



Explorando el futuro de la física de partículas

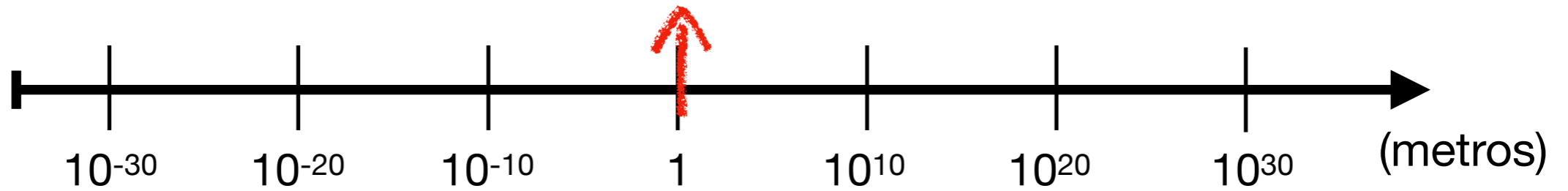
Joany Manjarrés Ramos

Contenido

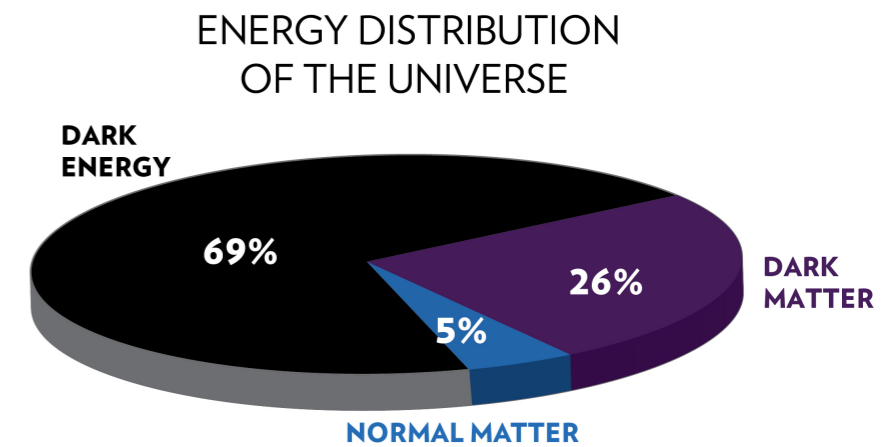
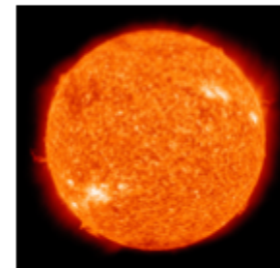
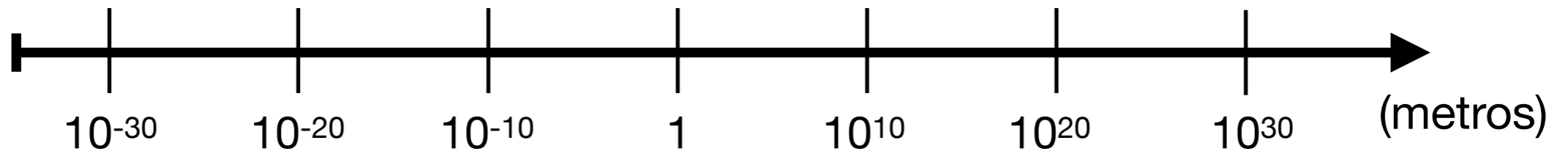
- ¿Qué es la física de partículas?
- Los misterios de la física de partículas
- Lo que estamos haciendo ahora y lo que haremos
 - LHC → HL-LHC
 - Futuros colisionadores
 - Neutrinos
 - Materia Oscura



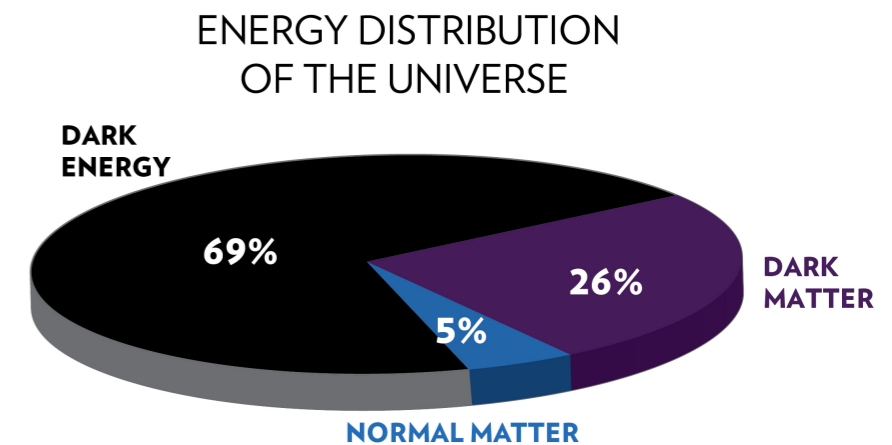
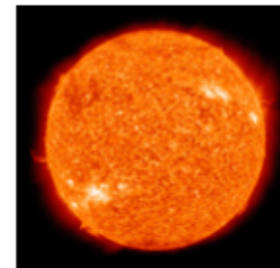
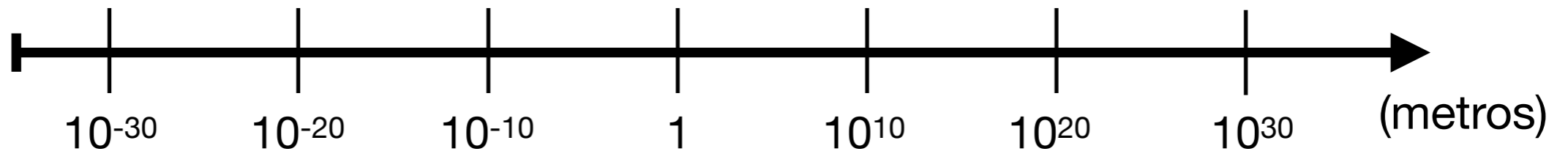
¡Vamos a alejarnos un poco!



¡Vamos a alejarnos un poco!



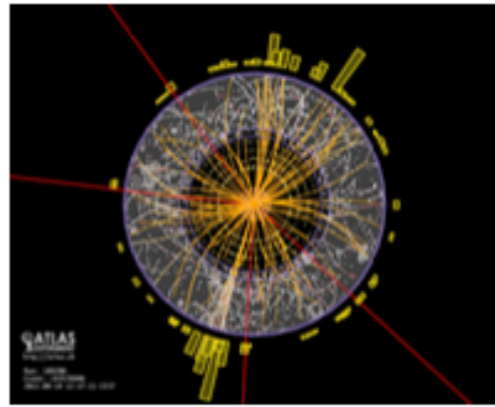
¡Vamos a alejarnos un poco!



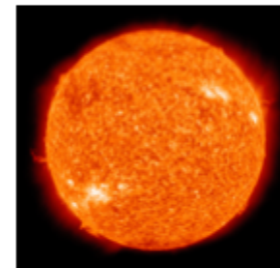
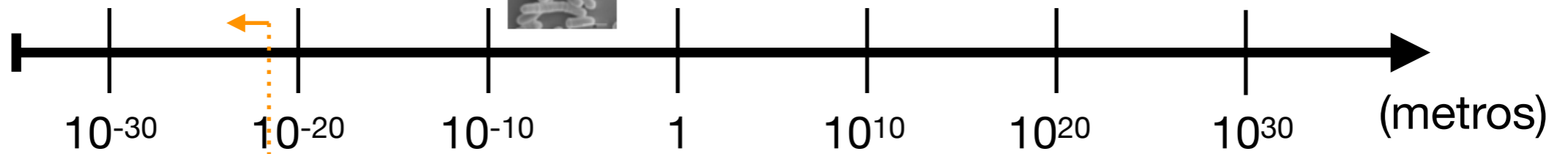
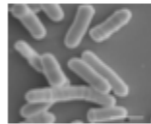
Conocido desconocido

(Materia oscura, energía oscura, asimetría de CP)

¡Hagamos un zoom in!

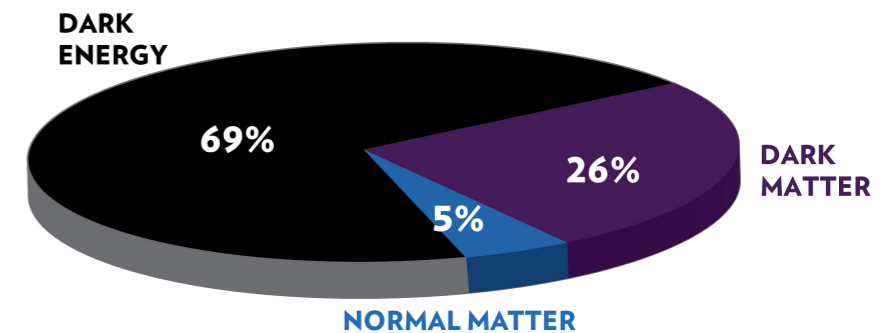


Física de partículas



	mass charge spin $\approx 2.2 \text{ MeV}/c^2$ $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ u up	$\approx 1.28 \text{ GeV}/c^2$ $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ c charm	$\approx 173.1 \text{ GeV}/c^2$ $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ t top	0 0 1 g gluon	$\approx 124.97 \text{ GeV}/c^2$ 0 0 H higgs
QUARKS	$\approx 4.7 \text{ MeV}/c^2$ $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ d down	$\approx 96 \text{ MeV}/c^2$ $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ s strange	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$ $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ b bottom	0 0 1 γ photon	
LEPTONS	$\approx 0.511 \text{ MeV}/c^2$ -1 $\frac{1}{2}$ e electron	$\approx 105.66 \text{ MeV}/c^2$ -1 $\frac{1}{2}$ μ muon	$\approx 1.7768 \text{ GeV}/c^2$ -1 $\frac{1}{2}$ τ tau	$\approx 91.19 \text{ GeV}/c^2$ 0 0 1 Z Z boson	GAUGE BOSONS VECTOR BOSONS
	$< 1.0 \text{ eV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$ ν_e electron neutrino	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$ ν_μ muon neutrino	$< 18.2 \text{ MeV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$ ν_τ tau neutrino	$\approx 80.39 \text{ GeV}/c^2$ ± 1 1 W W boson	

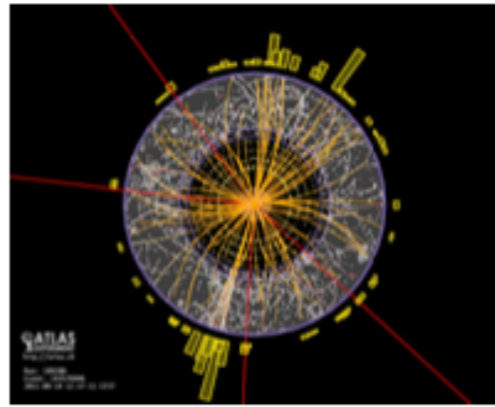
ENERGY DISTRIBUTION OF THE UNIVERSE



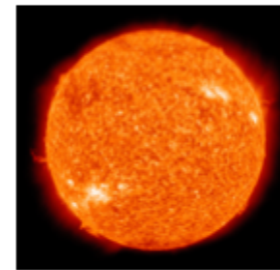
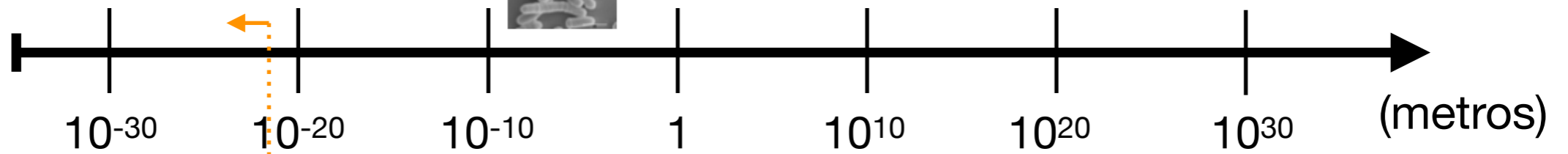
Conocido desconocido

(Materia oscura, energía oscura, asimetría de CP)

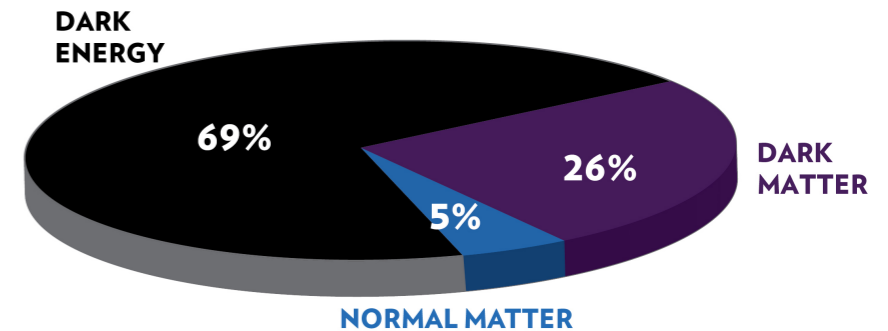
¡Hagamos un zoom in!



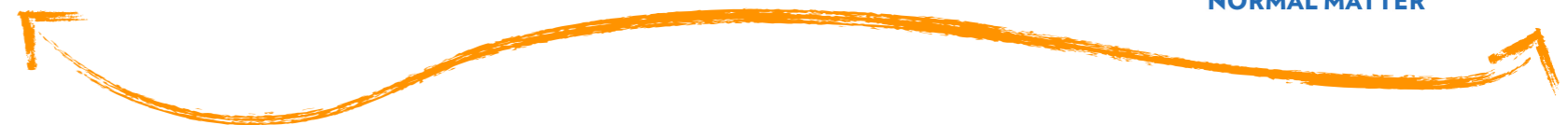
Física de partículas



ENERGY DISTRIBUTION OF THE UNIVERSE



Category	Particle	Mass	Charge	Spin	
QUARKS	u (up)	≈ 2.2 MeV/c ²	2/3	1/2	
	c (charm)	≈ 1.28 GeV/c ²	2/3	1/2	
	t (top)	≈ 173.1 GeV/c ²	2/3	1/2	
	d (down)	≈ 4.7 MeV/c ²	-1/3	1/2	
	s (strange)	≈ 96 MeV/c ²	-1/3	1/2	
	b (bottom)	≈ 4.18 GeV/c ²	-1/3	1/2	
LEPTONS	e (electron)	≈ 0.511 MeV/c ²	-1	1/2	
	μ (muon)	≈ 105.66 MeV/c ²	-1	1/2	
	τ (tau)	≈ 1.7768 GeV/c ²	-1	1/2	
	ν _e (electron neutrino)	< 1.0 eV/c ²	0	1/2	
GAUGE BOSONS VECTOR BOSONS	g (gluon)	0	0	1	
	γ (photon)	0	0	1	
	Z boson	≈ 91.19 GeV/c ²	0	1	
	W boson	≈ 80.39 GeV/c ²	±1	1	
	H (higgs)	≈ 124.97 GeV/c ²	0	0	
	SCALAR BOSONS	ν _μ (muon neutrino)	< 0.17 MeV/c ²	0	1/2
		ν _τ (tau neutrino)	< 18.2 MeV/c ²	0	1/2
		W boson	≈ 80.39 GeV/c ²	±1	1
		Z boson	≈ 91.19 GeV/c ²	0	1



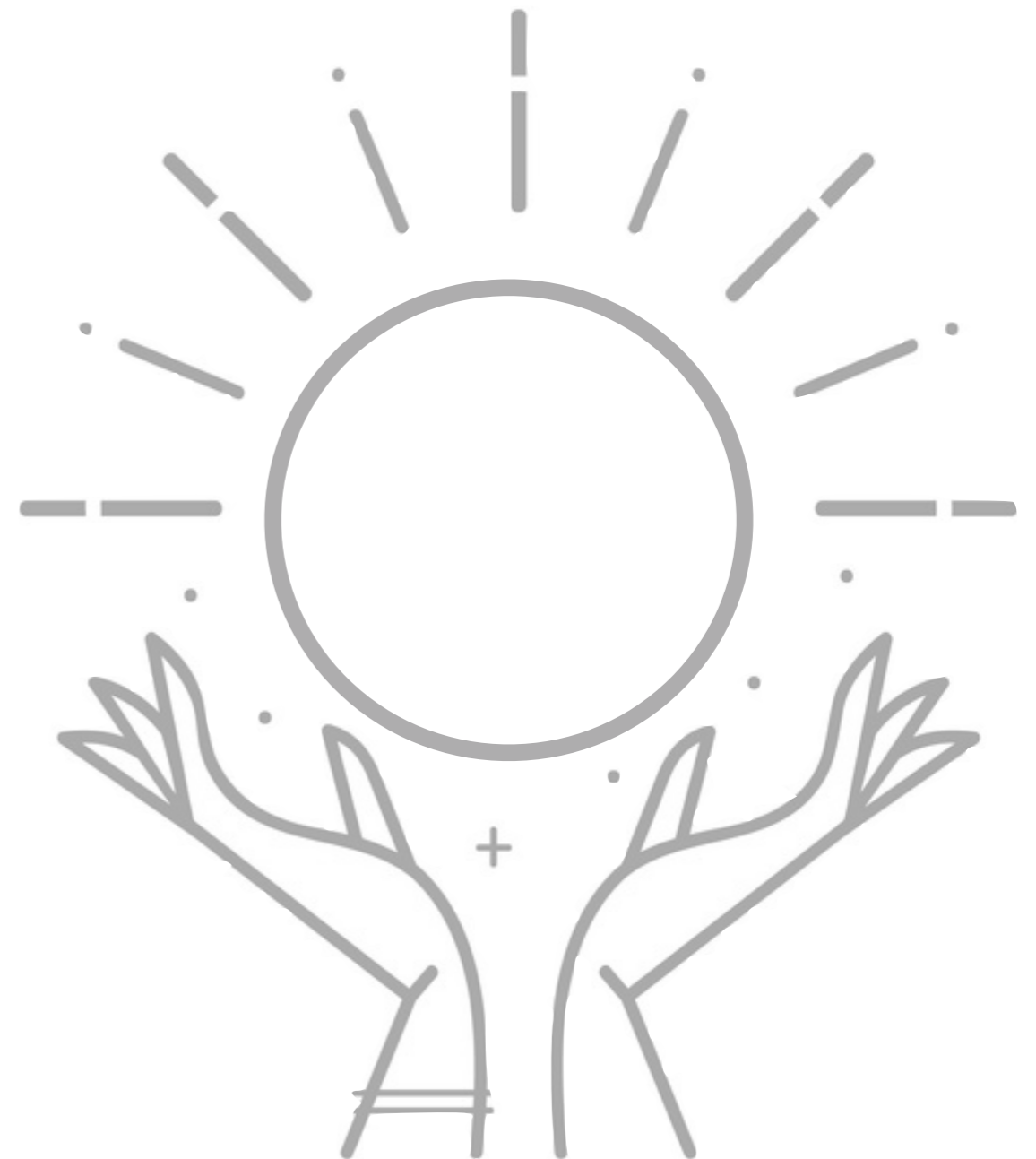
¿Conexiones?

¿Qué es la física de partículas?



Objetivos de la física de partículas

- Descubrir los componentes más fundamentales del universo
- Descifrar las reglas por las que esos componentes interactúan



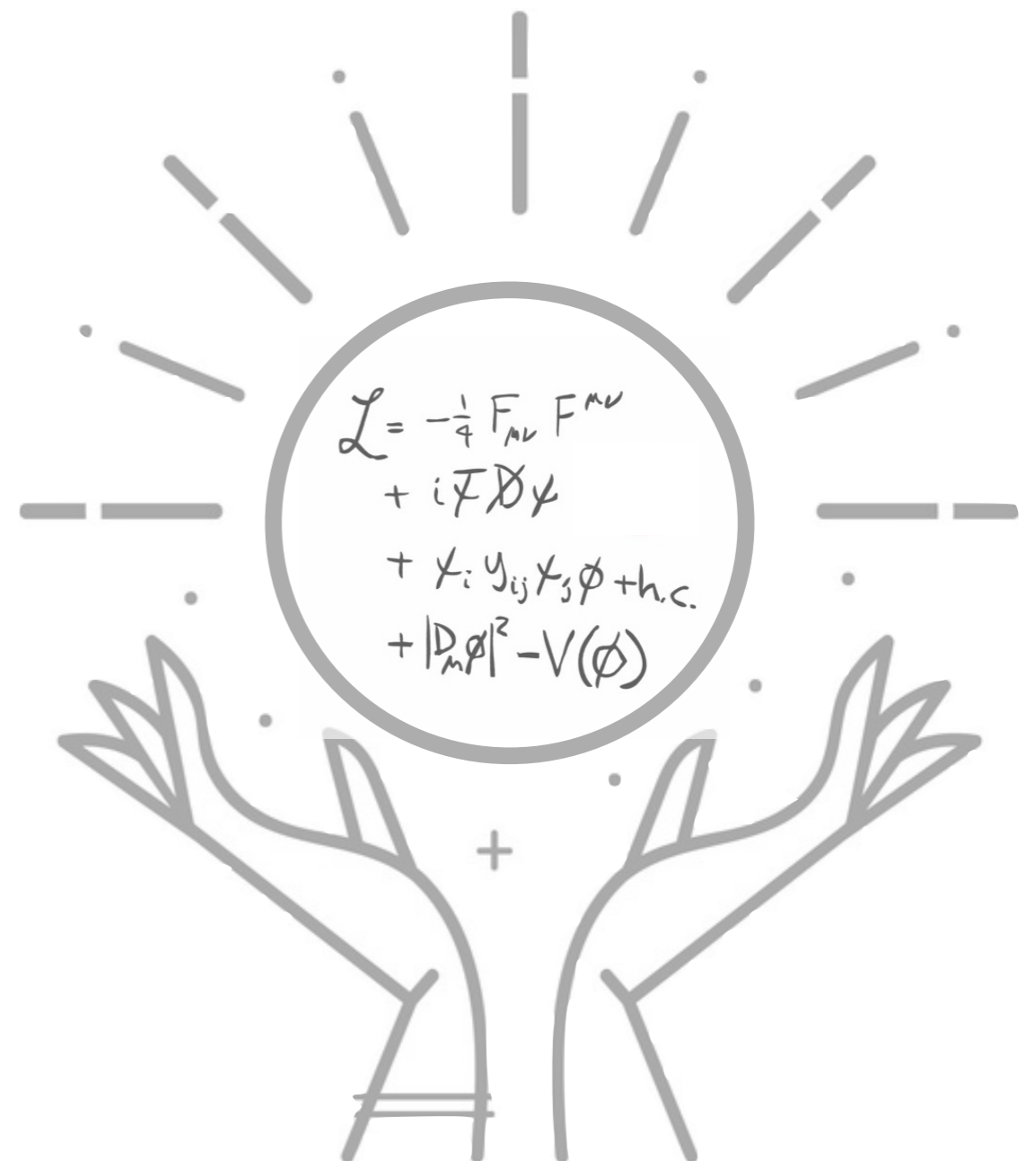
Las reglas de la física de partículas

■ Reglas parecen incluir:

- Mecánica cuántica
- Interacciones que son locales, invariantes de transición e invariantes de Lorentz
- Simetrías de calibre

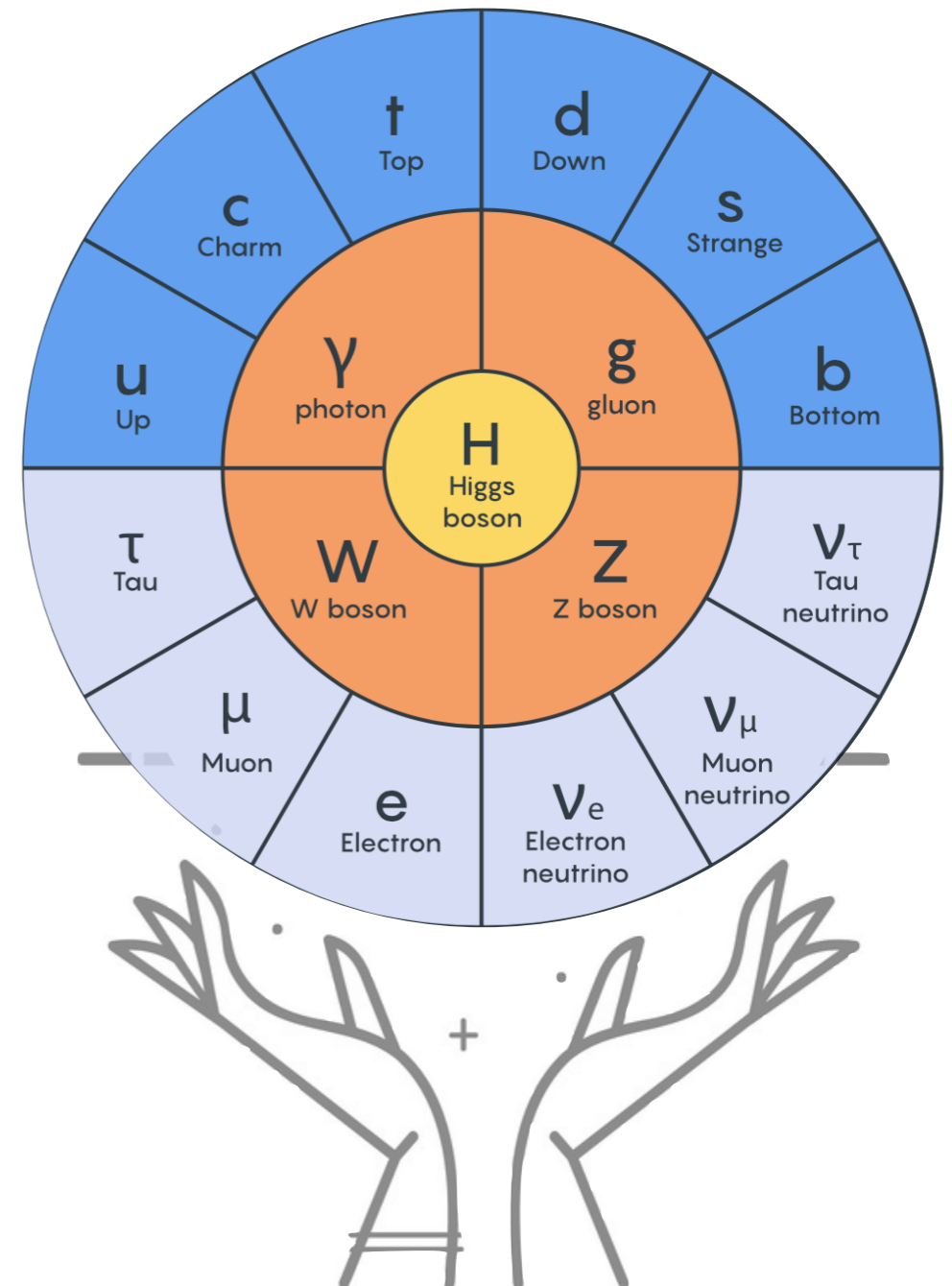
■ Usamos la teoría de campos

- Pero de una manera simple, porque desde nuestro punto de hay solo un electron

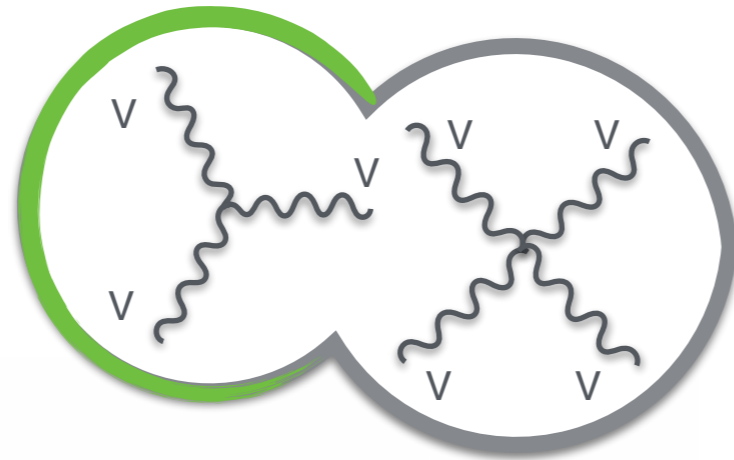


Modelos en la física de partículas

- No hay una única forma coherente de definir la teoría cuántica de campos relativista → **Muchos modelos posibles de física de partículas** dependiendo de qué grados de libertad que se asuman las simetrías y las interacciones
- Durante los últimos 50 años experimentos han confirmado el **Modelo Estándar de la física** de partículas con 17 partículas que parecen (hasta ahora) elementales
 - 12 con spin 1/2 “partículas de materia” fermiones: 6 quarks, 3 leptons cargados y 3 neutrinos
 - 4 partículas con spin 1 “mediadoras de la fuerzas”: fuerte, débil y electromagnética
 - Y una con spin 0 el bosón de Higgs



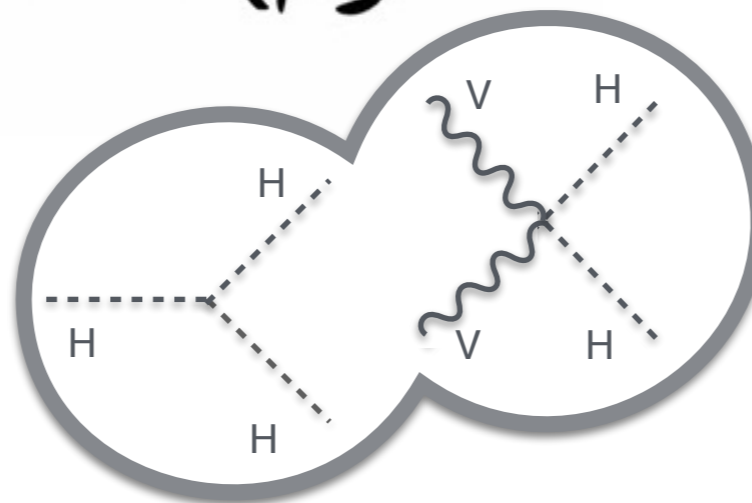
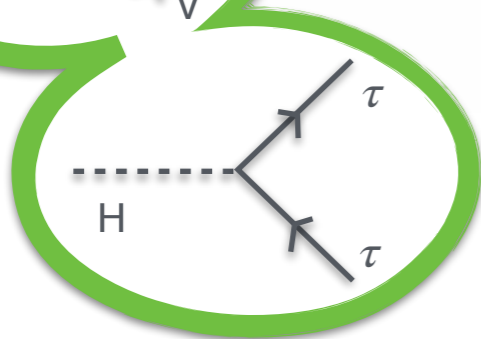
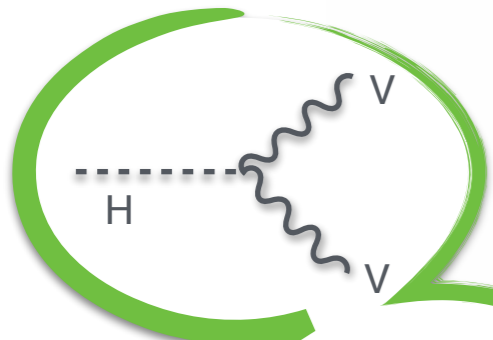
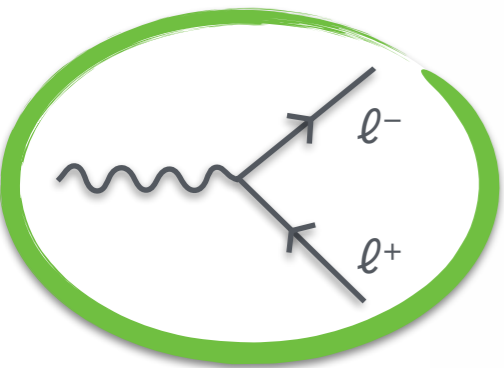
¿Qué explica el Modelo Estándar?



Partículas y sus interacciones

- $\gamma/Z \rightarrow \ell\ell, W \rightarrow \ell\nu$ muy bien entendido.
- WWV ($V = Z, W$) observado en el LEP y el LHC
- Acoplamiento de Higgs a fermiones y bosones vectoriales observado en el LHC
- Acoplamiento de 4 bosones gauge \rightarrow ¡sólo accesible ahora!
- Acoplamientos propios de Higgs aún no vistos \rightarrow ¿HL-LHC?

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} + i\bar{\psi}\not{D}\psi + \bar{\psi}_i Y_{ij} \psi_j \phi + \text{h.c.} + |D_\mu\phi|^2 - V(\phi)$$



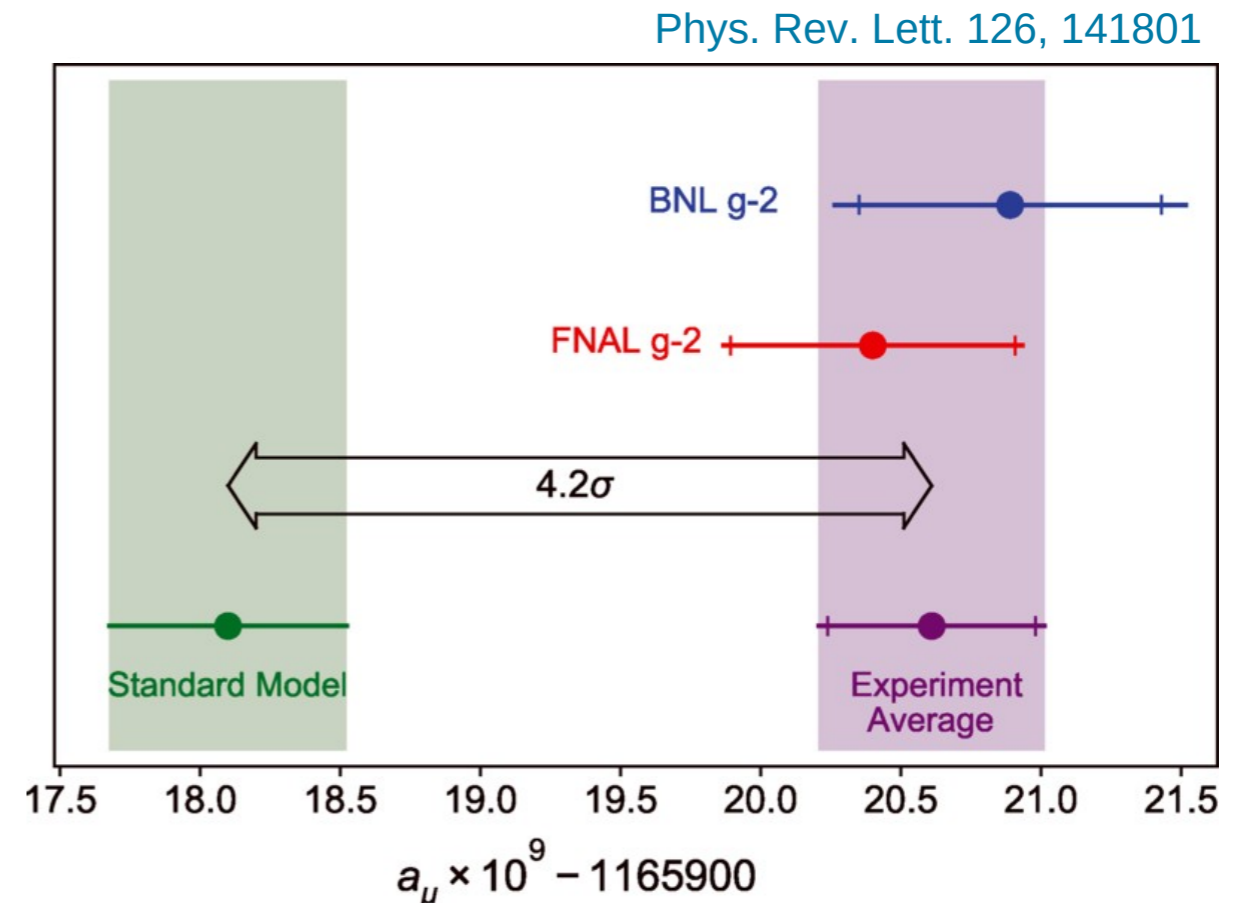
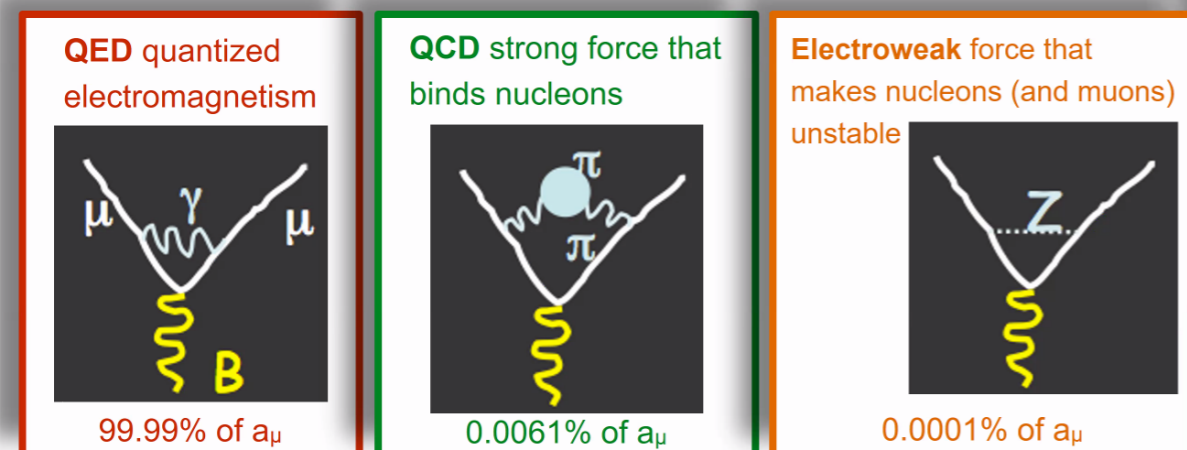
¿Qué explica el Modelo Estándar?

Algunas propiedades del vacío cuántico

- El vacío cuántico es el estado mas bajo de energía del Modelo Estándar
- En el espacio vacío hay partículas virtuales (principio de incertidumbre) y sus efectos físicos pueden ser predichos y medidos
- Por ejemplo:
 - Efectos virtuales en el momento magnético del muón están predichos con una inmensa precision.
 - Resultado experimento Muon g-2 en Fermilab muestran tension con el Modelo Estándar

$g(\text{exp})$ 2.00233184178

$g(\text{thy})$ 2.00233183620

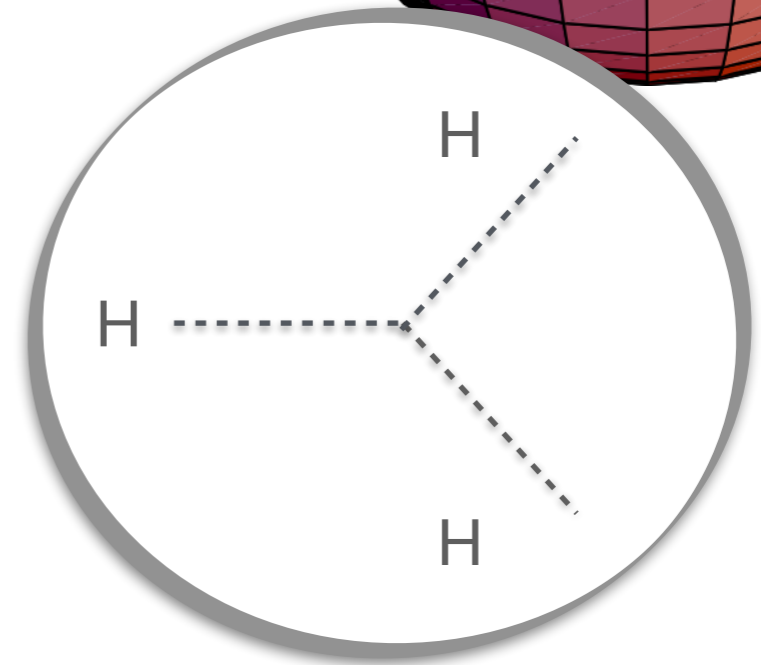
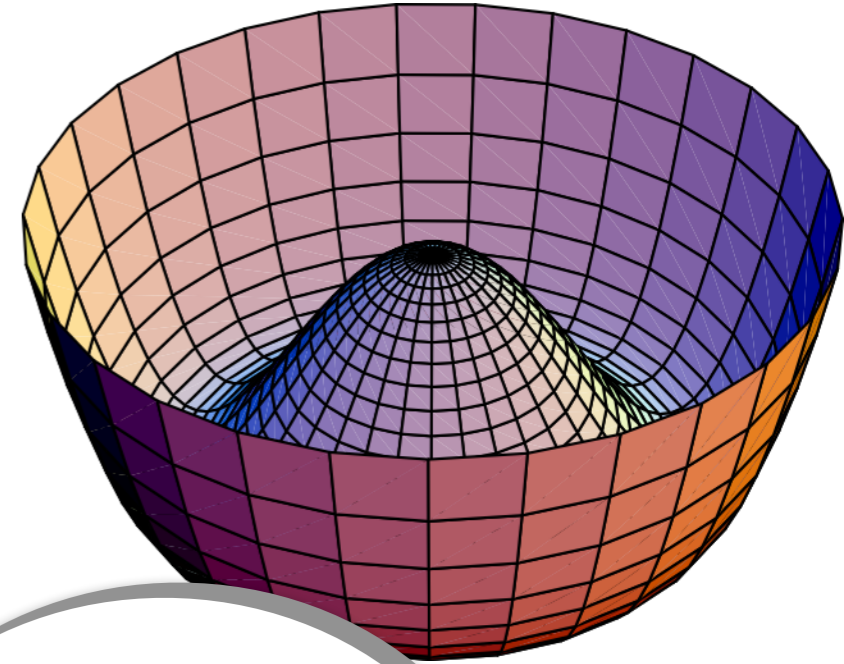


¿Qué explica el Modelo Estándar?

El bosón de Higgs

- El campo de Higgs tiene la notable característica de que (a diferencia de los campos electromagnéticos) puede originarse a sí mismo.
- El Modelo Estándar predice que el campo de Higgs se encendió por sí mismo en todo el universo en los primeros momentos del Big Bang (la transición de fase electrodébil)
- Cuando esto ocurrió, al menos 10 de los otros tipos de partículas adquirieron masa

¿CÓMO PASÓ?
¿PORQUE SUCEDIÓ DE ESA MANERA Y
NO OTRA?



¿Qué NO explica el Modelo Estándar?

- ¿Cómo neutrinos adquieren masa?
- ¿Porqué el quark Top es 350.000 veces mas pesado que electron?
- ¿Porqué quedó mas materia que antimateria después del Big Bang?
- ¿Qué es la materia oscura y como interactúa con la materia ordinaria?
- ¿Qué fue lo que causó un periodo de inflación cósmica en los primeros instantes del Big Bang?
- ¿Qué es energía oscura?
- ¿Porqué las interacciones del Higgs hacen el vacío cuántico meta-estable?
- ¿Cuáles son las propiedades cuánticas de la gravedad, el espacio y el tiempo?

EL FUTURO DE LA FÍSICA DE PARTÍCULAS ES RESPONDER ESTAS PREGUNTAS....

¿Qué NO explica el Modelo Estándar?

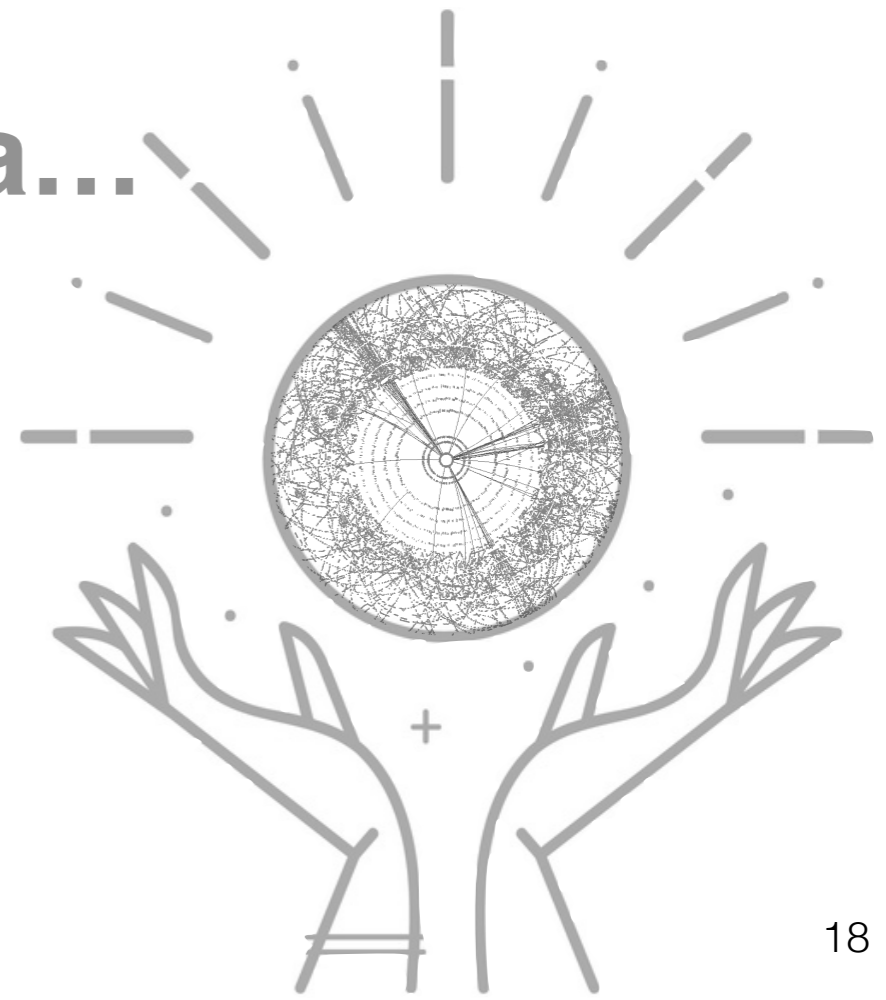
- ¿Cómo neutrinos adquieren masa?
- ¿Porqué el quark Top es 350 000 veces más pesado que el quark Bottom?
- ¿Porqué que los neutrinos oscilan?
- ¿Qué es la materia oscura?
- ¿Qué fue lo que desencadenó la inflación en los instantes iniciales del Big Bang?
- ¿Qué es energía oscura?
- ¿Porqué las interacciones fundamentales son tan débiles?
- ¿Cuáles son las partículas cuánticas de la gravedad, el espacio y el tiempo?

MOTORES DE LA FÍSICA DE PARTÍCULAS

- El mecanismo del Higgs
- Neutrinos
- Materia oscura y energía oscura
- Explorar lo desconocido

EL FUTURO DE LA FÍSICA DE PARTÍCULAS ES RESPONDER ESTAS PREGUNTAS....

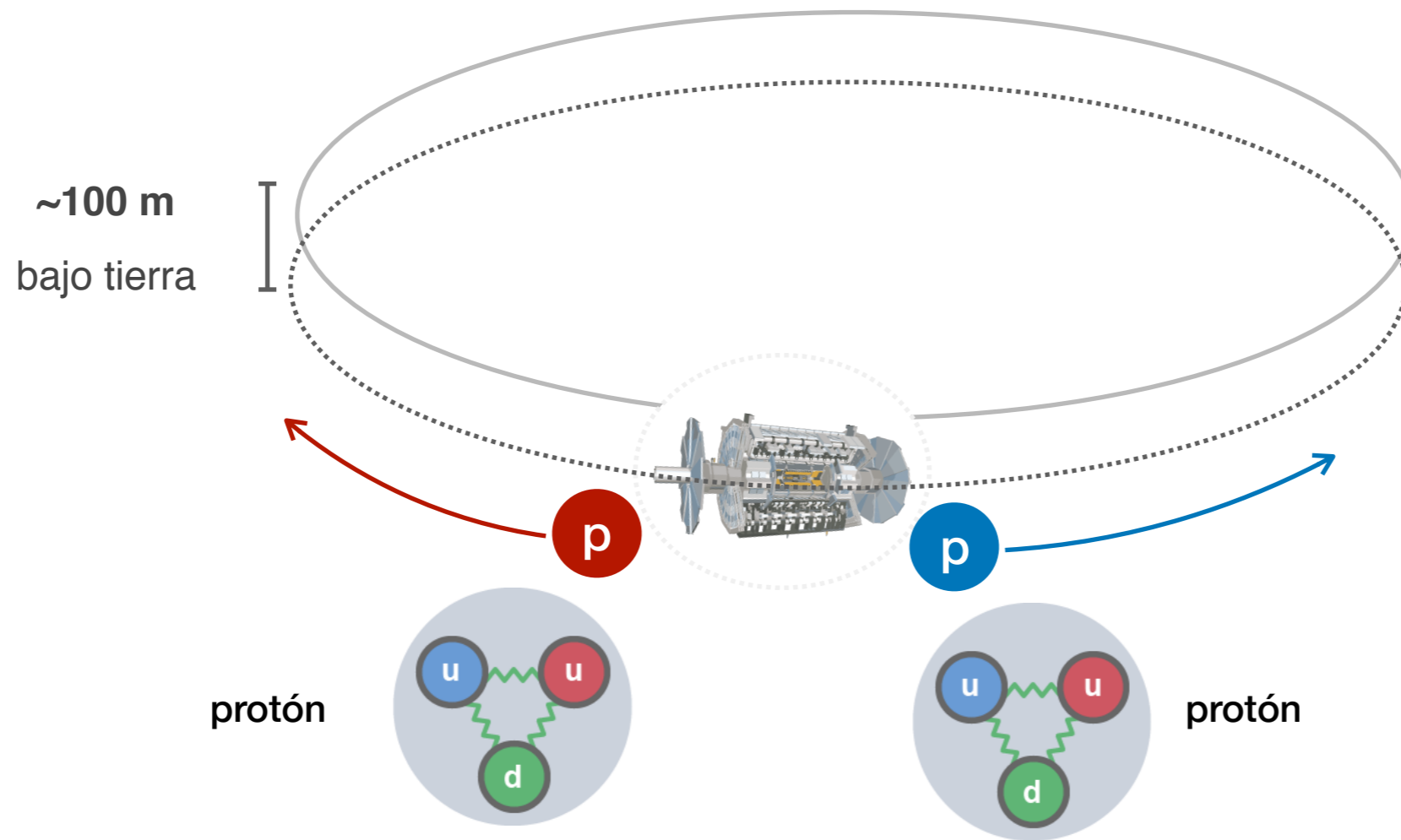
Lo que se está haciendo ahora...



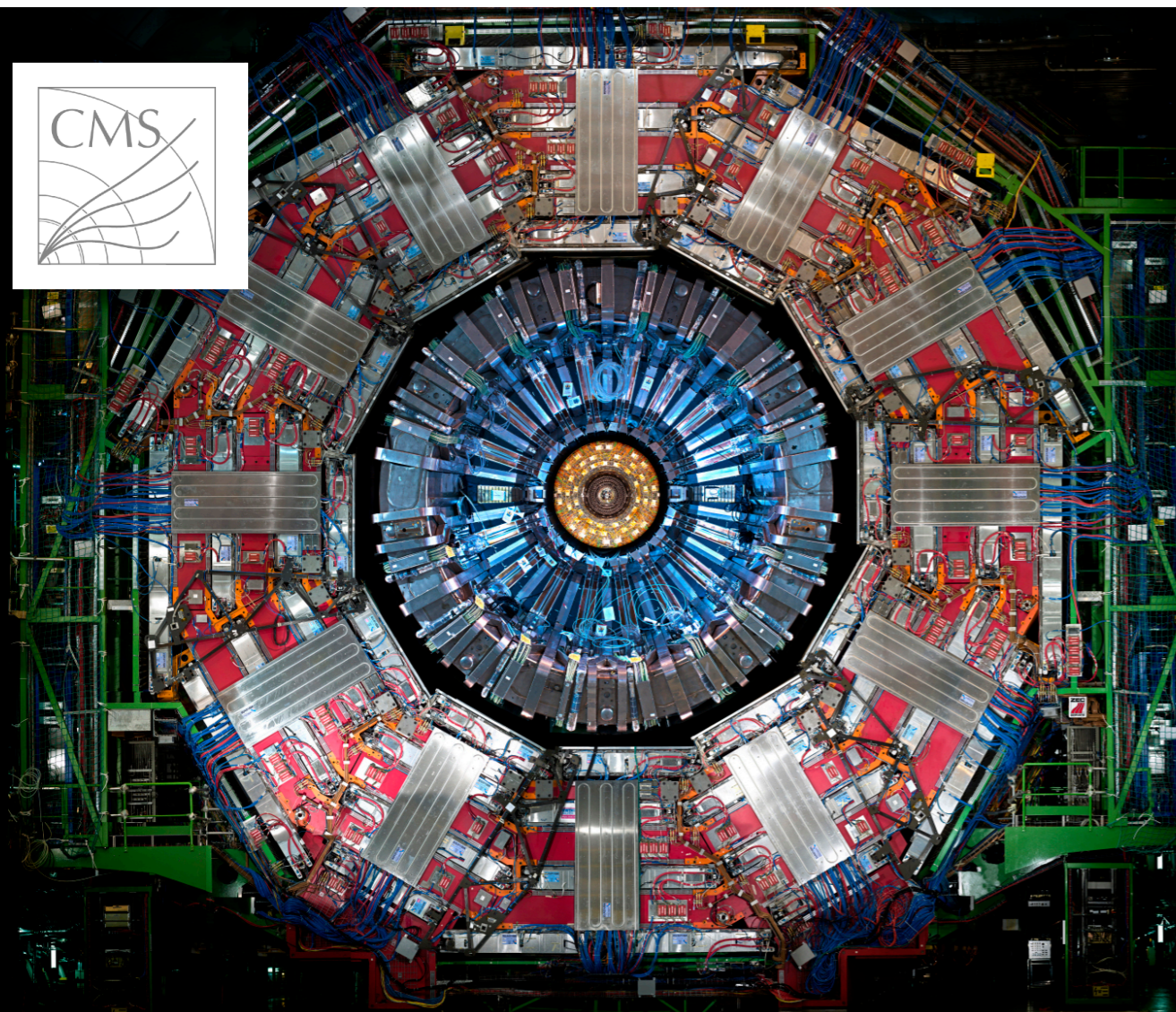
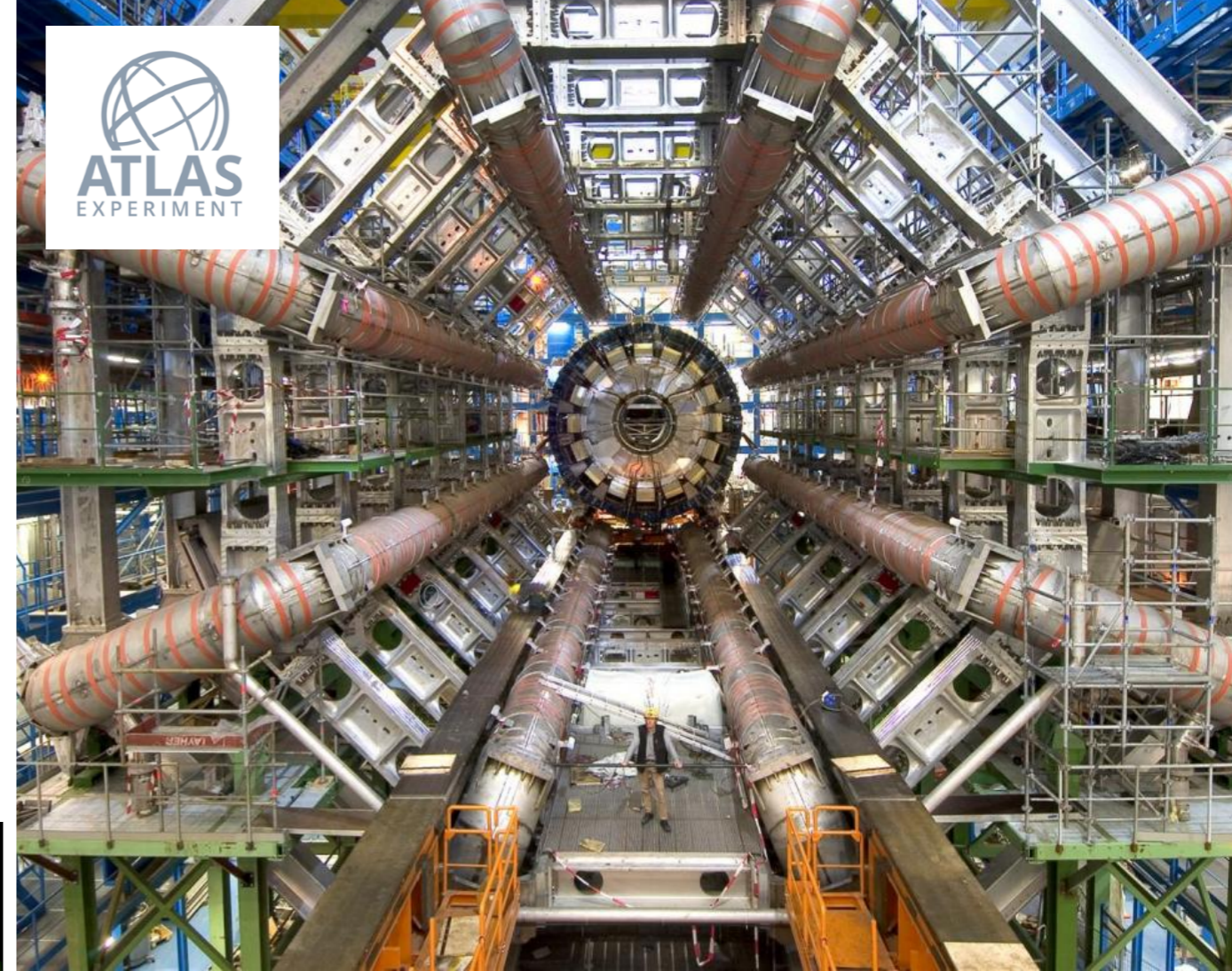
El Gran Colisionador de Hadrones



El Gran Colisionador de Hadrones



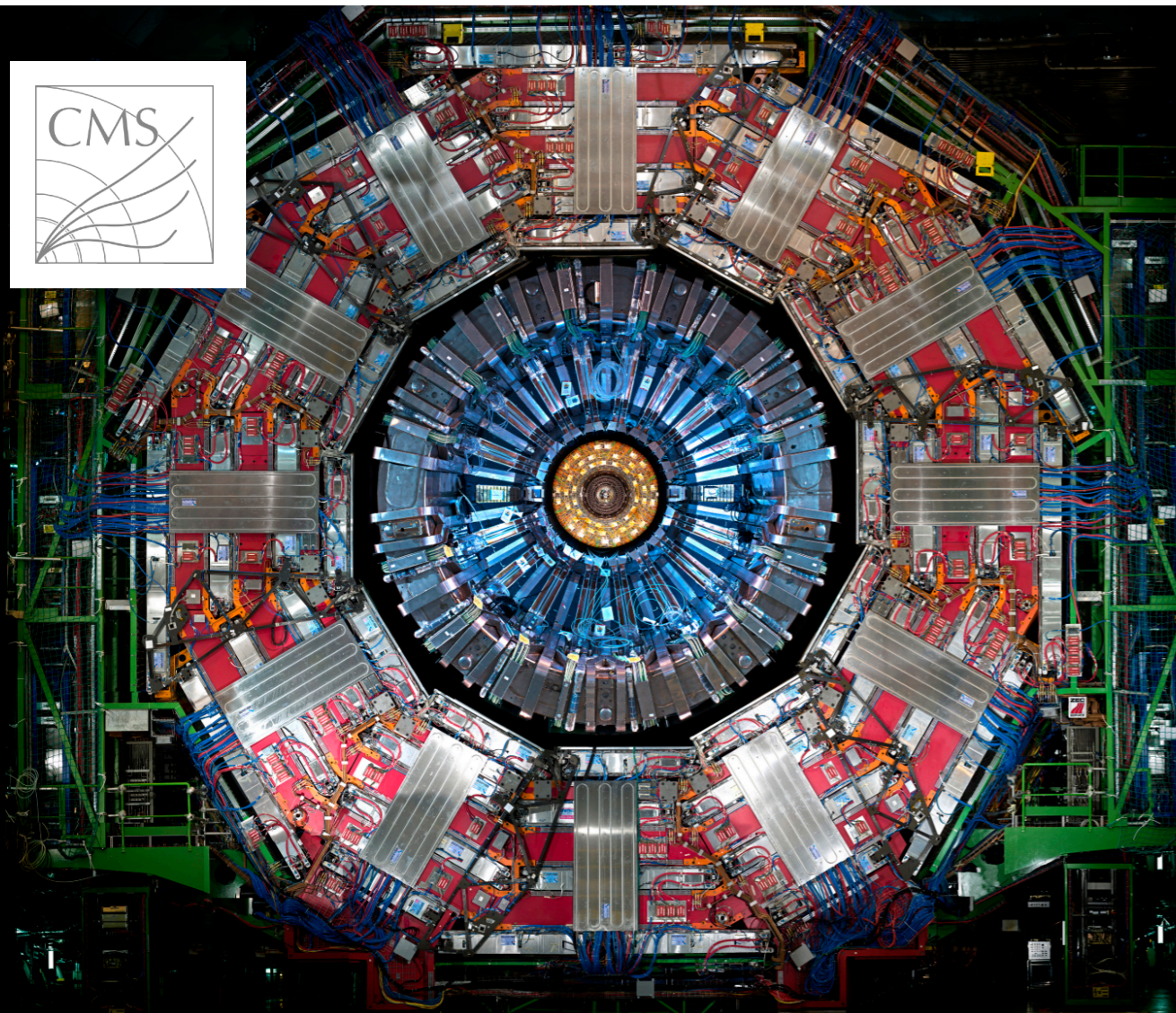
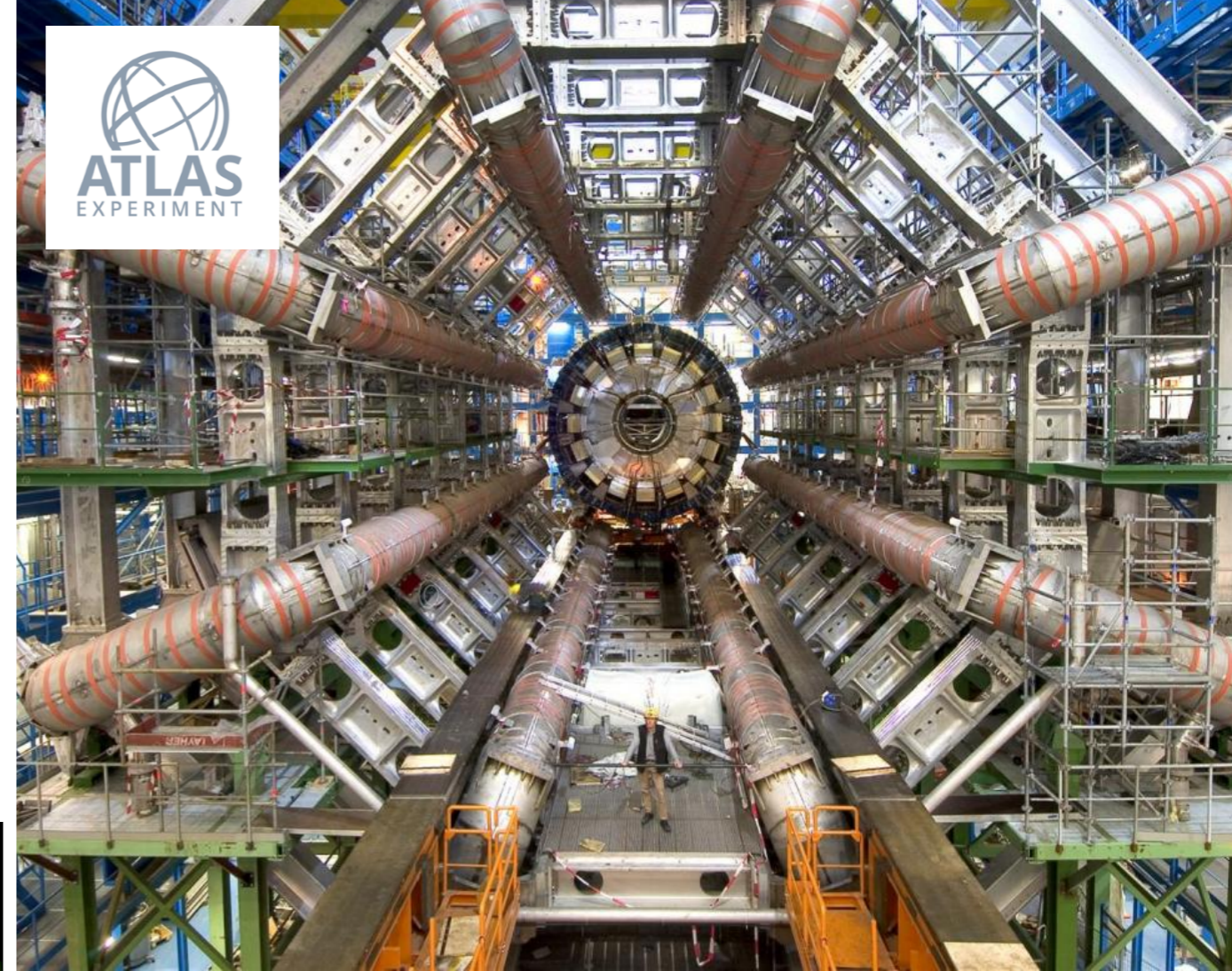
Los experimentos



- El LHC y sus experimentos llevan tomando datos desde 2010...

Los resultados

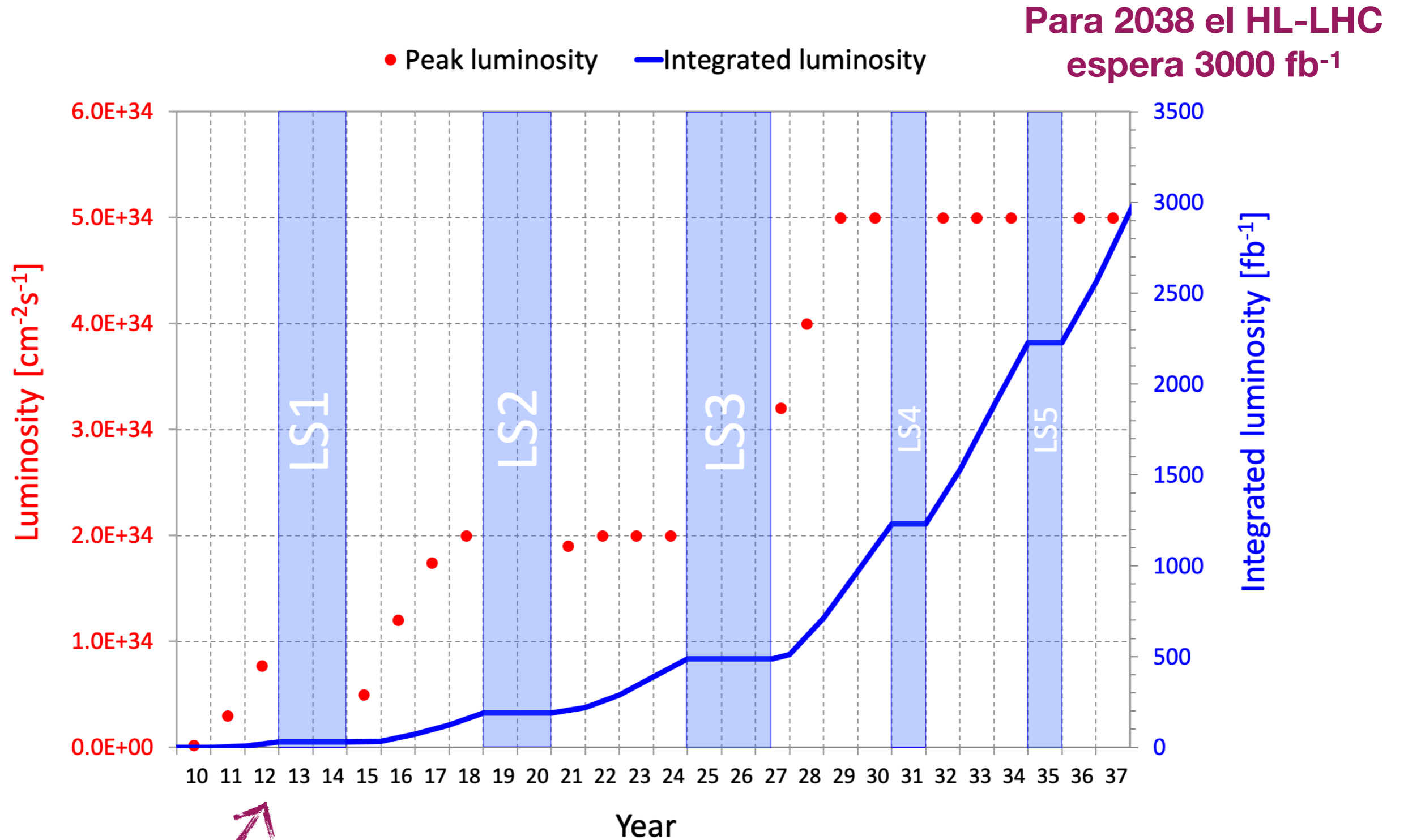
- Descubrimiento del Boson de Higgs
- Muchos procesos predichos por el Modelo Estándar han sido observados por primera vez
- Ningún indicio de Supersimetría, dimensiones extra o agujeros negros



Lo que todavía podemos estudiar

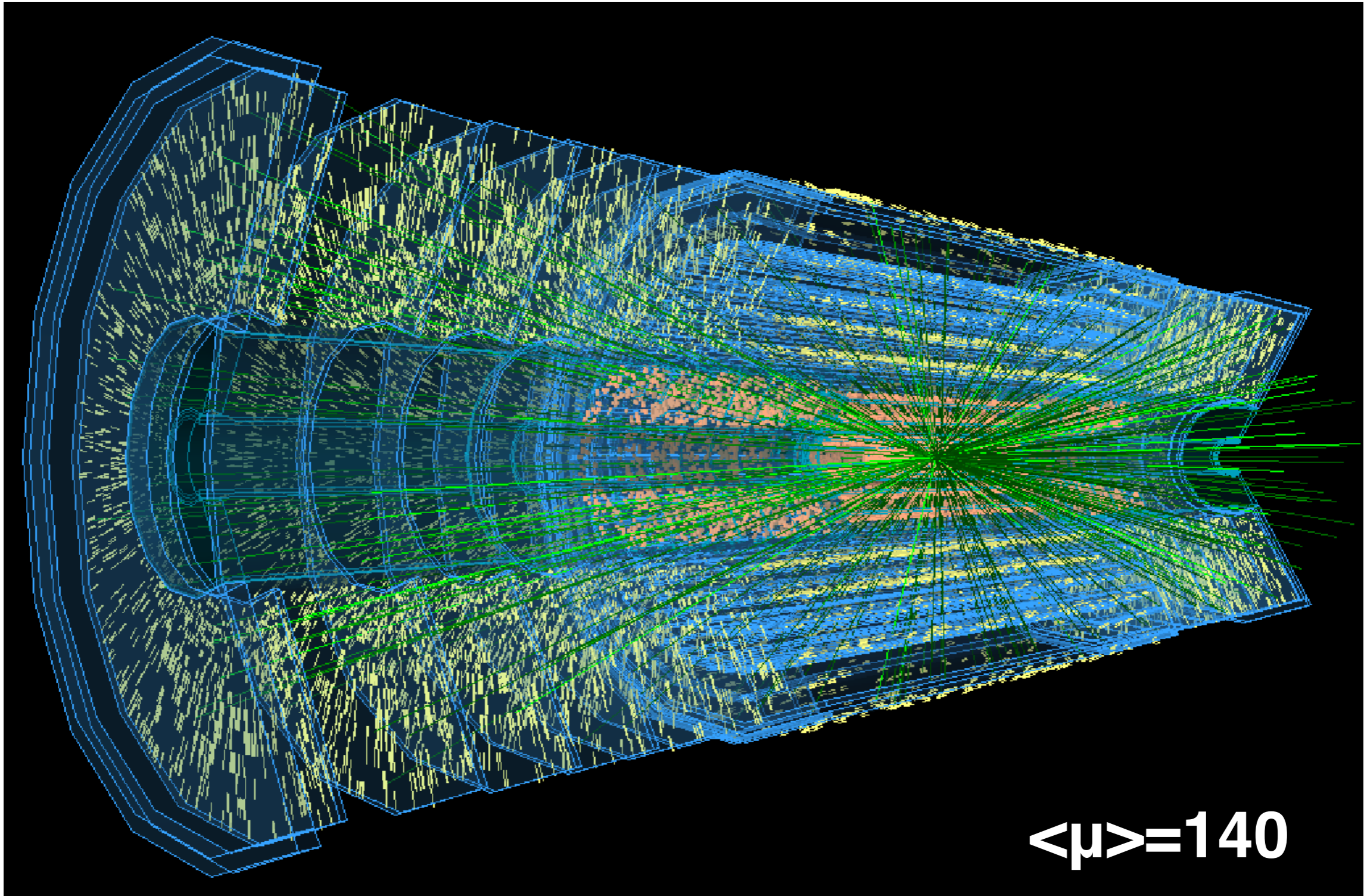
- El boson de Higgs y sus interacciones consigo mismo
- Investigar el mecanismo de EWSB quizás hay mas bosones de Higgs
- Tratar de producir y medir materia oscura
- Buscar sorpresas, explorar lo desconocido, con la precision que dan los datos...

Del LHC al HL-LHC: datos, datos y más datos

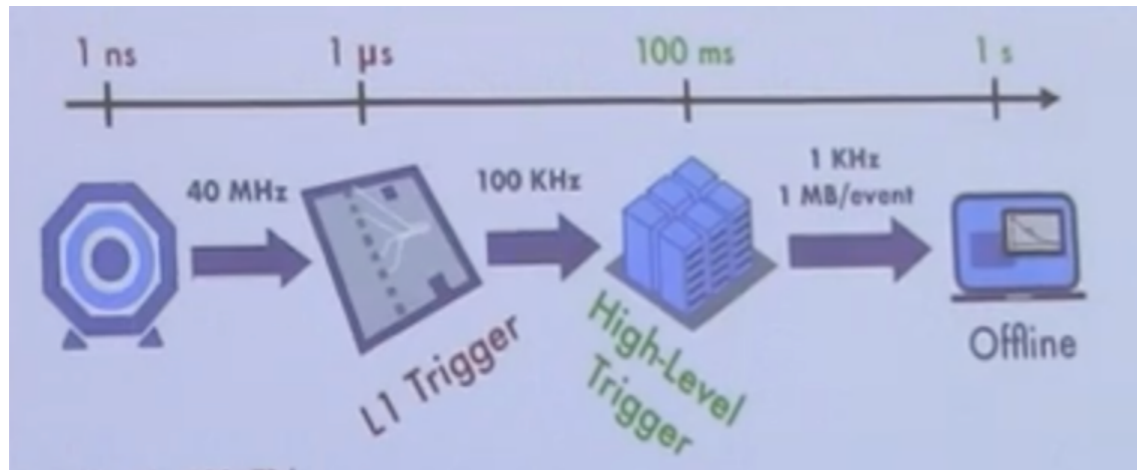


Descubrimiento del Bosón de Higgs con 11⁻¹ fb

Del LHC al HL-LHC: datos, datos y más datos



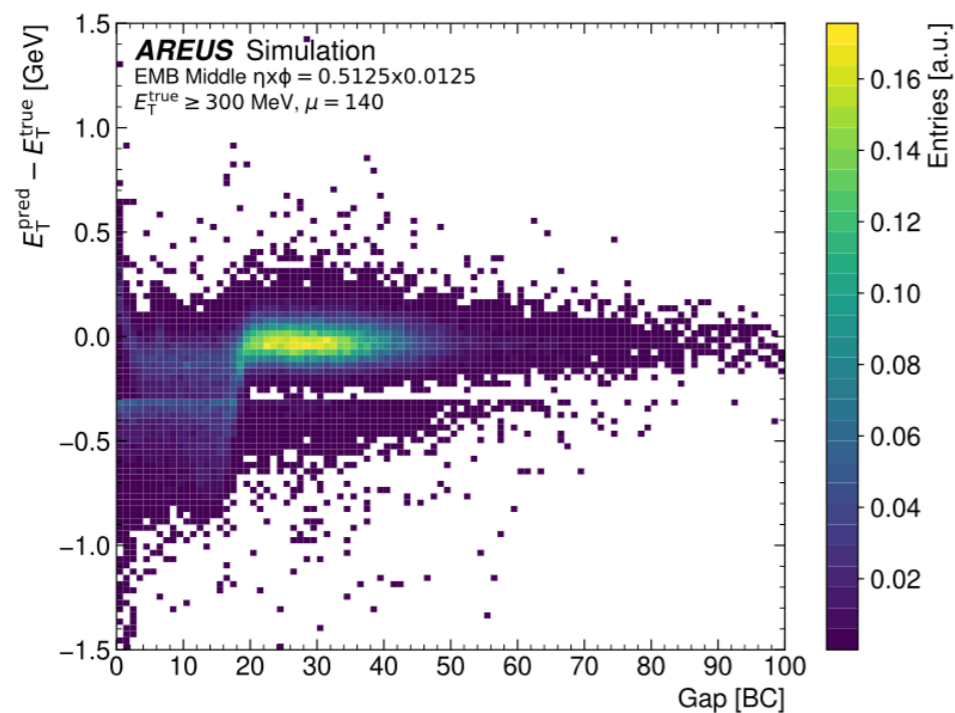
Del LHC al HL-LHC: Inteligencia artificial



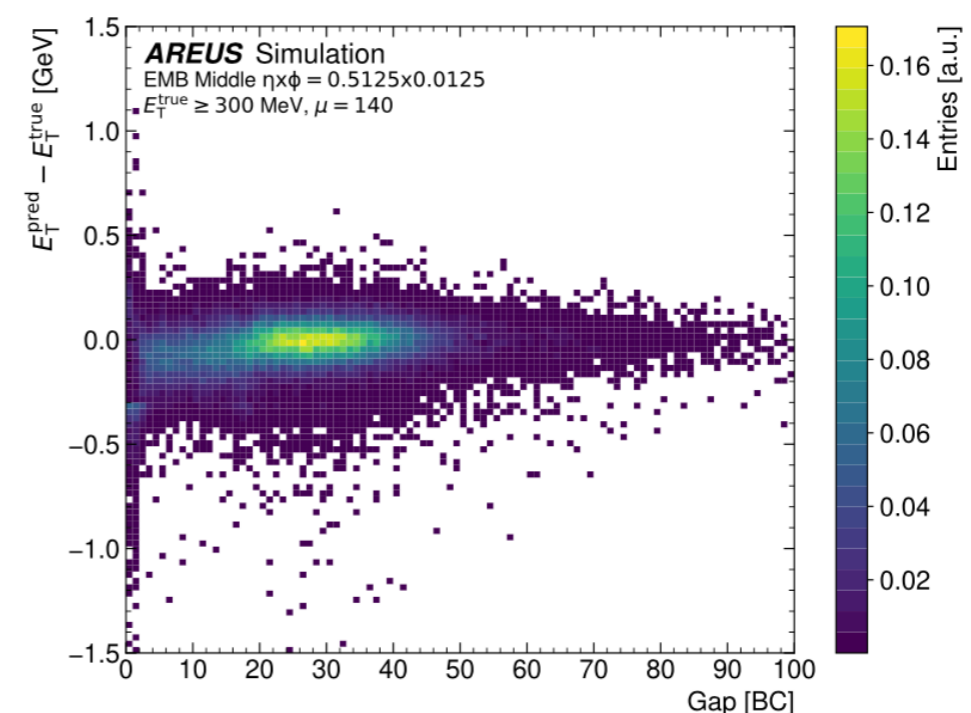
- Desarrollo de algoritmos de AI mas rápidos del mundo
- Respuestas en 100 nanoseconds usando FPGA/ASIC

- Ya se esta trabajando en esto no solo para trigger, sino también para la reconstrucción de la energía a nivel de trigger

Optimal Filter with Maximum Finder

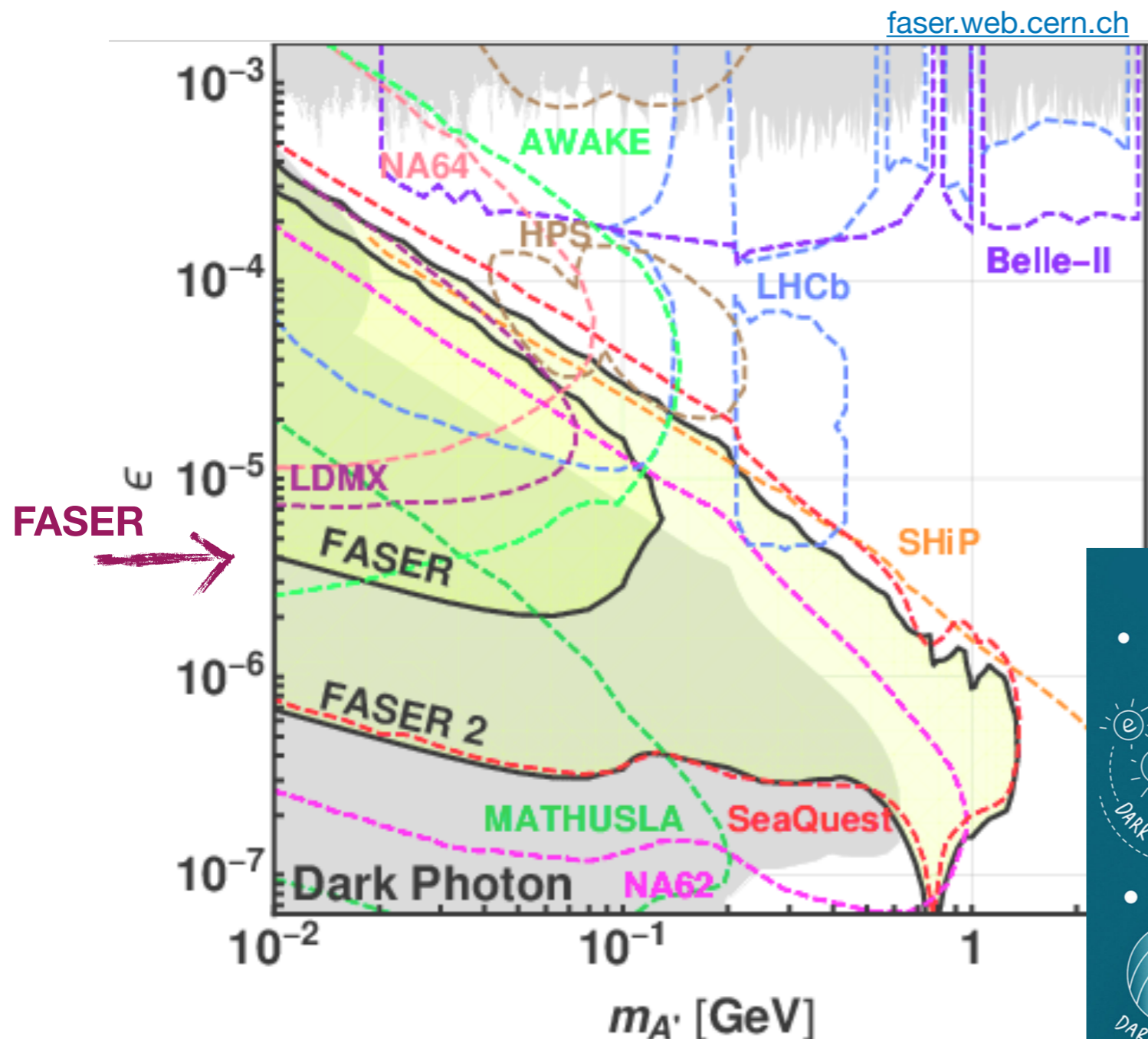


CNN with 3 Convolutional layers

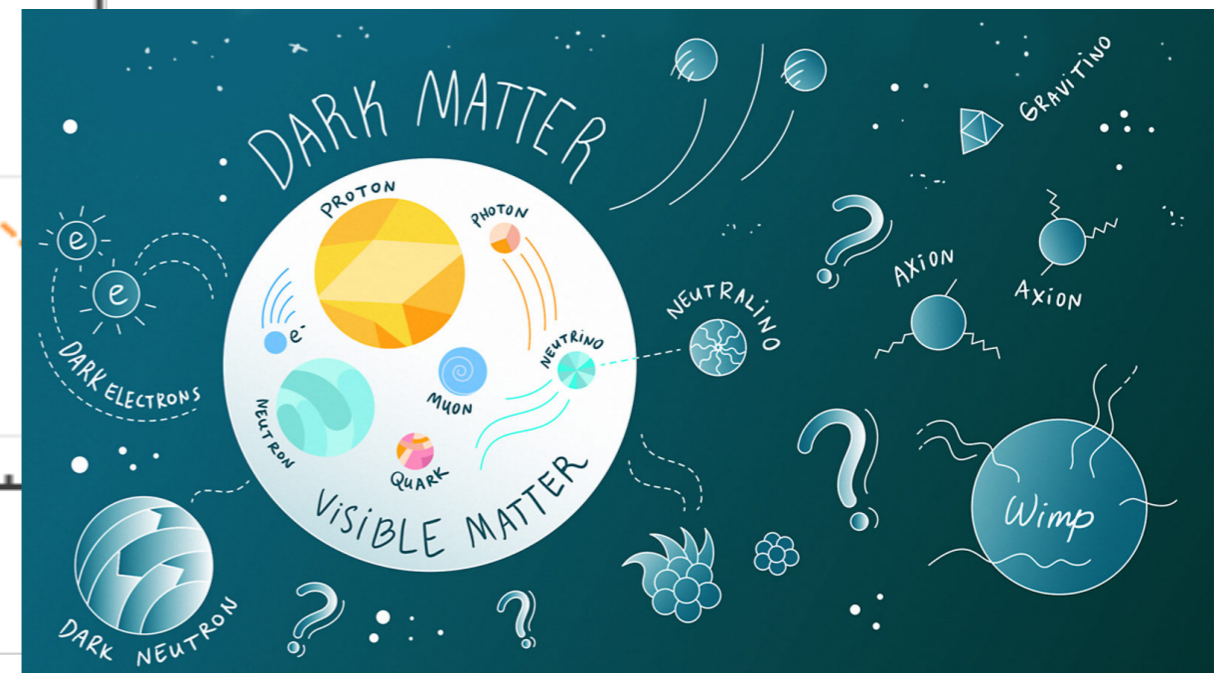


Del LHC al HL-LHC: detectar la materia oscura

- Con todas las colisiones deberíamos producir materia oscura, pero el reto es detectarlas si interactúan tan poco con la materia

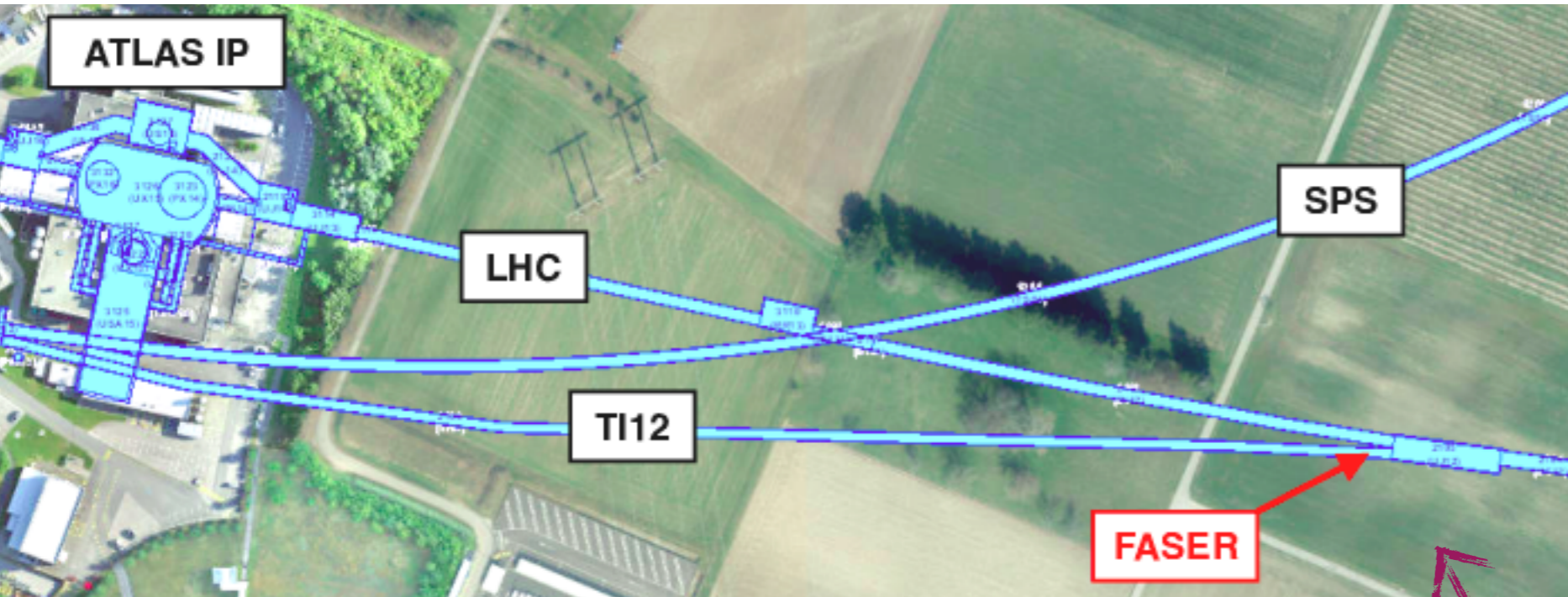


- Por ejemplo los “dark photons” de masa $m_{A'}$ deberían mezclarse fotones normales con una fuerza ϵ
- Las partículas oscuras podrían no decaer dentro de los detectores del LHC o se producen paralelas con el beam



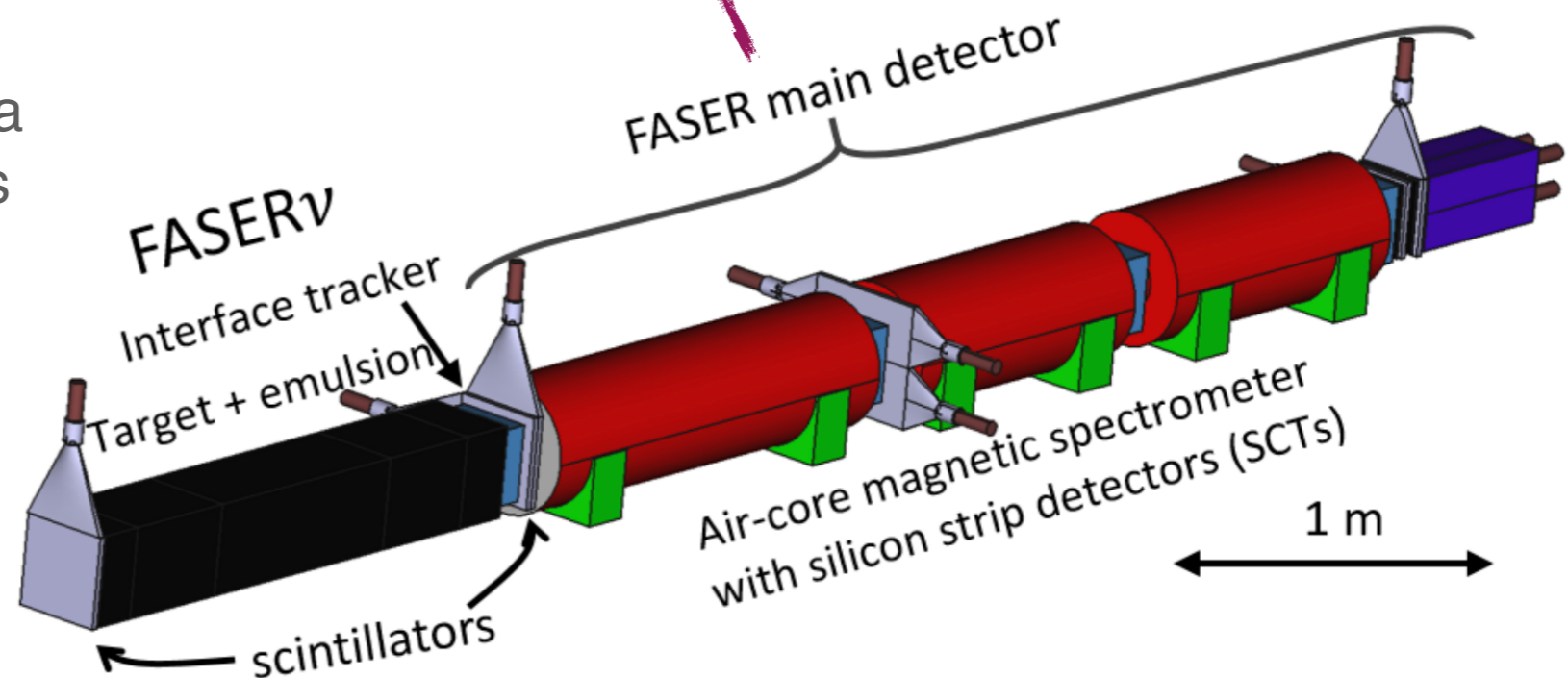


para detectar materia oscura



- Ubicado a 480 m de ATLAS, busca partículas que no deberían estar allí, pero podrían estar...

- Fotones oscuros de alta energía que decaen a e^+e^- y otros pares de partículas del SM



¿Más colisionadores en el futuro?

- Al CERN le tomó 40 años para ir del SPS con 0.6 TeV al LHC con ~14 TeV
- La capacidad con la que podemos aumentar la energía de las colisiones está limitada por la tecnología (y también el costo)
- El LHC incluyendo su túnel de 27 km costó ~10 billones de dólares! Y no se espera que los costos escalen linealmente!

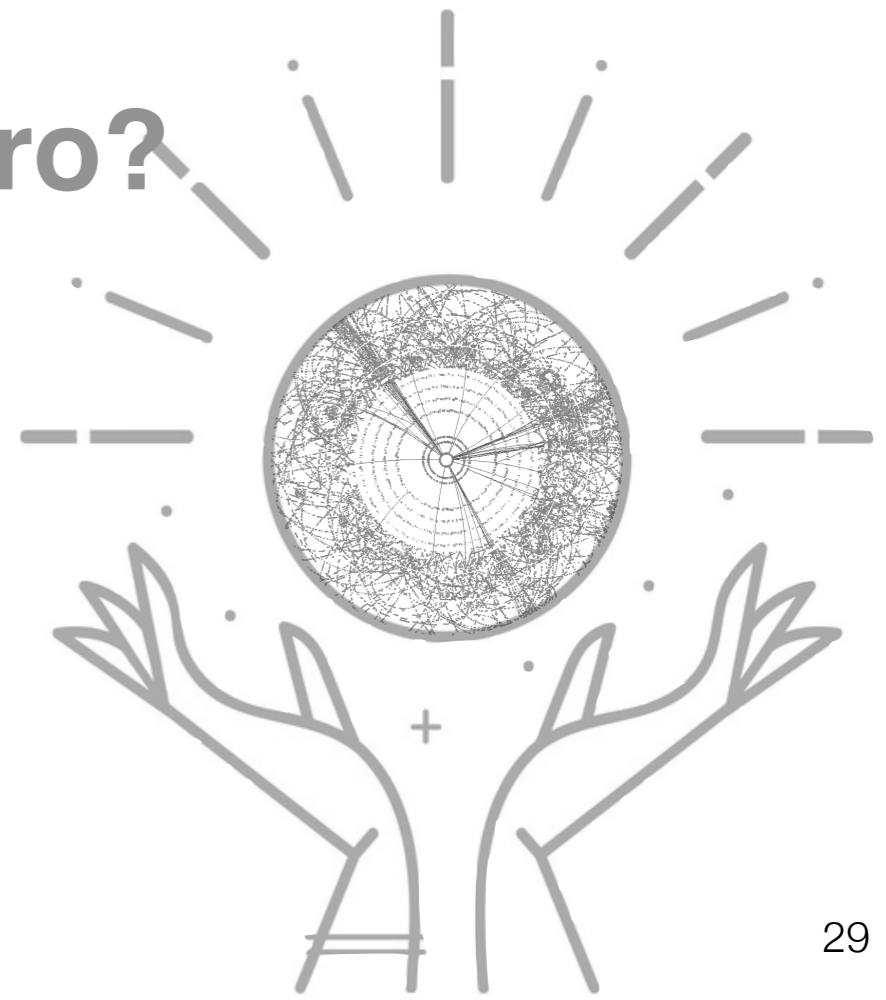
[lhc-closer](#)

Construction costs (MCHF)	Personnel	Materials	Total
LHC machine and areas ^{*)}	1224	3756	4980
CERN share to detectors	869	493	1362
LHC computing (CERN share)	85	83	168
Total	2178	4332	6510

- Un acelerador de 100 TeV se estima coste unos ~26 billones de dólares

^{*)} This includes: Machine R & D and injectors, tests and pre-operation.

¿Más colisionadores en el futuro?



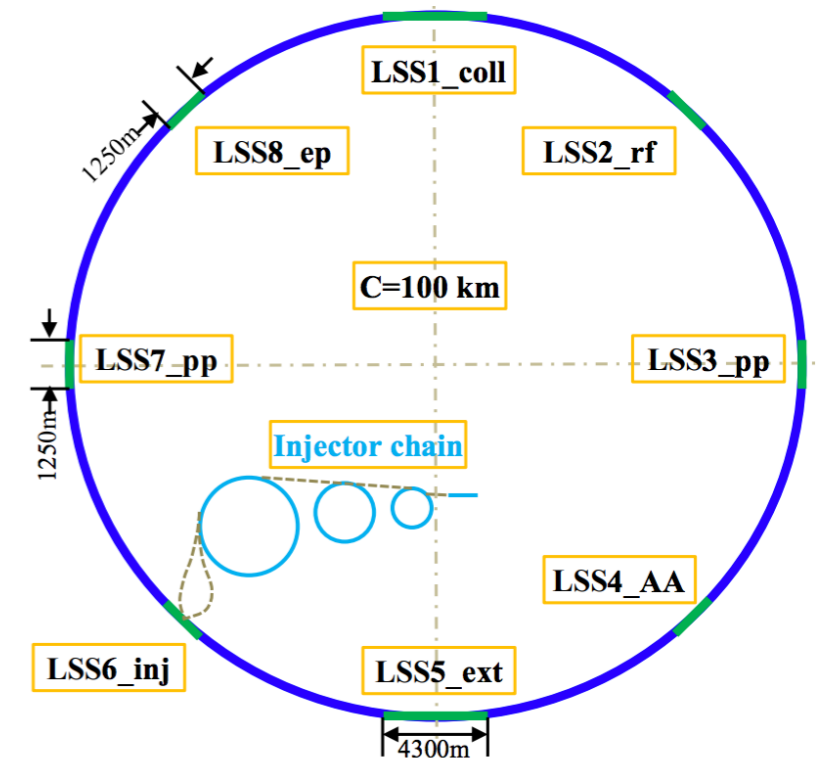
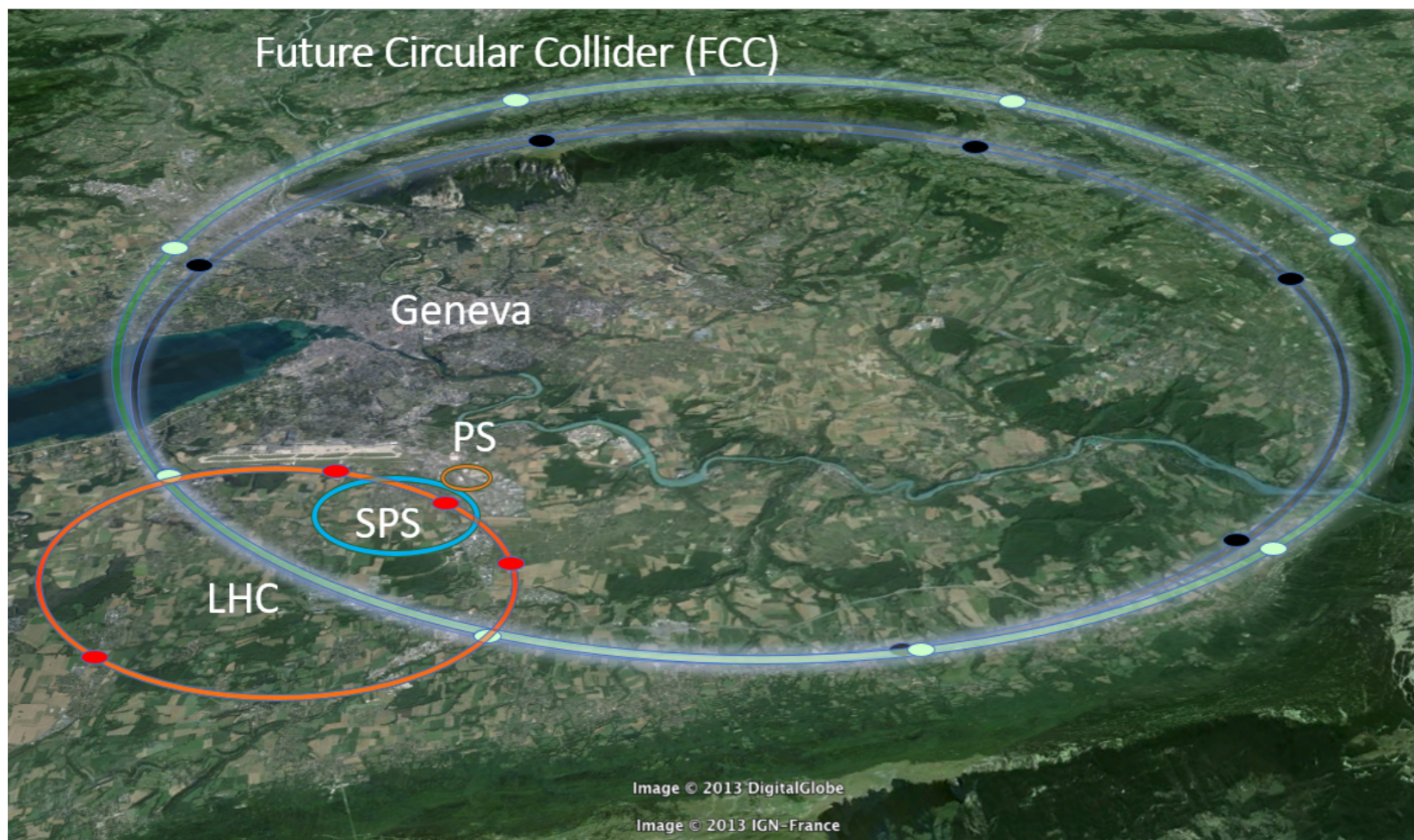
¿Más colisionadores en el futuro?

- Planes para colisionadores de ~ 100 TeV en el CERN “*Future Circular Collider*” (FCC-hh) y el “*Super Proton-Proton Collider*” (SppC) en China.
- Ambos requieren imanes super-conductores que no existen aún
- La nueva generación de colisionadores tomará un buen tiempo



8 years preparation	10 years tunnel and FCC-ee construction	15 years FCC-ee operation	11 years preparation for FCC-hh and installation	25 years FCC-hh operation pp/PbPb/eh
2020-2028		2038-2053		2064-2090

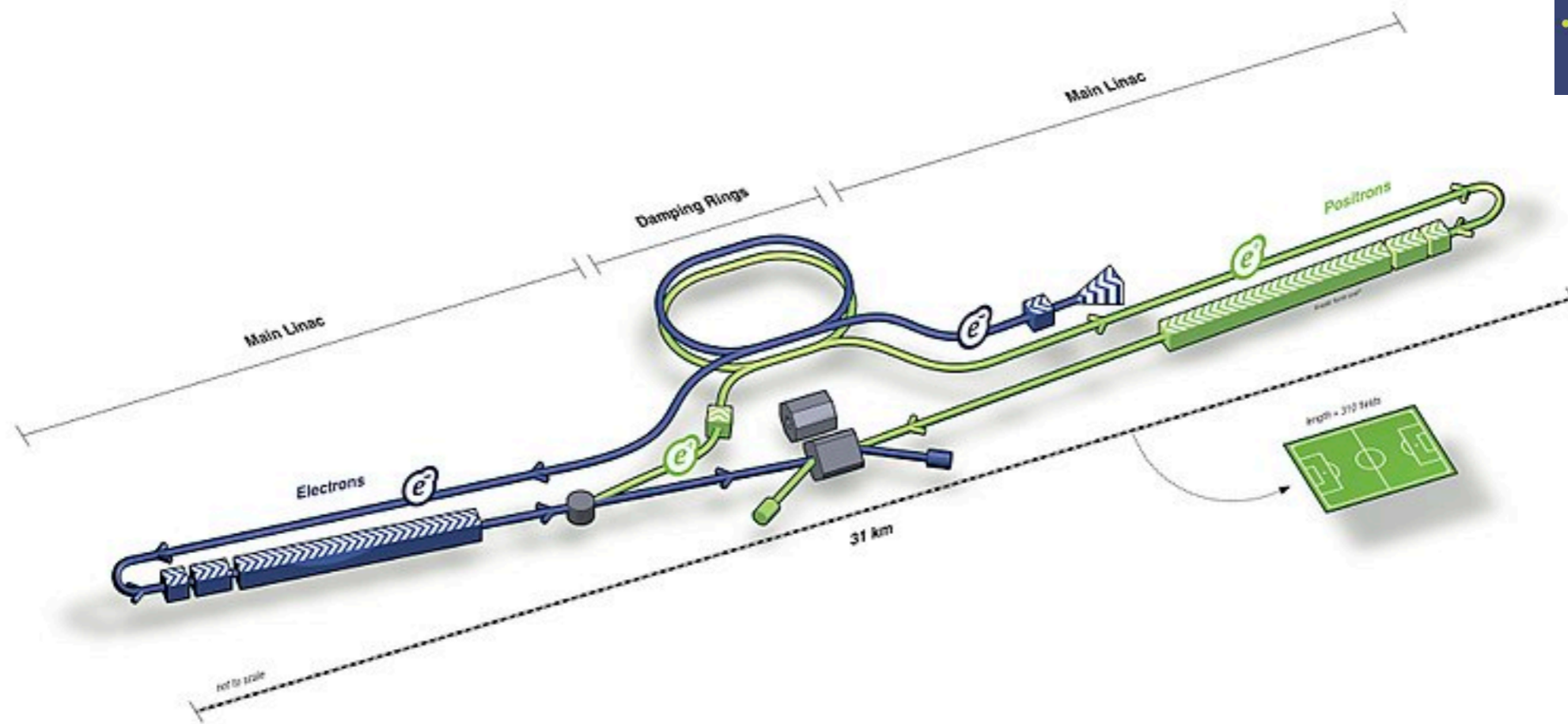
Fabiola Gianotti [EU strategy meeting](#)



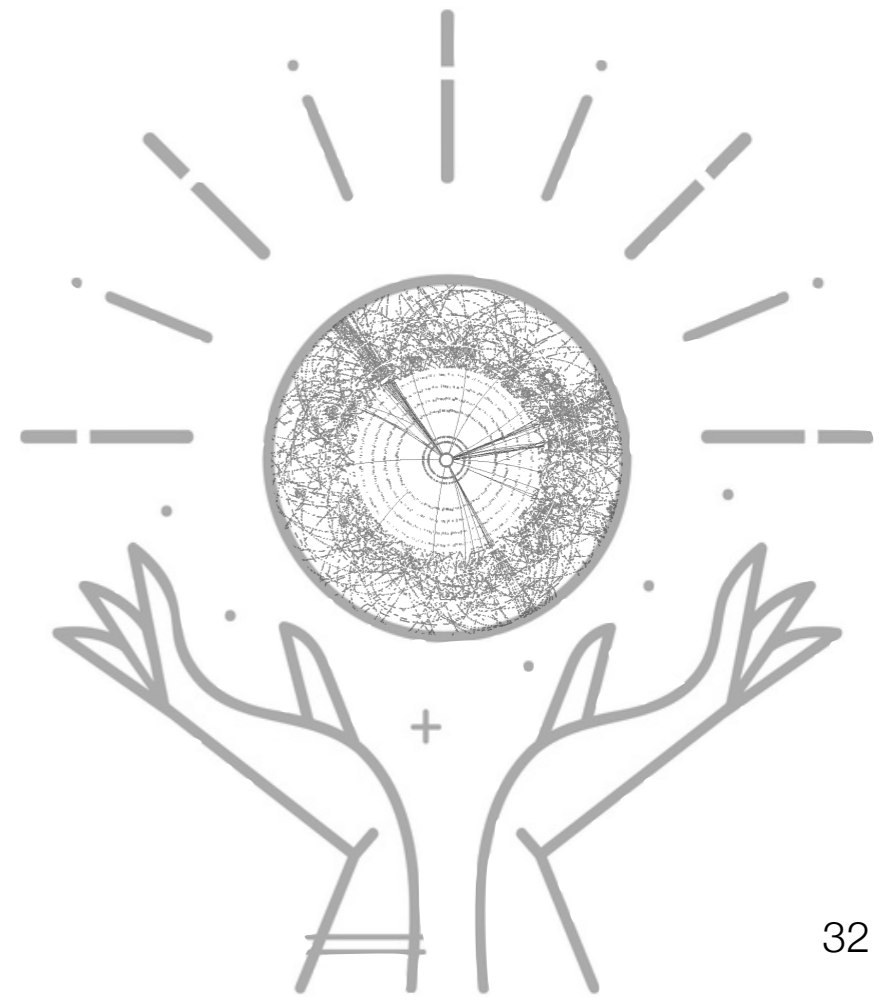
[arXiv:2101.10623](https://arxiv.org/abs/2101.10623)

International Linear Collider: Higgs Factory

- La ILC es la única opción realizable en un plazo de ~15 años
- Colisionador Electron-Positron con energía de 250 GeV → H and ZH son posibles
- Permitirá estudiar la física del Higgs con una precisión sin precedentes
- Upgrades permitirían 500 GeV, 1 TeV, 3 TeV, 30 TeV

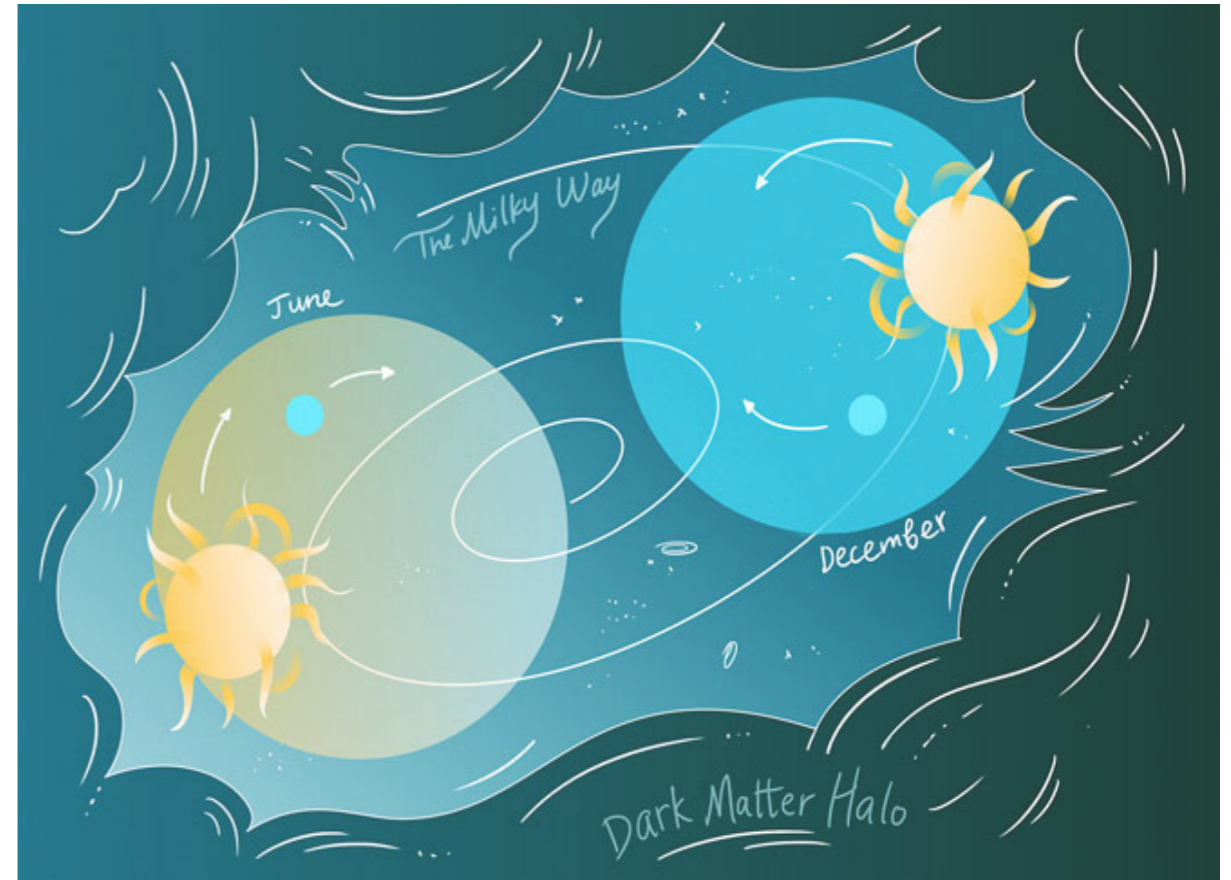


**¿Algo más aparte de
colisionadores en el futuro?**



Neutrinos y materia oscura

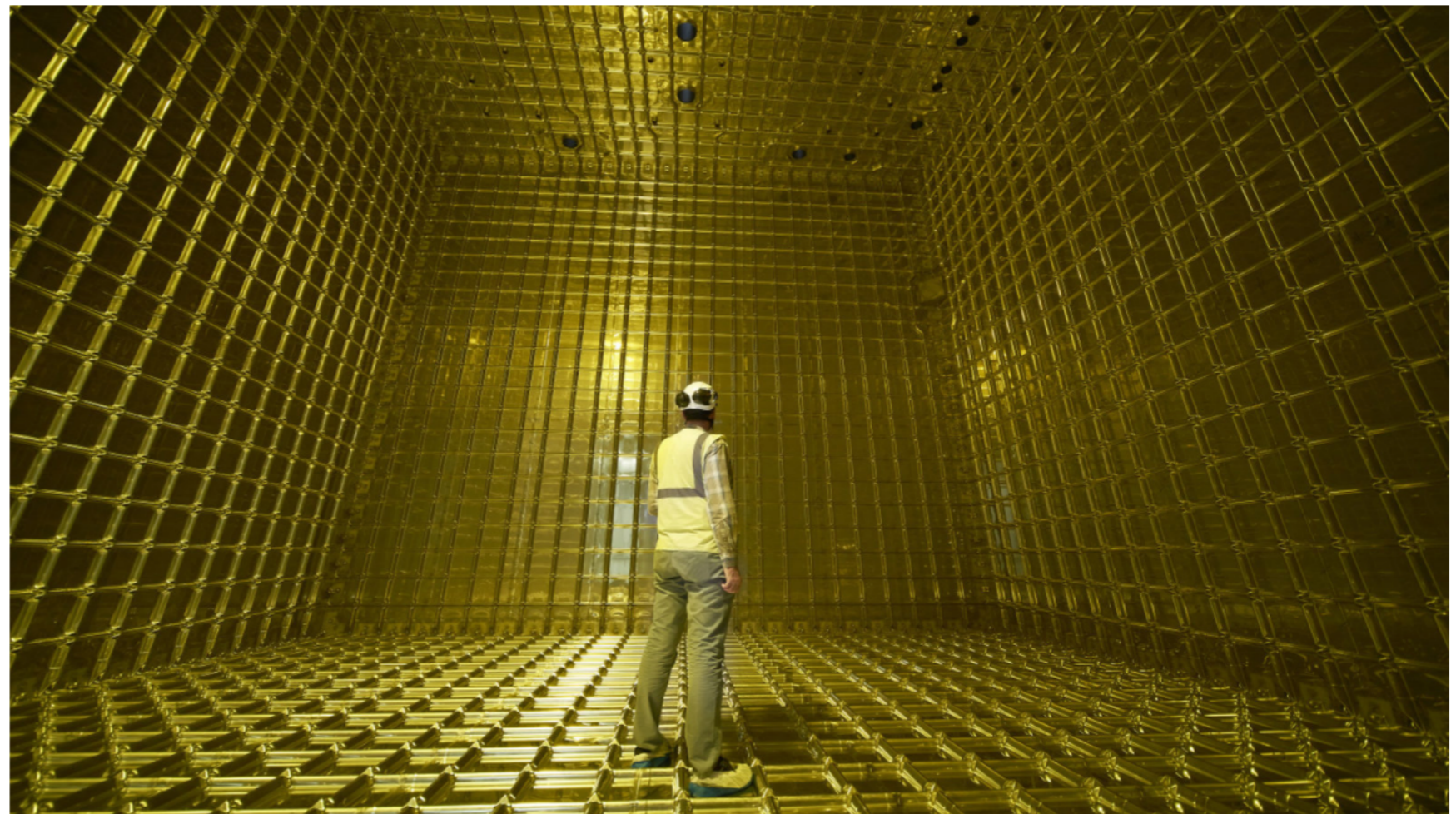
- Los neutrinos y la materia oscura son abundantes en nuestro universo
- Las fuentes astrofísicas producen un gran número de neutrinos
- Todos los días se producen neutrinos en los colisionadores y reactores
- Un viento de materia oscura sopla a través de la tierra todos los días



- Pero nuestra capacidad para detectar estas partículas y conocer sus secretos está limitada por nuestra capacidad para diseñar y desplegar sensores

Neutrinos

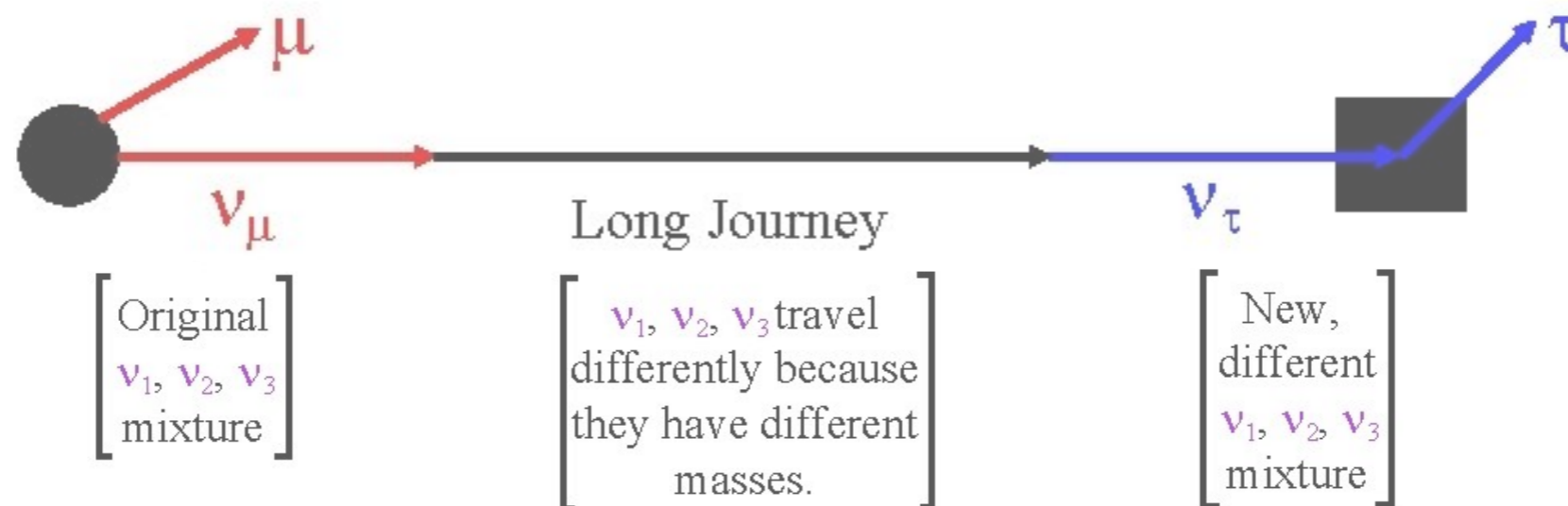
- Sabemos como detectar neutrinos y necesitamos mejorar nuestra manera de detectarlos
- Actualmente se está trabajando en usar la tecnología del argón líquido para detectar neutrinos (LAr TPC)
- Es posible producir un haz de neutrinos y dirigirlo hacia un detector. Por ejemplo:
 - Fermilab produce haces de neutrinos para MicroBooNE, Nova e ICARUS
 - J-PARC para T2K en Japón



Inside the first ProtoDUNE detector, before it was filled with liquid argon. Photo: CERN

Oscilaciones de neutrinos

- Los neutrinos son la versión de la naturaleza del gato de Schrodinger
- Cada neutrino-muón en un haz de neutrinos es una superposición cuántica de tres estados propios de masa diferentes
- Después de viajar cierta distancia, esta superposición cambiará debido a los diferentes factores de fase



- Por tanto, aunque el neutrino no haya interactuado, existe la posibilidad de detectarlo más tarde como un sabor diferente

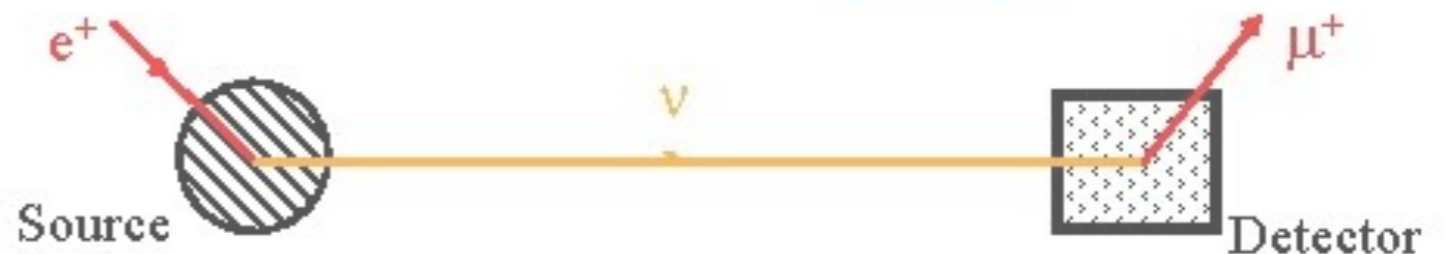
Oscilaciones de neutrinos y violación de CP

- Debido a que las masas de los neutrinos son tan pequeñas, esta oscilación del sabor del neutrino se ve en grandes escalas de distancia \sim cientos de kilómetros
- Estamos especialmente interesados en comparar las interacciones de los neutrinos con la materia y la antimateria

Neutrino
producido por una
partícula:



Neutrino
producido por una
anti-partícula:

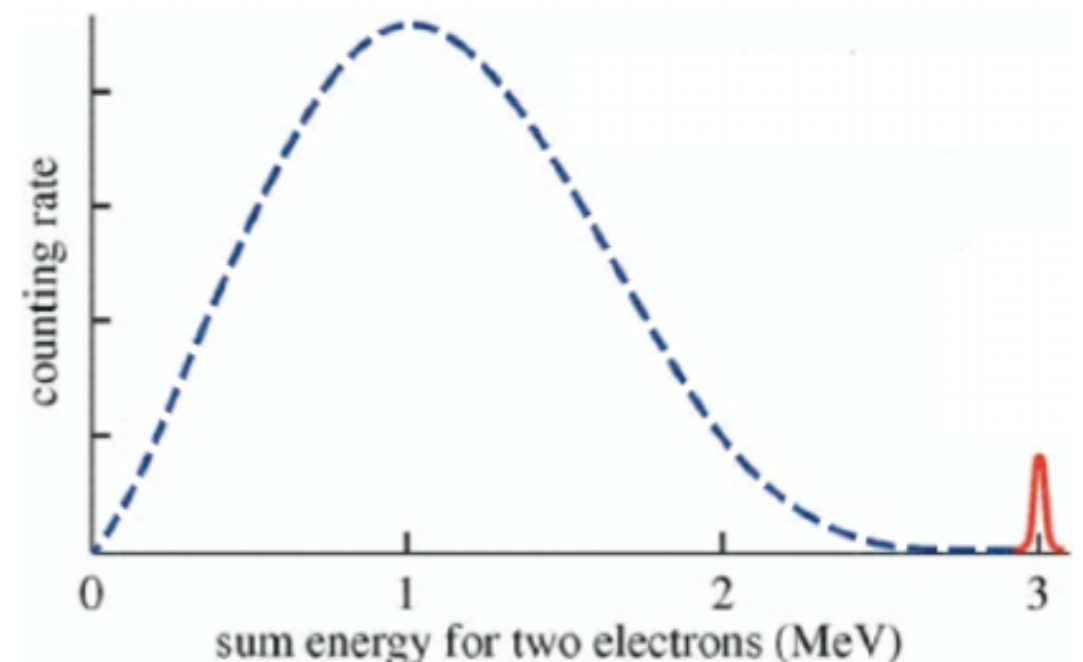
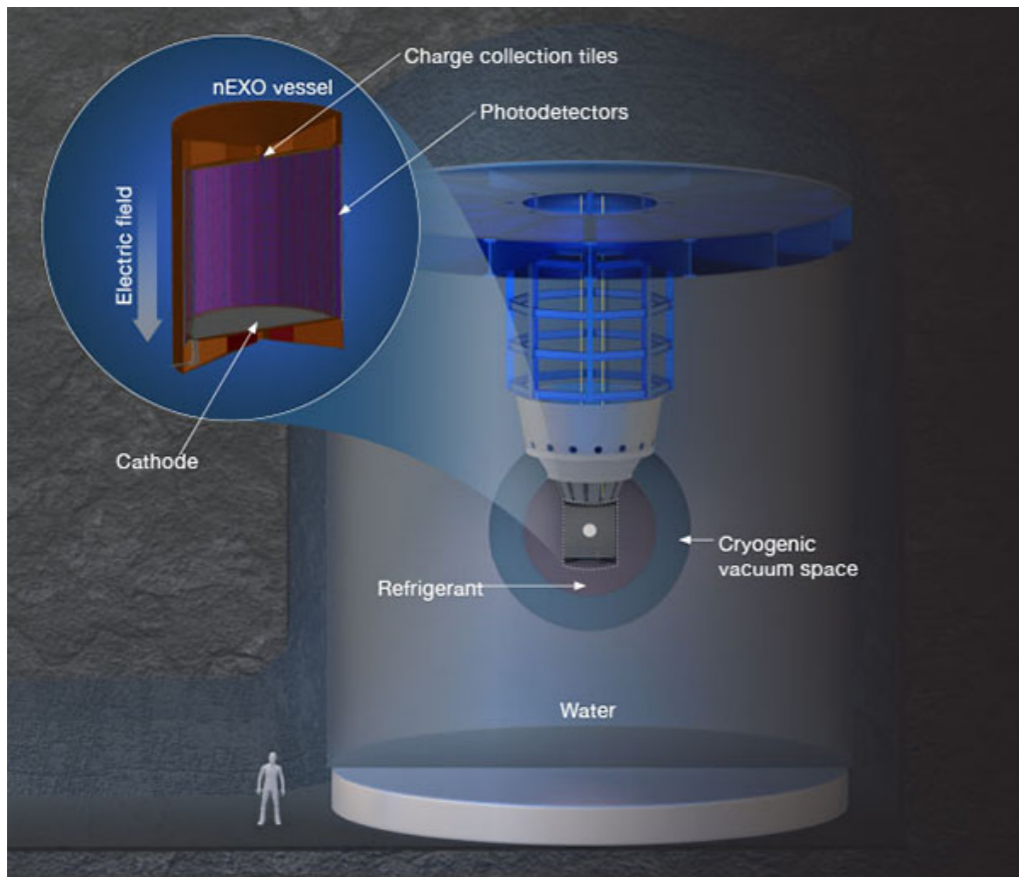
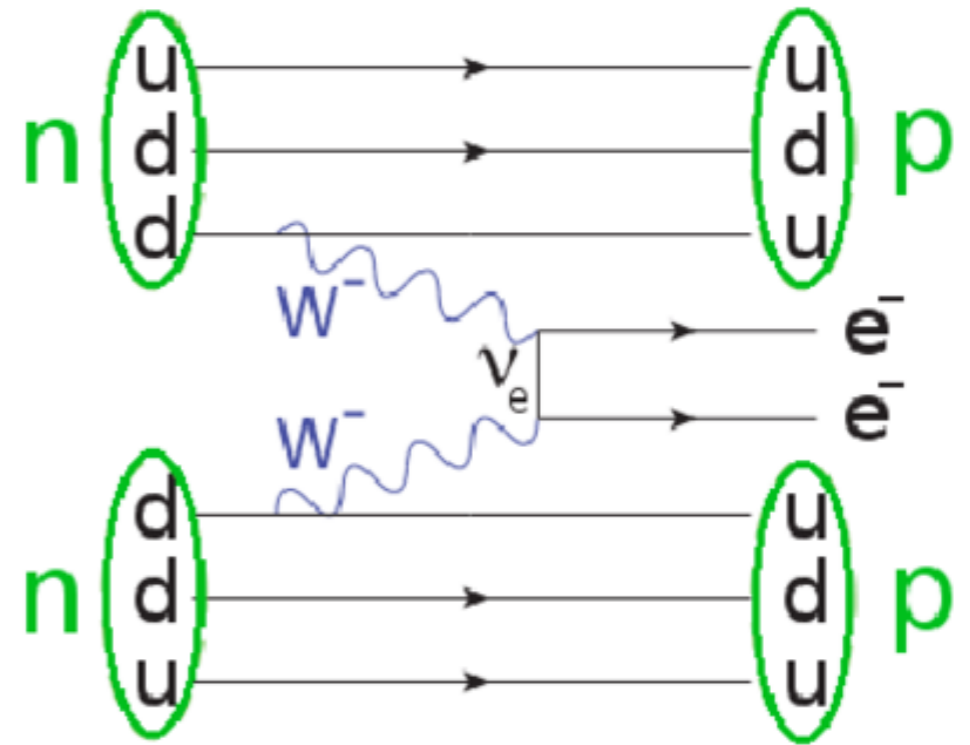


- Si no son iguales, los neutrinos violan el CP. Y esta podría ser la razón de nuestra existencia.

¿Son neutrinos sus propias partículas?

- Las partículas cargadas de materia del Modelo Estándar tienen versiones distintas de antipartículas con cargas opuestas
- Los neutrinos podrían ser sus propias antipartículas (es decir, fermiones de Majorana)
- Experimentos como nEXO intentarán detectar la desintegración beta doble sin neutrinos, que sólo puede ocurrir si los neutrinos son de Majorana

nEXO

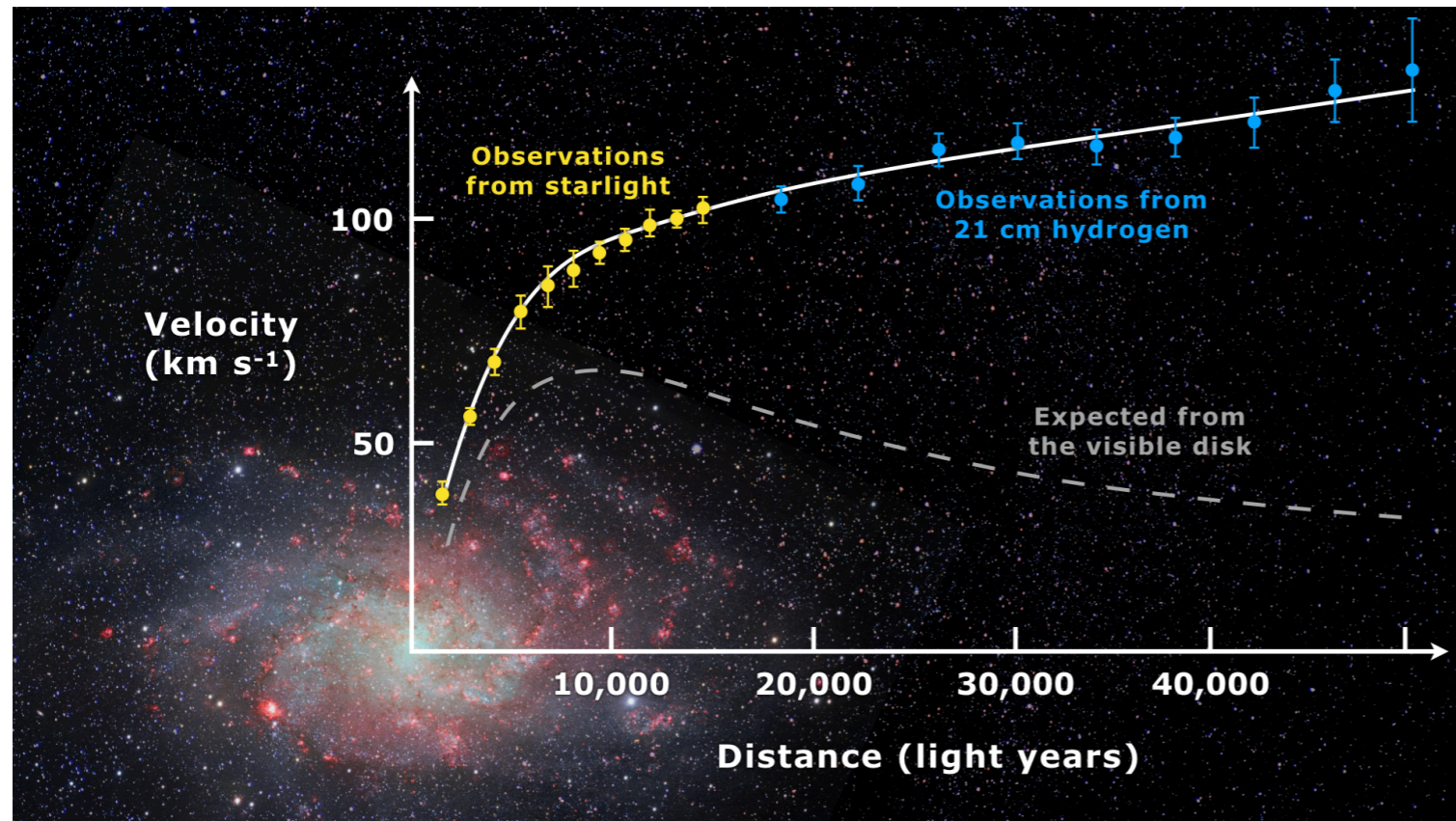


Y aún más con neutrinos...

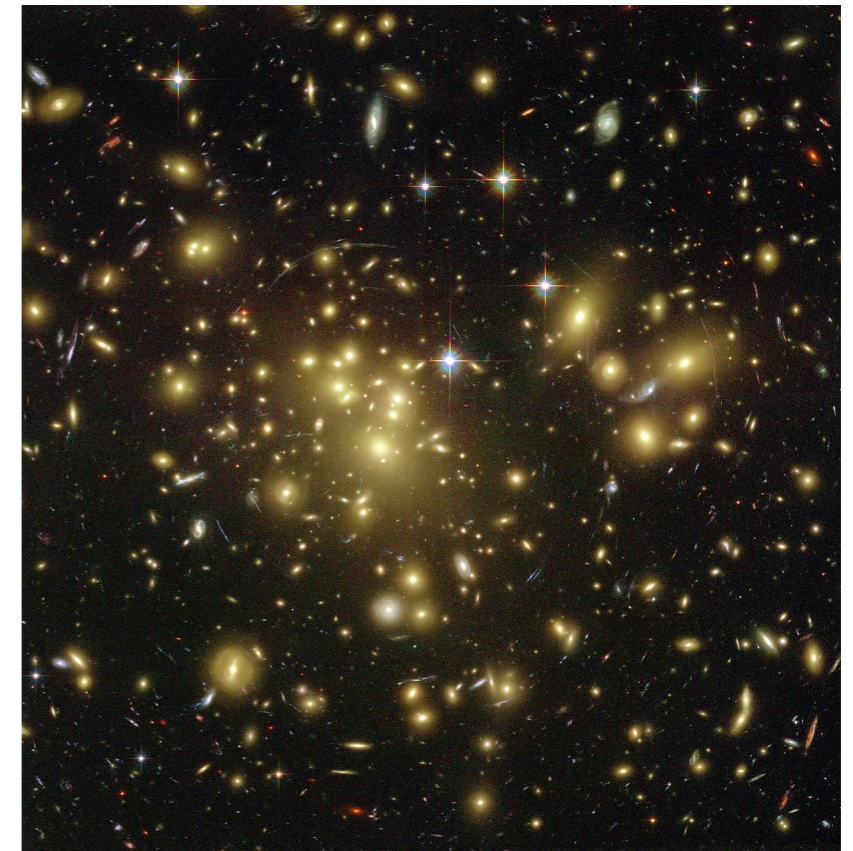
- La masa de los neutrinos afecta el CMB, así que microwave telescopes por ejemplo como el South Pole Telescope - 3G que se instalará en el polo sur se puede estudiar la masa de los neutrinos...
- Muchos experimentos de neutrinos tomando datos y siendo planeados...

El futuro de la materia oscura

- La materia oscura existe y espera por ser descubierta



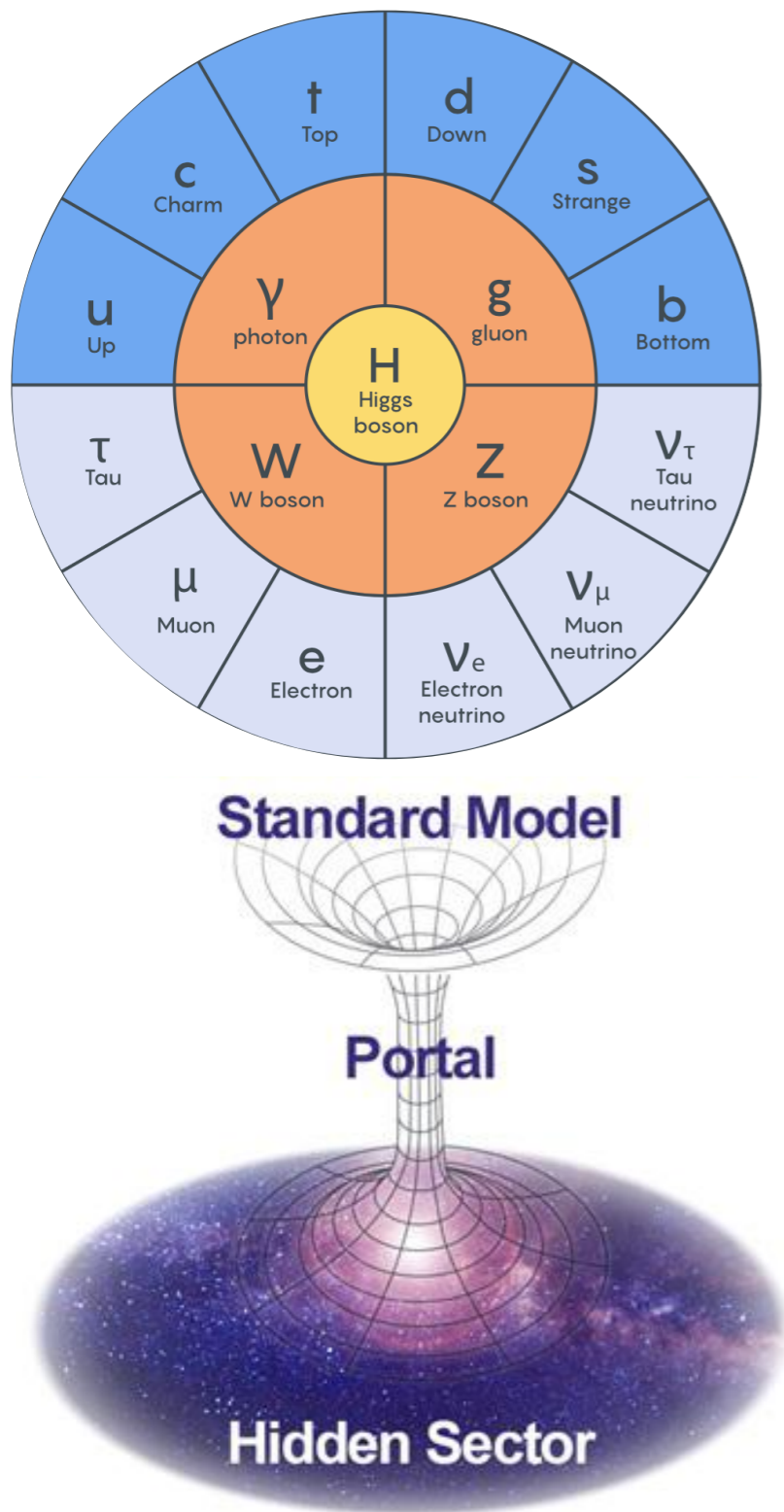
Curvas de rotación de galaxias



Gravitational lensing

- Los sectores oscuros también podrían existir. Muy pocas pistas sobre las escalas de masa
- Área vibrante y necesita más datos

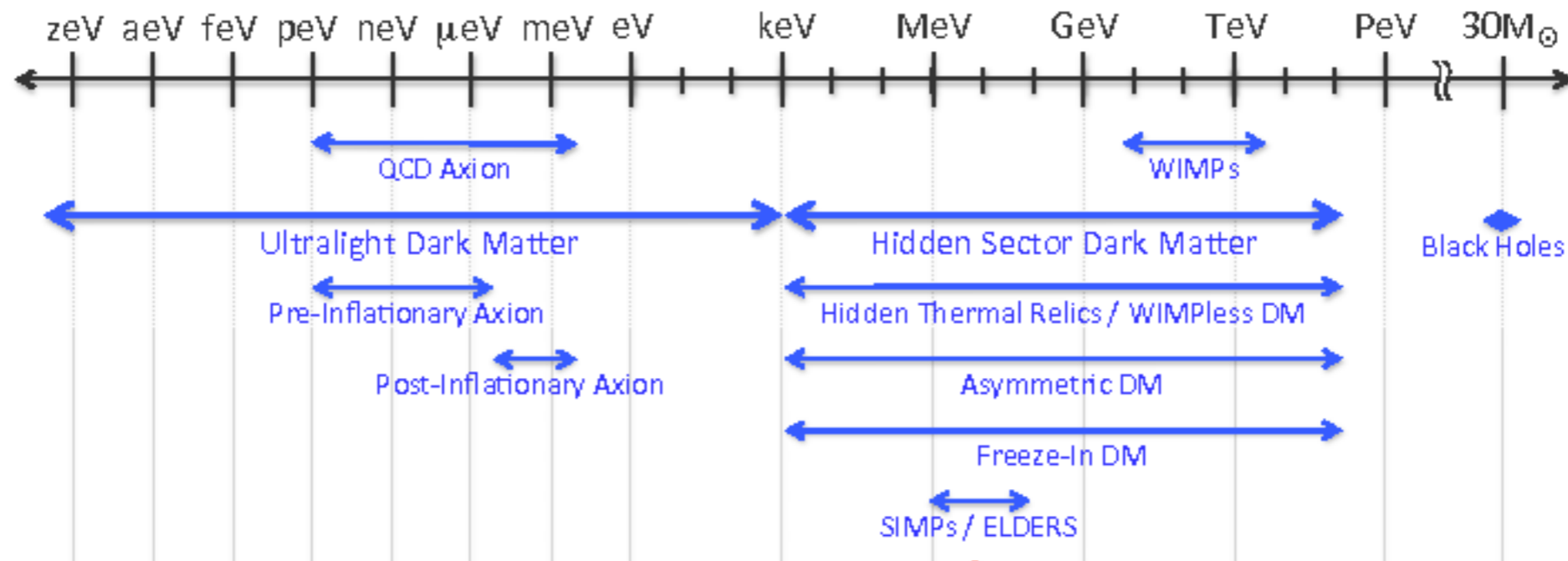
¿Qué se entiende por sector oscuro?



- Un sector oculto, con materia oscura, que nos habla a través de un portal
- El portal puede ser el propio bosón de Higgs o nuevos mensajeros
- El sector oscuro tiene una dinámica que no necesariamente sigue el Modelo Estándar. Así que podrían haber:
 - Nuevas fuerzas y nuevas simetrías
 - Múltiples estados nuevos en el sector oscuro, incluyendo candidatos a materia oscura
- Es posible que no haya portales a la materia oscura aparte de la gravedad

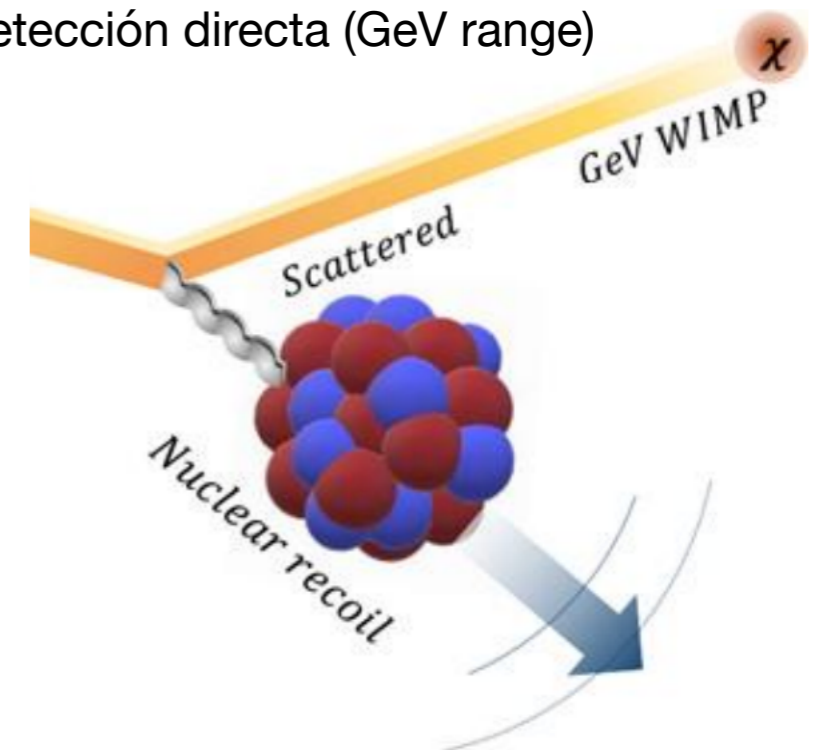
Candidatos de materia oscura

- Poco sabemos sobre la masa, puede estar en un rango de 75 ordenes de magnitud!

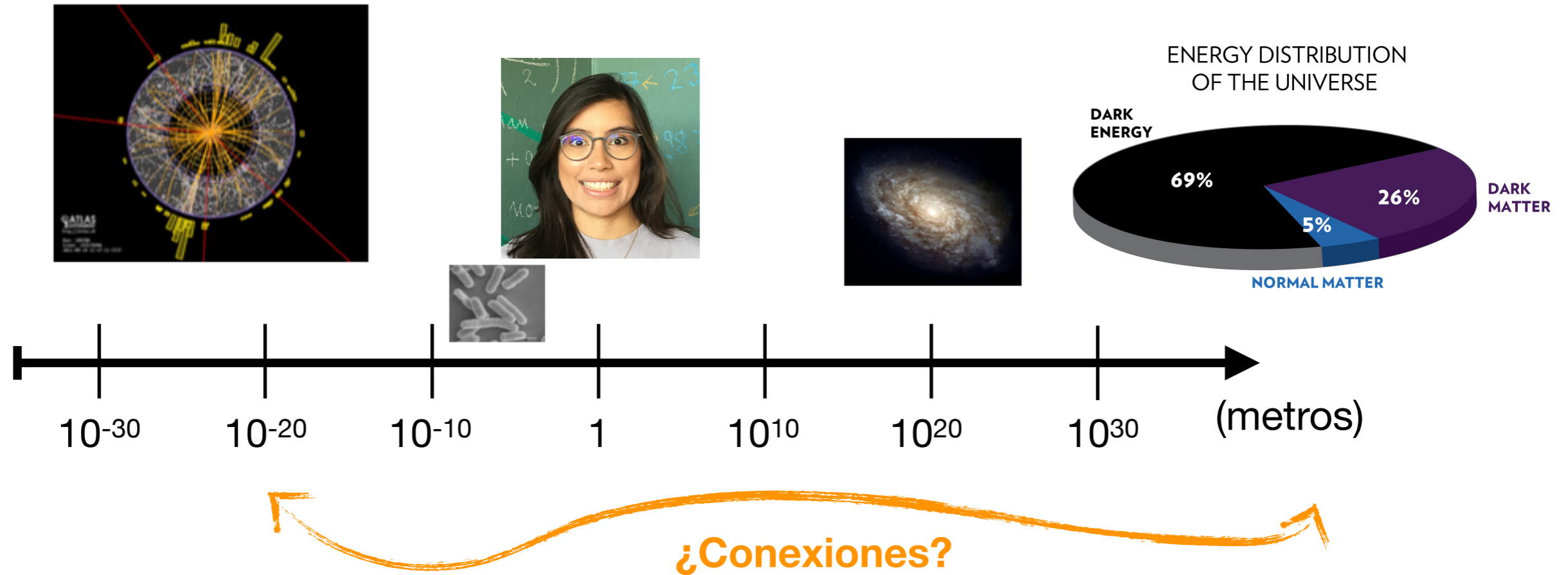


- Modelos teóricos predicen candidatos en todo este rango de masa!
- Búsquedas no cubren todo este rango, generalmente se enfocan en un sector
- El WIMP (Weekly Interacting Massive Particle) sigue siendo el paradigma principal

Detección directa (GeV range)



Algunas conexiones



- Bosón de Higgs: El vacío cuántico
- Neutrinos: quantum superposition y mixing
- Muon g-2: efectos virtuales
- Energía oscura: El vacío cuántico
- Dark matter: interacciones e identidad

Take away message

- En la física de partículas aún tenemos muchos misterios que resolver
- El futuro de la física de partículas se decide ahora! Con proyectos andando que nos mantendrán ocupados durante las próximas décadas!
- El futuro de este campo requiere desarrollo de nuevas tecnologías
 - Recrear las condiciones que queremos estudiar en el laboratorio
 - Imanes para acelerar partículas
 - Sensores más rápidos y capaces de detectar partículas que interactúan muy poco como neutrinos y materia oscura



More material

- Fabiola Gianotti [EU strategy meeting](#)
- Snowmass <https://snowmass21.org/>
- J.D. Lykken - “The Future of Particle Physics”

