



Ciencia en el CERN: un puente entre culturas

Ciencia en el CERN: un puente entre culturas

Edición de Marilena Streit-Bianchi

Ginebra
2018

Este libro está disponible también en inglés (v. o.), alemán, francés, italiano y portugués.

Ilustraciones de la cubierta:

Portada: **“Pushing particles near to the speed of light”** Justino António Cardoso, 2015. *Tinta china*

Contraportada: **“Geneva Switzerland”** Justino António Cardoso, 2015. *Tinta china y color*

© 2018 [[El/los autor(es)]]. Este libro es de contenido abierto (Open Access), los artículos están disponibles bajo la licencia **Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)** (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>) y las obras de arte bajo la licencia **Attribution-Non Commercial-Share Alike 4.0 International** (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).

Citar artículo(s) u obra(s) de arte como: [[Nombre(s) de autor(es) o artista(s)]], [[Título del artículo o de la obra de arte]] en “Ciencia en el CERN: un puente entre culturas”, edición de Marilena Streit-Bianchi, 2018, pp [[número(s) de página(s)]].

DOI 10.5281/zenodo.1300290

Prefacio

Sé por mi propia experiencia que el CERN ha sido, y sigue siendo, un lugar donde el conocimiento, la competencia técnica y el entendimiento encuentran un hogar acogedor. Ha sido así desde la fundación de la Organización en los años 50, y seguirá siéndolo mientras dure el CERN. Esto es así porque quienes trabajan en el CERN, ya sea en investigación o en operación, están motivados por el deseo de avanzar los límites de nuestra comprensión de las fuerzas fundamentales de la Naturaleza, independientemente de su procedencia o de cualquier prejuicio cultural que puedan tener.

Este libro da una idea de las actividades del CERN y destaca varias facetas menos conocidas del Laboratorio, que sin embargo son esenciales para llevar a cabo investigaciones en Física de Altas Energías. El CERN no es solo un ejemplo de excelencia en investigación, tecnología e innovación, sino que es también un verdadero crisol de distintas competencias y de aspectos humanos. La ciencia y el arte tienen como denominador común la creatividad y la investigación sin restricciones. Este libro enseña cómo estos dos mundos, que antaño estuvieron claramente conectados y que ahora son percibidos como separados, siguen siendo de hecho manifestaciones de la misma esencia de la curiosidad humana. También muestra cómo los artistas de diferentes culturas perciben el CERN y el trabajo realizado en él¹. La obra gráfica de Justino António Cardoso aporta un toque africano inconfundible y único.

Para concluir, me gustaría añadir que editar este libro, en sus diversas versiones lingüísticas, ha sido posible gracias al trabajo desinteresado de todos los colaboradores que, además de realizar sus tareas científicas y artísticas cotidianas han cedido parte de su tiempo para participar en este esfuerzo.

Aprovecho la oportunidad para agradecer calurosamente a:

- Sergio Bertolucci, profesor de la Universidad de Bolonia y anterior Director de Investigación y Computación Científica en el CERN, por el apoyo brindado a Justino António Cardoso durante su estancia en el CERN.
- João Penedones Fernandes, profesor de Física en la EPFL (École Polytechnique Fédérale de Lausanne), por pasar tiempo explicando el propósito del CERN y el trabajo que se realiza a Justino António Cardoso, y
- José Carlos Rasteiro Da Silva, ingeniero electrónico del LIP (Laboratory of Instrumentation and Experimental Particle Physics) Lisboa y del experimento CMS del CERN, por facilitar visitas guiadas de las instalaciones del CERN.

Estoy profundamente agradecida a: Beatrice A. Bressan, Mar Capeáns, Melissa Gaillard, James Gillies, Paulo Gomes, Bettina Hamoudi, João Antunes Pequenaço, Pascale Pessy, Délio Duarte Ramos, Klaus Michael Streit, asociación ARSCIENCIA (Susana Mataix, José Facal, Margarita Cimadevila y Wolfgang Trettnak) por la ayuda en la traducción y la revisión de este libro.

Marilena Streit-Bianchi

¹ Davide Anghelèddu (Italia), Justino António Cardoso (Mozambique), Margarita Cimadevila (España), Angelo Falciano (Italia), Michael Hoch (Austria), Karen Panman (Países Bajos), Islam Mahmoud Sweity (Palestina) y Wolfgang Trettnak (Austria).

Índice

Prefacio <i>Marilena Streit-Bianchi</i>	IV
CERN, laboratorio de física de partículas <i>Marilena Streit-Bianchi</i>	3
CERN, ciencia para la paz <i>Emmanuel Tsesmelis</i>	5
Modelo Estándar e investigaciones en una nueva física fundamental <i>John Ellis</i>	9
Aceleradores: cómo y porqué <i>Lucio Rossi</i>	13
Los físicos y sus experimentos <i>Ana Maria Henriques Correia y João Martins Correia</i>	23
CERN y tecnología de la información <i>Frédéric Hemmer</i>	31
Conocimiento y transferencia de tecnología <i>Giovanni Anelli</i>	34
ClearPEM <i>João Varela</i>	35
ARTSCI en el CERN <i>Arthur I. Miller</i>	37
Ciencia, política y sociedad <i>Rolf Heuer</i>	41

Artistas y títulos de sus obras

Justino António Cardoso (Mozambique):

Pushing particles near to the speed of light	Portada
Geneva Switzerland	Contraportada
CERN, the largest particle physics laboratory in the world	1
The evolution of our Universe	2
How to extend the Standard Model?	4
The forces	8
Strings propagate through space and interact	11
The search is open	12
CERN's accelerator complex	15
Energetic protons in a circular collider	16
Superconducting coils of an LHC magnet and vacuum beam pipe	17
Tanks of liquid helium to cool the LHC	17
A look into the future	20

Chameleon, a hypothetical scalar particle	27
Accelerators and detectors to understand the Universe	30
A clinical application: ClearPEM	34
An innovative technology	36
Gargamelle and the neutral currents	39
The gravitation law I know	40
Knowledge and black holes	43
Cosmic microwave background	44
<i>Wolfgang Trettnak (Austria):</i>	
Peter	III
<i>Angelo Falciano (Italia):</i>	
Congetture circolari	15
<i>Margarita Cimadevila (España):</i>	
Quarks	21
<i>Islam Mahmoud Sweity (Palestina):</i>	
François Englert and Peter Higgs at CERN in 2012	22
<i>Davide Anghelddu (Italia):</i>	
ATLAS Remeshed-Higgs Boson (escultura)	24
ATLAS Remeshed-Higgs Boson (impresión digital)	24
<i>Michael Hoch (Austria):</i>	
Matter-Anti-Matter, symmetry 4	25
<i>Karen Panman (Países Bajos):</i>	
Strings at the horizon of a black hole	38
<i>Fotos</i>	
Simon van der Meer and Carlo Rubbia celebrate their awarding of the Nobel Prize in 1984 with a toast at CERN (CERN-PHOTO-8410523)	22
Justino António Cardoso en el CERN	45-46



El mayor laboratorio de física de partículas es una organización líder en la creación de conocimientos



“CERN, the largest particle physics laboratory in the world” Justino António Cardoso, 2015. *Tinta china*



"The evolution of our Universe" Justino António Cardoso, 2015. Tinta china

La evolución de nuestro Universo dando lugar a la vida en la Tierra, ha llevado miles de millones de años. Los físicos del LHC están estudiando qué pasó en los 10-12 segundos después del Big Bang. Cerca de 380 000 años después se produjeron los primeros átomos de hidrógeno y helio.

CERN, laboratorio de física de partículas

Marilena Streit-Bianchi

El CERN, la Organización Europea para la Investigación Nuclear, es el mayor laboratorio del mundo de física de partículas y un ejemplo europeo constante de excelencia en la investigación, educación y transferencia de tecnología. El laboratorio se creó en 1954 en el lado suizo de la frontera franco-suiza cerca de Ginebra. El objetivo era crear un centro de investigación de física de nivel mundial para frenar el drenaje de cerebros a los Estados Unidos y federar Europa alrededor de un proyecto de investigación que fuera inviable para una nación sola. El grupo de científicos y diplomáticos visionarios que fundaron el CERN pretendían también fomentar el entendimiento entre las personas con independencia de sus nacionalidades y creencias políticas o religiosas.

El CERN sigue siendo muy internacional, especialmente en las colaboraciones de investigación, con cerca de 600 institutos y universidades de todo el mundo haciendo uso de las instalaciones del CERN.

El CERN es un centro de excelencia reconocido internacionalmente, que ha contribuido a descubrimientos importantes en el campo de la física de partículas y continúa siendo una organización líder en la generación de conocimientos.

Su papel e importancia para la formación de físicos, ingenieros, informáticos y técnicos crece continuamente. Alrededor de un millar de jóvenes recibe cada año cualificaciones por trabajos realizados en el CERN.

A lo largo de los años, los resultados positivos de adquisición y transferencia de información han mostrado ser sustanciales y el laboratorio es una fuente de continuos desarrollos tecnológicos.

En el CERN, los resultados obtenidos de la investigación fundamental son publicados, intercambiados libremente y puestos a disposición de todo el mundo. Desde el principio, los científicos del CERN han desarrollado un concepto muy natural de compartir la información que ha implicado a investigadores, ingenieros, técnicos y estudiantes. Por consiguiente, todo el mundo puede ejercitar y satisfacer su curiosidad al interactuar con personas de orígenes, campos y áreas de experiencia diferentes.

La infraestructura gigantesca del laboratorio y la libertad de los equipos para aprender y compartir supone una gran revelación para los recién llegados. En las grandes colaboraciones, el papel de la dirección y la coordinación son claves para el éxito de la actividad científica.

El impacto en otras áreas de los conocimientos adquiridos en grandes y pequeños proyectos de investigación está bien documentado. El CERN tiene una larga tradición en fomentar las relaciones con la industria para promover las tecnologías innovadoras necesarias para la construcción de los aceleradores y los detectores. Hoy en día, habiendo institucionalizado la Transferencia de Tecnología y Conocimientos y aumentado los esfuerzos para asegurarse un impacto más rápido y efectivo, el CERN está teniendo un papel más proactivo en la transferencia de las innovaciones desde la investigación fundamental hacia la sociedad.



"How to extend the Standard Model?" Justino António Cardoso, 2015. Tinta china

CERN, ciencia para la paz

Emmanuel Tsesmelis

Al final de la Segunda Guerra Mundial, la ciencia europea ya no estaba en una posición de liderazgo. Siguiendo el ejemplo de otras organizaciones internacionales, varios científicos y diplomáticos visionarios propusieron la creación de un laboratorio europeo de física nuclear. El laboratorio no solo uniría a los físicos europeos, sino que les permitiría compartir los costes crecientes de la física nuclear. El físico francés Louis de Broglie presentó la primera propuesta oficial para la creación de un laboratorio europeo en la Conferencia Cultural Europea, inaugurada en Lausanne el 9 de diciembre de 1949. Otro impulso se produjo en la quinta Conferencia General de la UNESCO, celebrada en Florencia en junio de 1950, donde el físico americano y premio Nobel Isidor Rabi presentó una resolución autorizando a la UNESCO a “ayudar y alentar la formación de laboratorios regionales de investigación para aumentar la colaboración científica internacional...”

En la sexta sesión del Consejo del CERN, que tuvo lugar en París del 29 de junio al 1 de julio de 1953, se firmó el Convenio CERN donde se creaba la Organización, sujeto a su ratificación por 12 estados. El Convenio fue gradualmente ratificado por los 12 Estados Miembros fundadores: Bélgica, Dinamarca, Francia, la República Federal de Alemania, Grecia, Italia, Holanda, Noruega, Suecia, Suiza, Reino Unido y Yugoslavia. El 29 de septiembre de 1954, el CERN (la Organización Europea para la Investigación Nuclear) nació oficialmente.

La Convención CERN ha resistido la prueba del tiempo durante más de 60 años. Proporciona los medios para que la Organización se adapte a los cambios políticos del entorno y a nuevos retos científicos y tecnológicos. La Convención es un testimonio de la sabiduría y la visión de los padres fundadores, a la par que de su previsión para reconstruir la paz en Europa estableciendo un único punto central que fomentase la colaboración científica a una escala sin precedentes entre unas naciones que sólo unos años antes habían combatido en una guerra entre sí.

Desde entonces, el CERN ha ayudado a construir una confianza mutua a través de las fronteras. Durante los años de la Guerra Fría el CERN fue la primera organización que en 1968 cerró un acuerdo con la Unión Soviética, para establecer una cooperación con el gran laboratorio nacional en el Instituto de Alta Energía Física (IHEP) en Protvino, cerca de Serpukhov. En 1956, siguiendo el modelo del CERN, se fundó el laboratorio internacional, llamado Instituto Conjunto de Investigación Nuclear (ICIN) en Dubna, al noreste de Moscú, para los “Estados del Pacto de Varsovia” detrás del Telón de Acero. La cooperación entre el ICIN y el CERN supuso uno de los pocos puentes para la colaboración entre científicos de Occidente y el Este durante la Guerra Fría. En particular, representó un papel importante en la colaboración de científicos de Alemania del Este y del Oeste, puesto que en aquellos tiempos era la única oportunidad para los científicos de las dos partes de Alemania de trabajar juntos. La cooperación entre el ICIN y el CERN se ha fortalecido a lo largo de las últimas décadas y ha conducido a un acuerdo recíproco que convierte al CERN en un observador del ICIN y al ICIN en un observador del Consejo del CERN. Otro ejemplo es la cooperación entre el CERN y la República Popular de China. Comenzó en la década de los 70, inicialmente en la tecnología de los aceleradores y física teórica, y pronto fue seguida por una participación en los programas de física experimental del CERN. A partir de los acuerdos de cooperación internacional firmados en los 90 con la República Popular de China, sus universidades participan ahora en cuatro experimentos del LHC (ALICE, ATLAS, CMS y LHCb), en la red Informática del LHC y en el estudio CLIC. El CERN también ha desarrollado una cooperación con Palestina. Después de que la Universidad Nacional An-Najah firmó una “expresión de interés” con ATLAS, Palestina dió un paso importante para la consolidación de su colaboración con el CERN, al firmar un Acuerdo de Cooperación Internacional en diciembre del 2015. Después de esto, se han lanzado una serie de iniciativas en Palestina, incluyendo Masterclasses, una Escuela de Física en la Universidad Árabe Americana en Jenin y la participación de profesores palestinos en el programa especial para profesores de secundaria dedicado a SESAME, el Síncrotrón ligero para ciencias experimentales y aplicaciones en el Medio Oriente. Por último, el CERN ha servido como modelo para otras organizaciones científicas con éxito, siendo la más reciente

SESAME.

Hoy el LHC es el proyecto científico más destacado del CERN y ha lanzado una nueva era de investigaciones y descubrimientos en física de partículas. Los experimentos en el LHC han servido para avanzar en las observaciones del bosón de Higgs, validando el mecanismo Brout-Englert-Higgs (BEH) y siendo uno de los descubrimientos más significativos en la historia de la física fundamental. Las expectativas del LHC son importantes y respaldan las perspectivas revolucionarias para el entendimiento del microcosmos y los cambios en nuestra explicación sobre los primeros instantes del Universo.

El CERN y sus proyectos científicos a gran escala como el LHC requieren una infraestructura grande y sostenida además de una colaboración global a lo largo de muchos años. La extensa colaboración internacional del LHC proporciona un entorno donde las personas aprenden a trabajar y a compartir, así como una oportunidad para reconocer las diferencias, aceptarlas y aprender de ellas respetando la diversidad. El CERN es también un ejemplo de la unificación de esfuerzos en campos de competencias muy diferentes. Ingenieros, técnicos y administradores trabajan con el mismo empeño para fabricar equipos con tecnología de vanguardia y proporcionar los servicios y el apoyo necesarios para la infraestructura de la investigación y los sistemas auxiliares. Construir una infraestructura de investigación de tal complejidad como el LHC requiere ingenieros, técnicos y administradores para áreas tan diversas como la ingeniería civil, instalación, imanes, sistemas de radiofrecuencia, vacío, criogenia, electricidad, sanidad y seguridad, protección radiológica, servicios legales, cuerpo de bomberos, logística, finanzas, compras y la gestión de recursos humanos. Ellos representan la gran mayoría del personal del CERN que en 2017 contaba aproximadamente con 2500 empleados. Por otra parte, cerca de 1000 contratistas de compañías externas prestan servicios que no forman parte de las competencias centrales del CERN y pueden ser subcontratadas.

Los resultados del LHC y sus actualizaciones marcarán el camino de la física de partículas en los años venideros y el CERN, como anfitrión del LHC, ocupa una posición privilegiada para contribuir a una mejor comprensión a largo plazo de la física de partículas. A la vista de esto, el CERN para preparar su futuro está explorando dos vías diferentes y complejas: el estudio CLIC (**C**ompact **L**inear **C**ollider) y el FCC (**F**uture **C**ircular **C**ollider).

Todo esto ocurre cuando las instalaciones para la física de altas energías (como para otras ramas de la ciencia) son cada vez más grandes y más caras. La financiación para esta área no está aumentando en muchos países y los plazos para los proyectos son cada vez mayores, contribuyendo ambos factores a que se realizan menos instalaciones. La física de partículas debe adaptarse a este cambio de situación. Esto conduce a la necesidad de más coordinación y más colaboración a escala global. Los conocimientos en física de partículas necesitan mantenerse en todas las zonas, asegurando la estabilidad a largo plazo y el apoyo desde el principio hasta el final. Es necesario involucrar a todos aquellos países con comunidades consolidadas de física de partículas e integrar a las comunidades de otros países. Los organismos de financiación deberán a su vez tener una perspectiva global. La planificación y ejecución de los proyectos de física de altas energías requieren una participación de alcance mundial para los proyectos internacionales, regionales y nacionales, es decir, para todo el programa de física de partículas. La física de partículas debe adaptarse a esta realidad cambiante fomentando una mayor colaboración y coordinación a una escala global.

El CERN se ha construido sobre una arraigada tradición de compromiso mundial en nuestro trabajo científico. La organización tiene relaciones con los Estados no Miembros (NMS) a través de Acuerdos bilaterales de Cooperación Internacional (ICAs), actualmente en vigor con unos 50 países. De un total de alrededor de 13 000 usuarios en el CERN, la participación actual de usuarios NMS es de casi un 40 %; la mayoría de los usuarios NMS son investigadores de los Estados Unidos y de la Federación de Rusia trabajando en el LHC. En general la participación de los NMS en los programas de investigación, que no son el LHC, es de un 20 %. Los recursos financieros para los programas de investigación, en especial los costes de mantenimiento y operatividad para los experimentos LHC son compartidos entre los Estados Miembros, los asociados y los NMS. Además, existe un interés

creciente en la colaboración en la I+D de los aceleradores (como las estructuras de alto campo magnético y de aceleración, y las tecnologías relacionadas) centradas en las actualizaciones del LHC y los estudios FCC y CLIC. El número de estados implicados en estas actividades sigue creciendo más allá del restringido círculo de los NMS que contribuyeron a la construcción del acelerador del LHC.

El aumento del interés general en el CERN se traduce en una demanda creciente de los programas de educación y formación del CERN, que están dentro de la misión del CERN de ayudar a implantar recursos en los países que están desarrollando sus comunidades de física de partículas.

Los logros científicos del CERN a lo largo de los años han ido de la mano con la política de aumentar sus conexiones internacionales y la colaboración científica, tecnológica y educativa con socios de todo el mundo. En vista de esto, en el año 2010, el Consejo aprobó el cambio más radical hasta la fecha del modelo de afiliación al CERN, integrado en una política de ampliación geográfica que permitió ser miembros de pleno derecho a países no europeos, independientemente de su ubicación geográfica. Al mismo tiempo, el Consejo incorporó el nuevo instrumento de Miembro Asociado para facilitar el acceso de nuevos miembros, incluyendo países emergentes fuera de Europa, que no disponen de recursos suficientes para mantener la plena adhesión en el futuro inmediato.

En la actualidad, el CERN tiene 22 Estados Miembros¹, 8 Estados Miembros Asociados² y seis Observadores³. Israel se convirtió en el Estado Miembro 21 en el 2014, mientras que Rumanía se integró como el Estado Miembro 22 en el 2016. Chipre, Serbia y Eslovenia son por el momento miembros asociados en el paso previo a miembros plenos, mientras que India, Lituania, Pakistán, Turquía y Ucrania son simplemente Miembros Asociados. Brasil y Croacia también han solicitado ser Miembros Asociados. En un momento en el que el CERN atrae a nuevos Estados Miembros y Estados Miembros Asociados, continúan los avances en las relaciones formales con los otros Estados no Miembros, por ejemplo con el cierre de nuevos acuerdos de cooperación internacional (ICAs). Hoy en día están vigentes 50 ICAs con una amplia y diversa distribución geográfica y se han establecido contactos científicos para otros muchos⁴.

La política de ampliación geográfica del año 2010 ofrece oportunidades importantes para el futuro de la Organización. Ahora el CERN lo ha convertido en una estrategia, presentada al Consejo en marzo del 2016, para garantizar que la ampliación geográfica consolide la base institucional y refuerce las aspiraciones científicas a largo plazo del CERN. La ampliación no es un objetivo en sí mismo. Más bien, la atención se centra en fortalecer las relaciones con los países que pueden aportar conocimientos científicos y tecnológicos al CERN y a su vez pueden beneficiarse de una mayor participación, al mismo tiempo que se ayuda a fomentar y generar la capacidad en países con comunidades de física de partículas en desarrollo. Es esencial que la adhesión plena y la adhesión asociada sean beneficiosas para la física de partículas de cada país en particular y que los gobiernos continúen invirtiendo en el crecimiento de comunidades nacionales. Al mismo tiempo, la ampliación no debe ser un obstáculo para la eficiencia operativa del Laboratorio.

En conclusión, mirando hacia el futuro, el compromiso del CERN con la comunidad internacional de física de partículas está claramente orientado a continuar con los objetivos establecidos en el Convenio del CERN y en la política de ampliación geográfica, a sabiendas de que investigar la unificación de las fuerzas fundamentales de la Naturaleza requiere unir nuestros esfuerzos por la ciencia a una escala mundial para el beneficio de la disciplina a largo plazo.

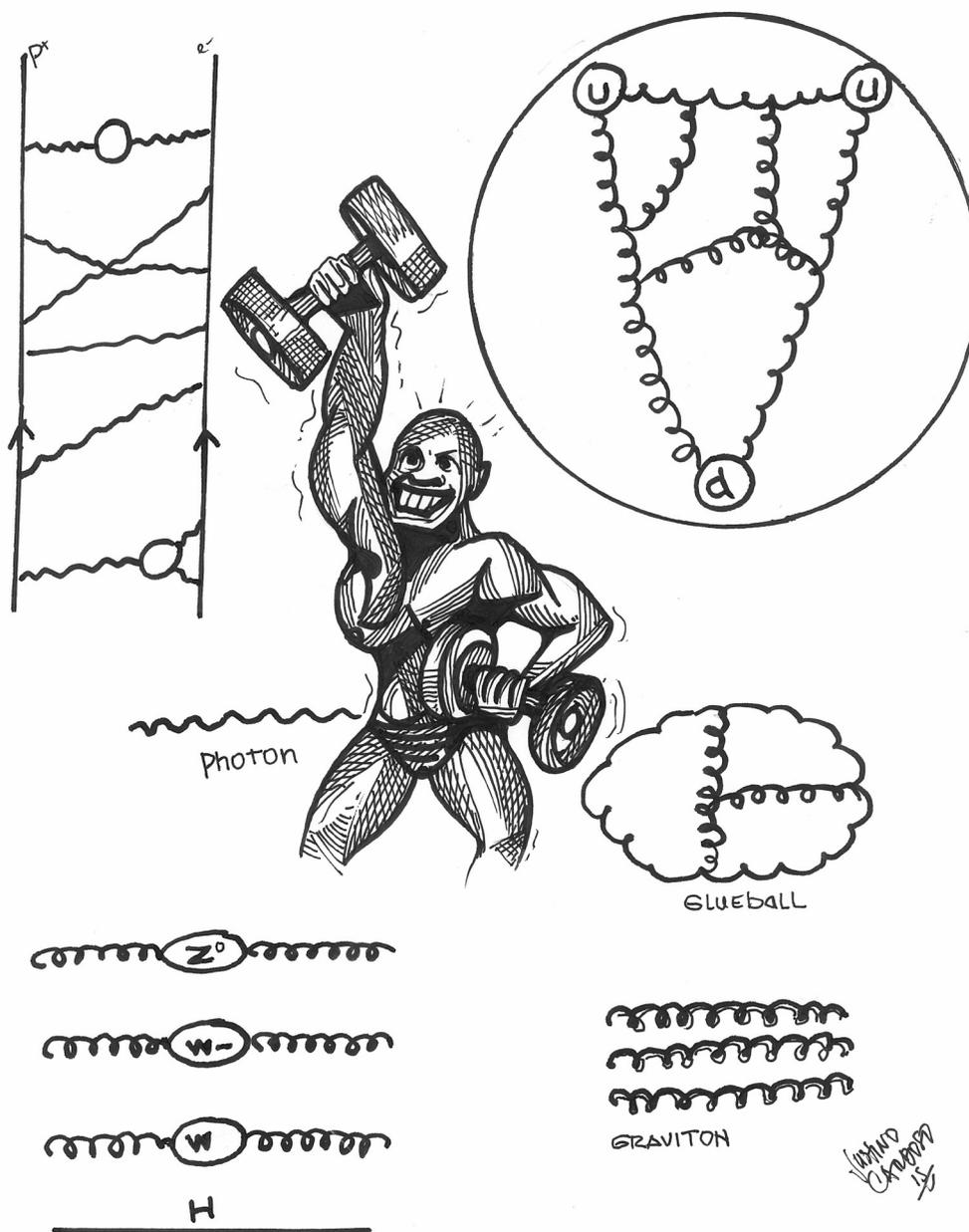
1 Estados Miembros: Alemania, Austria, Bélgica, Bulgaria, Chequia, Dinamarca, Eslovaquia, España, Finlandia, Francia, Grecia, Hungría, Israel, Italia, Noruega, Países Bajos, Polonia, Portugal, Reino Unido, Rumanía, Suecia y Suiza.

2 Chipre, Eslovenia y Serbia son Miembros Asociados en el paso previo a miembros plenos. India, Lituania, Paquistán, Turquía y Ucrania son Estados Miembros Asociados.

3 Observadores: EEUU, Japón, Rusia, Unión Europea, ICIN (Instituto Central de Investigaciones Nucleares) y UNESCO.

4 <http://international-relations.web.cern.ch/stakeholder-relations/Associate-Non-Member-State-Relations>

Estados no Miembros, territorios y regiones colaborando con el CERN: Albania, Arabia Saudí, Argelia, Argentina, Armenia, Australia, Azerbaijón, Bangladesh, Bielorusia, Bolivia, Brasil, Canada, Catar, Chile, China, Colombia, Corea, Costa Rica, Croacia, Cuba, Ecuador, Egipto, Emiratos Arabes, Estonia, Filipinas, Georgia, Ghana, Hong Kong, Islandia, Indonesia, Iran, Irlanda, Jordania, Kazajistán, Latvia, Líbano, Macedonia, Madagascar, Malasia, Malta, Marruecos, Méjico, Mongolia, Montenegro, Mozambique, Nepal, Nueva Zelanda, Omán, Palestina, Perú, Ruanda, Singapur, Sri Lanka, Sudáfrica, Tailandia, Taiwán, Túnez, Uzbekistán, Vietnam.



"The forces" Justino António Cardoso, 2015. Tinta china

Hay cuatro fuerzas o interacciones fundamentales. La interacción fuerte mantiene unidos los quarks y los mediadores son los gluones. La fuerza electromagnética que une los electrones a los núcleos de los átomos y los átomos en las moléculas, es transportada por los fotones. La fuerza débil da lugar a la radioactividad y actúa por medio de los bosones vectores W^+ , W^- y Z . La gravedad es la fuerza que hace caer los objetos, une la materia en los planetas y en las estrellas, y mantiene a las estrellas en las galaxias. Se piensa que es transmitida por los gravitones, pendientes de descubrir.

Modelo Estándar e investigaciones en una nueva física fundamental

John Ellis

¿De dónde venimos?

“¿De dónde venimos? ¿Qué somos? ¿Adónde vamos?” Son preguntas eternas y universales que la gente se ha estado haciendo durante miles de años y que han quedado reflejadas en un conocido cuadro, de ese nombre, pintado por Paul Gauguin en 1897, el año del primer descubrimiento de una partícula elemental: el electrón. Los físicos de partículas reinterpretaron la segunda pregunta de Gauguin como “¿De qué estamos hechos?” dando una respuesta llamada Modelo Estándar, que describe toda la materia visible en el Universo. El éxito final del Modelo Estándar fue el descubrimiento en los experimentos en el gran colisionador de hadrones (LHC, **L**arge **H**adron **C**ollider) del CERN del bosón de Higgs, la última partícula anunciada en el Modelo Estándar. Su descubrimiento proporciona además ideas sobre lo que ocurrió en los primeros instantes del Universo y suscita preguntas sobre su posible futuro, abordando de ese modo las otras dos preguntas de Gauguin.

Pero el Modelo Estándar está incompleto. Por ejemplo, no explica el origen de la materia en el Universo, y tampoco explica la misteriosa materia oscura que permitió la formación de galaxias y las sigue manteniendo unidas. Se siguen con los experimentos del LHC para contestar a estas preguntas, pero los físicos de partículas también debaten cuáles deben ser los siguientes pasos en la cruzada universal formulada por Gauguin. Las colisiones en el LHC e instalaciones similares recrean los procesos acaecidos en los primeros instantes de la historia del Universo, colisiones a energías superiores a las del LHC nos permitirán mirar todavía más atrás en el tiempo. Por tanto, una opción es construir una versión más potente del LHC en un túnel circular mayor. El LHC colisiona protones (núcleos de hidrógeno) a energías hasta aproximadamente 14 000 veces el equivalente de la energía de su masa en reposo, y ese acelerador circular de mayor energía podría hacer colisiones a 100 000 veces la energía de la masa del protón en reposo. Estas colisiones podrían revelar finalmente el origen de la materia oscura que llena el Universo. Otra posibilidad sería hacer colisionar electrones con sus antipartículas. Esas colisiones serían a energías más modestas, pero podrían en principio proporcionar una información más precisa sobre las partículas resultantes, como el bosón de Higgs. Estas investigaciones de alta precisión nos ayudarían a comprender mejor que roles tuvo en la formación inicial del Universo, y podría proporcionar pistas indirectas sobre la nueva física más allá del Modelo Estándar.

El siguiente paso en la física de partículas será un desafío verdaderamente global, que requiere el desarrollo de nuevas tecnologías, la formación de muchos ingenieros y científicos, recursos financieros importantes y un amplio apoyo político. Las competencias requeridas abarcarán desde la ingeniería civil a la informática pasando por la criogenia, ciencia de los materiales y la electrónica. Muchas de estas tecnologías tendrán otras aplicaciones además de contestar las preguntas de Gauguin. Ahora es el momento de pensar juntos como cumplir con este reto a la curiosidad humana.

El Modelo Estándar y las nuevas investigaciones

La física de partículas nos ha proporcionado una teoría, llamada Modelo Estándar, que describe satisfactoriamente toda la materia visible del Universo. Sin embargo, en paralelo, los astrofísicos y los cosmólogos han mostrado que el Universo contiene mucho más de lo que está a la vista, incluso de los telescopios astronómicos. En 1930, el astrónomo suizo Fritz Zwicky descubrió que las galaxias en el cúmulo cercano Coma se movían alrededor por un campo gravitatorio tan potente que no podía ser generado por la materia visible en el cúmulo. Sugirió que este campo gravitatorio adicional podía ser debido a una “masa oscura” invisible que no emite luz.

Esta idea radical tardó en ser aceptada, pero otros indicios significativos llegaron en 1970 con las mediciones de los movimientos de las estrellas en diferentes galaxias, realizadas por la astrónoma americana Vera Rubin y otros astrónomos. A diferencia del sistema solar, en el que los planetas más

alejados del sol se mueven más lentamente, de acuerdo a las leyes de Kepler, se encontró que las estrellas que están más distantes de los centros de las galaxias se mueven a velocidades similares a las estrellas cercanas y más rápido de lo calculado en base a la gravedad debida a la materia visible. Estas observaciones indican que debe existir una materia extra, una materia oscura invisible, mucho mayor de la que vemos, rodeando a las galaxias. Muchas observaciones posteriores han validado la hipótesis de la materia oscura.

Sin embargo, fue una gran sorpresa a finales de 1990 y principios del 2000 cuando los astrónomos descubrieron que además de la materia oscura aglomerada en galaxias y cúmulos debe existir una distribución adicional de energía a través del espacio “vacío” entre ellos. Esta llamada “energía oscura” está provocando que el Universo se expanda a un ritmo acelerado, a diferencia de la materia oscura cuya atracción gravitatoria causaría la desaceleración de la expansión del Universo. En total la densidad de la energía oscura debe ser 3 veces superior a la de la materia oscura.

¿De qué puede estar compuesta la materia oscura? Una idea popular es que podría ser un tipo desconocido de partícula masiva de interacción débil. El Modelo Estándar no contiene ningún posible candidato, pero muchas de las extensiones del Modelo Estándar si lo hacen. Una sugerencia común es que la partícula de la materia oscura pesaría entre 100 a 1000 veces la masa del protón, lo cual supondría que se podría generar en el gran colisionador de hadrones (LHC) del CERN. Los experimentos en el LHC han estado pendientes de detectar colisiones en las que una gran cantidad de energía se transforma en partículas invisibles de materia oscura sin conseguir hasta ahora ningún resultado. Las investigaciones en el LHC continúan con energías más altas, pero el descubrimiento de la materia oscura puede requerir un colisionador futuro de mayor energía. Alternativamente, hay experimentos que buscan la materia oscura directamente en astrofísica, por ejemplo, el AMS (**A**lpha **M**agnetic **S**pectrometer) de la estación espacial internacional busca partículas que pudieran haber sido producidas por partículas de la materia oscura que se aniquilan en el espacio interestelar. La sala de control del AMS está alojada en el CERN.

¿Y qué hay de la energía oscura? La posibilidad de su existencia fue inicialmente sugerida por Albert Einstein en 1917 cuando la denominó la constante cosmológica. Todas las teorías de la física fundamental predicen la contribución a la densidad de la energía oscura en el Modelo Estándar, por ejemplo, vía el bosón de Higgs. Así que su presencia no debería ser una sorpresa. No obstante, estas teorías hacen unas predicciones de energía oscura muy superiores a las cantidades descubiertas por los astrónomos. El enigma es más bien por qué la densidad de la materia oscura es tan pequeña. Los estudios sobre el bosón de Higgs en el LHC y en los futuros colisionadores pueden arrojar algo de luz sobre este oscuro enigma. Una posibilidad es que la energía oscura sea simulada por una nueva partícula cuya masa dependa de la densidad local de la materia. Esa partícula “camaleónica” sería muy difícil de detectar experimentalmente, como su homónimo el lagarto que cambia de color.



“Strings propagate through space and interact” Justino António Cardoso, 2015. Tinta china

Muchos físicos teóricos piensan que, al nivel más fundamental, las partículas elementales podrían ser cuerdas vibrantes y tratan de construir modelos de la materia basados en esta idea. (Cita de John Ellis)



"The search is open" Justino António Cardoso, 2015. Tinta china

Aceleradores: cómo y porqué

Lucio Rossi

Accelerate, v. *move or cause to move more quickly (OED)*.¹ Desde los tiempos del manifiesto del Futurismo en 1909, la aceleración ha sido uno de los signos de la época contemporánea. Los aceleradores de partículas, inventados en el siglo XX, son un producto típico de este período cuando se derribaron barreras y se superaron las fronteras del conocimiento.

Rutherford fue el primero en entender que se puede desvelar la estructura atómica bombardeándola con partículas nucleares, abriendo el camino hacia los aceleradores de partículas. En su famosa conferencia inaugural de 1927 como presidente de la Royal Society dijo: “El avance de la ciencia depende en buena medida del desarrollo de nuevos métodos técnicos y sus aplicaciones (...) Desde el punto de vista puramente científico, el interés se centra en la aplicación de estos altos potenciales a los tubos de vacío para obtener un suministro abundante de electrones y átomos de alta velocidad (...) Esto nos abrirá las puertas de un campo de investigación extraordinariamente interesante que no dejará de darnos información muy valiosa, no solo en cuanto a la constitución del núcleo del átomo sino también en otras muchas direcciones”. Hoy en día es fácil reconocer lo buen profeta que fue.

Breve descripción de un acelerador

Los aceleradores se han dividido según dos configuraciones principales:

a) *Linacs. Aceleradores lineales* en los que una disposición lineal de las cavidades de RF proporciona la aceleración múltiple. Más cavidades implican energía más alta. Sin embargo, el tamaño y el coste de los aceleradores aumenta en consecuencia.

b) *Aceleradores circulares*, en los que el haz pasa a través de las cavidades millones de veces, hasta que se llega a la energía máxima. En estas máquinas, como el LHC, la región de las cavidades es muy corta, apenas unas decenas de metros de los 27 km de longitud total, mientras que la parte magnética es mucho más larga.

Un acelerador de partículas tiene cuatro componentes principales:

a) Una cámara de vacío, de la cual se extraen moléculas y átomos dejando un vacío de alrededor de 10^{-7} y 10^{-10} mbar (casi un millar de billones de moléculas menos por unidad de volumen que en la atmósfera terrestre a nivel del mar)

b) Un campo eléctrico que acelera las partículas (que están cargadas eléctricamente)

c) Un campo magnético que desvía las trayectorias de las partículas (un dipolo magnético generado por un imán bipolar)

d) Varios tipos de cuadrupolos (imanes de 4 polos) que guían el haz de partículas y aseguran que las partículas no se tuercen e impacten en el tubo de vacío.

En un acelerador, diminutas partículas subatómicas se ensamblan en una nube formando una estrecha y larga línea, llamada haz de partículas. El haz generalmente no es continuo: las partículas se agrupan en racimos. El haz de partículas acelerado se puede utilizar para bombardear un objetivo fijo, normalmente una lámina fina, una cámara de gas, un sólido grueso o un líquido. En la década de los 60, Bruno Touschek propuso y construyó el primer colisionador de partículas, AdA en Frascati, Italia. En AdA, un haz de partículas se aceleraba y a continuación se estrellaba contra otro haz de partículas viajando en la dirección opuesta. Desde entonces, casi todos los aceleradores de gama alta han sido principalmente utilizados en modo colisionador.

Los *campos eléctricos* dan velocidad (momento) a las partículas: generalmente estos campos son de ondas electromagnéticas, con frecuencias en el rango de ondas de radio/TV a microondas. Estos se denominan campos de radiofrecuencia (RF), dado que inicialmente se usaron frecuencias de 10-200 MHz. Sin embargo, en los aceleradores modernos se emplean actualmente frecuencias de decenas de GHz (dentro de las frecuencias de microondas). Estas ondas electromagnéticas están

1 Acelerar, v. mover o hacer que se mueva más rápido (Oxford English Dictionary)

atrapadas en una caja metálica “vacía”, denominada cavidad RF, muy similar a la onda acústica atrapada en el tubo de un órgano. Cada vez que un haz pasa por la cavidad recibe un empujón, siempre y cuando entre con la fase correcta, muy parecido a los surfistas impulsados hacia adelante mientras se mantienen en la cresta de la ola. Una cavidad puede proporcionar un voltaje de 1-10 MV (lo que energía llamamos 1-10 MeV). Para conseguir gigaelectronvoltios (GeV) o teraelectronvoltios (TeV, la energía del LHC) el haz debe pasar por una cavidad miles, incluso millones de veces.

Los *campos magnéticos* son necesarios para guiar las partículas. Los imanes más abundantes son dipolos, en los que un campo magnético uniforme desvía las trayectorias de las partículas en un circuito curvo. La disposición de los dipolos mantiene a las partículas en un circuito circular. Cuanto más potente sea el dipolo magnético, mayor será la fuerza centrípeta (a veces llamada fuerza de Lorentz) de las partículas. En un acelerador circular la energía de la partícula está dada por una relación simple (en una aproximación relativista): $E_{\text{haz}} = 0,3 BR$, donde B es el valor del campo magnético y R es el radio de círculo recorrido por las partículas. Con unos parámetros de 8,3 Tesla de los campos magnéticos del LHC y 2,8 km de radio consigue una energía de 7 TeV para cada haz, equivalente a la aceleración proporcionada por 7 billones de voltios. No obstante, las cavidades RF del LHC solo proporcionan unos 10 MV por lo que el haz debe pasar millones de veces para alcanzar la energía máxima. Gracias al poder de desviación de sus 1232 dipolos, cada uno de 15 m de longitud y ocupando un total de 18 km de los 27 km del túnel del LHC, las partículas se mantienen en el circuito a medida que se aceleran. Los campos magnéticos tienen también la misión de estabilizar los haces contra cualquier pequeña desviación de la trayectoria ideal. Igual que los conductores mantienen sus vehículos en la carretera mediante continuos y pequeños ajustes del volante, en los aceleradores los imanes llamados cuadrupolos (con 4 polos) compensan en los intervalos de los dipolos las inevitables imperfecciones de las trayectorias. Sin los cuadrupolos, cualquier máquina, linear o circular, no funcionaría porque los haces rápidamente divergirían y chocarían con la cámara de vacío. En el LHC, la envuelta del haz es de aproximadamente 1 mm, gracias a sus 400 cuadrupolos. Así que el haz en el LHC es una serie de paquetes cilíndricos, de 1 mm de diámetro y alrededor de 20-30 cm de longitud, separados por 7,5 m, o 25 nanosegundos de tiempo. Cerca de 2800 paquetes llenan cada uno de los dos anillos de circulación de 27 km.

Hay otros muchos tipos de imanes desde sextupolos (seis polos) hasta dodecapolos (12 polos) cada uno subsanando una inestabilidad específica.

La cadena LHC

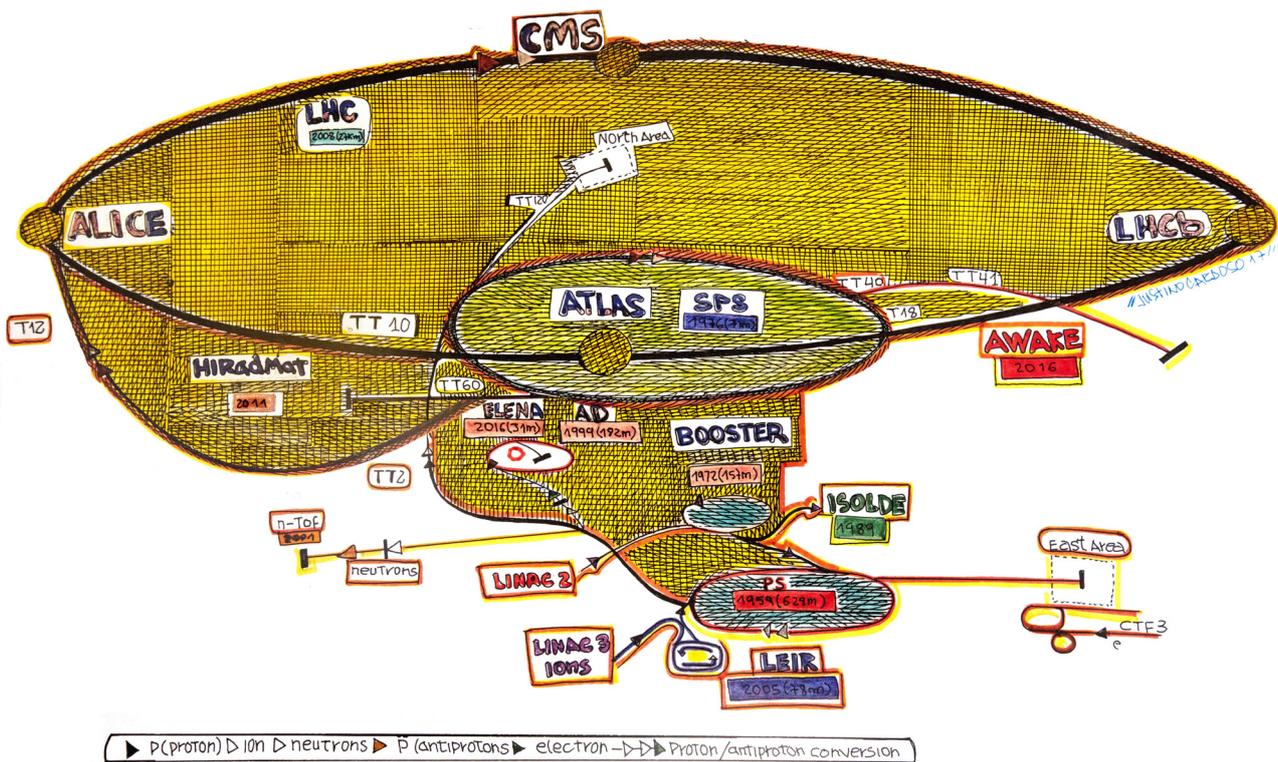
El LHC es el mayor y la etapa final de una cadena de aceleradores. Todo empieza cuando moléculas de hidrógeno, extraídas en forma de gas de una botella, son ionizadas por medio de una descarga eléctrica para formar un plasma, un gas cargado de partículas similar al que se encuentra en estrellas como el Sol. Después, los núcleos con carga positiva, llamados protones, son separados de los electrones por medio de unos campos eléctricos estáticos, formando un haz que es acelerado hasta 50 MeV con un Linac de unos 30 m de longitud. El haz se introduce en un acelerador circular, un sincrotrón de 150 m de longitud llamado el Booster, que acelera los haces hasta 1400 MeV (1,4 GeV). Entonces el haz es conducido dentro del Protón Sincrotrón (PS) de 600 m de circunferencia, el más antiguo de los aceleradores del CERN inaugurado en 1959, que acelera el haz de protones hasta 25 GeV. Después las partículas son inyectadas en el Super Protón Sincrotrón (SPS)² de 7 km de largo, que los impulsa hasta los 450 GeV. Finalmente, los protones son inyectados en el LHC: se forman 2 haces y se les hace rotar en direcciones opuestas y entonces son acelerados hasta 7000 GeV (es decir 7 TeV) que liberan en las colisiones frontales 14 TeV de energía en el centro de masa. La cadena completa mide más de 40 km de largo, de los cuales 27 km corresponden al LHC. Las primeras máquinas están al nivel del suelo. El SPS es un túnel a 40 m de profundidad. Cada una de las piezas de esta compleja máquina es una maravilla, y las decenas de miles de piezas de este complejo

² El SPS se transformó durante un corto período de tiempo en un colisionador de protones-antiprotones, permitiendo descubrir en 1983 en el CERN los Z y W bosones, por lo que Carlo Rubbia y Simon van Der Meer recibieron el premio Nobel en 1984.



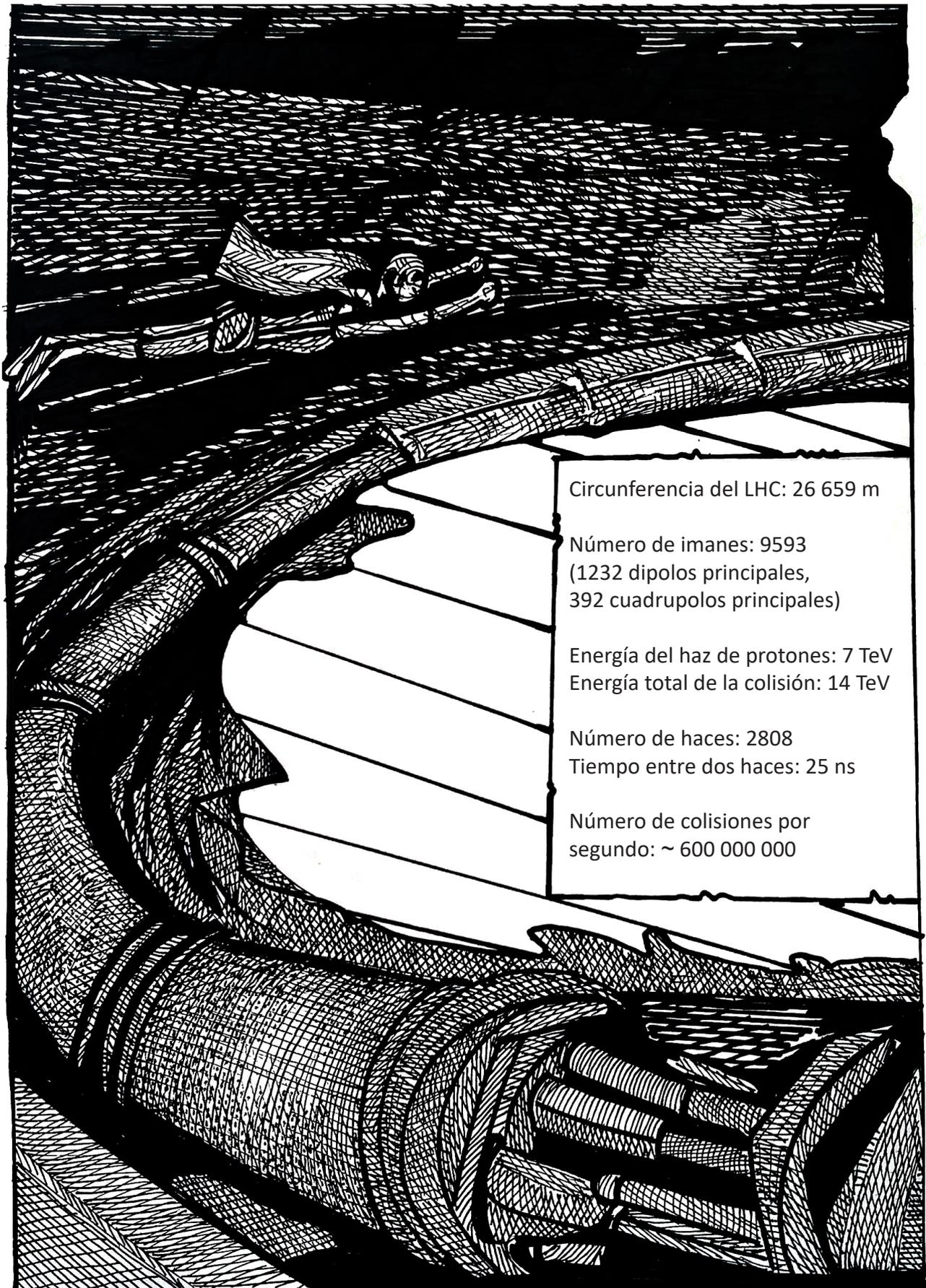
“Congetture circolari” Angelo Falciano, 2011. Acrílico en masonite

En el acelerador, las partículas corren a gran velocidad: de lo conocido hacia lo desconocido.

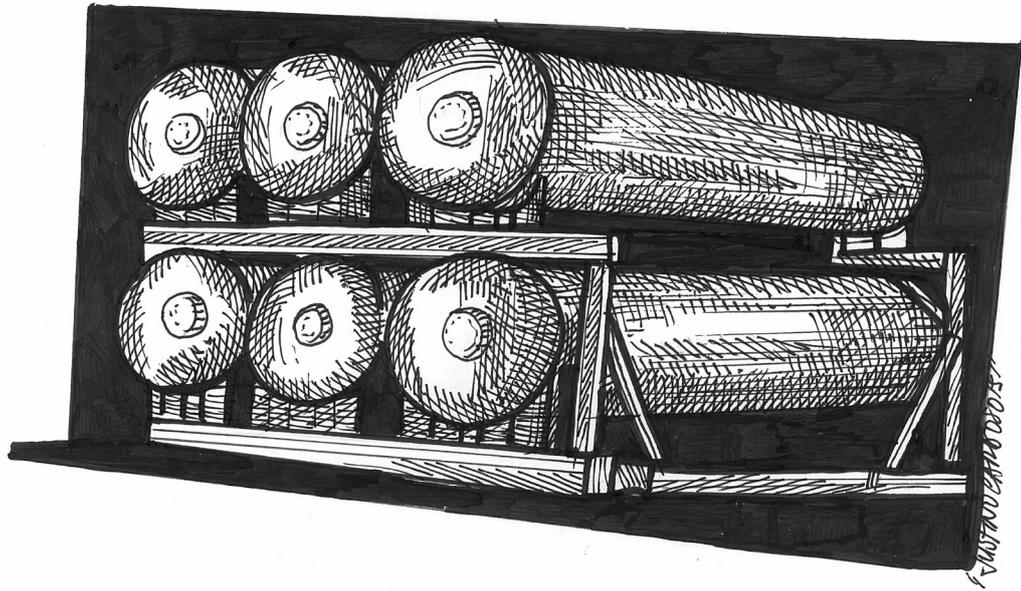
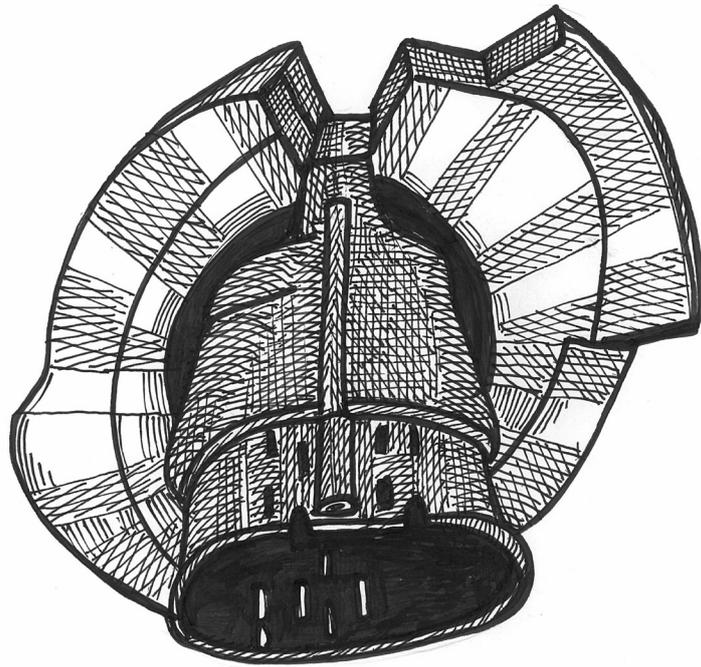


“CERN’s accelerator complex” Justino António Cardoso, 2015. Tinta china y color
(de OPEN-PHO-CHART-2013-001-1, fotografía: Fabienne Marcastel)

La cadena del LHC incluye: el Linac2, el PSB (PS Booster), el PS (proton sincrotrón) y el SPS (Super PS) que está conectado al LHC a través de los túneles T12 y T18.



“Energetic protons in a circular collider” Justino António Cardoso, 2015. *Tinta china*



“Superconducting coils of an LHC magnet and vacuum beam pipe” Justino António Cardoso, 2015.
Tinta china

“Tanks of liquid helium to cool the LHC” Justino António Cardoso, 2015. *Tinta china*

equipo tienen que funcionar conjuntamente para llevar los protones de la botella de hidrógeno a colisionar en los experimentos del LHC a 14 TeV y generar nuevas partículas incluyendo el famoso bosón de Higgs.

Una tecnología potente: superconductividad

La búsqueda de energías cada vez más altas no puede satisfacerse simplemente haciendo las cosas más grandes; hay un límite al tamaño de un acelerador. Una forma de limitar el tamaño es incrementar el campo magnético, puesto que un campo mayor equivale a más energía. Gracias al hecho de que en un superconductor la resistencia eléctrica es cero, los cables superconductores permiten corrientes enormes sin disipación de energía, y una corriente más alta equivale a un campo mayor. En el LHC alimentamos los imanes con corrientes de 12 000 A sin generar ningún calor en la bobina. Gracias a esto, los imanes de los aceleradores son 5 veces más potentes que los imanes de los aceleradores que usan tecnología convencional. El corazón superconductor del LHC se encuentra en sus 300 000 km de cable superconductor de 1 milímetro de espesor, hecho de una matriz de cobre puro en la que miles de finos filamentos de una aleación preciosa de niobio-titanio, Nb-Ti, dan lugar a la superconductividad: hay 2100 millones de km de filamentos superconductores en los imanes del LHC ¡suficientes para ir al Sol y regresar siete veces!

Estamaravillaes posible a costa de un desafío tecnológico extremo: la aleación superconductora de Nb-Ti utilizada en el LHC requiere una temperatura extremadamente baja de $-271\text{ }^{\circ}\text{C}$, una temperatura menor que la del espacio exterior y que se consigue gracias al helio superfluido. El LHC es la instalación criogénica más grande del mundo, y sus enormes refrigeradores consumen alrededor de 50 MW. Esto no es una cifra pequeña. Sin embargo, un LHC sin superconductividad, con una tecnología magnética convencional hubiera requerido un anillo de 100 a 120 km, con un consumo eléctrico de alrededor 1000 MW, la potencia generada por una planta nuclear de tamaño considerable. La superconductividad ha sido sin lugar a dudas una buena inversión, desde el punto de vista tecnológico, económico y medio ambiental.

Física moderna en uso

1. Relatividad. Una característica interesante de los aceleradores es la aparición macroscópica de extraños efectos de la física moderna. El hecho de que impulsemos las partículas hasta velocidades próximas a la velocidad de la luz significa que vemos cosas anticipadas por Einstein a escala macroscópica. Según las partículas se aproximan a la velocidad de la luz en los aceleradores del CERN, aceleran menos cuanto más rápido van. Su celeridad se satura a la velocidad de la luz y en su lugar comienza a aumentar la masa o, hablando con precisión, el impulso. Detectamos este efecto muy fácilmente, porque si no tomamos las contramedidas perderíamos las partículas. Según aumenta su masa, se moverían fuera de la órbita porque velocidad, masa y campo están finamente sincronizados. Esto fue evidente para el inventor de los aceleradores circulares Ernest O. Lawrence tan pronto como comenzó a construir ciclotrones en la década de los 30. Otro efecto interesante es el hecho de que cuando partículas inestables, de vida corta, son aceleradas su ciclo de vida se extiende, exactamente como Einstein predijo en la Teoría de la Relatividad Especial en su *Annus mirabilis* de 1905.

2. Microscopios y mecánica cuántica. Los aceleradores pueden ser considerados como super-microscopios que nos permiten mirar el mundo de lo infinitesimalmente pequeño. La resolución de un microscopio, dejando a un lado todos los límites técnicos e imperfecciones, está limitado por los efectos de difracción de la longitud de onda de la luz empleada. Esta es la razón por la que los microscopios que usan luz visible están limitados a aproximadamente 500 nanómetros (nm). Sin embargo, si empleamos rayos X (ondas electromagnéticas de la misma naturaleza que la luz pero con longitudes mucho más cortas de 0,1-1 nm) podemos visualizar átomos que son aproximadamente de ese tamaño. La mecánica cuántica nos enseña que las partículas se comportan como ondas con una longitud de onda $\lambda = hc/E$ (h es la constante de Planck, c la velocidad de la luz y E la energía de la partícula). Cuanto mayor sea la energía de la partícula, menor será la longitud de onda asociada.

Al acelerar partículas hasta 7 TeV, el CERN consigue una longitud de onda de 10^{-19} m; es decir, una milmillonésima de los 0,1 nm accesibles a los microscopios electrónicos. Los experimentos del LHC investigan escalas de distancias mucho más pequeñas que los átomos y los núcleos atómicos, arrojando luz en distancias 10 000 veces menores que el mismo protón. Por esto el LHC nos lleva hasta la infancia del Universo, cuando no era mayor que eso: ¡alrededor de una billonésima de segundo después del Big Bang!

Cuál es el futuro para los aceleradores HEP

Los aceleradores no se utilizan únicamente para la Física de Alta Energías (HEP); en la industria y en la medicina se emplean miles de aceleradores, y en la investigación aplicada, cientos de ellos, especialmente fuentes de luz sincrotrón. Sólo unas pocas decenas de aceleradores se usan para las partículas fundamentales y la investigación nuclear. No obstante, la física de partículas es sin duda el principal motor tecnológico para la innovación en el campo de los aceleradores.

Entonces ¿cuál es el siguiente paso después del LHC? Primero está el **LHC de Alta Luminosidad** (HL-LHC). Este proyecto basado en nuevos imanes superconductores, aproximadamente 50 % más potentes que los utilizados hoy en día en el CERN, es una nueva configuración del CERN que incrementará en gran medida el número de colisiones. Será como encender la luz en una habitación con poca luz, permitiéndonos ver mucho mejor y descubrir detalles que de otra forma permanecerían ocultos en la oscuridad. El HL-LHC, actualmente en construcción, se instalará en el 2024-2025 y será operativo hasta casi el 2040. Mientras tanto una numerosa red de laboratorios e instituciones de todo el mundo está colaborando con el CERN para estudiar las nuevas máquinas que definirán la era de los aceleradores posterior al LHC y HL-LHC.

En la actualidad se están considerando dos proyectos gigantes:

1. *Un colisionador lineal electrón-antielectrón*: dos opciones compiten en esta área. Uno es el Colisionador Internacional Lineal, ILC, una máquina de 30 km de longitud basada en cavidades superconductoras; el otro llamado Colisionador Lineal Compacto (CLIC), con cavidades RF de alta frecuencia (12 GHz), una apertura milimétrica del haz y una precisión nanométrica de la alineación a lo largo de los 50 km de túnel. Mientras el ILC está limitado a 0,5-1 TeV, el CLIC podría alcanzar los 3 TeV en el centro de masa, aunque con un consumo eléctrico muy elevado, 600 MW (¡sin superconductividad!).
2. *Un Futuro Colisionador Circular (FCC)* basado en un anillo de 100 km. En este, mediante la utilización de imanes superconductores potentes, el doble de potentes que los imanes del LHC, se podrían prever colisiones protón-protón a 100 TeV en el centro de masa. Alcanzar esta energía sin precedentes depende en gran medida del desarrollo de una nueva tecnología de superconducción para los aceleradores magnéticos. Los imanes del FCC deben ser el doble de fuertes que los del LHC. El desarrollo de la tecnología para los imanes del FCC ya ha comenzado basándose en los resultados del HL-LHC, el primer paso más allá del LHC. ¿Cuál de estos dos proyectos ganará la carrera? Es demasiado pronto para decirlo.

Para preparar la próxima actualización de la Estrategia Europea de Física de Partículas en el 2020, un proceso donde todos los grandes laboratorios europeos están involucrados, el CERN ha emprendido un estudio completo del FCC con 100 km de túnel, incluyendo la evaluación de la geología y la obra civil, con el considerable problema de pasar bajo el lago de Ginebra y varias cadenas montañosas. El final de esta década es el mejor momento para tomar decisiones, puesto que los resultados del LHC Run 2 (2015-2018) estarán disponibles y no es demasiado pronto para prepararse para la nueva generación de aceleradores que vendrán después del 2040, puesto que estos proyectos tienen ciclos de desarrollo de veinte años. Entretanto confiamos que las nuevas tecnologías que se están generando para el LHC de Alta Luminosidad encontrarán en breve aplicaciones prácticas, por ejemplo, en los sectores de la medicina y las energías renovables.



"A look into the future" Justino António Cardoso, 2015. *Tinta china*



“Quarks” Margarita Cimadevila, 2004. Acrílico y técnica mixta sobre lienzo
www.cimadevila.tk

En el modelo tradicional de los quarks, las partículas de interacción fuerte (hadrones) se unen en grupos de dos y tres ya sea en pares quark-antiquark (mesones) o tres quarks (bariones). Las partículas que no se pueden clasificar dentro de este esquema se llaman partículas exóticas, tetra-quarks y penta-quarks. En el 2016, los experimentos LHCb confirmaron la existencia de penta-quarks, descubrimiento anunciado en 2015.



“Simon van der Meer and Carlo Rubbia celebrate their awarding of the Nobel Prize in 1984 with a toast at CERN” (CERN-PHOTO-8410523)

El premio Nobel de física de 1984 se concedió conjuntamente a Carlo Rubbia y Simon van der Meer “por sus contribuciones decisivas a los grandes proyectos que condujeron al descubrimiento de las partículas de campo W y Z, mediadoras de la interacción débil”.



“François Englert and Peter Higgs at CERN in 2012” Islam Mahmoud Sweity, 2014. Dibujo a carboncillo (de una foto realizada por Maximilian Brice, CERN).

El premio Nobel de Física de 2013 se concedió a François Englert y Peter Higgs “por los descubrimientos teóricos de un mecanismo que contribuye a nuestra comprensión del origen de la masa en las partículas subatómicas, y que fue recientemente confirmado por el descubrimiento de la partícula fundamental que habían pronosticado en los experimentos Atlas y CMS en el Gran Colisionador de Hadrones del CERN”.

Los físicos y sus experimentos

Ana Maria Henriques Correia y João Martins Correia

La pequeña historia que vamos a contar es sobre el CERN con sus aceleradores gigantes y los inmensos detectores de partículas y cómo esa infraestructura (única en el mundo) aporta ideas para emplearlas en otros campos de la ciencia, al mismo tiempo que genera una ingeniería compleja que se emplea en la vida cotidiana. Empezando con los experimentos en el LHC del CERN el mayor acelerador de partículas, que básicamente hace colisionar partículas a una energía muy (¡muy!) elevada para romperlas y fusionarlas liberando los elementos originales de la materia. El CERN recrea los procesos que ocurrieron en el inicio de la historia del Universo utilizando máquinas y detectores sofisticados.

ATLAS (A Toroidal LHC ApparatuS) y **CMS (Compact Muon Solenoid)** son los dos mayores experimentos de los cuatro principales del LHC. Son experimentos de física de partículas de carácter general, diseñados para explotar al máximo el potencial de descubrimientos que el LHC proporciona. ATLAS es el detector de colisión de partículas de mayor volumen jamás construido, un cilindro con unas dimensiones de 46 m de largo por 25 m de diámetro que pesa 7000 toneladas, similar al peso de la torre Eiffel. ATLAS está ubicado en una caverna a 100 m de profundidad. En comparación, el detector CMS “solo” mide 21 m de longitud y 15 m de diámetro. Se ha construido alrededor de un inmenso imán solenoide que genera un campo de 4 Tesla, unas 100 000 veces el campo magnético de la Tierra. El campo magnético está encapsulado en una cubierta de acero que forma el grueso del detector de 14 000 toneladas de peso, el doble que la torre Eiffel. Los detectores son capas de instrumentos concebidos para detectar algunas de las partículas más diminutas y sin embargo más energéticas que jamás se han generado en la Tierra. Son diferentes subsistemas dispuestos concéntricamente en capas alrededor del punto de colisión para registrar la trayectoria, el momento y la energía de las partículas, permitiendo identificarlas y registrarlas individualmente. Sistemas magnéticos enormes desvían la trayectoria de las partículas cargadas para poder medir con la mayor precisión posible sus momentos.

Antes de provocar la colisión, los haces de partículas se almacenan en paquetes dentro del anillo de 27 km del LHC y se aceleran a velocidades próximas al 99,999999 % de la velocidad de la luz. De vez en cuando, las trayectorias de las partículas se desvían de forma que los haces colisionan en el centro del ATLAS y de los detectores CMS. Cuando esto ocurre, parte de la energía de la colisión se convierte en masa y en partículas previamente no detectadas de corta vida que vuelan en todas las direcciones en el detector, dando pistas sobre como la Naturaleza funciona a un nivel fundamental. Más de un billón de interacciones de partículas tienen lugar cada segundo en el centro del detector, una tasa de datos equivalente a la realización de 20 conversaciones de teléfonos simultáneas mantenidas por cada persona en el planeta. De media solo una entre un millón de colisiones es considerada como potencialmente interesante y registrada para ser analizada posteriormente. El 4 de julio del 2012, ATLAS y CMS anunciaron el descubrimiento del bosón de Higgs con una masa en reposo de 126,5 GeV de energía y con un nivel de confianza de 4,9 sigma. En la actualidad, los experimentos del LHC están analizando más detalladamente las propiedades y características del bosón de Higgs, explorando el territorio de energías más altas. El bosón de Higgs existe durante menos de una milésima de una billónésima de una billonésima de segundo antes de desintegrarse. Pero ¿pueden encontrarse otras partículas exóticas con una vida más larga? Estas partículas apenas interactuarían con la materia ordinaria pero su existencia proporcionaría una dirección a la física más allá del Modelo Estándar.

De los otros experimentos del LHC, el **LHCb (Large Hadron Collider beauty)** estudia que pasó en los primeros segundos después del Big Bang, cuando la antimateria desapareció dejando solo la materia para formarnos a nosotros, el mundo en que vivimos y el Universo que nos rodea. Insospechado por muchos de nosotros, nuestro mundo y nuestra existencia es de hecho un misterio cósmico tremendo. Cuando materia y antimateria se ponen en contacto el resultado es dramático.



“ATLAS Remeshed-Higgs Boson” Davide Anghelèddu, 2016. *Fibras de vidrio y fibras acrílicas, 1,5 m longitud*

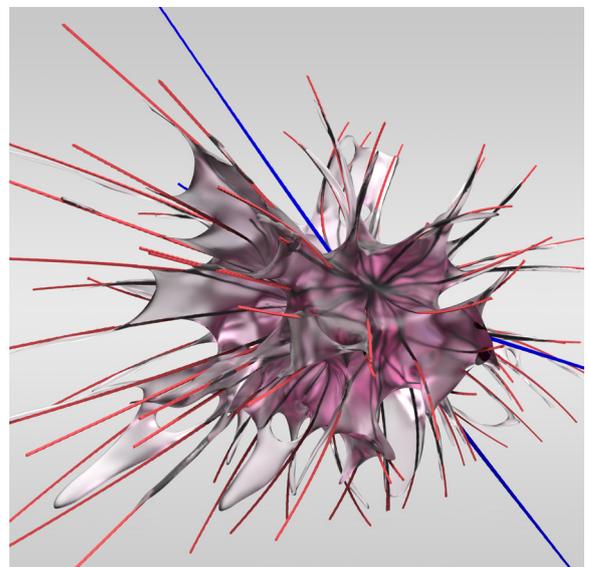
Representación 3D del candidato a bosón de Higgs, amablemente cedido por el experimento ATLAS. El bosón de Higgs se materializa como 2 muones y 2 electrones representados en azul. La escultura se ha hecho en 3 etapas:

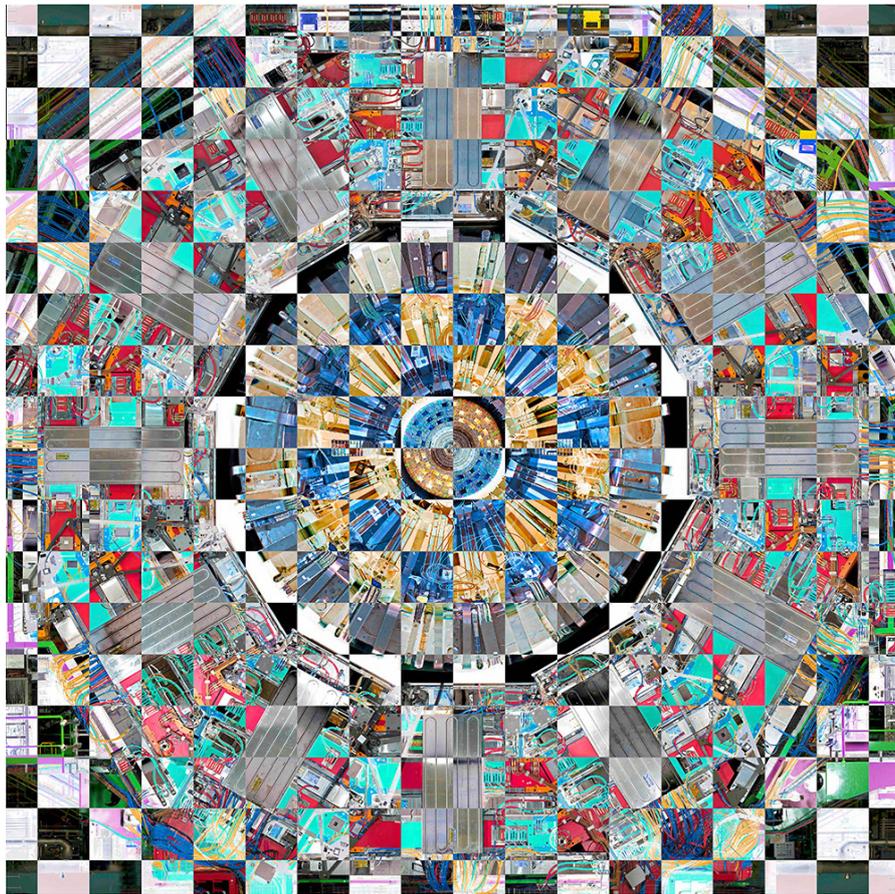
- 1) A la simulación recibida usando un proceso computarizado gráfico de remallado, se le aplica un algoritmo de remallado para generar un modelo virtual de la escultura.
- 2) Mediante sinterización con láser, se genera un modelo de alta precisión en nylon.
- 3) Empleando los antiguos sistemas convencionales de moldeado en cera, se hace la escultura final con el material seleccionado.

Presentado en Julio 2016 en la exhibición “Extreme. In search of particles”, diseñada y producida por el Museo Nazionale della Scienza e della Tecnologia Leonardo da Vinci en Milan, en colaboración con el CERN y el INFN.

La escultura y el video mostrando el proceso de remallado han sido exhibidos en noviembre 2016 en la Grunwald Art Gallery, Indiana University, Bloomington.

“ATLAS Remeshed-Higgs Boson”
Davide Anghelèddu, 2015. *Impresión digital*
www.davideangheleddu.weebly.com





“Matter-Anti-Matter, symmetry 4” Michael Hoch, 2012. Collage de fotos sobre Alu Dibond, 100 x 100 cm, basado en el detector CMS (Compact Muon Solenoid).

CMS, un experimento de alcance general de física de partículas del LHC, es del tamaño de un edificio de oficinas de seis plantas albergando sensores que en algunos casos no son mayores que el espesor de un cabello humano.

En la conferencia EPS-HEP 2017 en Venecia, Michael Hoch, art@CMS founder, recibió el premio 2017 Outreach de la High Energy and Particle Physics Division de la European Physical Society “por iniciativas que iluminan los conceptos y la belleza de la física de altas energías, y las inspiradoras cualidades que son comunes al Arte y a la Ciencia.” El Comité reconoció “el talento excepcional de Michael Hoch para aproximar pensamientos científicos a las mentes del público en general”.

art@CMS es un programa educacional y continuo del experimento CMS en el LHC del CERN. Es una colaboración entre la comunidad de científicos de High Energy Physics, artistas y comunidades artísticas, museos, y profesores de arte y de ciencia. El proyecto comenzó como un intento de construir puentes entre las artes y las ciencias al mismo tiempo que se hacía oír la voz y el trabajo del CMS y el CERN a una mayor audiencia.

Se compone de dos módulos complementarios:

- *Las exhibiciones de art@CMS, con el fin de crear un dialogo entre la comunidad científica HEP y las comunidades artísticas, realizan y presentan obras de arte de artistas colaboradores y promueven exhibiciones individuales y colectivas internacionales.*
- *SciArt Workshops (Science&Art@School): es un seminario interdisciplinar diseñado para introducir a los estudiantes de colegios, institutos y universidades de arte y ciencia al mundo científico de la física de partículas y de la investigación fundamental a través de cuestiones artísticas y con una aproximación interdisciplinar.*

Actuando como una factoría de ideas, art@CMS se erige como una plataforma para aprender y compartir.

En menos de un abrir y cerrar los ojos, ambas desaparecen, destrozándose mutuamente y dejando detrás un destello de energía. Esta relación explosiva levanta algunas preguntas inquietantes. Por ejemplo, si materia y antimateria fueron creadas en cantidades iguales durante el Big Bang, ¿cómo es que vivimos en un Universo formado solo de materia? ¿Pudo darse un mecanismo desconocido que evitase que la materia y la antimateria se destruyeran completamente entre sí? LHCb se ha organizado para estudiar las mínimas asimetrías entre materia y antimateria usando los quarks belleza. Aunque hoy en día hayan desaparecido del Universo, los quarks belleza eran corrientes después del Big Bang y son generados por billones dentro del LHCb con sus correspondientes antimaterias, los anti-quarks belleza. Estudiando con una precisión sin precedentes la escasa diferencia de desintegración entre los quarks belleza y sus antipartículas, LHCb está arrojando luz en uno de los misterios más fundamentales del Universo. Recientemente el LHCb comunicó la observación de la Ξ_{cc}^{++} (Ξ_{cc}^{++}), una nueva partícula formada por dos quarks encanto y un quark up. La masa de la nueva partícula identificada, un baryon doblemente pesado, es alrededor de 3621 MeV, o sea cuatro veces más pesado que un protón.

ALICE (A Large Ion Collider Experiment), otro experimento importante del LHC, está investigando la existencia y las propiedades de la fusión de protones y neutrones cuando liberan en condiciones extremas de temperatura y densidad sus componentes quarks y gluones. Esta sustancia se llama quark-gluon plasma y entre los objetivos de ALICE está comprender su formación. La materia ordinaria está hecha de átomos, cada uno de los cuales consiste en un núcleo rodeado de una nube de electrones. Los núcleos a su vez están formados por protones y neutrones, que a su vez están compuestos por quarks. Los quarks están ligados en los protones y los neutrones por una fuerza que se conoce como la interacción fuerte, realizada mediante el intercambio de unas partículas llamadas gluones. Nunca se ha observado un quark, o un gluon, aisladamente. Tanto los quarks como los gluones parecen estar permanentemente ligados y encerrados dentro de partículas compuestas, tales como los protones y los neutrones. A esto se le conoce como confinamiento. A pesar de que se ha explicado bien la mayor parte de la física de las interacciones fuertes, dos cuestiones básicas siguen sin resolverse: los orígenes del confinamiento y los mecanismos de la generación de la masa. Se sabe que protones y neutrones están formados por tres quarks, pero sumando las masas de los tres quarks sólo se obtiene alrededor de un 1 % de la masa del protón o del neutrón. ¿De dónde viene el 99 % restante?

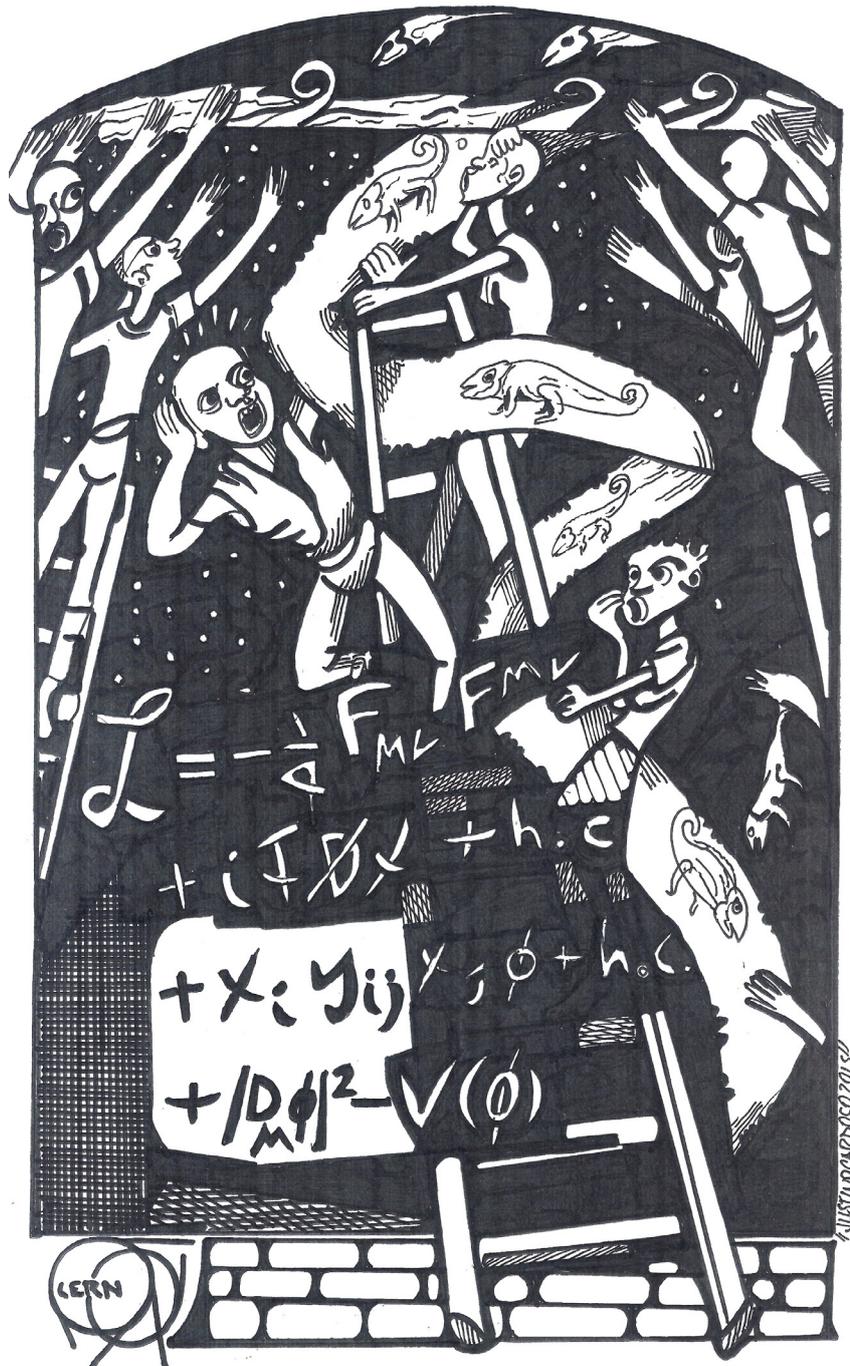
La teoría vigente de la interacción fuerte, llamada cromodinámica cuántica, predice que a muy altas temperaturas y muy altas densidades, los quarks y los gluones no deberían seguir confinados dentro de partículas compuestas. En su lugar deberían existir libremente en un nuevo estado de la materia: el quark-gluon plasma. Ese cambio debía producirse cuando la temperatura excede un valor crítico estimado en ¡100 000 veces más caliente que el núcleo del Sol! Esas temperaturas no han existido en la Naturaleza desde el nacimiento del Universo. Al provocar colisiones frontales de núcleos pesados como núcleos del átomo de plomo, acelerados por el LHC a una velocidad próxima a la de la luz, los científicos consiguen obtener (si bien en un volumen pequeño similar al tamaño de un núcleo y por un instante fugaz) una gota de esa materia primitiva y observarla según se reconvierte en materia ordinaria por medio de expansiones y enfriamientos. Los físicos de ALICE pueden indagar las profundidades de la física del confinamiento, para probar la generación de masa en las interacciones fuertes y tener un atisbo del comportamiento de la materia inmediatamente después del Big Bang.

Más aún, cuando los protones chocan frontalmente en el LHC, las colisiones proporcionan un micro laboratorio para investigar muchos fenómenos, incluyendo los mismos protones. Esta es la física para la que el experimento **TOTEM (TOTAL cross section, Elastic scattering and diffraction dissociation Measurement at the LHC)** ha sido especialmente diseñado. Tomando medidas precisas de las partículas que emergen de las colisiones muy próximas a la dirección de los haces del LHC (la llamada dirección frontal) TOTEM comprueba la física que no es fácilmente accesible en otros experimentos del LHC. Entre una serie de estudios, TOTEM mide la probabilidad total, o sección

representativa, en las interacciones protón-protón. De alguna manera, esta es una medida del tamaño global que un protón presenta como objetivo. El experimento investiga también fenómenos de dispersión análogos a la difracción de la luz.

Alrededor de otras veinte instalaciones experimentales y proyectos diferentes se benefician de la aceleración de los protones y de la experiencia e innovación tecnológica del CERN. Estos nos recuerdan la larga tradición en física de neutrinos del CERN. En la actualidad, el CERN alberga instalaciones I+D de detectores para futuros experimentos con neutrinos en el mundo.

Durante muchos años, el CERN también ha realizado investigaciones sobre antimateria en las instalaciones del AD (Antiproton Decelerator). Recientemente el anillo ELENA (Extra Low Energy



“Chameleon, a hypothetical scalar particle” Justino António Cardoso, 2015. Tinta china

Las partículas camaleón fueron propuestas en 2003 por Justin Khoury y Amanda Weltman.

Antiproton) ha sido inaugurado para decelerar antiprotones proporcionados por la instalación AD de 5,3 MeV a solamente 100 keV. Gracias a ELENA, los físicos no sólo serán capaces de producir y atrapar átomos de antimateria, sino que también podrán estudiar con más precisión las propiedades fundamentales y las interacciones del anti-hidrógeno, helio antiprotónico e iones de antihidrógeno libres o en estados ligados con el objetivo de saber si un mundo completamente hecho de antimateria sería 100 % igual al nuestro, sólo que una imagen especular.

En el Area Norte del acelerador SPS, el experimento **NA64** busca desintegraciones visibles e invisibles de fotones oscuros, una hipotética partícula elemental, propuesta como una fuerza electromagnética portadora de materia oscura, usando haces de electrones. Mientras tanto **CAST** (**Cern Axion Solar Telescope**) intenta detectar axiones o camaleones, partículas teóricas que de existir podrían ser responsables de la materia oscura y de la energía oscura. Juntas constituyen cerca del 95 % del Universo. Los axiones y camaleones podrían originarse en el plasma a 16 millones de grados en el centro del Sol.

Una rama bastante diferente de investigación, menor pero no menos importante, se lleva a cabo en **ISOLDE** (Isotope mass separator) donde se realizan 50 experimentos por año. ISOLDE es una instalación única que produce en continuo una panoplia de núcleos radioactivos sirviéndose de los energéticos protones del acelerador CERN Booster al colisionar y romper los elementos escogidos. De esta forma, ISOLDE hace el papel de las estrellas, proporcionando núcleos radioactivos exóticos a los investigadores que estudian la física nuclear y atómica, la física de estado sólido y la ciencia de los materiales y la vida. La energía en ISOLDE ha sido recientemente mejorada posacelerando los núcleos radioactivos, excitándolos y recreando las condiciones de reacción de su síntesis en las estrellas. Siendo una de las instalaciones más antiguas del CERN, ISOLDE permanece en la primera línea de la investigación nuclear básica y en las aplicaciones de la técnica radioactiva nuclear. Particularmente dedicada a la terapia y a la optimización de los radiodiagnósticos de cancer, las posibilidades de ISOLDE están siendo ampliadas con la construcción de las instalaciones del **CERN-MEDICIS**. Esto ocurre dentro del marco de la colaboración MEDICIS-PROMED, que entrenará a una nueva generación de científicos emprendedores que tenderán puentes entre las instituciones de investigación fundamental, empresas privadas y hospitales. A cambio, esto conllevará una rápida llegada de nuevos tipos de equipos a las empresas y de nuevos radiomedicamentos para tratar el cancer a los hospitales. Esto se realizará mediante el uso de haces de iones radioactivos que hasta ahora no se habían utilizado para fabricar lotes especializados para radiomedicamentos. En 2017, por primera vez la instalación fabricó radioisótopos para la investigación médica.

Por último, pero no menos importante, el experimento **CLOUD** (**Cosmics Leaving Outdoor Droplets**) estudia cómo los rayos cósmicos, partículas que bombardean la atmósfera terrestre desde el espacio lejano, pueden influenciar en la capa nubosa ya sea mediante la formación de nuevos aerosoles (pequeñas partículas suspendidas en el aire que pueden crear semillas de gotas en las nubes) o alterando directamente las nubes. Las nubes tienen un efecto significativo en el balance energético de la Tierra; pequeños cambios en sus porcentajes afectan considerablemente al clima. Sin embargo, a pesar de su importancia para el clima, se entiende muy poco la formación de los aerosoles. Medir la microfísica subyacente en las condiciones controladas en el laboratorio, es importante para un mejor entendimiento de los aerosoles atmosféricos y es clave para descubrir las posibles conexiones entre los rayos cósmicos y las nubes. El Protón Synchrotron es una fuente artificial de rayos cósmicos que simula condiciones atmosféricas naturales desde el nivel del suelo hasta la estratosfera. Se hace pasar un haz de partículas por la cámara de niebla, se registran y analizan sus efectos en la producción de aerosoles, nubes de líquido o nubes de hielo.

Otro distintivo del uso y la utilidad global del CERN es la infraestructura computacional del LHC. Desde que se produjeron las primeras colisiones en el LHC se han generado datos a una ratio sin precedentes del orden diez petabytes por año (1 PB = 1 000 000 000 000 bytes alrededor de 2000 discos duros de 500 GB). Esto significó un reto considerable que se resolvió montando una infraestructura de redes de ordenadores que conectaban en el año 2012 a 140 centros de cálculo

de 35 países. La resultante WLCG (Worldwide LHC Computing Grid) es la mayor red computacional del mundo e incluye más de 170 instalaciones informáticas interconectadas de 42 países. La misión principal del proyecto WLCG es proporcionar recursos informáticos globales para almacenar, distribuir y analizar los muchos petabytes de datos generados en el LHC. En 2017, 12,3 petabytes se almacenaron en un sólo mes. Pero las actividades de la red se extienden a otros muchos proyectos públicos incluyendo Protección Civil, Ciencias de la Tierra, Química Computacional y Ciencias de la Vida, proporcionando cálculo informático para la gestión de datos médicos y análisis.

La única manera de realizar proyectos tan desafiantes, con los recursos intelectuales y financieros requeridos, y para maximizar los resultados científicos es por medio de amplias colaboraciones internacionales con millares de personas. El ejemplo de esta aproximación es la naturaleza universal de los experimentos en el LHC que han atraído participantes de más de 100 nacionalidades, de todos los continentes incluyendo África. Los fondos para los grandes proyectos llegan en forma de inversiones de los organismos de financiación de los países miembros. En los mayores experimentos, ATLAS y CMS, las contribuciones proceden también del CERN y algunos recursos de ciertas universidades.

Para hacer que esto funcione, ATLAS y CMS escogen su dirección con una estructura organizativa que permite a los equipos autogestionarse y a sus miembros verse directamente implicados en el proceso de toma de decisiones.

Los científicos suelen trabajar en grupos pequeños, seleccionando las áreas de investigación y de datos que más les interesan. Cualquier resultado de la colaboración es compartido por todos los miembros, sometido a una revisión rigurosa y a un proceso de comprobación de los hechos antes de hacerse públicos. El éxito de la colaboración está, pues, vinculada por compromisos individuales a la física y la perspectiva de resultados nuevos apasionantes que solo pueden conseguirse con un esfuerzo de colaboración completo y coherente de científicos, innumerables ingenieros y personal administrativo.

Además de ser un mundo único de conocimientos, diversidad y complementariedad que contribuye al desarrollo académico, la educación y la divulgación del estado del arte de la ciencia y la tecnología, el CERN está ya mirando hacia el futuro. Mientras continuamente explora formas para utilizar mejor sus instalaciones de investigación, el CERN también está liderando la exploración de conceptos estratégicos para las instalaciones futuras de física de altas energías. El Laboratorio está estudiando oportunidades futuras para diversificar su cartera de investigación por el equipo de Physics Beyond Colliders Study Group. Todo esto es necesario ya que el Modelo Estándar de partículas no puede explicar varias observaciones, como: la evidencia de materia oscura, la prevalencia de materia sobre antimateria y la masa de los neutrinos.

En palabras de la Directora General del CERN, Fabiola Gianotti, hablando en enero del 2017: *“Sabemos que hay una nueva física, no sabemos donde está en términos de escala de energía y/o acoplamientos, pero necesitamos ser lo más abiertos posible en nuestro enfoque explorador ya que la diversidad científica es un deber: aprovechando las capacidades excepcionales del complejo de aceleradores e infraestructuras del CERN complementariamente con otros esfuerzos en el mundo y optimizando los recursos del área globalmente.”*

La creatividad y la innovación son necesarias para desarrollar los temas de física, encontrar los parámetros requeridos para los aceleradores y realizar experimentos sin precedentes. El considerable plazo de aproximadamente veinte años para el diseño y la construcción de un acelerador a gran escala pide un esfuerzo coordinado. El objetivo es asegurar una continuación ininterrumpida del programa mundial de física de partículas después de la era del LHC. El LHC del CERN con su actualización de alta luminosidad es el instrumento primordial para explorar las fronteras de la física hasta por lo menos el año 2035. Esto nos define el margen de tiempo disponible para preparar la infraestructura de investigación en física de altas energías que sucederá al LHC.



“Accelerators and detectors to understand the Universe” Justino António Cardoso, 2015. *Tinta china*

CERN y tecnología de la información

Frédéric Hemmer

Una mirada al pasado

La historia de la informática en el CERN se remonta a los principios de la Organización. La propuesta de comprar un ordenador electrónico se discutió ya en noviembre de 1955 en la tercera reunión del Comité de Política Científica del CERN presidido por Werner Heisenberg, pionero de la mecánica cuántica. El primer ordenador instalado en el CERN fue el Ferranti Mercury, que tardó dos años en ser construido por los ingenieros de Ferranti. Se instaló en el verano de 1958 y ocupaba toda la sala informática. Tenía un ciclo de reloj de 60 microsegundos. Hoy en día el núcleo de la CPU (**C**entral **P**rocessing **U**nit) es cien mil veces más rápida.

El siguiente paso significativo en la historia de la computación fue la adquisición de un IBM 709 instalado en 1961. Esta era todavía una máquina de válvulas de vacío y fue el primer ordenador que dispuso del lenguaje de programación FORTRAN (**F**ORMula **T**RANSlation). El 709 se actualizó a la versión con transistores, el 7090. Durante el mismo período empezaron a surgir miniordenadores, en general conectados directamente al equipo en salas experimentales, registrando datos en cintas que se llevaban al centro de cálculo para ser analizadas. Al final de los 60 había más de 50 minis distribuidos por las instalaciones. Es interesante pensar que ya en esa época se hicieron intentos de conectar los ordenadores centrales con las zonas experimentales por medio de un sistema en red de cosecha propia, con la finalidad de reemplazar lo que cariñosamente se conocía como el método “bicicleta en línea” de transportar las cintas al centro de cálculo para conseguir prioridad en el procesado y obtener una respuesta rápida a los experimentos.

En el mismo período se instaló el primer equipo CDC (**C**ontrol **D**ata **C**orporation) que llevó mucho tiempo en ser encargado, debido en gran parte a la falta de un sistema operativo estable. El inicio de los 70 estuvo marcado por la instalación del primer procesador central a tiempo compartido, el CDC 7600. En los siguientes quince años, el 7600 se actualizó a varios modelos de Cybers, mientras se compraron o arrendaron sistemas IBM (370/168, 3081, 3050, ES9000...) para complementar la capacidad de cálculo necesaria para los experimentos. Al final, las máquinas CDC se sustituyeron por un Cray XMP en 1988. A partir de 1982, la empresa DEC (Digital Equipment Corporation) que había instalado cientos de PDPs (**P**rogrammed **D**ata **P**rocessor) y VAXs (**V**irtual **A**ddress **e**Xtension) hizo su entrada en el centro de cálculo del CERN con un VAX para centralizar los servicios.

El comienzo de los años 90 vio la aparición de estaciones de trabajo RISC como Apollo, DEC, HP, SGI, SUN y otros. Estas reemplazaron las unidades centrales unos años más tarde al ofrecer órdenes de magnitud superiores en rendimiento-precio y no solo en la velocidad del procesador sino aún más importante en los discos de almacenamiento de datos. Sin prisa, pero sin pausa, el número de ordenadores en el centro de cálculo del CERN creció de unas pocas decenas en los 70 a varios cientos a finales de los 90.

Simultáneamente la velocidad de procesamiento de los ordenadores personales basados en INTEL alcanzaron velocidades suficientes (200 MHz en 1997) para considerarlos adecuadas para el proceso de datos en física y por último los ordenadores personales se hicieron sitio en todo el centro de cálculo que actualmente consiste en más de 14 000 servidores, 200 000 núcleos de CPU y 200 PB en cinta.

Hacia el presente

Redes de ordenadores

El CERN empezó a desarrollar las comunicaciones informáticas desde los 60, desarrollando varios sistemas (FOCUS, OMNET, CERNET) antes de adoptar el estándar Ethernet de la industria que equipa hoy las oficinas, aceleradores y detectores, operando bajo el protocolo TCP/IP.

A lo largo de los años, la evolución de las redes externas ha sido un elemento de cambio real. A principio de los 80, las transferencias eran del orden de kbit/s y solo se conectaban con un puñado de instalaciones de interés. En los 90, se dispuso de capacidades de varios cientos de Mbit/s

y el CERN se convirtió en el mayor punto de intercambio de internet de Europa, ocupando el 80 % de la capacidad de internet europea. Hoy en día, los institutos HEP (**H**igh **E**nergy **P**hysics) están conectados al CERN a velocidades del orden de Gbit/s y algunos a más de 100 Gbit/s. La capacidad de la red informática es esencial para la comunidad de Física de Altas Energías para trabajar con el CERN o desde el CERN, sin necesidad de una presencia física.

La web

Por supuesto es imposible hablar de informática en el CERN sin mencionar la Web. Más allá de la visión de Tim Berners-Lee está la necesidad de miles de científicos HEP diseminados por el mundo, combinado con la aparición de nuevas tecnologías tales como la interconexión mundial rápida con TCP/IP y la llegada de estaciones de trabajo gráficas, además de los últimos Macs y PCs accesibles a todos que convierten la World Wide Web en una revolución total.

La Grid

El proyecto Worldwide LHC Computing Grid (WLCG) es el mayor esfuerzo científico dedicado a compartir los recursos de computación disponibles en el mundo. El proyecto empezó en los inicios del siglo a partir de unas ideas y aplicaciones comenzadas en Argonne y la Universidad de California Santa Cruz, con importantes contribuciones de la Comisión Europea y los institutos HEP de todo el mundo. A partir de ahí creció un sistema de distribución robusto y resistente diseminado por 170 centros, proporcionando medio millón de núcleos y 500 petabytes de datos disponibles para el análisis de los datos del LHC, todos ellos interconectados con enlaces de alta velocidad y trabajando a multiGigabits por segundo.

La WLCG procesa en la actualidad medio millón de tareas simultáneamente, un avance considerable comparado con el simple cálculo que el Ferranti era capaz de realizar hace 60 años.

Conservación de datos

El desafío en estos últimos 50 años ha sido ser capaces de gestionar y procesar los datos producidos en los aceleradores y los experimentos. Pero ¿qué pasa cuando los experimentos terminen y los detectores se desmantelen? ¿Permanecerán los datos para siempre en las cintas? ¿Estarán los programas FORTRAN de 1960 en funcionamiento y serán capaces de interpretar esos datos? ¿Entenderá la gente lo que el programa hace y los supuestos que el autor asumió? Es aquí donde la conservación de datos entra en juego, y sigue siendo un desafío no resuelto. En mi opinión, es un problema muy grande y muy subestimado que supera los límites del HEP. ¿Están seguros de que todavía pueden ver las películas de su hijo tomadas en una cámara digital de hace diez años? ¿Pueden entender las comunicaciones en las que fueron almacenados? ¿Pueden leer documentos escritos en “Word” a mediados de los 90? ¿Pueden incluso encontrarlos?

Open Access (Publicaciones, datos y códigos)

El CERN se ha comprometido con el libre acceso (Open Access) puesto que refleja valores que fueron consagrados en la Convención de la Organización hace más de 60 años y que tiene una importancia creciente para los Estados Miembros del CERN, la Unión Europea y otros socios institucionales en todo el mundo. Durante más de 20 años, la mayoría de las publicaciones de física del CERN se han compartido públicamente y de inmediato en la red, en forma de pre-impresiones, antes de su publicación en las revistas. Esto se conoce como Green Open Access.

Las revistas Gold Open Access ponen gratuitamente a disposición de los lectores los artículos revisados por expertos. En general, esas revistas se financian mediante una cuota de publicación por cada artículo conocido como el Article Processing Charge (APC). Hasta el 2013, el Servicio de Información Científica del CERN cubría esas cuotas para determinadas revistas. Gracias a acuerdos con las grandes editoriales, los artículos de las colaboraciones del LHC sobre resultados experimentales se han publicado sistemáticamente desde el 2010 en Gold Open Access. Se espera de los autores del CERN que publiquen todos sus resultados en revistas de Gold Open Access.

El CERN está desarrollando varias tecnologías teniendo en mente el libre acceso. “Invenio”

es un paquete de gestión de bibliotecas de acceso libre que se beneficia de las contribuciones internacionales de los institutos colaboradores. “Invenio” se utiliza normalmente para las bibliotecas digitales. El CERN, con la cofinanciación de la Union Europea, ha invertido mucho en “Zenodo”, un depósito de Open Data libre para ser utilizado más allá de la comunidad de física de altas energías.

Trabajando con la Industria: CERN openlab

El CERN openlab es una asociación pública-privada única que acelera el desarrollo de soluciones punteras para la comunidad internacional del LHC y para la investigación científica en general. Por medio de CERN openlab, el CERN colabora con empresas líderes en ICT e institutos de investigación.

CERN openlab se creó en el 2001 y en 2018 entró en su sexta fase trianual. Igual que en su quinta fase, continuará abordando ambiciosos desafíos, cubriendo las necesidades previsibles más críticas de infraestructuras IT en áreas tales como adquisición de datos, plataformas informáticas, arquitecturas de almacenamiento de datos, aprovisionamiento y gestión de ordenadores, redes y comunicaciones y análisis de datos. Dentro de este marco, el CERN proporciona acceso a su compleja infraestructura IT y su experiencia en ingeniería, haciéndola extensiva en algunos casos a los institutos colaboradores internacionales. Los ensayos en unas condiciones tan exigentes como el CERN, proporcionan a los socios industriales ICT valiosos comentarios sobre sus productos permitiendo al mismo tiempo al CERN evaluar en sus fases iniciales de desarrollo los méritos de nuevas tecnologías para un posible uso futuro. Este esquema permite también un terreno neutral para realizar I+D avanzado con más de una compañía.

Educación

La CSC, escuela de informática del CERN, tiene una duración de dos semanas cada año y es una universidad de verano que ofrece una serie de conferencias y ejercicios prácticos, con un Diploma oficial CSC tras completar con éxito el examen CSC y el ECTS (**E**uropean **C**redits **T**ransfer **S**ystem). Está abierta a estudiantes de posgrado e investigadores, que trabajan en el CERN o en otros institutos, con unos años de experiencia en física de partículas elementales, en informática o en campos relacionados. Los participantes llegan de laboratorios y universidades internacionales, incluso ajenos a la comunidad de la física de partículas, en general atraídos por los temas avanzados que se enseñan. La asistencia oscila entre 60 y 80 estudiantes, con representación de unas 15 a 30 nacionalidades. En los últimos 10 años han participado personas de 60 nacionalidades. Alrededor del 80 % de los estudiantes proceden de países europeos.

Una mirada hacia el futuro

Con la computación del LHC por buen camino, la colaboración WLCG está mirando hacia el futuro, centrándose en las dos fases de actualización del LHC ya planificadas. La primera fase (2019-2020) verá mejoras importantes de los experimentos ALICE y LHCb, al igual que un incremento en la luminosidad del LHC. La segunda fase, el proyecto **H**igh **L**uminosity **L**H**C** (HL-LHC) actualmente programado para el 2024-2025, actualizará el LHC a una luminosidad mucho mayor e incrementará la precisión de los detectores ATLAS y CMS, mejorándolos sustancialmente.

Los requerimientos de datos y de cálculo crecerán dramáticamente en este tiempo, con unas tasas previstas para el HL-LHC de 500 PB/año. Se prevé que las necesidades de procesamiento aumenten más de 10 veces por encima de lo que se espera que genere la evolución de la tecnología. Estos son retos importantes y estimulantes. Está claro que la informática del LHC va a continuar evolucionando y que dentro de 10 años las cosas serán muy distintas, aunque se mantendrán las características que facilitan y potencian la colaboración. En una perspectiva a más largo plazo, los especialistas en informática, físicos e ingenieros han empezado ya a trabajar en estrecha colaboración para evaluar las necesidades en materia de energía y de red para el próximo proyecto **F**uture **C**ircular **C**ollider (FCC). Un proyecto de tales dimensiones requiere una gestión y una planificación financiera y administrativa específica. Todavía están por desarrollar las soluciones en muchas áreas técnicas, desde la instalación de controles hasta el análisis de datos, incluida la informática.

Conocimiento y transferencia de tecnología

Giovanni Anelli

Para perseguir sus ambiciosos proyectos de investigación, el CERN tiene que desarrollar constantemente una instrumentación avanzada y unas soluciones tecnológicas innovadoras, sobre todo en áreas relacionadas con la detección de partículas, la tecnología de los aceleradores e IT. Esto incluye muchos sectores como, por ejemplo, microelectrónica, superconductividad, criogenia y nuevos materiales.

Estas tecnologías, y más importante aún, los conocimientos que conllevan, son los activos claves de la Organización, y es de capital importancia que la sociedad en general se beneficie de ellos.

Durante muchos años, el CERN ha investigado activamente las aplicaciones posibles de su innovación en campos distintos al de High Energy Physics y ha desarrollado herramientas para transferir sus conocimientos y experiencia a empresas y otros institutos de investigación. Algunas de estas herramientas son por ejemplo las licencias del CERN Open Hardware, colaboraciones con la industria, acuerdos de licencias, servicios y consultoría, y una red de centros de incubación de negocios para atender la puesta en marcha de las empresas que adopten tecnologías del CERN en los Estados Miembros del CERN.

La transferencia de conocimientos a la industria también ocurre por medio de la contratación de componentes de alta tecnología y de la movilidad de las personas: muchos de los estudiantes y jóvenes investigadores que han trabajado en el CERN al principio de sus carreras se trasladan a la industria, beneficiándose de la riqueza de conocimientos que han adquirido mientras trabajaban en la Organización.

Una relación estrecha con la industria es vital para la Organización. El CERN necesita a la industria para su instrumentación avanzada, y a cambio ayuda a la industria a desarrollar nuevos productos y servicios, al ser simultáneamente un cliente y un proveedor de tecnologías y de conocimientos.

Al gestionar la mayor infraestructura de investigación en el área de HEP, el CERN tiene unos requisitos especiales y desarrolla unas tecnologías específicas. Hay muchos ejemplos de cómo los conocimientos generados en el CERN han impactado a la sociedad en campos tan variados como la imagen médica avanzada, los tratamientos de cáncer, la dosimetría, las aplicaciones aeroespaciales, la generación de energía, el almacenamiento de datos y el análisis de datos.

Un ejemplo de una aplicación práctica reciente de ensayos clínicos en hospitales es el ClearPEM, que se explica a continuación.



“A clinical application: ClearPEM” Justino António Cardoso, 2015. *Tinta china*

ClearPEM

João Varela

ClearPEM es un escáner de alta resolución espacial (1,4 mm) específico para mamografías, por emisión de positrones (Positron Emission Mammography), desarrollado en el CERN por el Crystal Clear Collaboration para detectar el cáncer de mama. Emplea una técnica de imagen basada en radioisótopos emisores de positrones llamados radiotrazadores que inyectados en el flujo sanguíneo se adhieren a las células cancerosas. Al concentrarse el trazador en las lesiones cancerosas es posible reconstruir una imagen de su distribución espacial dentro del cuerpo mediante la detección de pares de fotones que resultan de la aniquilación de los positrones con electrones en los tejidos del cuerpo humano. El positrón es la antipartícula del electrón y por tanto cuando entran en contacto se destruyen y generan dos fotones energéticos con trayectorias en direcciones opuestas pero arbitrarias. En la tomografía por emisión de positrones, conocida como PET, muchos de estos sucesos se registran por detectores de fotones externos, permitiendo reconstruir las direcciones en las que se han emitido y crear imágenes 3D de los tumores usando sofisticados algoritmos. Casi un siglo después del descubrimiento de la antimateria, los PET han surgido como una aplicación práctica espectacular de esta extraña forma de la materia.

El escaner ClearPEM es el resultado de las continuas mejoras llevadas a cabo en los detectores de cristal, fotosensores y electrónica de lectura del experimento CMS en el LHC. Un detector de fotones conocido como ECAL (Electromagnetic Calorimeter) formado por 80 mil cristales de tungstenato de plomo, construido por la colaboración CMS y operativo desde el 2009, mide con gran precisión los fotones producidos en las colisiones de los protones del LHC. Se esperaba que la desintegración de una hipotética partícula, el bosón de Higgs, tuviera como resultado la aparición de pares de fotones, como así se descubrió en el 2012 al observar los sucesos de pares de fotones entre otras señales. Hay, sin embargo, una gran diferencia entre los fotones de la desintegración de Higgs y los fotones de la aniquilación positron-electron: ¡son cien mil veces más energéticos! En consecuencia, los detectores pueden ser más pequeños que el ECAL y aptos para hacer escáneres de pecho.

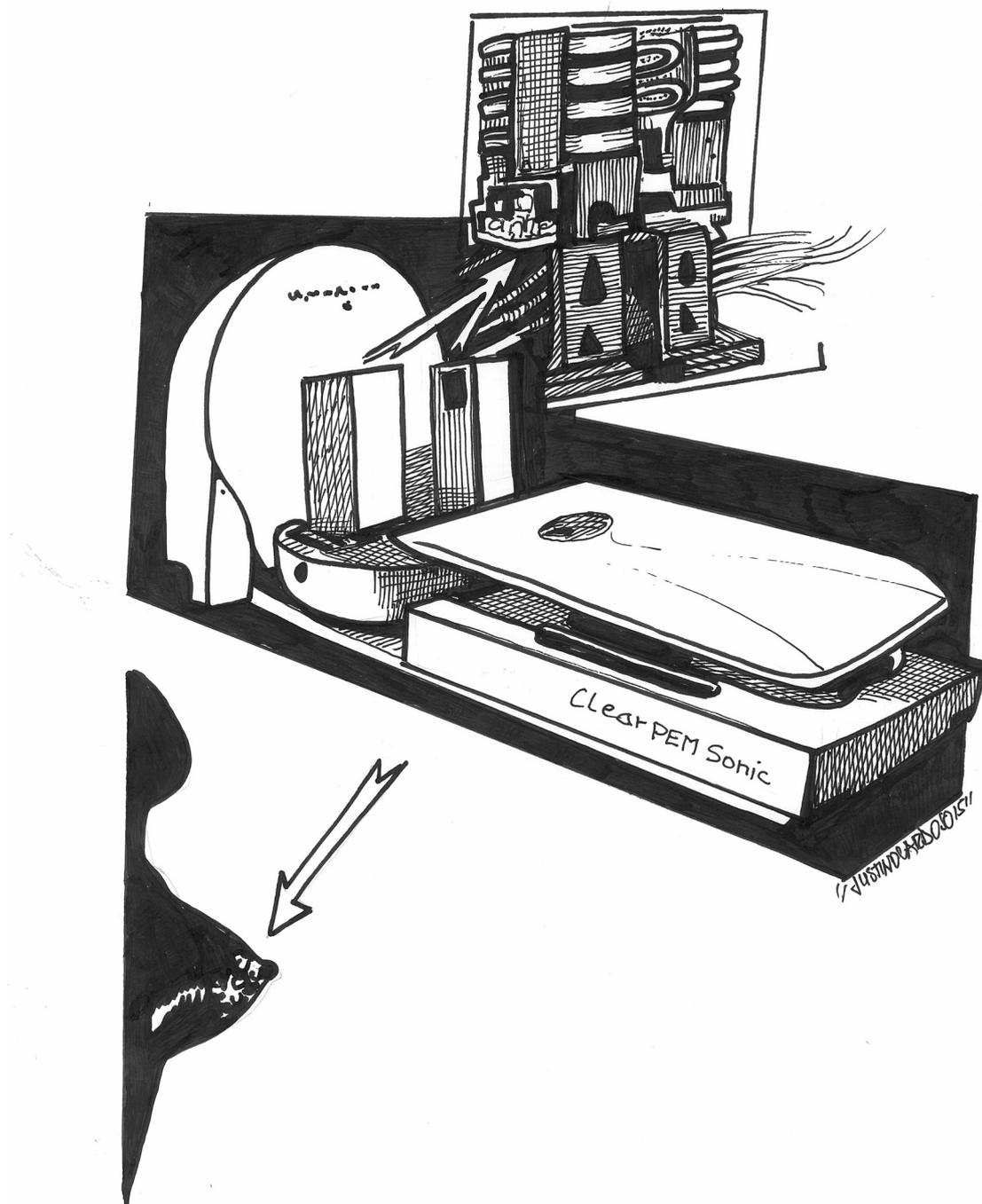
Los conocimientos y la comprensión adquirida por los físicos impulsaron la creación de un consorcio para utilizar las nuevas tecnologías en esta importante aplicación práctica. Se facilitó la concepción y construcción de una instrumentación que incluye cabezales de detectores para detectar los fotones emitidos por los radioisótopos acumulados en las lesiones, realizados con 6144 cristales LYSO a base de lutecio de dimensiones 2x2x20 mm. Por primera vez, fotosensores de silicio desarrollados para ECAL, los Avalanche Photo Diodes (APD), han sido empleados en un escáner PET para leer el centelleo generado en los cristales en lugar de los tradicionales fotomultiplicadores. Los APD asociados con un microchip específico nuevo, permiten construir cabezales de detectores compactos que pueden ser colocados próximos al pecho.

El sistema tiene una alta sensibilidad para la detección permitiendo no solo determinar la situación de las lesiones, sino también su actividad metabólica y por tanto una evaluación más precisa de la extensión de la enfermedad y hacer una mejor distinción entre lesiones benignas y malignas. Esto es sin duda un factor determinante para la planificación del consiguiente tratamiento de la enfermedad y su resultado en el paciente.

Se han construido dos máquinas ClearPEM. Una está instalada en el Hospital Universitario de Coimbra (ICNAS, Instituto de Ciências Nucleares Aplicadas à Saude) y la otra está funcionando en el Hospital de San Gerardo en Monza. El rendimiento de estas máquinas ha sido validado para pacientes con cáncer de pecho diagnosticados con los procedimientos y exámenes normales y sus consiguientes tratamientos. La comparación entre las imágenes de los mismos pacientes obtenidas con PET comerciales y las de los ClearPEM han mostrado las ventajas de la resolución espacial obtenida con estas últimas. En un laboratorio donde los físicos estudian el origen de nuestro Universo, tratando de comprender la asimetría entre materia y antimateria y desvelar los misterios

de la materia oscura, un proyecto como ClearPEM ha sido un estímulo para nuestra imaginación.

Este ejemplo ilustra como la investigación básica en física de partículas conduce en términos de innovación y transferencia de tecnología a avances importantes en beneficio de nuestras vidas cotidianas.



“An innovative Technology” Justino António Cardoso, 2015. *Tinta china*

ClearPEM es un nuevo tipo de escáner de alta resolución por emisión de positrones para detectar lesiones cancerígenas de mama desarrollado en el CERN por el Crystal Clear Collaboration. Es una aplicación práctica de diferentes tecnologías desarrolladas para el experimento CMS en el LHC.

ARTSCI en el CERN

Arthur I. Miller

El CERN es líder mundial en la investigación del misterioso mundo de las partículas elementales. También es un lugar privilegiado para el floreciente campo de ARTSCI, en el que artistas y científicos trabajan juntos para crear nuevas formas de representar el Universo en el que vivimos. Esto empezó alrededor del año 2000 cuando el artista londinense Ken McMullen llevó al CERN una camarilla de artistas europeos. Los artistas visitaron el CERN durante cortos períodos, volviendo después a sus estudios para trabajar en ideas inspiradas en las conversaciones con los científicos del CERN. La exposición resultante, *Signatures of the Invisible*, incluyó pinturas y esculturas. Se inauguró en 2001 en la galería Atlantis de Londres con gran éxito y a continuación se expuso en Estocolmo, Lisboa, París, el MOMA PS1 de Nueva York, solo por mencionar unos cuantos.

En los años siguientes, el CERN siguió ocupando las noticias. En 2009, *Ángeles y Demonios*, la exitosa versión cinematográfica de la novela de Dan Brown, que hablaba de sociedades secretas, simbolismos e incluía una singular bomba de antimateria fabricada en el CERN, se rodó parcialmente allí. El CERN insistió en dejar claro que tanto la historia como la bomba eran pura ficción. Poco después, Robert Harris en su novela de misterio *Fear Index*, utilizó como protagonista a un científico que había trabajado en el CERN.

Pero en términos de hacer avanzar el arte en el CERN, el acontecimiento más importante fue en 2009 la llegada de Ariane Koek, una productora londinense de programas culturales de la BBC, que impulsó un programa residencial de arte. Le llamó *Collide@CERN* (Colisión en el CERN), financiado en parte por la sociedad Ars Electrónica con base en Linz, Austria.

El artista residente era seleccionado en una competición formal para pasar dos meses de residencia en el CERN y un mes en Ars Electrónica con el fin de realizar obras inspiradas en el CERN. Este enfoque difería del programa de McMullen en el que los artistas pasaban varios períodos cortos en el CERN, pero hacían sus trabajos en sus propios estudios. En el CERN al artista escogido lo emparejaban con un científico en una "cita rápida" con la idea de que conociera tantos científicos como le fuera posible, y que cada uno de ellos le explicara su trabajo. Hoy en día este programa está dirigido por la crítica y conservadora española de arte Monica Bello. El problema es que el científico a menudo se siente incómodo con el mundo del artista y viceversa y más grave es que el artista sabe muy poco de ciencia.

De los artistas que han pasado por el programa me gustaría señalar al artista visual japonés, Ryoji Ikeda. Los artistas visuales gráficos de información utilizan algoritmos para extraer enormes cachés de datos y representarlos estéticamente. Al igual que los científicos, buscan patrones, porque los patrones son el ADN de la Naturaleza. Los datos son el meollo del CERN, son vitales, y Ikeda vive y respira ese mundo. Sus instalaciones usan programas de ordenador en tiempo real para representar una enorme cantidad de datos mediante puntos luminosos en unos patrones abigarrados y acompañados de una banda de sonido hipnótica. Son literalmente espectaculares, captan la excitación de los datos recogidos por detectores gigantes del mundo submicroscópico.

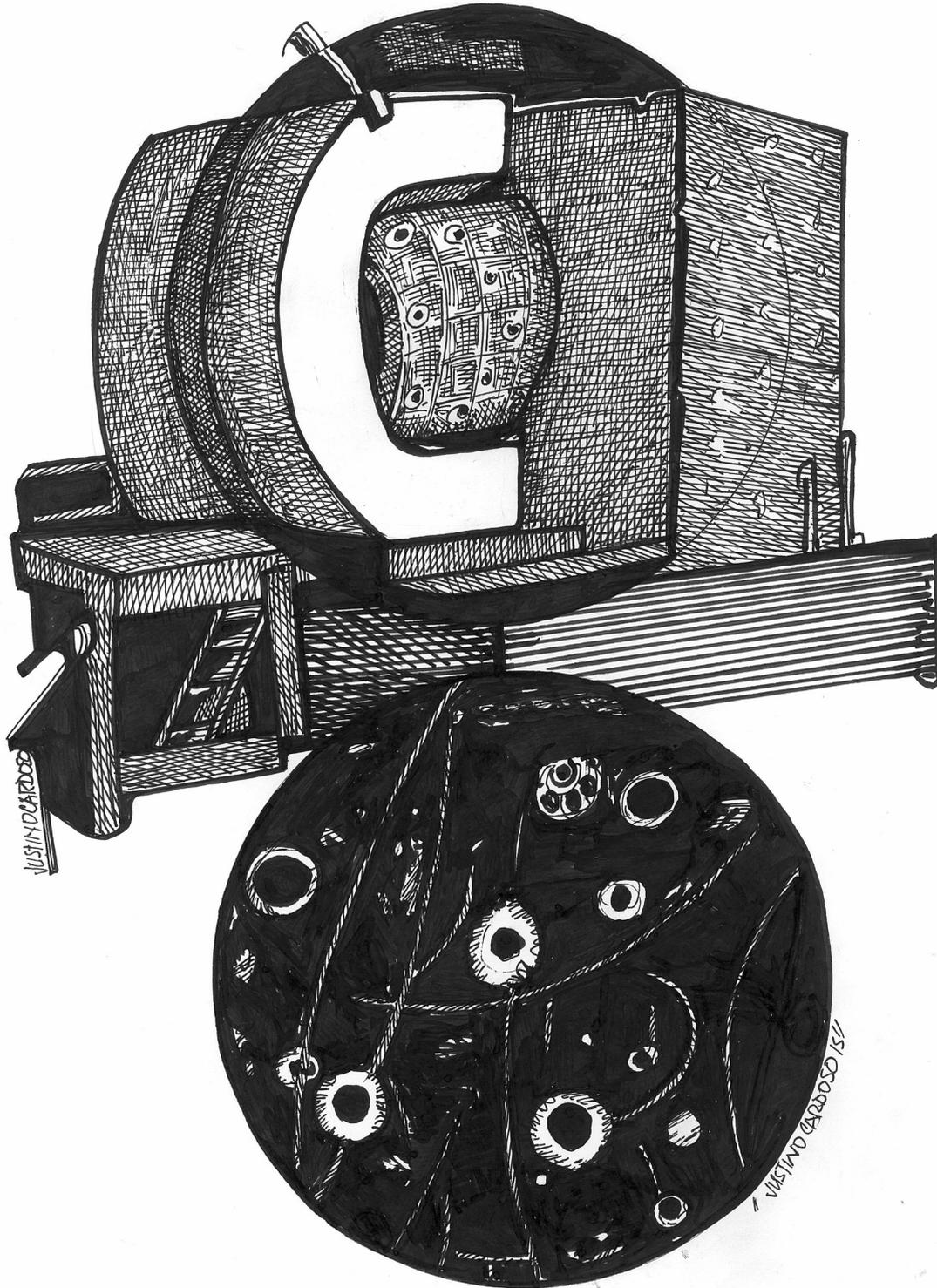
CERN tiene el prestigio para atraer artistas de alto nivel, quienes en mi opinión deberían ser invitados y pagados por sus servicios con el compromiso de realizar una obra para ser exhibida en el centro. Imagínense: una galería de arte en el CERN. Puesto que la investigación del CERN lucha para hacer lo invisible visible, se debería preferir a los artistas especializados en la abstracción, tales como el consagrado artista inglés Keith Tyson, ganador del prestigioso premio Turner en 2002. Su obra (pinturas y esculturas) abarca sistemas generativos y la complejidad e interconexión de la existencia. No es sorprendente que el Grupo de Teoría del CERN quedara impresionado cuando hizo una visita al CERN. Los científicos del CERN son una élite y deben tratar con artistas de alto rango que deberían ser libres de ir y venir a su gusto.

En mi libro *Colliding World: How Cutting-Edge Science Has Redefined Contemporary Art*¹ trato con bastante detalle el programa Collide@CERN. Basándose en más de 100 entrevistas con artistas del siglo XXI, se deduce que el arte, la ciencia y la tecnología tal y como las conocemos están desapareciendo, fusionándose en lo que yo llamo una tercera cultura, una nueva vanguardia. Sus ciudadanos son una nueva raza de artistas: artistas, científicos y tecnólogos combinados en uno. A estas criaturas híbridas se les encontrará en el emocionante y muy discutido campo del arte generado por la inteligencia artificial (AI). El CERN debería considerar el invitar a esta nueva raza de artistas.

1 Más información: www.arthurimiller.com/ and www.collidingworlds.org/ or a.miller@ucl.ac.uk

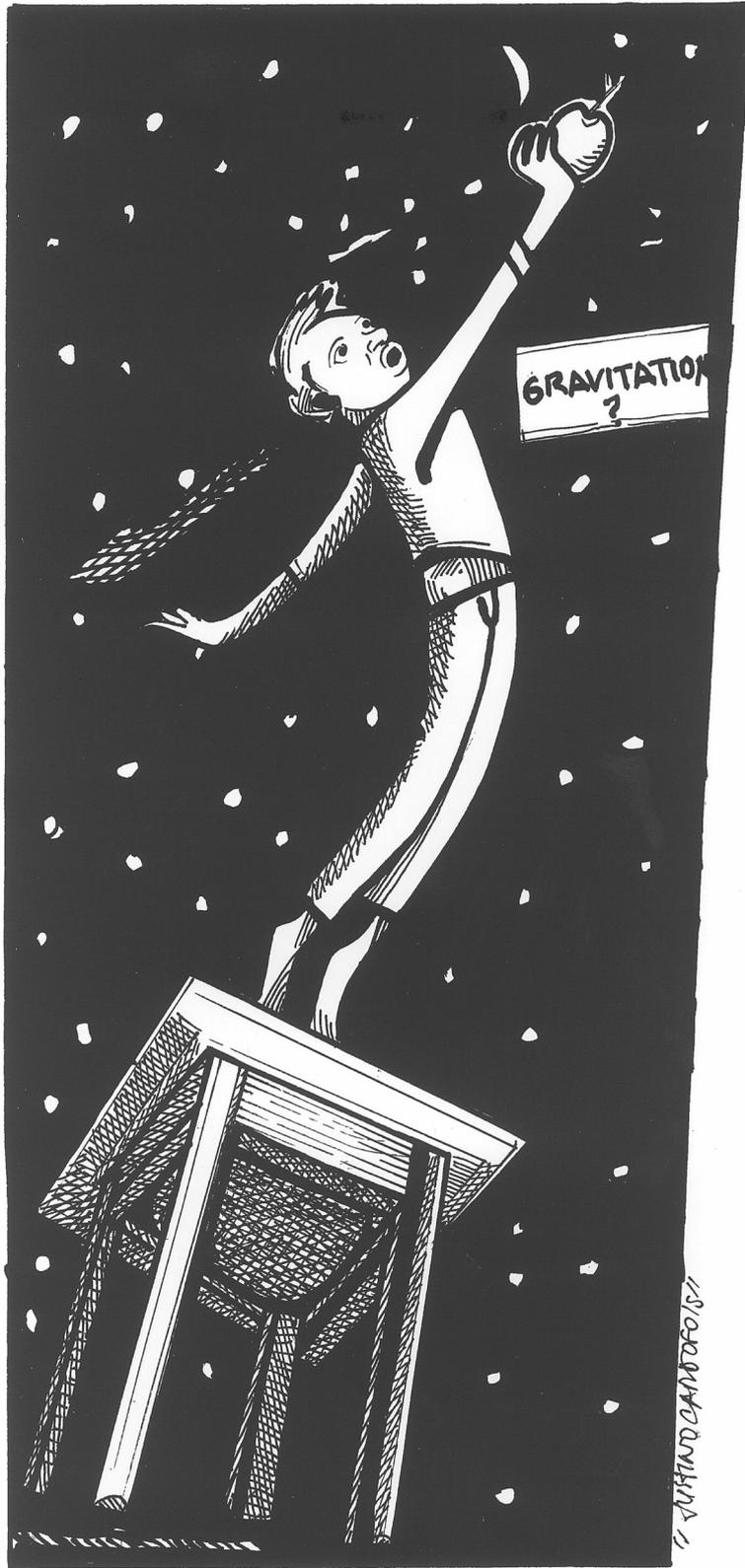


“Strings at the horizon of a black hole” Karen Panman, 2014. *Cerámica pintada y cuerdas de plástico*



"Gargamelle and the neutral currents" Justino António Cardoso, 2015. *Tinta china*

En Julio de 1973 André Lagarrigue y sus colegas del grupo Gargamelle anunciaron en el gran auditorio del CERN un descubrimiento pionero. En las imágenes de las cámaras de burbujas del sincrotrón de protones del CERN (PS) se habían encontrado pruebas de corrientes neutras. El descubrimiento confirmaba la teoría de la fuerza nuclear débil. Gargamelle, cuya estructura reposa ahora en el jardín del Microcosmo, era una enorme cámara de burbujas que pesaba alrededor de 1000 toneladas, rellena con 18 toneladas de freón líquido.



"The gravitation law I know" Justino António Cardoso, 2015. Tinta china

En 1687, Newton publicó la ley de gravitación universal en los "Principia". La gravedad es la interacción más débil de las cuatro fuerzas fundamentales de la Naturaleza. La existencia de otras dimensiones podría explicar porque la gravedad es tan débil. Con la teoría del todo, los físicos intentan unificar las interacciones fundamentales de la Naturaleza: gravedad, interacción fuerte, interacción débil y electromagnetismo.

Ciencia, política y sociedad

Rolf Heuer

El progreso es un proceso complejo, pero una cosa es segura y es que se explica por las peculiaridades de la curiosidad humana. Sin ella, la raza humana seguiría viviendo en el Valle del Rift. Con ella, hemos dominado nuestro mundo y estamos explorando otros, hemos alcanzado una posición desde donde contemplar la naturaleza de nuestro Universo, y hemos conseguido mejorar insospechadamente la vida de los seres humanos.

Hoy en día vivimos una era donde la curiosidad científica toca todos los aspectos de nuestras vidas y sin embargo durante décadas la ciencia ha ido apartándose de la sociedad y la cultura. Esto importa porque cada vez más se pide a las personas que tomen decisiones con un fundamento científico, y si la comunidad científica no colabora en equiparlas para realizarlas, nosotros los científicos estamos fallando a nuestras obligaciones. Si los científicos permanecemos enclaustrados en nuestras torres de marfil entonces no estamos haciendo nuestro trabajo. Esta es una responsabilidad importante de la ciencia, ayudar a las personas a tomar decisiones racionales en su vida cotidiana.

Para personas como yo, que trabajamos en la actividad científica financiada por el sector público, hay además una obligación moral de involucrar al público. En el CERN hacemos ciencia fundamental. Nuestro producto principal es el conocimiento sobre el Universo. A lo largo del camino, los científicos y los ingenieros del CERN desarrollan tecnologías que van desde la World Wide Web a detectores para escáneres médicos, y desde técnicas de ultra vacío que tienen aplicaciones en la captura de la energía solar a los aceleradores de partículas usados en los tratamientos del cáncer. Pero estamos aquí por los conocimientos, y en mi experiencia, los conocimientos que proporcionamos satisfacen una necesidad humana básica de aprender. La ciencia fundamental alimenta las mentes. Y permítanme añadir que el público que nos financia tiene el derecho a saber qué estamos haciendo y saber que están invirtiendo bien su dinero.

En el CERN estas responsabilidades se toman muy en serio: hemos impulsado la puesta en marcha del acelerador de partículas más potente del mundo, el Large Hadron Collider (LHC), mejorando nuestro perfil e interactuando con un amplio rango de audiencias. Hemos iniciado conversaciones que están marcando una diferencia: desde niños de primaria hasta responsables directivos, desde artistas hasta las religiones de alcance universal.

Este constituye mi primer mensaje: hoy más que nunca es esencial que la ciencia colabore con la sociedad puesto que todos dependemos de la ciencia, nuestro futuro depende de la ciencia y la ciencia tiene una obligación moral de comprometerse.

Mi segundo mensaje es que es igualmente importante que la ciencia no se realice aisladamente sino en colaboración. Así se entendió en Europa, después de la Segunda Guerra Mundial, cuando un pequeño grupo de científicos y diplomáticos visionarios combinaron ciencia y educación para crear una resonancia que cambiaría para siempre la forma en que se hace la ciencia entre varios países. El 29 de septiembre de 1954, esa resonancia sería el CERN, naciendo con él un modelo de colaboración internacional a largo plazo.

Los padres fundadores del CERN crearon un sistema estable para que el sector público sustente la ciencia básica. Desde entonces el mundo ha pasado por bajos y altos en la economía, pero siempre se ha hecho ciencia básica en el CERN. Si toda la ciencia básica se pudiera hacer según el modelo del CERN (internacional, en colaboración y abierta con una estructura de financiación del sector público estable) nuestro progreso estaría asegurado. Y el mundo sería más resistente frente a las recesiones de lo que es hoy en día.

El CERN es una organización europea, fundada en principios de imparcialidad respecto a sus miembros y abierta al mundo. En consecuencia, su modelo de gobierno da una representación equitativa a todos sus estados participantes, grandes o pequeños. Su modelo de financiación permite a los Estados Miembros contribuir en función de sus medios. Su modelo de investigación

acoge científicos de todo el mundo que contribuyen positivamente a los programas de investigación de los laboratorios. Con estos principios elementales, el CERN proporciona un modelo de estabilidad para la cooperación transfronteriza europea, a un compromiso coordinado de Europa con el resto del mundo, y a un programa para liderar el campo de la física de partículas. El resultado es que hoy en día el CERN es indiscutiblemente el foco de una comunidad global de científicos avanzando en las fronteras del conocimiento. Es un ejemplo excelente de lo que las personas pueden hacer cuando trabajan juntos. Ahora tenemos que extender este modelo. La ciencia se está convirtiendo en más y más global y la física de partículas está en la vanguardia de este desarrollo. De lo que se derivó naturalmente que el CERN, en el 2010, extendiera la limitación de pertenecer a Europa, para aceptar la admisión como miembros o asociados a todos los países independientemente de su ubicación geográfica.

Como consecuencia, el ideal del CERN de paz y entendimiento entre las naciones, con el lenguaje universal de la ciencia haciendo de mediador, es visible en todo el mundo acompañado del placer de compartir la curiosidad humana, y los beneficios prácticos de la educación, la innovación y la colaboración.

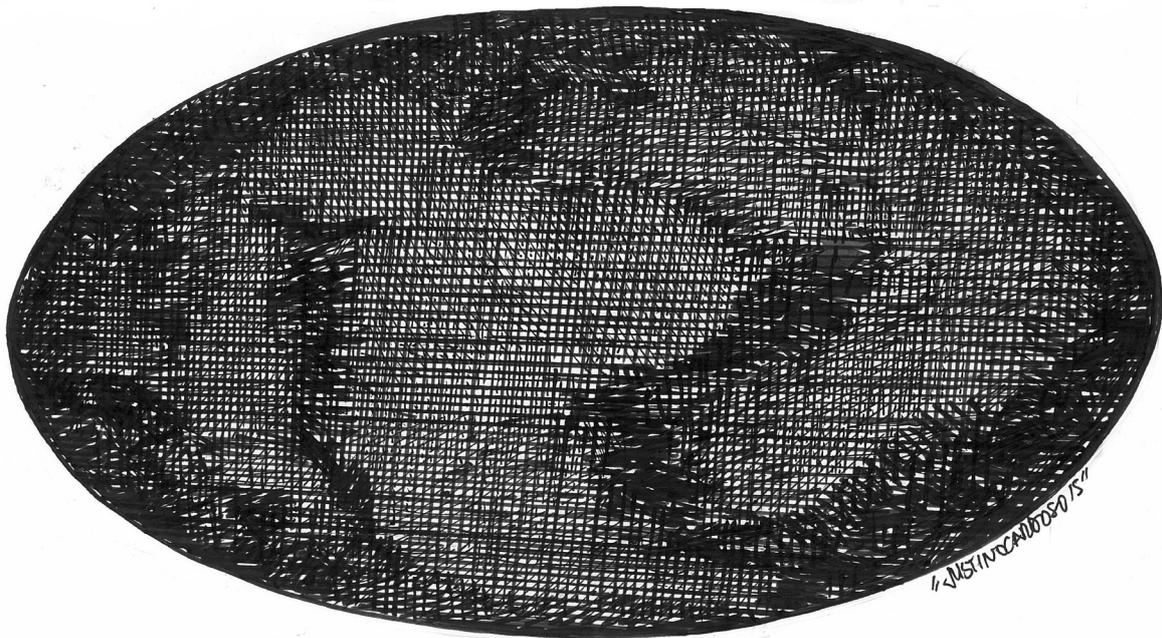
Una institución como el CERN puede tener un papel esencial en la educación. Empecemos con nuestros accionistas más jóvenes. Los sondeos industriales muestran, una y otra vez, una escasez de graduados en ciencias e ingeniería. ¿Cómo enfrentamos el problema? En mi opinión: entusiasmado a los más jóvenes. Cuando en 2009 se hizo una encuesta local de la opinión sobre el CERN, el resultado no fue ninguna sorpresa. Nuestros vecinos reconocían el impacto económico local de tener cerca una gran organización intergubernamental, pero recelaban de nosotros. Así que les preguntamos cómo les gustaría que nos convirtiéramos en mejores vecinos. Entre otros temas surgió el de llevar la ciencia a las aulas de la escuela primaria.

Trabajamos con las autoridades educativas de Francia y del cantón suizo de Ginebra, así como con la universidad de Ginebra para diseñar un proyecto de investigación para la infancia. En pocas palabras, las clases reciben unas cajas selladas para que, empleando razonamientos científicos, y ayudados con algunas pistas, los alumnos descubran sin mirar lo que hay en el interior. El proyecto se ha presentado en conferencias, traducido a otros idiomas y empleado en lugares lejanos como México. Es demasiado pronto para saber si esto animará a los más jóvenes a dedicarse a la ciencia, generando una oferta de personas cualificadas para la industria, pero habrá valido la pena, aunque lo único que haga es animar a que los niños no pierdan su sentido de la curiosidad.

Pasando ahora a la política, a los responsables de las decisiones. He aquí mi tercer mensaje: es esencial para la comunidad científica interactuar más con los círculos políticos.

¿Cuántas veces hemos visto a los políticos tomar decisiones equivocadas como resultado de un mal razonamiento científico? Con temas tan importantes como el cambio climático pidiendo que se actúe urgentemente, es vital que aquellos en los que depositamos nuestra confianza para que tomen las decisiones sean capaces de hacer también una evaluación científica. Es así que el CERN ha pedido y se le ha concedido el estatus de observador permanente en las Naciones Unidas donde hemos promovido un mensaje importante para los políticos: es vuestro trabajo, como custodios del erario público, mantener una base científica en buen estado. De hecho, esto es lo que Europa consiguió hace unos 60 años al fundar el CERN, y posteriormente otras siete organizaciones de investigación europeas líderes mundialmente.

Trabajar para conseguir una clase gobernante con formación científica, y un saludable flujo de graduados en ciencia e ingeniería pueden ser objetivos claros para el CERN, pero ¿qué pasa con otros grupos? ¿Las artes? ¿Las grandes religiones? Durante mi mandato como Director General del CERN lanzamos un programa residencial para artistas que ya ha conseguido algunas interacciones notables entre aparentemente dos polos opuestos del espectro cultural. Lo que estamos encontrando es que los artistas y los científicos tienen mucho en común. Los dos sienten curiosidad por el mundo en el que viven y ambos son sumamente creativos. Por ejemplo, cuando el artista de Mozambique Justino Cardoso realizó los trabajos reproducidos en este libro, era su primer viaje fuera de Africa.

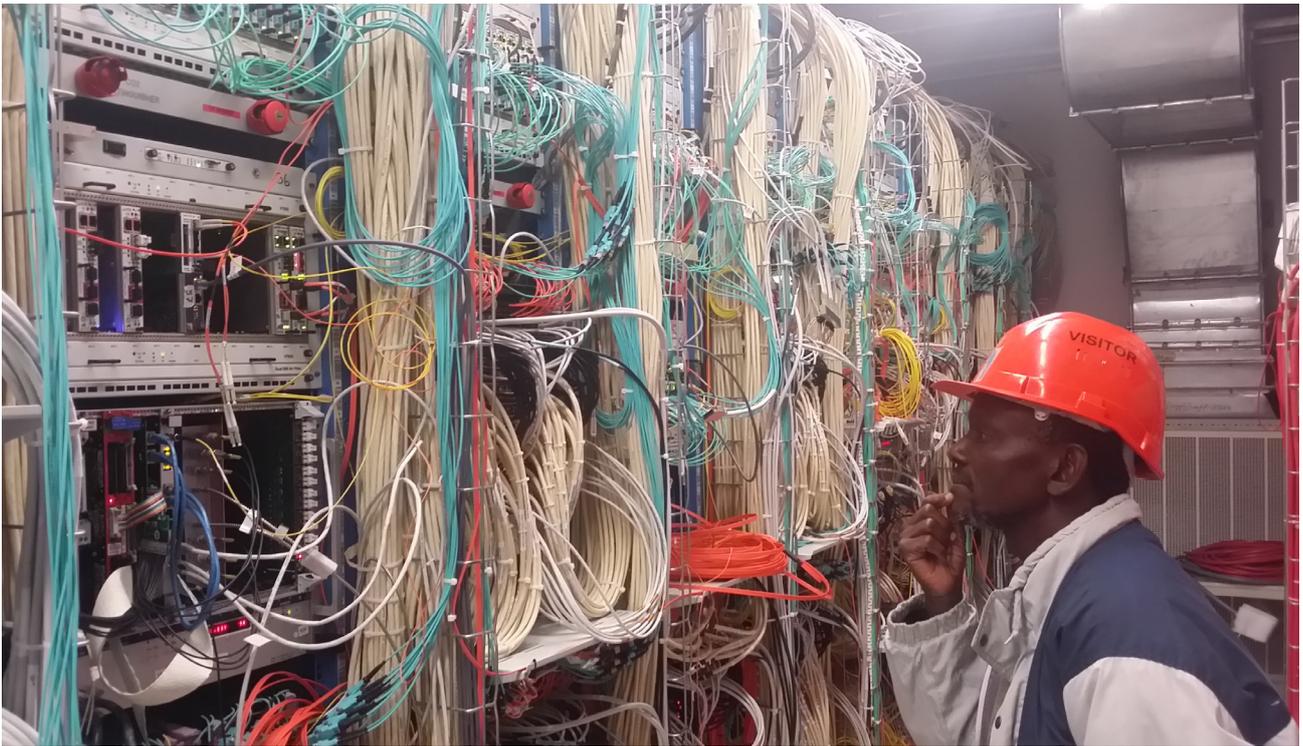


$$I = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1}$$

BLACK BODY RADIATION RADIAÇÃO DO CORPO NEGRO

“Cosmic microwave background” Justino António Cardoso, 2015. *Tinta china*

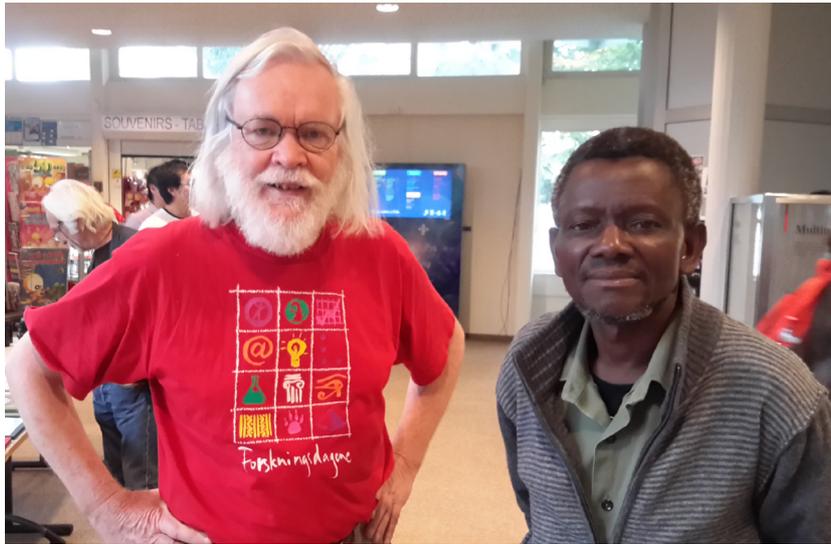
El Universo está lleno de un fondo de radiación de microondas emitidas cuando el Universo era muy joven: las irregularidades en esta radiación configuran los orígenes de las estructuras del Universo. (Cita de John Ellis)



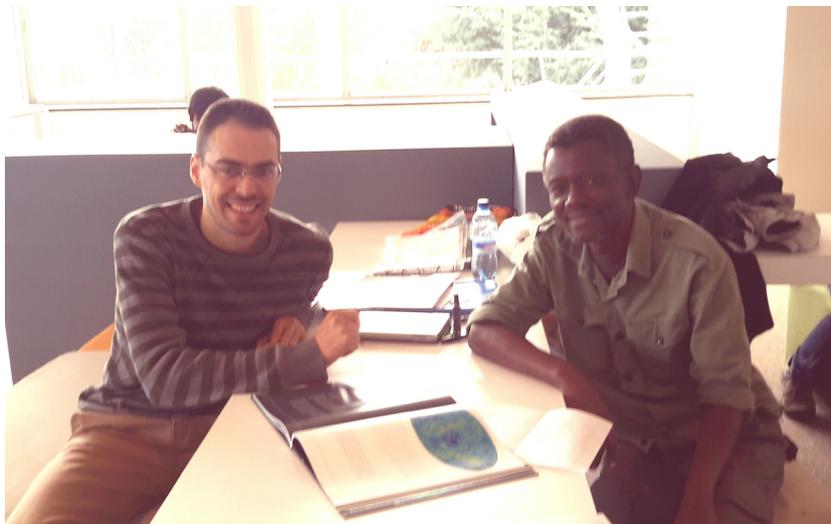
Justino António Cardoso visitando el experimento CMS
(foto de José Carlos Rasteiro Da Silva)



Justino António Cardoso en el CERN con Sergio Bertolucci y Marilena Streit-Bianchi
(foto de Bettina Hamoudi)



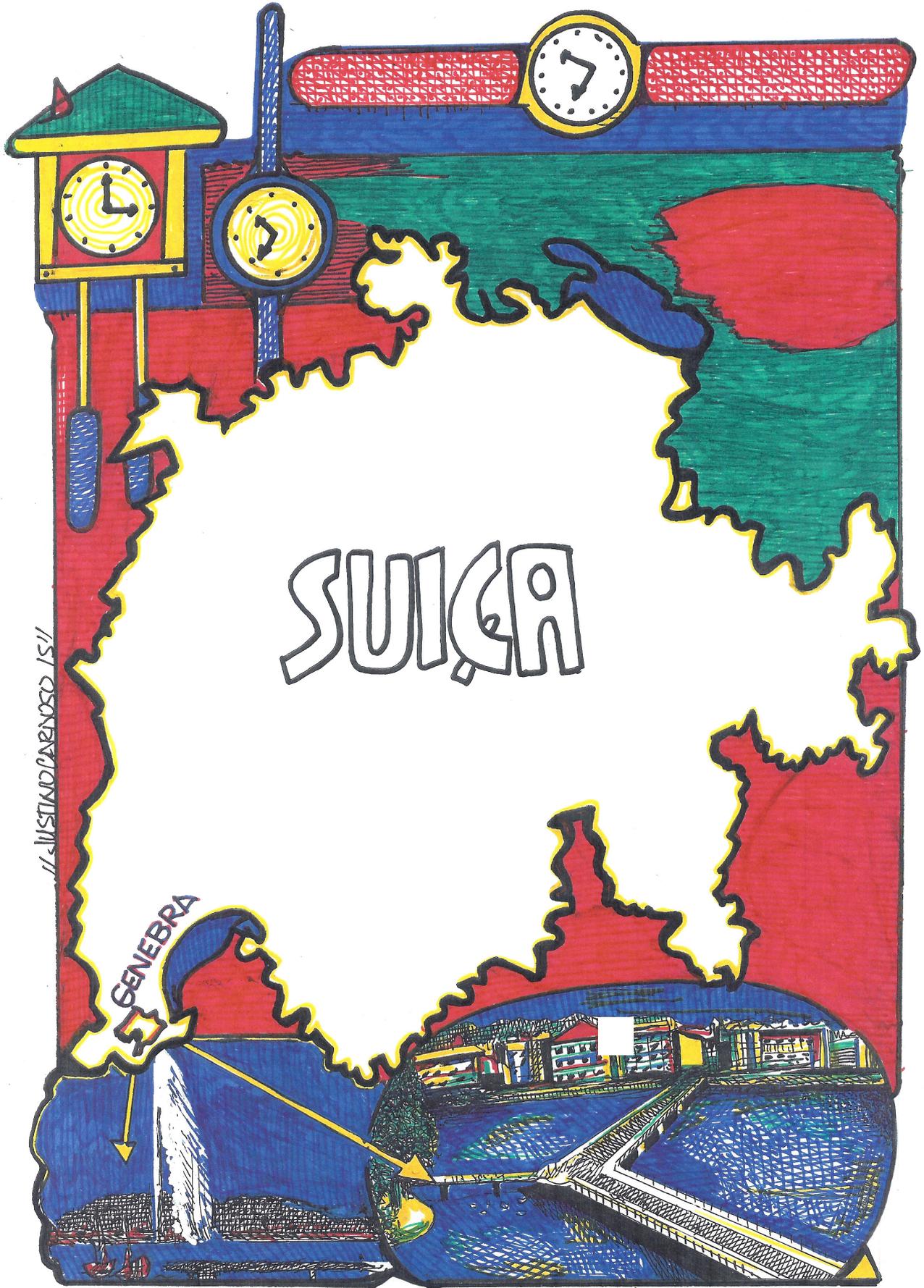
Justino António Cardoso en el CERN con John Ellis (foto de Marilena Streit-Bianchi)



Justino António Cardoso en el CERN con João Penedones Fernandes (foto de Marilena Streit-Bianchi)



Justino António Cardoso en el CERN. A su derecha Jack Steinberger (premio Nobel de física en 1988 junto a Leon Lederman y Melvin Schwartz) y a su izquierda Jean Michel Laurent, físico de la colaboración CAST (foto de Marilena Streit-Bianchi).



// ILUSTRAÇÃO CARLOS IS //

GENEVA

SUIÇA