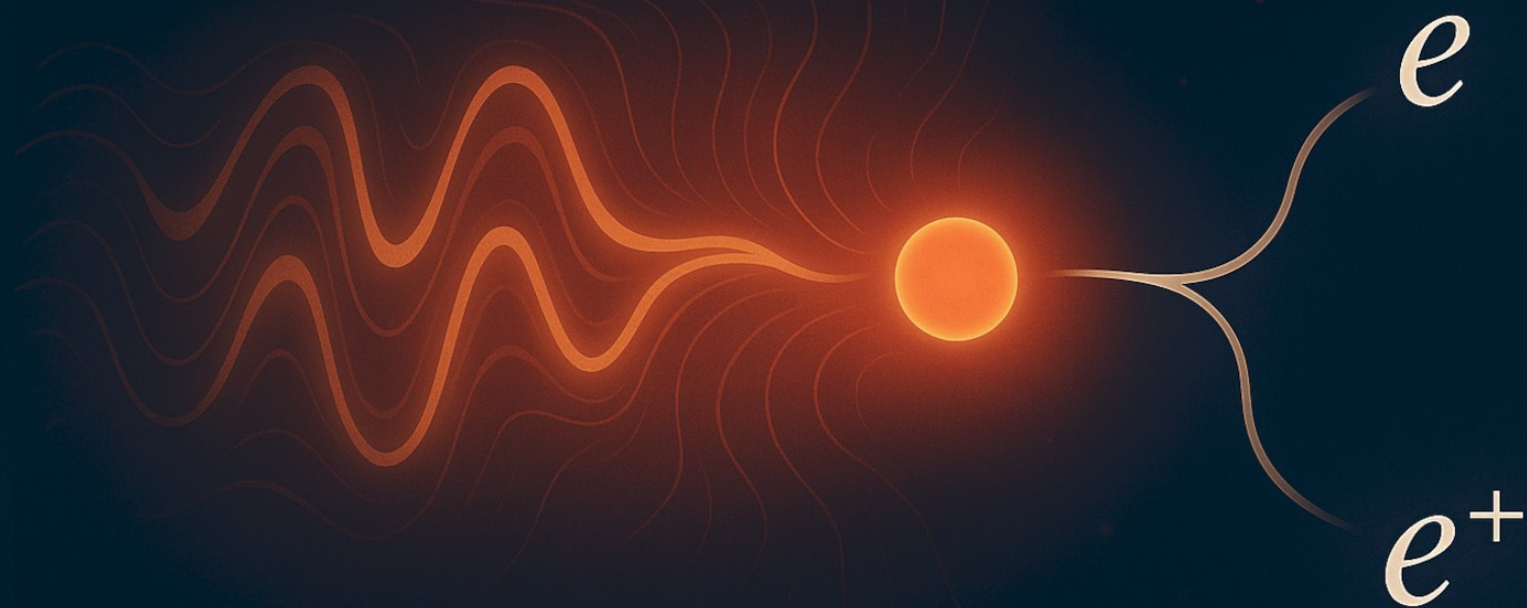


(algunos) Retos científicos de los futuros aceleradores

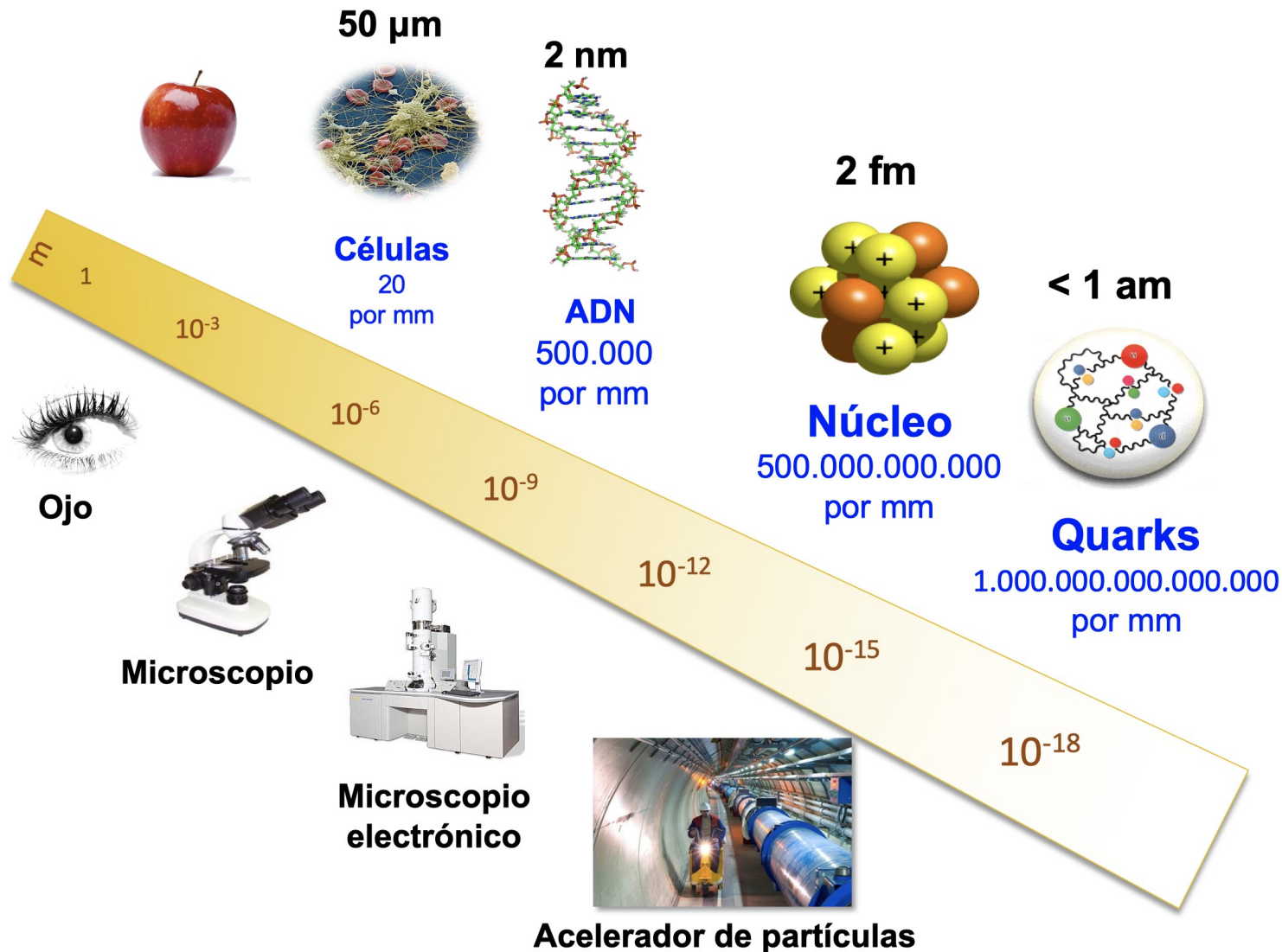
Adrián Irles
23 Julio 2026





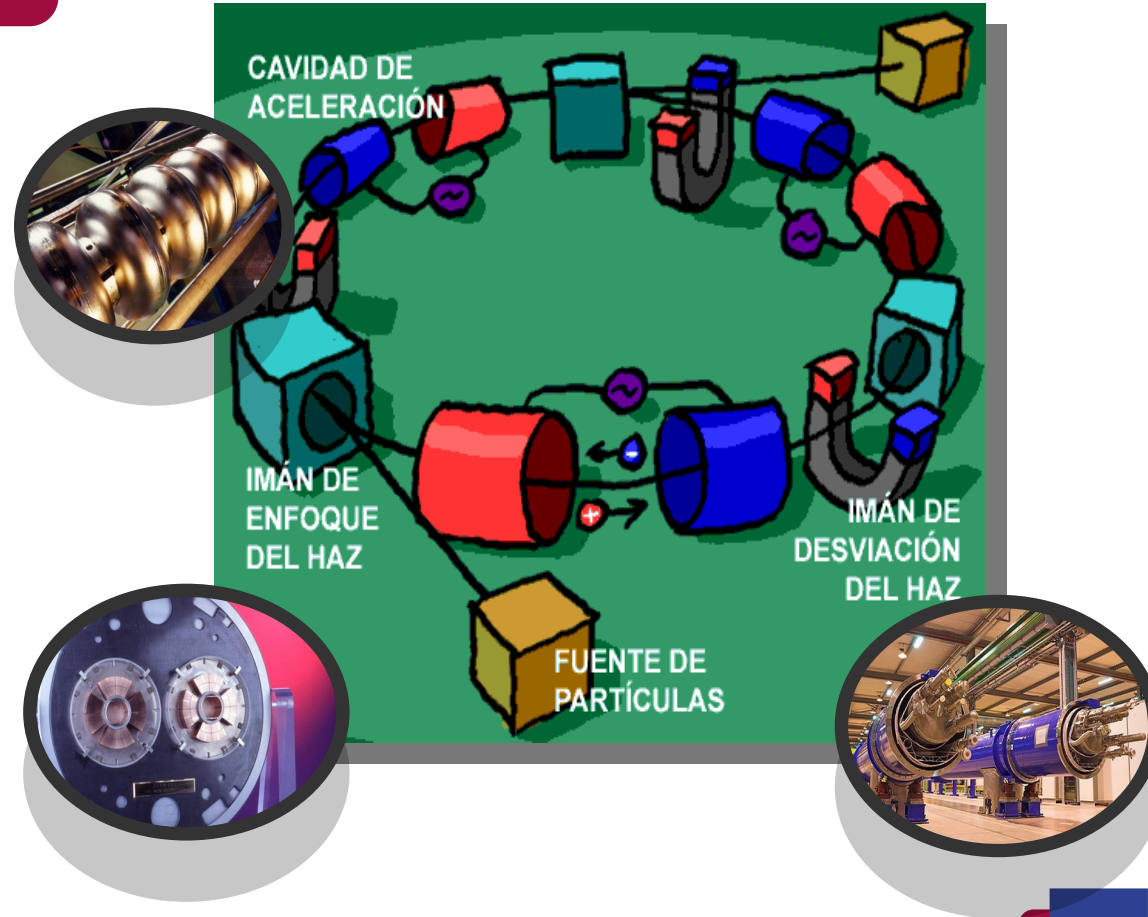
Instrumentos para observar el microcosmos





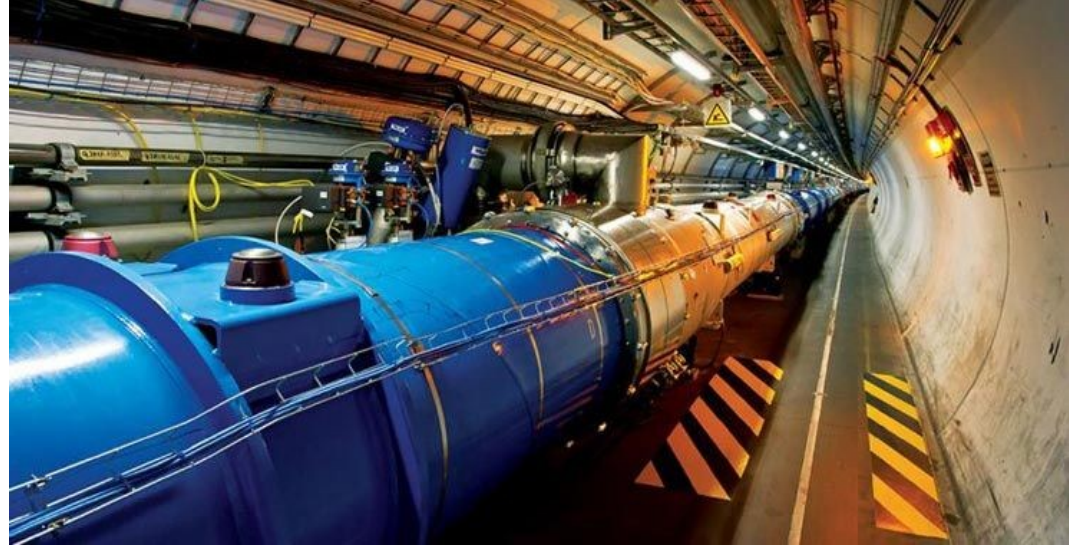
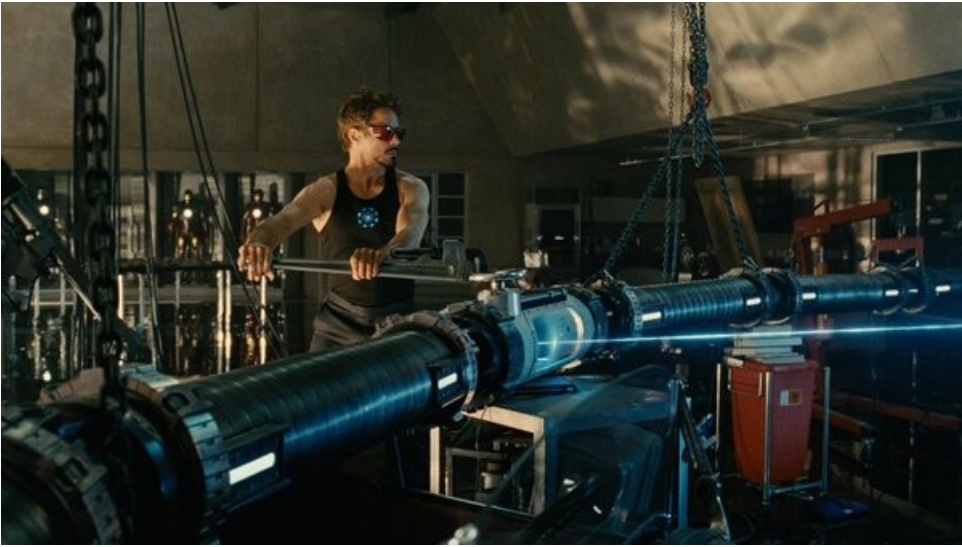
Experimentos en colisionadores de partículas

- ▶ A diferencia de las observaciones astronómicas, los **colisionadores** permiten **repetir un experimento** miles/millones de veces.
- ▶ “**Simulamos**” el **Big Bang** en cada colisión
- ▶ Los colisionadores son las **máquinas más grandes construidas** por el ser humano
 - **Tecnología puntera**

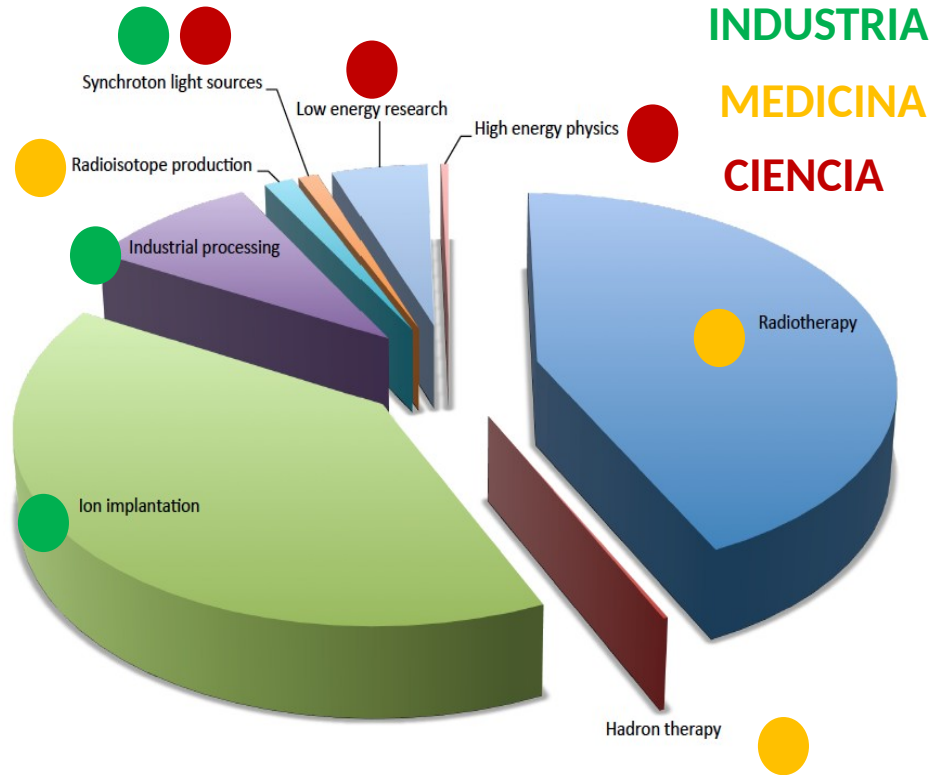


Instrumentos para ver el Microcosmos

Experimentos en colisionadores de partículas



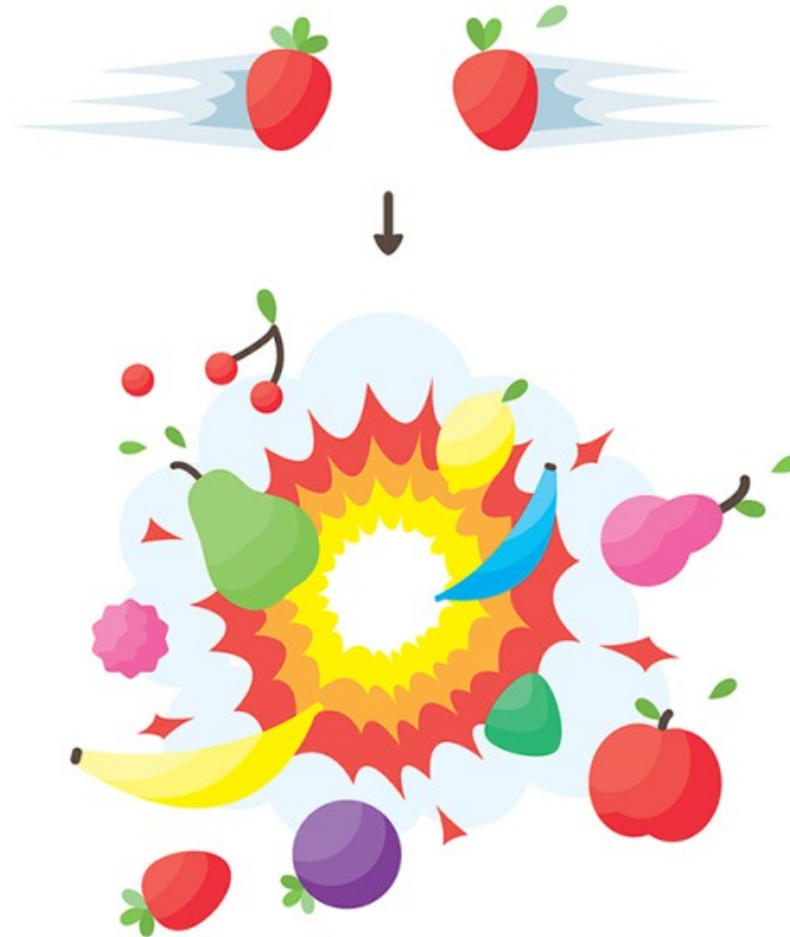
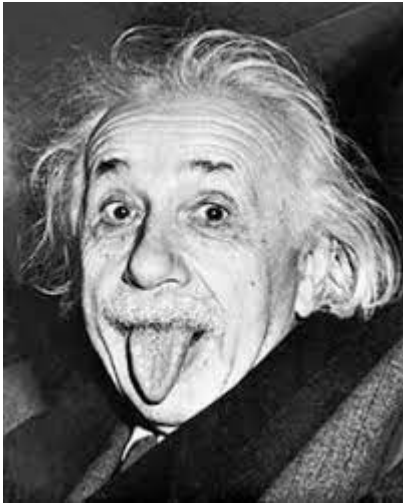
> 40000 aceleradores en el mundo



Colisionadores de partículas

Mundo microscópico

$$E=mc^2$$



Maria Hammestrom

Colisionadores de partículas



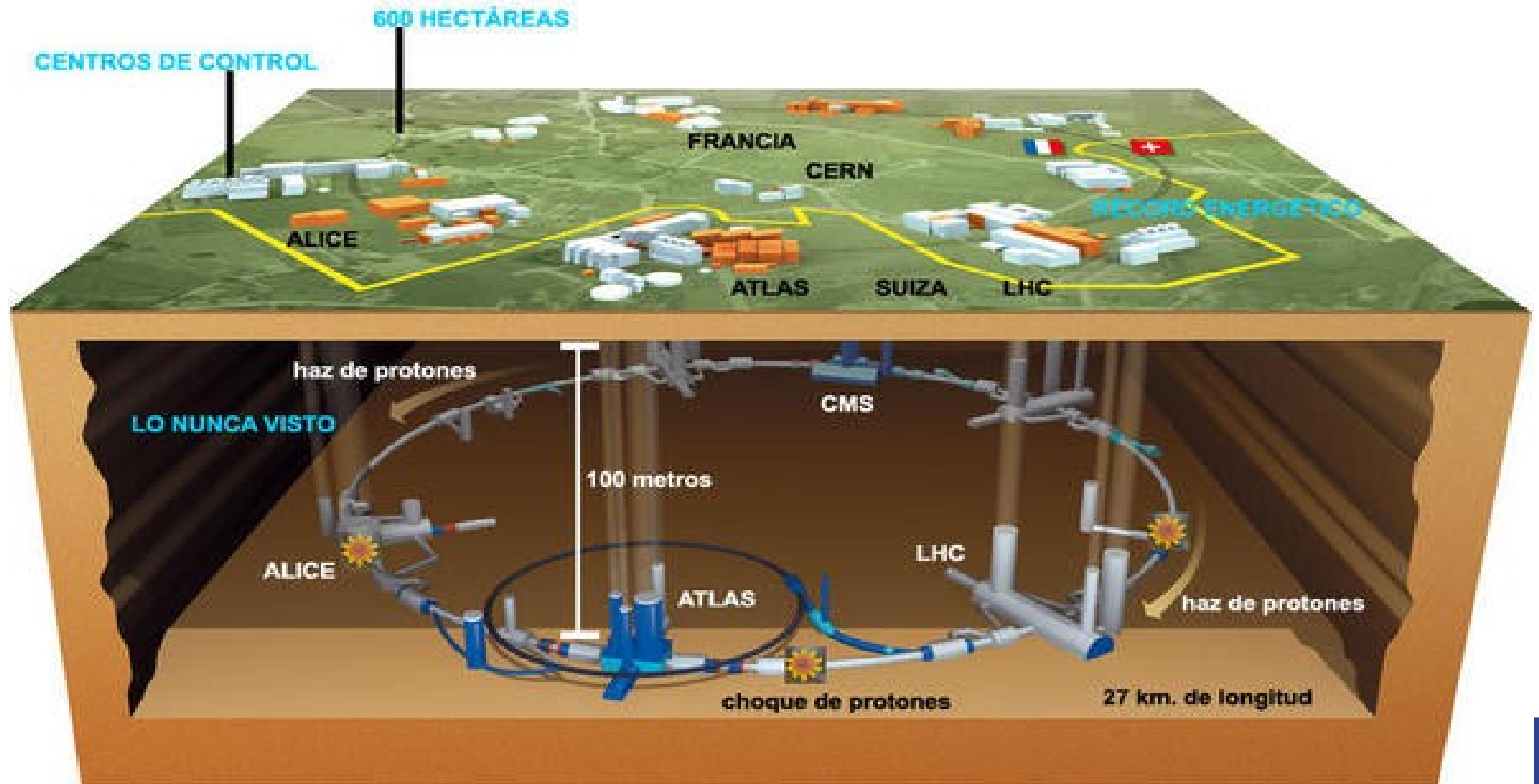
Colisionadores de partículas



© Eichiro Oda



El LHC (Gran Colisionador de Hadrones)



¿ Para qué construimos el LHC ?

CERN/LHCC/92-4
LHCC/I 2
1 October 1992

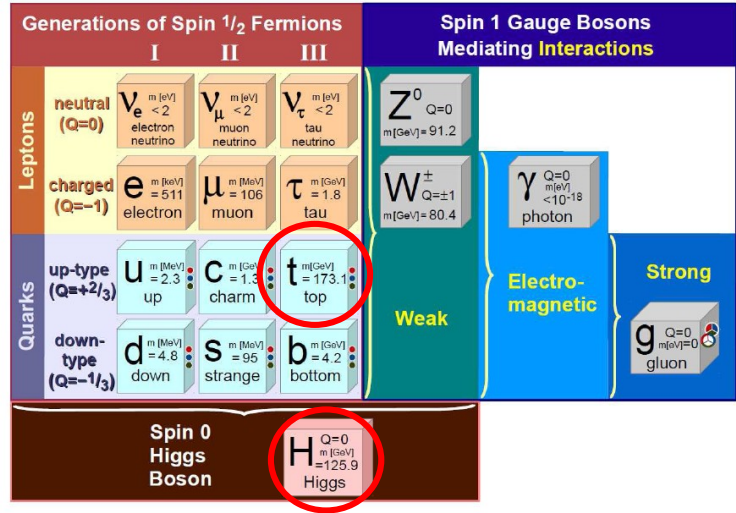
ATLAS

Letter of Intent
for a
General-Purpose pp Experiment
at the
Large Hadron Collider at CERN

1 Introduction and Overview

The ATLAS Collaboration proposes in this Letter of Intent a general-purpose pp experiment which would be operational at the startup of the Large Hadron Collider (LHC) in order to exploit its full discovery potential. The LHC offers a large range of physics opportunities, among which the origin of mass at the electroweak scale is a major focus of interest. The detector optimization is therefore guided by physics issues such as sensitivity to the largest possible Higgs mass range, but also for example by detailed studies of top quark decays, Supersymmetry searches, and sensitivity to large compositeness scales. The ability to cope with a broad variety of expected physics processes also demonstrates most importantly the detector's potential for unexpected new physics.

¿Dónde estamos?



► El **SM** se ha “**completado**” tras los descubrimientos del

- Quark top (Tevatron 1997, LHC)
- Bosón de Higgs (LHC)

► La introducción del campo de Higgs propicia

- El mecanismo de Rotura Espontánea de Simetría ElectroDébil EWSSB → masa!
- El bosón de Higgs aparece naturalmente como excitación del campo de Higgs.
- La masa de los fermiones se debe a la interacción de los mismos con el campo de Higgs

► Sin embargo, aun hay muchas preguntas por responder.

¿Dónde estamos?

Generations of Spin $1/2$ Fermions						Spin 1 Gauge Bosons Mediating Interactions	
Leptons	neutral ($Q=0$)	ν_e $m[\text{eV}] < 2$ electron neutrino	ν_μ $m[\text{eV}] < 2$ muon neutrino	ν_τ $m[\text{eV}] < 2$ tau neutrino		Z^0 $Q=0$ $m[\text{GeV}] = 91.2$	
	charged ($Q=-1$)	e $m[\text{keV}] = 511$ electron	μ $m[\text{MeV}] = 106$ muon	τ $m[\text{GeV}] = 1.8$ tau		$W^\pm$ $Q=\pm 1$ $m[\text{GeV}] = 80.4$	γ $Q=0$ $m[\text{eV}] < 10^{-18}$ photon
Quarks	up-type ($Q=+2/3$)	u $m[\text{MeV}] = 2.3$ up	c $m[\text{GeV}] = 1.3$ charm	t $m[\text{GeV}] = 173.1$ top		Weak	Electro-magnetic
	down-type ($Q=-1/3$)	d $m[\text{MeV}] = 4.8$ down	s $m[\text{MeV}] = 95$ strange	b $m[\text{GeV}] = 4.2$ bottom			
Spin 0 Higgs Boson							Strong g $Q=0$ $m[\text{eV}] = 0$ gluon

► ¿Qué pasa con la gravitación?

- No sabemos tratar la gravitación con este formalismo.
- Experimentos de observación astrofísica, ondas gravitacionales.

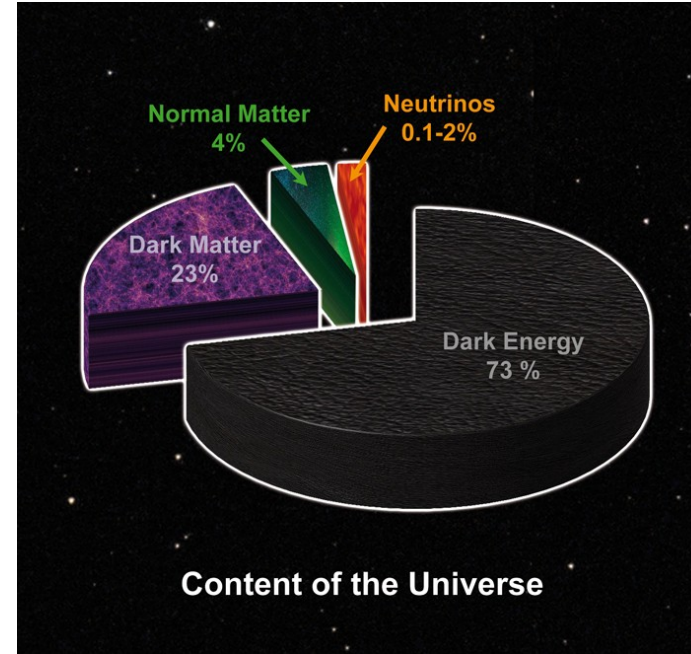
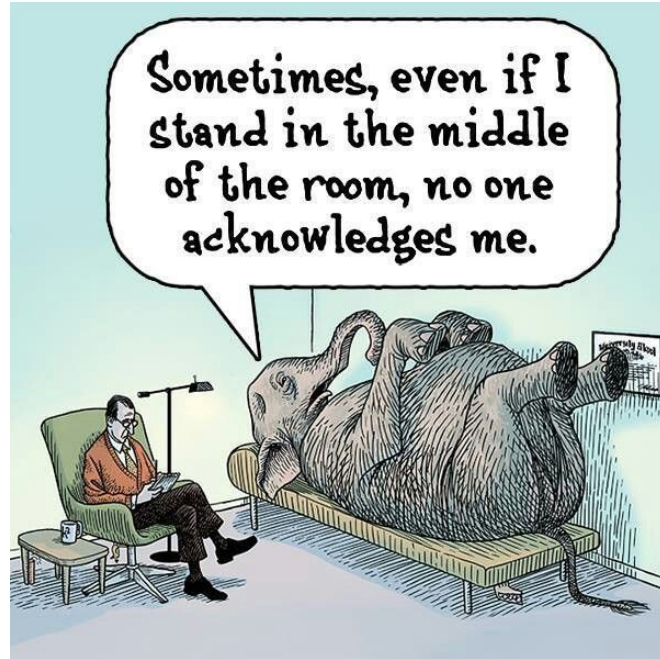
► ¿Masa de los neutrinos? No explicada por el actual mecanismo de EWSSB del campo de Higgs.

- Experimentos de neutrinos solares, atmosféricos, reactores, aceleradores de neutrinos...

► Cómo se explica la asimetría observada entre materia-antimateria ?

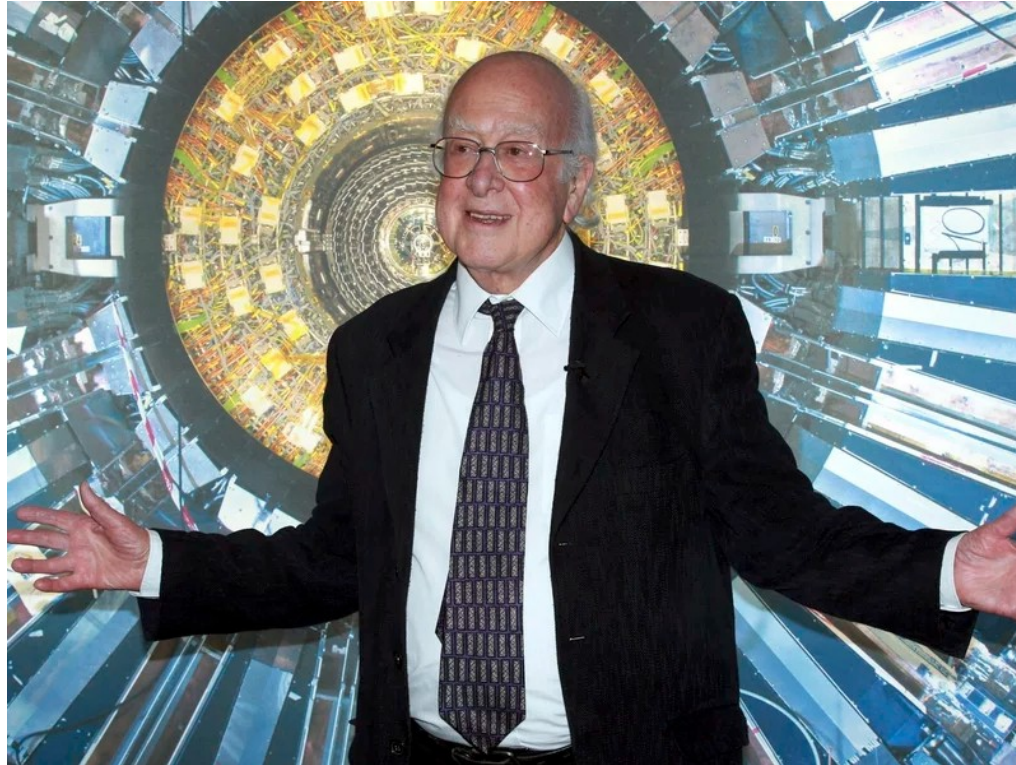
- Experimentos de física del sabor (quarks pesados, EW)

¿Dónde estamos?



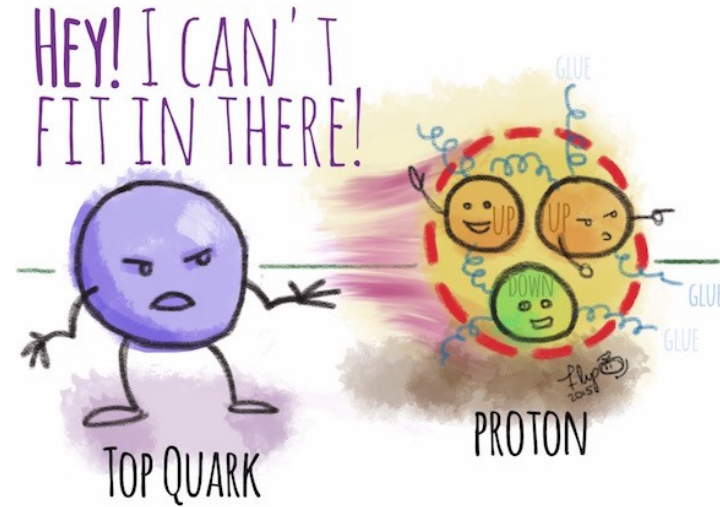
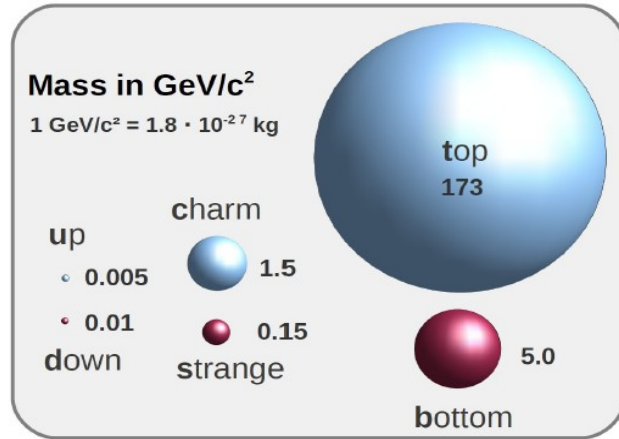
¿Dónde estamos?

- ▶ ¿Qué es el Bosón de Higgs? Es la única partícula escalar (spin 0) sin estructura interna que hemos observado
- ¿Es el SM (y el campo de Higgs) solo una teoría efectiva de otra a más alta energía (i.e. escalas de distancias más pequeñas) ?



¿Dónde estamos?

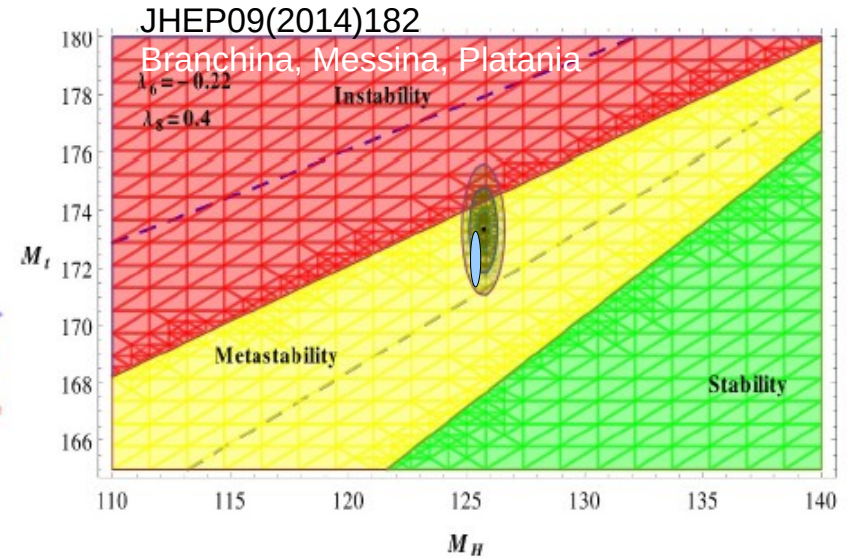
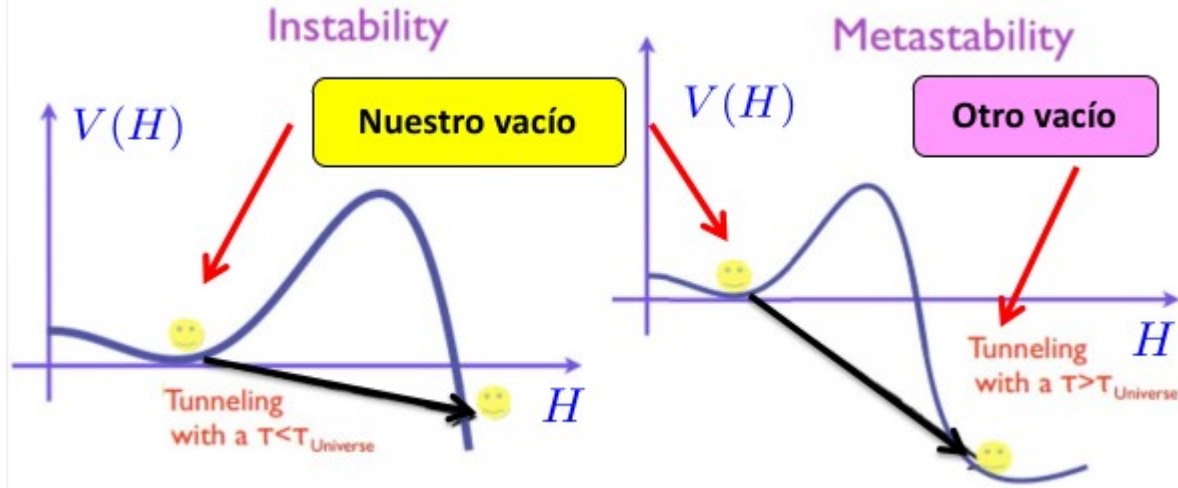
- ¿Porqué unas partículas interaccionan más fuerte que otras con el campo de Higgs? Jerarquía de masas.
- ¿Qué pasa con el top? Una partícula fundamental con mayo masa que núcleos pesados, y con Yukawa coupling ~ 1 con el Higgs



$$M_W = M_W^{\text{LO}} + \Delta r_{\text{top}} + \Delta r_H$$
$$\Delta r_{\text{top}} \simeq -\frac{3G_F n_t^2}{8\sqrt{2}\pi^2} \frac{1}{\tan\theta_W}$$
$$\Delta r_H \simeq \frac{11G_F M_Z^2 \cos\theta_W}{24\sqrt{2}\pi^2} \ln \frac{M_H^2}{M_Z^2}$$

¿Dónde estamos?

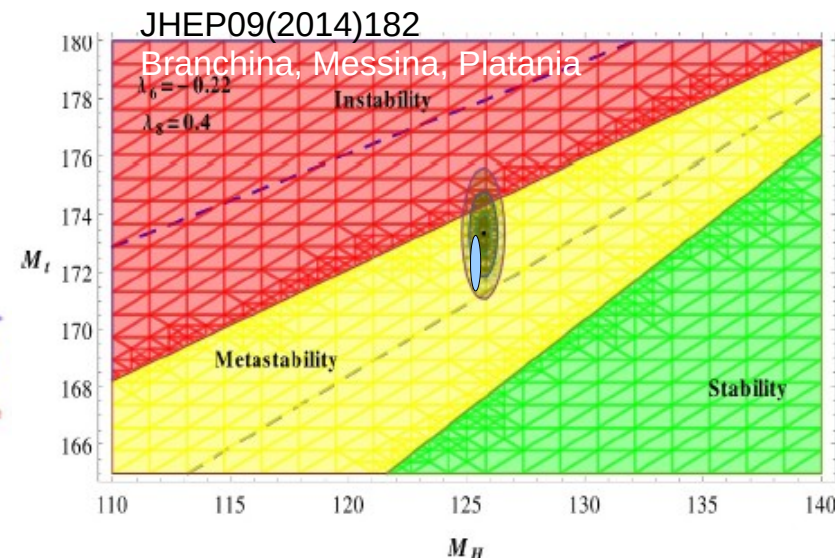
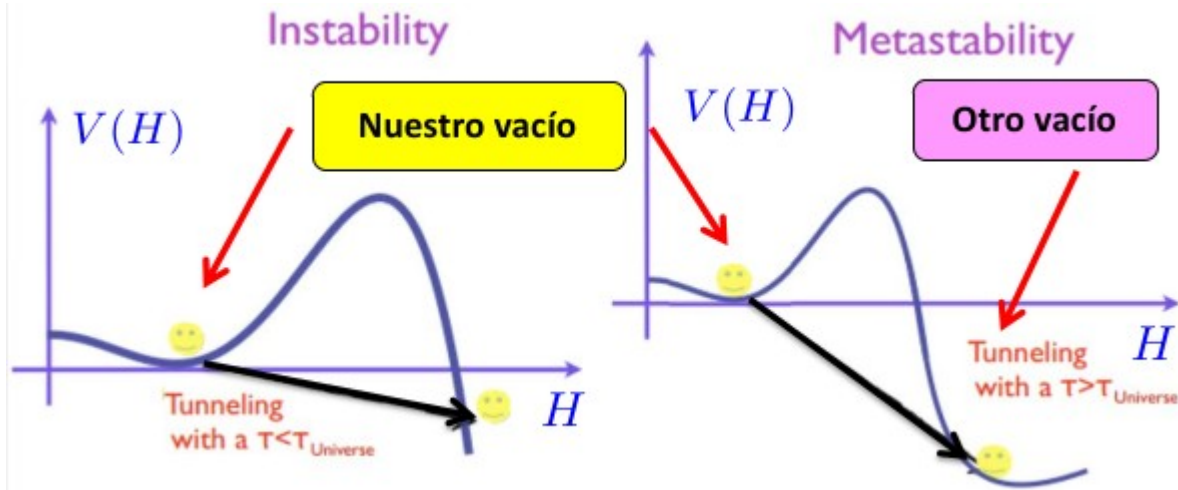
- ¿Cómo (qué!?) es el potencial de Higgs?
- Crucial en el entendimiento de la evolución del universo



$$V(\phi) = \lambda\phi^4/4 + \lambda_6\phi^6/(6M_P^2) + \lambda_8\phi^8/(8M_P^4)$$

¿Dónde estamos?

- ¿Cómo (qué!?) es el potencial de Higgs?
- Crucial en el entendimiento de la evolución del universo



$$V(\phi) = \lambda\phi^4/4 + \lambda_6\phi^6/(6M_P^2) + \lambda_8\phi^8/(8M_P^4)$$

Medir el potencial de Higgs de forma unívoca y precisa Higgs requiere medidas de precisión más allá del HL_LHC

Masa del Higgs
Auto-interacción del Higgs
Propiedades del Quark Top

**Futuros
colisionadores:
Factorías de Higgs**

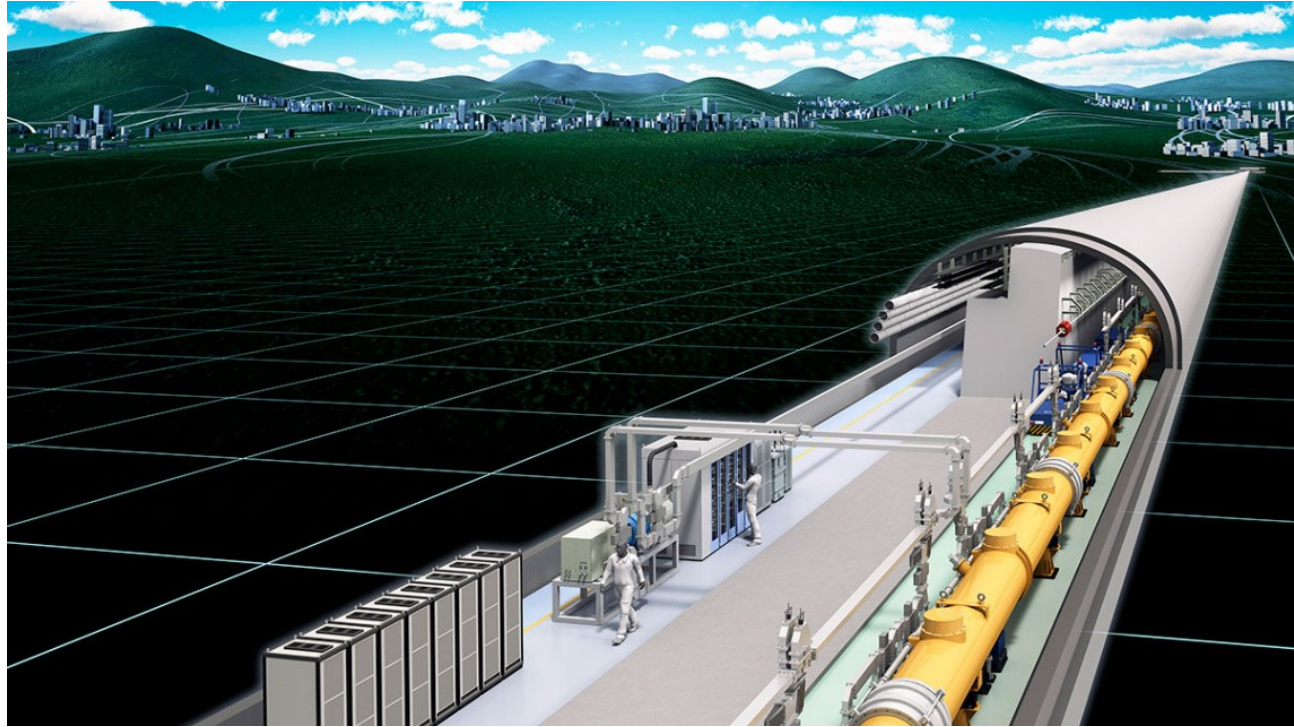
(más allá del HL-LHC)



Propuestas de futuro: un nuevo colisionador

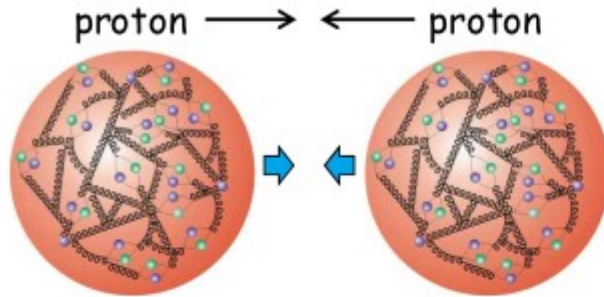
► Necesitamos un **nuevo colisionador específicamente diseñado** para estudiar el bosón de **Higgs** (y mucho más!)

- **Colisionando electrones en vez de protones**
- **Dónde?** Opciones: Japón, Suiza, China...
- **Cuándo?** 2030-40? 2045-55?



Lepton vs Hadron Colliders

LHC (hadron collider)



collision of two composite particles
(with different initial constituents
and energies)

**electroweak interactions
+ strong interactions**

ILC (lepton collider)



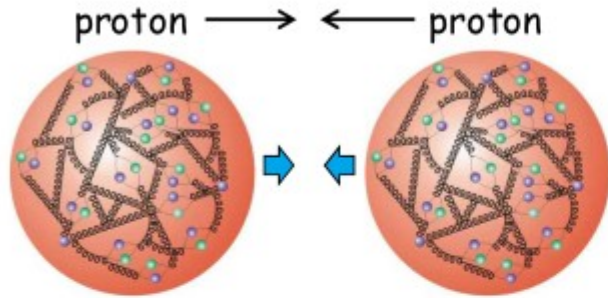
collision of two point-like particles
(with exactly defined initial state,
quantum numbers and energies)

electroweak interactions



Lepton vs Hadron Colliders

LHC (hadron collider)



collision of two composite particles
(with different initial constituents
and energies)

electroweak interactions
+ strong interactions



ILC (lepton collider)



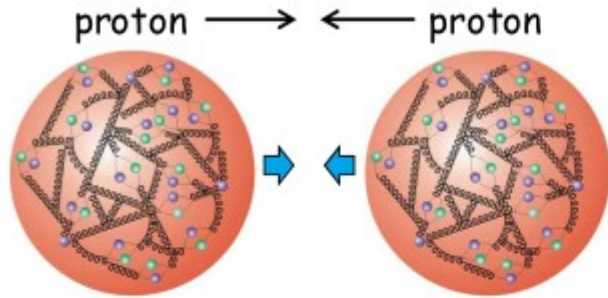
collision of two point-like particles
(with exactly defined initial state,
quantum numbers and energies)

electroweak interactions



Lepton vs Hadron Colliders

LHC (hadron collider)



collision of two composite particles
(with different initial constituents
and energies)

electroweak interactions
+ strong interactions

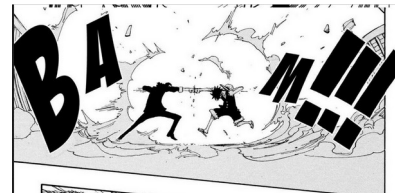


ILC (lepton collider)



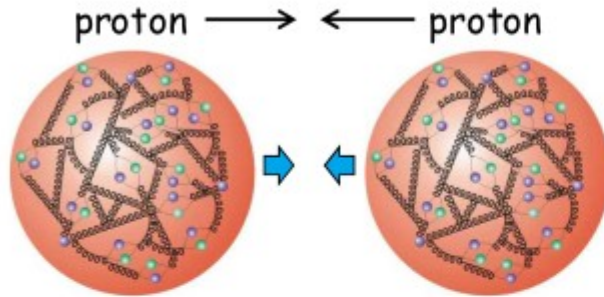
collision of two point-like particles
(with exactly defined initial state,
quantum numbers and energies)

electroweak interactions



Lepton vs Hadron Colliders

LHC (hadron collider)



collision of two composite particles
(with different initial constituents
and energies)

electroweak interactions
+ strong interactions

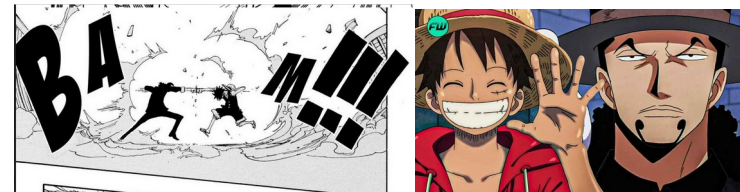


ILC (lepton collider)

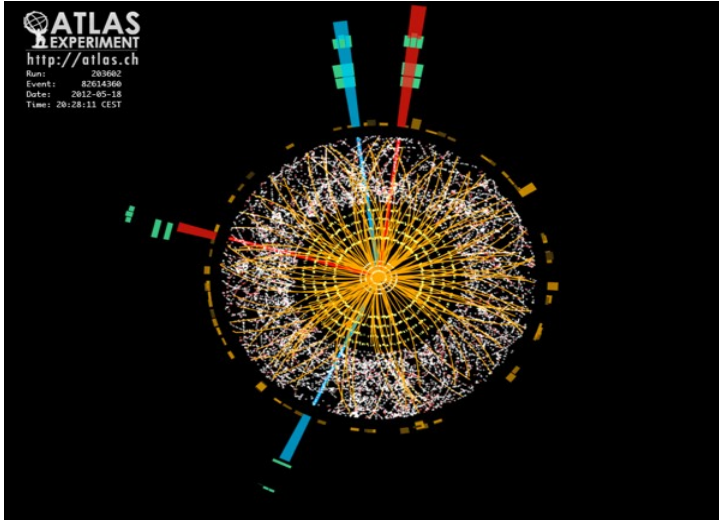


collision of two point-like particles
(with exactly defined initial state,
quantum numbers and energies)

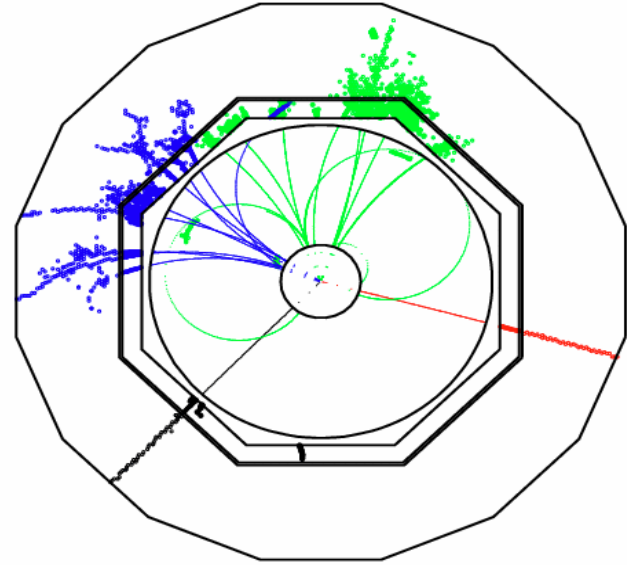
electroweak interactions



Lepton vs Hadron Colliders



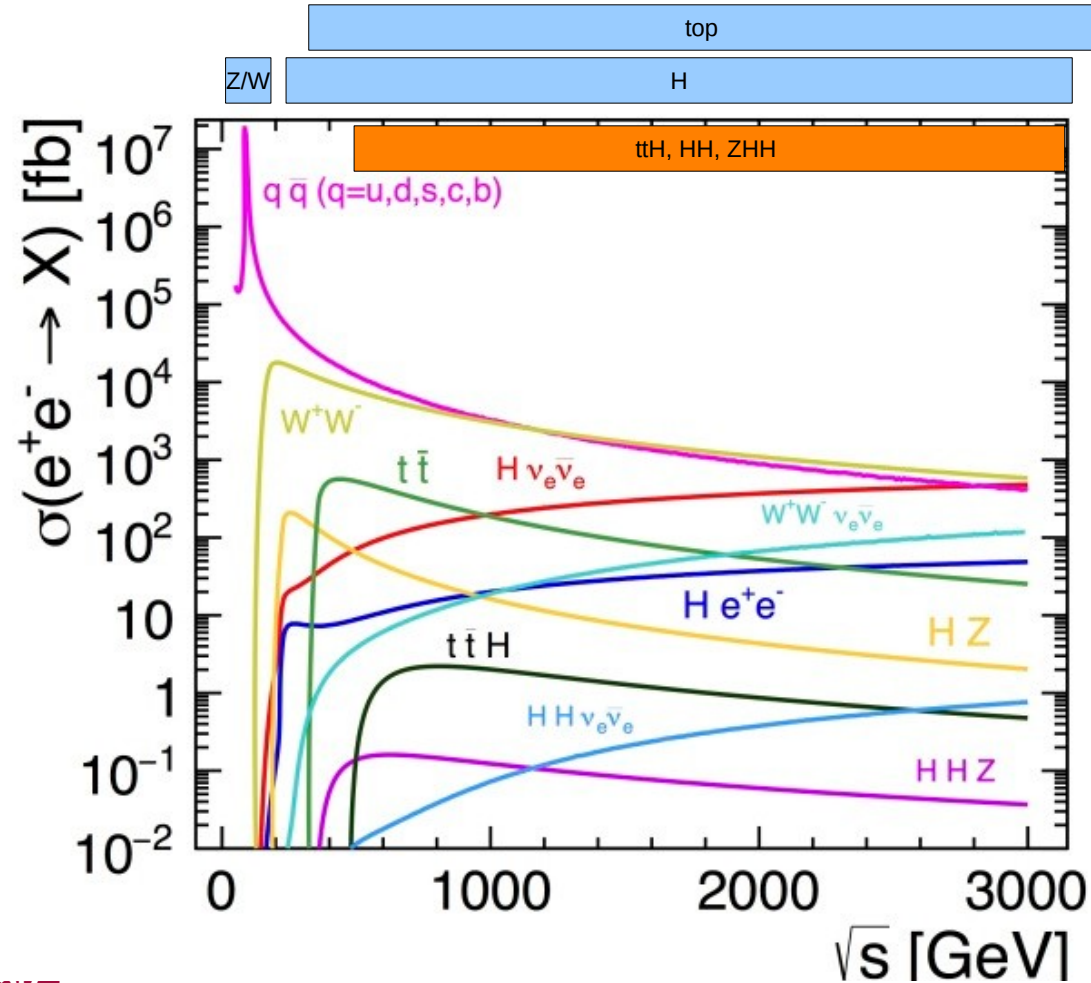
Higgs candidate decaying to 4 electrons
(ATLAS 2012))



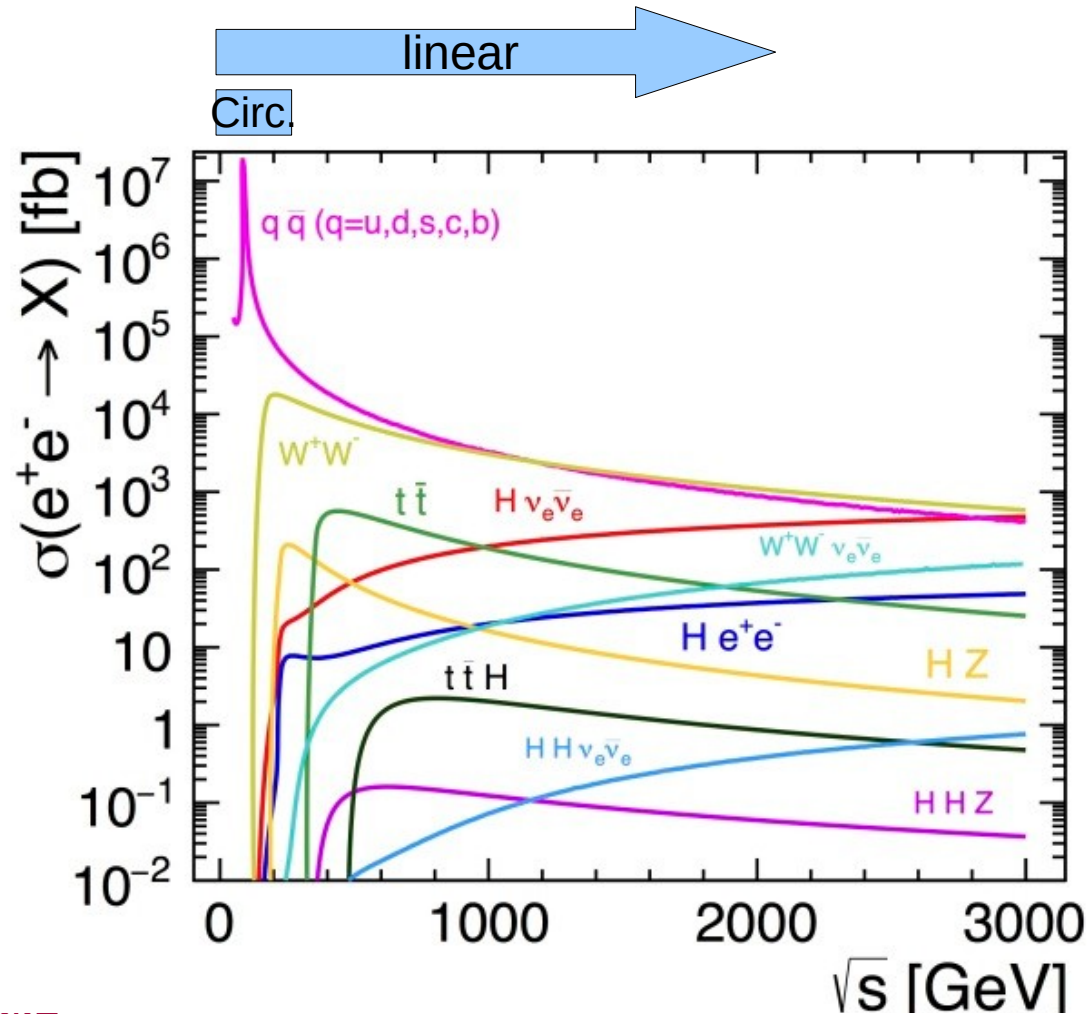
$e^-e^+ \rightarrow HZ$,
 $Z \rightarrow 2 \text{ leptons}$
(ILD simulation)



Lepton colliders - Higgs Factories



Lepton colliders - Higgs Factories



► Lineales vs circulares

► **Circular:**

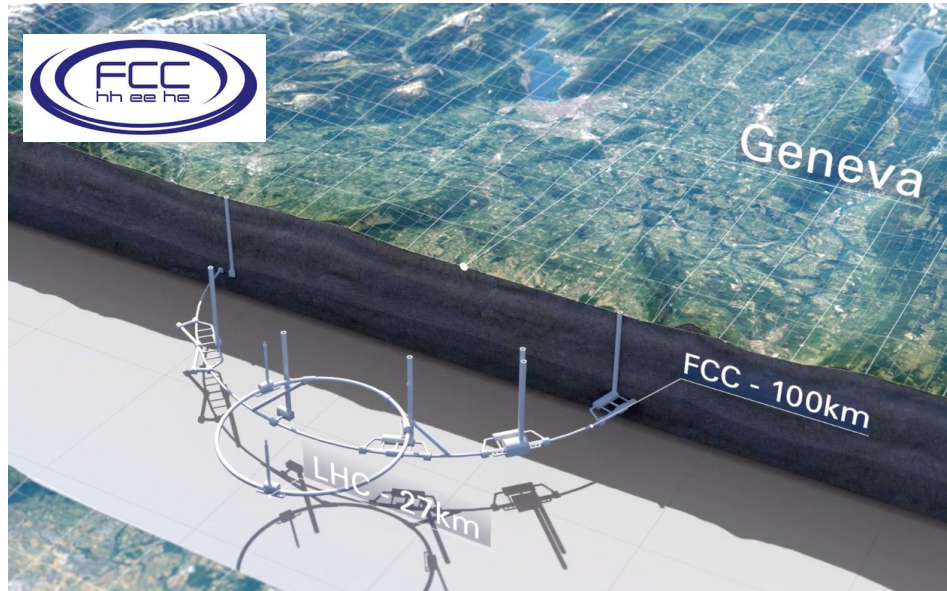
- **Alta luminosidad**
(especialmente a baja energía)
- **Energía limitada** por la radiación breemstrahlung de los electrones
- Mayor consumo y necesidades de infraestructura

► **Lineal:**

- Alcanza **altas energías**
(~proporcional a la longitud del tunel)
- **Menor luminosidad**

Colisionadores Circulares - CERN

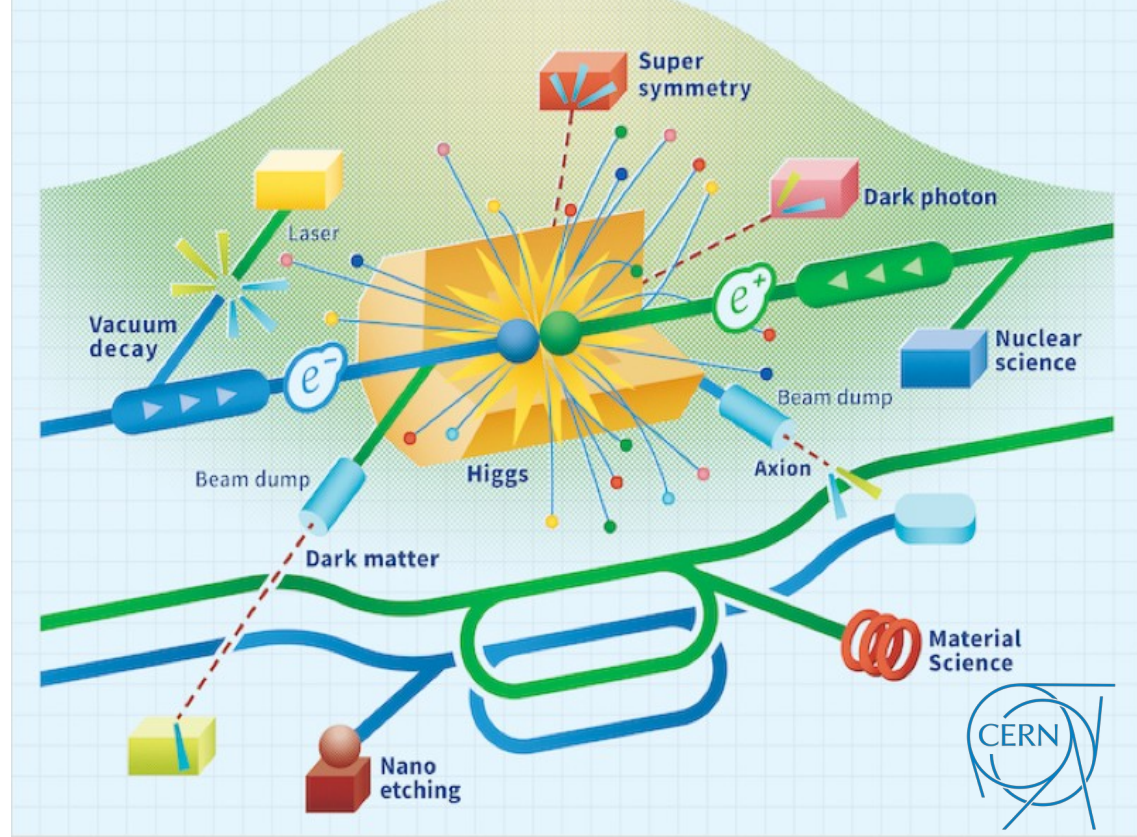
- ▶ **Primera fase – Factoría de Higgs** → colisiones e^+e^- en el Z-polo, threshold WW y threshold HZ
 - Ampliable hasta hasta el threshold de producción del pair top-antitop (energía limitada por radiación sincrotrón).
- ▶ **Segunda Fase** → colisiones hh a alta energía ($\sim 100\text{TeV}$) en ~ 2060
 - para el auto-acoplamiento del Higgs, física del top y búsquedas de nueva física
- ▶ Estudio de viabilidad del CERN FCCee/hh está en progreso.



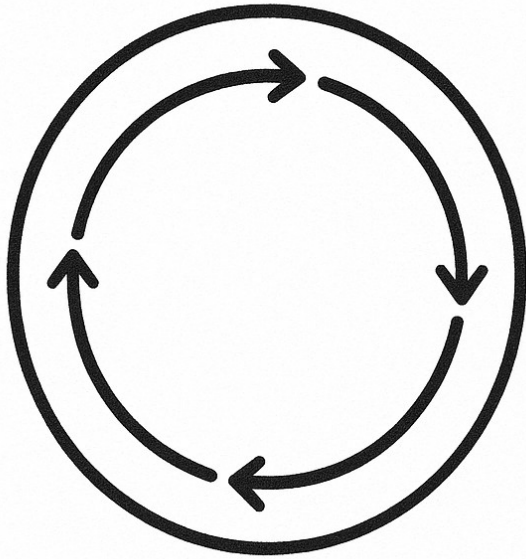
Colisionadores Lineales - CERN

- ▶ Energía: 0.1 - 1 TeV
 - Fácilmente extensible en energía
- ▶ Polarización longitudinal de los dos haces
- ▶ Fase “Factoría de Higgs” 500 y 250 GeV – Footprint ~20km
- ▶ Máquina diseñada para estudiar, desde el principio (~2040):
 - el Higgs (incluido su auto acoplamiento), el top-quark y
 - Física más allá del Modelo Estándar a altas energías

LCVision: a LC facility al CERN

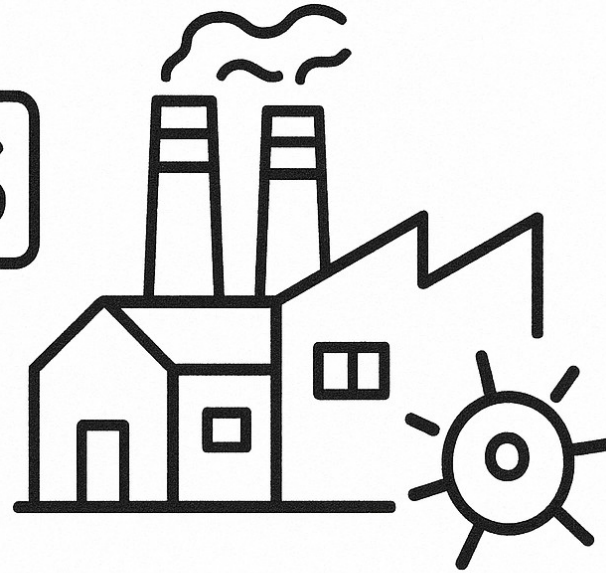


LHC



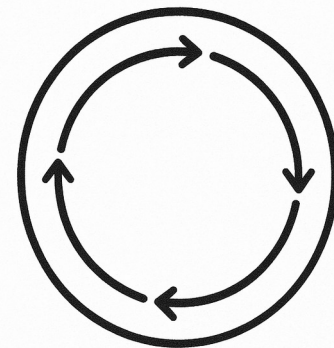
VS

HIGGS FACTORIES



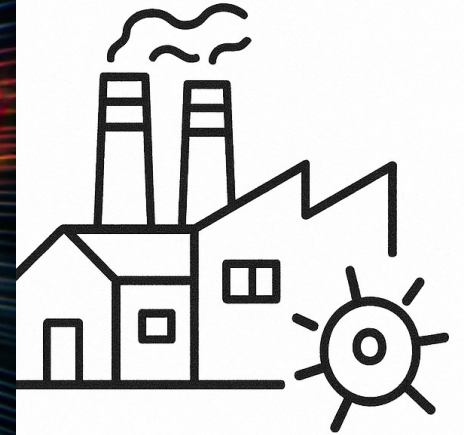


LHC





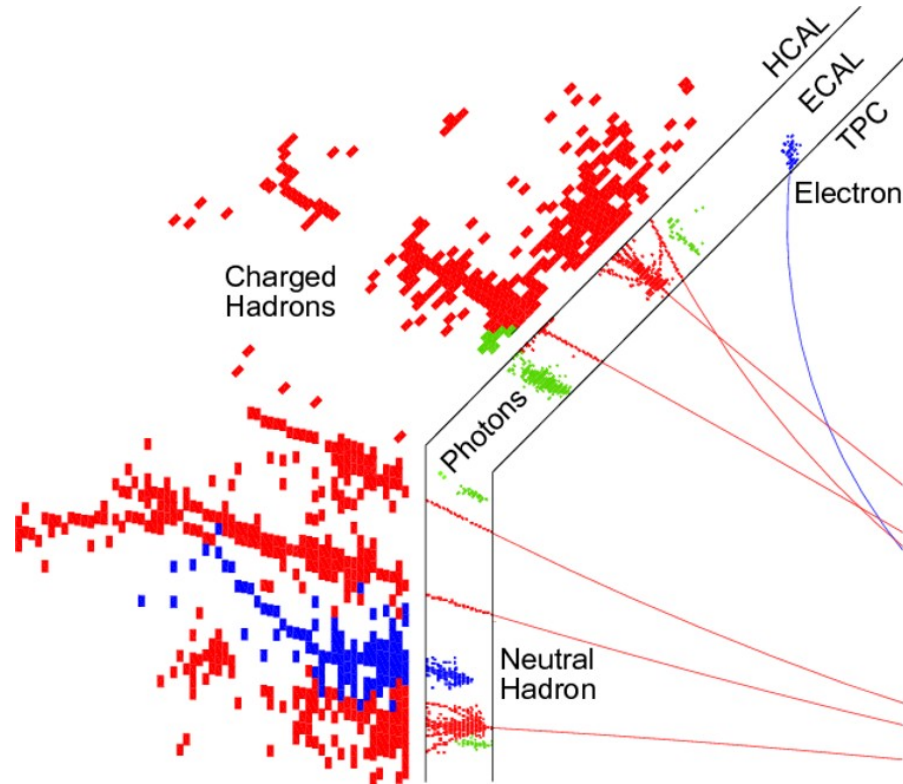
HIGGS FACTORIES



Imaging-detectors (aka Particle Flow concept)

Concepto

- ▶ Con “trackers” casi transparentes y calorímetros de alta granularidad
- ▶ Nuestro detector se convierte en una “cámara de pixels” donde el tamaño del pixel escala con el tipo de interacción
 - Trazas de partículas cargadas
 - Cascada electromagnética
 - Cascada hadronica
- ▶ Separación de partículas cargadas y neutras
- ▶ **Reconstrucción de todas y cada una de las partículas producidas.**



Conceptos novedosos de detectores (ejemplo - ILD)

From key requirements from **physics**:

- **p_t resolution** (total ZH x-section)

$$\sigma(1/p_t) = 2 \times 10^{-5} \text{ GeV}^{-1} \oplus 1 \times 10^{-3} / (p_t \sin^{1/2} \theta)$$

$\approx \text{CMS} / 40$

- **vertexing** ($H \rightarrow bb/cc/\tau\tau$)

$$\sigma(d_0) < 5 \oplus 10 / (p[\text{GeV}] \sin^{3/2} \theta) \mu\text{m}$$

$\approx \text{CMS} / 4$

- **jet energy resolution** ($H \rightarrow \text{invisible}$) 3-4%

$\approx \text{ATLAS} / 2$

- **hermeticity** ($H \rightarrow \text{invis}, \text{BSM}$) $\theta_{\min} = 5 \text{ mrad}$

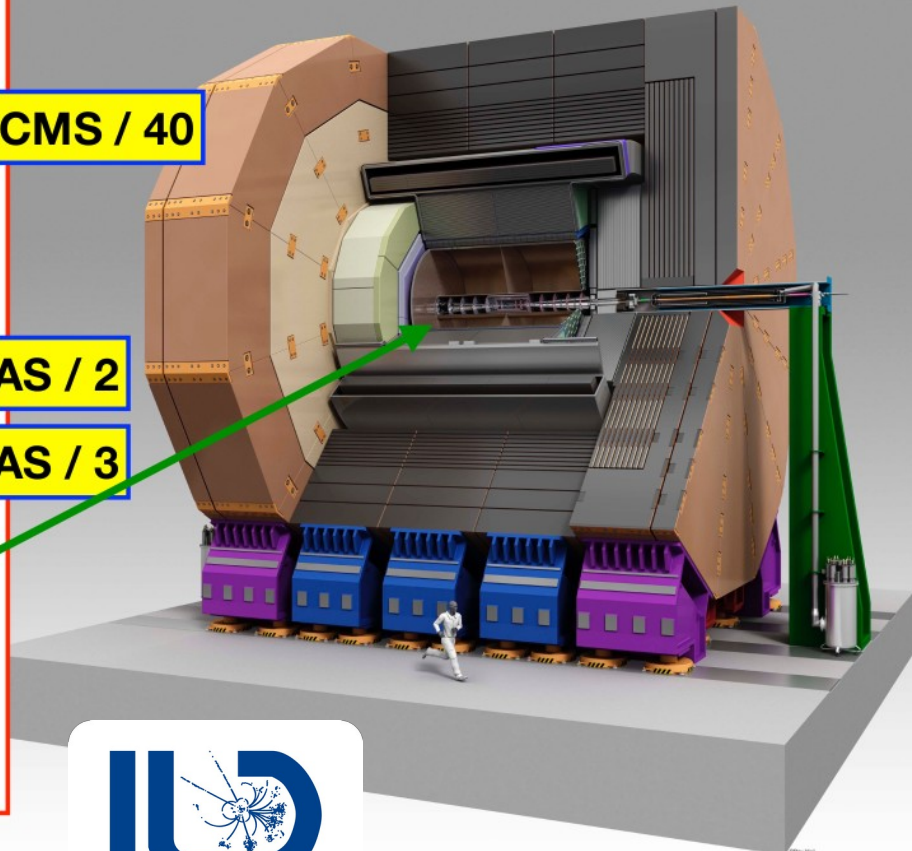
$\approx \text{ATLAS} / 3$

To key features of the **detector**:

- **low mass tracker:**

- main device: **Time Projection Chamber** (dE/dx !)
- add. silicon: eg VTX: 0.15% rad. length / layer)

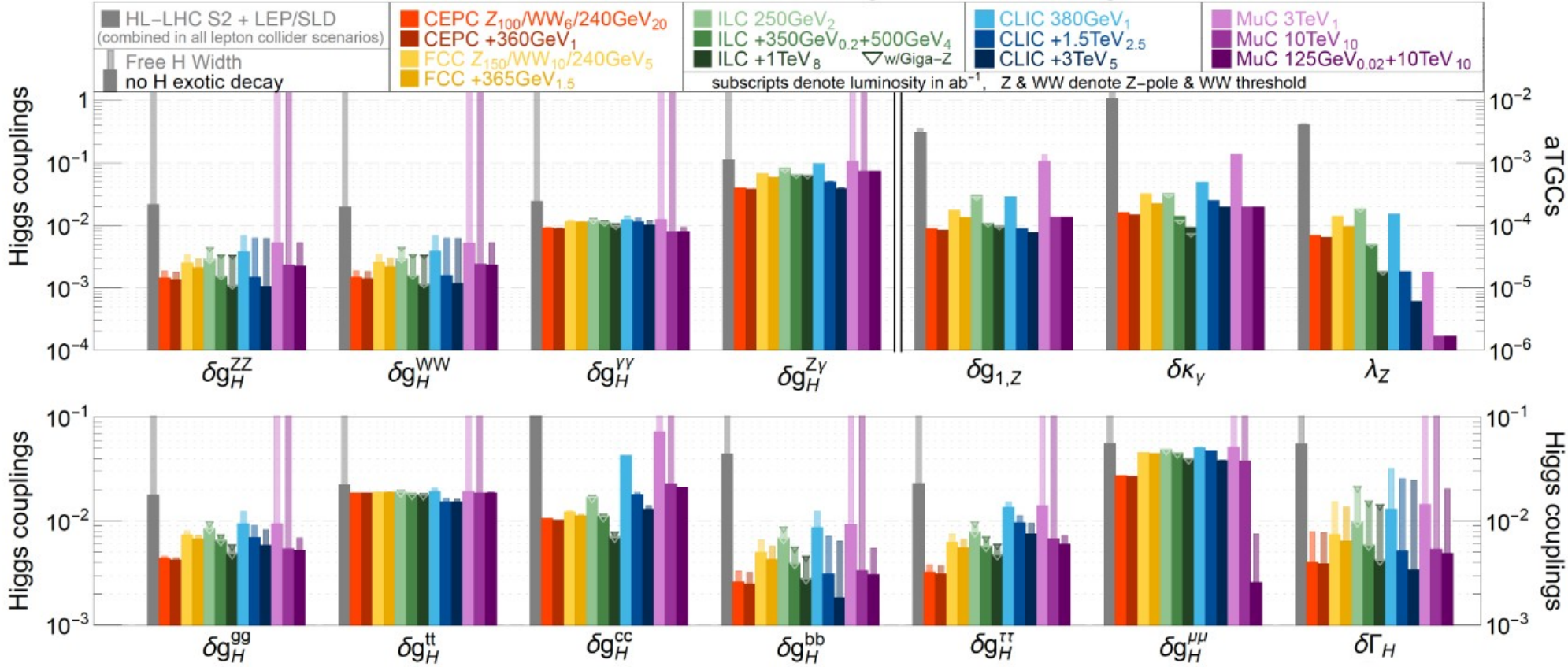
- **high granularity calorimeters**
optimised for particle flow



~ 1000 more r/o cells than LHC exps.
 $\sim 10-100$ more than HL-LHC exps.

Colisionadores de leptones

precision reach on effective couplings from SMEFT global fit





¿Dónde estamos?

- ▶ **Para completar el programa empezado por el LHC y el HL-LHC, la comunidad persigue:**
 - **una Factoría de Higgs (e+e-) que incluya** un programa de alta energía
 - Higgs/EW/Top/BSM !!
 - Ante la falta clara de evidencias de nuevas partículas o fuerzas... **la física de precisión** y las búsquedas alternativas **son nuestra mejor herramienta.**
- ▶ **Es un desafío global, con proyectos a largo plazo y de alto coste.**
- ▶ **Esfuerzo global y estratégico** en el cuál el **el IFIC tiene una posición muy fuerte:**
 - En **estudios de física**
 - En **instrumentación** de **aceleradores**
 - Y en **instrumentación** de **detectores**
 - Roles de coordinación en comités europeos e internacionales



¿Dónde estamos?

- ▶ Para completar el programa empezado por el LHC y el HL-LHC, la comunidad persigue:
 - una **Factoría de Higgs (e+e-)** que incluya un programa de alta energía
 - Higgs/EW/Top/BSM !!
 - Ante la falta clara de evidencias de nuevas partículas o fuerzas... **la física de precisión** y las búsquedas alternativas **son nuestra mejor herramienta.**
- ▶ Es un desafío global, con proyectos a largo plazo y de alto coste.
- ▶ Esfuerzo global y estratégico en el cuál el **el IFIC** tiene una posición muy fuerte:
 - En **estudios de física**
 - En **instrumentación de aceleradores**
 - Y en **instrumentación de detectores**
 - Roles de coordinación en comités europeos e internacionales

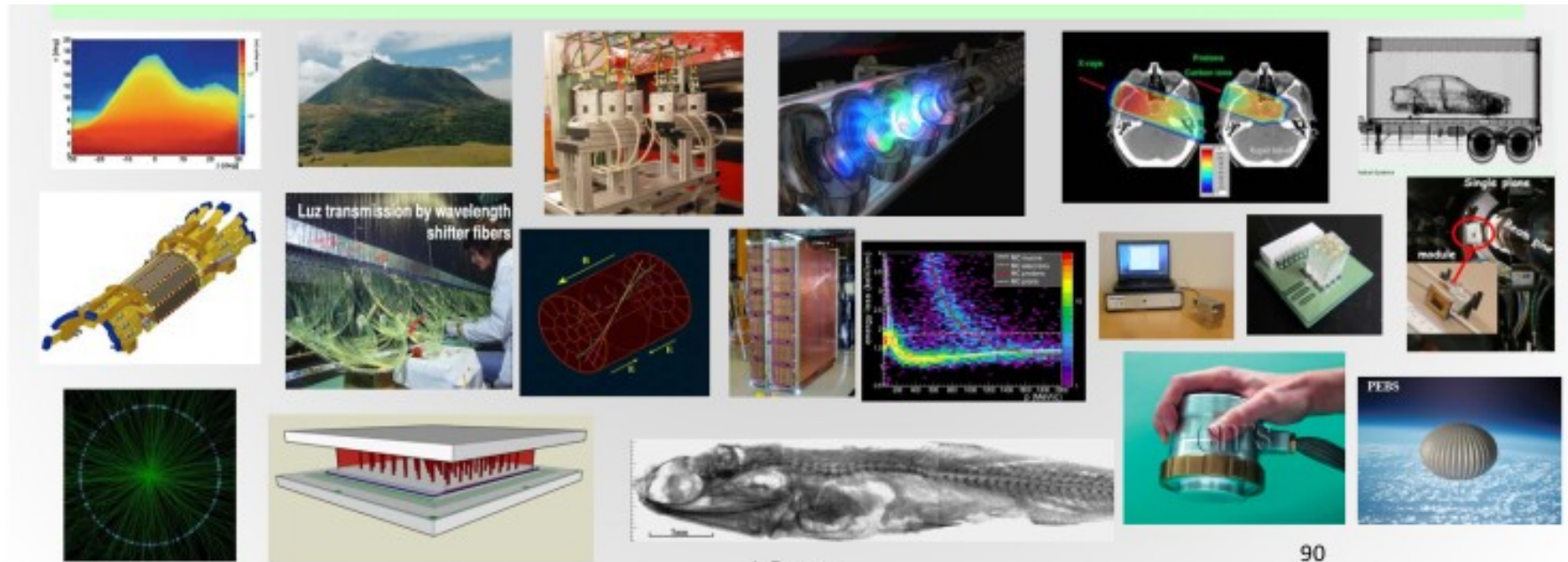


Ciencia
→
Tecnología
→
Sociedad



Física de partículas y tecnologías de la sociedad

- En muchos casos, la tecnología necesaria para poner a punto los experimentos de física de partículas no está disponible en el mercado → **nuevos desarrollos**
- En otros, las prestaciones de la tecnología disponible se han mejorado por el uso en el límite de especificaciones, o escala de uso → **contribución al desarrollo**
- En otros, simplemente se aplica tecnología existente → **usuarios de tecnología**



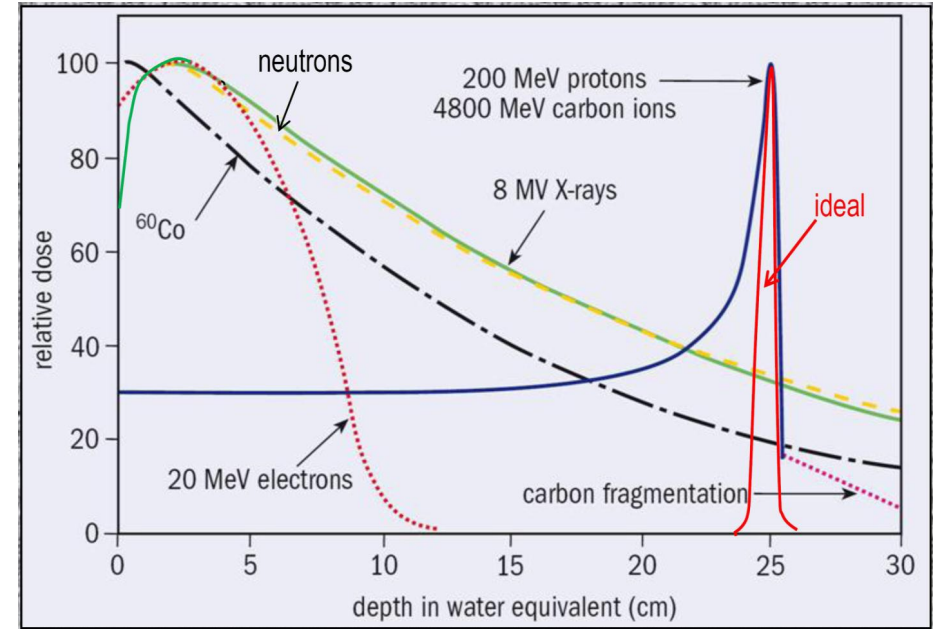
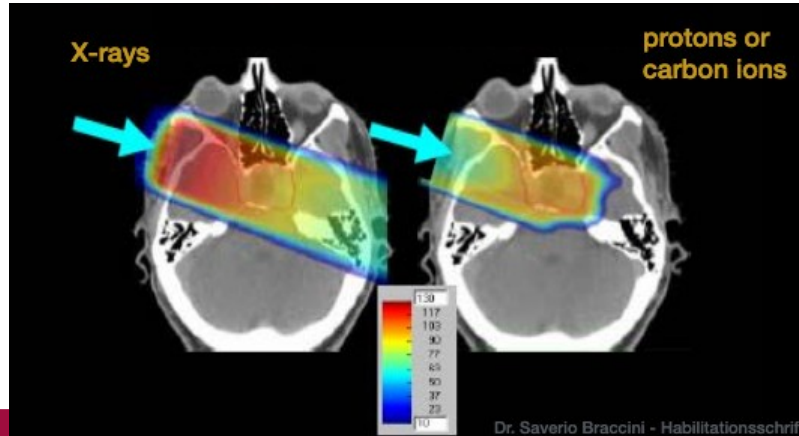
Aplicaciones en medicina: terapias contra el cáncer

El reto de utilizar radiaciones para curar el cáncer está en conseguir:

- Tratar el tumor
- Todo el tumor
- Y solo el tumor

Radioterapia

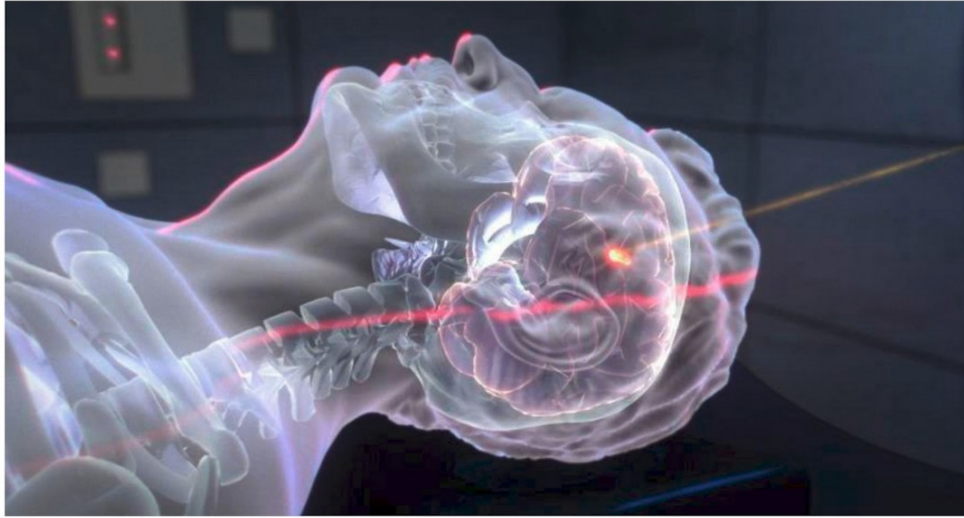
Terapias con protones e iones



Haz penetrando la materia

Con rayos-X > 14000 en todo el mundo
Para protones unos 112 centros en Europa
Para iones solo 4 centros en Europa

El IFIC – pionero en aceleradores para la sociedad



El IFIC albergará una infraestructura pionera de investigación en hadronterapia contra el cáncer

El grupo AITANA del IFIC se posiciona como líder en tecnologías para la sociedad con este proyecto para desarrollar la tecnología de aceleradores lineales compactos con haces de iones con la colaboración entre empresas y organismos públicos de investigación españoles y realizar estudios radiobiológicos únicos a nivel mundial.



El Gobierno invertirá cerca de 22 M € en la primera infraestructura de investigación de hadronterapia de España, una tecnología pionera contra el cáncer

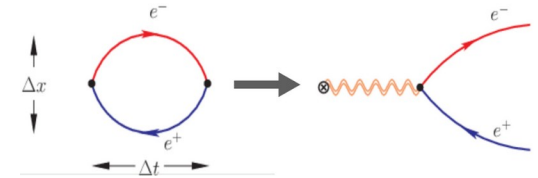
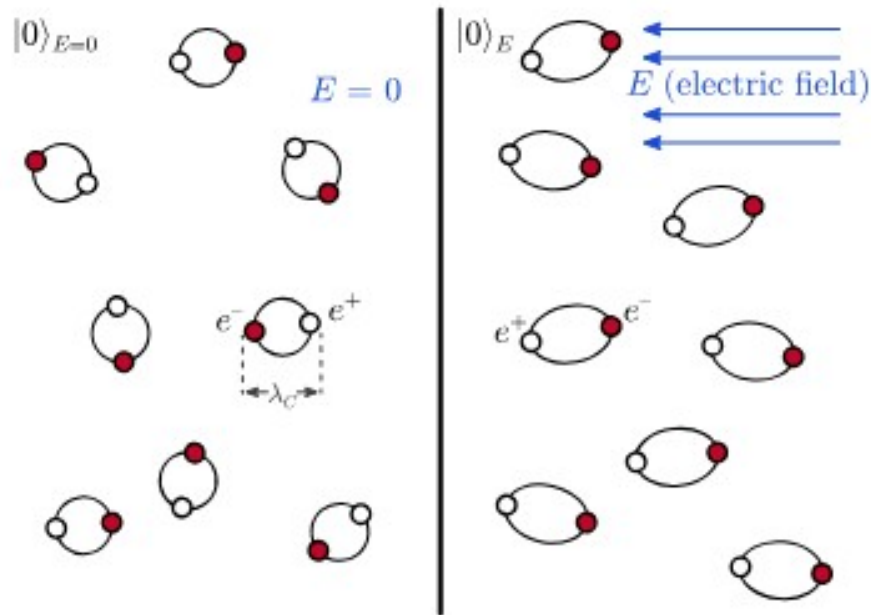
Instalación pionera en España y EUROPA



Ciencia
→
Tecnología
→
más Ciencia



QED de Campo Fuerte



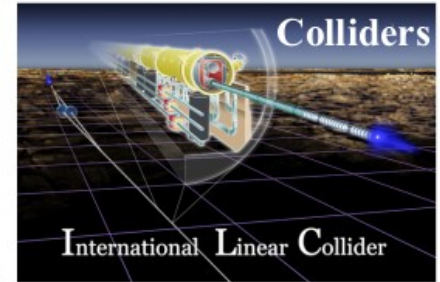
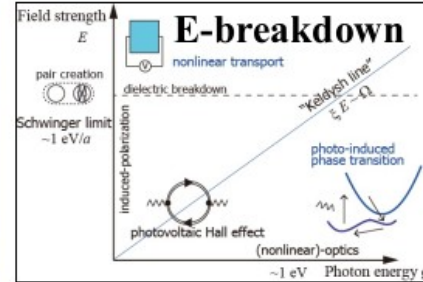
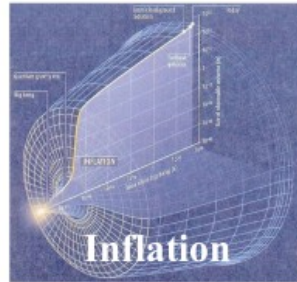
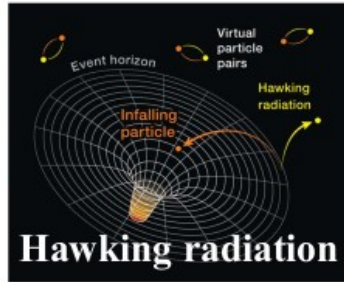
$$\mathcal{E}_{crit} = \frac{m_e^2 c^3}{\hbar e} = 1.32 \times 10^{18} \text{ V/m}.$$

"In extreme EM environments, even the vacuum starts to sweat virtual particles."

QED de Campo Fuerte

► **Estos campos no se han alcanzado experimentalmente** en laboratorios. Existen en:

- Superficie de **magnetars** (estrellas de neutrones)
- Nucleos pesados
- En los **bunches** de **colisionadores e^+e^-**
- Wake Field Accelerator



QED de Campo Fuerte

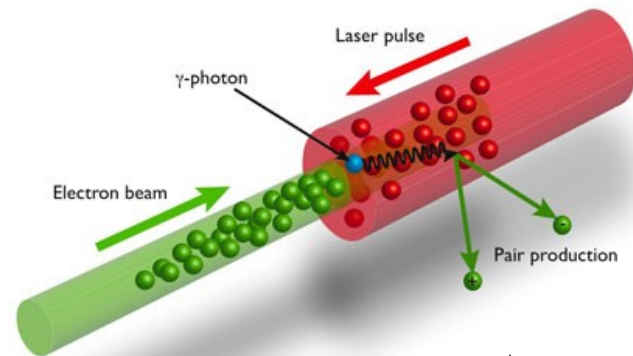
► El **IFIC** participa en un **experimento único** en el mundo que replica esas condiciones.

- En DESY y Eu.XFEL (Alemania)

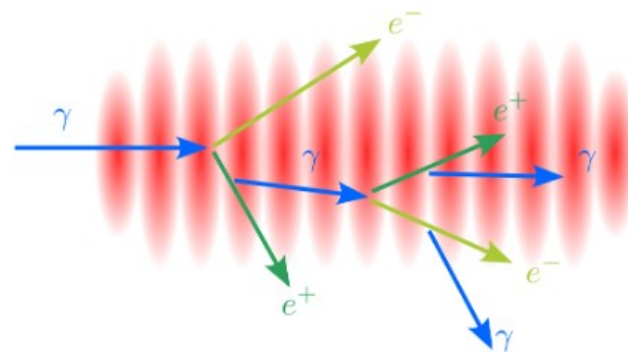
LUXE

► Solo **posible** gracias a **avances independientes** en:

- Tecnología y física de láseres
- **Aceleradores lineales de electrones** y **detectores** para **Higgs Factories**



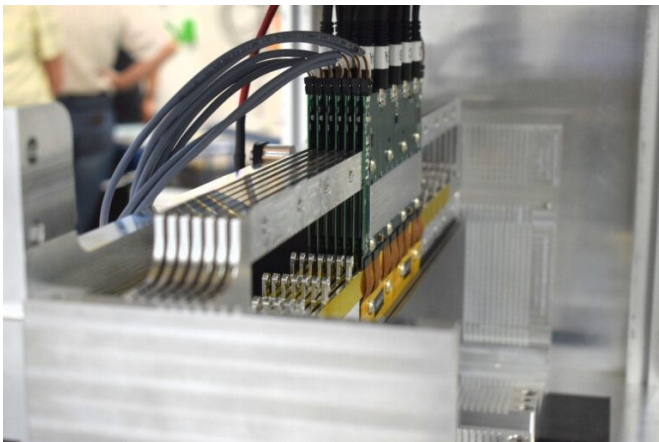
$$\varepsilon_L = \gamma \varepsilon (1 + \cos \theta)$$



Non-linear non-perturbative QED

QED de Campo Fuerte

- ▶ El **IFIC** es parte del **consorcio** que **instrumentará** la línea de haz en el acelerador Eu.XFEL dirigida al experimento LUXE
 - Y a nuevos experimentos y desarrollos de física de plasma → aceleradores del futuro!
 - **ELBEX**
- ▶ El **IFIC** es además miembro de la **colaboración LUXE** y juega un papel principal en el desarrollo y construcción de sus detectores
 - **LUXE** va a explorar **regímenes nunca explorados** de la física cuántica...
 - Y además servirá de banco de pruebas para los **detectores** de **futuras Higgs Factories**



Grandes desafíos



¿Y PARA QUE SE PUEDE USAR ESTO?

NO SABEMOS, LO QUE HACEMOS ES INVESTIGACION BASICA

QUE BONITO, NOSOTROS NOS MATAMOS EMPUJANDO PIEDRAS
Y ARRASTRANDO ANIMALES SALVAJES, MIENTRAS LOS SEÑORES
SE ENTRETENEN HACIENDO COSAS QUE NO SIRVEN PARA NADA



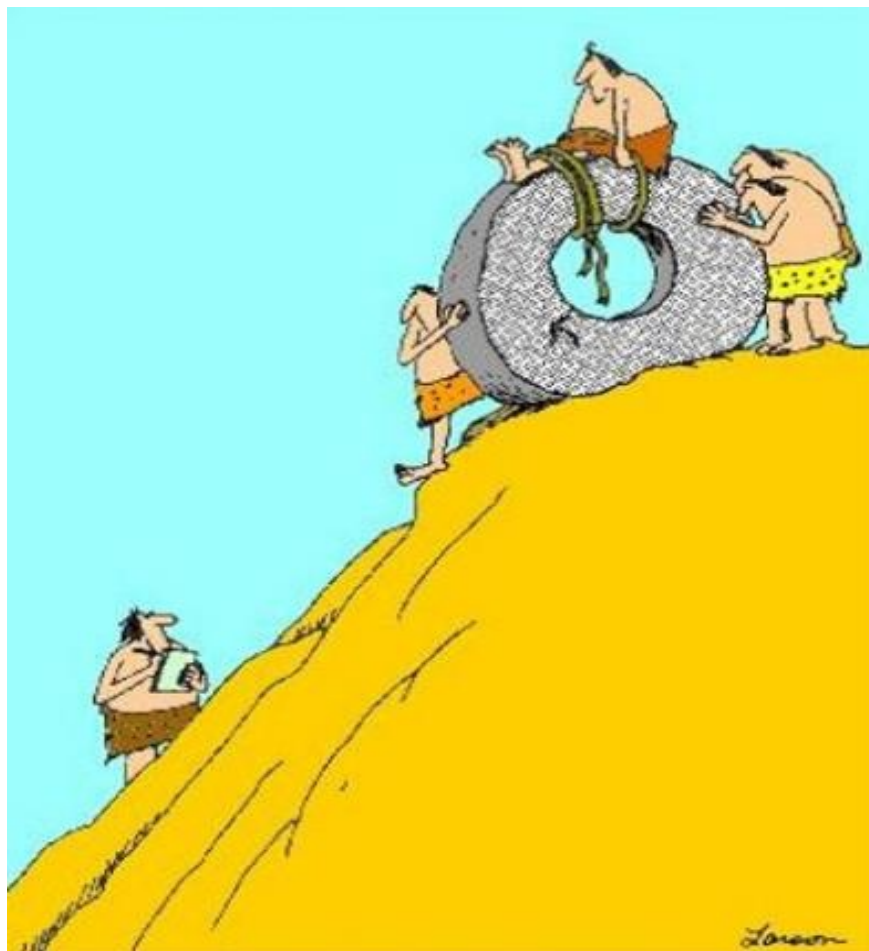
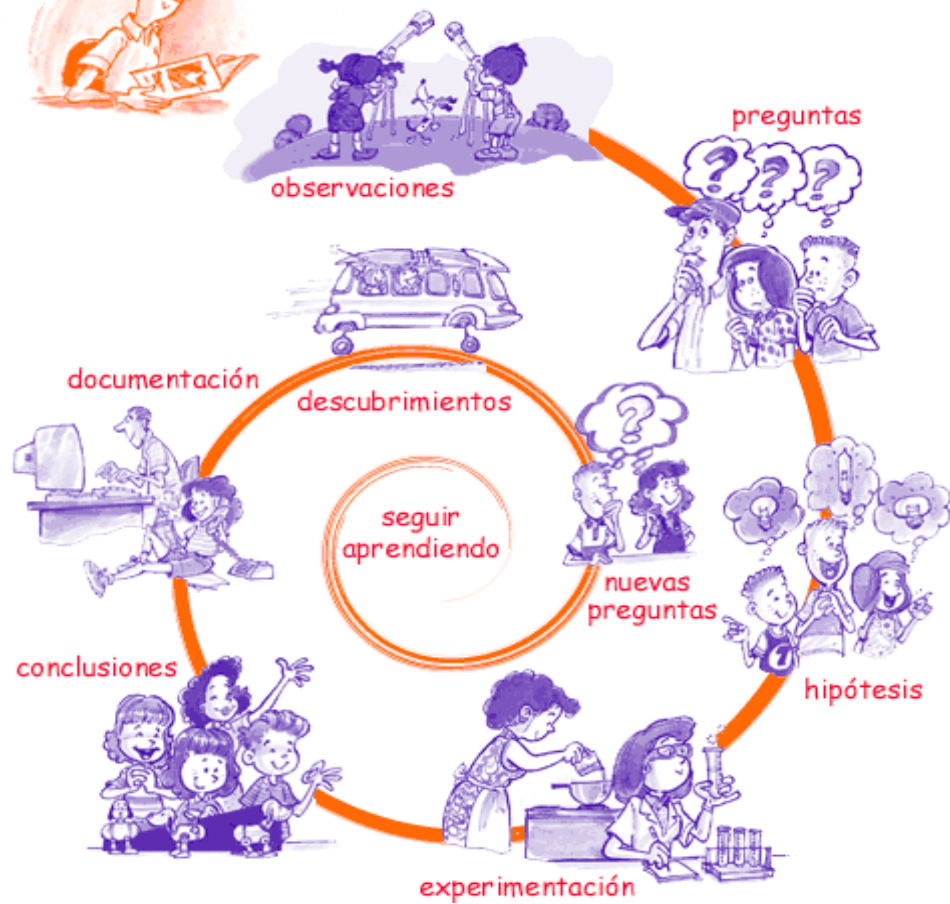


En “El Ocaso de los Ídolos” de Nietzsche, este formula tres tareas por las que se requieren educadores: hay que aprender a mirar, a pensar y a hablar.

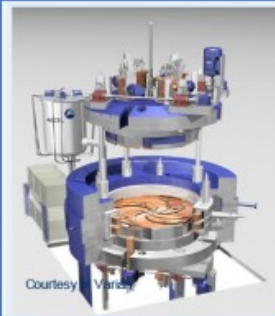




El método científico



Tipos de aceleradores

Tipo de acelerador	Acelerador lineal	Ciclotrón/sincrociclotrón	Sincrotrón
	 Image: copyright Varian medical systems	 Courtesy: Varian	
Uso	- Imagen médica - Terapias contra el cáncer	- Radioisótopos - Terapias contra el cáncer	Terapias contra el cáncer
Partículas	Electrones	Protones, iones	Protones e iones
Energías	4-20 MeV	11-230 MeV	70-430 MeV
#en el mundo	¡El acelerador de partículas más exitoso del mundo!		protones iones

Con rayos-X > 14000 en todo el mundo
 Para protones unos 112 centros en Europa
 Para iones solo 4 centros en Europa