

EL GRAN COLISIONADOR DE HADRONES Y LA FÍSICA DE PARTÍCULAS



ANA CUETO



Heráclito y Demócrito. El filósofo ríe y el filósofo que llora. Wikipedia.org. Fresco transferido a lienzo por Bramante. Año 1477. Pinacoteca de Brera, Milán.

EL MODELO ESTÁNDAR

Las primeras ideas sobre qué es la materia o de qué estamos compuestos las dieron los antiguos filósofos griegos. Aquellos pensadores jónicos de la escuela de Mileto tenían una visión naturalista en la que consideraban que lo que subyacía tras la apariencia del mundo perceptual era un principio material. Para Tales era el agua, para Anaxímenes el aire y para Heráclito el fuego.

Por otra parte, Leucipo y su discípulo Demócrito, también de Mileto, desarrollaron el atomismo filosófico introduciendo la idea de átomo como la parte indivisible que compone la materia [1].

Sin embargo, ninguna de ellas se desarrolló en los siglos siguientes quedando tan solo como especulaciones metafísicas. Por entonces no contaban con el marco teórico necesario para madurar estas ideas ni un método científico que poder seguir dada la imposibilidad de realizar experimentos. El entendimiento de la materia estuvo ligado a la química durante los primeros periodos de la Edad Contemporánea.

PERIODIC TABLE OF THE ELEMENTS

http://www.periodni.com

Copyright © 2012 Eri Generali

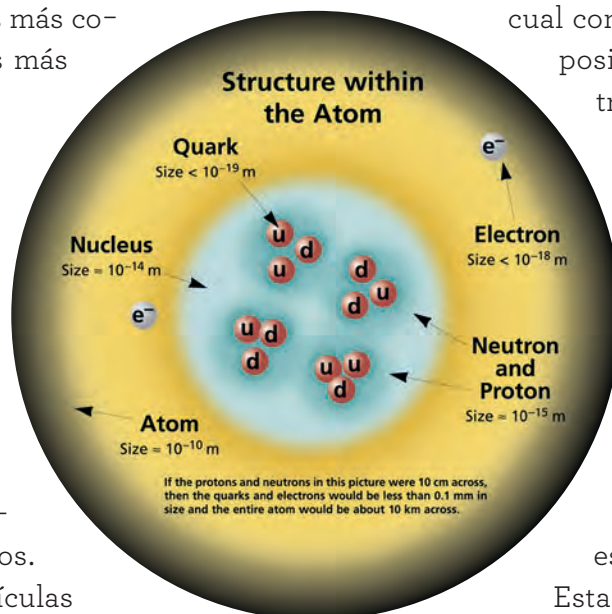
(1) Pure Appl. Chem., 81, No. 11, 2131-2156 (2009)
Relative atomic masses are expressed with five significant figures. For elements that have no stable nuclides, the value enclosed in brackets indicates the mass number of the longest-lived isotope of the element. However three such elements (Tl, Pa and U) do have a characteristic terrestrial isotopic composition, and for these an atomic weight is tabulated.

Tabla periódica de los elementos

En 1869, Mendeleiev publicó su primera versión tabla periódica de los elementos [2]. En ella se recogían tanto los tipos de átomos conocidos hasta el momento ordenados en función de sus propiedades. Con ellos se podía explicar la composición tanto de los objetos más comunes como de las estrellas más lejanas.

Pero aún se podía ir más allá y mirar niveles de escala más pequeños que los átomos. La física de partículas elementales comenzó con el descubrimiento del electrón por Joseph John Thomson en 1897 estudiando las propiedades de los rayos catódicos. Thomson llamó a estas partículas “corpúsculos” y conjeturó correctamente que formaban parte de los

átomos [3]. Se sabía que los átomos son neutros, es decir, no tienen carga eléctrica y de alguna forma se tendría que compensar la carga negativa de los electrones con carga positiva. Thomson desarrolló entonces el primer modelo atómico el cual consistía en una esfera compacta positivamente cargada con electrones a su alrededor.



Estructura interna del protón

Las observaciones de posteriores experimentos llevaron a la comunidad física a postular que el átomo estaba compuesto de neutrones y protones en su núcleo, con electrones orbitando alrededor de éste (la descripción real de este movimiento es más sutil). Estas tres piezas indivisibles de la materia explican la composición y propiedades de los cientos de ele-

Standard Model of FUNDAMENTAL PARTICLES AND INTERACTIONS

The Standard Model summarizes the current knowledge in Particle Physics. It is the quantum theory that includes the theory of strong interactions (quantum chromodynamics or QCD) and the unified theory of weak and electromagnetic interactions (electroweak). Gravity is included on this chart because it is one of the fundamental interactions even though not part of the "Standard Model."

FERMIONS

matter constituents
spin = 1/2, 3/2, 5/2, ...

| Leptons spin = 1/2 | | | Quarks spin = 1/2 | | |
|---------------------------|-------------------------|-----------------|-------------------|---------------------------------|-----------------|
| Flavor | Mass GeV/c ² | Electric charge | Flavor | Approx. Mass GeV/c ² | Electric charge |
| ν_e electron neutrino | <1×10 ⁻⁸ | 0 | u up | 0.003 | 2/3 |
| e electron | 0.000511 | -1 | d down | 0.006 | -1/3 |
| ν_μ muon neutrino | <0.0002 | 0 | c charm | 1.3 | 2/3 |
| μ muon | 0.106 | -1 | s strange | 0.1 | -1/3 |
| ν_τ tau neutrino | <0.02 | 0 | t top | 175 | 2/3 |
| τ tau | 1.7771 | -1 | b bottom | 4.3 | -1/3 |

Spin is the intrinsic angular momentum of particles. Spin is given in units of \hbar , which is the quantum unit of angular momentum, where $\hbar = h/2\pi = 6.58 \times 10^{-34}$ GeV s = 1.05×10^{-34} J s.

Electric charges are given in units of the proton's charge. In SI units the electric charge of the proton is 1.60×10^{-19} coulombs.

The energy unit of particle physics is the electronvolt (eV), the energy gained by one electron in crossing a potential difference of one volt. Masses are given in GeV/c² (remember $E = mc^2$), where $1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV} = 1.60 \times 10^{-10}$ joule. The mass of the proton is $0.938 \text{ GeV}/c^2 = 1.67 \times 10^{-27} \text{ kg}$.

BOSONS

force carriers
spin = 0, 1, 2, ...

| Unified Electroweak spin = 1 | | | Strong (color) spin = 1 | | |
|------------------------------|-------------------------|-----------------|-------------------------|-------------------------|-----------------|
| Name | Mass GeV/c ² | Electric charge | Name | Mass GeV/c ² | Electric charge |
| γ photon | 0 | 0 | g gluon | 0 | 0 |
| W ⁻ | 80.4 | -1 | | | |
| W ⁺ | 80.4 | +1 | | | |
| Z ⁰ | 91.187 | 0 | | | |

Color Charge
Each quark carries one of three types of "strong charge," also called "color charge." These charges have nothing to do with the colors of visible light. There are eight possible types of color charge for gluons. Just as electrically-charged particles interact by exchanging photons, in strong interactions color-charged particles interact by exchanging gluons. Leptons, photons, and W and Z bosons have no strong interactions and hence no color charge.

Quarks Confined in Mesons and Baryons

One cannot isolate quarks and gluons; they are confined in color-neutral particles called hadrons. This confinement (binding) results from multiple exchanges of gluons among the color-charged constituents. As color-charged particles (quarks and gluons) move apart, the energy in the color-force field between them increases. This energy eventually is converted into additional quark-antiquark pairs (see figure below). The quarks and antiquarks then combine into hadrons; these are the particles seen to emerge. Two types of hadrons have been observed in nature: mesons qq and baryons qqq.

Residual Strong Interaction

The strong binding of color-neutral protons and neutrons to form nuclei is due to residual strong interactions between their color-charged constituents. It is similar to the residual electrical interaction that binds electrically neutral atoms to form molecules. It can also be viewed as the exchange of mesons between the hadrons.

PROPERTIES OF THE INTERACTIONS

| Baryons qqq and Antibaryons $\bar{q}\bar{q}\bar{q}$ | | | | | |
|--|-------------|-------------------------|-----------------|-------------------------|------|
| Baryons are fermionic hadrons. There are about 123 types of baryons. | | | | | |
| Symbol | Name | Quark content | Electric charge | Mass GeV/c ² | Spin |
| p | proton | uud | 1 | 0.938 | 1/2 |
| \bar{p} | anti-proton | $\bar{u}\bar{u}\bar{d}$ | -1 | 0.938 | 1/2 |
| n | neutron | udd | 0 | 0.940 | 1/2 |
| Λ | lambda | uds | 0 | 1.116 | 1/2 |
| Ω^- | omega | sss | -1 | 1.672 | 3/2 |

Matter and Antimatter

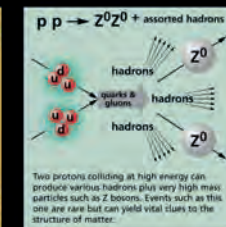
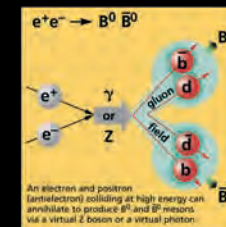
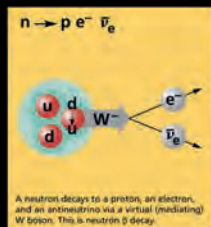
For every particle type there is a corresponding antiparticle type, denoted by a bar over the particle symbol (unless + or - charge is shown). Particle and antiparticle have identical mass and spin but opposite charges. Some electrically neutral bosons (e.g., Z⁰, γ , and $\eta_c = c\bar{c}$, but not K⁰ = d \bar{s}) are their own antiparticles.

Figures

These diagrams are an artist's conception of physical processes. They are not exact and have no meaningful scale. Green shaded areas represent the cloud of gluons or the gluon field, and red lines the quark paths.

| Property | Interaction | Gravitational | Weak (Electroweak) | | Electromagnetic | | Strong | |
|---|-------------|-----------------------------|--|----------------------|-----------------|--------------------------------------|--------|--|
| | | | Fundamental | Residual | Fundamental | Residual | | |
| Acts on: | | Mass - Energy | Flavor | Electric Charge | Color Charge | See Residual Strong Interaction Note | | |
| Particles experiencing: | | All | Quarks, Leptons | Electrically charged | Quarks, Gluons | Hadrons | | |
| Particles mediating: | | Graviton (not yet observed) | W ⁺ W ⁻ Z ⁰ | γ | Gluons | Mesons | | |
| Strength relative to electromagnetic for two u quarks at: | | 10 ⁻⁴¹ | 0.8 | 1 | 25 | Not applicable to quarks | | |
| for two protons in nucleus: | | 10 ⁻⁴¹ | 10 ⁻⁴ | 1 | 60 | Not applicable to hadrons | | |
| | | 10 ⁻³⁶ | 10 ⁻⁷ | 1 | 20 | | | |

| Mesons qq | | | | | |
|--|--------|---------------|-----------------|-------------------------|------|
| Mesons are bosonic hadrons. There are about 145 types of mesons. | | | | | |
| Symbol | Name | Quark content | Electric charge | Mass GeV/c ² | Spin |
| π^+ | pion | u \bar{d} | +1 | 0.140 | 0 |
| K ⁻ | kaon | s \bar{u} | -1 | 0.494 | 0 |
| ρ^+ | rho | u \bar{d} | +1 | 0.770 | 1 |
| B ⁰ | B-zero | d \bar{b} | 0 | 5.279 | 0 |
| η_c | eta-c | c \bar{c} | 0 | 2.980 | 0 |



The Particle Adventure

Visit the award-winning web feature *The Particle Adventure* at <http://ParticleAdventure.org>

This chart has been made possible by the generous support of:

U.S. Department of Energy
U.S. National Science Foundation
Lawrence Berkeley National Laboratory
Stanford Linear Accelerator Center
American Physical Society, Division of Particles and Fields
BURL INDUSTRIES, INC.

©2000 Contemporary Physics Education Project. CPEP is a non-profit organization of teachers, physicists, and educators. Send mail to: CPEP, MS 50-308, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA, 94720. For information on charts, test materials, hands-on classroom activities, and workshops, see: <http://CPEPweb.org>

mentos de la tabla periódica. Pero, ¿son estas tres partículas fundamentales?, ¿Qué fuerzas existen entre ellas?, ¿Necesitamos más partículas para poder describir las observaciones?

Durante los años cuarenta y hasta la década de los 60 se descubrieron muchas más partículas subatómicas usando aceleradores de partículas. El puzzle de partículas fundamentales no estaba completo con lo que se conocía hasta la fecha. Fue a final de los 60 cuando los físicos observaron que los protones y neutrones estaban hechos de partículas aún más pequeñas, los llamados quarks [4]. Actualmente, conocemos seis tipos de quarks. Los protones y neutrones están formados por dos tipos de estos quarks, el quark arriba (up) y el quark abajo (down). Los otros cuatro sirven para explicar las diferentes partículas subatómicas que se fueron detectando a partir del siglo XX.

Otro tipo de partículas subatómicas distinto de los quarks son los llamados leptones; el electrón es el más famoso de ellos pero son 6 en total. Tres de ellos tienen carga eléctrica, como el electrón, los otros tres, conocidos como neutrinos, son eléctricamente neutros. A cada una de las partículas descritas anteriormente le corresponde una antipartícula con las mismas propiedades, pero con carga eléctrica de signo opuesto.

Por otra parte, sabemos que todas estas partículas interactúan entre ellas y no se propagan de forma aislada por el cosmos. Existen cuatro fuerzas que determinan dichas interacciones [5]. La más familiar es la fuerza de la gravedad, la responsable de que podamos mantenernos unidos a la Tierra. Sin embargo, la gravedad es muy débil comparada con el resto de fuerzas y ni siquiera entendemos bien cómo actúa a escalas muy pequeñas.

La más conocida de las tres restantes es el electromagnetismo que, a nivel subatómico, es la encargada del movimiento de los electrones alrededor del núcleo atómico. Las otras dos son menos conocidas, la fuerza nuclear fuerte mantiene a los quarks unidos dentro de los protones mientras que la fuerza nuclear débil es responsable de algunas desintegraciones radiactivas de los núcleos. A escalas pequeñas, todas estas fuerzas funcionan a través del intercambio de diferentes tipos de partículas que se conocen como bosones. Sus nombres son: fotón en el electromagnetismo, gluón en la fuerza nuclear fuerte y bosones Z y W para la fuerza de interacción débil.

A pesar de ser un modelo sólido y capaz de explicar una gran cantidad de observaciones todavía hay fronteras que explorar. A finales del siglo XX, aún no había sido descubierto el mecanismo que hacía que las partículas tuviesen masa. Esta fue la principal motivación para la construcción del gran colisionador de hadrones (LHC, de sus siglas en inglés). Teóricamente, el mecanismo de Higgs podría explicar cómo las partículas adquirirían masa [6]. De ser corroborado, se debería detectar en el LHC un bosón con las propiedades que el modelo determinaba.

El CERN, la Organización Europea para la Investigación Nuclear, es un gigantesco laboratorio en el que físicos e ingenieros investigan la estructura fun-

damental del universo. Utilizan los instrumentos científicos más grandes y complejos del mundo para estudiar los componentes básicos de la materia: las partículas fundamentales. Las partículas se hacen colisionar juntas a una velocidad cercana a la de la luz. El proceso proporciona a los físicos pistas sobre cómo interactúan las partículas y proporciona información sobre las leyes fundamentales de la naturaleza.

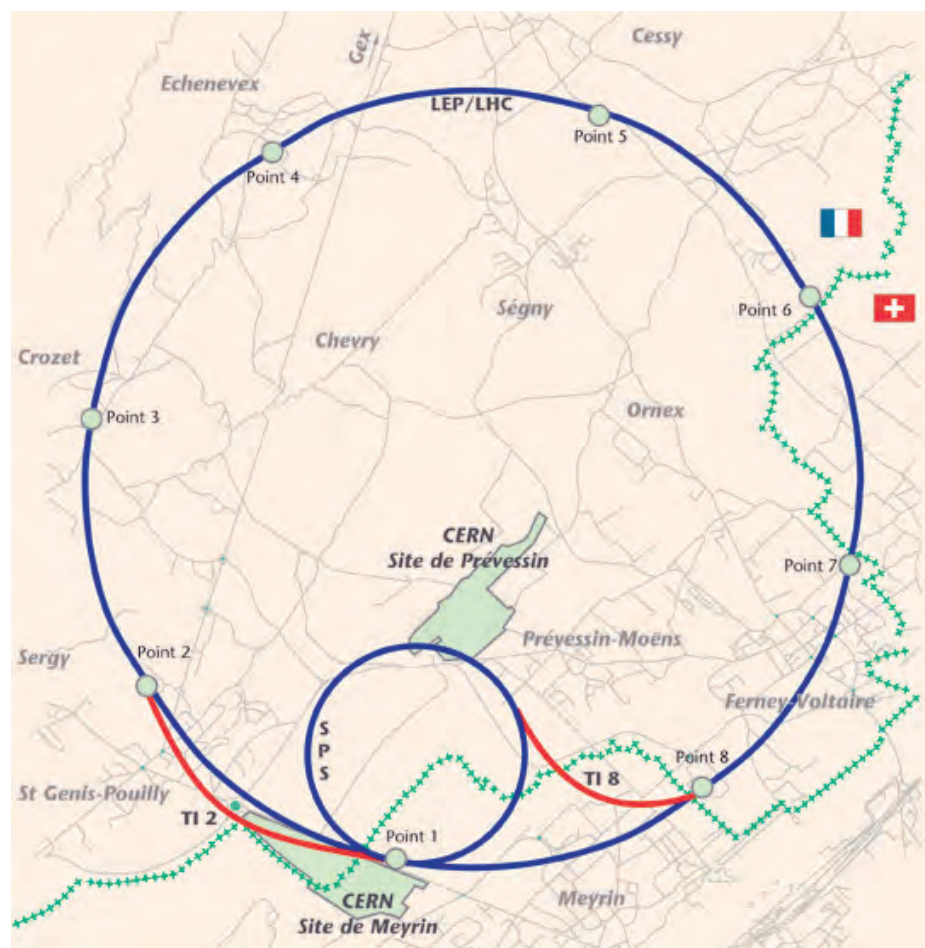
Los instrumentos utilizados en el CERN son aceleradores y detectores de partículas especialmente diseñados. Los aceleradores aumentan los haces de partículas a altas energías antes de hacer que los haces colisionen entre sí o con objetivos fijos. Los

detectores observan y registran los resultados de estas colisiones.

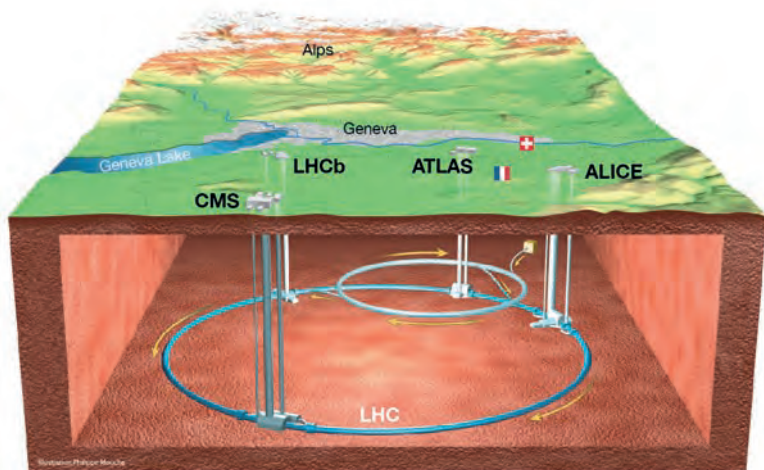
Fundado en 1954, el CERN se construyó en una amplísima zona situada entre Francia y Suiza, en las cercanías de Ginebra. Fue una de las primeras empresas conjuntas de Europa y ahora cuenta con 22 estados miembros.

EL GRAN COLISIONADOR DE HADRONES

El LHC [7] es la máquina más grande jamás creada por el hombre y está situada en el mayor laboratorio de investigación en física de partículas, el Consejo



CERN. Plano de los aceleradores LHC y SPS así como de los nuevos túneles de transferencia TI2 y TI8.



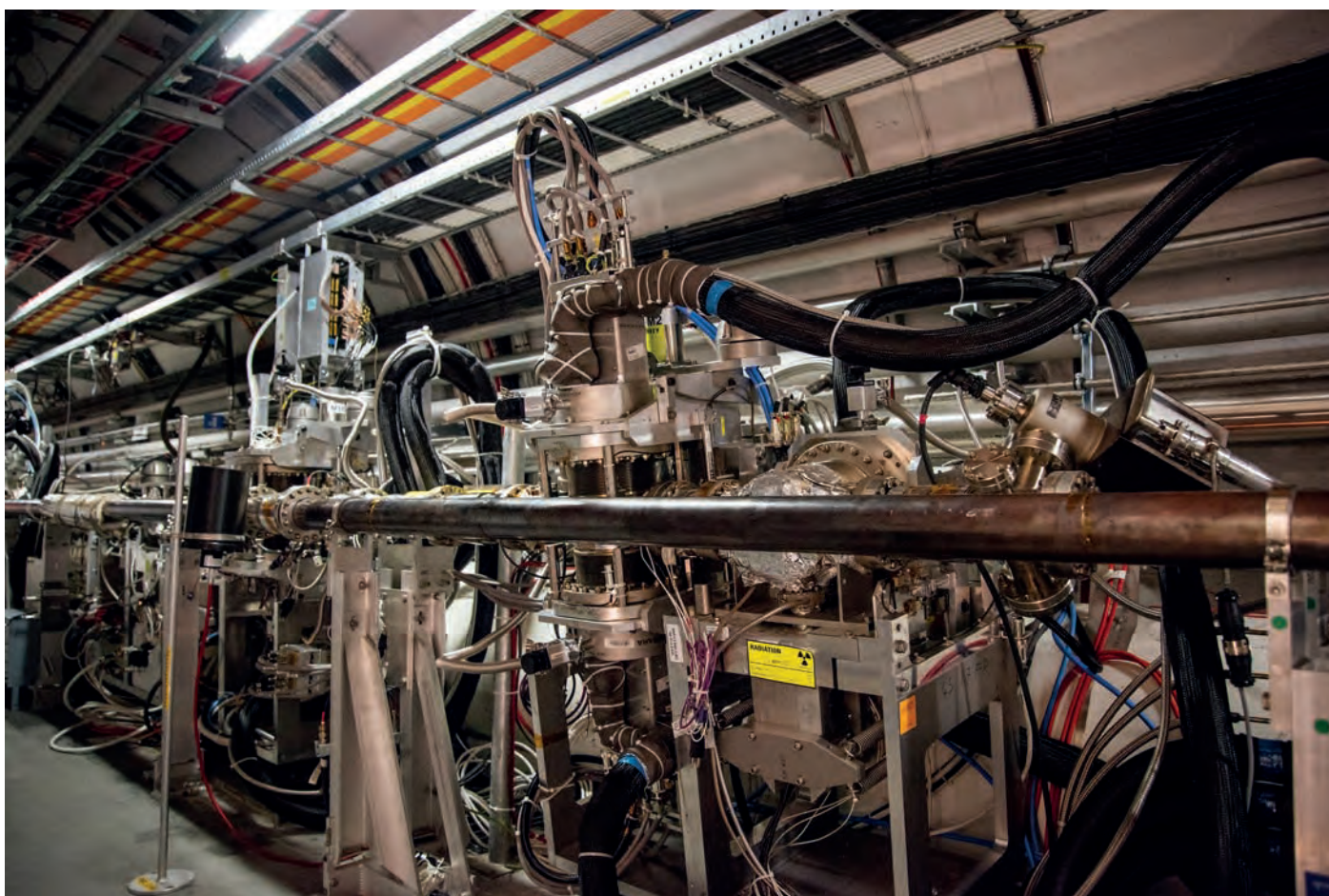
Vista completa del acelerador y los cuatro detectores

Europeo para la Investigación Nuclear (CERN), en Ginebra. Es un anillo de 27 kilómetros de circunferencia enterrado a 100 metros de profundidad en el que se hacen colisionar protones a una velocidad cercana a la de la luz.

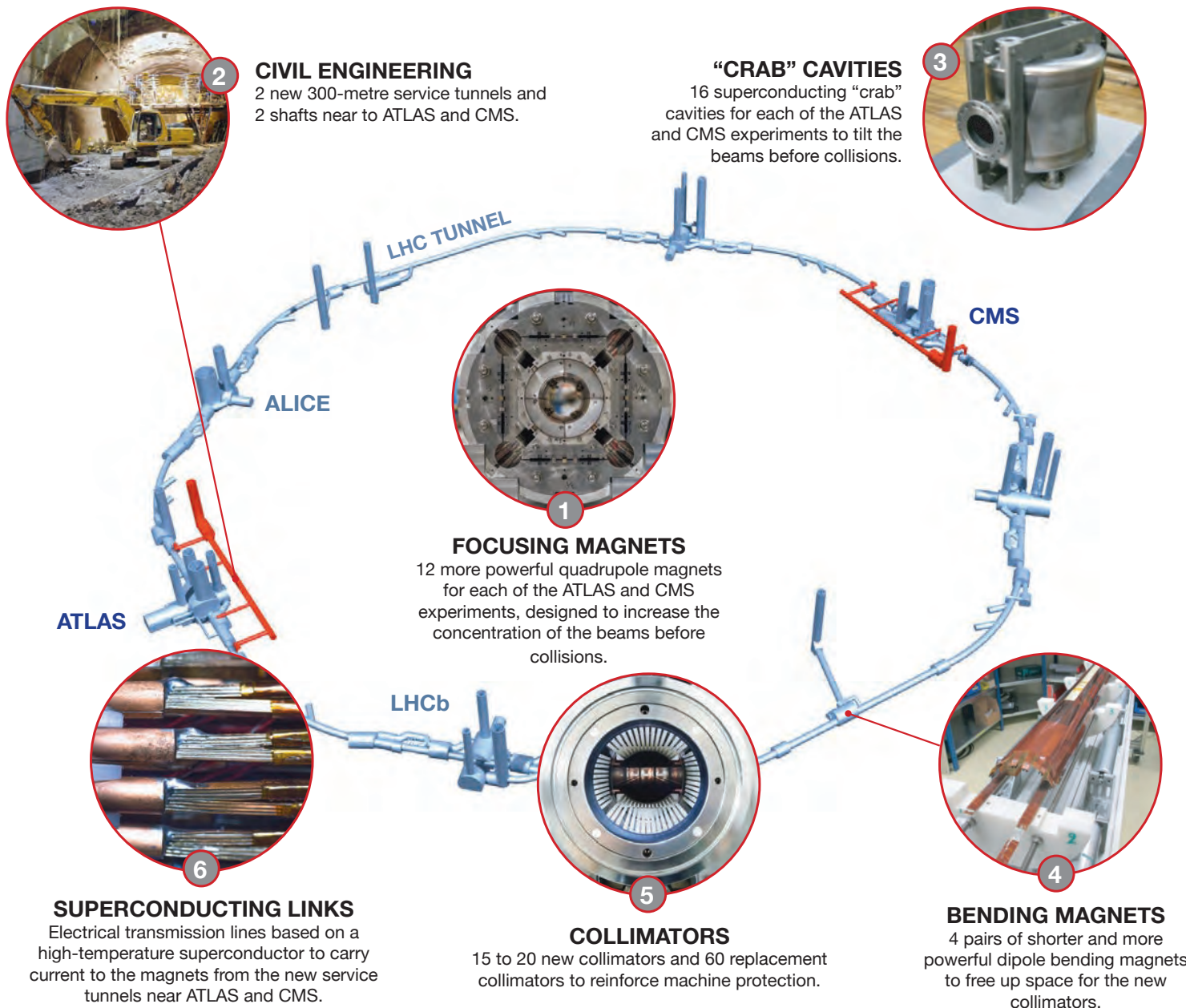
Los protones se extraen de una botella de hidrógeno. Este átomo está compuesto por un elec-

trón y un protón, los cuales tienen carga de signo opuesto. Una característica de las partículas con carga es que curvan su trayectoria en presencia de un campo magnético y lo hacen en un sentido u otro dependiendo de su carga. Es así, aplicando un campo magnético, cómo se consigue separar los protones de los electrones del hidrógeno. Éstos se van acelerando secuencialmente en aceleradores más pequeños hasta que llegan al gran anillo.

Dentro de este acelerador viajan dos haces de partículas muy energéticas que se hacen colisionar en distintos puntos del anillo. Los haces de protones son guiados a través del acelerador gracias a un campo magnético producido por imanes superconductores. Para el correcto funcionamiento de estos imanes hace falta un sistema de criogenia muy avanzado capaz de mantener una temperatura de -271°C , cercana al cero absoluto.



CERN. Una muestra de la impresionante complejidad de este acelerador.



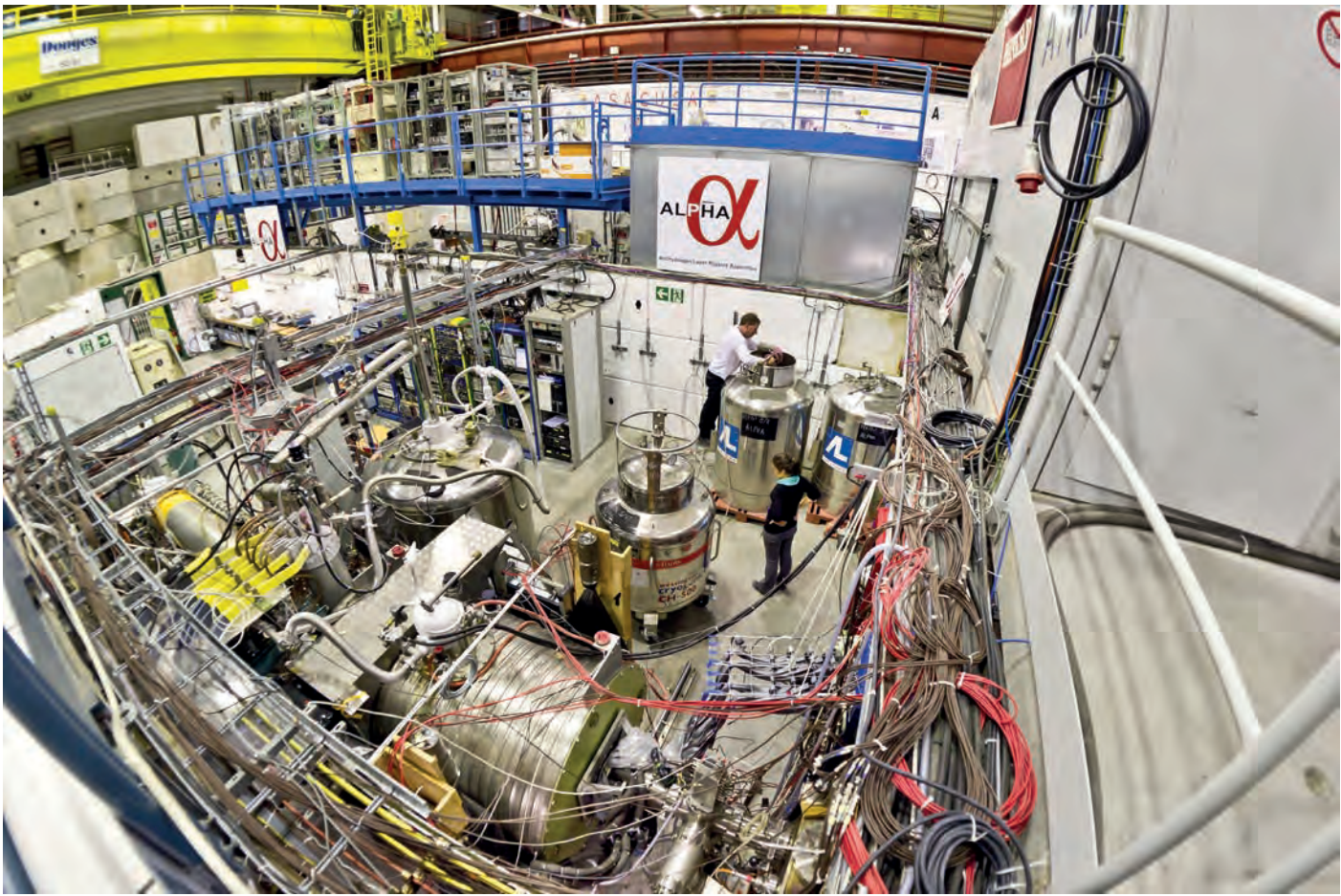
CERN. Infografía de la composición del LHC.

La energía a la que colisionan los protones actualmente es de 13 teraelectronvoltios (TeV). La cantidad de energía de 1 TeV se suele comparar a la de un mosquito en vuelo, pero a diferencia del caso del insecto esta energía está condensada en un espacio extremadamente pequeño, millones de millones de veces más pequeñas que el mosquito. Este hecho es el que nos permite adentrarnos dentro de los protones y hacer colisionar sus componentes indivisibles, los quarks.

Las colisiones tienen lugar en cuatro puntos distintos del acelerador y cada uno de ellos hay un detector: ALICE, ATLAS, CMS y LHCb. Cada detector tiene un propósito distinto y están diseñados de acorde a él. ATLAS y CMS son detectores multi-propósito en los que se miden una gran variedad de eventos. Los eventos se distinguen en función del estado final que los físicos estén buscando para un determinado proceso y es que, comenzando desde la

colisión de dos quarks es posible acabar teniendo bosones, leptones o quarks.

Debido a las propiedades de la fuerza nuclear fuerte, los quarks no se observan libres en el detector, si no que a medida que van perdiendo energía se unen a otros quarks o gluones para formar otras partículas llamadas hadrones, como los protones. El LHC permite obtener tales partículas – bosones, leptones o quarks – en el



CERN. Instalaciones para desarrollar el experimento ALPHA sobre antimateria. Fotografía Maximilien Brice.

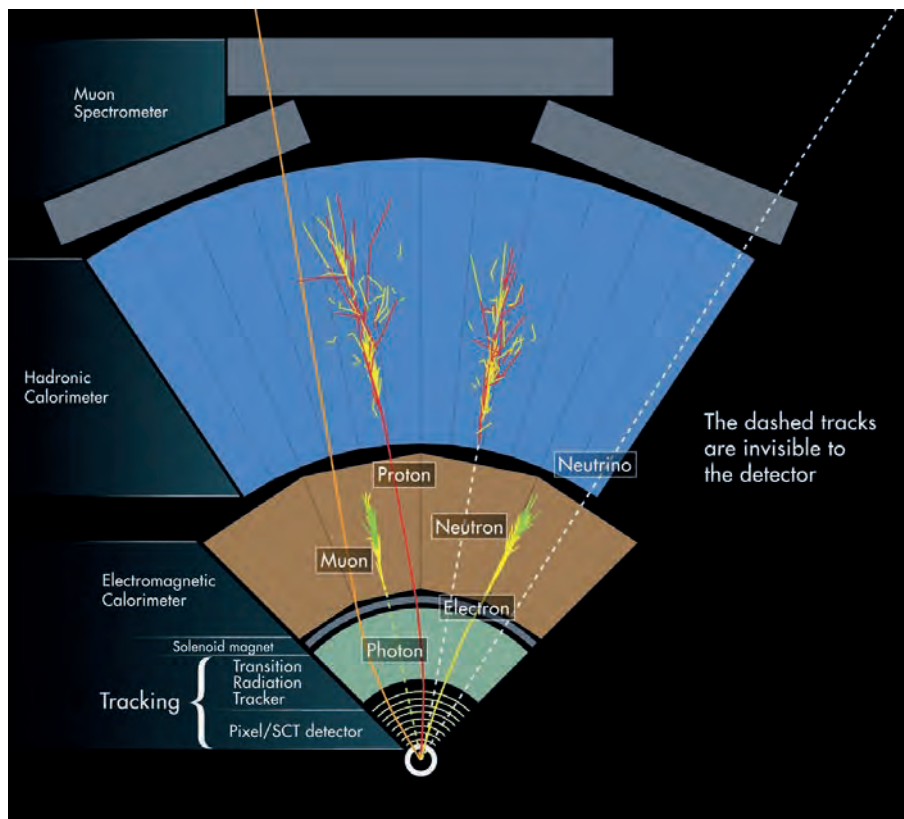
estado final o casi cualquier combinación de ellos dadas las reglas que siguen las interacciones que conocemos en el Modelo Estándar.

Los detectores están diseñados para poder identificar todas las posibles partículas que pueden resultar de una colisión. Tienen una estructura en forma de capas alrededor del haz que permite reconstruir la trayectoria, velocidad y energía de las partículas que pasan a través de él y, con ello, identificar los distintos tipos de partículas con una certeza muy cercana al 100%. Por ejemplo, entre las piezas del detector suele colocarse un imán y, como ya se ha comentado antes, se puede determinar la carga de la partícula en función del sentido de su curvatura o, si la trayectoria es recta, se puede inferir que la partícula es neutra como, por ejemplo, un fotón.

En esta gigantesca máquina se producen cada segundo centenares de millones de colisiones. Los circuitos electrónicos graban el paso de una par-

tícula a través de un detector como una serie de señales electrónicas que se envían al Centro de Datos del CERN para su reconstrucción. Esto da lugar a que cada año una cantidad ingente de información (decenas de petabytes de datos) tenga que ser almacenada para que, a partir de ella, los físicos puedan determinar si algún evento de su interés se ha producido entre todas las colisiones tomadas. La gran capacidad de almacenamiento que existe en los centros del CERN no es suficiente para albergar la ingente cantidad de datos que es necesario grabar. Por ello es preciso e imprescindible hacer uso de muchos centros de computación de todo el mundo, formando la “Worldwide LHC Computing Grid”, que permite el acceso en tiempo real a los datos almacenados.

Acudiendo a este gigantesco banco de datos los físicos de cada una de las colaboraciones: ALICE, ATLAS, CMS y LHCb pueden comenzar su trabajo. Existen varias áreas en las que un físico puede trabajar con estos datos: mejorar la calibración



de la escala de energía o la identificación de los objetos del estado final en función de sus características, hacer medidas de precisión de parámetros según la teoría del Modelo Estándar, buscar nueva física, etc... Para abarcar todas estas tareas existen varios grupos de trabajo y en cada uno de ellos hay varios grupos de análisis que se enfocan en un proceso concreto. Sin embargo, por mucha especialización que requiera un análisis, depende de forma indispensable del trabajo que se ha desarrollado previamente o se está desarrollando simultáneamente por otros grupos.

Representación de los distintos subdetectores de ATLAS. ATLAS Experiment © 2016 CERN



Centro de cálculo del CERN. © CERN



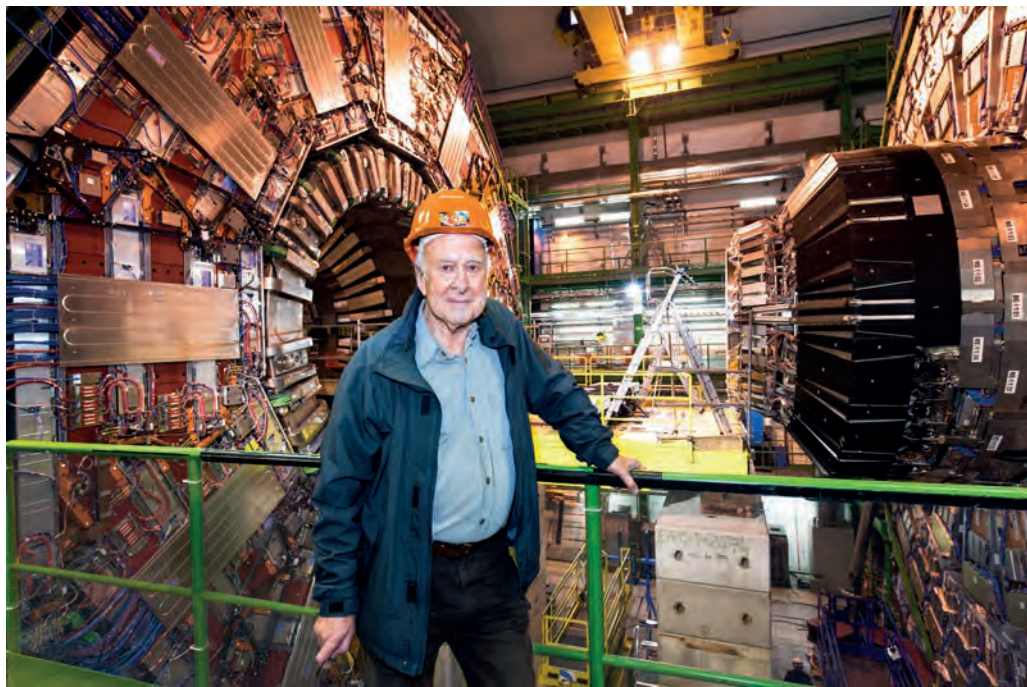
EL FUTURO DEL LHC

Uno de los motivos que resultó determinante al tomar la decisión de construir esta gran máquina fue su potencial para descubrir el bosón de Higgs. El 4 de julio de 2012 se logró publicar la observación de una partícula con las mismas propiedades que el Higgs a una masa aproximada de 125 GeV. Aún hacía falta más estadística para lograr medir con precisión las características de esta partícula y poder afirmar con total seguridad que se trata del conocido bosón. Se podría pensar entonces que conocemos perfectamente de qué estamos hechos, que conocemos al detalle la teoría que explica todas las interacciones que determinan el comportamiento de las partículas y que la única forma de mejorar el conocimiento de este campo es mejorando la precisión de sus parámetros. Por desgracia (o por suerte) este no es el caso y aún existen muchas preguntas abiertas. Algunas de ellas son las siguientes:

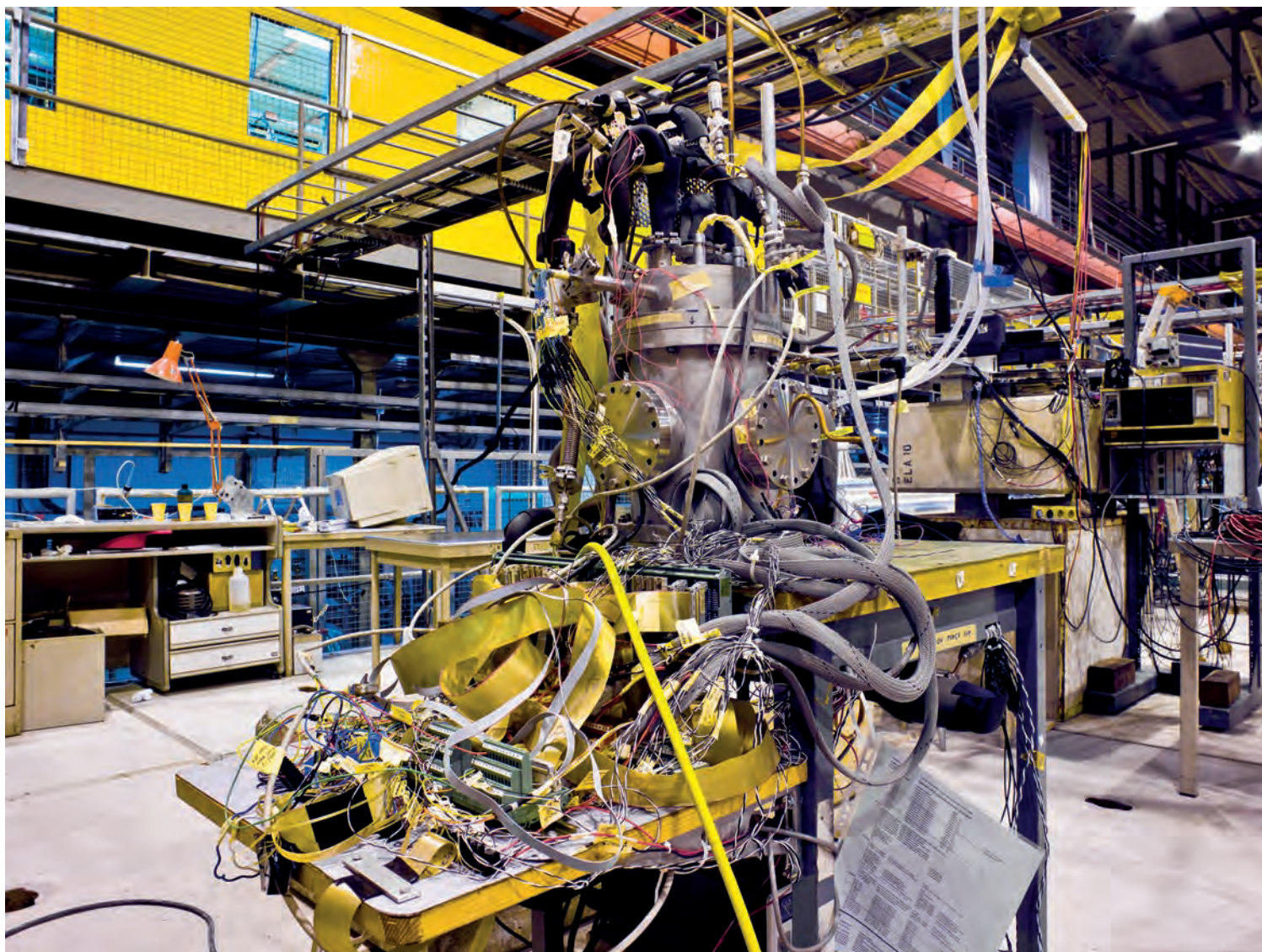
- * A partir de la observación del movimiento de objetos astronómicos como planetas, galaxias, etc... sabemos que la materia que observamos y conocemos es tan solo un 4% de la composición total del universo, un 21% es materia oscura y el restante 75% es energía oscura (relacionada con la expansión acelerada del Universo). Pero, ¿qué es la materia oscura?, ¿qué tipo de partículas la forman? [8]

- * Si en las reglas que rigen las interacciones del Modelo Estándar, partículas y antipartículas se producen por igual conservando su número, ¿por qué estamos compuestos de materia (partículas) y no de antimateria (antipartículas)? [9]
- * Se piensa que los parámetros de una teoría “natural” como el Modelo Estándar deberían tener un valor similar y no diferir en muchos órdenes de magnitud como es el caso. Esto se conoce como problema de la jerarquía. ¿Es esto solo un criterio estético? ¿O tiene consecuencias físicas más profundas que no hemos sido capaces de entender? [10]

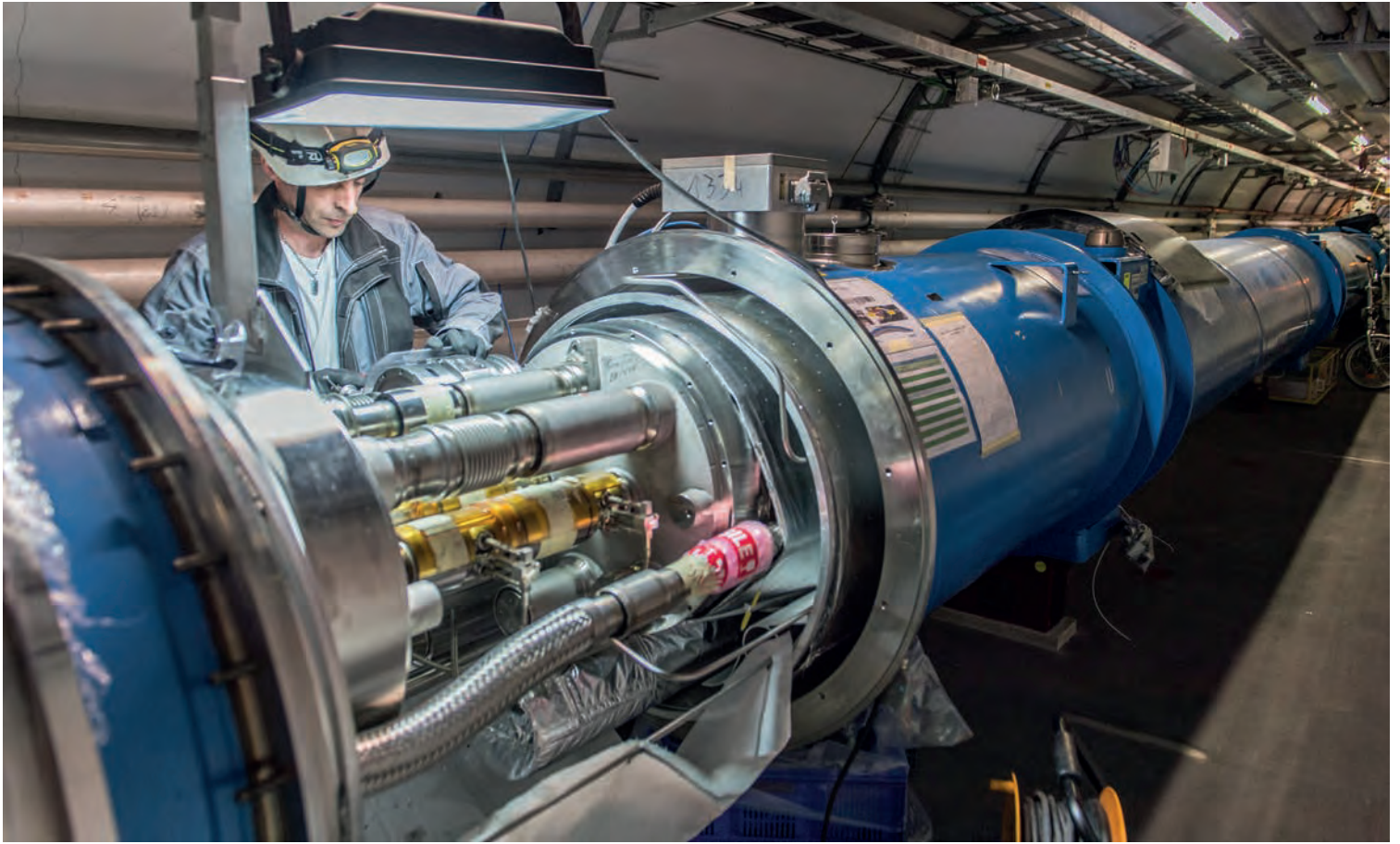
La comunidad científica seguirá trabajando para poder resolver estas preguntas. Es probable que máquinas aún más potentes que el LHC o con diferentes características sean necesarias para corroborar las teorías que se vayan formulando para responder a dichas preguntas. Saber a priori si el experimento va a confirmar la teoría o si, por el contrario, tan solo va a poner algún límite extra a nuestro conocimiento es imposible. Esto hace que convencer a las autoridades de la construcción e inversión en experimentos de estas características no sea nada sencillo puesto que los resultados no tienen aplicaciones inmediatas que puedan ser usadas por el ser humano. Es una inversión en conocimiento y cultura.



CERN. El profesor Peter Higgs en el experimento CMS para estudiar el escurridizo bosón que lleva su nombre. Fotógrafo Maximilien Brice.



CERN. Construcción de un detector para el proyecto TOTEM. Fotógrafo Maximilien Brice.



Un científico trabajando en el sector 8. LT1. Fotografía Anna Pantelia.

Pero hay que mencionar que en este tipo de experimentos se trabaja con la tecnología más actual y que, en muchos casos, es necesaria tecnología que aún no ha sido desarrollada y que luego puede ser aprovechada en otros campos. Uno de las aportaciones a la vida cotidiana que se desarrolló en el CERN es la creación del modelo de la World Wide Web (www), nacido de la necesidad de compartir información de manera automática entre los científicos. Por otro lado, la física de aceleradores cada vez se usa más en el campo de la medicina y, por tanto, la medicina se podrá beneficiar de los avances que desarrollen en la física de partículas.

LAS IMÁGENES
SE HAN TOMADO DE LA
MAGNÍFICA WEB DEL CERN.

REFERENCIAS

- [1] Fragmentos presocráticos: De Tales a Demócrito, Alianza Editorial.
- [2] La tabla periódica de los elementos. https://es.wikipedia.org/wiki/Tabla_periódica_de_los_elementos
- [3] Modelo atómico de Thompson. https://es.wikipedia.org/wiki/Modelo_atómico_de_Thomson
- [4] Quark. <https://es.wikipedia.org/wiki/Quark>
- [5] Interacciones fundamentales. https://es.wikipedia.org/wiki/Interacciones_fundamentales
- [6] Mecanismo de Higgs. https://es.wikipedia.org/wiki/Mecanismo_de_Higgs
- [7] Acercándonos al LHC. http://www.lhc-closer.es/taking_a_closer_look_at_lhc/1.lhc/idioma/es_ES
- [8] Materia oscura. https://es.wikipedia.org/wiki/Materia_oscura
- [9] Asimetría de bariones. https://es.wikipedia.org/wiki/Materia_oscura
- [10] Problema de jerarquía. https://es.wikipedia.org/wiki/Problema_de_jerarquía