Noticias desde el Gran Colisionador de Hadrones

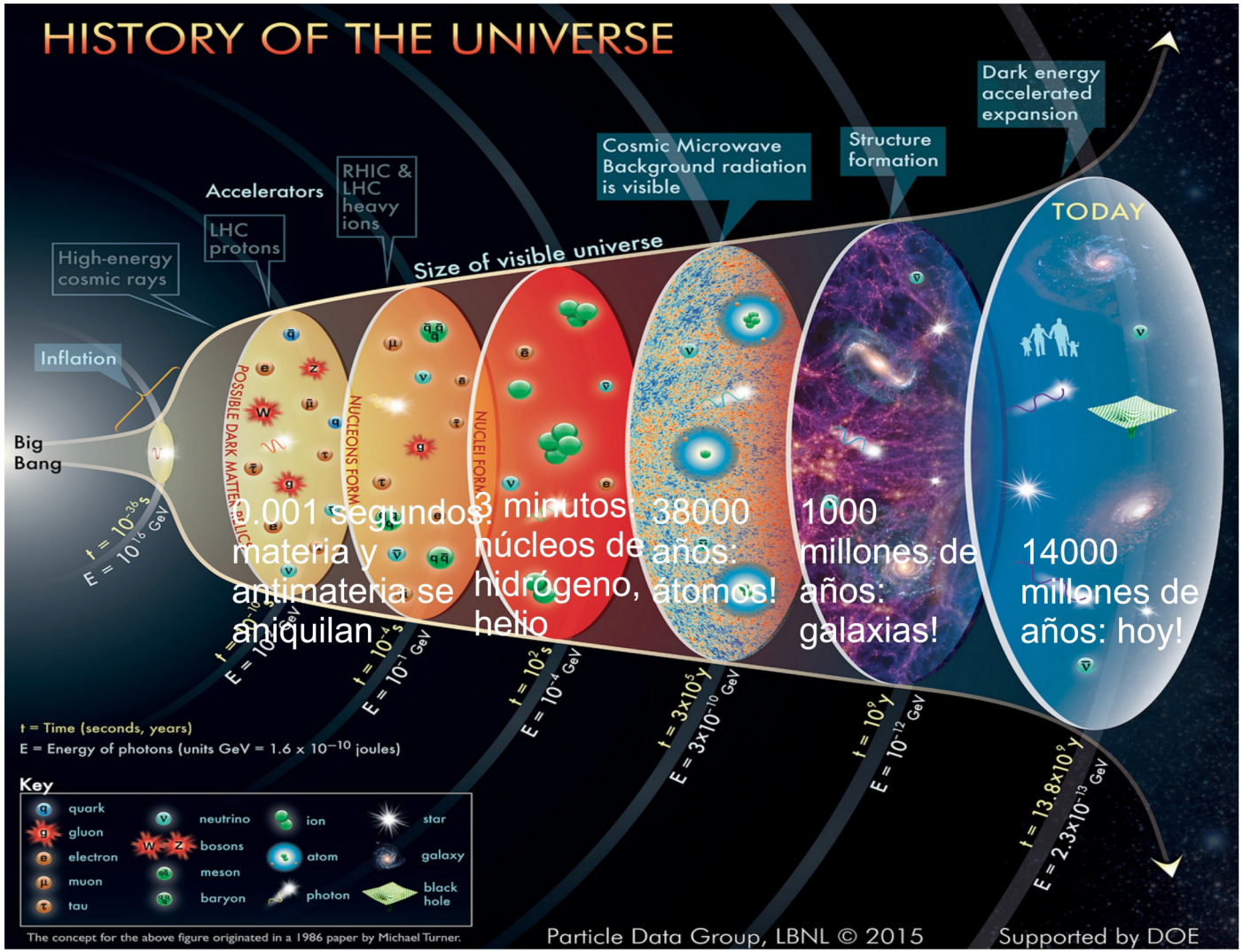
Reina Camacho Toro

LPNHE/CNRS & CERN

Tópicos en Física Contemporánea
Escuela de Física/Universidad Industrial de Santander (UIS)
6 de Junio, 2023

La historia del universo a través de la física de partículas

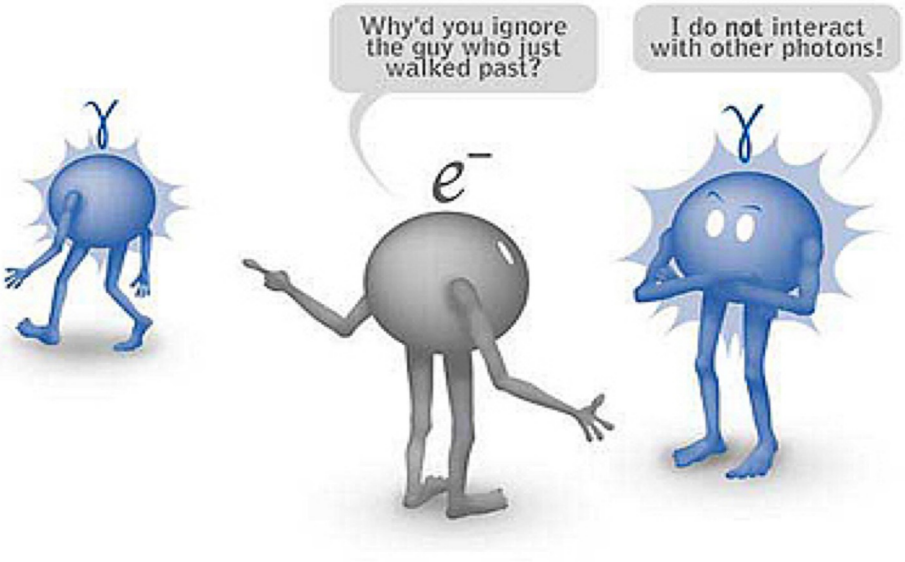
Es la clave para resolver preguntas fundamentales: ¿Cuál es la física que rige nuestro universo? ¿Existe una teoría que explique todos los fenómenos naturales de manera fundamental?



A medida que retrocedemos en la historia del universo este se hace más denso y mas caliente (energía) y las escalas de distancia son más y más cortas

Los ingredientes de la física de partículas

- Parece incluir:
  - Mecánica cuántica
  - Interacciones que son locales, invariantes de transición e invariantes de Lorentz
  - Simetrias de calibre
- Usamos la teoría de campos:
  - La teoría cuántica de campos relativista describe las partículas como excitaciones de campos cuánticos que llevan ciertos quantos fijos de masa, espín y varios tipos de cargas
  - Por ejemplo, decimos que el universo observado contiene un único campo de electrones, que resulta estar en un estado excitado con unos 10^80 cuantos de electrones, cada uno con espín 1/2h, carga eléctrica -e y masa 0,51 MeV/c2



Los ingredientes de la física de partículas

- Parece que existe una única forma coherente de definir la teoría cuántica de campos relativista
  - **Pero muchos modelos posibles de física de partículas** dependiendo de los grados de libertad, simetrías y las interacciones que se asumen

- Durante los últimos 50 años experimentos han confirmado el **Modelo Estándar de la física**

$$
\begin{gathered}
\mathcal{L}_{SM} = -\tfrac{1}{2}\partial_\nu g^a_\mu \partial_\nu g^a_\mu - g_s f^{abc}\partial_\mu g^a_\nu g^b_\mu g^c_\nu - \tfrac{1}{4}g_s^2 f^{abc} f^{ade} g^b_\mu g^c_\nu g^d_\mu g^e_\nu - \partial_\nu W^+_\mu \partial_\nu W^-_\mu - \\
M^2 W^+_\mu W^-_\mu - \tfrac{1}{2}\partial_\nu Z^0_\mu \partial_\nu Z^0_\mu - \tfrac{1}{2c_w^2} M^2 Z^0_\mu Z^0_\mu - \tfrac{1}{2}\partial_\mu A_\nu \partial_\mu A_\nu - igc_w(\partial_\nu Z^0_\mu (W^+_\mu W^-_\nu - \\
W^+_\nu W^-_\mu) - Z^0_\nu (W^+_\mu \partial_\nu W^-_\mu - W^-_\mu \partial_\nu W^+_\mu) + Z^0_\mu (W^+_\nu \partial_\nu W^-_\mu - W^-_\nu \partial_\nu W^+_\mu)) - \\
igs_w(\partial_\nu A_\mu (W^+_\mu W^-_\nu - W^+_\nu W^-_\mu) - A_\nu (W^+_\mu \partial_\nu W^-_\mu - W^-_\mu \partial_\nu W^+_\mu) + A_\mu (W^+_\nu \partial_\nu W^-_\mu - \\
W^-_\nu \partial_\nu W^+_\mu)) - \tfrac{1}{2}g^2 W^+_\mu W^-_\mu W^+_\nu W^-_\nu + \tfrac{1}{2}g^2 W^+_\mu W^-_\mu W^+_\nu W^-_\nu + g^2 c_w^2 (Z^0_\mu W^+_\mu Z^0_\nu W^-_\nu - \\
Z^0_\mu Z^0_\mu W^+_\nu W^-_\nu) + g^2 s_w^2 (A_\mu W^+_\mu A_\nu W^-_\nu - A_\mu A_\mu W^+_\nu W^-_\nu) + g^2 s_w c_w (A_\mu Z^0_\nu (W^+_\mu W^-_\nu - \\
W^+_\nu W^-_\mu) - 2A_\mu Z^0_\mu W^+_\nu W^-_\nu) - \tfrac{1}{2}\partial_\mu H \partial_\mu H - 2M^2 \alpha_h H^2 - \partial_\mu \phi^+ \partial_\mu \phi^- - \tfrac{1}{2}\partial_\mu \phi^0 \partial_\mu \phi^0 - \\
\beta_h \left(\tfrac{2M^2}{g^2} + \tfrac{2M}{g}H + \tfrac{1}{2}(H^2 + \phi^0\phi^0 + 2\phi^+\phi^-)\right) + \tfrac{2M^4}{g^2}\alpha_h - \\
g\alpha_h M\,(H^3 + H\phi^0\phi^0 + 2H\phi^+\phi^-) - \\
\tfrac{1}{8}g^2\alpha_h\,(H^4 + (\phi^0)^4 + 4(\phi^+\phi^-)^2 + 4(\phi^0)^2\phi^+\phi^- + 4H^2\phi^+\phi^- + 2(\phi^0)^2 H^2) - \\
gMW^+_\mu W^-_\mu H - \tfrac{1}{2}g\tfrac{M}{c_w^2} Z^0_\mu Z^0_\mu H - \\
\tfrac{1}{2}ig\,(W^+_\mu(\phi^0\partial_\mu\phi^- - \phi^-\partial_\mu\phi^0) - W^-_\mu(\phi^0\partial_\mu\phi^+ - \phi^+\partial_\mu\phi^0)) + \\
\tfrac{1}{2}g\,(W^+_\mu(H\partial_\mu\phi^- - \phi^-\partial_\mu H) + W^-_\mu(H\partial_\mu\phi^+ - \phi^+\partial_\mu H)) + \tfrac{1}{2}g\tfrac{1}{c_w}(Z^0_\mu(H\partial_\mu\phi^0 - \phi^0\partial_\mu H) + \\
M\,(\tfrac{1}{c_w}Z^0_\mu\partial_\mu\phi^0 + W^+_\mu\partial_\mu\phi^- + W^-_\mu\partial_\mu\phi^+) - ig\tfrac{s_w^2}{c_w}MZ^0_\mu(W^+_\mu\phi^- - W^-_\mu\phi^+) + igs_w MA_\mu(W^+_\mu\phi^- - \\
W^-_\mu\phi^+) - ig\tfrac{1-2c_w^2}{2c_w}Z^0_\mu(\phi^+\partial_\mu\phi^- - \phi^-\partial_\mu\phi^+) + igs_w A_\mu(\phi^+\partial_\mu\phi^- - \phi^-\partial_\mu\phi^+) - \\
\tfrac{1}{4}g^2 W^+_\mu W^-_\mu\,(H^2 + (\phi^0)^2 + 2\phi^+\phi^-) - \tfrac{1}{8}g^2\tfrac{1}{c_w^2}Z^0_\mu Z^0_\mu\,(H^2 + (\phi^0)^2 + 2(2s_w^2 - 1)^2\phi^+\phi^-) - \\
\tfrac{1}{2}g^2\tfrac{s_w^2}{c_w}Z^0_\mu\phi^0(W^+_\mu\phi^- + W^-_\mu\phi^+) - \tfrac{1}{2}ig^2\tfrac{s_w^2}{c_w}Z^0_\mu H(W^+_\mu\phi^- - W^-_\mu\phi^+) + \tfrac{1}{2}g^2 s_w A_\mu\phi^0(W^+_\mu\phi^- + \\
W^-_\mu\phi^+) + \tfrac{1}{2}ig^2 s_w A_\mu H(W^+_\mu\phi^- - W^-_\mu\phi^+) - g^2\tfrac{s_w}{c_w}(2c_w^2 - 1)Z^0_\mu A_\mu\phi^+\phi^- - \\
g^2 s_w^2 A_\mu A_\mu\phi^+\phi^- + \tfrac{1}{2}ig_s\,\lambda^a_{ij}(\bar{q}^\sigma_i\gamma^\mu q^\sigma_j)g^a_\mu - \bar{e}^\lambda(\gamma\partial + m^\lambda_e)e^\lambda - \bar{\nu}^\lambda(\gamma\partial + m^\lambda_\nu)\nu^\lambda - \bar{u}^\lambda_j(\gamma\partial + \\
m^\lambda_u)u^\lambda_j - \bar{d}^\lambda_j(\gamma\partial + m^\lambda_d)d^\lambda_j + igs_w A_\mu\left(-(\bar{e}^\lambda\gamma^\mu e^\lambda) + \tfrac{2}{3}(\bar{u}^\lambda_j\gamma^\mu u^\lambda_j) - \tfrac{1}{3}(\bar{d}^\lambda_j\gamma^\mu d^\lambda_j)\right) + \\
\tfrac{ig}{4c_w}Z^0_\mu\{(\bar{\nu}^\lambda\gamma^\mu(1+\gamma^5)\nu^\lambda) + (\bar{e}^\lambda\gamma^\mu(4s_w^2 - 1 - \gamma^5)e^\lambda) + (\bar{d}^\lambda_j\gamma^\mu(\tfrac{4}{3}s_w^2 - 1 - \gamma^5)d^\lambda_j) + \\
(\bar{u}^\lambda_j\gamma^\mu(1 - \tfrac{8}{3}s_w^2 + \gamma^5)u^\lambda_j)\} + \tfrac{ig}{2\sqrt{2}}W^+_\mu\left((\bar{\nu}^\lambda\gamma^\mu(1+\gamma^5)U^{lep}{}_{\lambda\kappa}e^\kappa) + (\bar{u}^\lambda_j\gamma^\mu(1+\gamma^5)C_{\lambda\kappa}d^\kappa_j)\right) + \\
\tfrac{ig}{2\sqrt{2}}W^-_\mu\left((\bar{e}^\kappa U^{lep\dagger}{}_{\kappa\lambda}\gamma^\mu(1+\gamma^5)\nu^\lambda) + (\bar{d}^\kappa_j C^\dagger_{\kappa\lambda}\gamma^\mu(1+\gamma^5)u^\lambda_j)\right) + \\
\tfrac{ig}{2M\sqrt{2}}\phi^+\left(-m^\kappa_e(\bar{\nu}^\lambda U^{lep}{}_{\lambda\kappa}(1-\gamma^5)e^\kappa) + m^\lambda_\nu(\bar{\nu}^\lambda U^{lep}{}_{\lambda\kappa}(1+\gamma^5)e^\kappa)\right) + \\
\tfrac{ig}{2M\sqrt{2}}\phi^-\left(m^\lambda_e(\bar{e}^\lambda U^{lep\dagger}{}_{\lambda\kappa}(1+\gamma^5)\nu^\kappa) - m^\kappa_\nu(\bar{e}^\lambda U^{lep\dagger}{}_{\lambda\kappa}(1-\gamma^5)\nu^\kappa\right) - \tfrac{g}{2}\tfrac{m^\lambda_\nu}{M}H(\bar{\nu}^\lambda\nu^\lambda) - \\
\tfrac{g}{2}\tfrac{m^\lambda_e}{M}H(\bar{e}^\lambda e^\lambda) + \tfrac{ig}{2}\tfrac{m^\lambda_\nu}{M}\phi^0(\bar{\nu}^\lambda\gamma^5\nu^\lambda) - \tfrac{ig}{2}\tfrac{m^\lambda_e}{M}\phi^0(\bar{e}^\lambda\gamma^5 e^\lambda) - \tfrac{1}{4}\,\bar{\nu}_\lambda\,M^R_{\lambda\kappa}\,(1-\gamma_5)\hat{\nu}_\kappa - \\
\tfrac{1}{4}\,\overline{\bar{\nu}_\lambda\,M^R_{\lambda\kappa}\,(1-\gamma_5)\hat{\nu}_\kappa} + \tfrac{ig}{2M\sqrt{2}}\phi^+\left(-m^\kappa_d(\bar{u}^\lambda_j C_{\lambda\kappa}(1-\gamma^5)d^\kappa_j) + m^\lambda_u(\bar{u}^\lambda_j C_{\lambda\kappa}(1+\gamma^5)d^\kappa_j\right) + \\
\tfrac{ig}{2M\sqrt{2}}\phi^-\left(m^\lambda_d(\bar{d}^\lambda_j C^\dagger_{\lambda\kappa}(1+\gamma^5)u^\kappa_j) - m^\kappa_u(\bar{d}^\lambda_j C^\dagger_{\lambda\kappa}(1-\gamma^5)u^\kappa_j\right) - \tfrac{g}{2}\tfrac{m^\lambda_u}{M}H(\bar{u}^\lambda_j u^\lambda_j) - \\
\tfrac{g}{2}\tfrac{m^\lambda_d}{M}H(\bar{d}^\lambda_j d^\lambda_j) + \tfrac{ig}{2}\tfrac{m^\lambda_u}{M}\phi^0(\bar{u}^\lambda_j\gamma^5 u^\lambda_j) - \tfrac{ig}{2}\tfrac{m^\lambda_d}{M}\phi^0(\bar{d}^\lambda_j\gamma^5 d^\lambda_j) + \bar{G}^a\partial^2 G^a + g_s f^{abc}\partial_\mu\bar{G}^a G^b g^c_\mu + \\
\bar{X}^+(\partial^2 - M^2)X^+ + \bar{X}^-(\partial^2 - M^2)X^- + \bar{X}^0(\partial^2 - \tfrac{M^2}{c_w^2})X^0 + \bar{Y}\partial^2 Y + igc_w W^+_\mu(\partial_\mu\bar{X}^0 X^- - \\
\partial_\mu\bar{X}^+ X^0) + igs_w W^+_\mu(\partial_\mu\bar{Y}X^- - \partial_\mu\bar{X}^+ Y) + igc_w W^-_\mu(\partial_\mu\bar{X}^- X^0 - \\
\partial_\mu\bar{X}^0 X^+) + igs_w W^-_\mu(\partial_\mu\bar{X}^- Y - \partial_\mu\bar{Y}X^+) + igc_w Z^0_\mu(\partial_\mu\bar{X}^+ X^+ - \\
\partial_\mu\bar{X}^- X^-) + igs_w A_\mu(\partial_\mu\bar{X}^+ X^+ - \\
\partial_\mu\bar{X}^- X^-) - \tfrac{1}{2}gM\left(\bar{X}^+ X^+ H + \bar{X}^- X^- H + \tfrac{1}{c_w^2}\bar{X}^0 X^0 H\right) + \tfrac{1-2c_w^2}{2c_w}igM\left(\bar{X}^+ X^0\phi^+ - \bar{X}^- X^0\phi^-\right) + \\
\tfrac{1}{2c_w}igM\left(\bar{X}^0 X^-\phi^+ - \bar{X}^0 X^+\phi^-\right) + igMs_w\left(\bar{X}^0 X^-\phi^+ - \bar{X}^0 X^+\phi^-\right) + \\
\tfrac{1}{2}igM\left(\bar{X}^+ X^+\phi^0 - \bar{X}^- X^-\phi^0\right).
\end{gathered}
$$

Los ingredientes de la física de partículas

- Parece que existe una única forma coherente de definir la teoría cuántica de campos relativista
  - **Pero muchos modelos posibles de física de partículas** dependiendo de los grados de libertad, simetrías y las interacciones que se asumen

- Durante los últimos 50 años experimentos han confirmado el **Modelo Estándar de la física**

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

Describe las fuerzas

Cómo las fuerzas actúan sobre la materia

Cómo las partículas obtienen mass

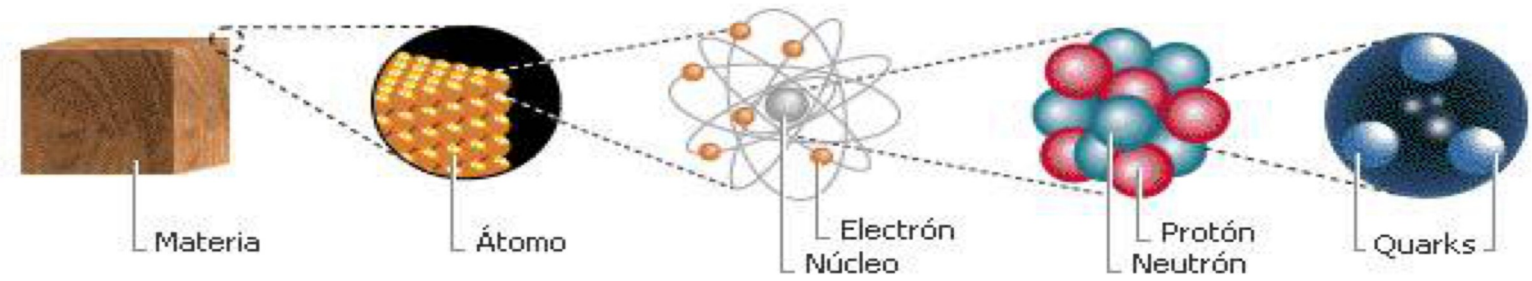
Cómo funciona el Higgs

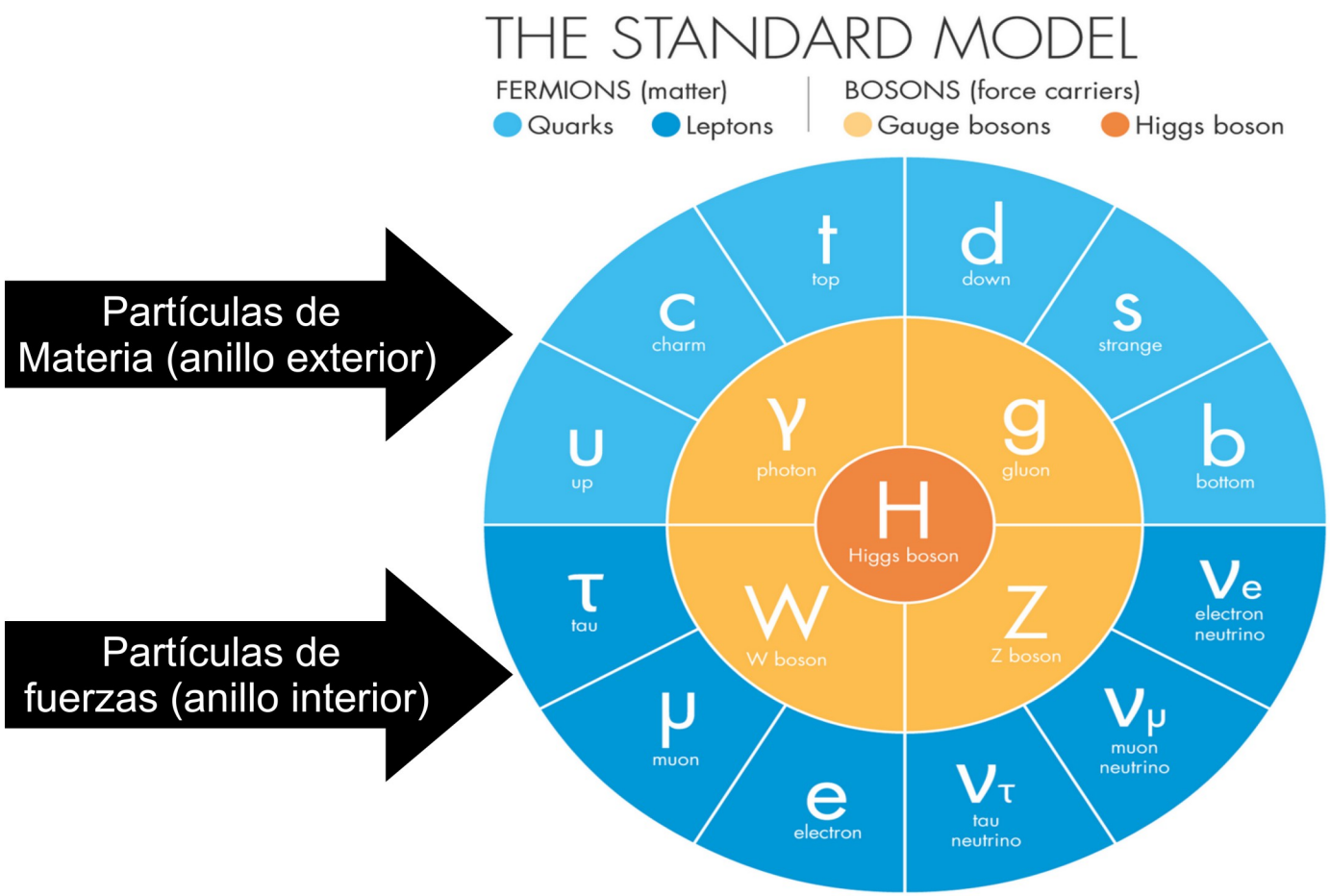
F o D: partículas de fuerza

ψ : partículas de materia

ϕ : bosón de Higgs

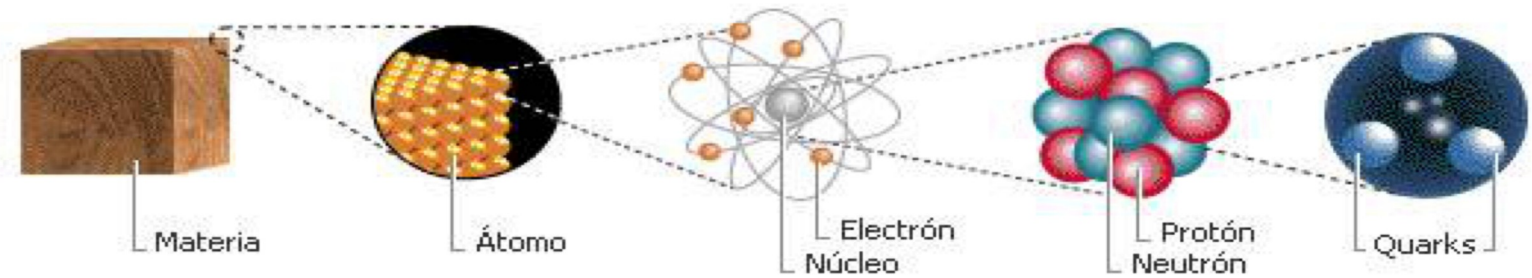
¿Qué sabemos hoy de la materia?
El modelo estándar, un modelo para unificar todo (o casi todo)

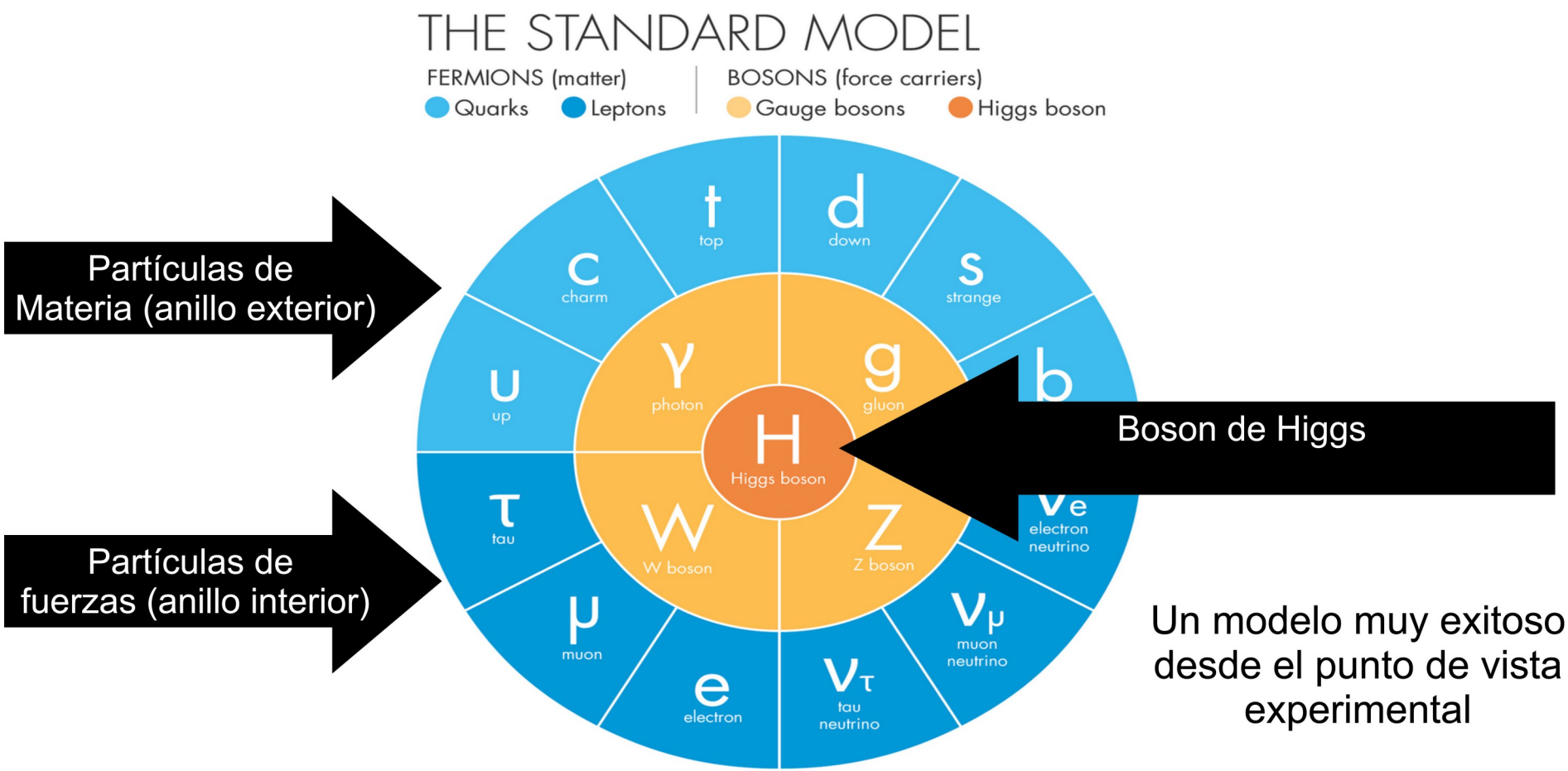




* Toda partícula fundamental tiene su correspondiente antipartícula, misma masa y carga eléctrica opuesta

¿Qué sabemos hoy de la materia?
El modelo estándar, un modelo para unificar todo (o casi todo)





Un modelo muy exitoso desde el punto de vista experimental

* Toda partícula fundamental tiene su correspondiente antipartícula, misma masa y carga eléctrica opuesta

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

- El descubrimiento de una partícula con características similares al boson de Higgs fue anunciado en el 2012
  - Parte del trabajo desde entonces se ha centrado en medir las propiedades de esta nueva partícula

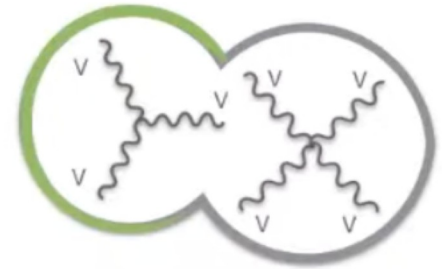
Standing ovation in the CERN auditorium at the end of the seminar announcing the discovery of the Higgs boson. (Image: Maximilien Brice, Laurent Egli/CERN)

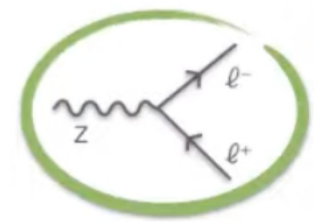
¿Qué tan bien conocemos el Modelo Estándar (ME?

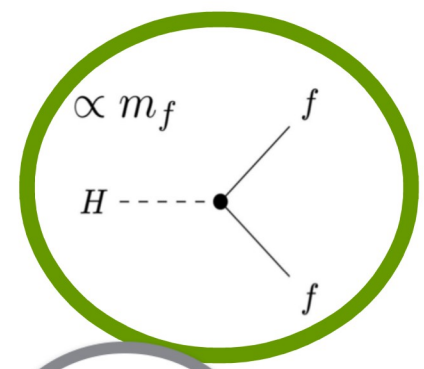
• Un modelo muy exitoso experimentalmente, que predice:

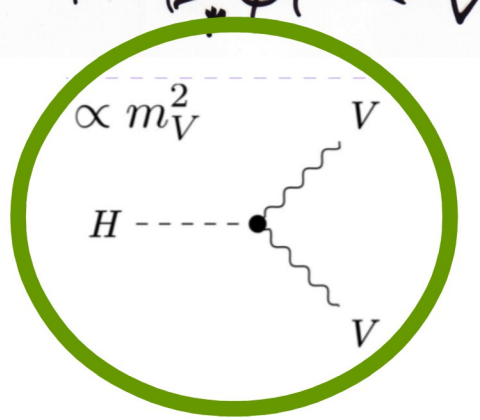
- Contenido de las partículas
- **Interacciones de las partículas**
  - γ/Z/W → lepton muy bien entendido
  - WWV (V=W,Z) observado en el LEP y el LHC
  - Acoplamiento del Higgs a fermiones y bosones vectoriales observado en el LHC
  - Acoplamientos de 4 bosones gauge → Solo accesible ahora!
  - Acoplamientos propios del Higgs → ¿HL-LHC?

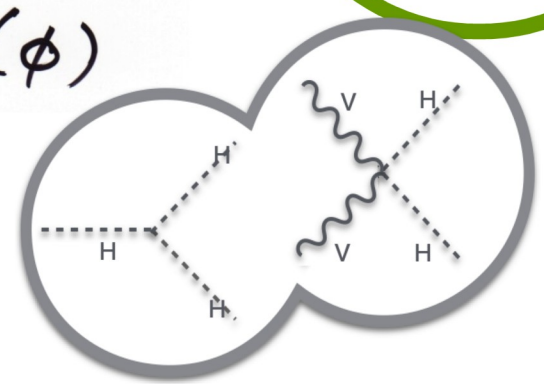
$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu}$$
$$+ i \bar{\psi} \not{D} \psi + h.c.$$
$$+ \bar{\psi}_i y_{ij} \psi_j \phi + h.c.$$
$$+ |D_\mu \phi|^2 - V(\phi)$$





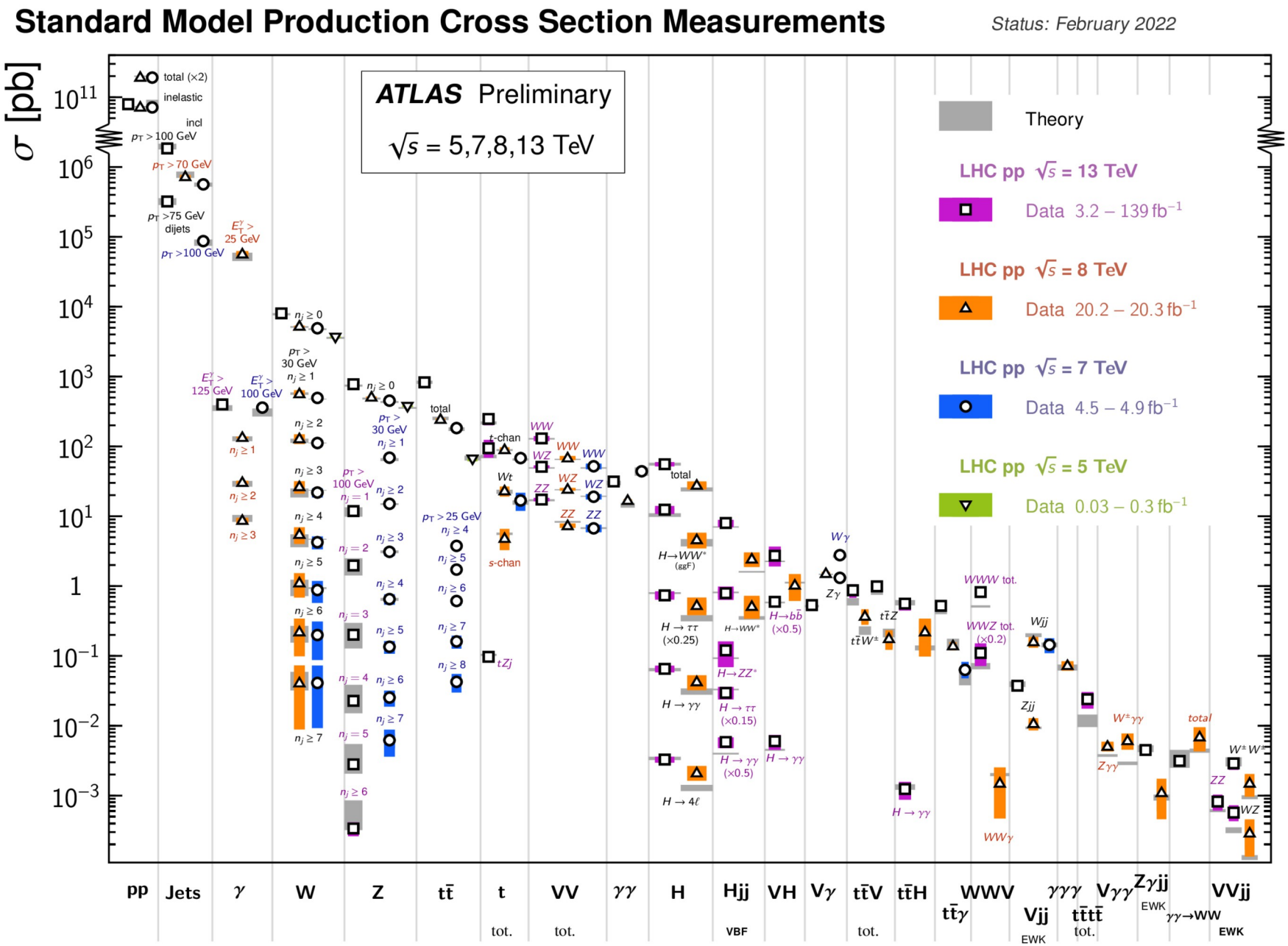




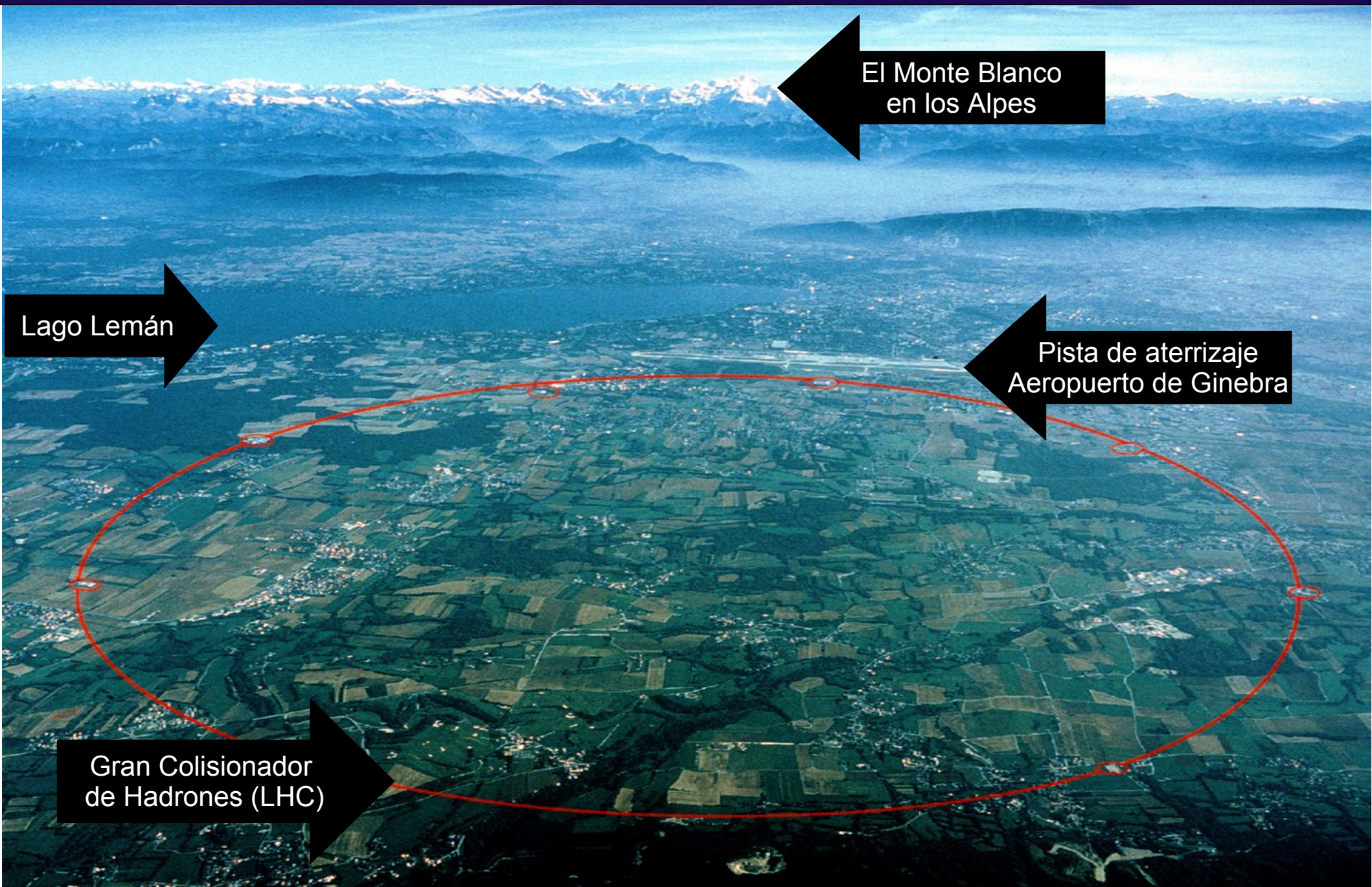


¿Realmente sabemos todo sobre el Modelo Estándar?

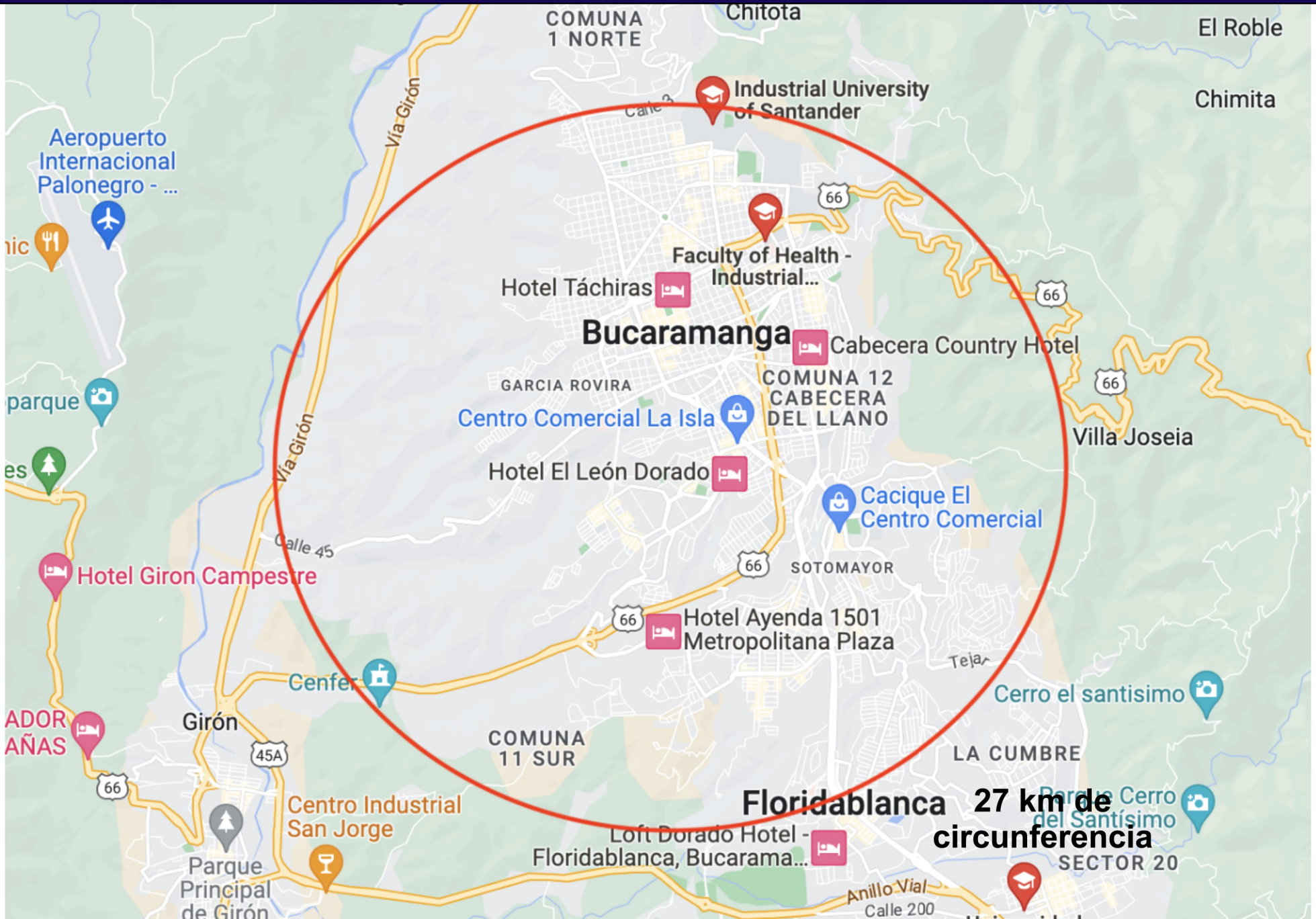
Un modelo muy exitoso



Las herramientas de los físicos de partículas

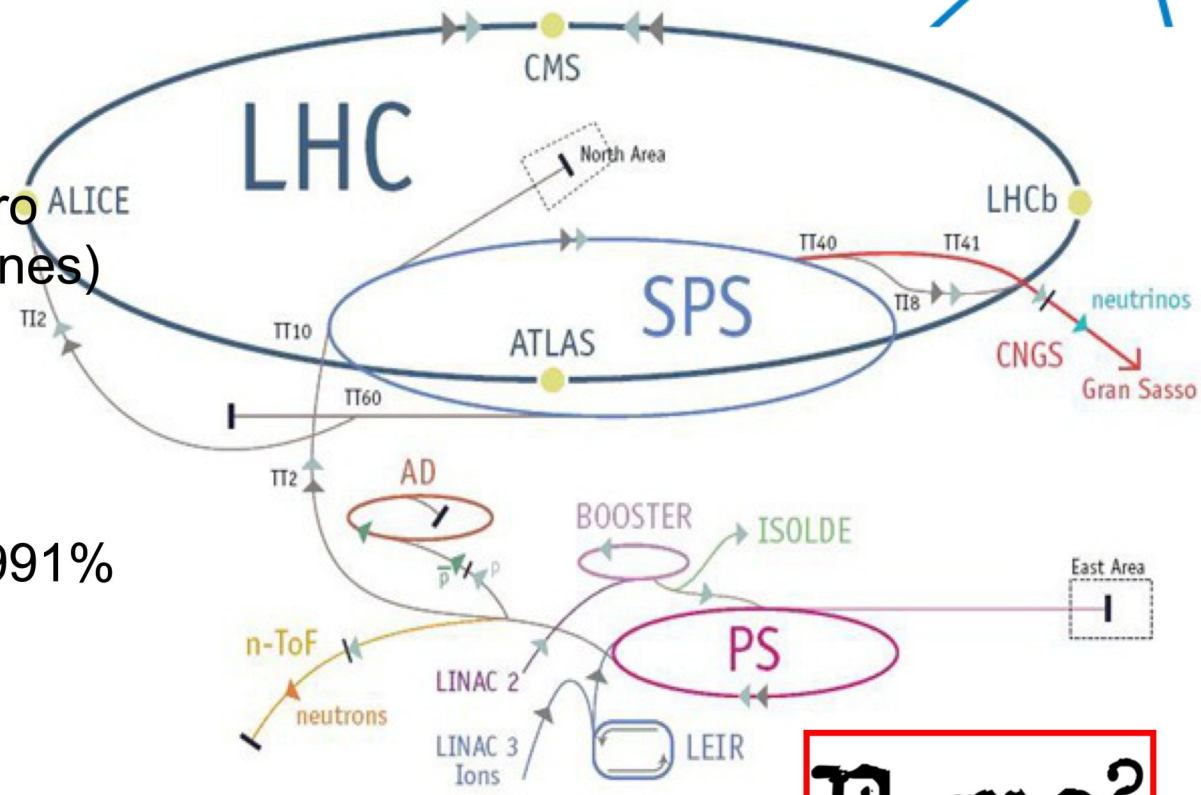


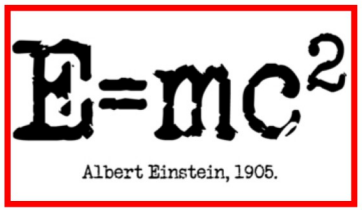
El Gran Colisionador de Hadrones (LHC)



El Gran Colisionador de Hadrones (LHC)

- Ubicado en la frontera franco-suiza
- Dentro del CERN
- 27 km de circunferencia, 100 m debajo de la superficie
- Mayor energía que cualquier otro colisionador de partículas (protones)
- 600 millones de colisiones por segundo
- Protones acelerados a 99.9999991% la velocidad de la luz
- 4 Detectores de gran precisión construidos para registrar información: ATLAS, CMS, LHCb y ALICE





La última etapa : el LHC el señor de los anillos

Millones de millones de protones de protones
Cado uno con la energía de un mosquito
99.9999991% de la velocidad de la luz
Circulan el anillo de 27km 11 000 veces/segundo
Mil millones de colisiones por segundo

Dirigidos dentro del acelerador por miles de imanes de diferentes tipos y tamaños

La última etapa : el LHC el señor de los anillos

La presión en el anillo es 10 veces menos que alrededor de la luna, **¡10^{-15} mbar!**

La última etapa : el LHC el señor de los anillos

Más frío que el espacio

LHC 1.9 grados sobre el cero absoluto = - 271 C
El espacio 2.7 grados sobre el cero absoluto = - 270 C

A fin de mantener una temperatura adecuada para la superconductividad de los imanes, las cavidades de radiofrecuencia

LHC: 4 detectores principales

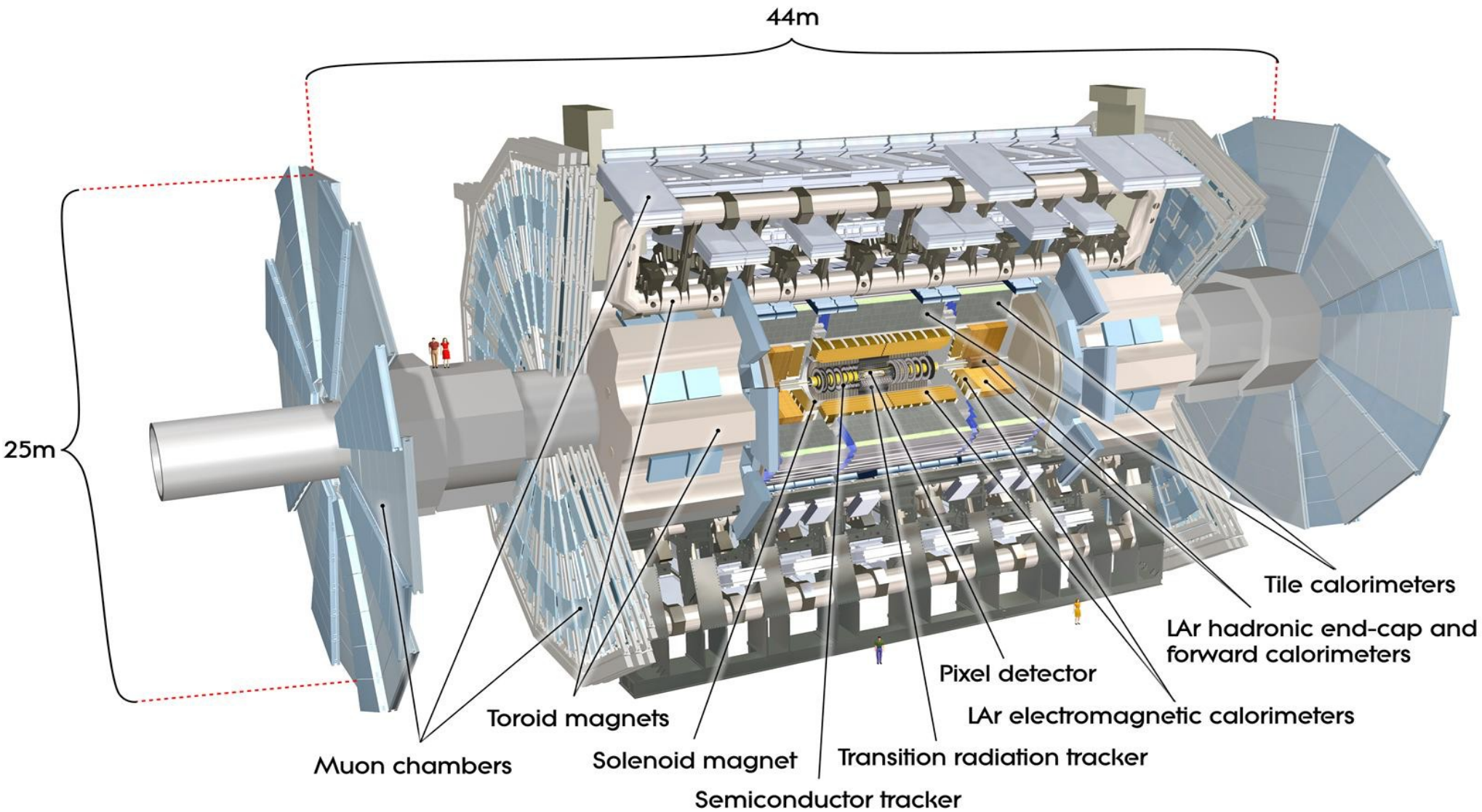
- **ATLAS:** es un detector general, optimizado para estudiar todas las colisiones duras, en particular aquellas con jets de quarks en el estado final

- **CMS:** también es un detector general, optimizado para estudiar colisiones duras, en particular aquellas con fotones en el estado final

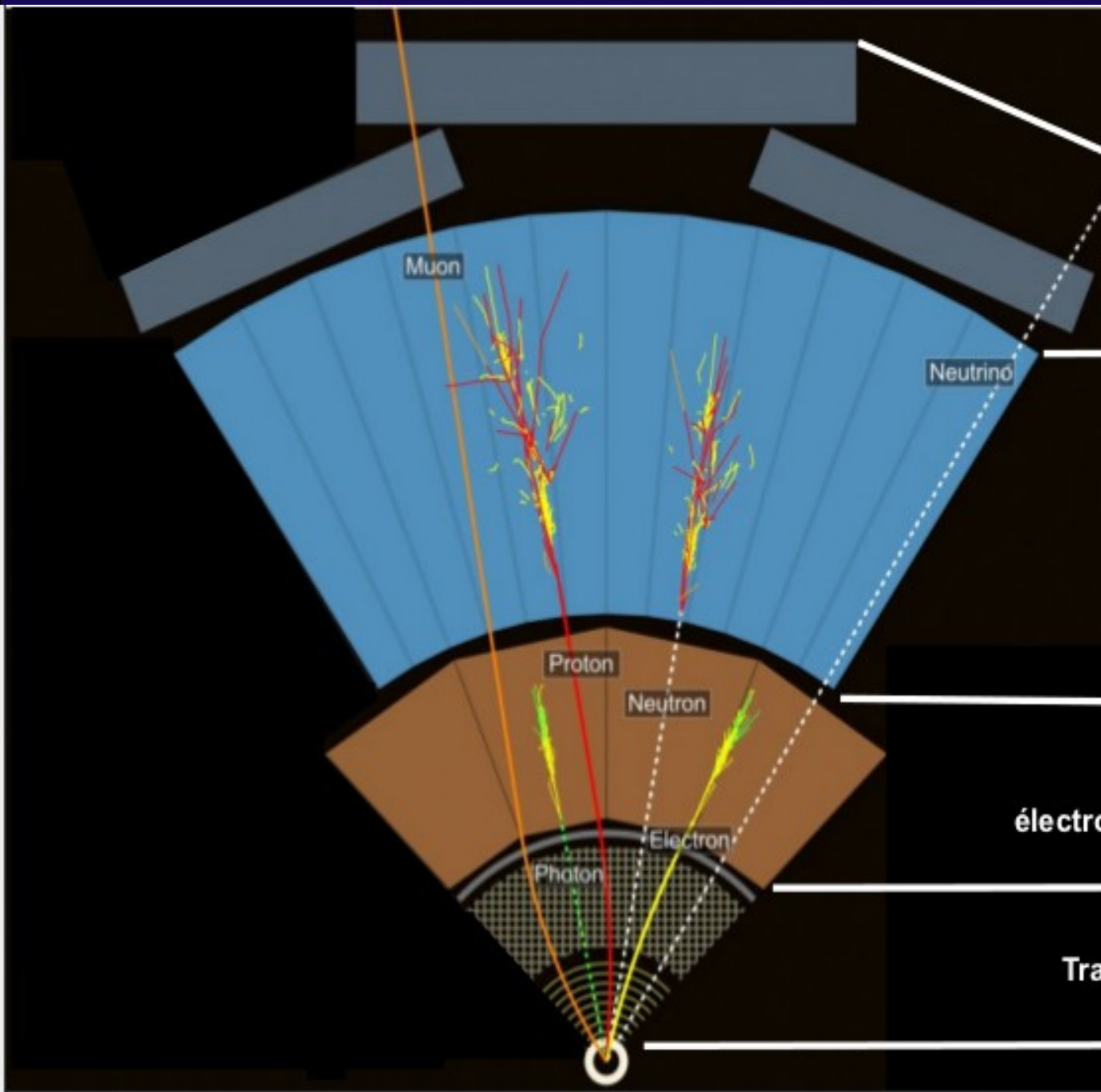
- **LHCb:** detector optimizado para realizar medidas de precisión relacionadas con sabores pesados (hadrones B)

- **ALICE:** tiene como objetivo la observación de plasma quark-gluón producidos en las colisiones de iones pesados

El experimento ATLAS

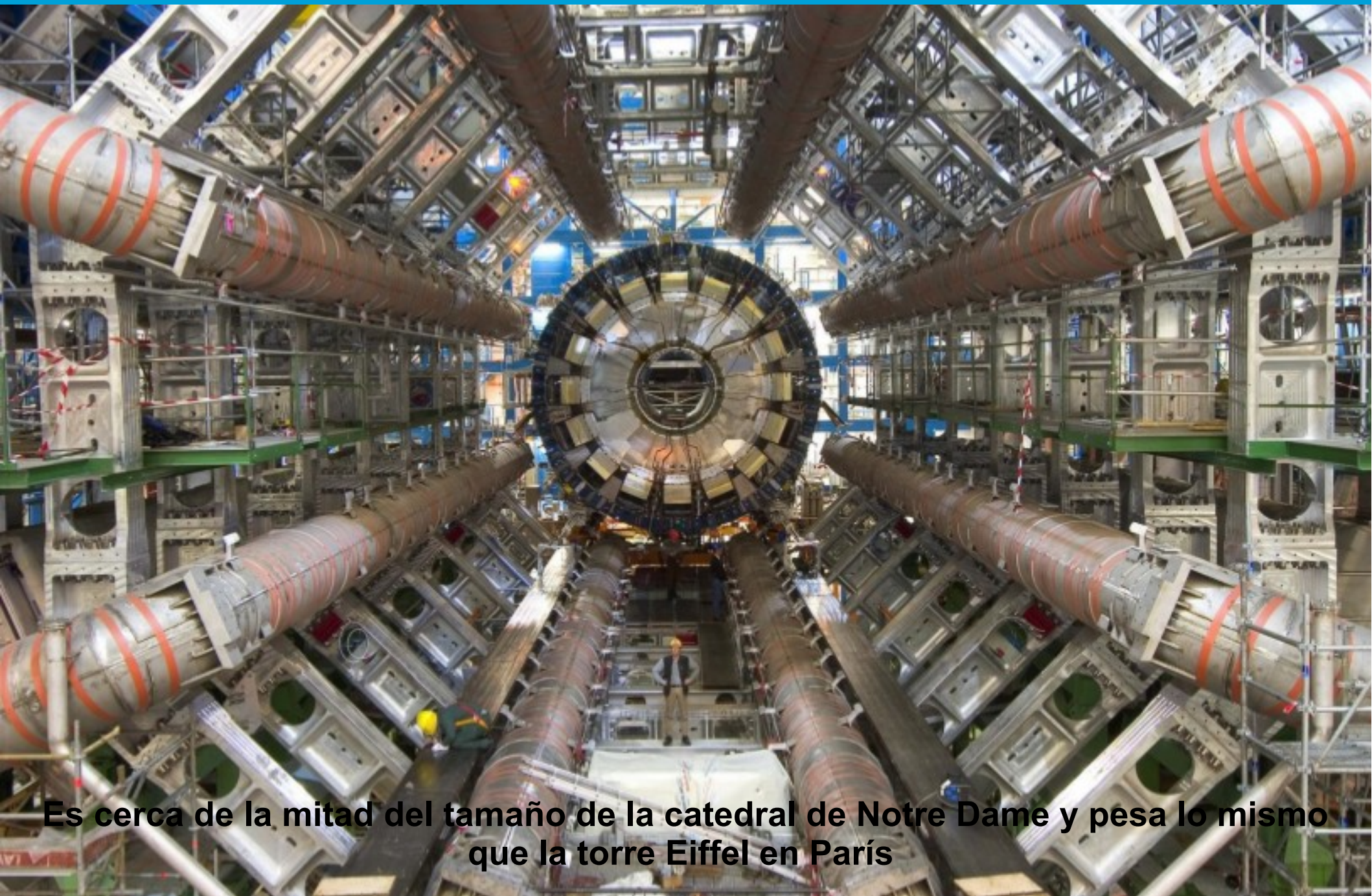


El experimento ATLAS



	Particules	Grandeurs mesurées
Spectromètre	muon	impulsion, charge
Calorimètre hadronique	hadrons (protons, neutrons, pions, kaons, etc.)	énergie
Calorimètre électromagnétique	e-, e+, photons	énergie
Trajectographe	particules chargées	impulsion, charge

ATLAS



Es cerca de la mitad del tamaño de la catedral de Notre Dame y pesa lo mismo que la torre Eiffel en París

El experimento ATLAS: muchos cables

- Suficiente para cubrir 5 veces la distancia al sol mas 6 veces la distancia a la luna

El experimento ATLAS: datos y consumo energético

- El LHC produce 600 millones de colisiones por segundo
  - Una velocidad de datos equivalente a 20 conversaciones telefónicas simultáneas mantenidas por cada persona en la tierra

- Un trigger inicial es indispensable: sistema encargado de seleccionar que eventos guardar y cuales no

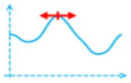
- Alrededor de 200-300 colisiones por segundo son seleccionadas

El CERN Data Centre, 470 000 processor cores and 11 000 servidores funciona 24/7 y almacena más de 30 petabytes of data de los experimentos del LHC cada por año

Our 2018 power consumption in gigawatt-hours

1 250 GWh

i.e. 1.25 billion kilowatt-hours



Our maximum active power in megawatts

200 MW

average power during the day of maximum consumption in 2018

€

Our annual electricity bill in millions of euro

48 M€

for electricity (+ 4 M€ for distribution)

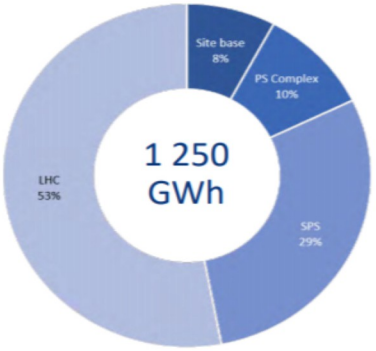
1 250 GWh...

... this is 25% more than the electricity consumption of 300 000 homes in a major city like Lyon (excluding businesses and industry).

Source: Enedis 2017

... and slightly less than half the electricity consumption of the whole Canton of Geneva (all sectors except for CERN which gets its power from France).

Source: SIG 2017



Breakdown of electrical consumption by machine

PS = *Proton Synchrotron*
SPS = *Super Proton Synchrotron*
LHC = *Large Hadron Collider*
Site base = office buildings and central services (computing centre, pumping station, etc.)

El experimento ATLAS:
desde el punto de vista humano

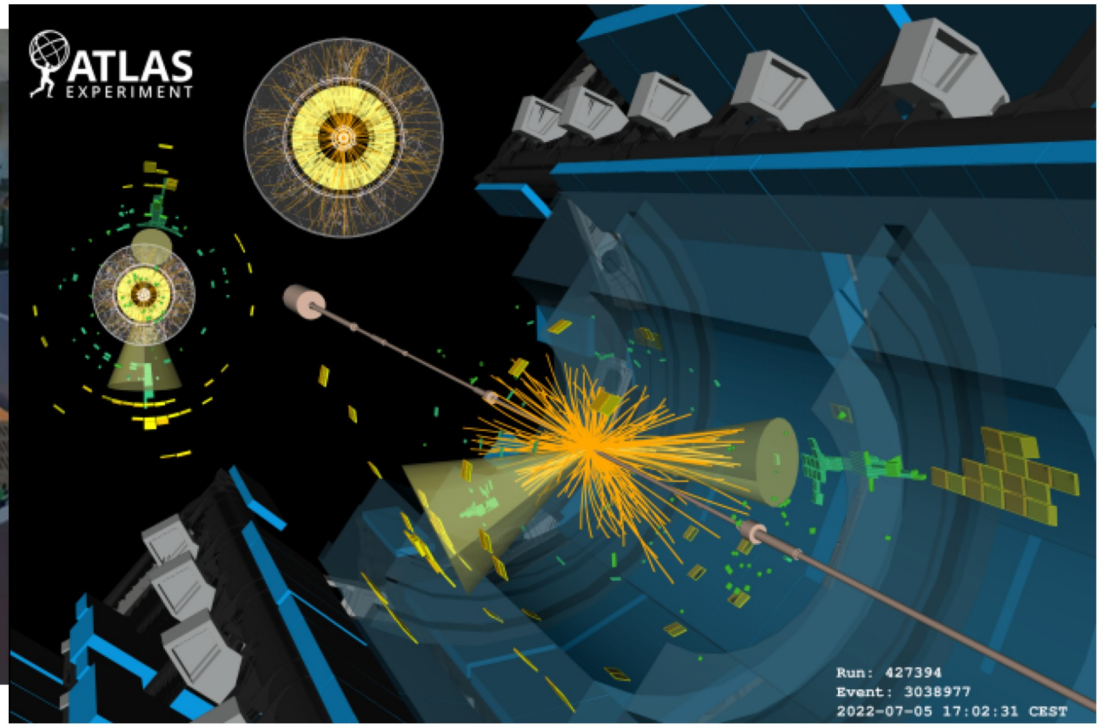
Un caso específico: la colaboración ATLAS

Alrededor de 5500 miembros, 3000 autores (~1/3 estudiantes), 245 instituciones, 42 países, 1 objetivo en común

El experimento ATLAS:
desde el punto de vista humano

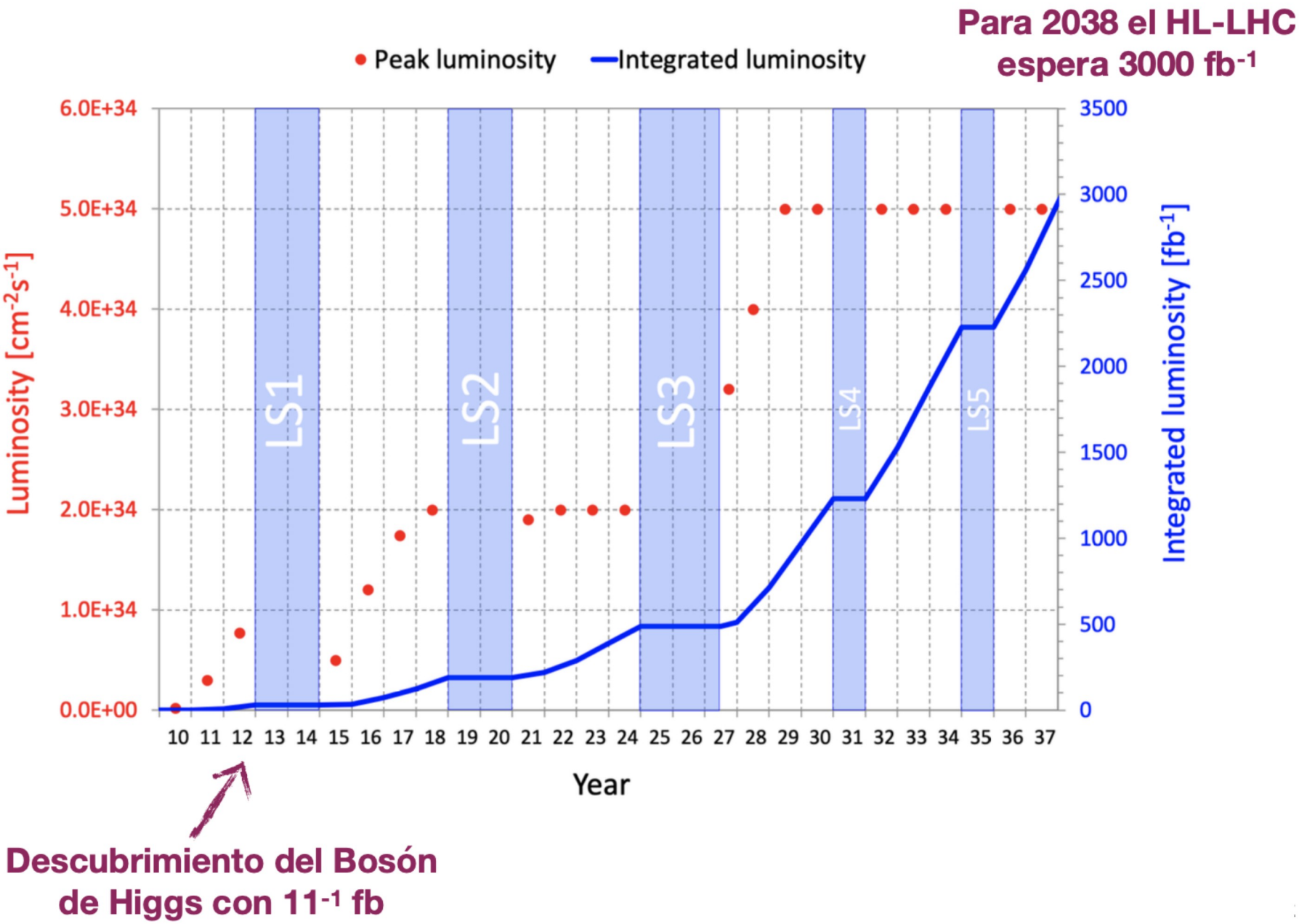
El experimento ATLAS:
desde el punto de vista humano

Un día más normal en la sala de control del experimento ATLAS:
Análisis de datos, desarrollo de detectores, operaciones del detector
Y muchos muchos meetings...



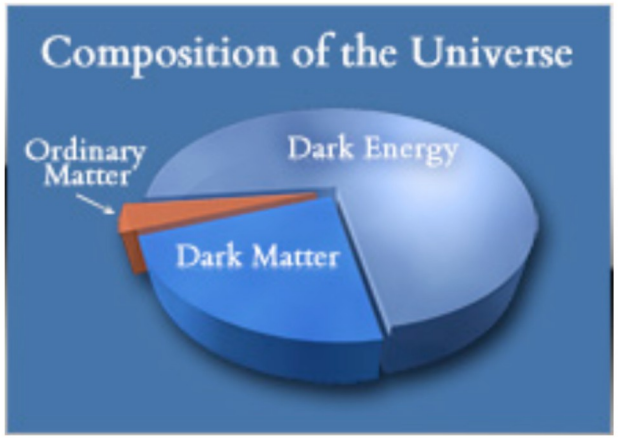
Después de 2 anos y medio de pausa para actualizaciones del acelerador y de los detectores, la toma de datos reinició en el 2022

El experimento ATLAS: datos, datos y más datos



¿Pero qué hay de malo con el Modelo Estándar?

- Hoy en día:
  - Numerosas predicciones del Modelo Estándar han sido verificadas experimentalmente con gran precisión



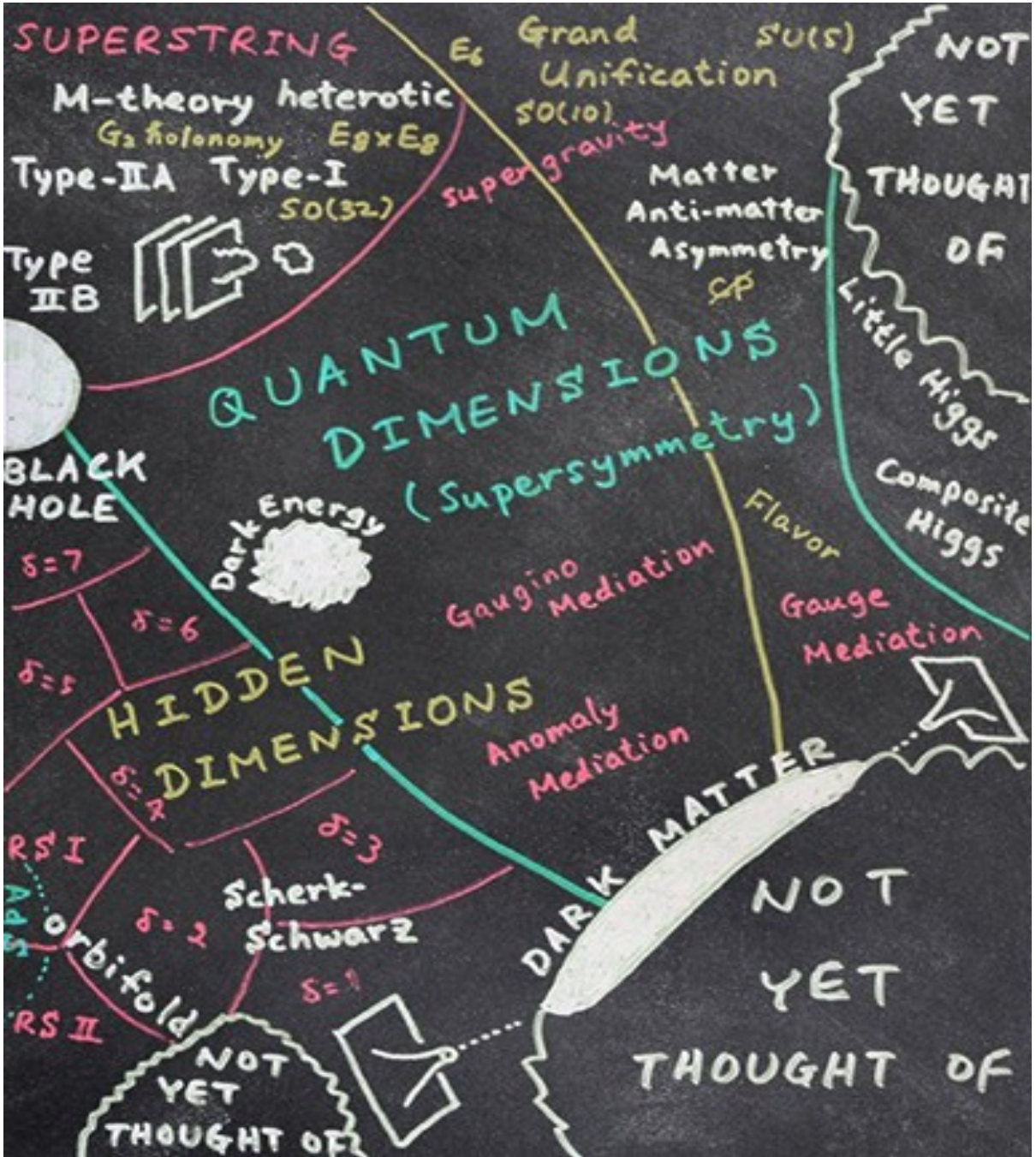
- Algunas de las preguntas sin respuesta:
  - ¿Y la gravitación?
  - ¿Cómo unificamos todas las interacciones?
  - ¿Cuál es la naturaleza de la materia y la energía oscura?
  - El MS no incluye suficiente violación CP como para explicar la asimetría materia-antimateria observada en la naturaleza
  - Diferencia entre escala de Planck y Electrodébil: ~10^{16}(problema de jerarquía)

¿Es el Modelo Estándar una teoría efectiva?

- **Aproximación de una teoría más general**
- **Debemos aumentar la precisión de los experimentos hasta alcanzar el límite de esta aproximación**

¿Nos permitirá el LHC y sus escalas de energía empezar probar los límites de la teoría?

Alternativas: teorías más allá del Modelo Estándar: Los físicos somos exploradores!



Los detectores ATLAS y CMS son catedrales modernas, pero la teoría de partículas también ha estado construyendo catedrales: nuevas ideas y enfoques para la materia oscura y la naturalidad, y cálculos más precisos de los procesos del SM

New particles predicted by specific models of physics beyond the Standard Model (Image: Daniel Dominguez, with permission from Hitoshi Murayama)

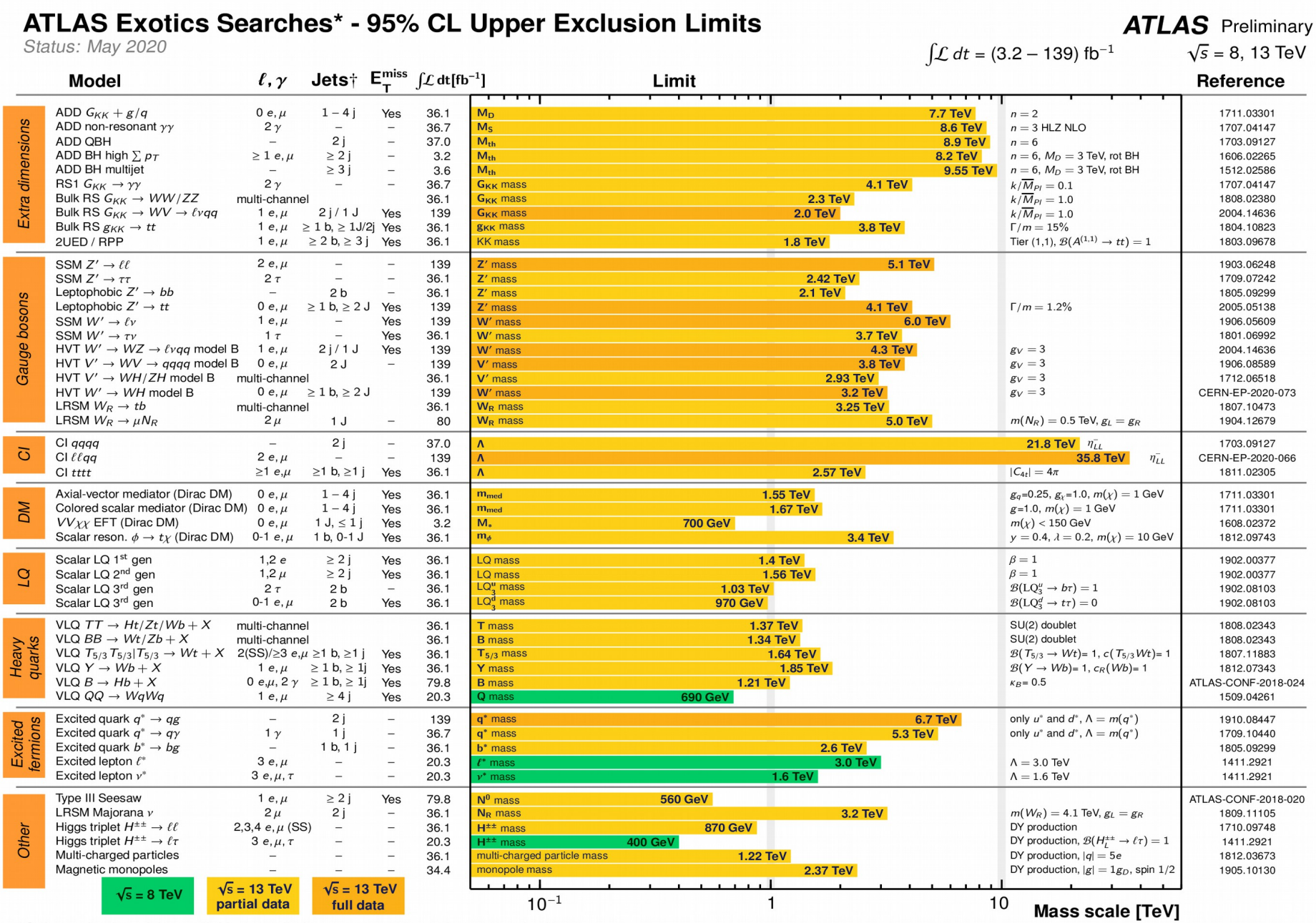
¿Hacia donde vamos?
Los físicos somos exploradores!

Conocidos conocidos

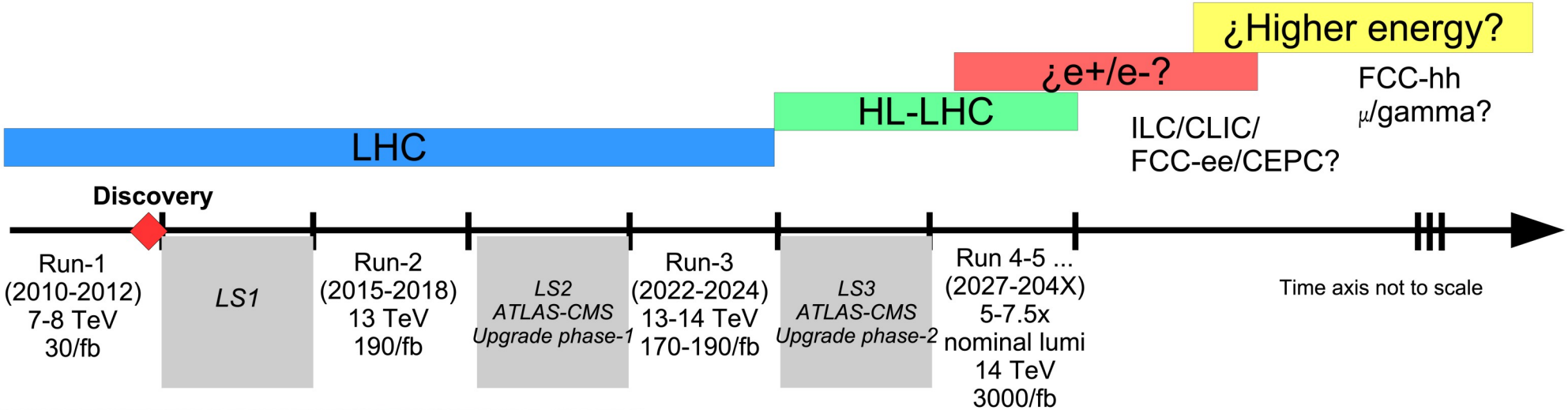
Conocidos desconocidos

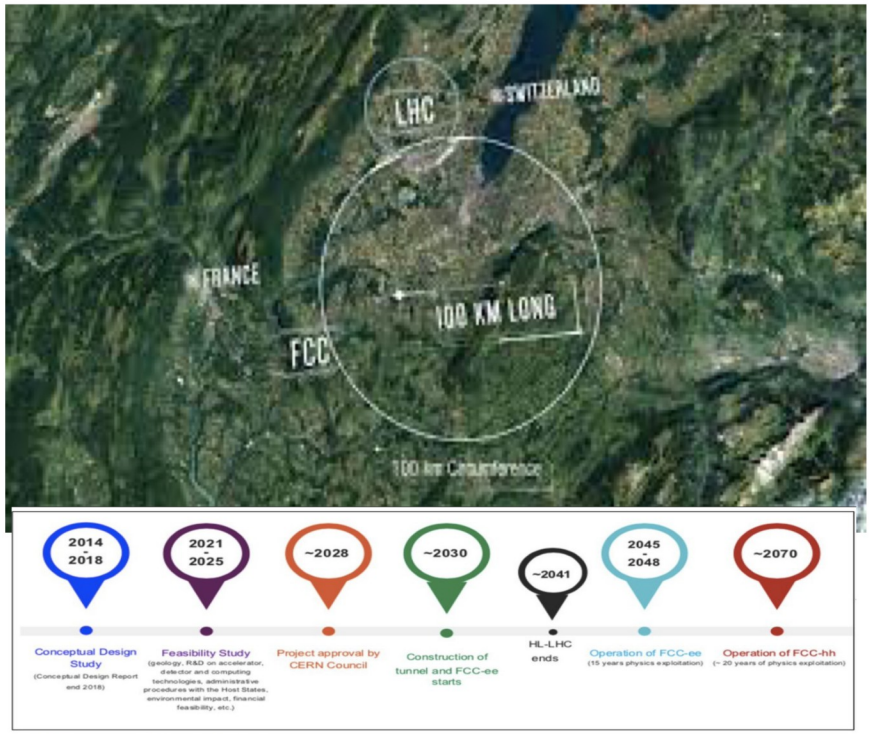
Desconocidos desconocidos

¿Qué hemos visto hasta ahora? ¿Nueva física?



Nueva física puede aparecer ahora o luego de varios años de exploración





1st stage collider, FCC-ee: electron-positron collisions 90-360 GeV
Construction: 2033-2045 → Physics operation: 2048-2063

2nd stage collider, FCC-hh: proton-proton collisions at ≥ 100 TeV
Construction: 2058-2070 → Physics operation: ~ 2070-2095

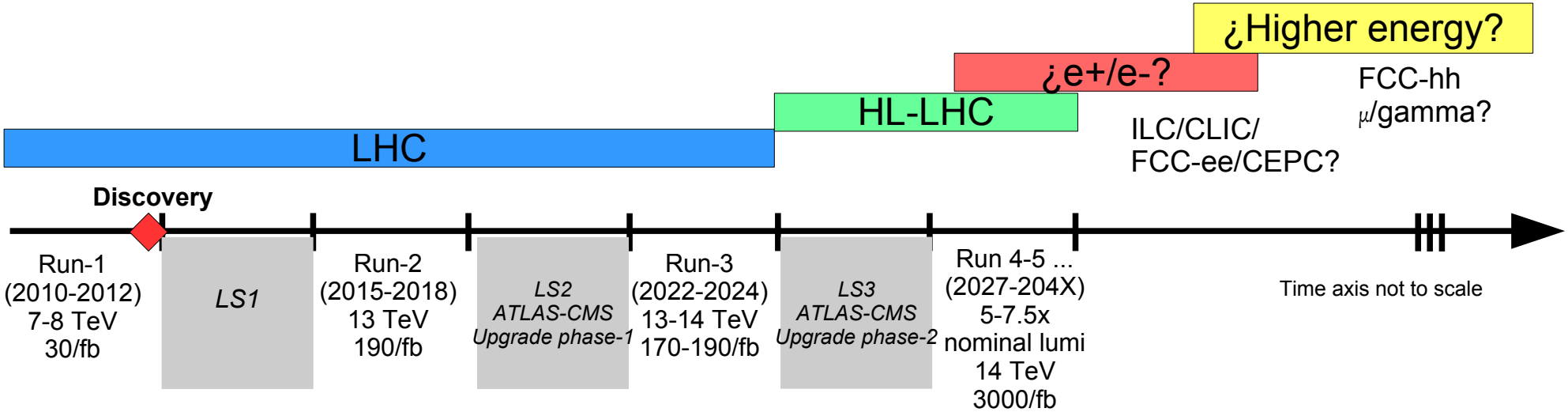
Nuevos detectores:

- Sensores CMOS para seguimiento y calorimetría
- I+D en memorias asociativas, FPGA y GPU
- Imanes superconductores más potentes, etc
- Y mucho aprendizaje automático

Muchas preguntas:

- ¿Cuáles son los mejores modelos para seguir llevando al mercado lo que se desarrolla en HEP? → fortalecer la transferencia tecnológica
- ¿Cómo podemos reducir las barreras actuales para hacer realidad las oportunidades industriales?

Nueva física puede aparecer ahora o luego de varios años de exploración



No decidimos dónde aparecerán nuevas partículas, pero decidimos seguir explorando:

- Mejorando nuestras técnicas, aprovechando nuevas tecnologías, colaborando con industria
- ¿Pero y qué pasa si no encontramos respuestas?

Necesitamos nuevos ojos...

¿Estamos preguntando las preguntas correctas?
¿Hacia donde nos lleva el futuro?

Colaboraciones + diversidad + apoyo a jóvenes investigadores/as

Para finalizar...

- Una comunidad HEP latinoamericana creciente afuera y adentro, participando activamente en experimentos de altas energías, y creando oportunidades en la región

- Varias instituciones latinoamericanas que ya participan en experimentos en el CERN en Colombia, Perú, Ecuador, Argentina, Brasil, Chile, México y otras iniciativas como: LA-CoNGA physics, Física Sin Fronteras, entre otras

- Varias oportunidades en diversos institutos (CERN, DESY, en Latam) como escuelas de verano y otros programas de formación

Gracias

Backup

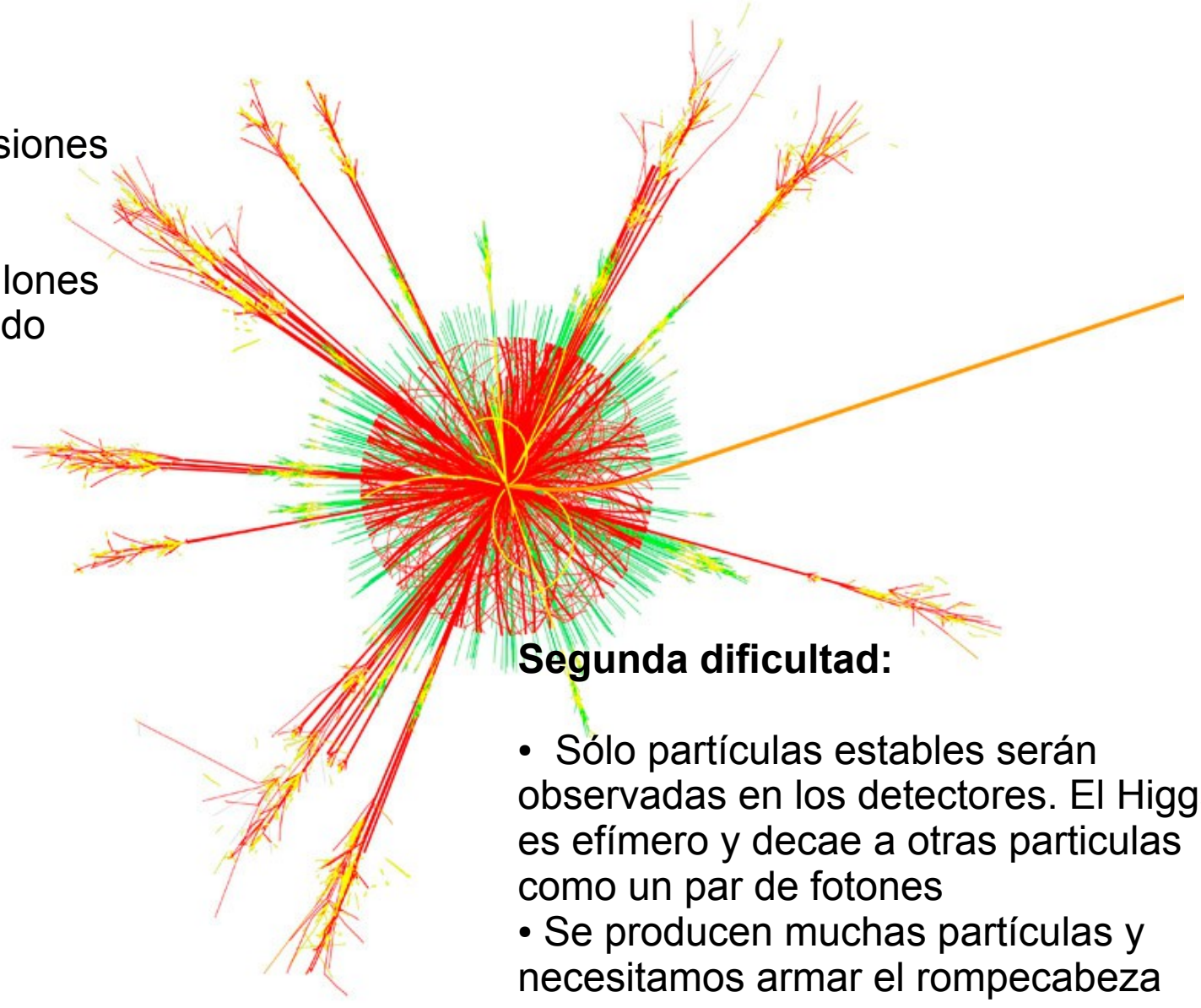
El Gran Colisionador de Hadrones (LHC)

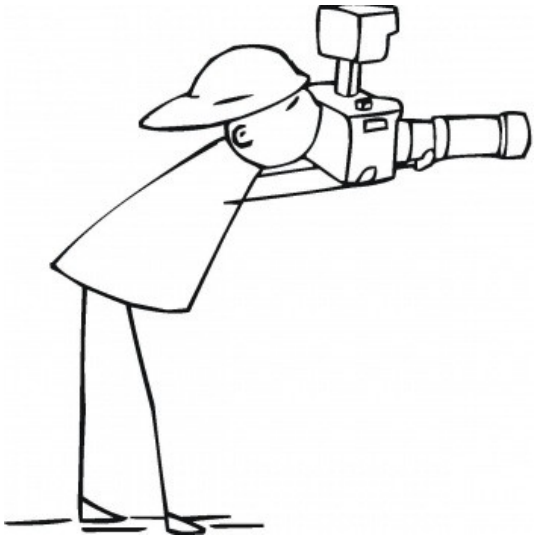
¿Cómo se descubre una partícula?
Tomemos el ejemplo del Higgs (video)

Necesitamos producir el Higgs y luego necesitamos poder detectarlo/identificarlo!

Primera dificultad:

- Necesitariamos 10^{14} colisiones para observar un Higgs
- El LHC produce 600 millones de colisiones por segundo

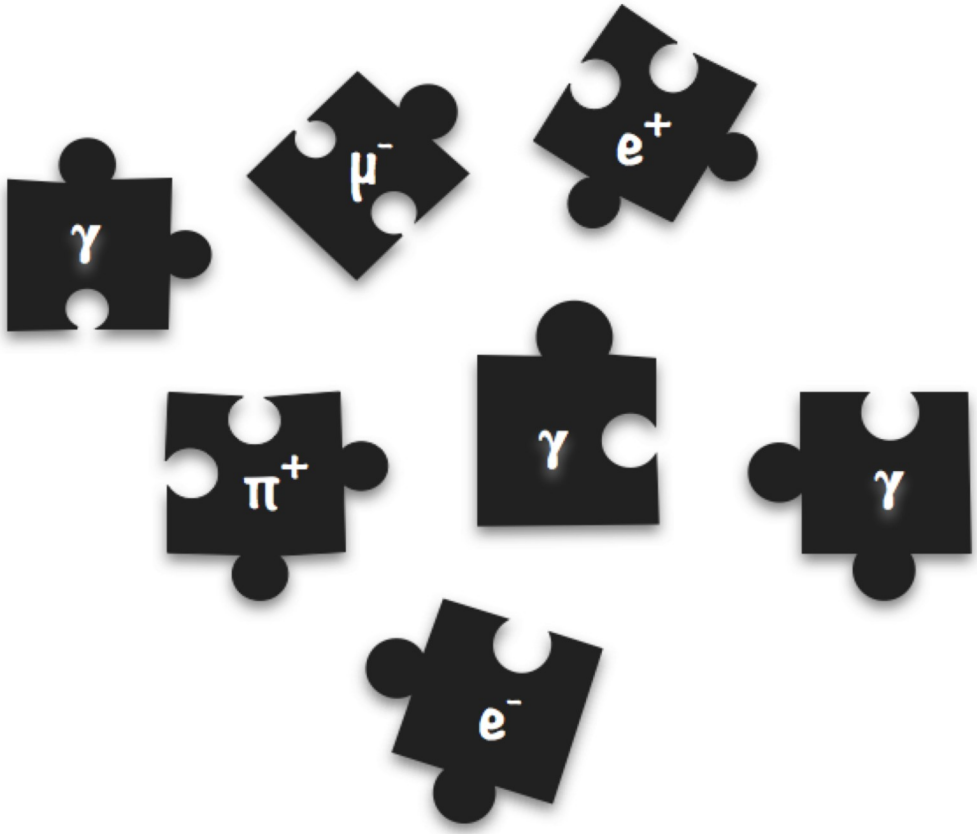




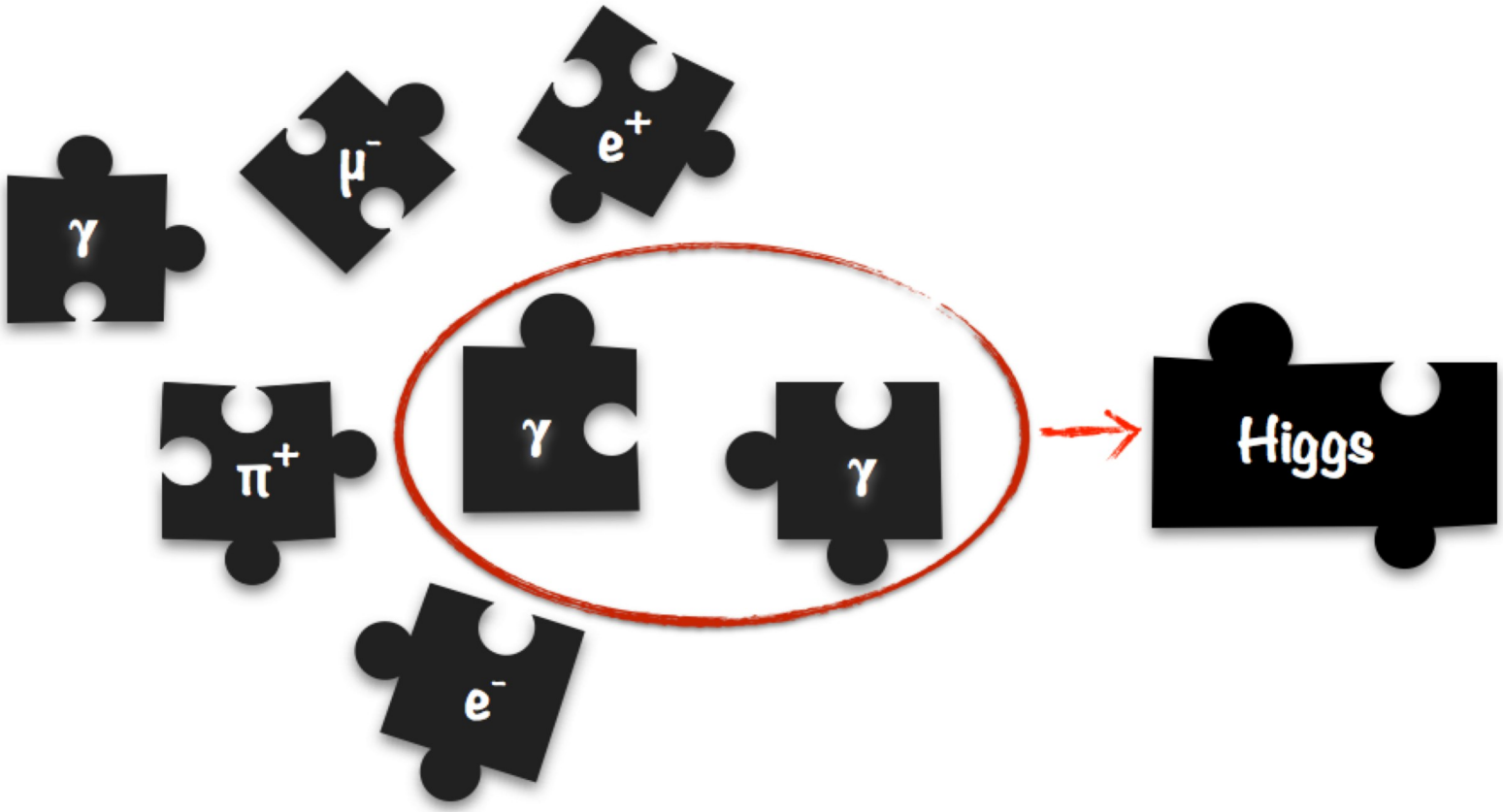
Segunda dificultad:

- Sólo partículas estables serán observadas en los detectores. El Higgs es efímero y decae a otras particulas como un par de fotones
- Se producen muchas partículas y necesitamos armar el rompecabeza

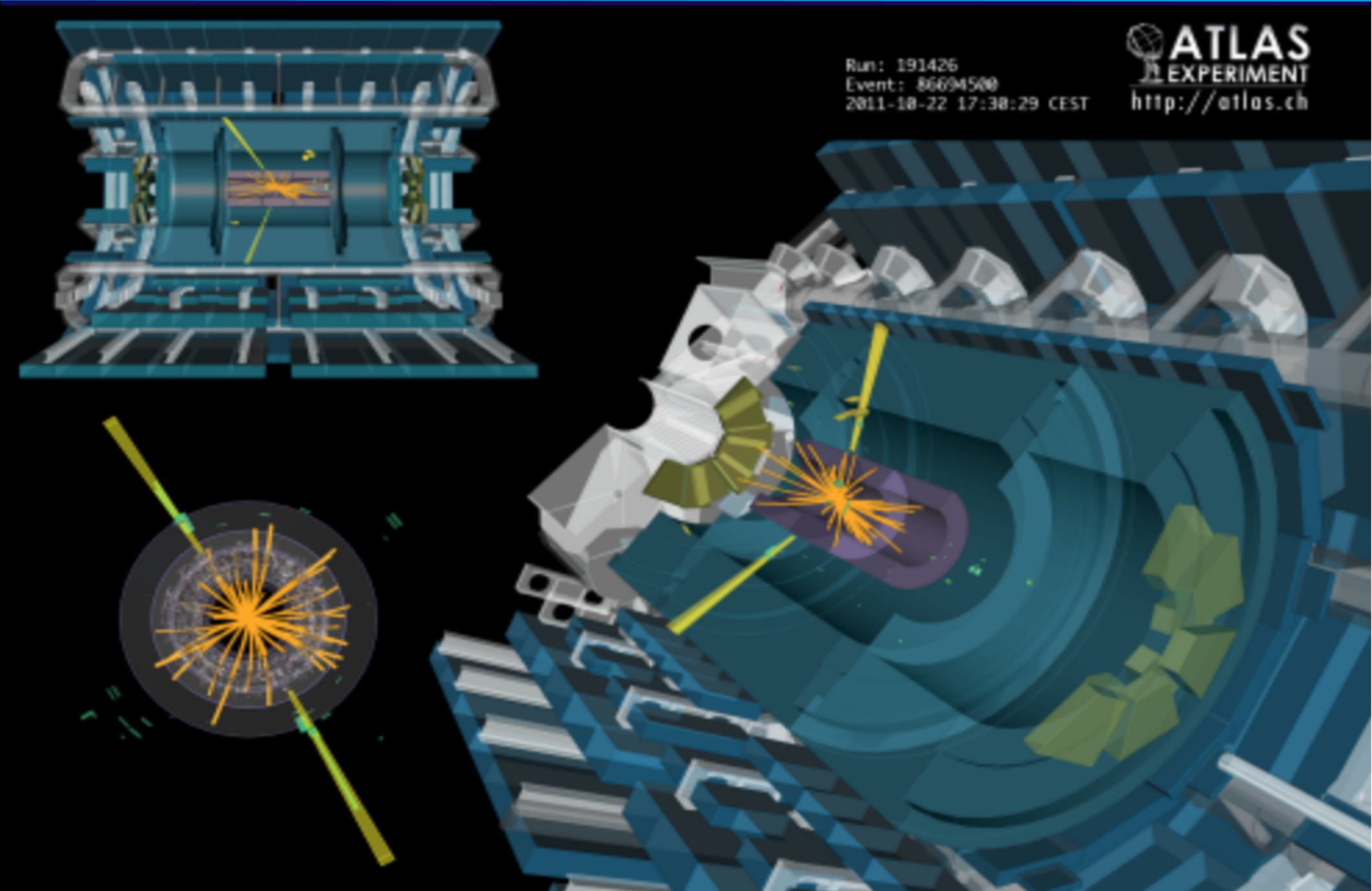
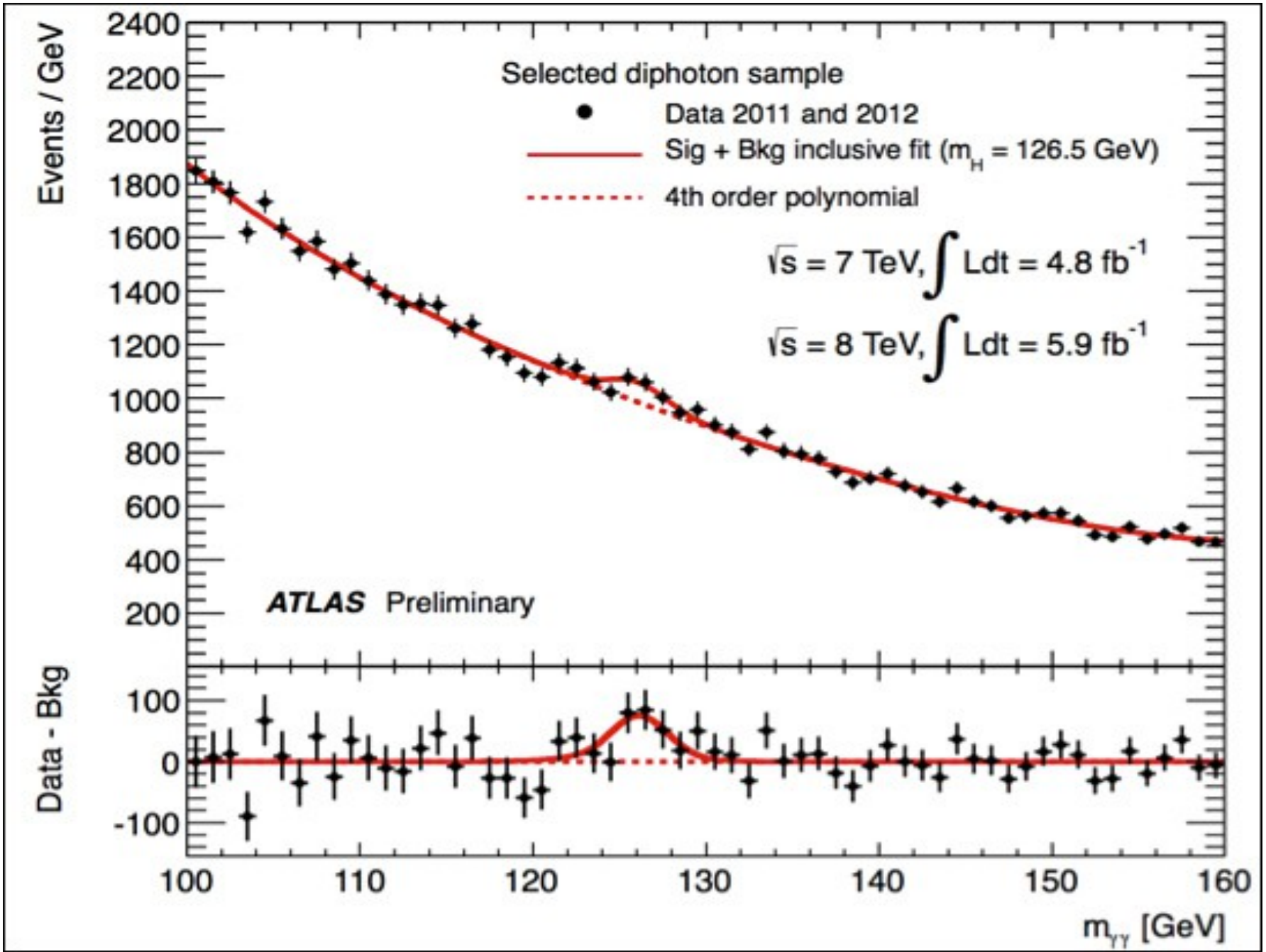
¿Cómo se descubre una partícula?
Tomemos el ejemplo del Higgs



¿Cómo se descubre una partícula?
Tomemos el ejemplo del Higgs



¿Cómo se descubre una partícula?
Tomemos el ejemplo del Higgs



Cómo se descubre una partícula?
Tomemos el ejemplo del Higgs