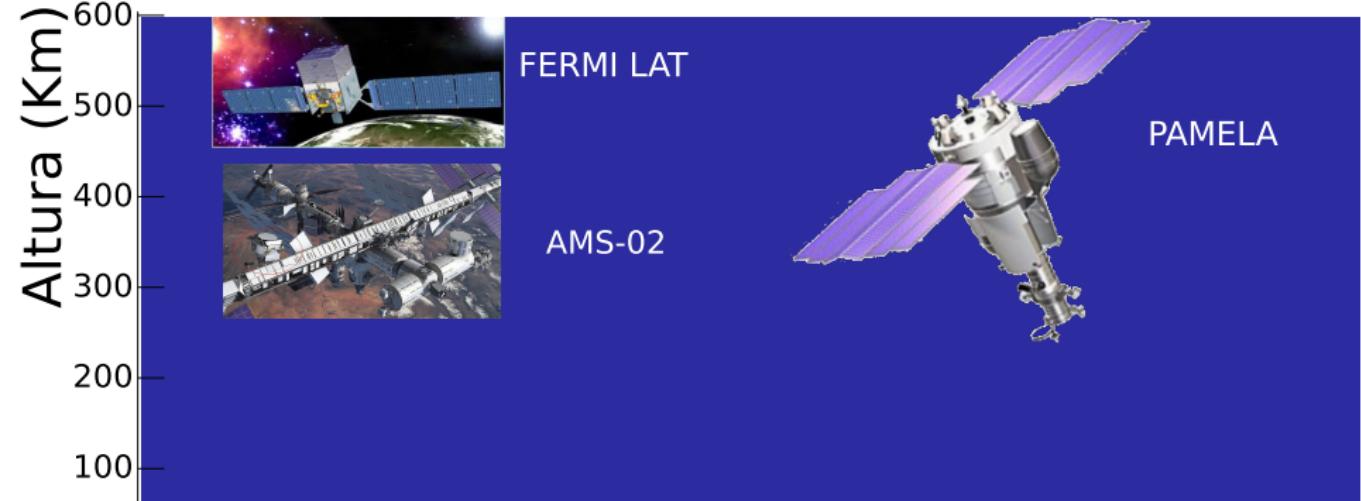


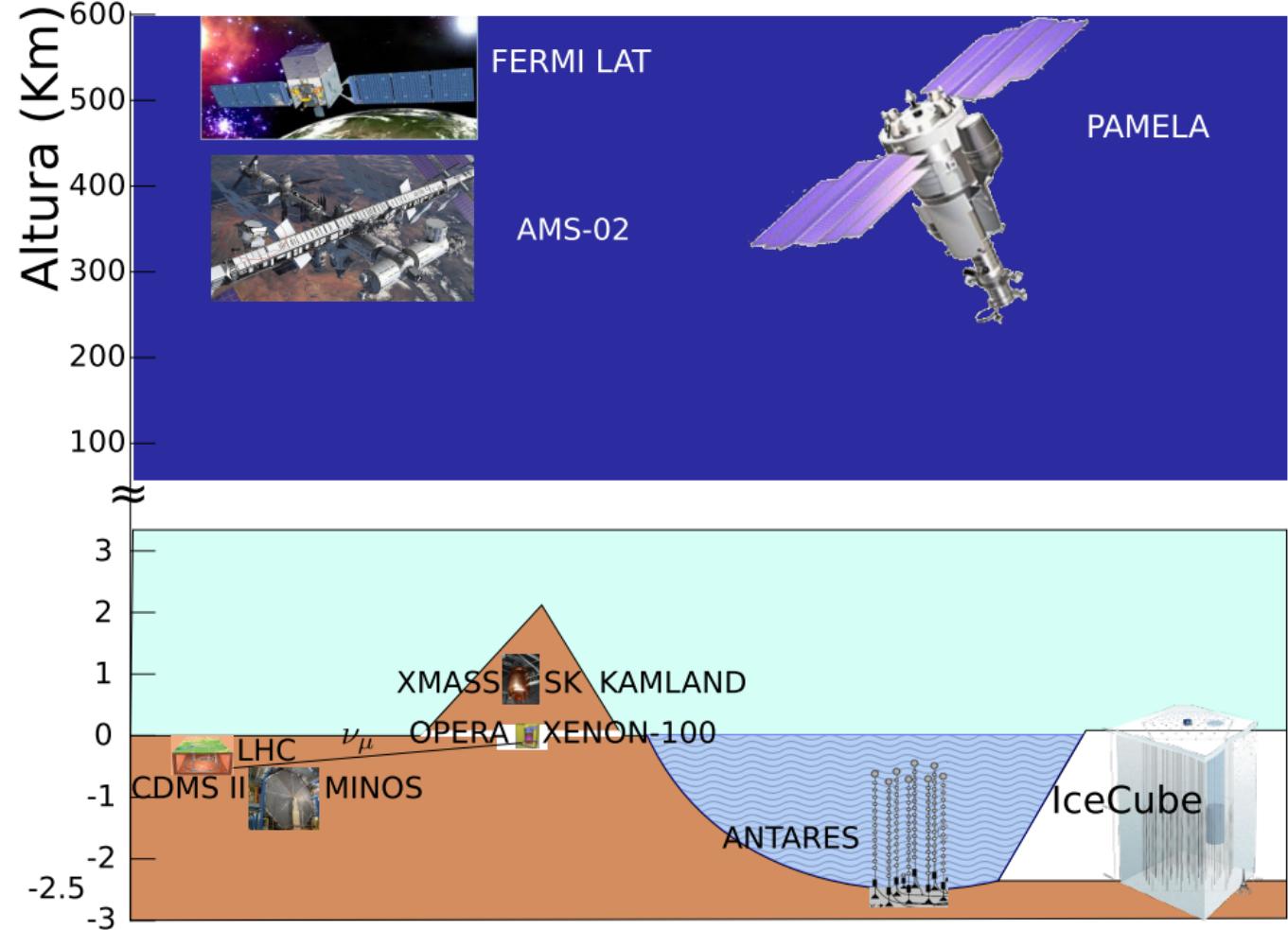


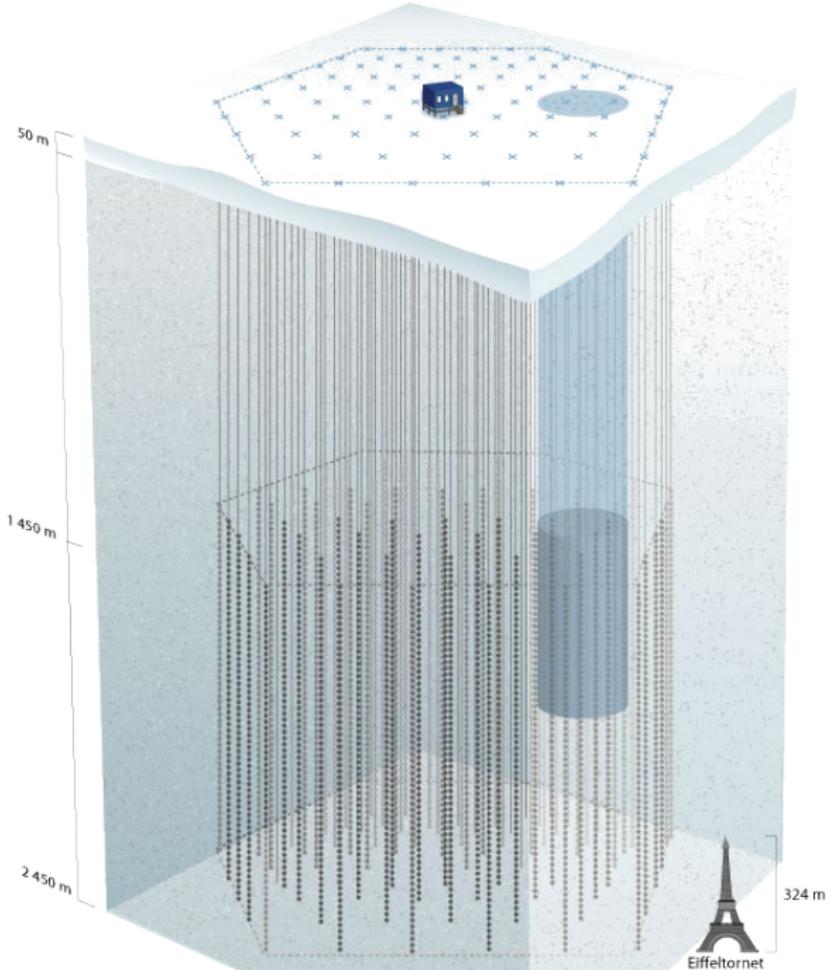


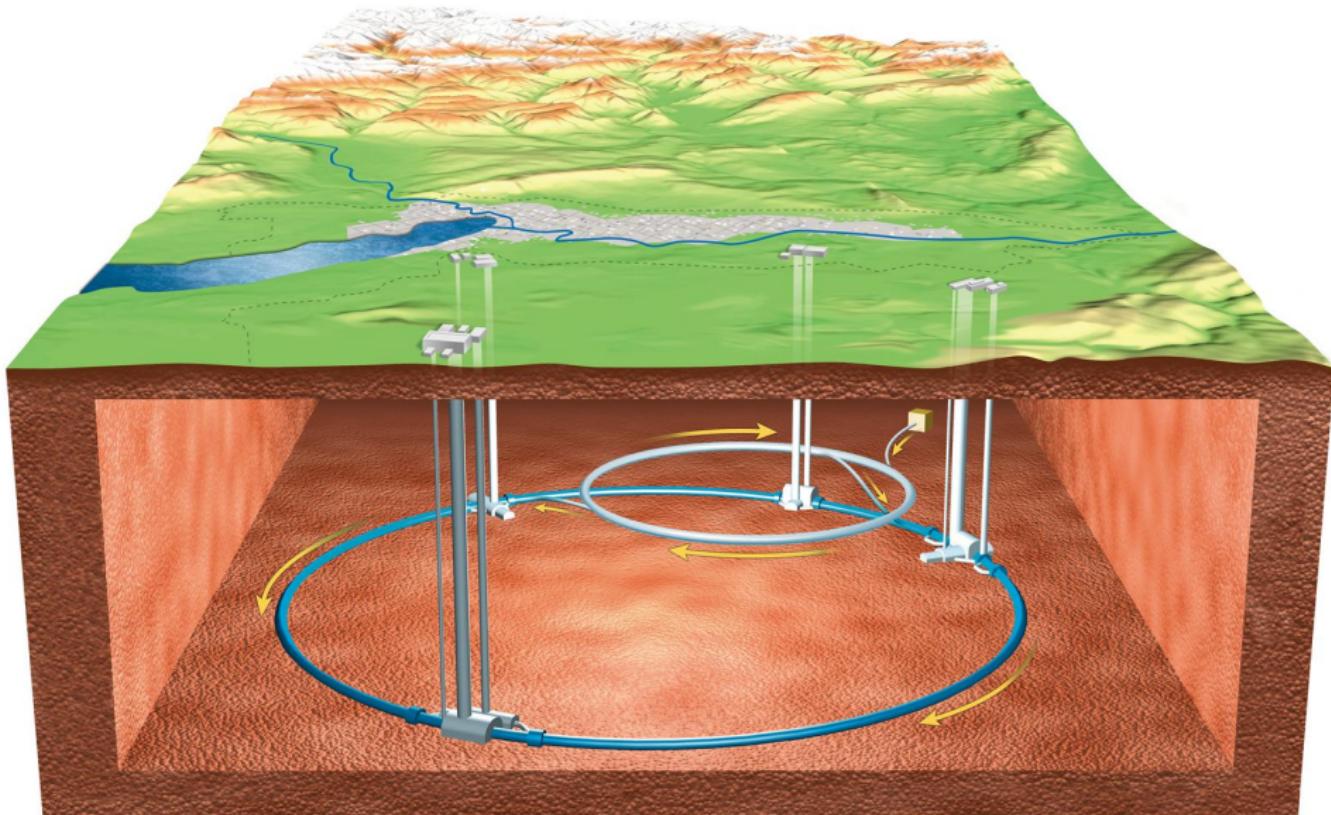












Tevatron

Type $p - \bar{p}$

Year 1988

Cost US\$ 180M Run I

US\$ 290M Run II

Energy 2 TeV

B 4.2T

Length 6.3 Km

$v_p = 0.9999995 c$

p 10^{12}^*

\bar{p} 10^{11}

Collisions 2.5 MHz,

On tape 100 Hz,

$\sim 1\text{MB/s}$

Reinjection 10 a 15 hours

Vacuum ?

Compare with Avogadro number

LHC

Type $p - p$

Year 2009

Cost 3×10^9 euros

Energy 14 TeV

B 8T

Length 27 km

$v_p = 0.999999991 c$

p $400 \times 10^{12}^*$

Collisions 600 MHz,

On tape 6 MHz,

$\sim 300\text{MB/s}$ 27TB/día

Reinjection 10 horas

Vacuum 9000 m^3 a 10^{-13} atm

Tevatron

Type $p - \bar{p}$

Year 1988

Cost US\$ 180M Run I

US\$ 290M Run II

Energy 2 TeV

B 4.2T

Length 6.3 Km

$v_p = 0.9999995 c$

*

p 10^{12}^*

\bar{p} 10^{11}

Collisions 2.5 MHz,

On tape 100 Hz,

$\sim 1\text{MB/s}$

Reinjection 10 a 15 hours

Vacuum ?

Compare with Avogadro number

LHC

Type $p - p$

Year 2009

Cost 3×10^9 euros

Energy 14 TeV

B 8T

Length 27 km

$v_p = 0.999999991 c$

p $400 \times 10^{12}^*$

Collisions 600 MHz,

On tape 6 MHz,

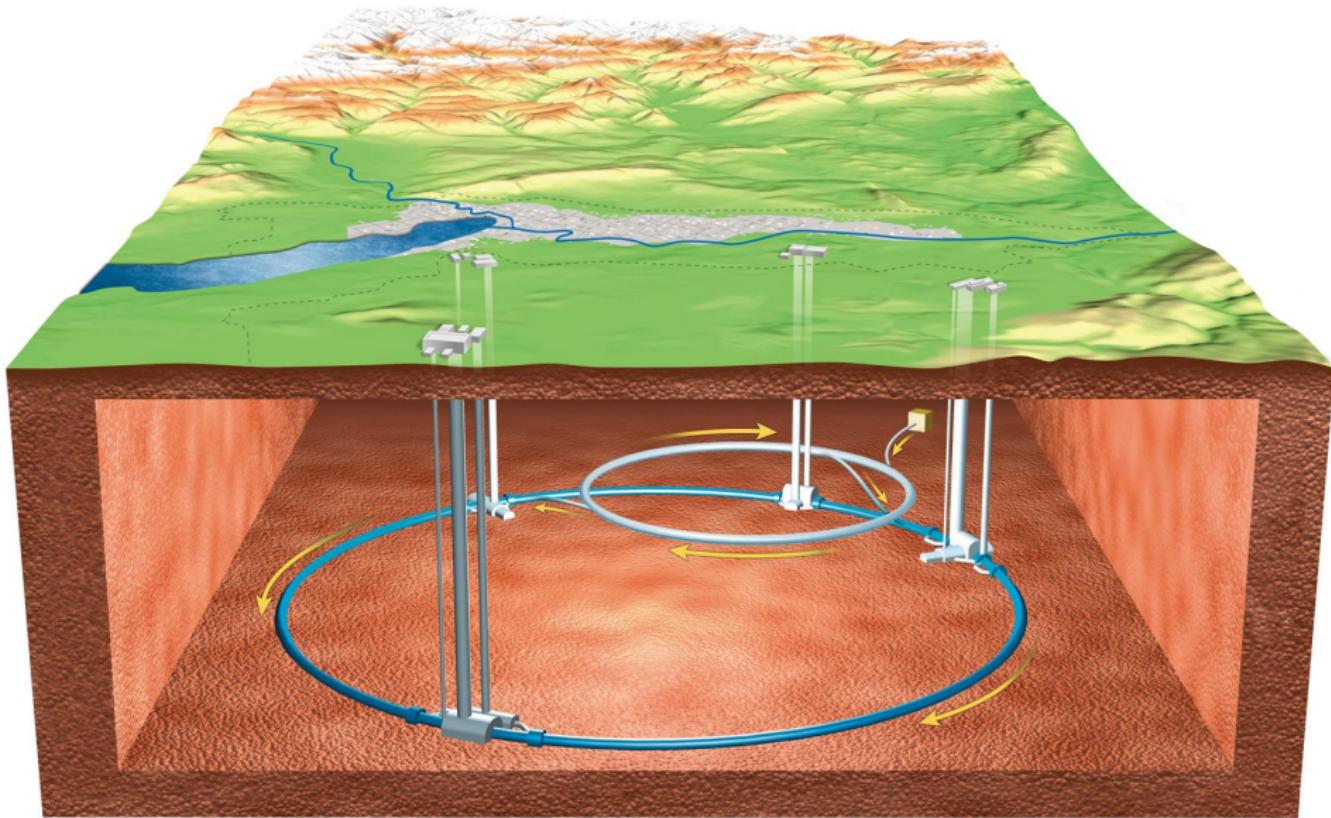
$\sim 300\text{MB/s}$ 27TB/día

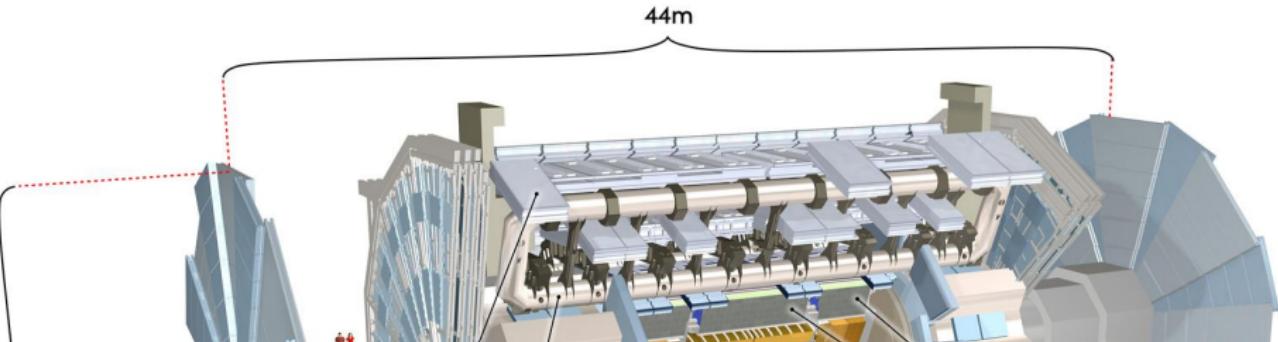
Reinjection 10 horas

Vacuum 9000 m^3 a 10^{-13} atm

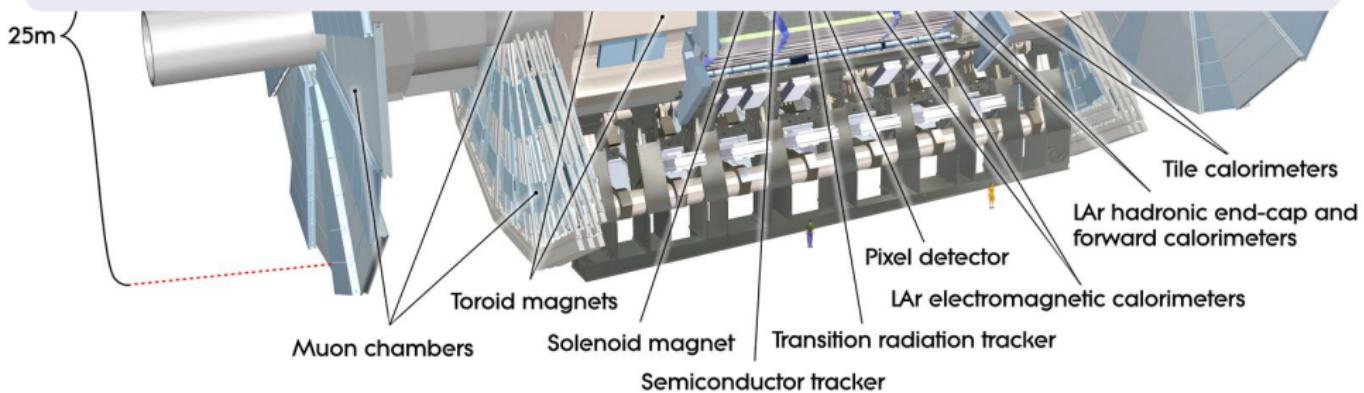
Fechas Claves

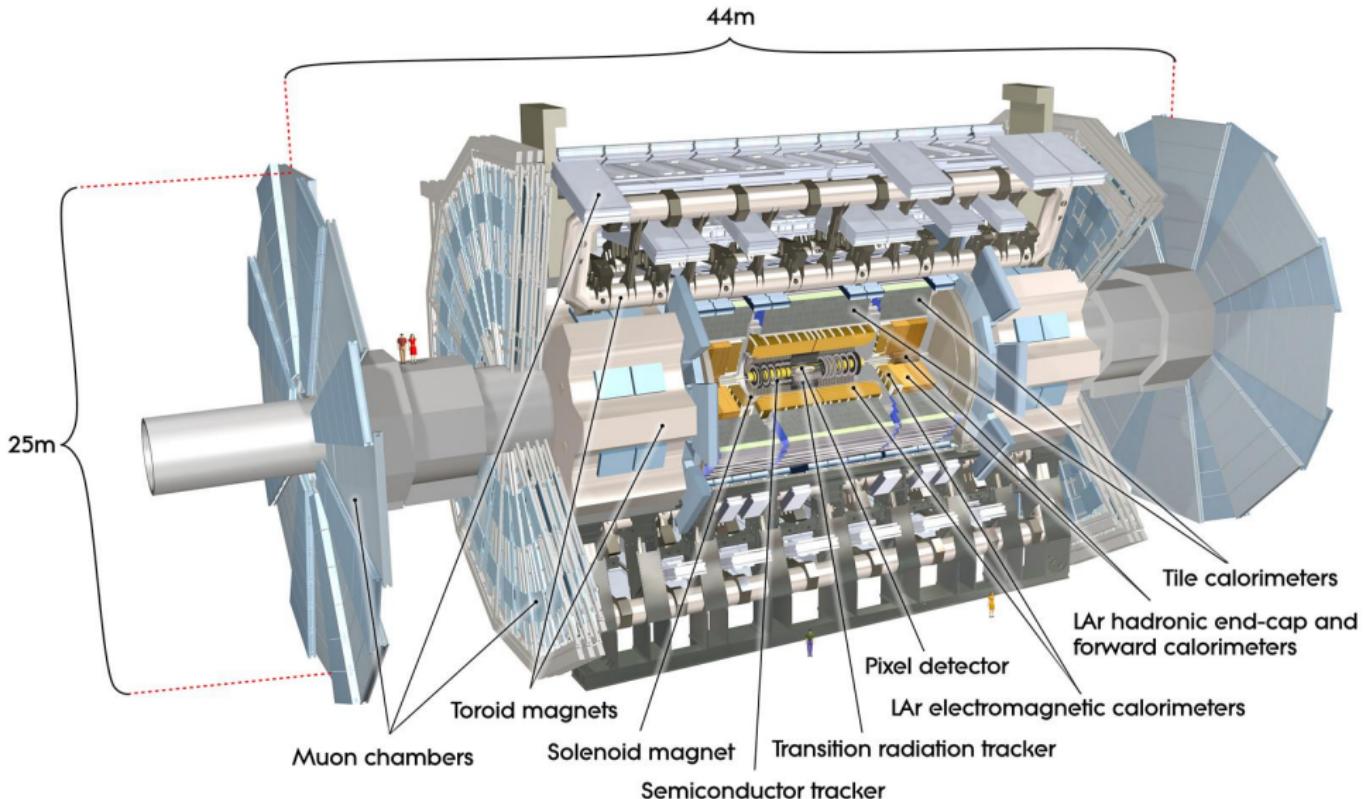
- Primer rayo: 10 de septiembre 2008
- Primer fallo: 19 de septiembre 2008
- Inaguración: 21 de Octubre 2008
- Primera colisión: 23 de noviembre 2009
- Colisiones a 7 TeV: 3 de marzo 2010 a diciembre de 2011
- Colisiones a 8 TeV: durante 2012
- Anuncio descubrimiento de una nueva particula: durante 2012
- Colisiones 14 TeV: 2014?

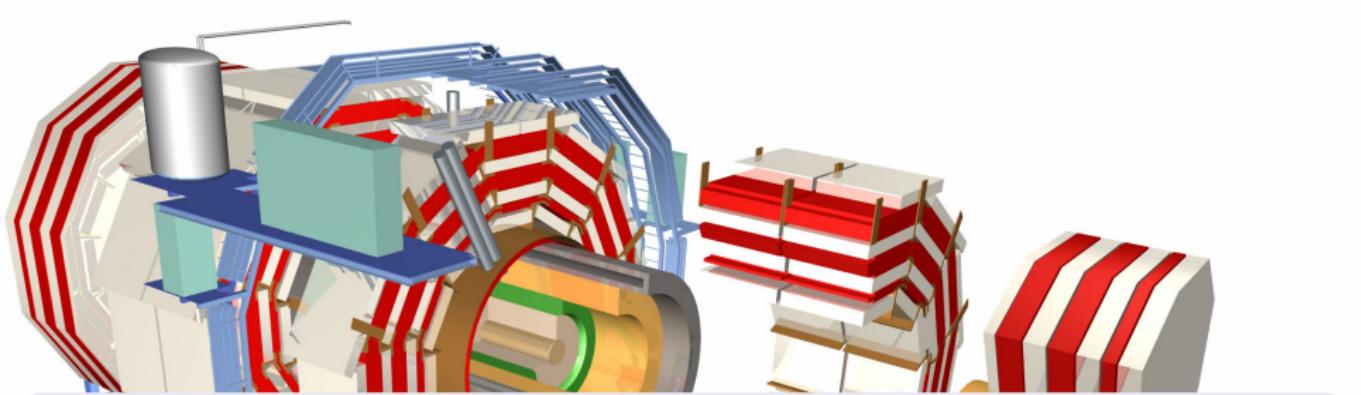




ATLAS (.co: UAN)







CMS (.co: Uniandes)

