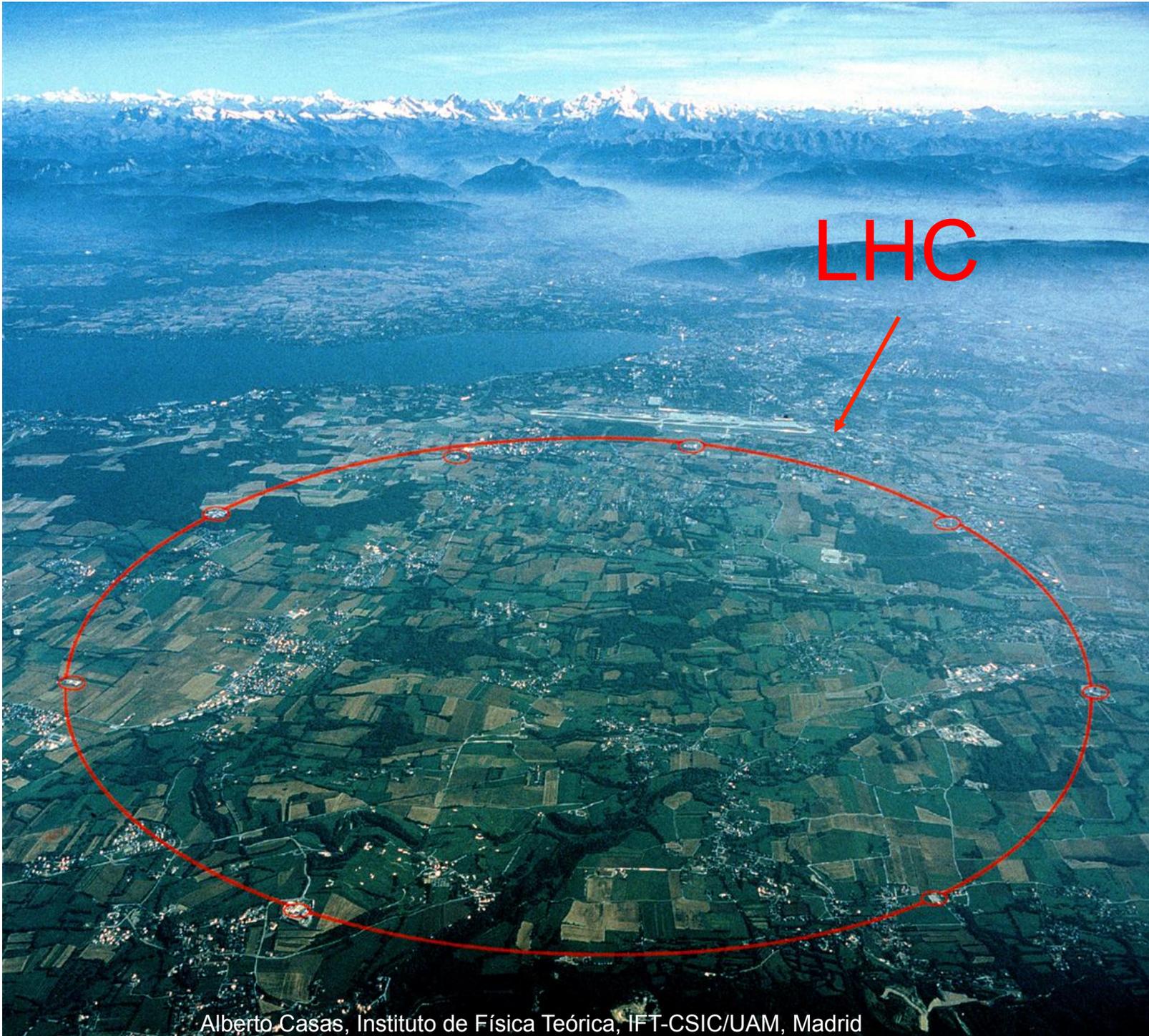


La Frontera de la Física de Partículas.

Modelo Estándar, Higgs, ...

Curso para
profesores
CSIC, 2015

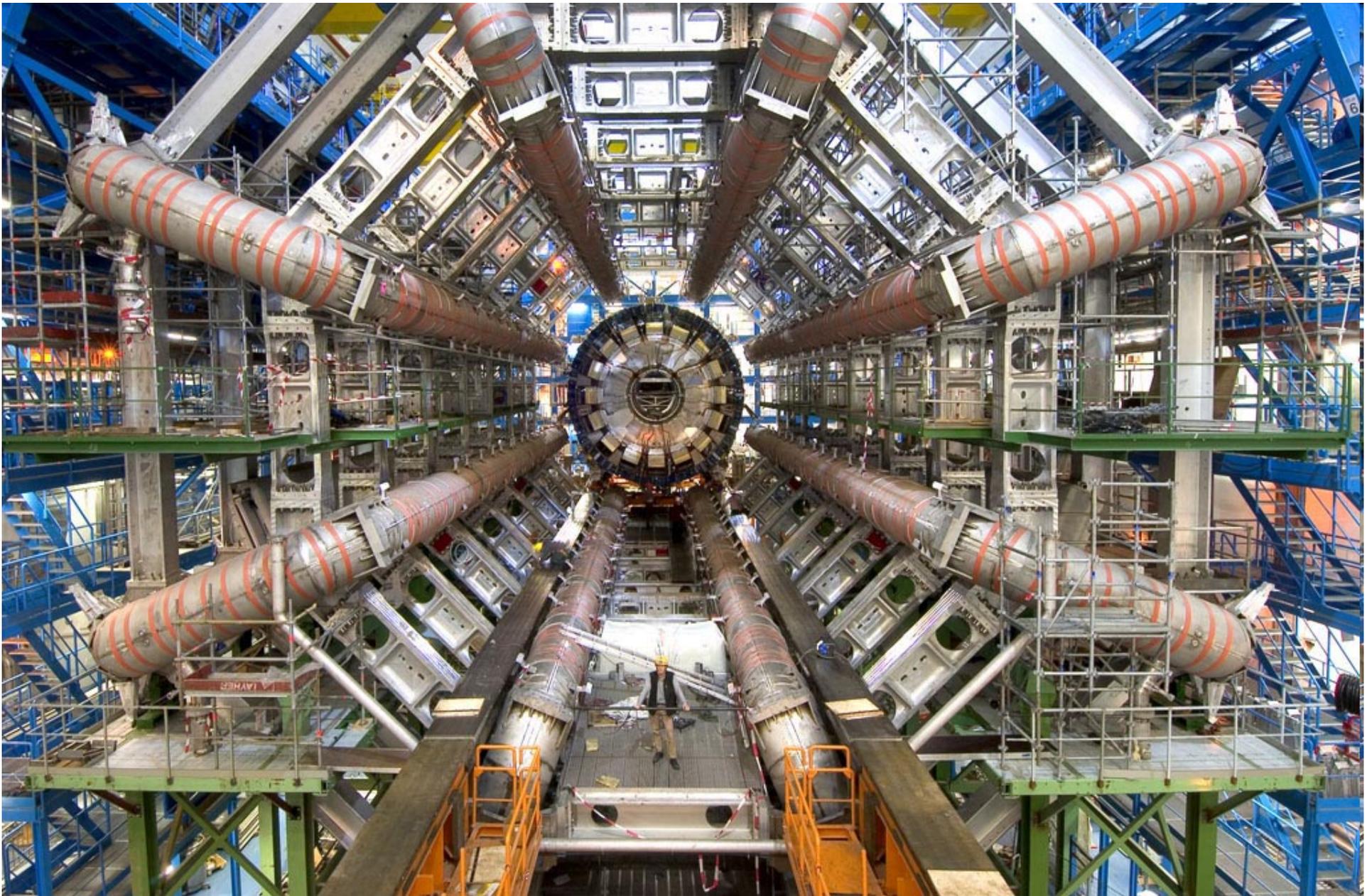
Alberto Casas
(IFT-CSIC/UAM, Madrid)



Alberto Casas, Instituto de Física Teórica, IFT-CSIC/UAM, Madrid



Alberto Casas, Instituto de Física Teórica, IFT-CSIC/UAM, Madrid



Alberto Casas, Instituto de Física Teórica, IFT-CSIC/UAM, Madrid

EL LHC es una máquina para acelerar y hacer chocar protones a enormes energías.

En cada colisión se producen cientos de partículas.



Del estudio de estas partículas se espera obtener información nueva y crucial para nuestra comprensión de la naturaleza.

EL objetivo del **LHC** es traspasar la frontera actual del conocimiento básico sobre la naturaleza

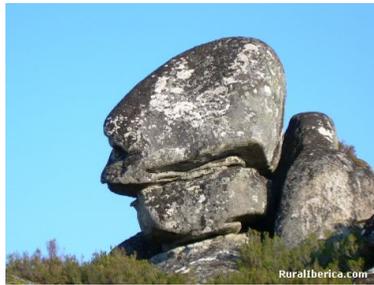
¿Por qué...?



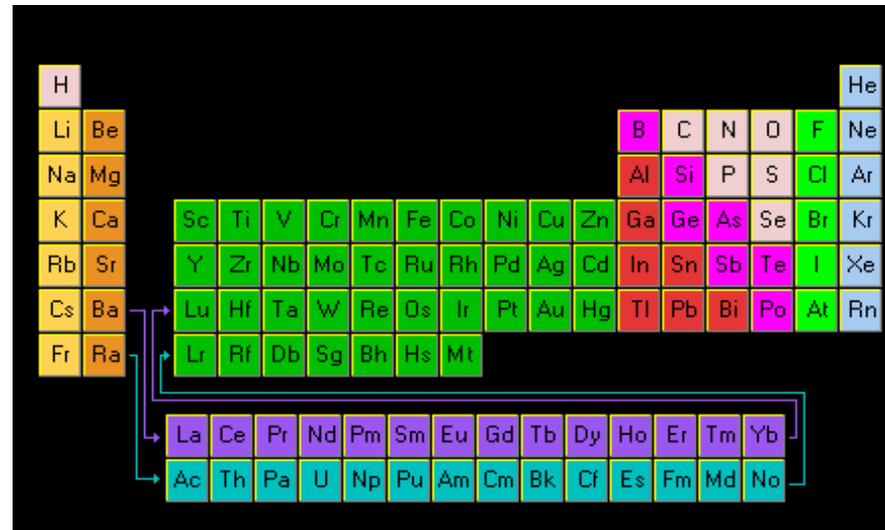
Alberto Casas, Instituto de Física Teórica, IFT-CSIC/UAM, Madrid

¿Por qué hay tantas sustancias y objetos diversos?





Mendeleiev
(1867)



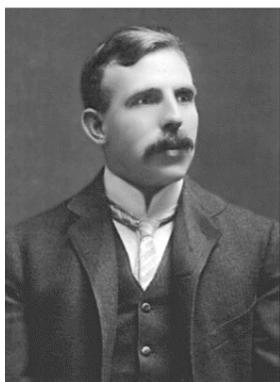
H																	He
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
Cs	Ba	Lu	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
Fr	Ra	Lr	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt									
		La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb		
		Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No		

Tabla Periódica

The periodic table is displayed with various elements colored in groups: H (white), He (white), Li-Be (orange), Na-Mg (orange), K-Ca (orange), Rb-Sr (orange), Cs-Ba (orange), Fr-Ra (orange), B (pink), C (pink), N (pink), O (pink), F (green), Ne (white), Al (orange), Si (pink), P (pink), S (pink), Cl (green), Ar (white), Sc (green), Ti (green), V (green), Cr (green), Mn (green), Fe (green), Co (green), Ni (green), Cu (green), Zn (green), Ga (orange), Ge (pink), As (pink), Se (pink), Br (green), Kr (white), Y (green), Zr (green), Nb (green), Mo (green), Tc (green), Ru (green), Rh (green), Pd (green), Ag (green), Cd (green), In (orange), Sn (pink), Sb (pink), Te (pink), I (green), Xe (white), Lu (green), Hf (green), Ta (green), W (green), Re (green), Os (green), Ir (green), Pt (green), Au (green), Hg (green), Tl (orange), Pb (orange), Bi (pink), Po (pink), At (green), Rn (white), La-Lu (purple), Ac-Lr (purple), and the bottom row (Ac-Th, Pa-U, Np-Pu, Am-Cm, Bk-Cf, Es-Fm, Md-No) in cyan. Blue arrows point from the bottom row of the periodic table to the atomic model section.



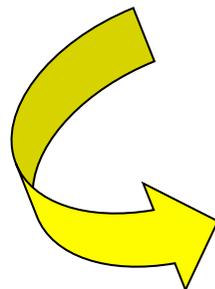
Tabla Periódica



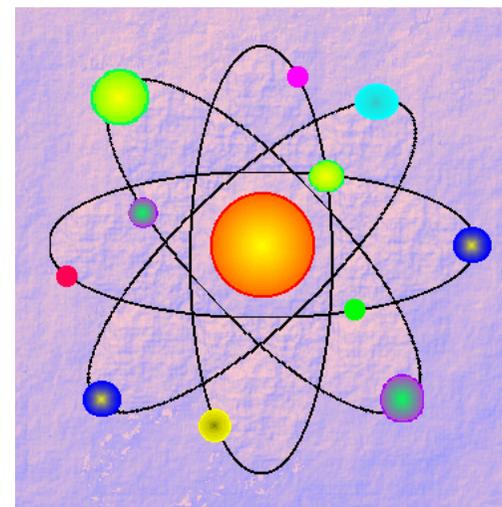
Rutherford
(1909)

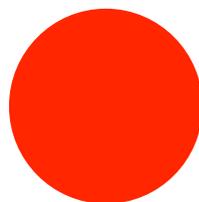
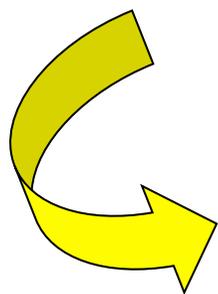
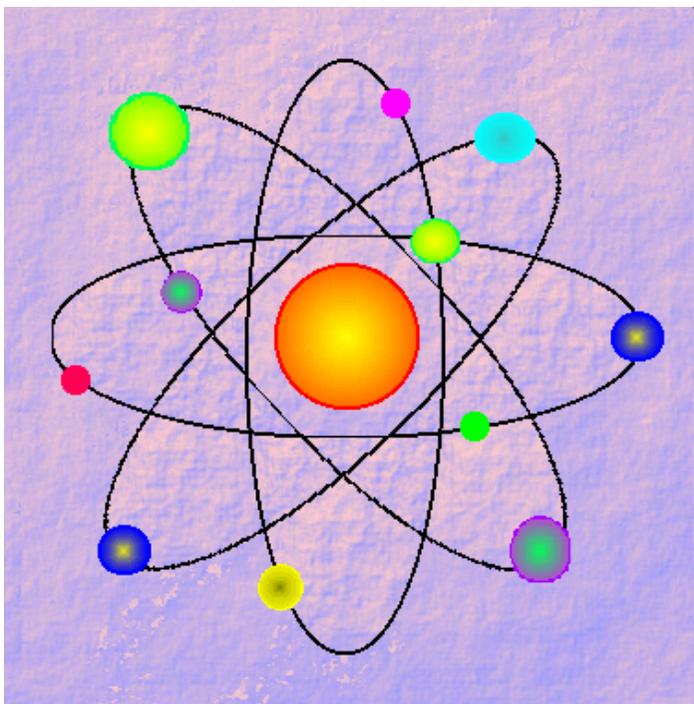


Bohr
(1913)

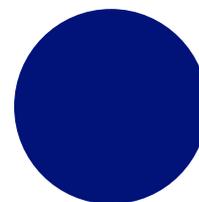


Átomo





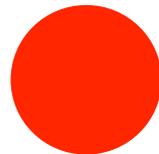
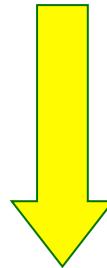
protón



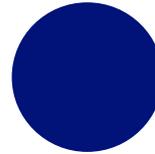
neutrón



electrón



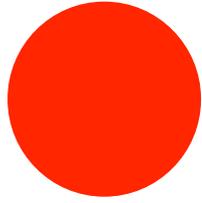
protón



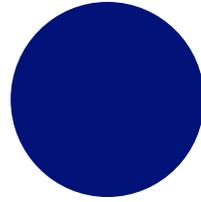
neutrón



electrón



protón



neutrón



electrón

¿Por qué existen estas tres partículas
y a qué se deben sus propiedades?

Esta pregunta sólo ha podido ser
respondida parcialmente

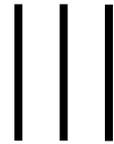
**Aquí es donde chocamos con la
frontera básica del conocimiento**

Todo lo que sabemos sobre las
partículas elementales está
sistematizado en una teoría de gran
éxito:

El Modelo Estándar



Frontera actual



Modelo Estándar

Modelo Estándar

(~1980)

Simetría

The diagram features a central yellow starburst containing the word 'Simetría'. Two red arrows originate from the top corners of this starburst and point downwards to two rounded rectangular boxes. The left box is pink and contains the text 'Componentes de la Materia'. The right box is cyan and contains the text 'Interacciones'. Above the starburst, a yellow rounded rectangle contains the text 'Modelo Estándar', and to its right, the text '(~1980)' is written in purple.

**Componentes de la
Materia**

Interacciones

Materia

1932

p, n, e, ν

1937

μ

1940s

mesones π, K

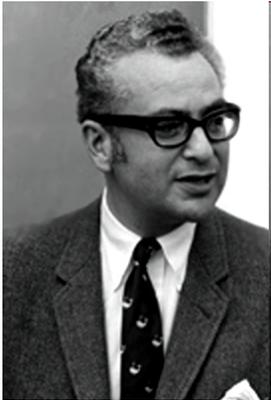
1950s

partículas $\Lambda, \Delta, \Sigma, \dots$

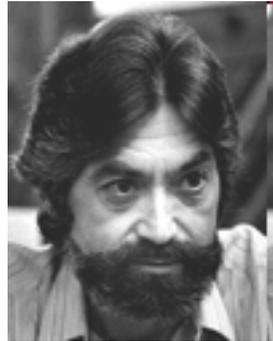
...Actualmente se conocen unas 300 partículas

En 1964 se propuso la idea de los

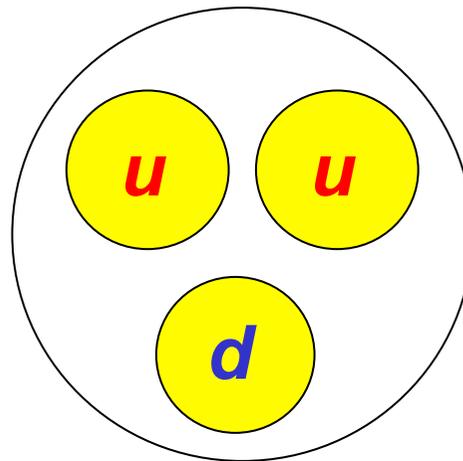
quarks



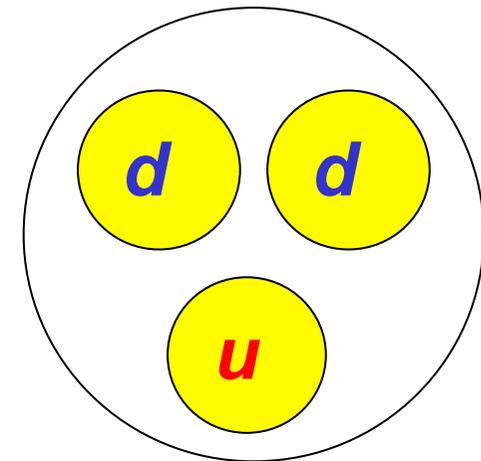
Gell-Mann



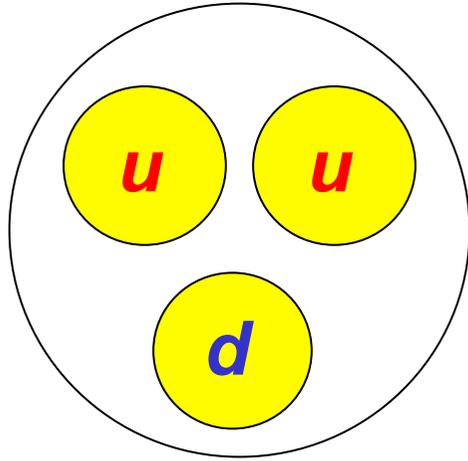
Zweig



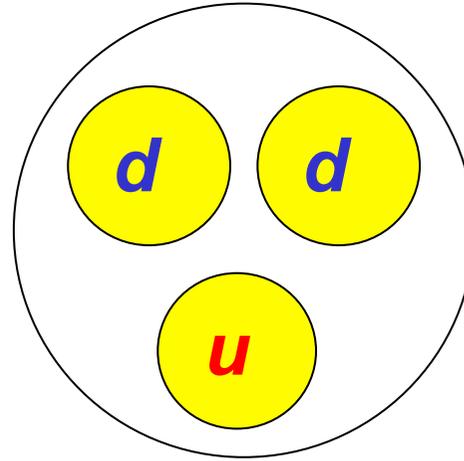
protón



neutrón



protón



neutrón

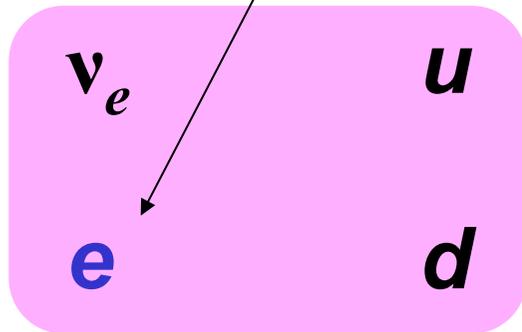
- ★ ¿Qué mantiene unidos a los quarks?
- ★ ¿Por qué no se ha visto nunca un quark libre?
- ★ ...



1^a familia de partículas elementales

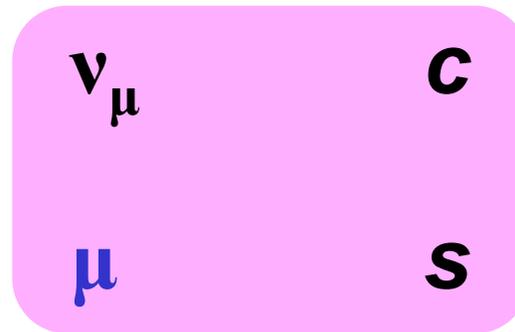
casi todo está hecho con ellas

1897

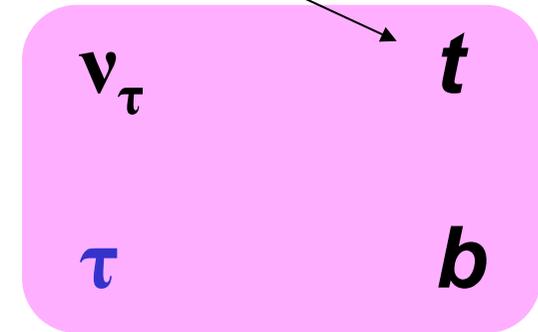


1^a familia

1995



2^a familia

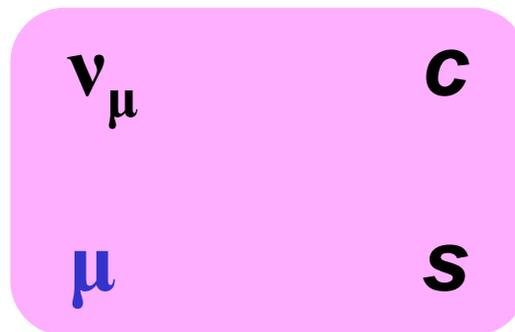


3^a familia

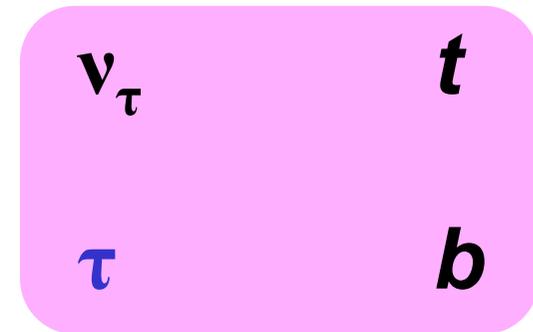




1^a familia



2^a familia



3^a familia

¿Por qué?

Masas de las partículas

e	0,0005		μ	0,106		τ	1,78	} leptones
ν_e	?		ν_μ	?		ν_τ	?	
u	0,002		c	1,25		t	173	} hadrones
d	0,004		s	0,095		b	4.2	

1^a

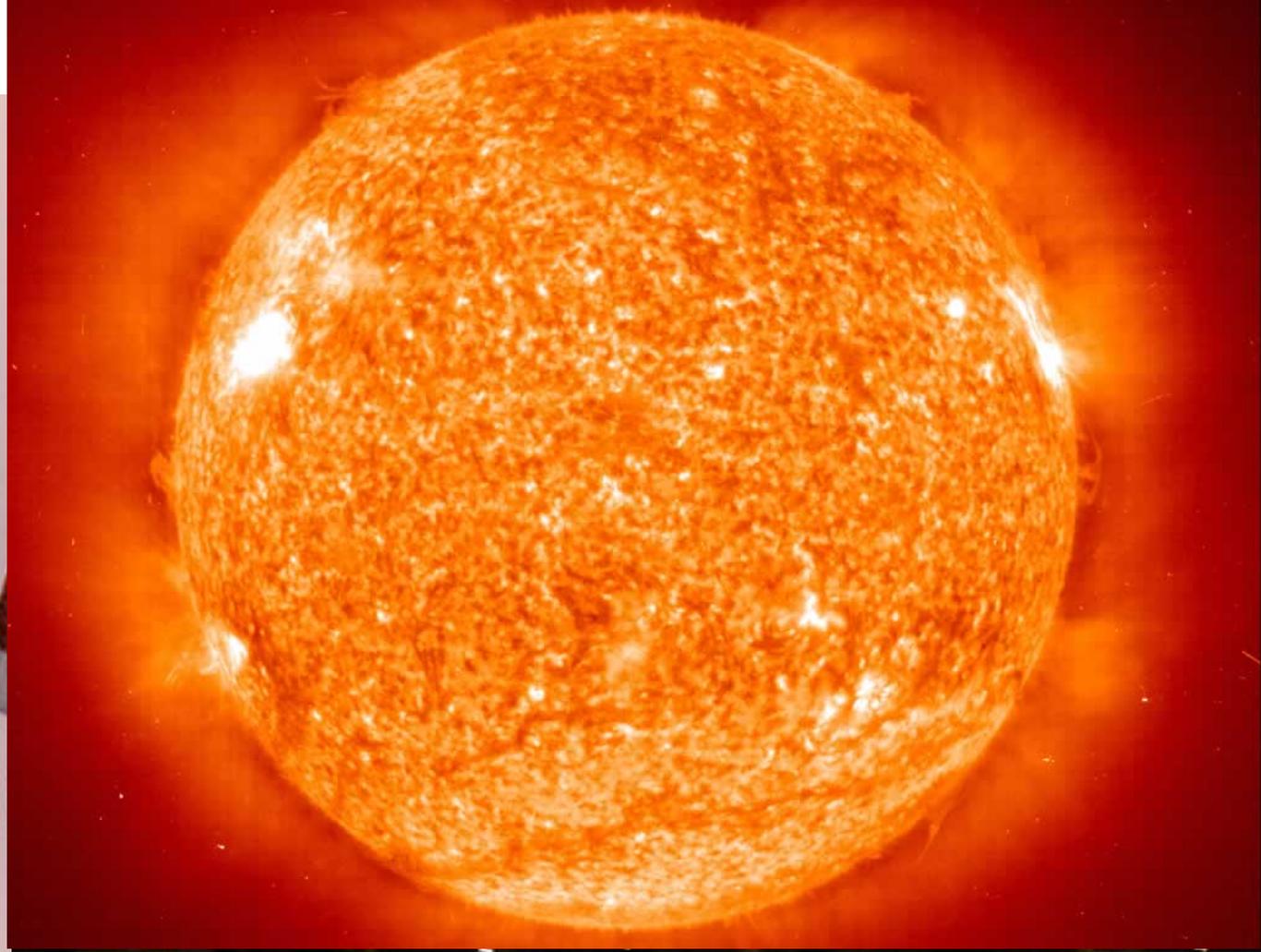
2^a

3^a

(en *GEV*)

Interacciones

Alberto Casas, Instituto de Física Teórica, IFT-CSIC/UAM, Madrid



**Todas estas interacciones son manifestaciones
de sólo**

4 interacciones básicas

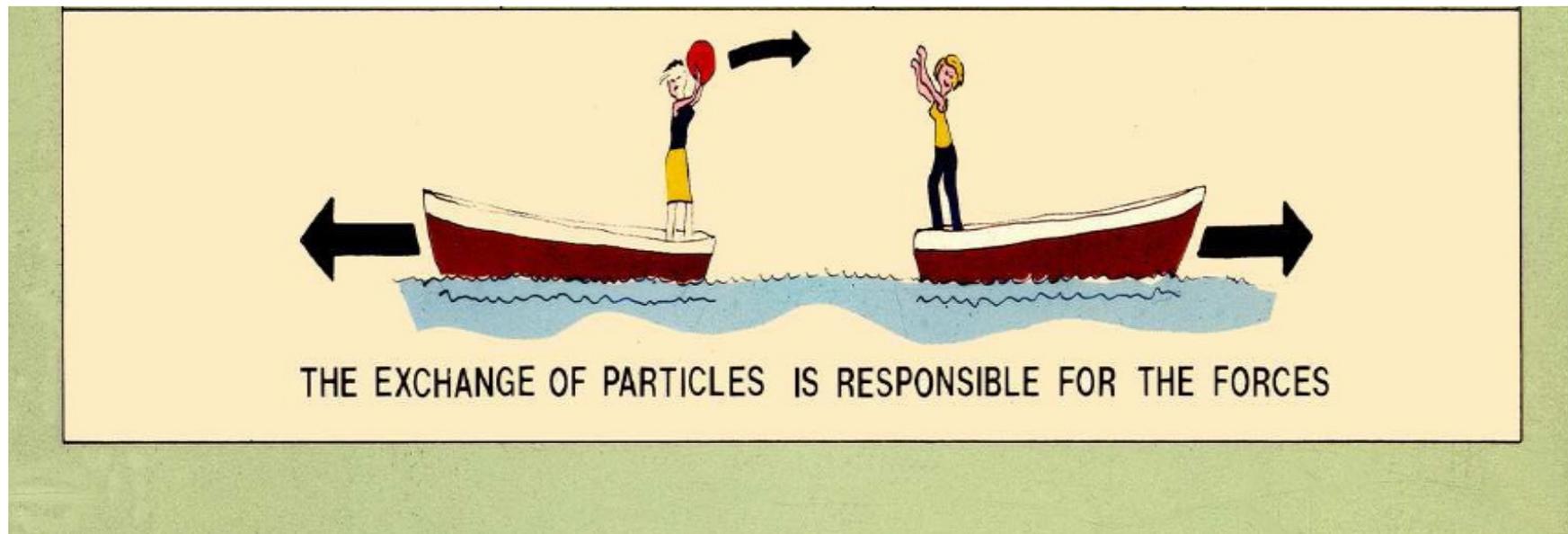
gravitatoria

fuerte

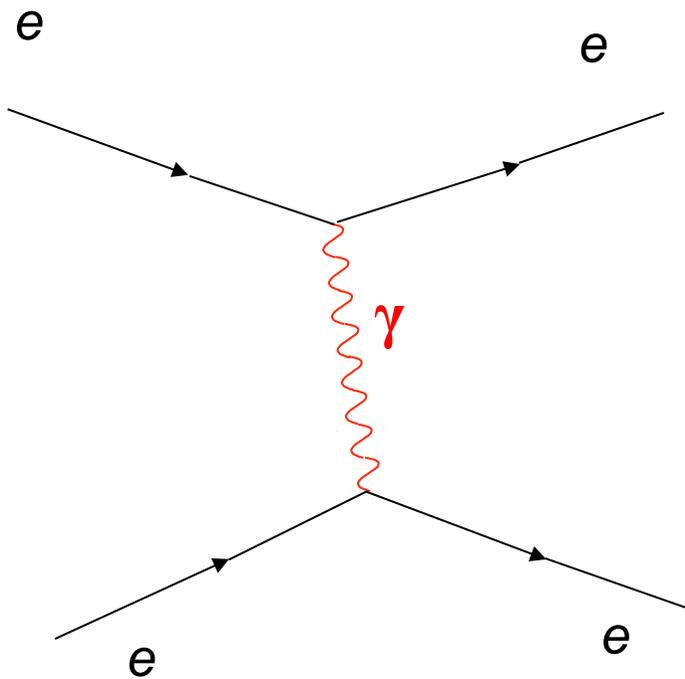
electromagnética

débil

Estas interacciones están mediadas por otras partículas: **mensajeras de la interacción**



Estas interacciones están mediadas por otras partículas: **mensajeros de la interacción**



Interacción Electromagnética

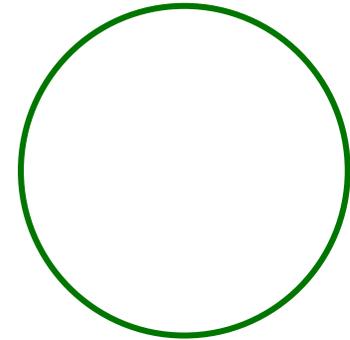
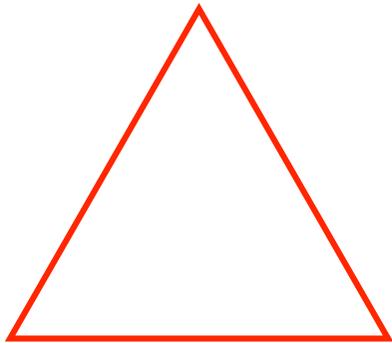
≡ Intercambio de fotones

Tipo de Interacción	Partícula Mediadora
Electromagnética	γ (fotón)
Fuerte	g (gluón)
Débil	bosones W, Z
Gravitatoria	G (gravitón)

**¡tienen
masa!**

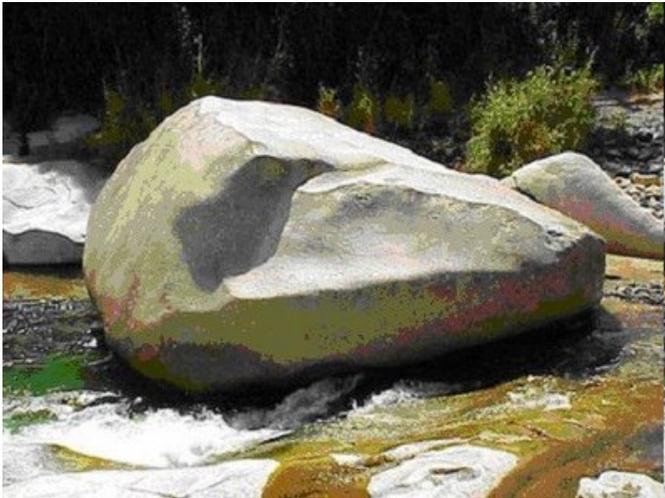
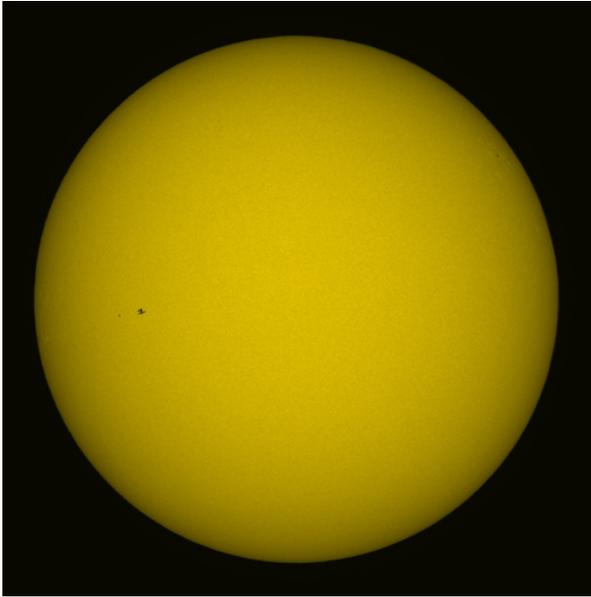
Simetría

...Quizá el concepto más importante en la física de partículas moderna



Simetría \equiv Invariancia bajo transformaciones

**¿ Presenta la naturaleza alguna
simetría ?**



Lo verdaderamente fundamental **no** son los objetos, sino las **leyes de la física** que los originan.

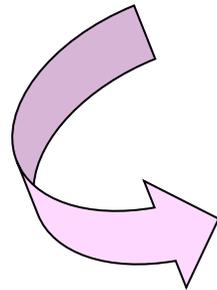
... y las leyes de la física tienen una enorme simetría

Es decir, quedan invariantes bajo ciertas transformaciones matemáticas

Por ejemplo:

**Las leyes de la física tienen
invarianza temporal:**

no cambian con el tiempo



**Conservación de
la Energía**

- Traslaciones temporales

Conserv. de la energía

- Traslaciones espaciales

Conserv. del momento

- Rotaciones

Conserv. del mom. angular

- Cambios de sistema de referencia
(transformaciones relativistas)

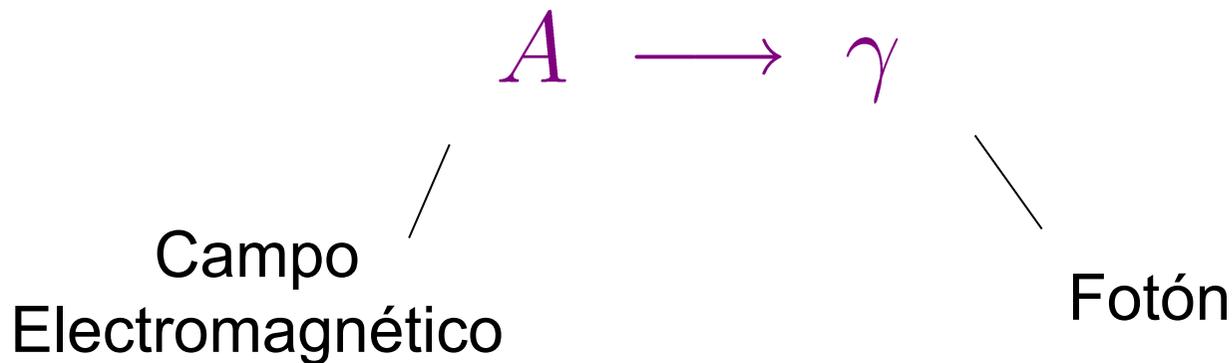
masa y espín

...y aún hay más simetría

Simetrías Internas

En una Teoría Cuántica de Campos (como el Modelo Estándar), los **objetos fundamentales** no son las partículas sino los **campos**.

Las partículas son las excitaciones (cuánticas) del campo



Esto da posibilidades de nuevas simetrías

Imaginemos una teoría que depende de dos campos: $A(x), B(x)$

pero sólo a través de la combinación $A + B$



la teoría es invariante bajo la transformación:

$$A \rightarrow A + q$$

$$B \rightarrow B - q$$

simetría interna



Emmy Noether
(1915)

Las simetrías internas también producen cantidades conservadas

¡La conservación de la carga eléctrica proviene de una simetría interna de las ecuaciones del Electromagnetismo!

EM

$U(1)_{EM}$

Simetrías Locales

$$A \rightarrow A + q$$

$$B \rightarrow B - q$$

Si la simetría es válida para cualquier $q(x)$



simetría local

Simetrías locales



Interacciones



Yang & Mills
(1954)

Las partículas
mediadoras de esas
interacciones han de
ser bosones **sin masa**

Las interacciones básicas de la naturaleza son consecuencia de simetrías subyacentes

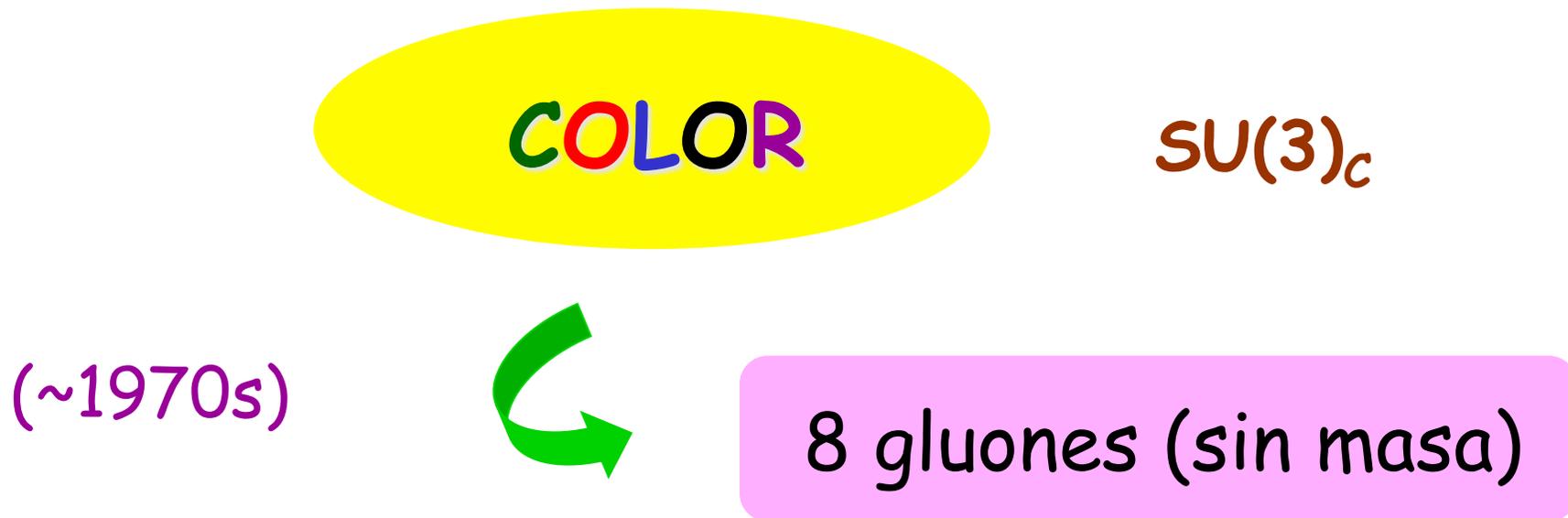
¡ La simetría **EM** es local !

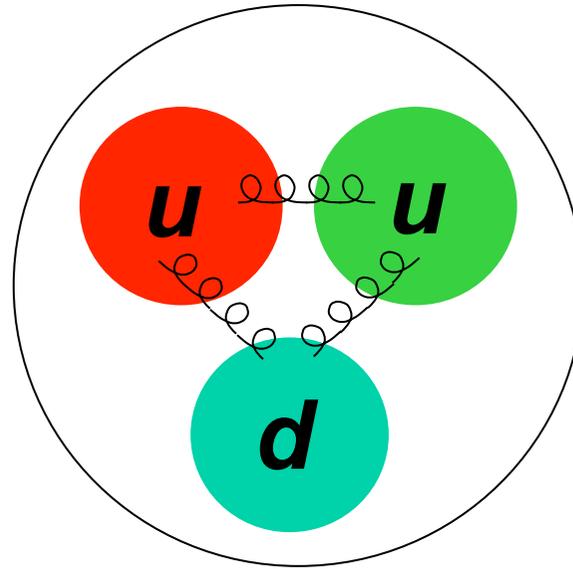
La interacción
electromagnética y
los **fotones**...

... son consecuencia
de una **simetría local**
de la naturaleza

Interacciones fuertes:

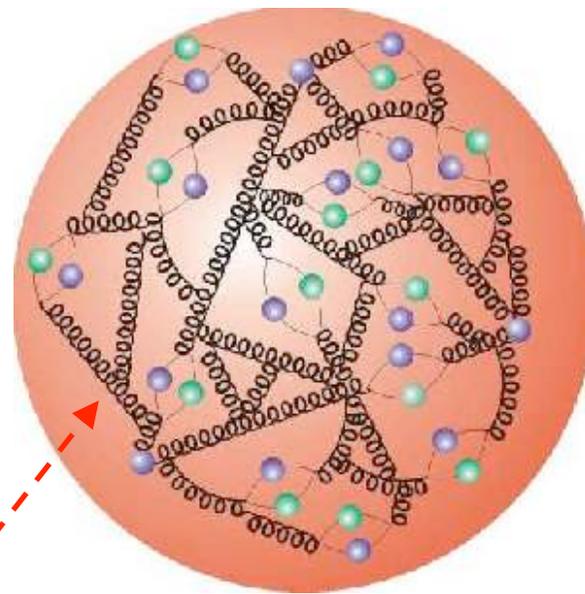
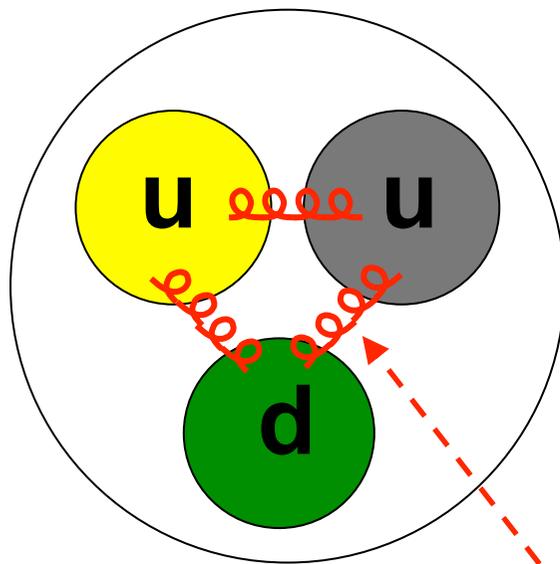
... son consecuencia de
otra simetría local:





protón

protón

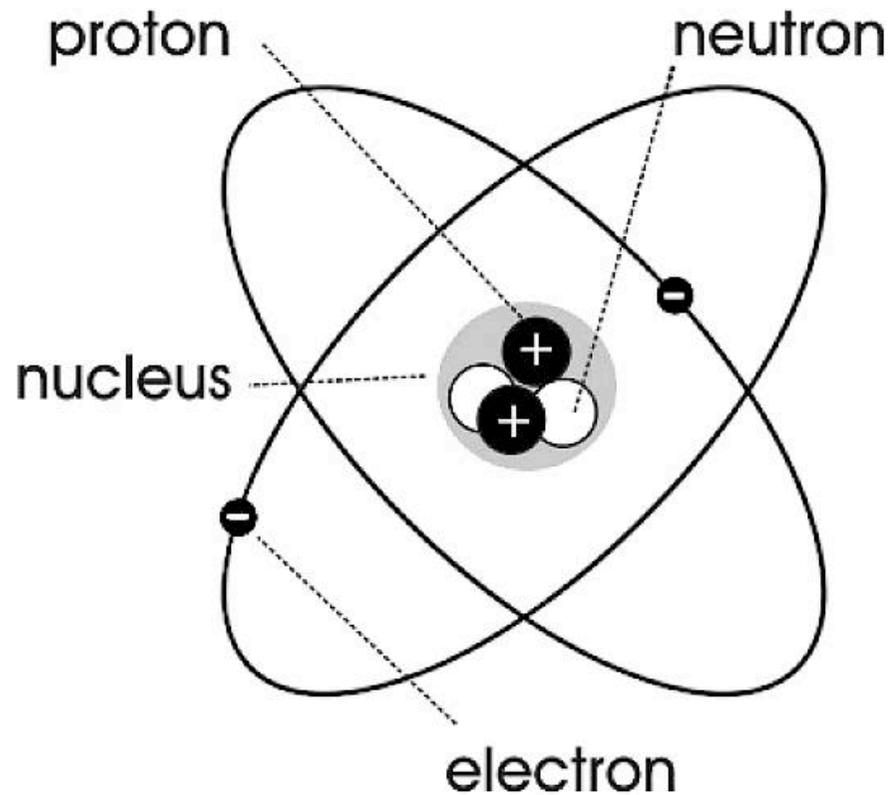


gluones

$$M_{\text{proton}} \simeq 1 \text{ GeV}$$

$$m_u \simeq 0,002 \text{ GeV}$$

$$m_d \simeq 0,005 \text{ GeV}$$

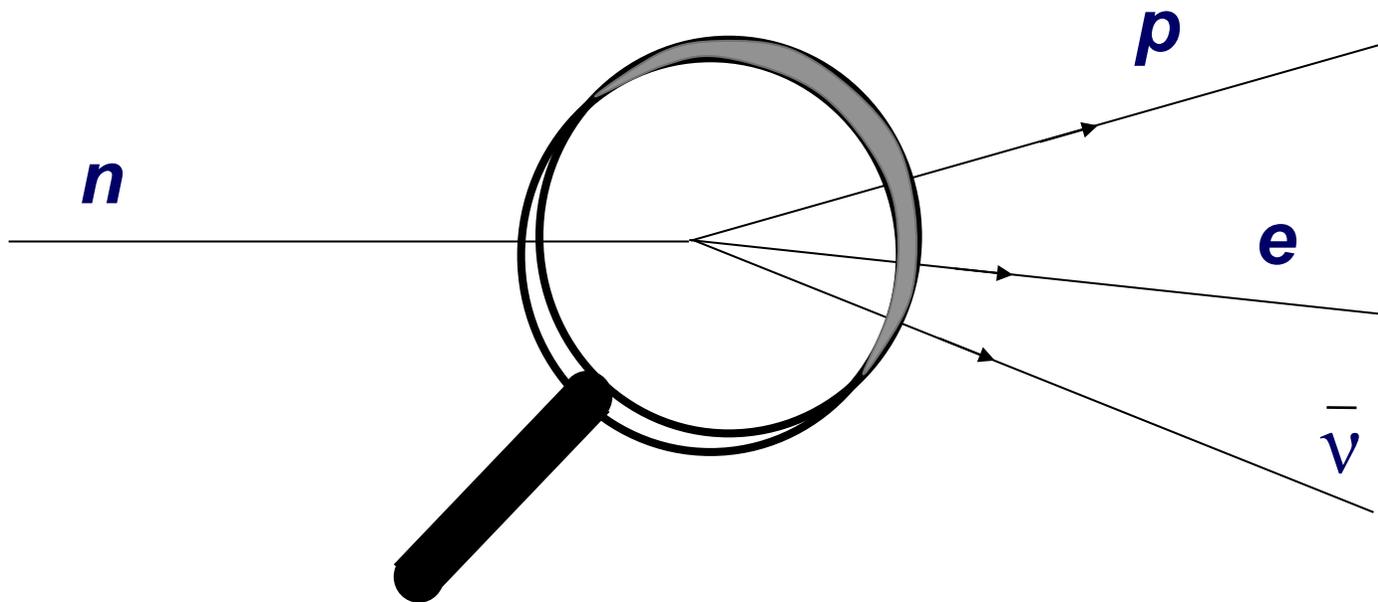


La mayor parte de la masa de un átomo proviene de las **interacciones fuertes** que mantienen unidos los quarks dentro de los protones y los neutrones

Sin embargo las masas del electrón y de los quarks tienen importancia crucial

- Gracias a $M_{\text{electron}} \neq 0$ el núcleo puede atrapar a los electrones
- Desde el punto de vista teórico, estas masas son aún más importantes. ¿Por qué tienen masa los quarks y electrones?

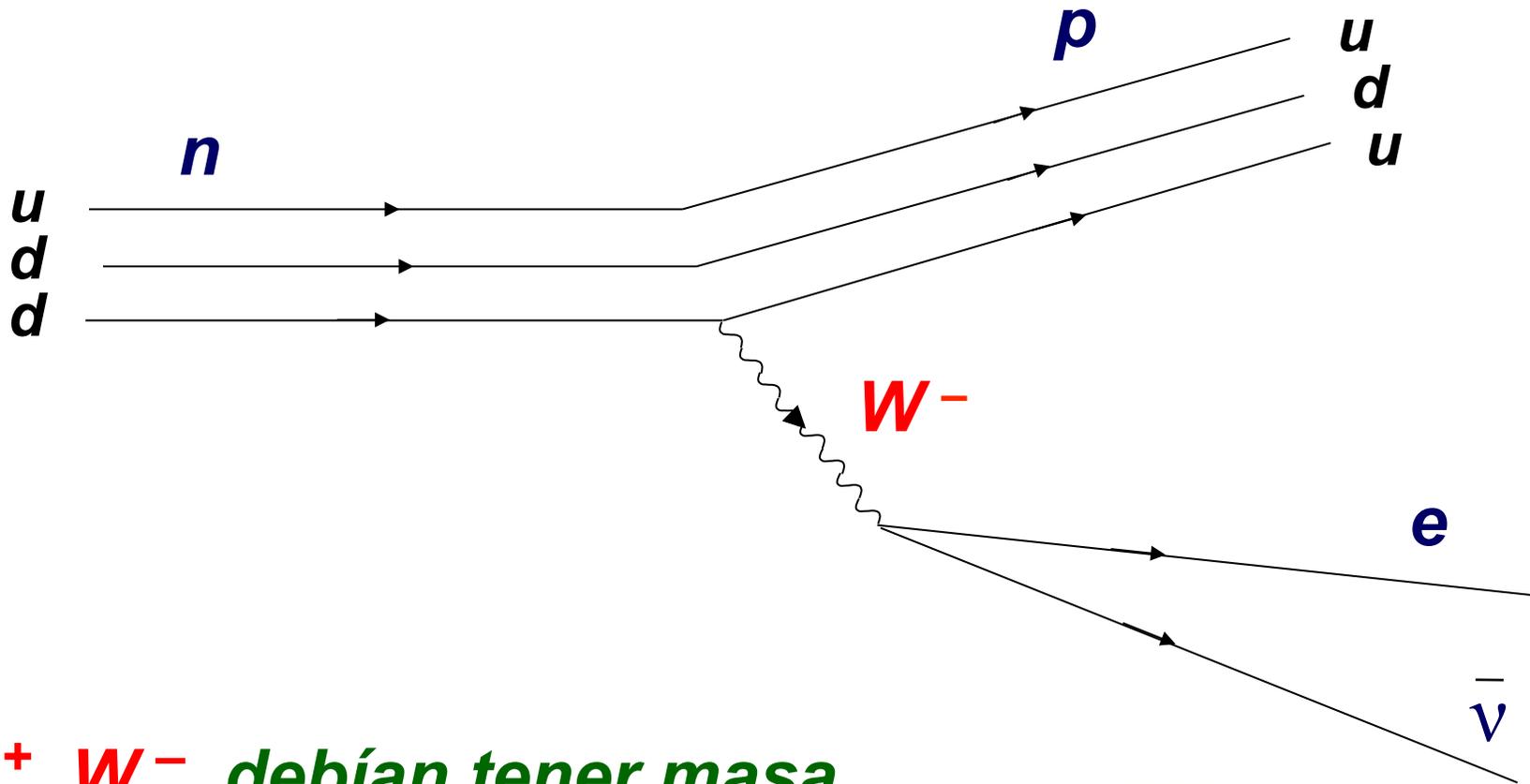
Interacciones débiles:



Fermi (1933)



Interacciones débiles:



W^+ , W^- debían tener masa

problema

Simetrías

Leyes de
conservación

Interacciones

Partículas
Mediadoras

Las interacciones básicas de la naturaleza son consecuencia de simetrías subyacentes

Tipo de Interacción	Partícula Mediadora
Electromagnética	γ (fotón)
Fuerte	g (gluón)
Débil	bosones W, Z
Gravitatoria	G (gravitón)

La masa se lleva **mal** con la simetría

¡ Las simetrías del Modelo Estándar parecen requerir que **todas** las partículas tengan **masa cero** !

Además...

No podemos simplemente **renunciar** a las simetrías del Modelo Estándar

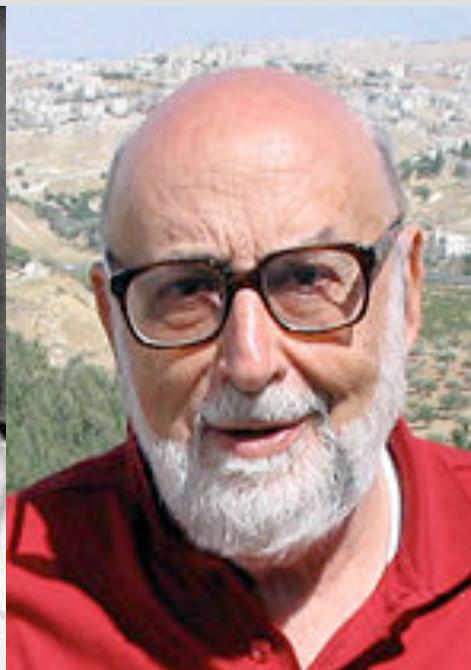
¡ Sin las simetrías la teoría se vuelve **inconsistente!**



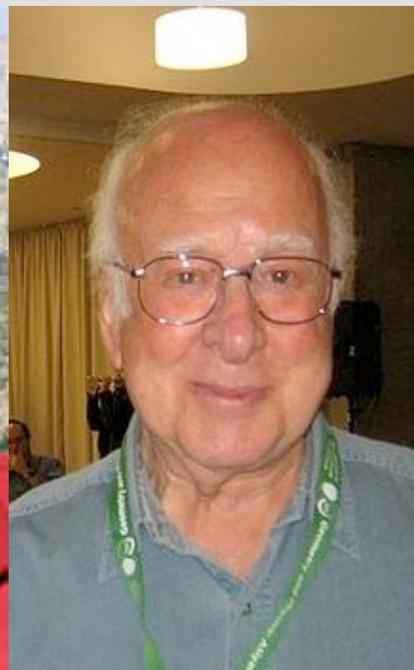
Necesitamos un mecanismo
que dé masa a las partículas sin
estropear la simetría



R. Brout



F. Englert



P. Higgs

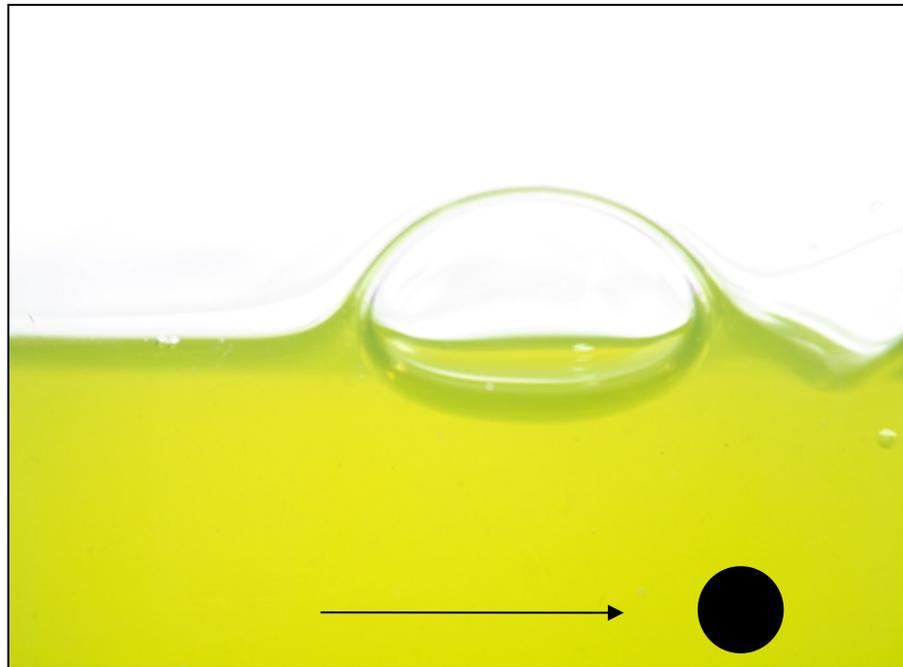
Mecanismo de Higgs

1964

Una imagen sencilla del mecanismo de Higgs

Mecanismo de Higgs

Existe un campo (campo de Higgs) que llena todo el espacio, como un líquido viscoso.



masa



Fricción con el
líquido viscoso

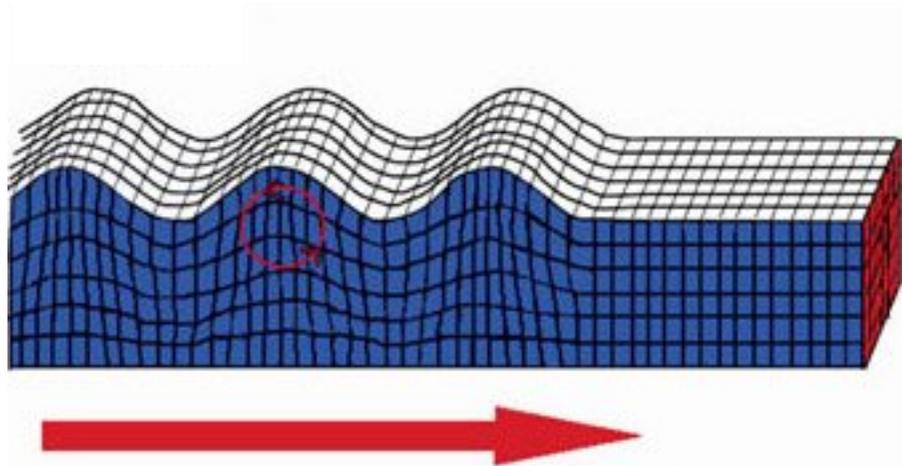
Si esta hipótesis es correcta, debe existir una nueva partícula “especial”:

el bosón de Higgs

Bosón de Higgs



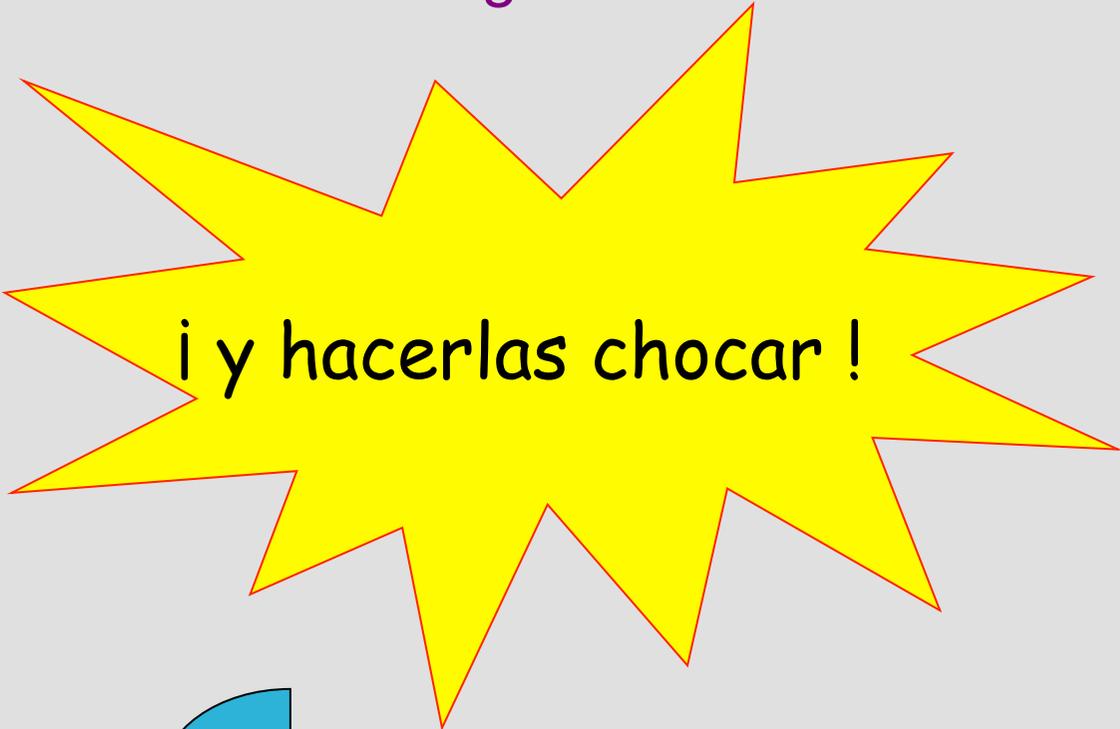
Ondas en el líquido viscoso



Para producir bosones de Higgs
tenemos que

agitar el vacío

Y para “agitar el vacío” necesitamos una máquina que permita acelerar las partículas hasta enormes energías



¡ y hacerlas chocar !



LHC

Una explicación más exacta (y difícil...)

¡para
estudiantes
excelentes!



$\psi \equiv$ electrón

Transf. de simetría: $\psi \longrightarrow q \psi$

Término de masa: $m \psi^2$



El término de masa
se transforma:

$$m \psi^2 \longrightarrow q^2 m \psi^2$$



$\psi \equiv$ electrón

$H \equiv$ Higgs

Transf. de simetría: $\psi \longrightarrow q \psi$
 $H \longrightarrow H/q^2$

En vez del término de masa, $m \psi^2$, escribimos:

$$H \psi^2$$

$$H \psi^2 \longrightarrow H \psi^2$$



...pero $H \psi^2$ **no** es un término de masa,
sino una **interacción**



TRUCO:

$$H = \langle H \rangle + h$$

valor en el vacío

excitación \equiv bosón de Higgs

$$H \psi^2 = \langle H \rangle \psi^2 + h \psi^2$$

término de masa

interacción con el bosón de Higgs



En general:

$$y H \psi^2 = \underbrace{y \langle H \rangle \psi^2}_{\text{término de masa}} + \underbrace{y h \psi^2}_{\text{interacción con el bosón de Higgs}}$$

fuerza de la interacción

¿Por qué sólo los
bosones W y Z
(interacciones débiles)
tienen masa?

Porque H solo se transforma
bajo la simetría relacionada
subyacente a las
interacciones débiles



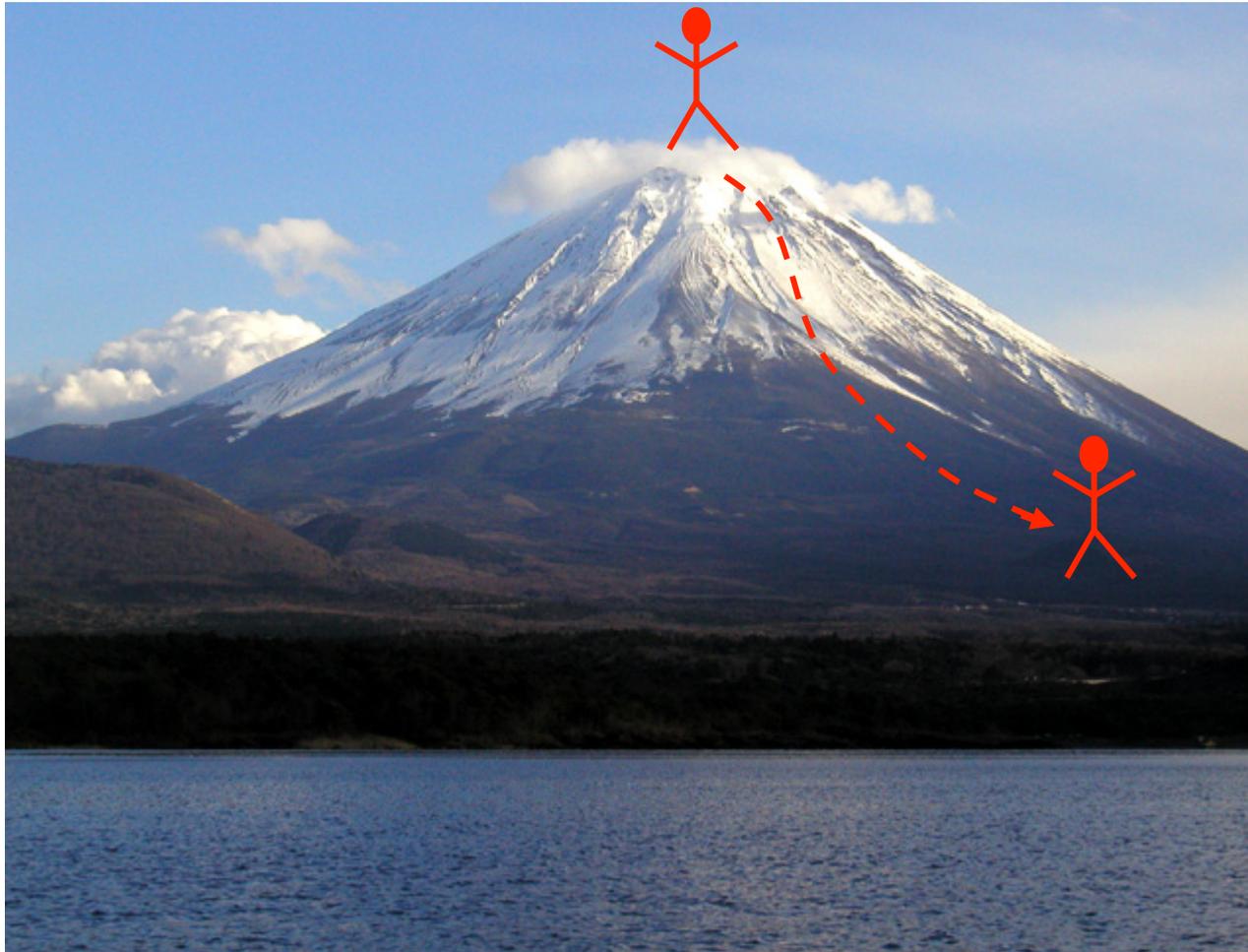
Solo siente las
interacciones débiles

Otra perspectiva

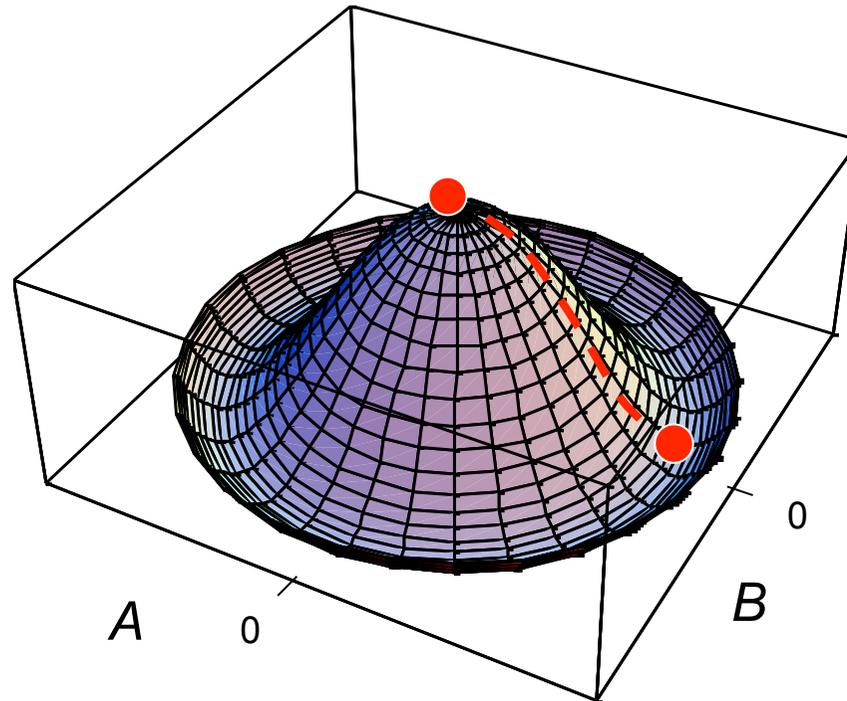
¡también para
estudiantes
excelentes!



Simetrías rotas

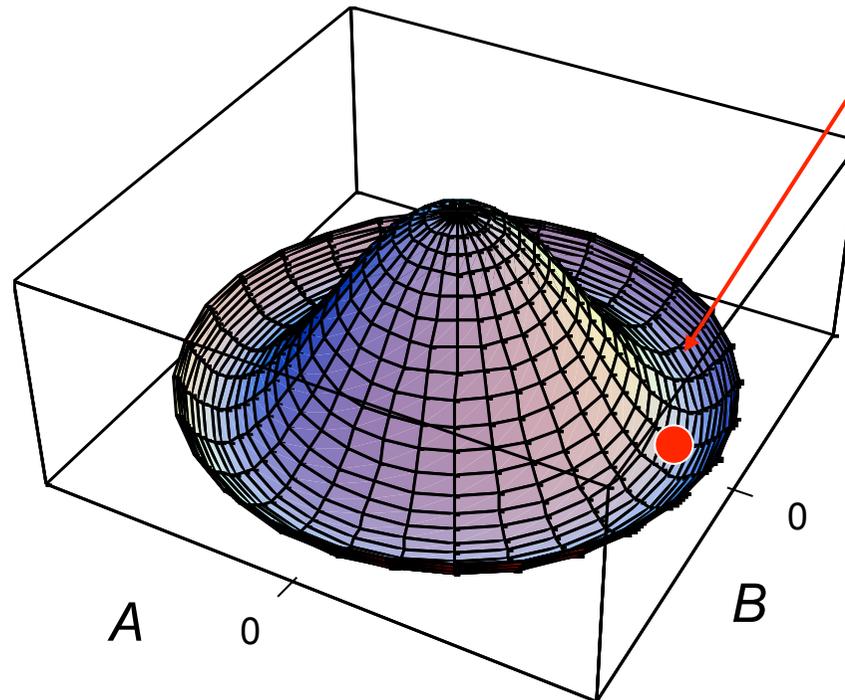


Ruptura espontánea de simetría



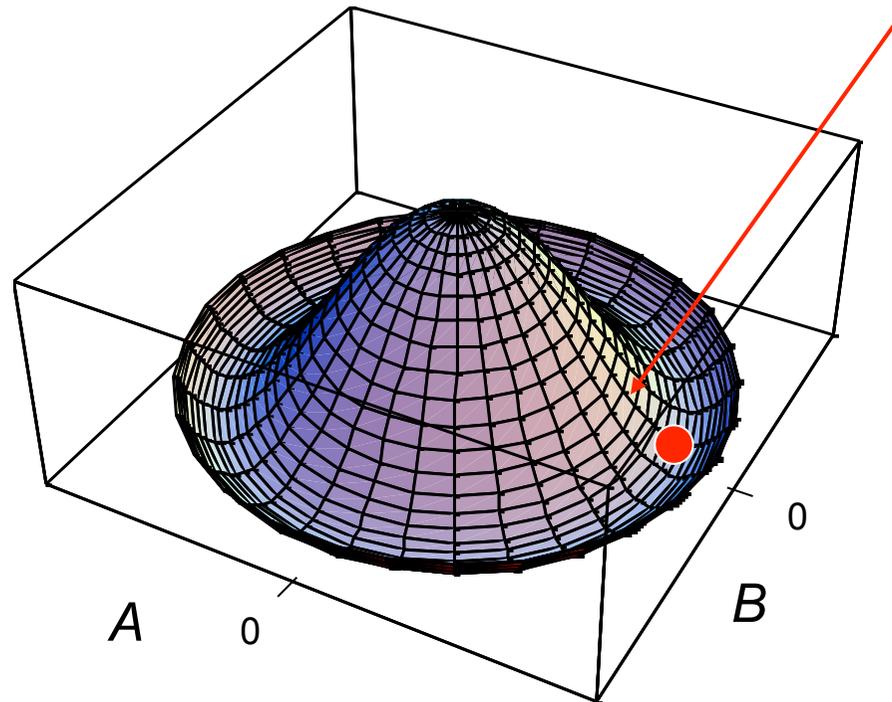
Mecanismo de Higgs

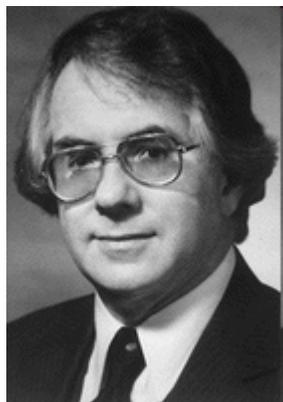
Da masa al
bosón mediador
("fotón")



Mecanismo de Higgs

Partícula con
masa (Higgs)





1960s

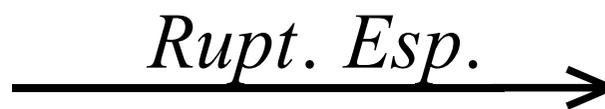
Glashow Weinberg Salam

Simetría Electrodébil:

ED

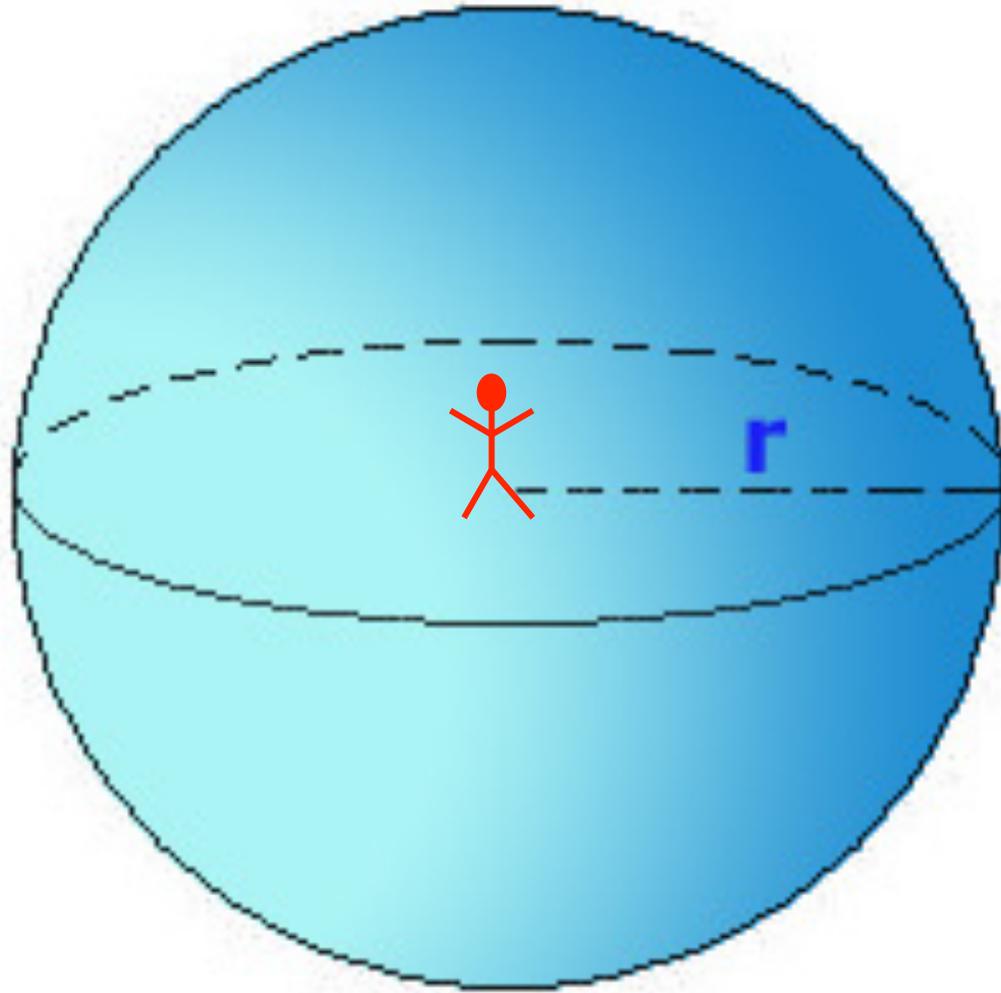
$SU(2) \times U(1)$

ED



EM

$\langle H \rangle$



ED $\xrightarrow{\text{Rupt. Esp.}}$ EM

★ En el proceso 3 partículas mediadoras:

W^+, W^-, Z

(Descubiertas en el
CERN en 1983)

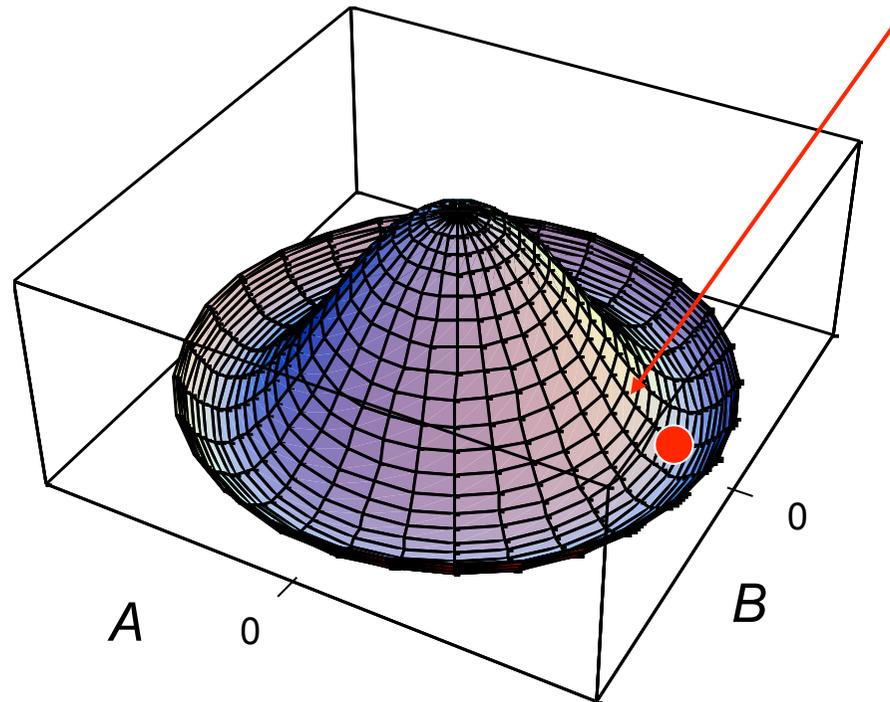
adquieren masa

★ Y una partícula mediadora:

γ (fotón)

queda sin masa

Partícula con
masa (Higgs)



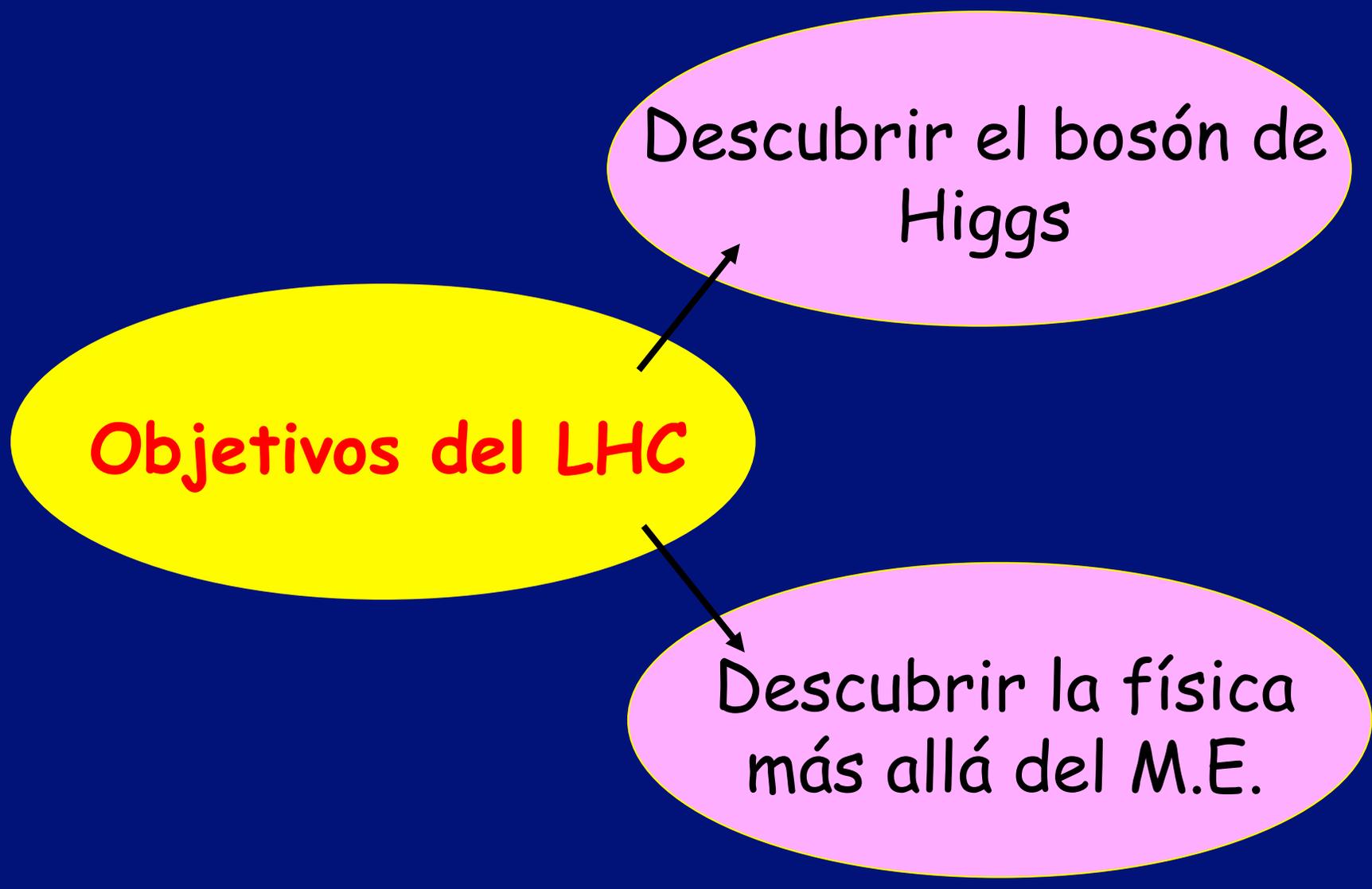
Si la teoría es correcta debía existir un bosón
de Higgs con masa

Esta era la única predicción importante del Modelo Estándar aún sin verificar

Pero era una predicción crucial

Producir un bosón de Higgs es equivalente a “sacar al vacío de su sitio” (por un instante diminuto)

Objetivos del LHC



```
graph TD; A(Objetivos del LHC) --> B(Descubrir el bosón de Higgs); A --> C(Descubrir la física más allá del M.E.);
```

Descubrir el bosón de Higgs

Descubrir la física más allá del M.E.

Pero si el Mod. Est.
funciona tan bien,
¿Por qué ir más allá?

Qué hay de malo con
el Mod. Est.?

...Continuará en
parte 2...