



MINISTERIO
DE CIENCIA, INNOVACIÓN
Y UNIVERSIDADES



VNIVERSITAT
D VALÈNCIA

El futuro de Física de Partículas en aceleradores.

Una visión personal

π^-

k^0

π^+

Λ

p

π^-



π^-

Juan A. Fuster Verdú – IFIC, València
LatorreFest
Barcelona, 31 de Mayo de 2019

Por qué estoy aquí ?



Gràcies per l'invitació

1er Taller de Altas Energías 2002: Peñíscola



Javier Mas

María José Herrero

José Igancio Latorre

Juan Fuster



1er Taller de Altas Energías 2022: Peñiscola



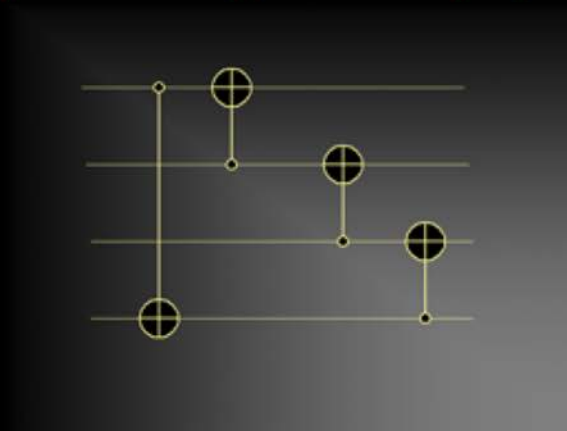
1er Taller de Altas Energías 2002: Peñíscola

Información Cuántica

I TAE
Peñíscola
Abril 2002

$$|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$$

El paradigma cuántico
Elementos básicos
Logros recientes
Perspectivas de futuro



José Ignacio Latorre
Universitat de Barcelona

1er Taller de Altas Energías 2002: Peñíscola



TAE 2002: Proyecto “hacer nuestro vino”



TAE 2002: Proyecto "hacer nuestro vino"



TAE 2002: Prototipos



Quàntic spin-off de TAE2002



'Quàntic' és un vi inspirat en la Física Quàntica de Partícules i és obra de Joan Fuster, Jordi Miguel i José Ignacio Latorre. El producte ha sigut elaborat i embotellat en el celler El Celler La Muntanya, que ha prestat tot l'assessorament necessari, convertint-se així en el primer elaborat per un microvinyer. La microvinya es troba situada en el paratge de Sant Cristòfol i representa tots els valors de les serres de les comarques de l'Alcoià i El Comtat.

Un dels seus autors, el doctor en Física de Partícules, Joan Fuster, ha trobat en el vi la manera d'estar en contacte amb la seua terra i amb la seua gent. El vi conté tots els valors del projecte Microvinya i, per descomptat, porta el segell personal dels seus creadors.

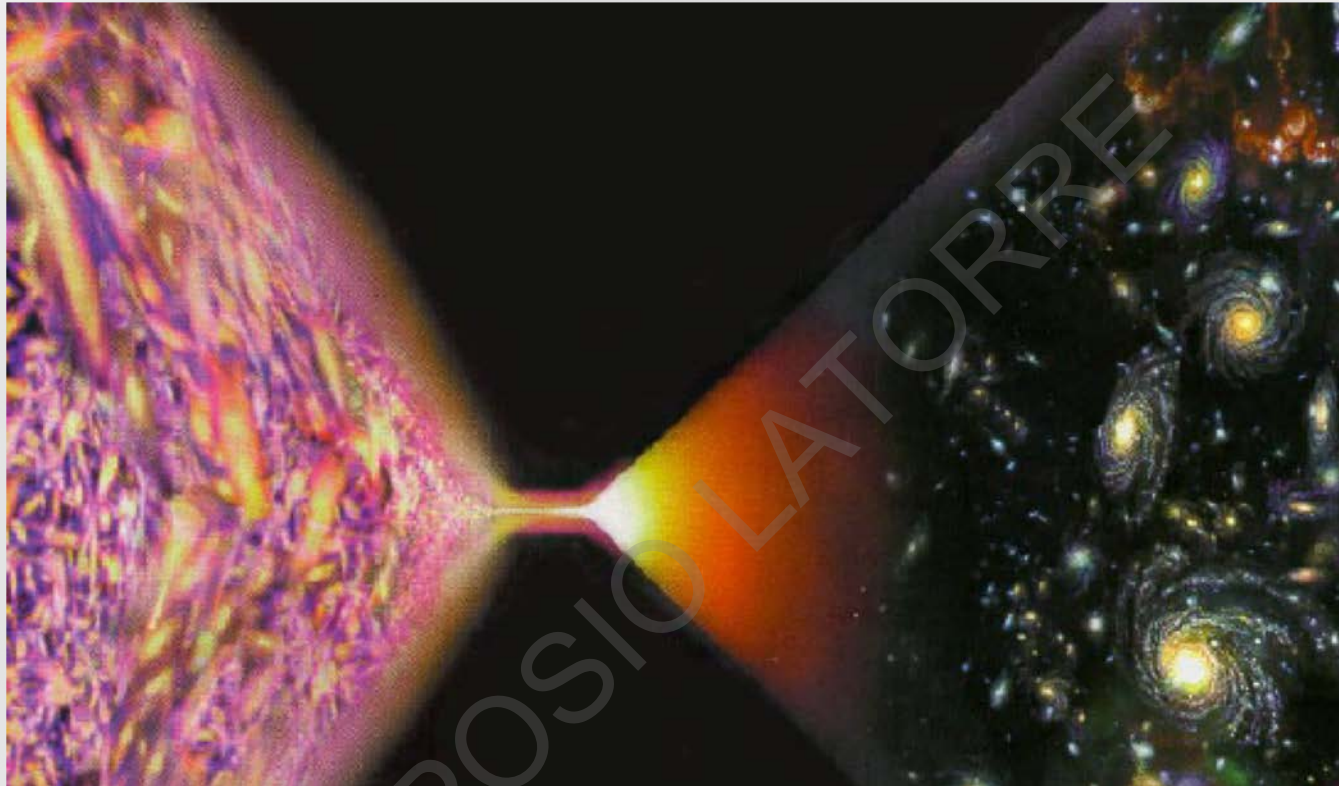
Fruit de la passió per la terra dels seus creadors ha nascut 'Quàntic', un vi molt personal extret amb el raïm conreat en uns bancals abandonats durant dècades, situats en uns terrenys tan agrests que li proporcionen un sabor molt especial.



Quàntic 2017 (y es primo !!)



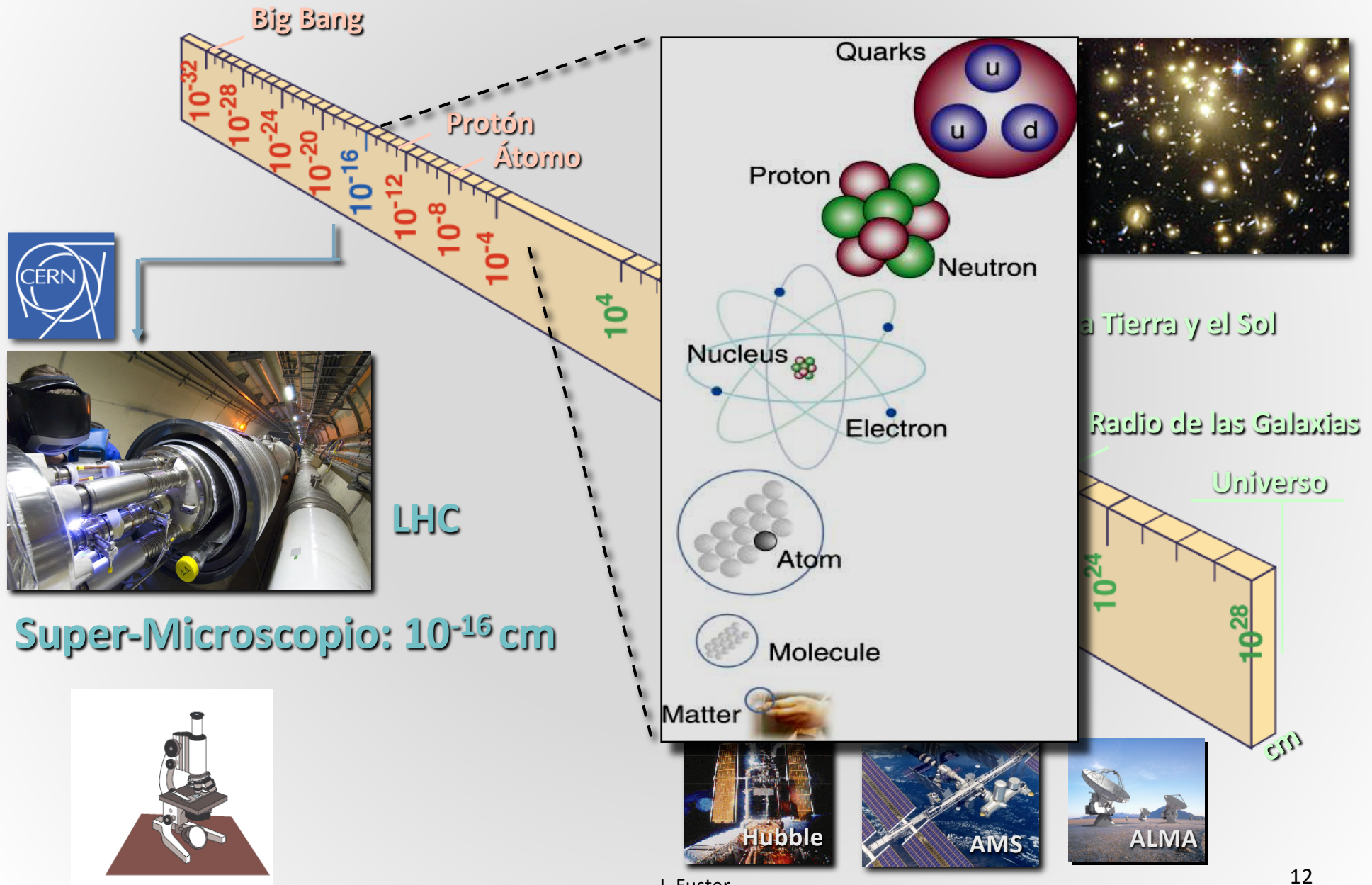
Del quark al cosmos



Propósito y visión del campo:

- Entender la naturaleza y estructura fundamental de la energía, la materia, el espacio y el tiempo.
- Aplicar este conocimiento para entender el origen, la evolución y destino del Universo.

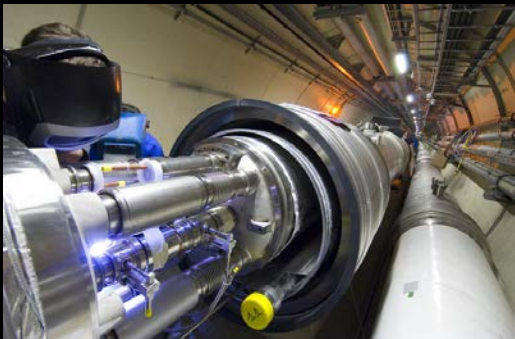
Los grandes aceleradores son microscopios



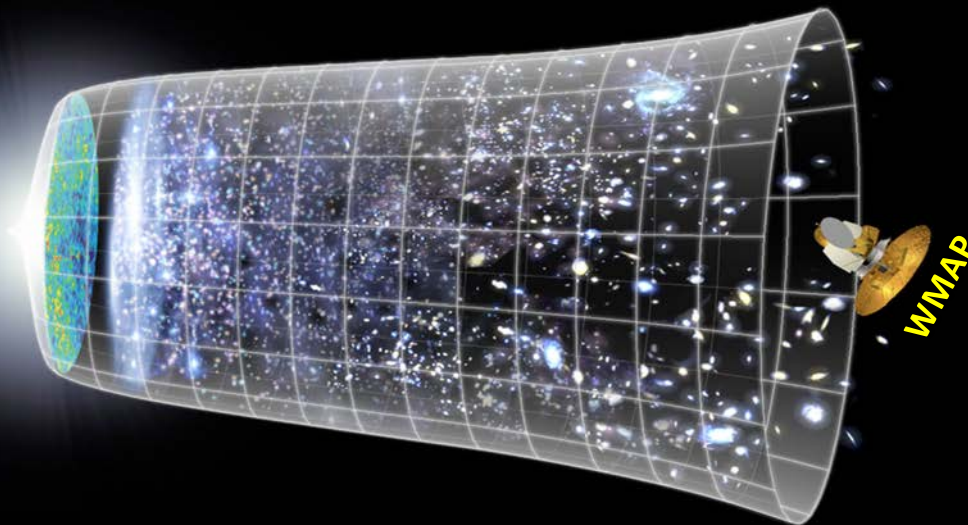
Los grandes aceleradores “también” son máquinas del tiempo

Reto:

“entender los primeros instantes del Universo justo después Big Bang”
en perfecta sinergia Física de Partículas, Astrofísica y Cosmología



← Big Bang
LHC



Máquina del tiempo: 10^{-10} seg



13700 millones de años

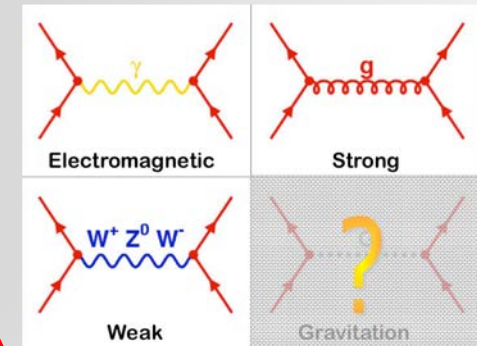
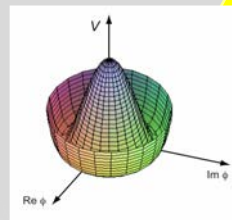
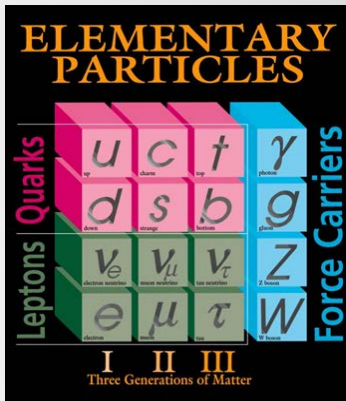




El Modelo Estándar

$$\mathcal{L}_{\text{SM}} = \mathcal{L}_{\text{Gauge}} + \mathcal{L}_{\text{Higgs}} + \mathcal{L}_{\text{Yukawa}}$$

(~1980)



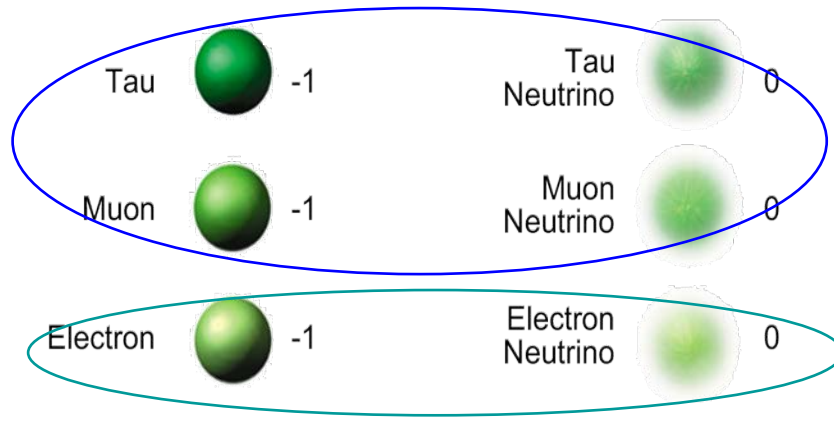
Higgs: EWSB

Partículas

Interacciones/Fuerzas

Las partículas del Modelo Estándar

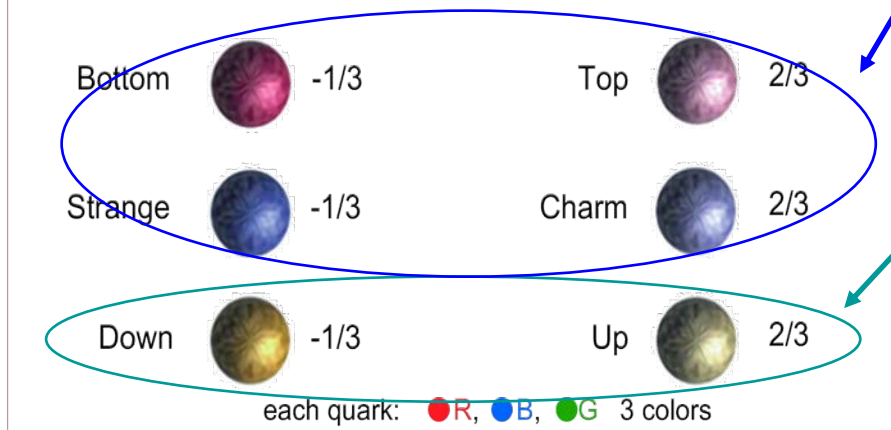
Leptones



3 familias de leptones y
3 familias de quarks

Presentes en los rayos
cósmicos y creados en el
laboratorio
(presentes en el origen del
Universo)

Quarks

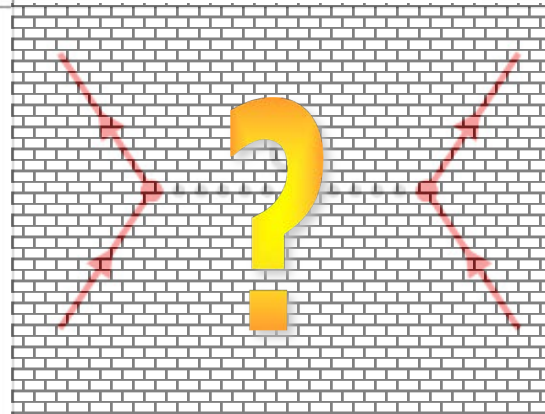
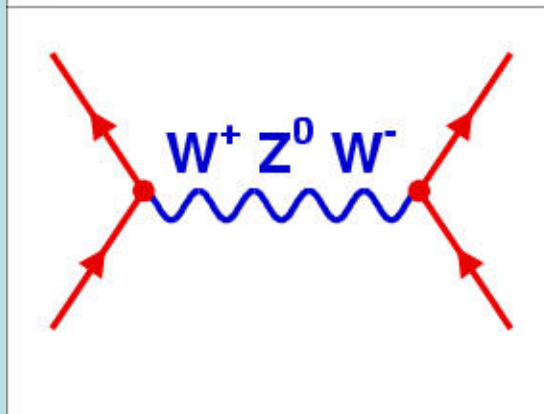
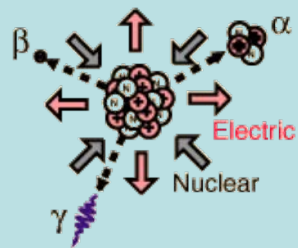
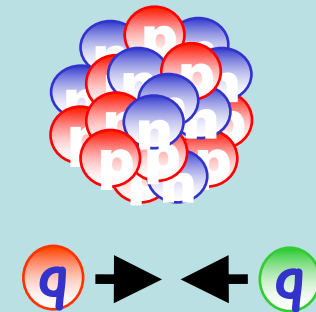
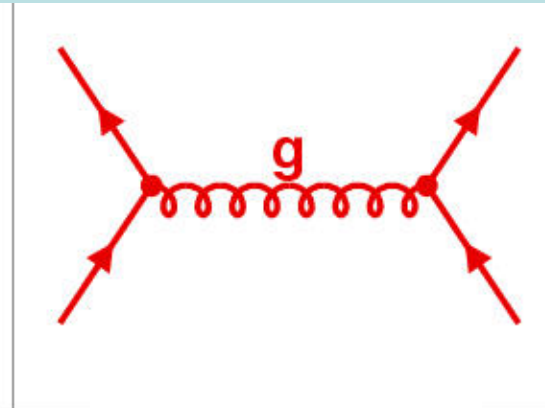
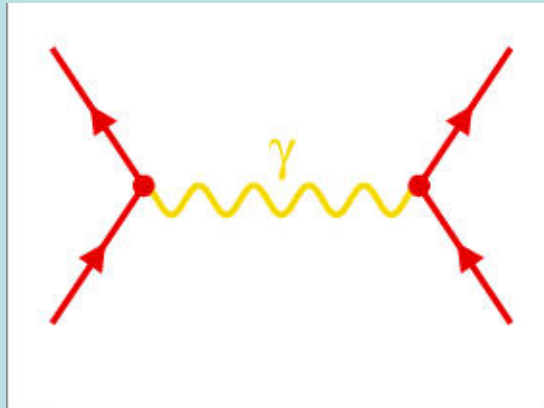
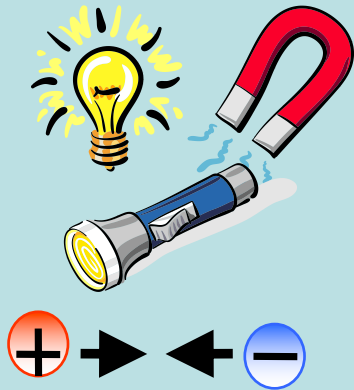
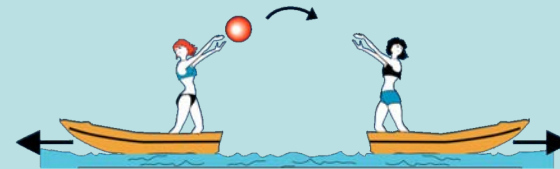


Constituyentes de la materia
ordinaria

The particle drawings are simple artistic representations

Interacciones fundamentales

Las interacciones están mediadas por el intercambio de partículas (bosones de gauge)

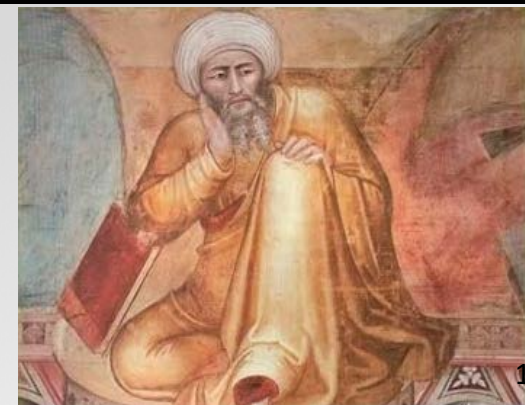
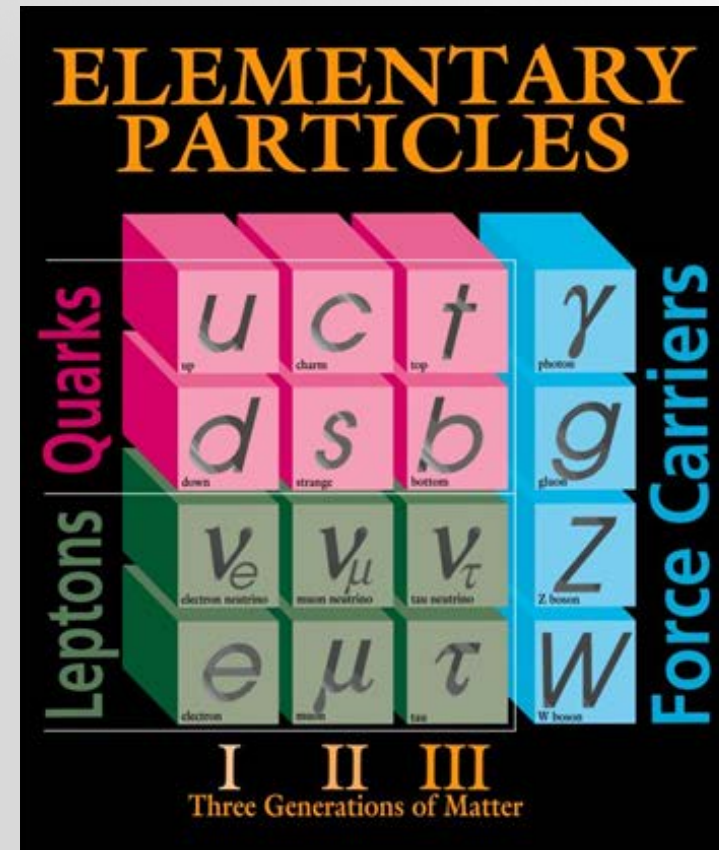


¿ Por qué el modelo estándar es cómo es ?

- La primera y la última columna son indispensables, pero no las otras !
- Averroes (Córdoba siglo XII) nos dice :
“En la naturaleza nada hay superfluo.”
- Queremos entender las razones detrás de esta estructura,

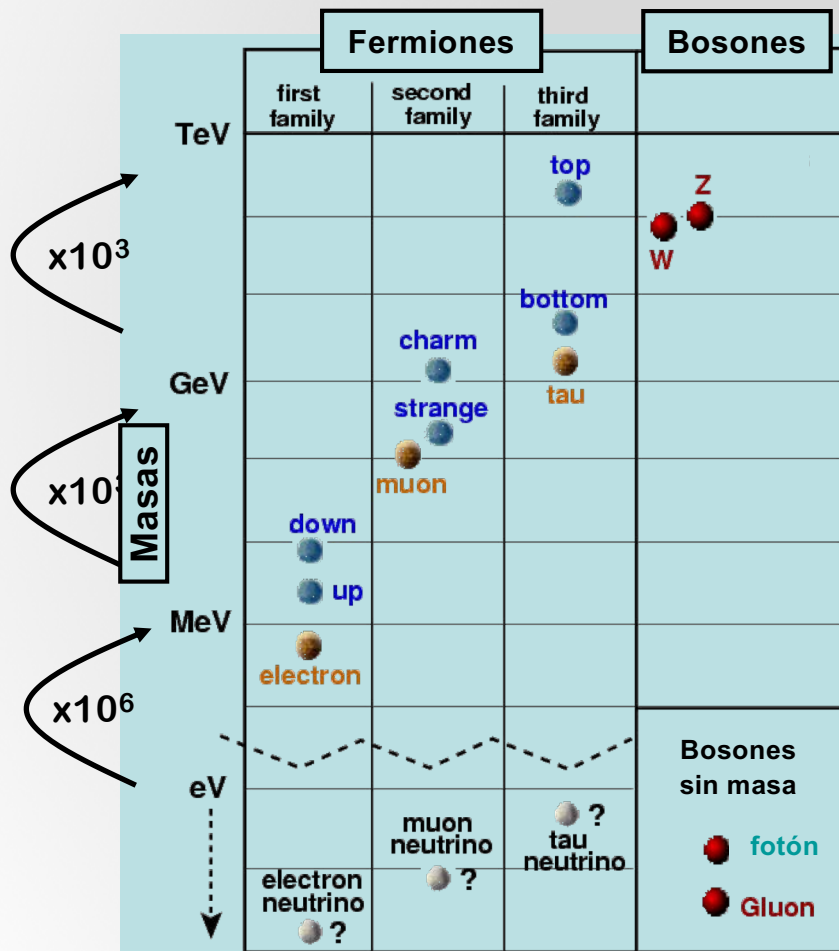
¿ por qué ?

Replicas de la primera pero con masas distintas



La masa de las partículas

● Hemos medido un amplio espectro de masas.

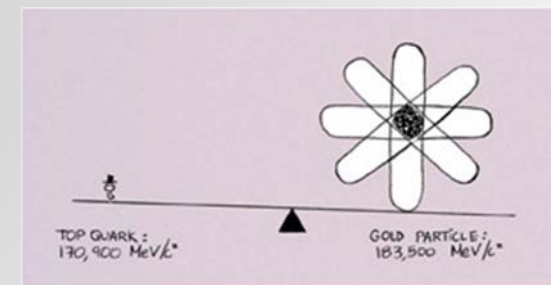


$$m_{\gamma} = 0 \quad i.e. \quad < 6 \cdot 10^{-26} \quad \text{GeV}$$

$$m_{W^{\pm}} = 80.425 \pm 0.038 \quad \text{GeV}$$

$$m_{Z^0} = 91.1876 \pm 0.0021 \quad \text{GeV}$$

$$m_g = 0$$

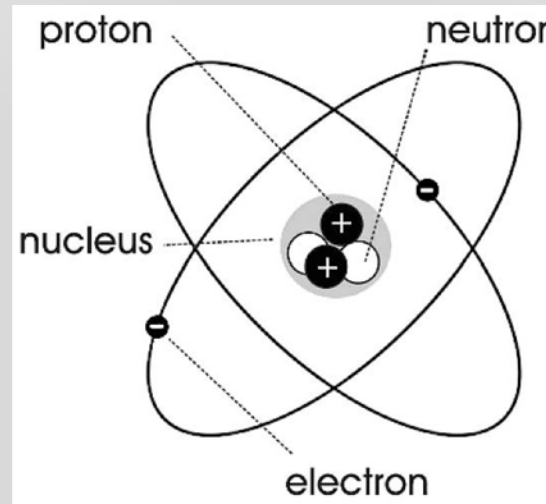


Averroes: ¿ por qué ?

Porque son las masas tan diversas ?

- Una casualidad o una necesidad ? Mejor dicho podríamos cambiarlas sin que hayan consecuencias sobre nuestro universo sugiriendo que son el resultado de la casualidad ?
- En ciertos casos aparece claramente que no son posibles cambios sin que hayan consecuencias dramáticas
- Así un cambio muy tenue de las masas de las partículas de la 1^{era} familia **u d e** implica graves consecuencias

Porque son las masas tan diversas ?



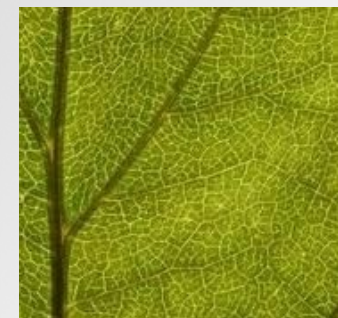
- Por ejemplo el **neutrón udd** podría ser menos pesado que el **protón uud** con la consecuencia que el **hidrógeno** no sería estable
- Gracias a $M_{\text{electron}} \neq 0$ el núcleo puede atrapar a los electrones
- **Averroes:** ¿por qué el electrón y los quarks tienen masa?

La jerarquía de las masas de las partículas

- Las masas varían sobre **14 ordenes de magnitud**
 - Que quiere decir esto ?
 - Similar diferencias de escala ocurren en la naturaleza pero con **objetos complejos** mientras que aquí se trata de **partículas elementales**
 - **Averroes: serán realmente elementales ?**
- Tierra = $12,76 \times 10^6 = 12,760,000$ metros ancho (12,76 millones metros)



- Células vegetales = $12.76 \times 10^{-6} = 0.00001276$ metros ancho (12.76 millonésimas de metro)



Las distintas caras de la masa



- **1687 Newton:** masa inercial, resistencia al movimiento y leyes de gravitación



$$\vec{F} = m\vec{a}$$

Las distintas caras de la masa

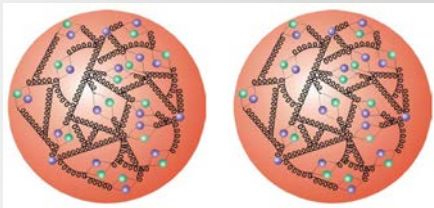


- **1687 Newton:** masa inercial, resistencia al movimiento y leyes de gravitación



$$\vec{F} = m\vec{a}$$

- **1905 Einstein:** equivalencia entre masa y energía, masa del protón (hadrones) es energía condensada



$$E = mc^2$$

Las distintas caras de la masa

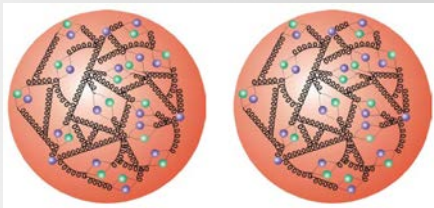


- **1687 Newton:** masa inercial, resistencia al movimiento y leyes de gravitación



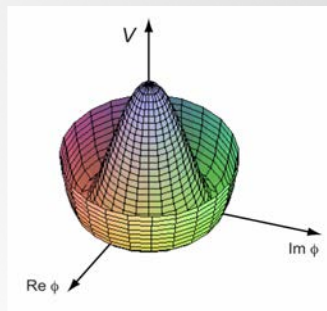
$$\vec{F} = m\vec{a}$$

- **1905 Einstein:** equivalencia entre masa y energía, masa del protón (hadrones) es energía condensada



$$E = mc^2$$

- **1964 Brout-Englert-Higgs:** conexión con el vacío. El vacío no es la “nada” sino el estado de mínima energía



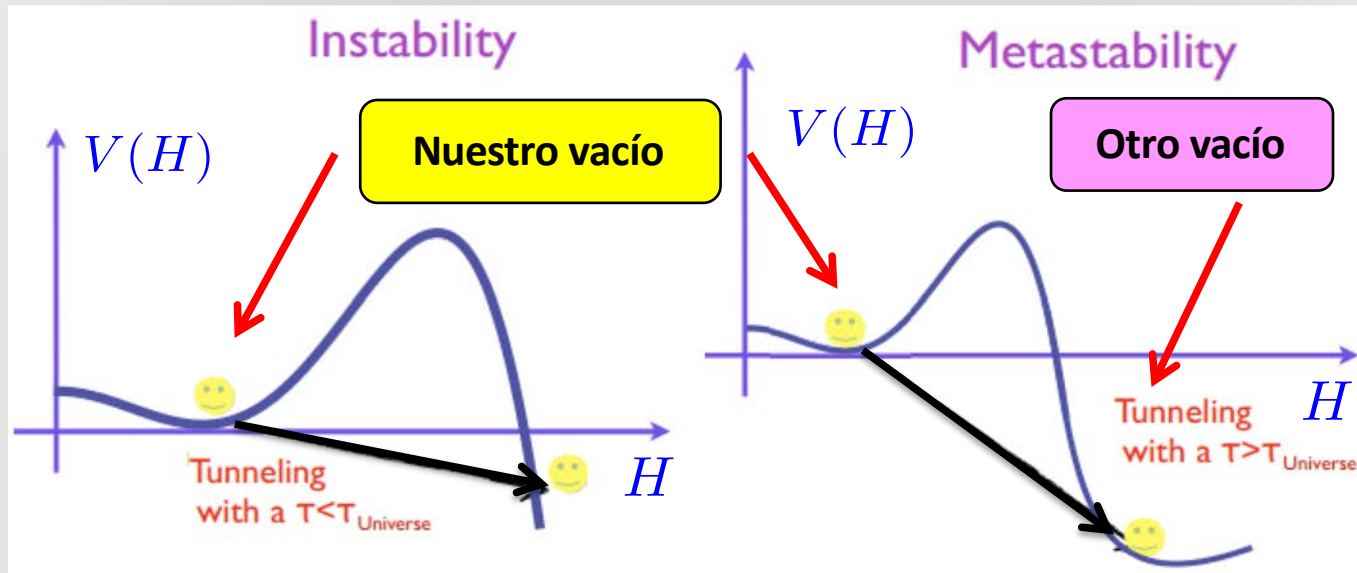
$$|\phi| = a = \left(\frac{-\mu^2}{2\lambda}\right)^{1/2}$$

$$\phi(x) = a + \frac{\phi_1(x) + i\phi_2(x)}{\sqrt{2}}$$

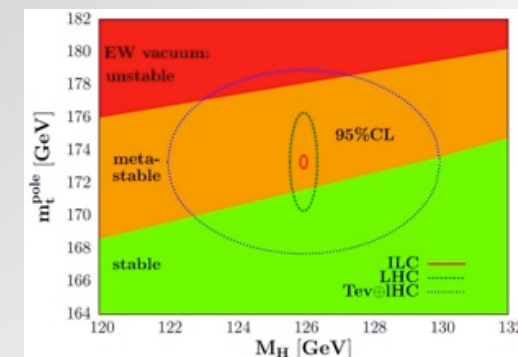
Las distintas caras de la masa



- **Recientemente:** los valores de la masa del Higgs y la masa del quark top, nos dicen que vivimos en un universo metaestable



- ¿ Nos tendremos que preocupar, “Ilegaremos a la jubilación” ?
- ¿ Hay nueva física que “cura la metaestabilidad” ?
- **Que diría ¿ Averroes ?**



¿ Qué es metaestabilidad ?



J. Fuster

H(125) de momento se comporta como el Higgs del MS, pero ..

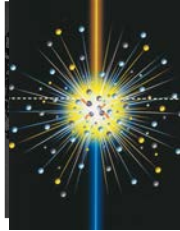


Cortesía de C. García

**Hay que estudiar con la mejor precisión posible el Higgs,
nuestro “mejor” mensajero al mundo subatómico
Averroes de nuevo !!: y entender por qué ?**

Balance materia anti-materia

Big-Bang
Energía



Materia
1,000,000,001



anti-materia
1,000,000,001

Cuadro de Marilyn Monroe
Andy Warhola (1964)



$$E=mc^2$$



Materia
1,000,000,002

anti-materia
1,000,000,000



El Universo
ahora
Materia 2



Averroes: ¿por qué?

Materia Oscura

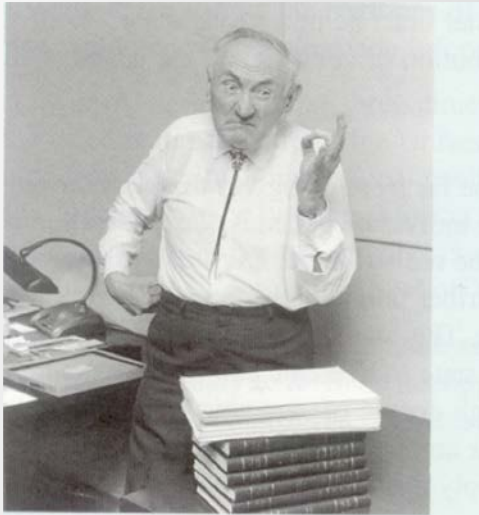
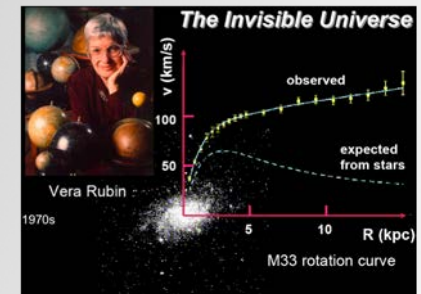
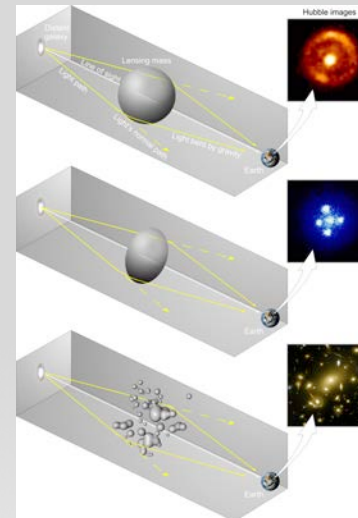


Figure 4.6 Fritz Zwicky (1898 – 1974).
(California Institute of Technology)

1930s: Fritz Zwicky, estudió la galaxia de Coma y predijo la existencia de *materia no visible* que influía en el movimiento orbital de las galaxias.

Desde entonces varias observaciones se han sucedido y confirmado la existencia de la Materia Oscura en el Universo (lentes gravitacionales)

El MS no incluye ningún candidato natural para explicar la Materia Oscura.



Galaxy Cluster Abell 2218
NASA, A. Fruchter and the ERO Team (STScI, STFC) • STScI-PRC00-08
HST • WFPC2

Los ingredientes del Universo

4-5% Normal-bariónica (u,d,e):

- **Materia ordinaria. incluye estrellas, planetas, personas**

22-25% Materia oscura:

- **Modelo Estándar (4-5%) bariónica.**

70-75% Energía oscura:

- **Más rara todavía !**



Averroes:

El lado oscuro
domina el Universo,

¿ por qué ?

Averroes:

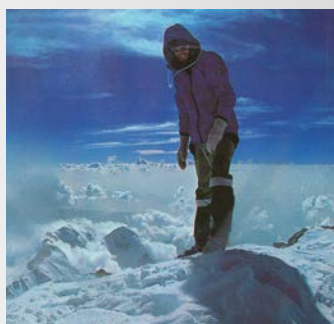
¿ Cúal es la naturaleza de la materia oscura ?

¿ Interaccionará el Higgs con la materia oscura ?

Con el descubrimiento del Higgs-H(125) nuevos retos aparecen



Después de un largo y exitoso programa de investigación con gran inversión de recursos, estudios e investigaciones se ha edificado el Modelo Estándar (PETRA, PEP, Babar, Belle, HERA, LEP, Tevatron, LHC, etc..)



La culminación ha sido el descubrimiento del Higgs-H(125)

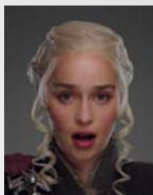


Sin embargo solo significa un paso mas en nuestro conocimiento para ser mas conscientes de lo que desconocemos. Ahora podemos plantear e identificar mejor nuestros futuros objetivos.

Con el descubrimiento del Higgs-H(125) nuevos retos aparecen

Las preguntas fundamentales, las remanentes y las nuevas:

- qué establece la masa del bosón de Higgs ?, es elemental o compuesto ?
- cuál es el mecanismo que rige la rotura espontánea de simetría ?, hay un Higgs o hay mas ?
- estabilidad del Universo
- cuál es la naturaleza de la Materia Oscura ?
- que rige la inflación del Universo ?
- por qué solo hay materia en el Universo ?



Nuestras mejores herramientas en física de partículas:

- H(125)
- quark top
- bosones W/Z- γ
- Neutrinos
- Sabor (quark b, etc..)
- búsqueda de nueva física - nuevas partículas

Los Instrumentos: aceleradores, $E=mc^2$

$$N_{\text{sucesos}} = \mathcal{L} \times \sigma$$

\mathcal{L} = Luminosidad

σ = Sección Eficaz

Condiciones
del Experimento
(la energía del proceso,
el estado inicial...)

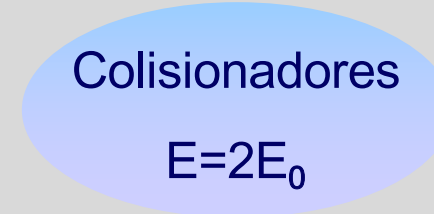
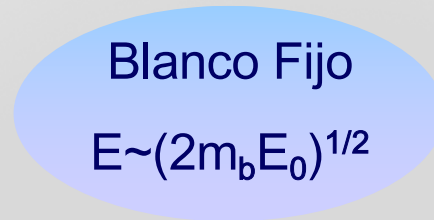
$$\mathcal{L} \propto N_{\text{part}} f/A$$

$$f \sim \mu\text{sec-nsec}$$

$$A \sim 20 \times 200 \mu\text{m}^2$$

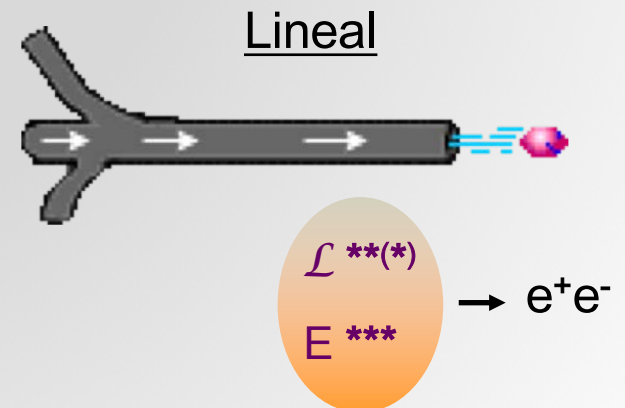
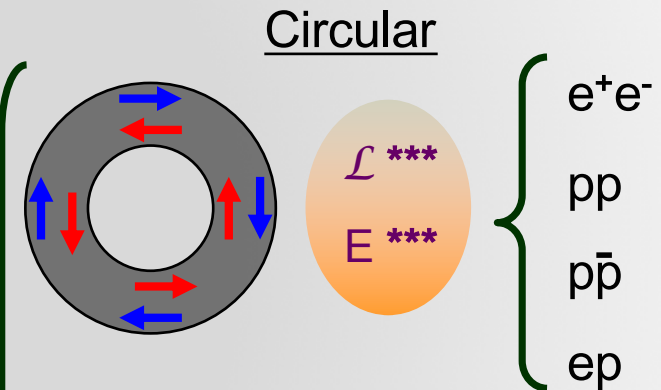
$$1-5 \times 100 \text{ nm}^2$$

$$N_{\text{part}} \sim 10^{10-12} \text{ part.}$$

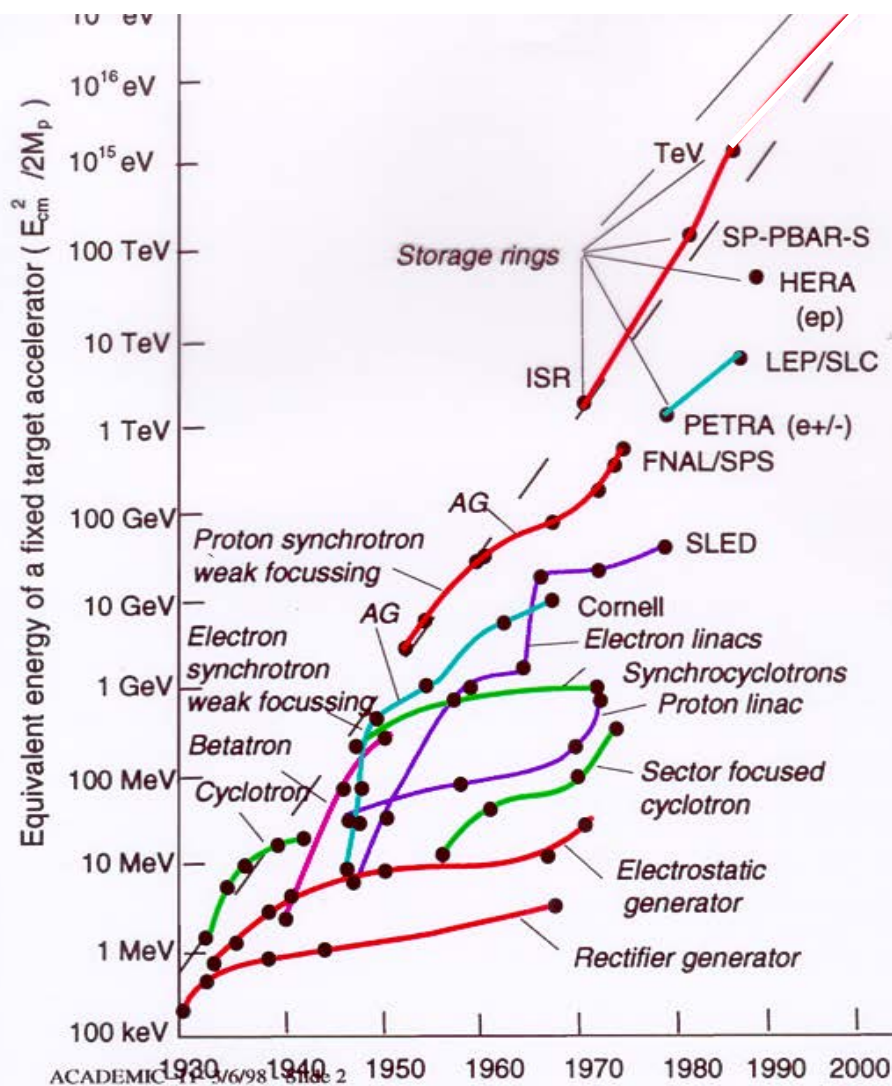


$$\Delta E_{\text{perdida}} \propto E^4/R$$

$$\Delta E_{\text{perdida}} \propto 1/m^4$$

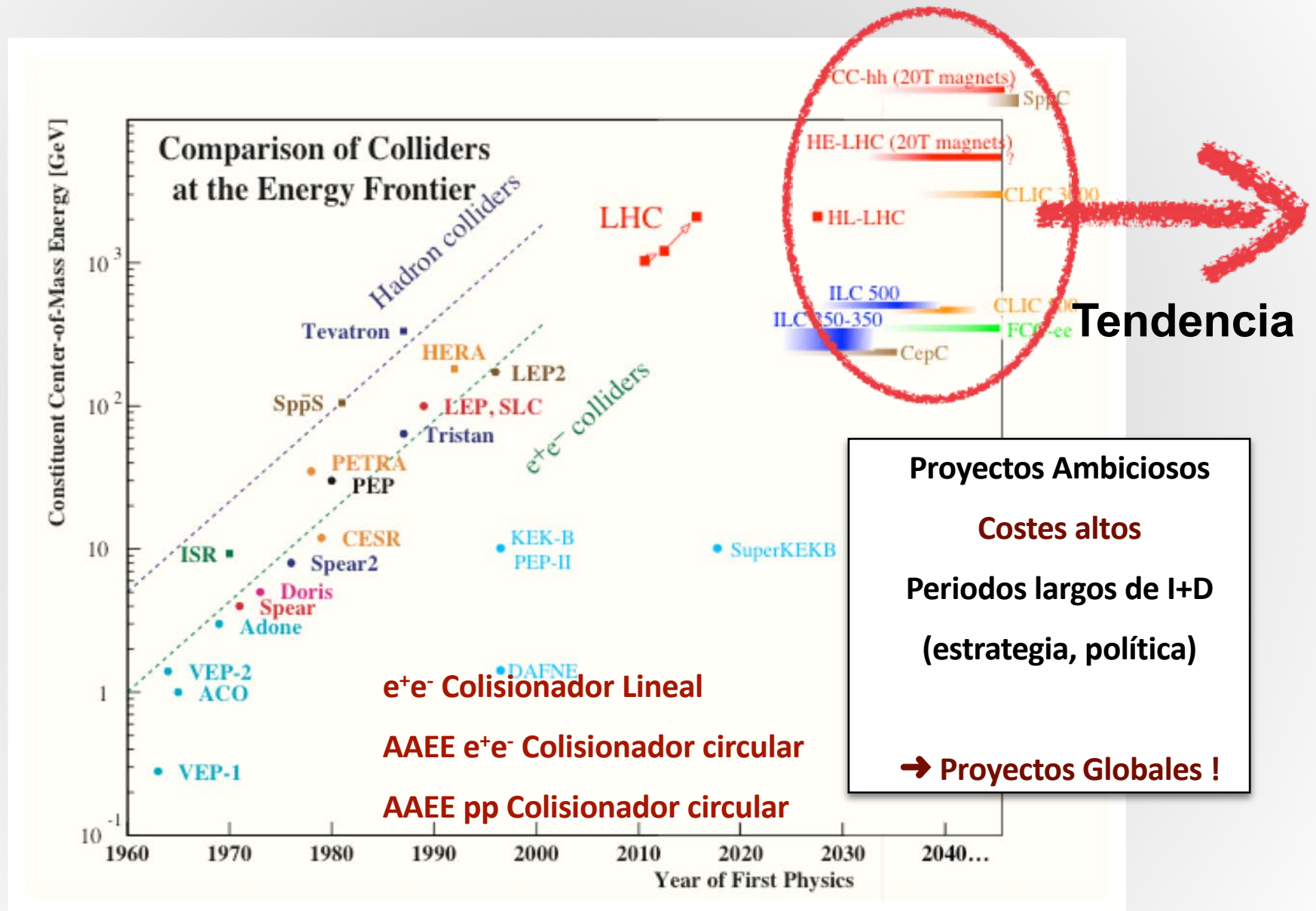


Los Instrumentos: aceleradores, desarrollo

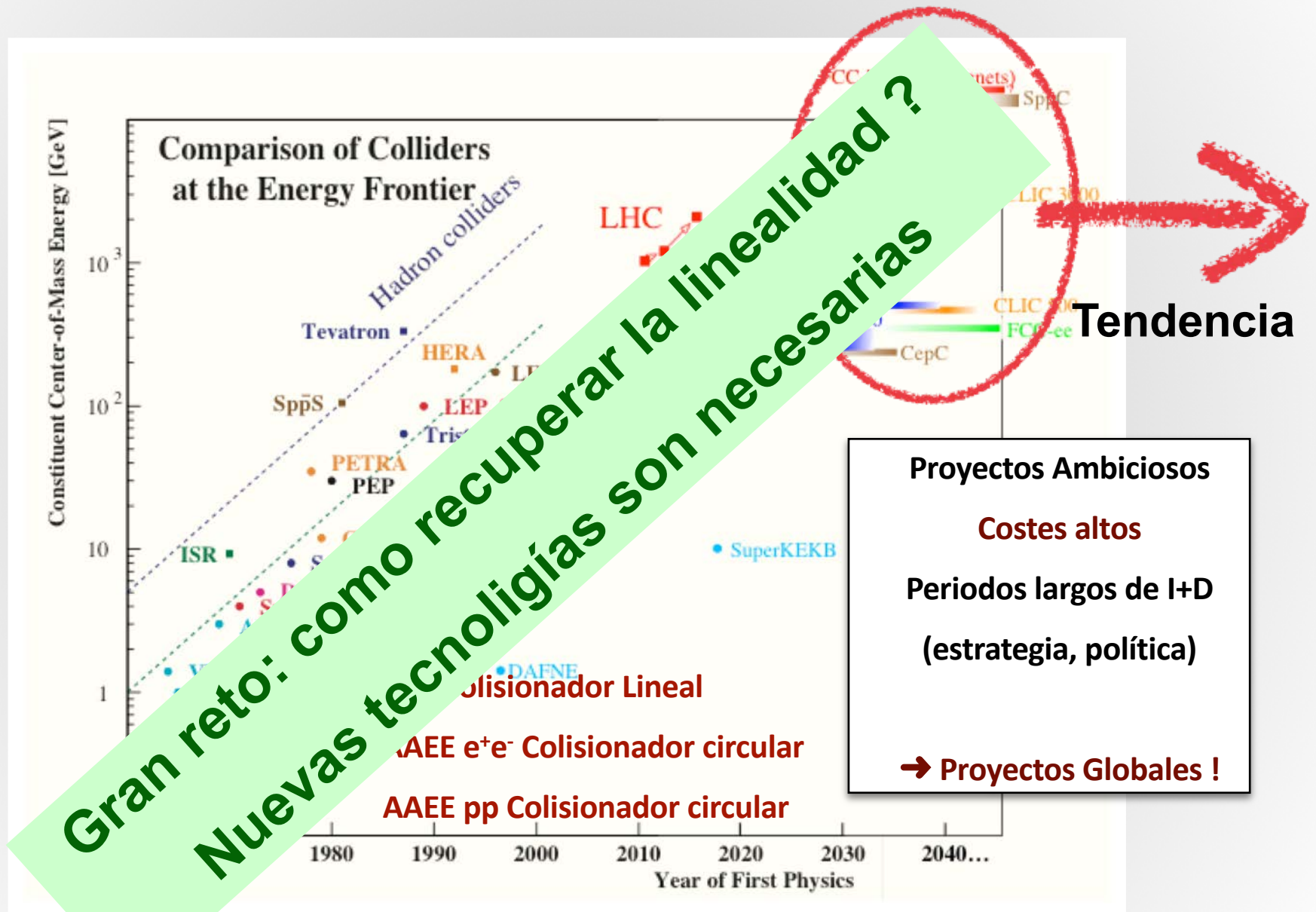


- Desarrollo continuo en los últimos 90 años
- A etapas de saturación les han seguido etapas de nuevos desarrollos con nuevas tecnologías
- Superconductividad es ahora la palabra clave pero no será la última, PLASMA (potencial, factor 1000 gradiente de aceleración respecto a los existentes)
- **Retos en aceleradores circulares:**
 - ✓ Imanes de alto campo
- **Retos en aceleradores lineales:**
 - ✓ Alto gradiente
 - ✓ Focalización (nano-haces)

Aceleradores: pasado, presente, futuro

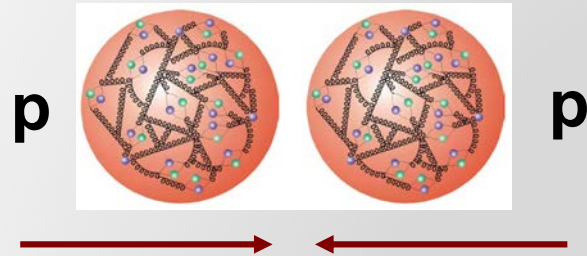


Aceleradores: pasado, presente, futuro



Nuestros Instrumentos: aceleradores + detectores

Colisiones protón-protón



LHC



En operación!

2011-12 $\sim 30 \text{ fb}^{-1}$ @ 7/8 TeV

~ 2021 300 fb^{-1} @ 13/14 TeV

~ 2035 3000 fb^{-1} @ 14 TeV HL-LHC

Propuesta: FCC-hh @100 TeV

Colisiones electrón-positrón

e^+ e^-



Colisionadores lineales:

TDR



250...500...1000 GeV

CDR



250...1500...3000 GeV

Colisionadores circulares:

CepC 90..250 GeV (50 km)

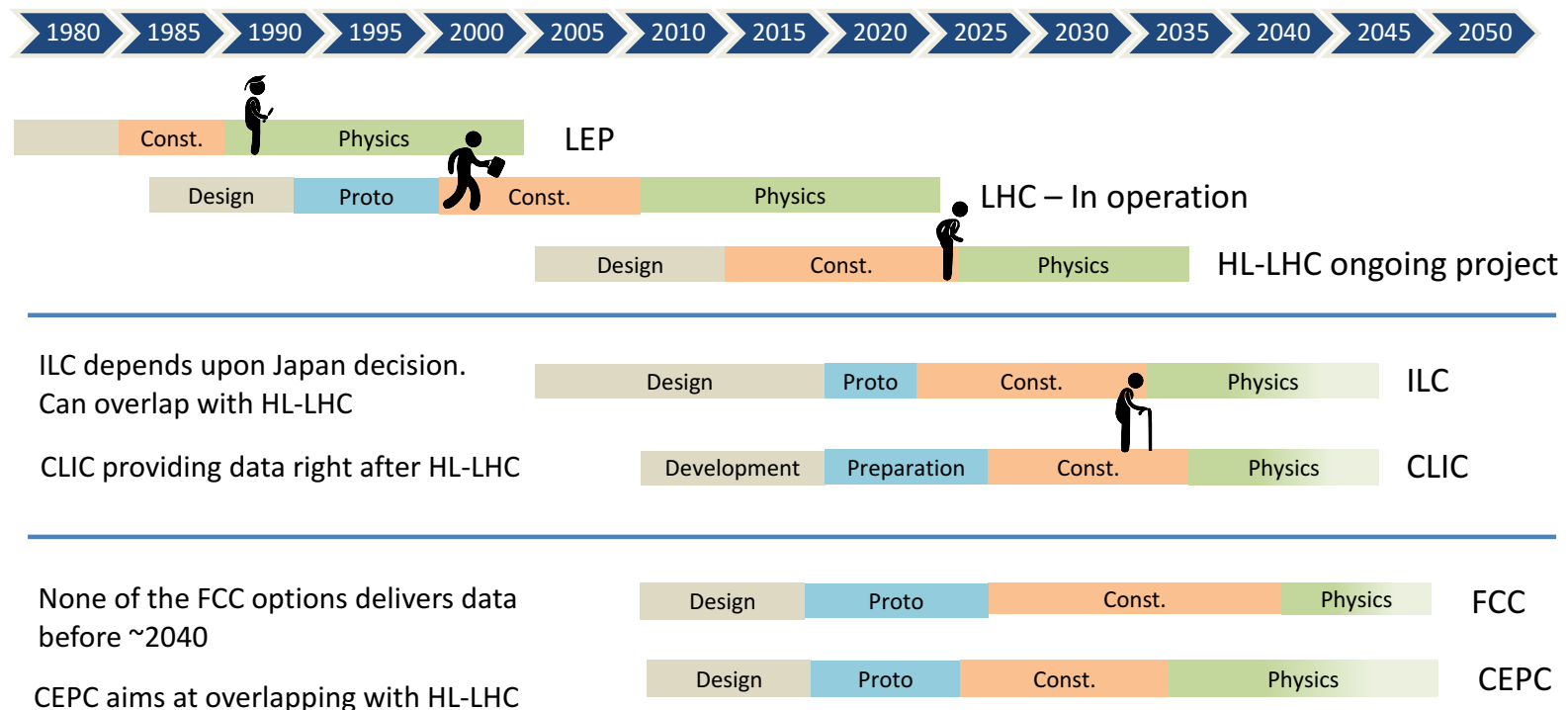
FCC-ee 240..350 GeV (80 km)

(otros: $\gamma\gamma \rightarrow H$, $e p \rightarrow H+X$, $\mu\mu \rightarrow H$)

Propuesta

Nuestros Instrumentos: aceleradores + detectores

The Timeline



ILC depends upon Japan decision.
Can overlap with HL-LHC

CLIC providing data right after HL-LHC

None of the FCC options delivers data before ~2040

CEPC aims at overlapping with HL-LHC

Carlos Lacasta 2018, IMFP-Salamanca



“Las mas cercanas en tiempo:”

Aceleradores e+e-

Higgs Factory

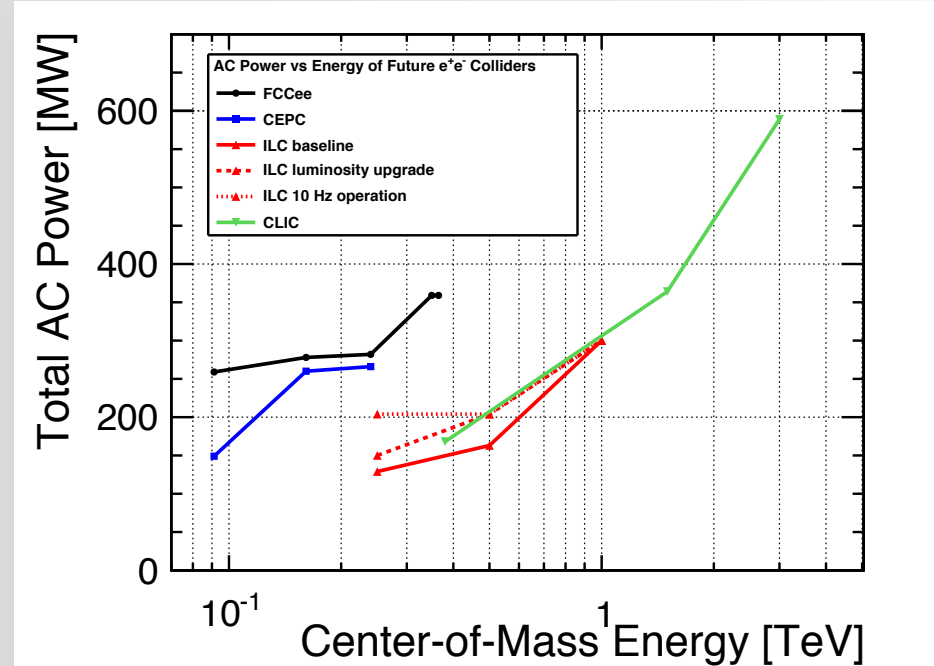
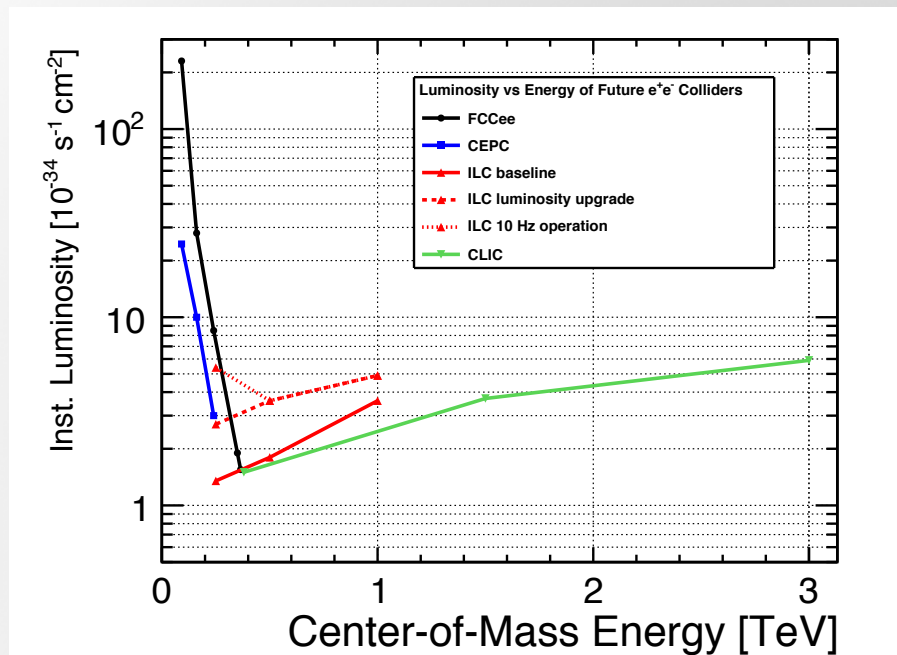
(esto es lo mas cercano a mi opinión personal)

e^+e^- Higgs Factory proposals

	\sqrt{s}	beam polarisation	$\int L dt$ for Higgs	R&D phase
ILC	0.1 - 1 TeV	e-: 80% e+: 30%	2000 fb ⁻¹ @ 250 GeV 200 fb ⁻¹ @ 350 GeV 4000 fb ⁻¹ @ 500 GeV	TDR completed in 2013
CLIC	0.35 - 3 TeV	e-: (80%) e+: 0%	1000 fb ⁻¹ @ 380 GeV 2500 fb ⁻¹ @ 1.5 TeV 5000 fb ⁻¹ @ 3 TeV	CDR completed in 2012
CEPC	90 - 240 GeV	e-: 0% e+: 0%	5600 fb ⁻¹ @ 240 GeV	CDR completed in 2018
FCC-ee	90 - 350 GeV	e-: 0% e+: 0%	5000 fb ⁻¹ @ 250 GeV 1700 fb ⁻¹ @ 350 GeV	CDR completed in Jan 2019

update based on J. Tian, LC School, DESY, 2018

Lineal o Circular, Luminosidad y Consumo



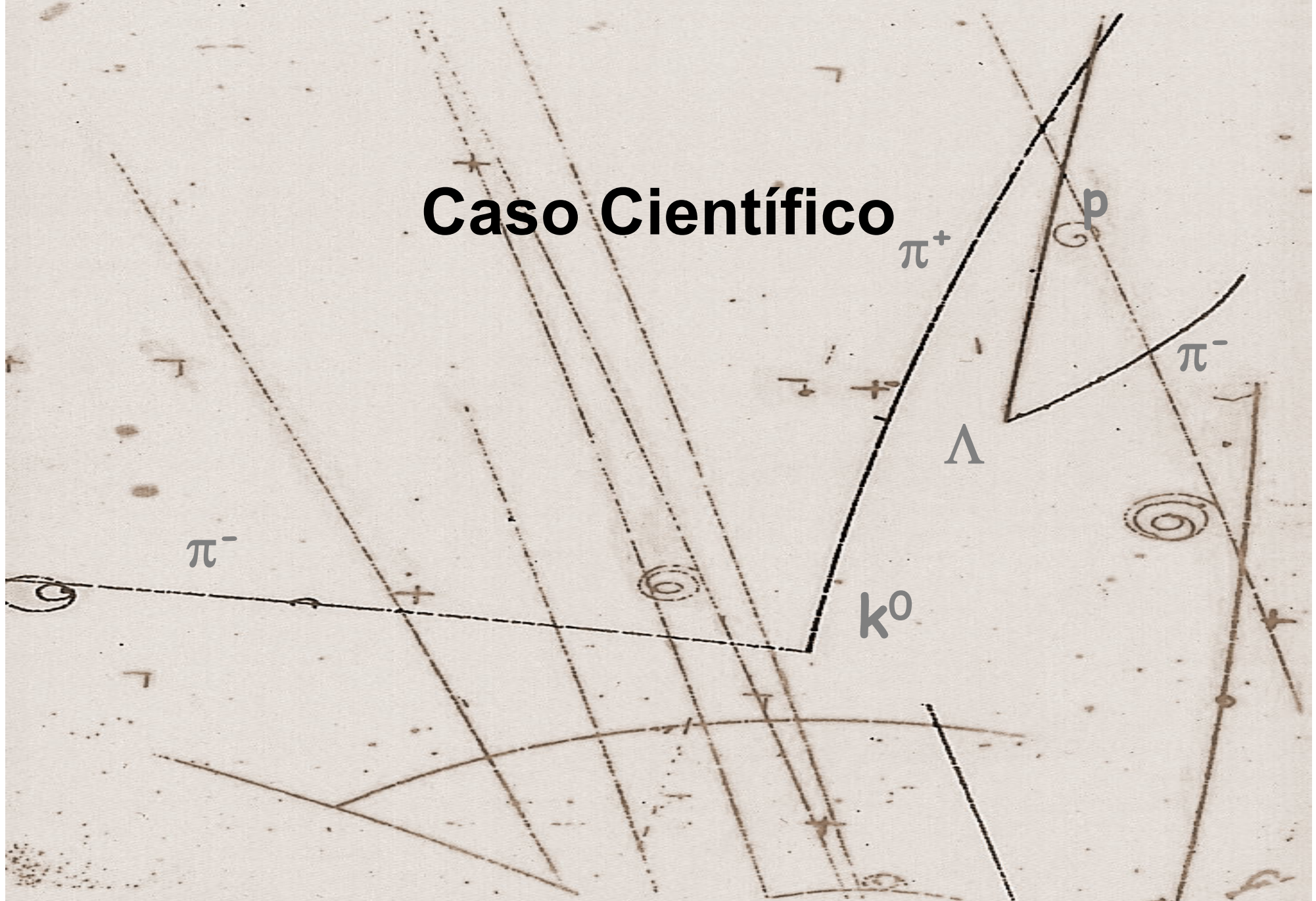
Lineal: extensible/flexible Z-polo hasta ~ 1-3 TeV CMS

Circular: máxima luminosidad para baja energía Z-polo

Lineal: polarización >80% e⁻, 30-40% e⁺ (compensa 2.5 en Luminosidad)

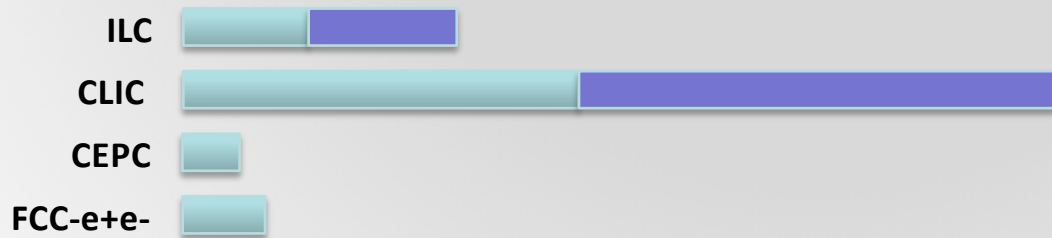
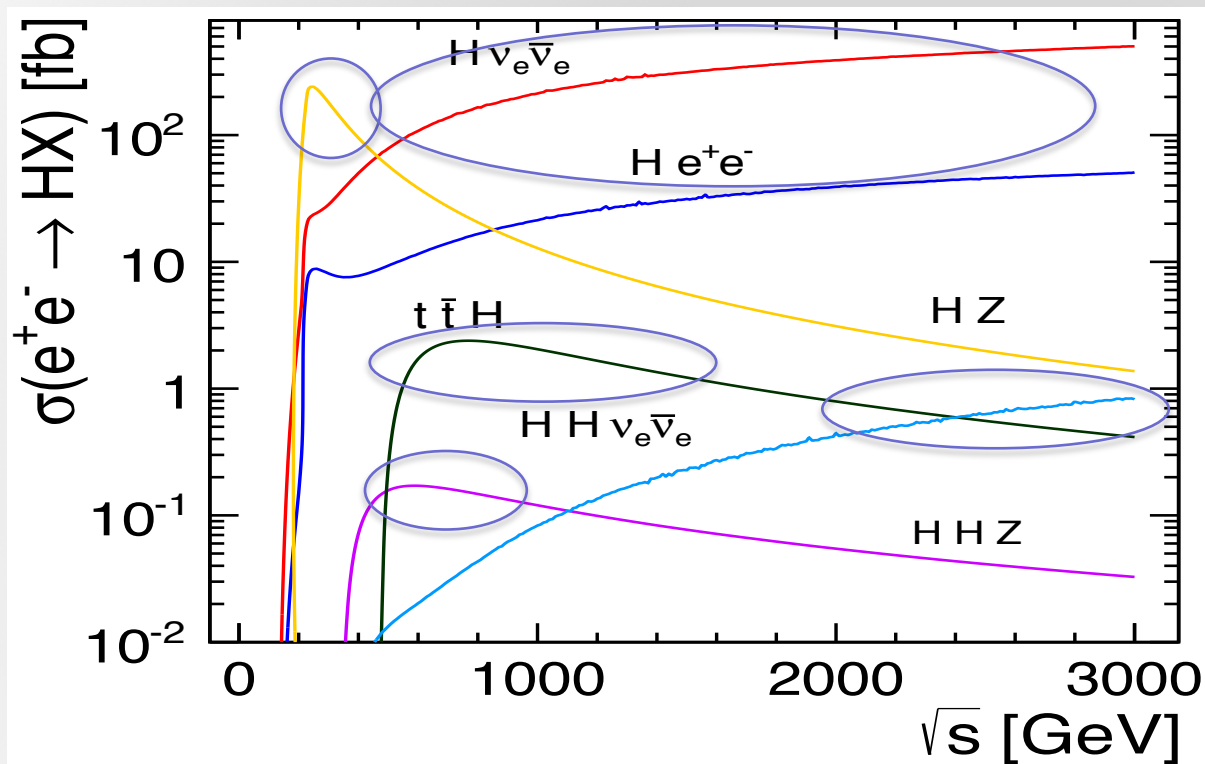
Consumo: $\Delta E \sim (E/m)^4 R^{-1}$

Caso Científico

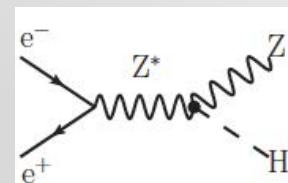




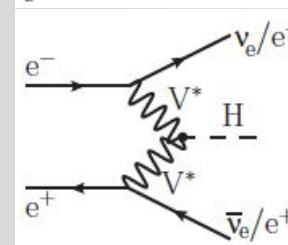
Physics potential: e^+e^- Higgs physics



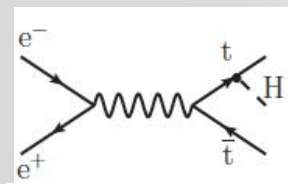
Many processes at different \sqrt{s} needed & accessible



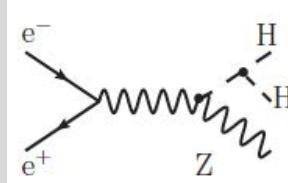
Mass
 $g_Z(m.i.)$
 $BR's$



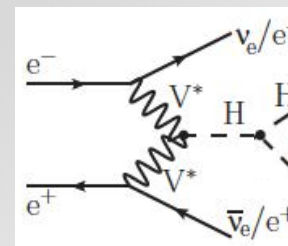
(LHC)-invisible
 Γ_{tot}



g_t (ILC, CLIC)

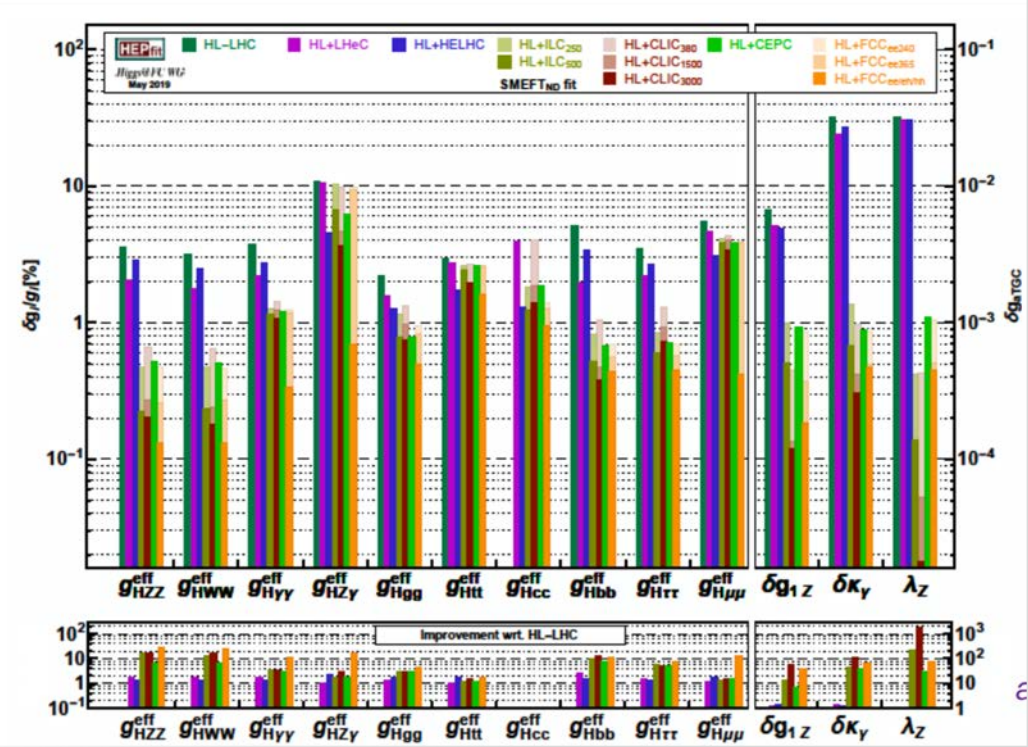


g_{HHH} (ILC500)



g_{HHH} (ILC1000, CLIC)

Mejoras respect al HL-LHC



EFT-framework

	HE-LHC LHeC prel.	ILC250	ILC500	CLIC380	CLIC1500	CLIC3000	CEPC	FCCee360	FCCee365	FCCee395	FCCee/hh
g_{HZZ}^{eff}	1.7	1.2	7.7	≥ 10	5.5	≥ 10	≥ 10	6.9	7.7	≥ 10	≥ 10
g_{HWW}^{eff}	1.8	1.3	6.7	≥ 10	4.9	≥ 10	≥ 10	6.3	7.0	≥ 10	≥ 10
$g_{H\gamma\gamma}^{eff}$	1.7	1.3	2.8	3.4	2.6	3.1	3.4	3.1	3.1	3.1	≥ 10
$g_{HZ\gamma}^{eff}$	1.1	2.4	1.1	1.6	1.1	2.3	3.0	1.7	1.1	1.2	≥ 10
g_{Hgg}^{eff}	1.4	1.7	2.0	2.8	1.7	2.3	2.9	2.8	2.3	2.7	4.5
g_{Htt}^{eff}	1.1	1.7	1.1	1.2	1.1	1.4	1.4	1.1	1.1	1.1	1.8
g_{Hcc}^{eff}	*		*	*	*	*	*	*	*	*	*
g_{Hbb}^{eff}	2.7	1.5	6.1	9.8	5.1	≥ 10	≥ 10	7.6	7.3	9.1	≥ 10
$g_{H\tau\tau}^{eff}$	1.6	1.3	4.1	5.8	2.7	3.8	4.8	5.0	5.0	6.1	7.8
$g_{H\mu\mu}^{eff}$	1.2	1.8	1.3	1.4	1.3	1.4	1.6	1.4	1.4	1.4	≥ 10
$\delta g_{1Z} [\times 10^2]$	1.3	1.4	6.7	≥ 10	≥ 10	≥ 10	≥ 10	7.3	7.8	≥ 10	≥ 10
$\delta \kappa_\gamma [\times 10^2]$	1.3	1.2	≥ 10	≥ 10	≥ 10	≥ 10	≥ 10^2	≥ 10	≥ 10	≥ 10	≥ 10
$\lambda_Z [\times 10^2]$	1.1	1.0	≥ 10	≥ 10^2	≥ 10	≥ 10^2	≥ 10^3	≥ 10	≥ 10	≥ 10	≥ 10

SMEFT ND (*) not measured in HL-LHC

Reunión Granada sobre Estrategia Europea en Física de Partículas
Beate Heinmann





Physics potential: e^+e^- Higgs physics

	Factor ≥ 2	Factor ≥ 5	Factor ≥ 10	Years from T_0
CLIC380	9	6	4	7
FCC-ee240	10	8	3	9
CEPC	10	8	3	10
ILC250	10	7	3	11
FCC-ee365	10	8	6	15
CLIC1500	10	7	7	17
HE-LHC	1	0	0	20
ILC500	10	8	6	22
CLIC3000	11	7	7	28
FCC-ee/eh/hh	12	11	10	>50

13 quantities in total

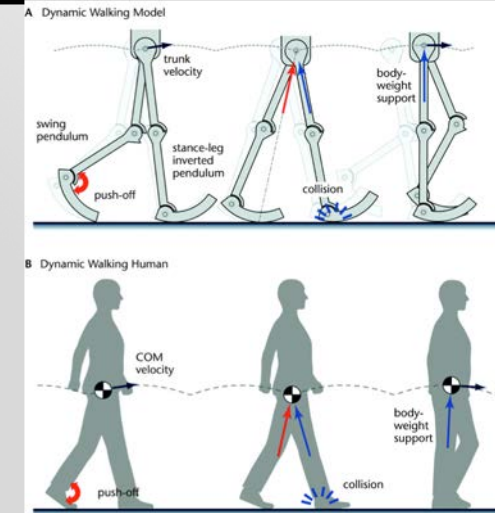
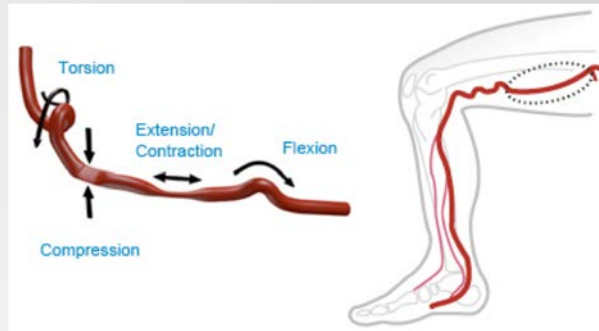
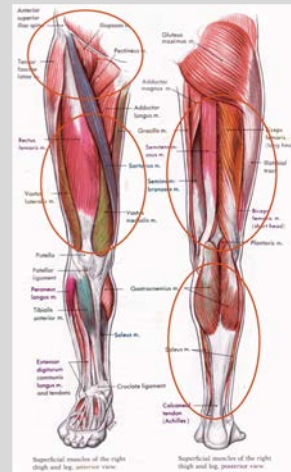
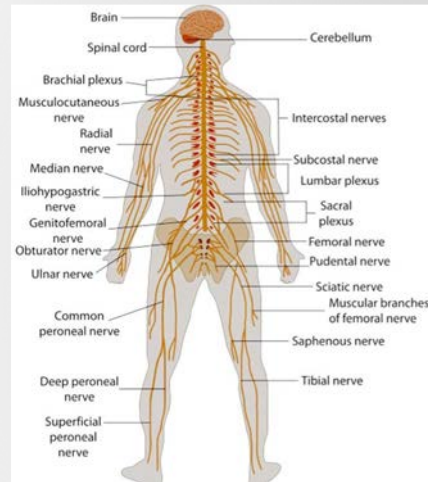
NB: number of seconds/year differs: ILC 1.6×10^7 , FCC-ee & CLIC: 1.2×10^7 , CEPC: 1.3×10^7

Tiempo, coste,
madurez tecnológica, inmediatez...

Definir T_0

Nuestro Modelo Estándar está limitado

El Modelo Estándar es una teoría efectiva que nos da los elementos y patrones esenciales...



Sin embargo no describe el detalle último, la verdadera fisiología de cómo “camina la naturaleza”



Higgs/top nuestro mejores mensajeros

Bosón de Higgs y quark top



Debemos buscar donde alumbra
y nada debe escaparse





J. Fuster



Moltes Felicitats



I no oblidés que el bon vi millora amb el temps

Un últim consell !!!



Parece que vamos a vivir para siempre