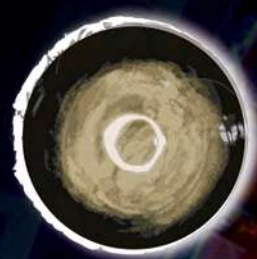


El universo en un rayo de luz
Ivonne Maldonado **pág. 8**

De los aceleradores a la IA... y de regreso
Luis Roberto Flores Castillo **pág. 14**

El Observatorio Pierre Auger
Karen Caballero **pág. 22**



OSIDIANA

Ciencia y Cultura por México

SUPERMÁQUINAS: FÍSICA DE ALTAS ENERGÍAS

AÑO 3, NÚM. 18.
MÉXICO, MARZO DEL 2026



NUESTRAS REDES SOCIALES

 @Obsidianamx  @obsidiana_mex  @obsidiana_mex

Busca contenidos exclusivos en la versión digital de **Obsidiana**, disponible en:

www.obsidianadigital.mx

 **BSIDIANA**
Ciencia y Cultura por México

MARZO 2026

obsidianadigitalmx@gmail.com

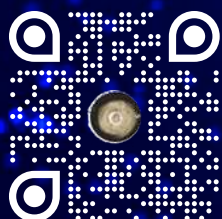


Imagen de portada:

Detalle del detector interno de CMS, con capas de sensores de silicio que registran partículas en colisiones a energías extremas en el LHC.

Foto: CERN / Colaboración CMS.

Imagen de contraportada:

Representación artística de una red neuronal artificial. En física de partículas, estas redes se utilizan para identificar patrones complejos en los datos producidos por detectores como los del LHC. Imagen generada con inteligencia artificial (OpenAI DALL-E).

Consejo Editorial

Presidente

José Franco

Estrella Burgos (†), Lamán Carranza Ramírez, Luz de Teresa, Luis Roberto Flores Castillo, Alejandro Frank, Azucena Galindo, Cinthya García Leyva, Marcia Hiriart, Alonso Huerta, Antonio Lazcano, Omar López-Cruz, María Nieves Noriega, Raúl Rojas, Pedro Salazar, José Seade, Marina Stavenhagen, Brenda Valderrama Blanco, Yael Weiss

Equipo Editorial

Lamán Carranza Ramírez

Director General

Diciembre Aguilar

Directora de Comunicación y

Vinculación

Omar Hernández

Director de Diseño e Ilustración Editorial

Jovany Cruz

Colaborador de Diseño Editorial y Web

.....
**Supermáquinas:
Física de altas energías**

Luis Roberto Flores Castillo
Editor invitado



CONTENIDO

2

Arquitectura del
conocimiento
Lamán Carranza

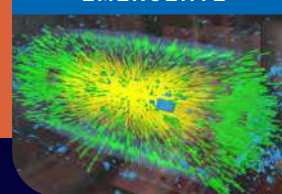
EMERGENTE



18

Universo en una gota
Irais Bautista

EMERGENTE



FRAGMENTOS



De ver el átomo a cambiar
el mundo

4

ESPEJO



20

El espejo del progreso
Lamán Carranza

AMORFO



24

Sueños circulares y
catedrales subterráneas
Luis Roberto Flores Castillo

6

De suerte a diseño
Alejandro Castilla Loeza

ESPEJO



ESPEJO



Una ventana a la Gran
Explosión: ALICE y México
Arturo Fernández Téllez

10

26

Arely Cortés: seguir una
partícula hasta el origen
del universo
Por Diciembre Aguilar

TRANSLÚCIDO



12

Aceleradores de frontera,
¿o del futuro?
Cristóbal García / Chico Partículas

ESPEJO



INSTRUSIÓN



La supermáquina somos
nosotros: Bioscénica y los
cuerpos colectivos
Alejandro Ortiz González

28

ESPEJO



Cuando la ciencia ilumina el
progreso: el sincrotrón como
motor del desarrollo de un país
Viani Morales

16

32

Partículas, Cámara
y Acción

CÓRTEX





ARQUITECTURA DEL CONOCIMIENTO

Lamán Carranza
DIRECTOR GENERAL

@LamanCarranza

@lamancarranza

@lamancarranza

La curiosidad es una fuerza discreta pero persistente. Suele empezar con algo pequeño: una pregunta que asalta al mirar el cielo o al desarmar un objeto para entender cómo funciona. Sin embargo, cuando esa chispa se organiza y se suma a la voluntad de cientos de personas, deja de ser una inquietud individual para convertirse en algo monumental. El resultado son las "supermáquinas", la materialización física de una apuesta colectiva por lo desconocido que va mucho más allá de la simple ingeniería.

Estas infraestructuras representan la escala más ambiciosa del ingenio humano. No se trata solo de construcciones monumentales; son, en esencia, herramientas diseñadas para lo imposible. Sirven para observar lo que es demasiado pequeño para el ojo humano o demasiado lejano para los telescopios convencionales. Son motores de innovación que, mientras buscan entender el origen del universo, terminan diseñando los microprocesadores del futuro, encontrando rutas para tratar enfermedades mediante haces de luz o creando sistemas de energía más limpia. En ellas, la ciencia básica se convierte en la tecnología que define nuestra vida diaria.



El Gran Colisionador de Hadrones -LHC- es el acelerador de partículas más grande y potente que ha existido. Se encuentra en la frontera francosuiiza cerca de Ginebra. Foto: CERN / Colaboración ATLAS.

Este recorrido por la física de frontera cuenta con la participación de autores como Cristóbal García, quien detalla la ingeniería detrás de las máquinas que empujan la materia a sus límites, e Irais Bautista, quien explora el plasma de quarks y gluones, ese estado primigenio donde todo comenzó. Por su parte, Karen Salomé Caballero explica cómo una red de detectores distribuida en el paisaje escucha los fenómenos más energéticos del cosmos.

Bajo la edición de Luis Flores Castillo, estas páginas aterrizan la compleji-

dad técnica para mostrar los impactos de estas supermáquinas en nuestra vida cotidiana. Aquí se analiza cómo el control de partículas y el manejo masivo de datos no son solo experimentos de laboratorio, sino la base de la medicina moderna, la industria de alta precisión y la seguridad tecnológica de un país.

Al final, estas infraestructuras son mucho más que centros de investigación: son las fábricas de las herramientas que usaremos mañana. Cada sensor calibrado y cada haz de luz generado representan un avance concreto en nuestra capacidad para resolver problemas reales. Apostar por estas supermáquinas es, sencillamente, asegurar que tengamos la tecnología necesaria para enfrentar los desafíos que vienen.

Infraestructura científica que redefine el futuro del conocimiento.



TECNOLOGÍA ESPACIAL HECHO EN MÉXICO

Misión lunar

COLMENA 1 · 2024

- La primera fase de la **Misión COLMENA** llevó al espacio un **enjambre de microrrobots**, diseñados para trabajar como un sistema colectivo.
- **5 microrrobots** autónomos.
- **Tamaño: 12 cm · Peso: 60 g** cada uno.
- Operación coordinada como enjambre.

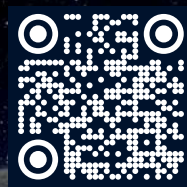
COLMENA 2 · en desarrollo

- La siguiente fase del proyecto llevará esta tecnología a la superficie lunar.
- 3 modelos de rovers lunares.
- Exploración y prospección del subsuelo.
- Navegación y posicionamiento en superficie.

Tecnología mexicana validada en espacio profundo alcanzando el **75% de los objetivos** de la misión.

Esta misión colocó **tecnología mexicana** a una distancia equivalente a la órbita lunar y generó conocimiento clave para futuras misiones.

Escanea el QR y descubre más.



¿POR QUÉ ES IMPORTANTE?



México en la exploración espacial.



Formación de talento científico.



Generación de conocimiento estratégico.

COLMENA 1 validó la tecnología. COLMENA 2 la llevará a la Luna.

www.obsidianadigital.mx

¡ADIÓS JUEGO DE GEOMETRÍA, HOLA REGLA ANGULAR DML®!

¡CONÓCELA!

ADQUIERE LA TUYA

reglaangulardml.com

55 85351844

TRAZA

MIDE

COMPRUEBA

Dan Moses. Creador de la Regla Angular DML

De un lado cuenta con centímetros, como cualquier regla común. Lo innovador está del lado derecho, donde hay grados para poder trazar, medir y comprobar ángulos.

Con sus tres colores será muy fácil usarla:

- Negros para trazar
- Azules para medir
- Rojos para comprobar
- Mejora la enseñanza y el aprendizaje
- Reduce tiempos a la hora de trazo y medición de ángulos
- Facilita la rápida comprensión de ángulos agudos y obtusos
- Muestra de manera más gráfica los ángulos complementarios y suplementarios
- Posibilidad de dar magnitud y dirección a un vector en un solo trazo



FRAGMENTOS

DE VER EL ÁTOMO

130 años de aceleradores, detectores y

● Aceleradores

● 1897

Descubrimiento del Electrón.

El inicio de la física subatómica por Joseph John Thomson.



● 1911

Cámara de Niebla.

Charles Wilson inventó este detector inspirado en nubes de tormenta.



● 1927

Robert Van de Graaff construyó generadores de alto voltaje para experimentos nucleares



● 1930

Primer Ciclotrón.

El primer acelerador circular.



● 1960

Aceleradores para semiconductores.

Ralph Van de Graaff y su equipo usaron aceleración para implantar iones en microchips.

● 1970s

Radiación sincrotrón aplicada.

Björn Wiik y otros promovieron su uso en biología y materiales en DESY.

● 1970s

Irradiación de alimentos.

Aplicaciones FAO-IAEA con aceleradores y fuentes gamma.

● 1971

ISR (CERN)

Kjell Johnsen y su equipo construyeron el primer gran colisionador protón-protón.

● 1980s

Detectores integrados.

UA1 y UA2 en CERN integraron detectores de muones en un solo sistema.

● 1980s

Terapia con protones.

Herman Suit llevó el uso clínico del pico de Bragg a hospitales.

● 1980s

Primeras fuentes de luz sincrotrón dedicadas.

NSLS y DORIS hicieron de la radiación sincrotrón una herramienta científica clave.

● 1983

Tevatron (Fermilab).

Wilson y Edwards construyeron el primer acelerador superconductor de 1 TeV por haz.

● 2000

Sincrotrones de 3a. generación.

ESRF (Francia), APS (EE. UU.) y Spring-8 (Japón) generaron haces de altísima brillantez.

● 2008

LHC (CERN)

Lyn Evans li más potente



MO A CAMBIAR EL MUNDO

aplicaciones que transformaron la ciencia y la vida cotidiana.

● Detectores

● Aplicaciones

● 1943

Calutrón (Proyecto Manhattan).
Ernest Lawrence adaptó su ciclotrón para separar isótopos de uranio en Oak Ridge.



● 1952

Cámara de Burbujas de Donald Glaser.
Detector, inspirado en una copa de cerveza.



● 1954

Fundación del CERN.
Por Pierre Auger y Edoardo Amaldi, símbolo de cooperación científica tras la guerra.



● 1959

Sincrotrón de protones (CERN).
John Adams lideró el proyecto que alcanzó 28 GeV en protones.



● 2012

Descubrimiento del bosón de Higgs.
ATLAS y CMS, con Fabiola Gianotti y Joe Incandela, lo anunciaron.

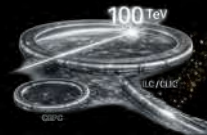


● 2020

Sincrotrones de 4a. generación.
MAX IV (Suecia) y Sirius (Brasil) impulsan la biología estructural y la nanotecnología.

Proyectos futuros de aceleradores de partículas

● **Proyectos FCC, ILC/CLIC y CEPC:**
futuras máquinas del CERN y la comunidad global, rumbo a los 100 TeV.



● **Detectores 4D:**
en ATLAS, CMS y ALICE, combinan espacio-tiempo con precisión de picosegundos.



● **Nuevas aplicaciones:**
de aceleradores médicos compactos a motores iónicos espaciales, derivados de la física de aceleradores.





ESPEJO



DE SUERTE A DISEÑO

Alejandro Castilla Loeza

THOMAS JEFFERSON NATIONAL ACCELERATOR FACILITY, EE.UU.
DEPARTMENT OF PHYSICS, OLD DOMINION UNIVERSITY, EE.UU.



El tubo de rayos catódicos con el que J. J. Thomson identificó el electrón en 1897. Foto: Science Museum / Science & Society Picture Library (vía Wikimedia Commons).

Los
aceleradores
de partículas
son herramientas
para entender y
transformar
el mundo.

El primer abrelatas, creado por Ezra Warner en 1858, apareció casi cincuenta años después de que Peter Durand patentara la primera lata de comida en 1810. Y esa lata fue posible gracias al método de esterilización desarrollado ese mismo año por Nicholas François Appert. La historia comienza todavía antes: en 1795, cuando Napoleón Bonaparte ofreció doce mil francos a quien resolviera un problema urgente: cómo conservar alimentos para sus soldados.

Primero nació la necesidad. Luego la solución. Y después, la mejora de la solución.

La lata llegó antes que el abrelatas. En 1870, William Lyman presentó el diseño manual que hoy reconocemos. En 1931 apareció la versión eléctrica. Casi siglo y medio de ajustes e innovaciones nos permite hoy abrir una lata de chiles en segundos y comer con tranquilidad. Lo que empezó como un desafío militar terminó convertido en un gesto cotidiano.

La historia de la física nuclear y de los aceleradores de partículas tiene algo en común con la saga del abrelatas: comenzó sin que nadie pudiera imaginar su alcance.

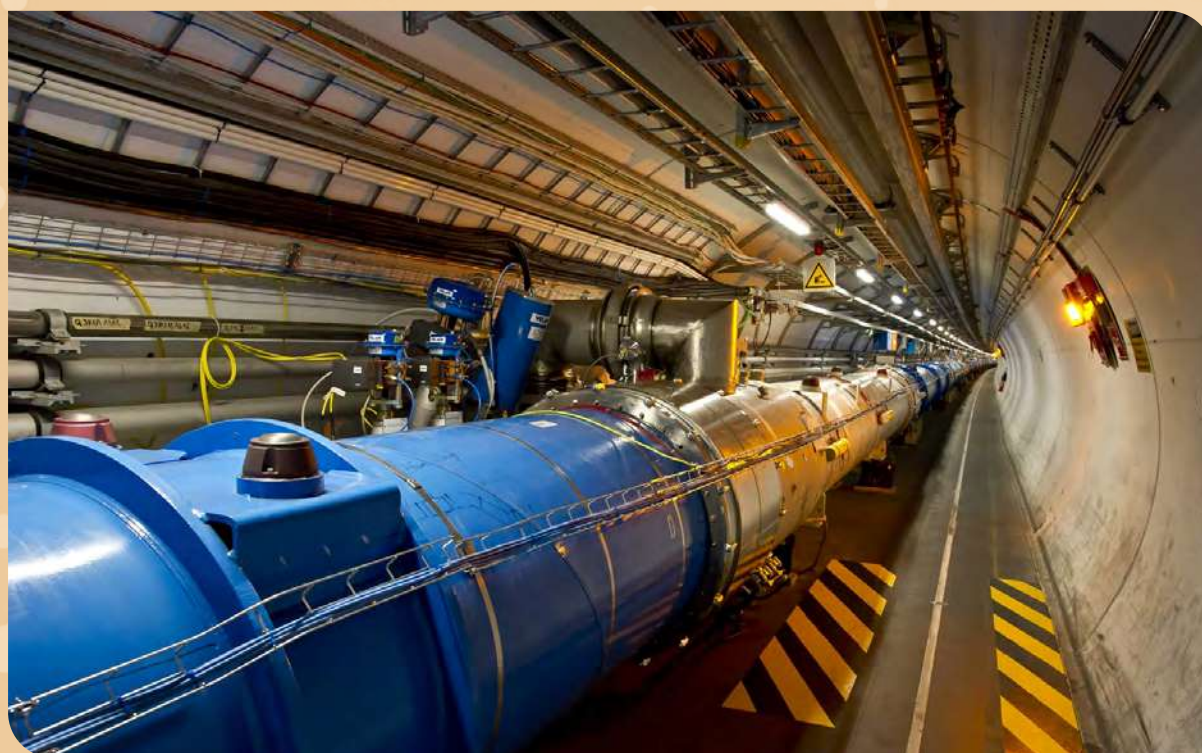
En 1897, J. J. Thomson identificó el electrón. En ese momento no estaba pensando en teléfonos celulares ni en hospitales. La investigación experimental de finales del siglo XIX era casi artesanal. Imagine un tubo de vidrio soplado, de unos 50 centímetros, construido en el laboratorio Cavendish. Un objeto delicado, con anillos de cobre, placas metálicas en su interior y alambres sellados con cera para mantener el vacío.

Ese “tubo de rayos catódicos” era, en esencia, un acelerador primitivo. Con él, Thomson abrió la puerta al mundo subatómico y cambió nuestra idea de la materia.

Tras descubrir el electrón, propuso un modelo del átomo comparable a un panqué con pasas: una masa positiva con electrones incrustados. No veía aplicaciones prácticas. De hecho, solía brindar diciendo: “¡Por el electrón, que quizá nunca será útil a nadie!”

Hoy resulta imposible imaginar un día sin electrones trabajando para nosotros: en el teléfono, en el automóvil, en la esterilización de alimentos o en tratamientos contra el cáncer.

Ernest Rutherford, discípulo de Thomson, dio el siguiente paso y propuso el modelo planetario del átomo. Más tarde pidió a sus estudiantes Ernest Walton



El túnel del Gran Colisionador de Hadrones (LHC) del CERN. Sus imanes superconductores guían haces de protones a energías cientos de millones de veces mayores que las alcanzadas en los primeros tubos de rayos catódicos. Foto: CERN.

¹ Un electronvoltio es la energía que gana un electrón cuando se mueve a través de una diferencia de voltaje de 1 volt.

y John Cockcroft que construyeran un acelerador capaz de alcanzar un millón de electronvoltios¹. En los años treinta lograron dividir el átomo con el generador Cockcroft-Walton, alcanzando energías de 700 mil electronvoltios. El logro les valió el Premio Nobel.

Con el tiempo, el diseño de aceleradores dejó de seguir únicamente las preguntas de la física nuclear y empezó a desarrollar sus propios objetivos: alcanzar mayores energías, producir haces más intensos y construir máquinas más compactas, especialmente útiles en medicina e industria.

Pero ¿qué es, en términos simples, un acelerador de partículas? Puede pensarse como una receta con cuatro ingredientes:

- **Fuente:** de donde obtenemos partículas cargadas.
- **Campo eléctrico:** que les da energía, como si las empujara.
- **Campos magnéticos:** que guían su trayectoria.
- **Vacío:** la ausencia de aire que evita que las partículas choquen con moléculas en su camino.

La física que describe este proceso se conoce como la fuerza de Lorentz. Más allá de la fórmula, basta imaginar una escena común entre físicos: extienden el dedo índice en la dirección de la partícula, el dedo medio señala el campo magnético y el pulgar indica hacia dónde actúa la fuerza. Es la famosa “regla de la mano derecha”. Incluso aparece ilustrada en un billete suizo de 200 francos emitido en 2018. La ciencia también se imprime en la cultura.

El impacto de los aceleradores va mucho más allá de los laboratorios. En 1937, los hermanos Varian, junto con William

Comprender la materia ha sido una de las formas más poderosas de diseñar el futuro.



Hansen, desarrollaron el klistrón, pieza clave en los sistemas de radar usados durante la Segunda Guerra Mundial. Más tarde se enfocaron en aceleradores para el tratamiento del cáncer. Hoy, Varian figura entre las compañías que lideran el mercado mundial de sistemas de radioterapia.

En los años setenta, detectores derivados de la física nuclear contribuyeron al desarrollo de la resonancia magnética, fundamental en el diagnóstico médico. En 1945, Percy Spencer observó que una barra de chocolate se derretía cerca de una fuente de radiofrecuencia; ese hallazgo casual llevó al horno de microondas. En 1989, en el CERN, Tim Berners-Lee desarrolló la red mundial de comunicación que hoy conocemos como internet.

Sin exagerar, el mundo actual sería muy distinto sin estas aplicaciones surgidas —algunas por diseño, otras por sorpresa— del estudio de las partículas.

Entonces, ¿para qué sirven los aceleradores? No hay una respuesta breve. En 2011, el Departamento de Energía de Estados Unidos lo resumió así: un haz de partículas con la energía adecuada pue-

de reducir tumores, producir energía más limpia, detectar amenazas, mejorar materiales, purificar agua, fechar objetos arqueológicos o revelar los secretos del universo.

De suerte a diseño. De experimento artesanal a tecnología global. La ciencia avanza así: primero responde preguntas fundamentales y, con el tiempo, transforma la vida de quienes quizá nunca imaginaron estar conectados con un tubo de vidrio soplado en el siglo XIX. ©



Sistema de terapia con protones para el tratamiento del cáncer. Un acelerador compacto produce haces de protones que pueden dirigirse con gran precisión hacia el tumor. Foto: Romina Cialdella / Wikimedia.



EL UNIVERSO EN UN RAYO DE LUZ

Ivonne Alicia Maldonado Cervantes
INSTITUTO DE CIENCIAS NUCLEARES, UNAM

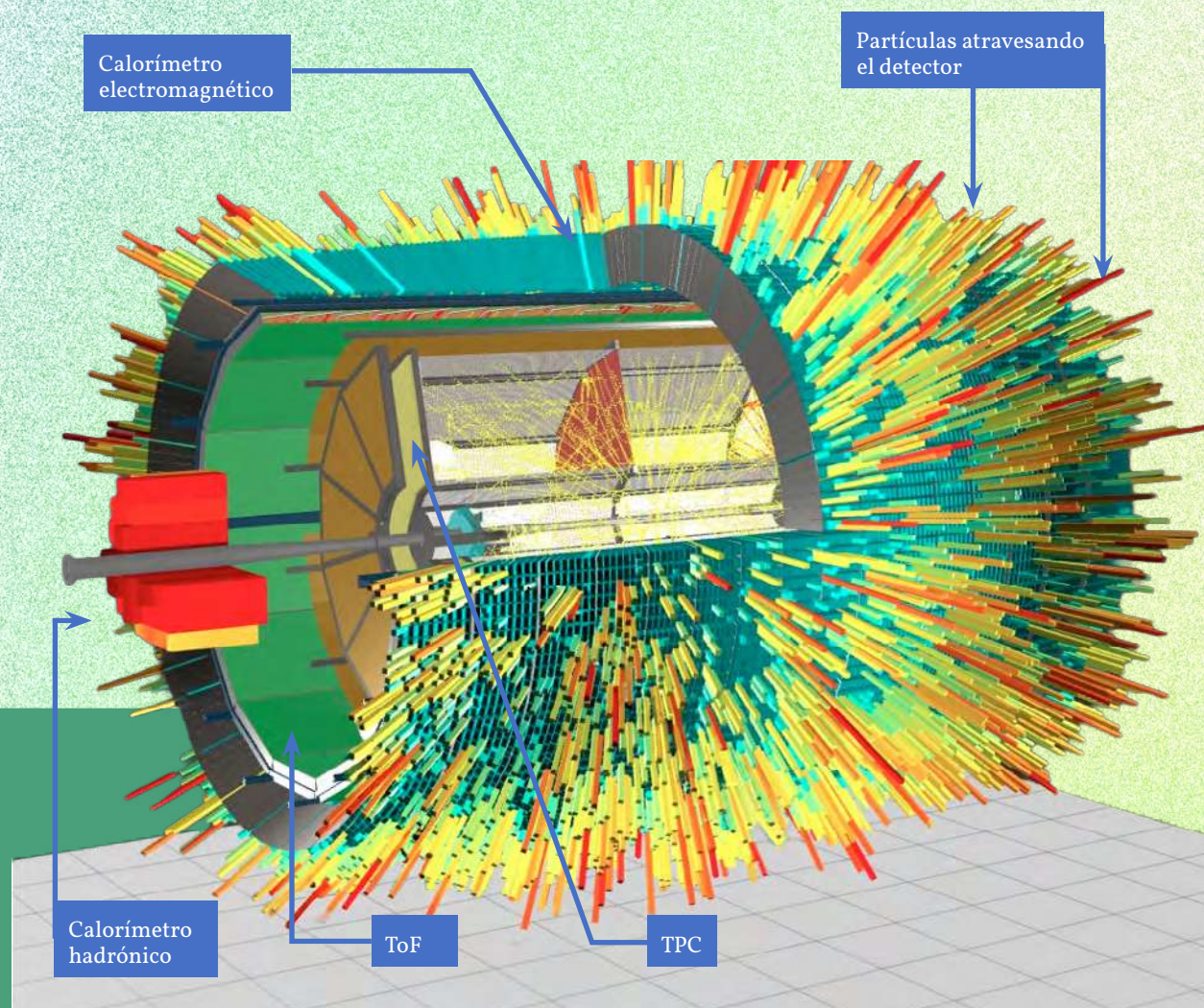
Recuerdo que de niña miraba un rayo de sol atravesar la ventana. En ese cono de luz flotaban partículas: algunas como puntos diminutos, otras como líneas onduladas que parecían danzar sin orden. Durante años pensé que el polvo vivía dentro de la luz. Después entendí que estaba en todas partes; simplemente se volvía visible cuando interactuaba con los fotones del Sol. Esa dispersión —el efecto Tyndall, descrito por John Tyndall en 1869— es lo que permite que lo invisible, de pronto, aparezca ante nuestros ojos.

En física de altas energías ocurre algo parecido. En experimentos de colisiones de iones pesados como el MPD (Multi-Purpose Detector), parte del complejo NICA del JINR, las partículas que nos interesa estudiar no se parecen en nada a aquellas motas de polvo. Son infinitamente más pequeñas y viven apenas fracciones de segundo. Sin embargo, el principio es el mismo: no vemos las partículas directamente, vemos su interacción con la materia que las rodea.

El MPD busca recrear en el laboratorio el estado primigenio de la materia: el plasma de quarks y gluones (QGP),

presente en los primeros instantes del universo. Queremos entender cómo esa materia “desconfinada” cambió de fase hasta formar protones, neutrones y, eventualmente, todo lo que hoy conocemos. Pero estas partículas son demasiado pequeñas o demasiado efímeras para observarlas directamente. Por eso desarrollamos detectores: instrumentos que nos permiten reconstruir su existencia de manera indirecta.

En física nuclear y de partículas, los detectores registran la interacción de las partículas con la materia. Aunque existen cuatro fuerzas fundamentales, los detectores se basan en la interacción electromagnética. Detectamos partículas cargadas porque ionizan el medio que atraviesan: pierden energía al arrancar electrones de los átomos. También podemos medir la emisión de fotones al interactuar con núcleos (radiación Bremsstrahlung), la ra-



El plasma de quarks y gluones es un eco del universo recién nacido.

Simulación de partículas producidas en una colisión de iones pesados, atravesando los diferentes sistemas del MPD.

diación Cherenkov cuando una partícula viaja más rápido que la luz en un material, o la radiación de transición al cruzar la frontera entre dos medios. Todo ello deposita energía que convertimos, finalmente, en una señal eléctrica medible.

Las partículas neutras no dejan huella directa, pero sí podemos detectar las partículas cargadas que producen al interactuar con el detector. Este principio no está limitado a los grandes laboratorios: también se usa en hospitales. En estudios médicos se detectan fotones emitidos por radioisótopos para identificar tumores, o se monitorean las reacciones nucleares inducidas por haces de protones o iones de carbono en terapia hadrónica. Lo que comenzó como una herramienta para entender el universo, hoy salva vidas.

El MPD está formado por múltiples capas, cada una diseñada para registrar distintos aspectos de la interacción de las partículas con la materia. Tras la colisión de iones pesados, el QGP se forma y evoluciona rápidamente hacia hadrones que emergen en todas direcciones. Primero atraviesan los sistemas de rastreo y el campo magnético; luego los calorímetros electromagnéticos y hadrónicos; finalmente, los detectores de muones.

Para reconstruir trayectorias, el MPD utiliza principalmente una Cámara de Proyección de Tiempo (TPC), inventada por D. R. Nygren en 1976. Es un gran volumen cilíndrico lleno de gas, inmerso en campos eléctrico y magnético. Cuando una partícula cargada lo atraviesa, ioniza el gas. Los electrones y iones derivados viajan hacia los extremos del detector. Midiendo el tiempo que tardan en llegar y la posición en la que impactan, podemos reconstruir en tres dimensiones la trayectoria de la partícula.

El campo magnético curva esa trayectoria debido a la fuerza de Lorentz, lo que permite determinar su momento y su



La misma física que estudia el Big Bang ayuda a diagnosticar y tratar enfermedades.

Colisionador de partículas NICA (Nuclotron-based Ion Collider Facility) en Dubna, Rusia.

carga. A partir de la pérdida de energía —descrita por la ecuación de Bethe-Bloch— podemos identificar si se trata de un pión, un protón u otra partícula cargada.

Rodeando a la TPC se encuentra el detector de tiempo de vuelo (TOF). Midiendo el tiempo que tarda una partícula en recorrer una distancia conocida, diferenciamos partículas ligeras de pesadas con el mismo momento. En el MPD, el TOF utiliza Cámaras de Placas Resistivas de Espacios Múltiples (MRPC), desarrolladas en 1979, donde electrodos sometidos a alto voltaje y separados por gas permiten medir con gran precisión el instante de llegada de la señal.

Después vienen los calorímetros: electromagnéticos, que absorben electrones y fotones; y hadrónicos, más densos, que detienen protones y neutrones. Al incidir una partícula se producen cascadas internas que generan señales proporcionales a

su energía. Sólo los muones —200 veces más pesados que los electrones y mucho menos interactivos— logran atravesarlos, por lo que una última capa especializada los detecta.

Con toda la información reunida —masa, carga, energía y momento— reconstruimos el evento completo. Podemos determinar el punto de origen de las partículas, su abundancia y si se formó o no el plasma de quarks y gluones. Al comparar los resultados con modelos teóricos y con colisiones de protones, estimamos la temperatura, la densidad y el tipo de transición de fase. En otras palabras: reconstruimos, en miniatura y por instantes, las condiciones del universo después del Big Bang.

Como aquel polvo suspendido en la luz, el universo siempre estuvo ahí. Lo que cambia es nuestra capacidad para hacerlo visible. Cada detector es una ventana nueva. Cada señal eléctrica, una pista. Cada colisión, una oportunidad de entender de qué estamos hechos.

Y en ese esfuerzo, inevitablemente, también nos vemos reflejados. ●



UNA VENTANA A LA GRAN EXPLOSIÓN: ALICE Y MÉXICO

Arturo Fernández Téllez

FCFM - VICERRECTORÍA DE INVESTIGACIÓN Y ESTUDIOS DE POSGRADO, BUAP

El Gran Colisionador de Hadrones (LHC, por sus siglas en inglés) es la máquina científica más grande construida para estudiar la materia en su nivel más profundo. Su función es acelerar partículas subatómicas —como los protones, que forman parte del núcleo de los átomos— hasta energías extremadamente altas y hacerlas colisionar entre sí. En esos impactos se concentra una enorme cantidad de energía en un espacio diminuto, recreando condiciones semejantes a las que existieron poco después de la Gran Explosión.

El LHC es un anillo subterráneo de 27 kilómetros donde circulan haces de partículas en sentidos opuestos hasta encontrarse y chocar. En los puntos de colisión se encuentran enormes sistemas de detección, es decir, instrumentos diseñados para registrar las partículas que emergen tras el impacto.

En esta infraestructura operan cuatro grandes experimentos: ATLAS, CMS, LHCb y ALICE. Cada uno es, en esencia, un detector gigantesco con un propósito específico. ATLAS y CMS son experimentos de propósito general: estudian todo lo que pueda surgir en colisiones de alta energía y buscan nuevas partículas o fenómenos físicos. LHCb se concentra en analizar con gran precisión ciertas partículas que permiten estudiar diferencias entre materia y antimateria.

ALICE (A Large Ion Collider Experiment), en cambio, fue diseñado para investigar qué ocurre cuando la materia alcanza temperaturas y densidades extremas.



Arturo Fernández en el túnel del LHC, inspeccionando el sistema electromecánico.

Para lograrlo, el LHC no solo hace chocar protones. También puede acelerar iones de plomo, es decir, núcleos atómicos mucho más pesados. El plomo tiene una masa aproximadamente 207 veces mayor que la del protón. Cuando estos núcleos pesados colisionan, se genera una concentración excepcional de materia nuclear y energía.

Bajo esas condiciones, los componentes internos de los protones y neutrones —llamados quarks y gluones— pueden liberarse momentáneamente. A este estado se le conoce como plasma de quarks y gluones (QGP, por sus siglas en inglés). Desde la década de 1990, los físicos propusieron que este plasma debió existir instantes después de la Gran Explosión. En 2005 se confirmó su existencia experimentalmente, y desde el inicio de operaciones del LHC, el experimento ALICE se dedica a estudiarlo.

La participación mexicana en ALICE comenzó con la construcción de instrumentos de detección específicos.

Uno de ellos fue el detector V0, diseñado para medir cuántas partículas se producen en cada colisión y cómo se distribuyen. Esta información es esencial para clasificar y comprender los eventos registrados.

Otro fue ACORDE (A Cosmic Ray Detector for ALICE), un sistema construido para registrar partículas provenientes de rayos cósmicos que atraviesan más de 50 metros de roca antes de llegar a la caverna del experimento. Esto permite distinguir señales externas de las producidas por las colisiones del LHC y, al mismo tiempo, estudiar fenómenos asociados a esos rayos cósmicos.

Posteriormente se desarrolló el detector ADD (ALICE Diffractive Detector), enfocado en analizar colisiones no comple-

El Gran Colisionador de Hadrones acelera partículas para estudiar la estructura más profunda de la materia.

tamente frontales, es decir, impactos que dejan señales más sutiles en el centro del experimento. Actualmente el grupo mexicano trabaja en el FDD (Forward Diffractive Detector), una versión actualizada adaptada a las nuevas condiciones de operación del LHC.

Cada uno de estos sistemas forma parte de un conjunto mayor. No son dispositivos aislados, sino elementos integrados que permiten reconstruir lo ocurrido en cada colisión.

México contribuye con detectores clave dentro del experimento ALICE.

Detrás de estos desarrollos hay más de dos décadas de trabajo de investigadores y estudiantes de instituciones públicas mexicanas como la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP), el Centro de Investigación y de Estudios Avanzados (CINVESTAV), la Universidad Autónoma de Sinaloa (UAS) y la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). En sus laboratorios se diseñaron, construyeron y probaron estos sistemas antes de integrarlos en el CERN.

El caso de ACORDE ilustra ese recorrido. La propuesta fue presentada en 2002 ante la Colaboración Internacional ALICE. Tras dos años de desarrollo fue aceptada e incorporada al programa científico en 2004. En 2006 comenzó a utilizarse para calibrar uno de los detectores centrales del experimento, demostrando alta eficiencia y sensibilidad. Operó de manera estable hasta 2018.

Además del desarrollo instrumental, el grupo mexicano participa activamente en el análisis de los datos obtenidos por ALICE. De este trabajo han surgido numerosos artículos científicos sobre colisiones de iones pesados. Entre los resultados más relevantes se encuentra la evidencia de que el plasma de quarks y gluones puede generarse no solo en colisiones entre núcleos pesados, sino también en choques protón-protón o protón-núcleo, lo que amplió la comprensión de estos procesos en la cromodinámica cuántica.

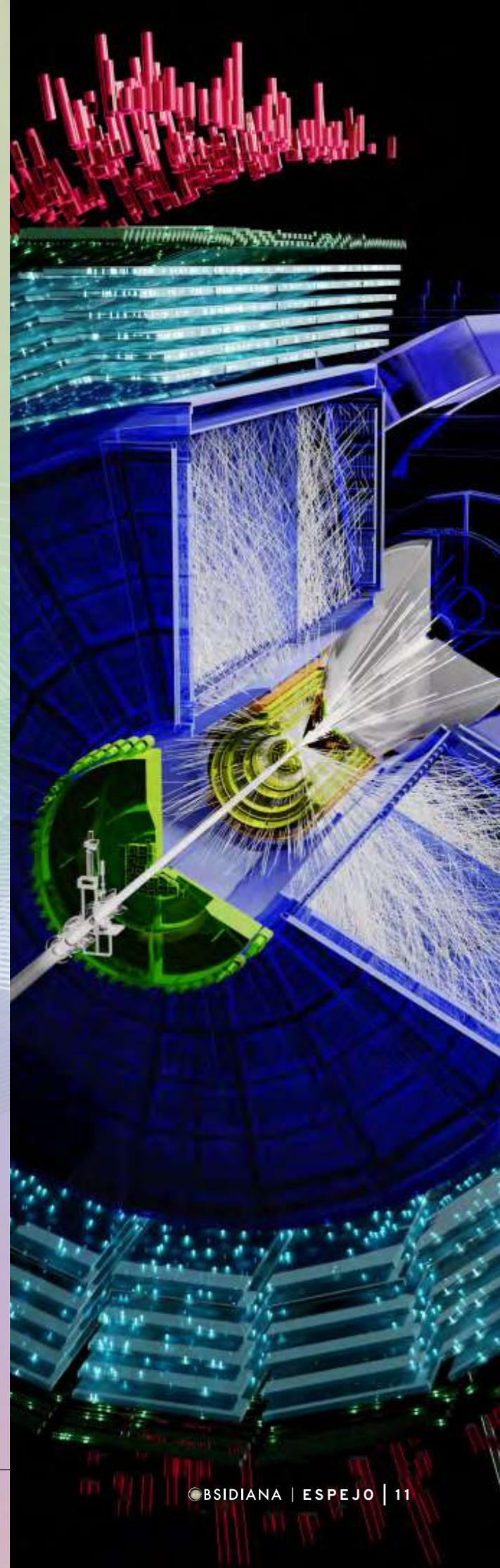
El LHC permite recrear, por instantes, condiciones semejantes a las del universo temprano. ALICE estudia ese estado extremo de la materia. Y en ese esfuerzo, México forma parte activa de una colaboración científica internacional que busca comprender cómo evolucionó la materia desde sus primeras etapas hasta constituir el universo que hoy habitamos. 



M. Ivan Martínez, Arturo Fernández, L. Alberto Pérez enfrente del experimento ALICE-LHC del CERN.



Instalación de centelladores ACORDE sobre el magneto de ALICE. En la foto: Mario Rodríguez (BUAP) e Ivonne Maldonado (UNAM).





ACELERADORES DE FRONTERA, ¿O DEL FUTURO?

Cristóbal Miguel García Jaimes / Doctor Partículas
DEPARTMENT OF PHYSICS AND ASTRONOMY, UNIVERSITY OF HAWAII, EE.UU.

Un acelerador de partículas es, en esencia, una máquina diseñada para incrementar la energía de las partículas. Se habla de energía y no de velocidad porque, cuando una partícula se acerca a la velocidad de la luz, los cambios en esa velocidad se vuelven prácticamente imperceptibles. Resulta más claro describirlas en términos de energía: cantidades como 45.6 GeV o 182.5 GeV.

Estas cifras se expresan en electron-voltios, una unidad que indica la energía que adquiere un electrón al atravesar un campo eléctrico. En ese lenguaje —el de la energía— es donde realmente se entiende el funcionamiento de los aceleradores.

Para comprender cómo logran esto, basta recordar qué entendemos por una partícula. En física se trata de una porción de materia con propiedades definidas que puede considerarse uniforme en su extensión. Por eso solemos representarlas como esferas: una manera sencilla de expresar que no hay partes distintas dentro de ellas. Muchas partículas, además de masa, poseen carga eléctrica, y es justamente esa carga la que permite a los aceleradores “empujarlas” mediante campos eléctricos para incrementar su energía.

Cuando esa energía se concentra en el punto donde dos haces colisionan, ocurre uno de los procesos más sorprendentes de

Un acelerador incrementa la energía de las partículas para revelar la estructura de la materia.



Vista aérea de la región de Ginebra con el trazado del Gran Colisionador de Hadrones (LHC), un anillo subterráneo de 27 km actualmente en operación. A lo largo de este túnel, cuatro enormes detectores —ATLAS, CMS, ALICE y LHCb— registran colisiones de partículas a las energías más altas alcanzadas en laboratorio. Foto: CERN.

la naturaleza: la energía puede transformarse en nuevas partículas. Es una manifestación directa de la ecuación más conocida de la física, $E = mc^2$. En un acelerador, esa relación deja de ser una fórmula abstracta y se convierte en un fenómeno observable.

Los aceleradores no tienen un solo propósito. Su uso depende principalmente de la energía que alcanzan, del tipo de partículas que pueden acelerar y del objetivo contra el cual se dirigen. En México existe un dicho que lo resume bien: “de acuerdo al sapo es la pedrada”. Así, un acelerador puede emplearse para tratar cáncer mediante haces de protones, para implantar iones

en materiales industriales o para estudiar reacciones nucleares en investigación básica. Las diferencias entre estas aplicaciones radican en las condiciones del haz: su energía, su intensidad y el tiempo durante el cual se mantiene activo.

En investigación científica, los aceleradores son herramientas indispensables para poner a prueba teorías físicas. Permiten explorar fenómenos que no pueden observarse de otra manera. Sin embargo, no se trata de disparar partículas al azar. Cada experimento se diseña cuidadosamente, guiado por preguntas específicas y por predicciones teóricas que indican qué buscar y en qué condiciones hacerlo.

Dentro de este panorama existen los llamados aceleradores de frontera. Son aquellos que, en un momento dado, representan el límite de lo posible en energía, tecnología e innovación. Ese límite no es permanente: cambia conforme avanza la ciencia.

En su momento, el Tevatron del Fermilab —un laboratorio nacional en Estados Unidos— fue el acelerador más poderoso del mundo. Alcanzó energías del orden de un tera-electron-voltio (TeV) y permitió el descubrimiento del quark top en la década de 1990. A partir de 2008, el liderazgo pasó al Gran Colisionador de Hadrones (LHC, por sus siglas en inglés), ubicado en el CERN —la Organización Europea para la Investigación Nuclear—. Este acelerador, un anillo subterráneo de 27 kilómetros de circunferencia, puede alcanzar energías cercanas a los 14 TeV en el punto donde colisionan las partículas. En él se logró, en 2012, el descubrimiento del bosón de Higgs, una pieza clave del modelo estándar de la física de partículas.

Como ocurre en toda actividad humana, el conocimiento no se detiene. Hoy se trabaja en el diseño de una nueva

Diseñar estas máquinas es construir herramientas para explorar el origen de la materia.



Centro de Control del CERN (CCC), donde se supervisa la operación de todo el complejo de aceleradores del laboratorio desde las primeras etapas de aceleración hasta el Gran Colisionador de Hadrones (LHC). Foto: CERN.



El anillo del LHC frente al trazado propuesto del Future Circular Collider (FCC), un acelerador de más de 90 km concebido para explorar nuevas fronteras de la física. Imagen: CERN.

generación de aceleradores, entre ellos el Future Circular Collider (FCC), un proyecto internacional que busca superar las capacidades actuales y ampliar el alcance experimental de la física.

En ese esfuerzo participan equipos de distintas áreas y países. El trabajo consiste en resolver un desafío fundamental: lograr que los haces de partículas sigan trayectorias precisas, mantengan el tamaño adecuado y lleguen al punto de colisión en

el momento exacto. Puede parecer similar a organizar el tráfico en una autopista, pero la diferencia es que aquí se trata de partículas diminutas cuyo control exige una precisión extrema.

El diseño de estos aceleradores implica considerar múltiples factores, incluso geográficos. En el caso del CERN, ubicado entre Suiza y Francia, el terreno montañoso hace más viable construir un anillo de gran circunferencia que uno más compacto. Así, elementos naturales influyen directamente en la ingeniería de estas máquinas.

A lo largo del tiempo surgen nuevas propuestas para optimizar su funcionamiento. Una de ellas consiste en utilizar imanes capaces de realizar simultáneamente funciones de guía y enfoque del haz. Estas innovaciones podrían reducir pérdidas de energía y aumentar la eficiencia del sistema, permitiendo alcanzar mayores energías en las colisiones.

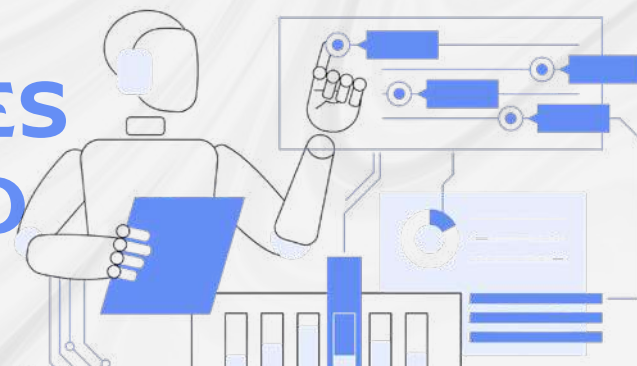
Trabajar en el diseño de aceleradores de frontera es, en muchos sentidos, como armar un enorme rompecabezas. Cada componente debe colocarse con precisión para que el conjunto funcione. En ese proceso se combinan física, ingeniería y creatividad, con el objetivo de construir herramientas que permitan explorar las preguntas más profundas sobre la materia y el universo. ●



DE LOS ACELERADORES A LA IA... Y DE REGRESO

Luis Roberto Flores Castillo

DEPARTMENT OF PHYSICS, THE CHINESE UNIVERSITY OF HONG KONG,
HONG KONG SAR, CHINA



Los aceleradores de partículas y la inteligencia artificial parecen, a primera vista, mundos muy distintos. Unos son enormes instalaciones donde haces de partículas viajan casi a la velocidad de la luz; la otra está formada por algoritmos que operan en computadoras. Sin embargo, ambos están profundamente ligados. La razón es simple: un acelerador moderno genera más datos que casi cualquier otro experimento científico. Para encontrar, entre billones de colisiones, aquellas que podrían revelar fenómenos desconocidos, fue necesario desarrollar métodos avanzados de selección y análisis de información.

Desde los años ochenta surgió el primer gran desafío: decidir, en fracciones de microsegundo, qué colisiones valía la pena conservar y cuáles debían des-

cartarse. A estos sistemas se les conoce como *triggers*, mecanismos automáticos de selección en tiempo real. En el Tevatrón de Fermilab se implementaron jerarquías de filtros electrónicos para seleccionar, entre millones de colisiones, solo alrededor de un centenar por segundo. Con la llegada del LHC la escala se volvió aún más extrema: cientos de millones de colisiones por segundo deben reducirse a apenas unos miles de eventos almacenables. Para lograrlo fue necesario construir enormes

centros de procesamiento y desarrollar el *Worldwide LHC Computing Grid* (WLCG), una red mundial de cómputo distribuido que en su momento se convirtió en la mayor infraestructura científica de su tipo y antecedente directo de lo que hoy conocemos como computación en la nube.

Cada salto tecnológico en los aceleradores ha estado acompañado por transformaciones en las herramientas informáticas. La electrónica analógica de los primeros aceleradores del CERN dio paso a las grandes computadoras centrales; más tarde surgieron las redes de estaciones de trabajo, el nacimiento de la World Wide Web en 1989 y, posteriormente, las granjas de procesadores que

La inteligencia artificial nació en los laboratorios científicos mucho antes de llegar a nuestra vida cotidiana.

La aplicación EGL (Experiment Grid Live) muestra, casi en tiempo real la actividad de la red WLCG, incluyendo el movimiento de datos de los trabajos en ejecución de los experimentos ATLAS, CMS, LHCb y ALICE. (Imagen tomada del video de João Pequeno Antunes/Mayank Sharma/CERN)

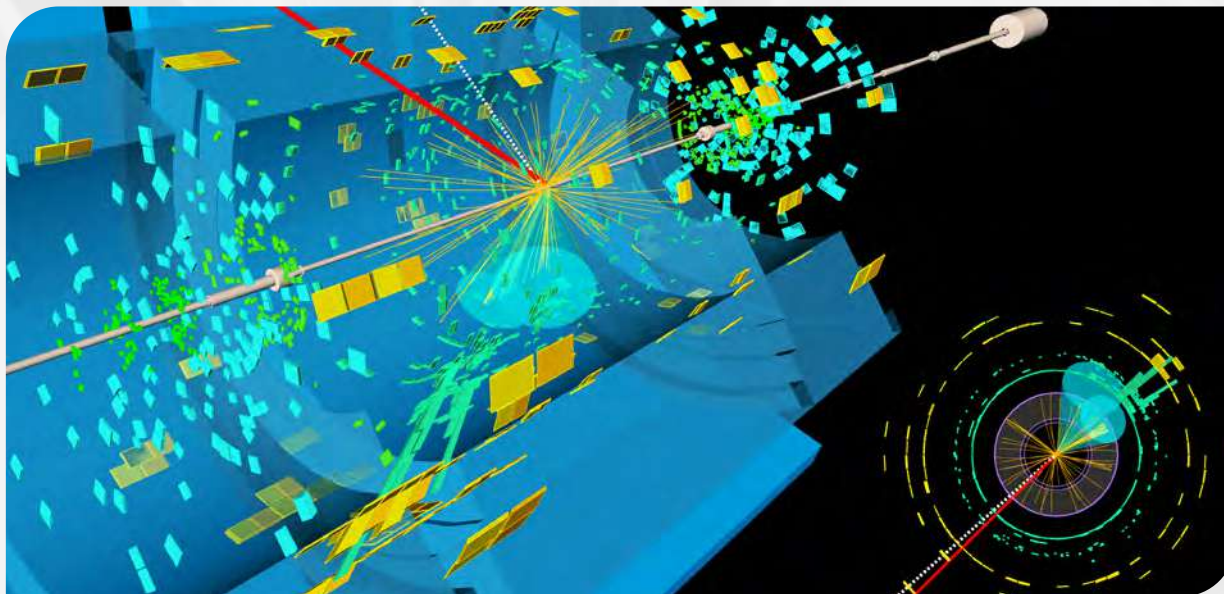


hoy sostienen la física de partículas. De esta manera, la historia de los aceleradores ha avanzado en paralelo con las fronteras de la informática.

Otro aspecto fundamental ha sido el modelo abierto con el que se desarrollan estas herramientas. Programas como ROOT, GEANT o TMVA, creados en el CERN para análisis y simulación de datos, se distribuyen de forma libre y han sido utilizados por miles de científicos e ingenieros fuera de la física de partículas, convirtiéndose en plataformas de formación tecnológica global.

El siguiente paso fue la adopción de técnicas de aprendizaje automático. Los métodos estadísticos tradicionales comenzaron a resultar insuficientes ante la complejidad de los datos. En ese contexto se popularizaron algoritmos como los *Boosted Decision Trees* (BDT), técnicas estadísticas desarrolladas en los años noventa que encontraron en la física de partículas uno de sus primeros campos de aplicación masiva. En la búsqueda del bosón de Higgs, por ejemplo, estos métodos contribuyeron a mejorar significativamente la sensibilidad de los análisis.

En lo personal, el vínculo con las redes neuronales comenzó mucho antes de su popularización actual. Durante mi formación académica trabajé con ellas en aplicaciones de control de instrumentos y en estudios sobre circuitos neuronales biológicos. En aquellos años, dentro de la física de partículas, las redes neuronales eran vistas como herramientas curiosas pero marginales. Incluso durante el doctorado en Fermilab persistía cierto escepticismo. Con frecuencia surgía la pregunta: “¿por qué usar redes neuronales?”. Hoy la situación es prácticamente inversa. En los experimentos del LHC, la pregunta suele ser: “¿por qué no utilizarlas?”. Este cambio de perspectiva se refleja también en el reconocimiento reciente del Premio Nobel de Física 2024 a John Hopfield y Geoffrey Hinton por sus contribuciones fundamentales al aprendizaje automático.



Cada segundo el LHC produce más información de la que una persona podría revisar en toda su vida.

Actualmente, la relación entre aceleradores e inteligencia artificial es aún más estrecha. Los sistemas modernos de selección de datos emplean redes neuronales profundas que operan en tiempo real dentro de hardware especializado. En experimentos como LHCb, el proceso de selección se realiza completamente mediante software basado en inteligencia artificial. En ATLAS y CMS, otros grandes detectores del LHC, las redes se utilizan para identificar tipos de partículas y reconstruir trayectorias en entornos extremadamente densos. Incluso los detectores del futuro contemplan integrar algoritmos de aprendizaje directamente en su electrónica.

La inteligencia artificial también comienza a aplicarse en el diseño y operación de los propios aceleradores. Se están desarrollando algoritmos capaces de ajustar imanes superconductores, optimizar el comportamiento del haz y modelar los

Colisión compatible con la producción de un bosón de Higgs que se desintegra en dos quarks b (conos azules), un muón (rojo) y un neutrino (línea discontinua). La identificación de procesos tan difíciles de aislar entre miles de millones de eventos se apoya hoy en técnicas de inteligencia artificial. Imagen: CERN / Colaboración ATLAS.

campos magnéticos. En proyectos como el Future Circular Collider se estudia la posibilidad de utilizar redes neuronales para adaptar dinámicamente la óptica del acelerador.

Esta relación ha sido claramente bidireccional. Muchas herramientas desarrolladas en la física de partículas migraron hacia áreas como la biomedicina, la astrofísica, la economía o la industria tecnológica. Al mismo tiempo, los avances impulsados por el mercado digital regresan a la física, proporcionando nuevas capacidades de análisis y control.

Los aceleradores y la inteligencia artificial se han convertido así en sistemas interdependientes. La ciencia de frontera exige procesar información en condiciones extremas; la sociedad digital demanda tecnologías capaces de hacerlo. Entre ambas surge una dinámica singular: el conocimiento avanza no solo impulsado por la curiosidad científica, sino también por la necesidad de comprender y gestionar un mundo cada vez más definido por la abundancia y el análisis de datos. ●



CUANDO LA CIENCIA ILUMINA EL PROGRESO: EL SINCROTRÓN COMO MOTOR DEL DESARROLLO DE UN PAÍS

Viani Suhail Morales Guzmán
INSTITUTO DE CIENCIAS NUCLEARES, UNAM

Un sincrotrón es una máquina gigantesca que acelera partículas cargadas —generalmente electrones— hasta velocidades cercanas a la de la luz dentro de una trayectoria circular cerrada. Al moverse en ese anillo, las partículas emiten radiación electromagnética que abarca desde rayos X hasta luz infrarroja. Esta radiación, conocida como luz de sincrotrón, se convierte en una herramienta excepcional para observar materiales con una resolución extraordinaria, desde moléculas biológicas hasta dispositivos electrónicos.

La luz de sincrotrón permite iluminar estructuras diminutas y revelar su organización interna. Gracias a ella es posible comprender cómo funcionan los materiales y cuáles son sus propiedades. Muchos avances tecnológicos que forman parte de la vida cotidiana —como los microprocesadores, los dispositivos de almacenamiento de datos o las tecnologías de energía limpia— han sido posibles gracias a investigaciones realizadas en este tipo de instalaciones. Incluso durante la pandemia de COVID-19, la luz de sincrotrón permitió estudiar el comportamiento del virus y aportó información clave para el diseño de vacunas.

Invertir en ciencia de gran escala es apostar por el talento, la soberanía tecnológica y el futuro de un país.



Vista aérea del acelerador Sirius, en Brasil.
Foto: Divulgación CNPEM.

Sin embargo, el potencial de estas máquinas viene acompañado de enormes desafíos técnicos. Un sincrotrón exige un nivel de precisión extremo. Los imanes que guían a los electrones deben alinearse con tolerancias del orden de micrómetros, equivalentes a dividir el grosor de un cabello humano entre cien. Una desviación mínima afectaría la calidad del haz de luz.

El entorno físico donde se construyen también es determinante. El suelo debe ser extremadamente estable, con vibraciones controladas al máximo. En el caso del sincrotrón Sirius, en Brasil, se cons-



La estación experimental Sapoti, parte de la línea de luz Carnáuba del acelerador Sirius, podrá alcanzar resoluciones de hasta un nanómetro en experimentos de imagen con rayos X. Foto: Divulgación CNPEM.

truyó una losa de concreto de hasta metro y medio de espesor diseñada para amortiguar incluso vibraciones provocadas por el tránsito o los pasos humanos. Además, la temperatura dentro del anillo no puede variar más de una décima de grado centígrado, ya que cualquier fluctuación alteraría la trayectoria de los electrones.

A esto se suman las condiciones de vacío extremo necesarias en los túneles donde circulan las partículas, con presiones comparables a las del espacio exterior. Estas exigencias hacen que la construcción de un sincrotrón requiera recursos considerables, así como personal altamente especializado.

Ante estas características, surge con frecuencia una pregunta inevitable: ¿se trata de un lujo científico o de una inversión estratégica? La evidencia muestra que su impacto trasciende ampliamente el ámbito de la investigación. El sincrotrón Diamond Light Source, en el Reino Unido, ha generado beneficios económicos estimados en miles de millones de dólares durante sus primeros años de operación. Estos beneficios incluyen producción científica, desarrollo de patentes, innovación tecnológica y aplicaciones industriales.

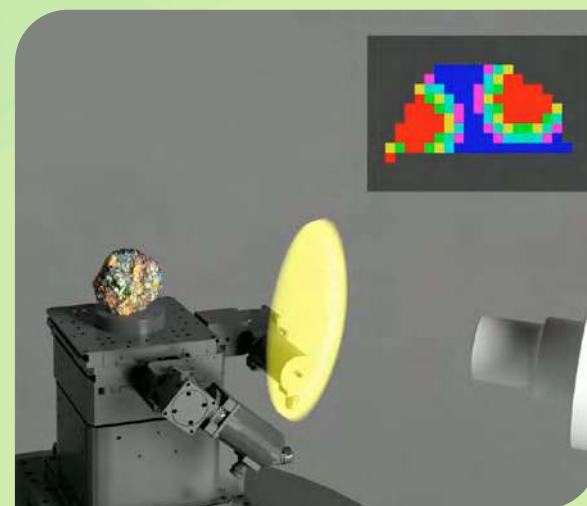
Además, los sincrotrones impulsan la formación de capital humano altamente especializado. Su construcción y operación requieren cientos de profesionales, mientras que miles de estudiantes participan en programas de capacitación y formación. En el Reino Unido, decenas de miles de personas han visitado el Diamond desde su apertura, acercándose a la ciencia a través de actividades de divulgación.

El impacto también se extiende al sector industrial. Empresas que utilizan estas instalaciones han reportado mejoras significativas en su competitividad, aumento en ventas y expansión de mercados. Este efecto demuestra que la investigación científica puede traducirse directamente en innovación económica.

Más allá de los beneficios inmediatos, los sincrotrones generan distintos niveles de impacto. El impacto directo se observa en la creación de empleo, el desarrollo tecnológico y la actividad económica asociada a su construcción y operación. El impacto indirecto se manifiesta en la transformación del entorno: desarrollo urbano, instalación de centros educativos y atracción de empresas tecnológicas. Finalmente, existe un impacto global y de largo plazo, relacionado con el prestigio científico, la cultura de innovación y la capacidad de un país para posicionarse en la frontera del conocimiento.

En este sentido, un sincrotrón no es solo una herramienta científica. Es una infraes-

Quando un sincrotrón se enciende, no solo ilumina materiales: ilumina las posibilidades de toda una sociedad.



Ejemplo de una línea de luz de espectroscopia. Imagen: Diamond Light Source.

tructura estratégica capaz de atraer talento, fortalecer la formación de nuevas generaciones e impulsar la innovación tecnológica. Su influencia se extiende mucho más allá del laboratorio, permeando la economía, la educación y la cultura científica.

A lo largo de su historia, los sincrotrones han contribuido a descubrimientos que transformaron nuestra vida cotidiana. Sus beneficios no se limitan a los países que los albergan, sino que se expanden globalmente. De esta manera, estas máquinas no solo iluminan materiales diminutos: iluminan también las posibilidades de desarrollo de una sociedad. ●

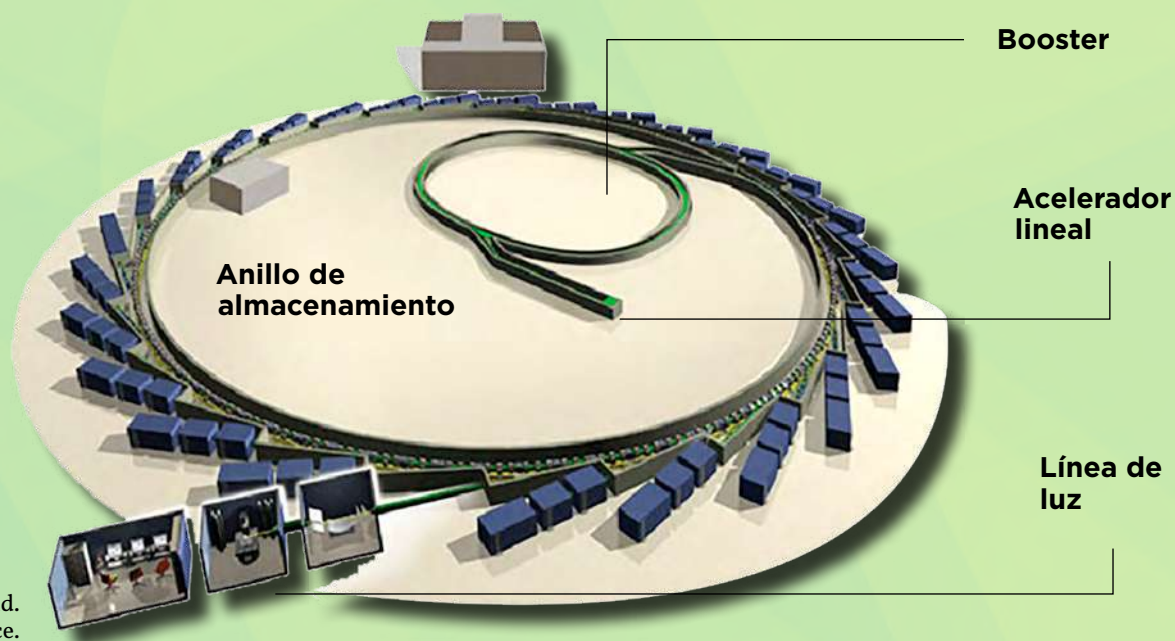


Diagrama de instalaciones del sincrotrón Diamond. Imagen: Diamond Light Source.



EL UNIVERSO EN UNA GOTA

Irais Bautista Guzmán

FCFM - CENTRO INTERDISCIPLINARIO DE INVESTIGACIÓN
Y ENSEÑANZA DE LA CIENCIA, BUAP

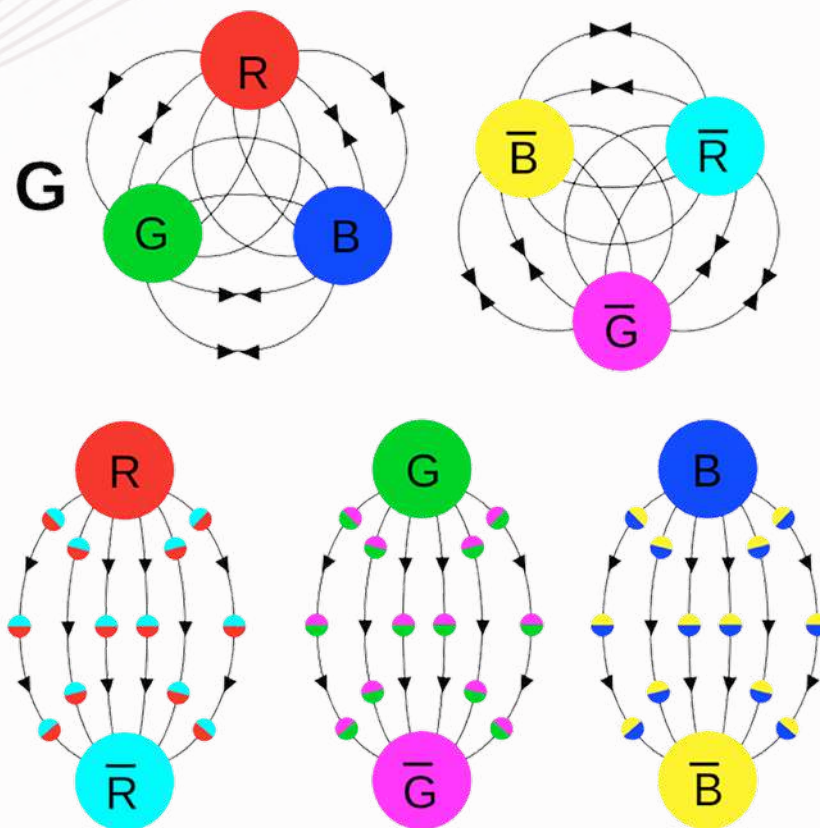
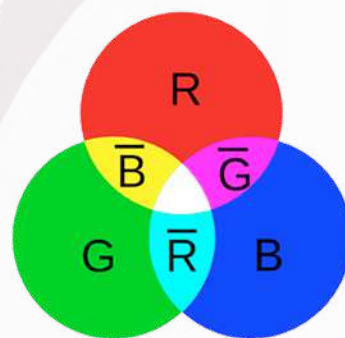
V

iajar al origen del universo ha sido, durante siglos, una aspiración más cercana a la imaginación que a la realidad. Sin embargo, en el Gran Colisionador de Hadrones (LHC, por sus siglas en inglés) del CERN, algo extraordinario ocurre: por un instante brevísimo y en una región diminuta del espacio, se recrean condiciones semejantes a las que existieron apenas millonésimas de segundo después del Big Bang.

Cuando núcleos de plomo colisionan a velocidades cercanas a la de la luz, la materia ordinaria deja de comportarse como la conocemos. Se “derrite” y se transforma en una fase exótica: el plasma de quarks y gluones (QGP). En este estado, los quarks —componentes fundamentales de protones y neutrones— y los gluones —las partículas que los mantienen unidos— dejan de estar confinados en estructuras estables. Durante una fracción de segundo, forman un medio extremadamente caliente y denso, similar al que llenaba el universo en sus primeros instantes.

En condiciones normales, los quarks nunca aparecen aislados. Siempre están agrupados: de dos en dos formando mesones o de tres en tres formando bariones. A estas combinaciones se les llama hadrones. El protón y el neutrón, que constituyen los núcleos atómicos y, en

**Entender
cómo los quarks
se confinan es
comprender cómo
comenzó a construirse
la materia que
nos forma.**



Esquema de la cromodinámica cuántica (QCD), la teoría que describe cómo los gluones median la fuerza fuerte entre quarks mediante “cargas de color”: rojo, verde y azul (RGB, por sus siglas en inglés: red, green, blue). Imagen: Instituto de Física Corpuscular.

última instancia, toda la materia visible, son ejemplos de hadrones. Por eso, observar cómo el QGP evoluciona hasta volver a formar estas partículas estables equivale a estudiar el momento en que la materia comenzó a organizarse.

El gran enigma es comprender cómo ocurre esa transición: cómo se pasa de una “sopa” primordial de quarks y gluones a un mundo compuesto por partículas bien definidas. La teoría que describe estas interacciones es la cromodinámica cuántica (QCD), que explica cómo los quarks interactúan mediante gluones. En energías muy altas, esta teoría puede abordarse con técnicas llamadas perturbativas. Pero en el entorno denso y caliente de las colisiones

de iones pesados entramos en un régimen no perturbativo, donde el confinamiento de los quarks y las fluctuaciones del vacío cuántico impiden utilizar esos métodos. Es ahí donde surgen los modelos fenomenológicos, que actúan como puente entre la teoría y la evidencia experimental.

Para explorar este territorio complejo, la comunidad científica ha desarrollado herramientas poderosas. Los cálculos de *lattice QCD* discretizan el espacio-tiempo en una “rejilla” computacional que permite simular numéricamente el comportamiento del vacío y las transiciones de fase. Por otro lado, los modelos hidrodinámicos describen el plasma como un fluido y explican cómo surgen propiedades colectivas, como el flujo, a partir de interacciones microscópicas. Los modelos

híbridos combinan ambos enfoques para interpretar los datos con mayor precisión.

Estas metodologías no solo han enriquecido la física de partículas. Los avances en *lattice* QCD impulsaron desarrollos en supercomputación que hoy se aplican en química cuántica y ciencia de materiales. Los modelos hidrodinámicos encuentran paralelismos en la astrofísica, donde ayudan a describir plasmas estelares o la dinámica de estrellas de neutrones. El estudio del QGP, así, no solo ilumina el origen del universo: también expande las herramientas científicas que otras disciplinas utilizan.

En el LHC, experimentos como CMS (Compact Muon Solenoid) y ATLAS desempeñan un papel crucial en la física de iones pesados. Aunque son ampliamente conocidos por el descubrimiento del bosón de Higgs en 2012, también permiten reconstruir patrones de correlación entre partículas que revelan el comportamiento fluido del plasma. Sus sistemas de detección de partículas cargadas, calorímetros y detectores de

muones permiten analizar cómo el plasma se forma, se expande y finalmente se enfría hasta que los quarks vuelven a reagruparse en hadrones.

Gracias a estas mediciones hoy sabemos que el plasma de quarks y gluones posee propiedades sorprendentes. Su viscosidad es extremadamente baja: se comporta como un líquido casi perfecto, más fluido que cualquier material conocido en condiciones ordinarias. También se estudian la propagación de señales en su interior, el flujo colectivo y las correlaciones entre partículas. Lo fascinante es que algunas de estas propiedades pueden compararse con fenómenos cotidianos, como las transiciones de fase del agua, lo que permite tender un puente entre lo familiar y lo cósmico.

Uno de los hallazgos más recientes es que incluso en colisiones más pequeñas —

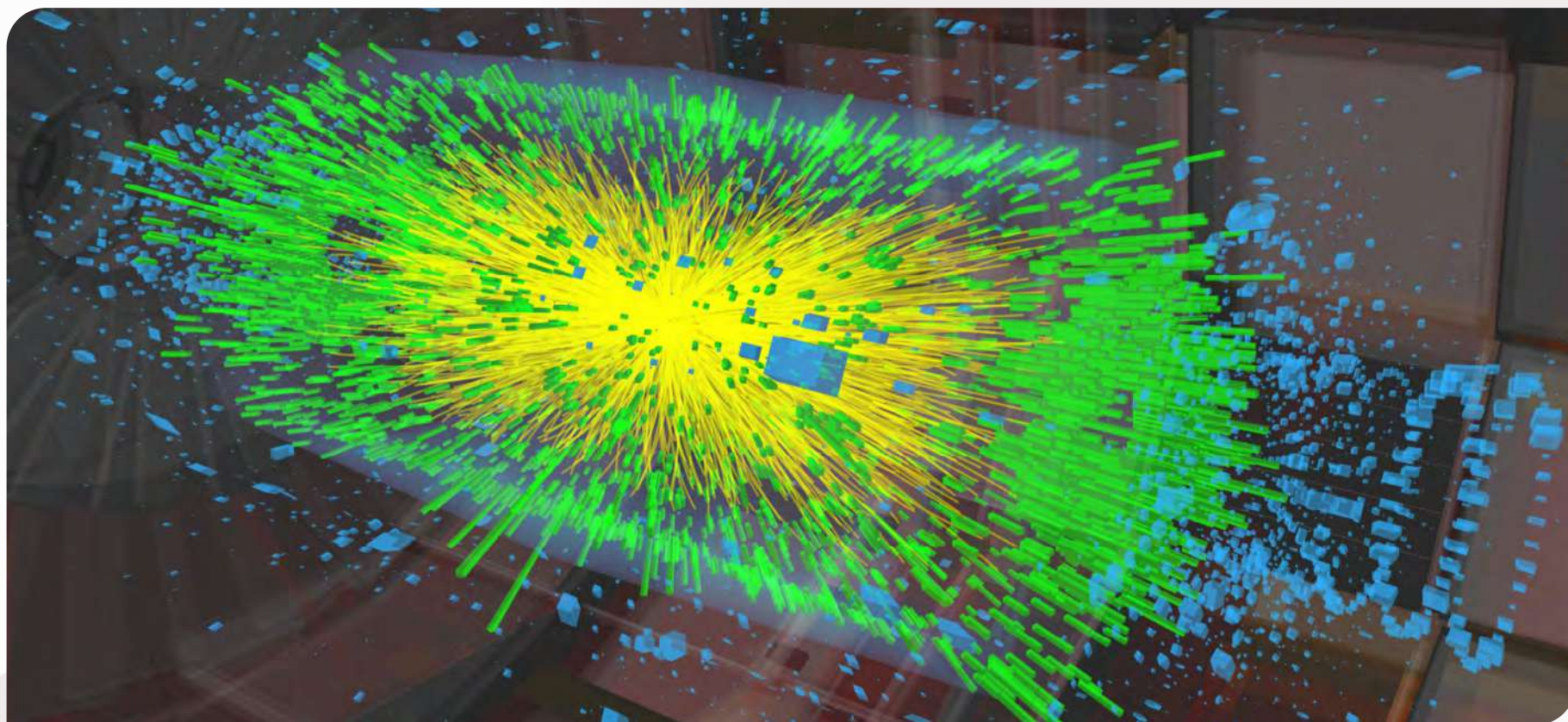
protón-protón o protón-plomo— aparecen señales de comportamiento colectivo similares al QGP. Esto abre una pregunta profunda: ¿se están formando di-

minutas gotas de plasma en sistemas tan pequeños o estamos ante nuevos efectos de la QCD? La respuesta aún está en construcción.

Cada vez que dos iones pesados colisionan en el LHC, ocurre un Big Bang en miniatura. En esa gota microscópica de plasma se condensa la historia temprana del cosmos. Es-

tudiarla no es solo un ejercicio intelectual: es una forma de comprender cómo emergió la materia que hoy forma estrellas, planetas y, finalmente, a nosotros mismos. El universo primitivo no está tan lejos como parece; vive, por instantes, en cada colisión. ●

En cada colisión microscópica se esconde una historia cósmica que también es la nuestra.



Evento de colisión de iones pesados registrado por el detector CMS en el LHC en septiembre de 2023. Las trayectorias reconstruidas de miles de partículas revelan la extraordinaria densidad de materia creada en estas colisiones, que permiten estudiar el plasma de quarks y gluones. Imagen: CERN / Colaboración CMS.

EL ESPEJO DEL PROGRESO

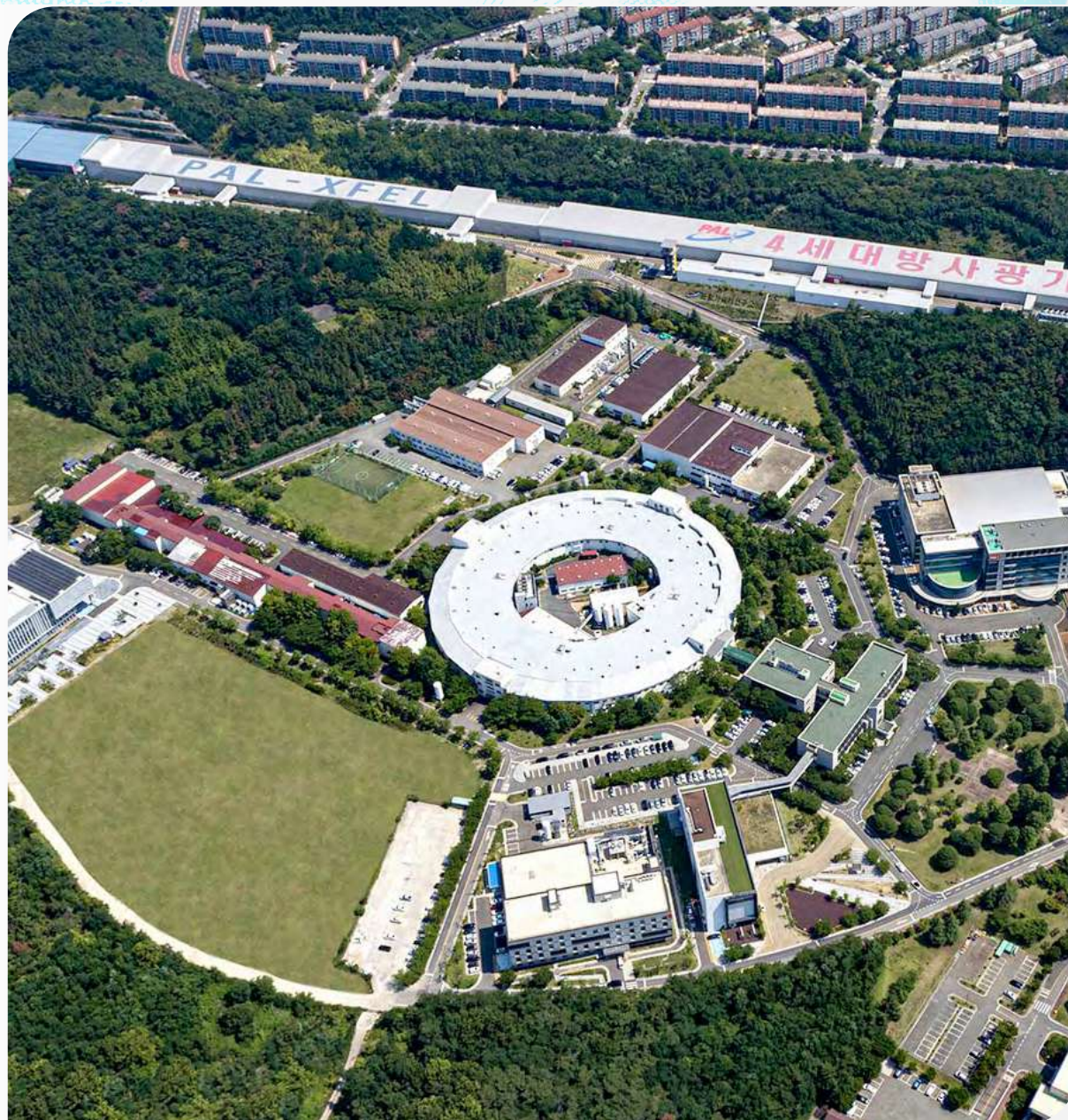
Lamán Carranza
DIRECTO GENERAL

Si pudiéramos viajar a 1960 y poner frente a frente a México y Corea del Sur, la apuesta lógica de cualquier inversionista habría sido México. Los números no mentían: el PIB per cápita mexicano era de 345 dólares, mientras que el de Corea del Sur apenas llegaba a los 158. México era, literalmente, el doble de rico. Teníamos el "Milagro Mexicano" a todo vapor, construyendo presas y carreteras, mientras ellos intentaban levantarse de las cenizas de una guerra.

Sesenta años después, el espejo nos devuelve una realidad que incomoda. Corea del Sur es hoy un titán tecnológico que marca el ritmo del mundo, y México, sigue enfocado en la manufactura. ¿Qué pasó en el camino? La diferencia no está en las ganas de trabajar, sino en lo que se decide invertir. Mientras ellos apostaron por la infraestructura del conocimiento, nosotros nos quedamos en la infraestructura básica.

Hoy, las naciones que realmente mandan en la economía global no solo administran recursos; inventan el futuro. Y lo hacen invirtiendo entre el 3% y el 5% de su PIB en ciencia y tecnología. En México, hemos vivido estancados en un histórico que oscila entre el 3% y el 0.5%. Esa brecha no es solo una cifra en un presupuesto; es la diferencia entre ser los que compran la tecnología o ser los que cobran por ella.

La inversión en ciencia no es únicamente una decisión presupuestal. Define la capacidad de un país para generar tecnología propia, desarrollar industrias complejas y participar en los sectores más avanzados de la economía global.



Pohang Light Source es el sincrotrón de Corea del Sur, activo desde 1995. Foto: Pohang Accelerator Laboratory (PAL).

Una parte importante de esa capacidad depende de lo que los científicos llaman infraestructura de gran ciencia.

Se trata de instalaciones de gran escala —aceleradores de partículas, sincrotrones, telescopios gigantes, supercomputadoras o plataformas avanzadas de biotecnología— diseñadas para

En 1960 México era más rico que Corea del Sur; hoy Corea lidera en tecnología.

ampliar radicalmente nuestra capacidad de observar, medir y comprender la naturaleza.

Estas máquinas no son grandes únicamente por su tamaño. Son grandes porque permiten responder preguntas que de otra manera serían inaccesibles.

Un ejemplo reciente se observó durante la pandemia de COVID-19. En diversos sincrotrones del mundo se utilizaron rayos X de alta intensidad para resolver la estructura tridimensional de proteínas clave del virus SARS-CoV-2. Comprender estas estructuras a nivel atómico permitió estudiar cómo el virus interactúa con las células humanas y contribuyó al desarrollo de tratamientos, anticuerpos y estrategias para el diseño de vacunas.

Este tipo de avances ilustra cómo funcionan las grandes infraestructuras científicas: permiten generar conocimiento fundamental que, con el tiempo, se convierte en innovación tecnológica, aplicaciones médicas y desarrollos industriales.

Las grandes instalaciones científicas suelen surgir cuando tres actores trabajan de forma coordinada: gobierno, industria y academia. Cuando estas tres esferas se articulan, la investigación científica puede traducirse en tecnología, empresas, empleos altamente especializados y cadenas productivas completas.



Un país que invierte en ciencia invierte en su capacidad de decidir su propio futuro.



Cuando no tenemos nuestras propias máquinas, dependemos de la buena voluntad o de la agenda de otros. Tener infraestructura de "Gran Ciencia" es, en el fondo, una cuestión de libertad y soberanía. Un sincrotrón no solo sirve para estudiar virus; sirve para que un agricultor tenga mejores fertilizantes, para que tu celular tenga una batería que dure días o para que las empresas mexicanas dejen de importar soluciones y empiecen a exportar innovación.

Y para ello necesitamos la "Cuádruple Hélice": que el Gobierno, la Academia, la Industria y la sociedad hablen el mismo idioma. No podemos seguir viendo la ciencia como un gasto o un lujo de intelectuales. Es el motor que genera empleos, que evita que nuestros jóvenes tengan que irse del país para cumplir sus sueños. La ciencia no sabe de periodos de seis años ni de colores. Exige una visión de Estado, una planeación que sobreviva a las administraciones.

Al final del día, las máquinas que una sociedad decide construir son el reflejo de sus aspiraciones. Si solo construimos lo básico, nuestro futuro será básico. Pero si nos atrevemos a construir las máquinas científicas y tecnológicas estaremos garantizando que México se vea como un protagonista y no como un simple espectador. ●



EL OBSERVATORIO PIERRE AUGER: UN DETECTOR GIGANTESCO, EN PEDACITOS



Karen Salomé Caballero Mora
FCFM - BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CHIAPAS

Agazapado en la Pampa Amarilla y casi mimetizado con el paisaje de Malargüe, en Mendoza, Argentina, se encuentra el Observatorio Pierre Auger. A simple vista puede parecer una extensa red de tanques dispersos en el campo. En realidad, es el detector más grande del mundo dedicado al estudio de los rayos cósmicos ultra-energéticos (RCUE), es decir, partículas que llegan desde el espacio con energías superiores a 10^{17} electronvolts (eV). También estudia fenómenos de cosmo-geofísica (CG), procesos que conectan el espacio con la atmósfera terrestre.

Los rayos cósmicos (RC) son núcleos atómicos y partículas cargadas que viajan por el universo hasta impactar la atmósfera de la Tierra. Su existencia fue confirmada en 1912 por Victor Hess, quien demostró que su origen era extraterrestre. Más tarde, el físico mexicano Manuel Sandoval Vallarta contribuyó a establecer que muchos de ellos son núcleos atómicos, principalmente protones. Cuando estas partículas alcanzan energías extremas —millones de veces mayores que las que se producen en aceleradores terrestres— se les denomina rayos cósmicos ultra-energéticos.

El interés por los RCUE no es menor: se busca conocer cuáles son sus fuentes,

cómo se aceleran a energías tan extraordinarias, cómo se propagan en los campos magnéticos del universo y si pueden ofrecer pistas sobre física más allá del Modelo Estándar de partículas elementales.

Para estudiarlos, Auger funciona como una supermáquina dividida en sistemas complementarios. Cuando un rayo cósmico ultra-energético entra en la atmósfera, produce un chubasco atmosférico extendido (CAE), una cascada de partículas secundarias que se propaga hacia el suelo. Este chubasco tiene tres componentes principales: muónica (formada por muones), electromagnética (electrones y fotones) y hadrónica (partículas compuestas como protones y neutrones). Medir cada componente permite reconstruir la naturaleza de la partícula original.

El detector de superficie (SD, por Surface Detector) está compuesto por 1,660 estaciones distribuidas en un área de aproximadamente 3,000 kilómetros cuadrados. Cada estación es un tanque de 12 toneladas de agua pura, llamado detector Cherenkov en agua (WCD, por Water



Los rayos cósmicos ultra-energéticos son mensajeros de los procesos más extremos del universo.

Tanque de detección del observatorio. Imagen: Colaboración Pierre Auger.



Edificio del FD. Foto: Colaboración Pierre Auger.

Cherenkov Detector). Allí se registra la luz Cherenkov, producida cuando una partícula viaja en el agua más rápido que la luz en ese medio. Sobre cada tanque se han añadido detectores de centelleo superficial (SSD, Surface Scintillator Detector), que ayudan a distinguir mejor las componentes del chubasco.

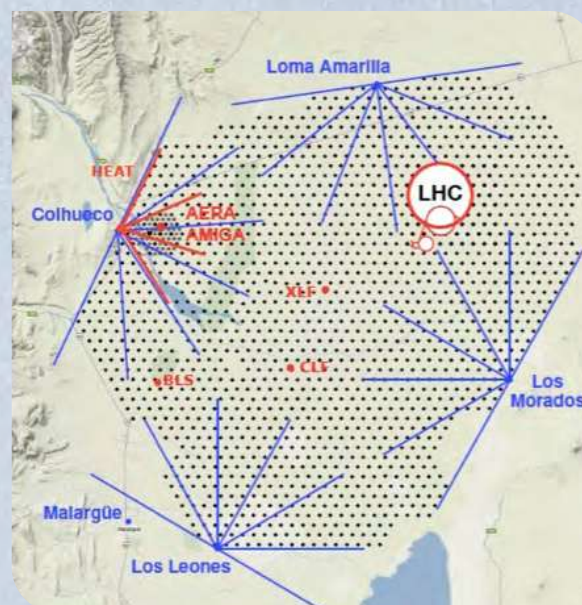
Además, cada estación incluye un detector de radio (RD), que mide señales electromagnéticas en el rango de 30 a 80 megahertz. Bajo parte del arreglo se encuentran contadores de muones del sistema AMIGA (Auger Muons and Infill for the Ground Array), que consisten en detectores enterrados capaces de medir con mayor precisión la componente muónica del chubasco.

En los bordes del SD se ubica el detector de fluorescencia (FD, Fluorescence Detector), conformado por 27 telescopios distribuidos en cuatro edificios. Estos telescopios observan, durante noches despejadas, la tenue luz UV que produce el CAE al atravesar la atmósfera. Mientras el SD detecta la huella que las partículas dejan en el suelo, el FD observa el desarrollo completo del evento en el cielo. Ambos sistemas se complementan: el SD opera el 100% del tiempo, mientras que el FD, aunque funciona solo alrededor del 15% del tiempo, permite calibrar con gran pre-

cisión la energía de los eventos.

El observatorio también estudia fenómenos atmosféricos como los destellos terrestres de rayos gamma (TGFs, Terrestrial Gamma-ray Flashes), así como eventos luminosos transitorios en la ionosfera conocidos como ELVES y SPRITES. Este conjunto de estudios forma parte de la cosmo-geofísica. Para ello, Auger cuenta con instrumentos adicionales como sistemas LIDAR para monitoreo atmosférico y globos meteorológicos.

Todo este entramado tecnológico se coordina desde el centro de control cercano a la Ruta 40, donde se ensamblan, monitorean y almacenan los datos. El grupo



Mapa del Observatorio comparado con el LHC. Imagen: Colaboración Pierre Auger.

Medir la huella en el suelo y la luz en el cielo permite reconstruir el origen de una partícula cósmica.

mexicano de la colaboración está integrado por investigadores y estudiantes de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP), el Instituto Politécnico Nacional (IPN), la Universidad Autónoma de Chiapas (UNACH) y la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

El Observatorio Pierre Auger es, en esencia, una máquina monumental construida en pedazos. Una superestructura distribuida sobre la tierra que escucha señales diminutas provenientes de los rincones más energéticos del universo. En cada tanque, en cada antena y en cada telescopio se refleja una misma aspiración humana: comprender de dónde vienen las partículas más extremas que nos atraviesan y, al hacerlo, entender mejor nuestro lugar en el cosmos. ©



Un tanque del SD. Foto: Colaboración Pierre Auger.



AMORFO

SUEÑOS CIRCULARES Y CATEDRALES SUBTERRÁNEAS

Luis Roberto Flores Castillo

DEPARTMENT OF PHYSICS, THE CHINESE UNIVERSITY OF HONG KONG, HONG KONG SAR, CHINA

El Duomo de Milán comenzó a construirse en 1386 y no fue declarado concluido sino hasta 1965. Casi seiscientos años de obra. Los primeros maestros de construcción sabían que jamás verían terminada la catedral. Aun así, colocaron la primera piedra. No era un proyecto para una generación, sino para muchas.

En el CERN, cerca de Ginebra, circulan hoy planos que evocan esa misma ambición. Dibujan un túnel de casi 91 kilómetros de circunferencia que atravesaría la región fronteriza entre Francia y Suiza, con tramos bajo el lago Lemán. El proyecto se llama **Future Circular Collider (FCC)** y busca ir más allá del actual Gran Colisionador de Hadrones (LHC). Su objetivo: explorar con una energía y precisión inéditas la maquinaria íntima de la naturaleza.

Estudio de factibilidad y horizonte de decisiones

El 31 de marzo de 2025, el CERN publicó el informe de factibilidad técnica, financiera y geológica del FCC. Más de 1,400 científicos e ingenieros participaron en su elaboración. La conclusión fue clara: no existen obstáculos técnicos insalvables para su construcción.

El documento detalla estudios del terreno, modelos de ingeniería, escenarios presupuestales y fases operativas. El costo estimado asciende a 15,300 millones de francos suizos. Sin embargo, aún no



Catedral de Milán desde la Piazza del Duomo. Wikipedia.

La factibilidad técnica está demostrada; la decisión ahora es política y colectiva.

existe una decisión política definitiva ni un plan cerrado de financiamiento.

Parte del trabajo preliminar ya comenzó. Entre 2025 y 2026 se realizan estudios sísmicos y perforaciones bajo el lago Lemán para determinar profundidad, estabilidad y trazado óptimo del túnel. Si el proyecto recibe aprobación formal, la construcción podría iniciar en la década de 2030. Las primeras colisiones

ocurrirían en la década de 2040. La fase más energética, basada en protones, operaría décadas después.

El FCC no es todavía una realidad, pero está más cerca que nunca de convertirse en una decisión histórica.

Un programa doble: precisión y potencia

El diseño del FCC contempla dos etapas complementarias, siguiendo la lógica empleada en el LHC:

- **FCC-ee:** colisionador de electrones y positrones. Su misión sería medir con altísima precisión las propiedades del bosón de Higgs y de las partículas W y Z. Una “fábrica de Higgs” destinada a refinar el modelo actual de la física de partículas.
- **FCC-hh:** colisionador de protones —y posiblemente iones— que reutilizaría el mismo túnel con tecnología adaptada para alcanzar energías de hasta 100 teraelectronvoltios (TeV), más de siete veces la energía máxima del LHC.

Esta combinación permitiría unir precisión extrema con exploración energética, abriendo la puerta tanto a mediciones detalladas como a la búsqueda de fenómenos aún desconocidos.

Ecós desde oriente

Mientras Europa evalúa el FCC, China impulsa el **Circular Electron Positron**

Collider (CEPC), también de unos 100 kilómetros de circunferencia. Su diseño técnico fue publicado en diciembre de 2023. La propuesta contempla una transición posterior hacia un colisionador de protones denominado SppC.

Sin embargo, el proyecto no fue incluido en el más reciente plan quinquenal del gobierno chino, por lo que su calendario de aprobación y construcción permanece incierto.

En cualquier caso, ambos proyectos enfrentan importantes desafíos de financiamiento, cooperación internacional y sostenibilidad a largo plazo.

Ingeniería al límite

Excavar un túnel de 91 kilómetros bajo suelos variables y con tramos sublacustres exige una precisión estructural extraordinaria. El estudio del FCC prevé una profundidad promedio cercana a los 200 metros. Se han evaluado presiones de agua subterránea, estabilidad sísmica, drenaje y fatiga estructural.

Los imanes superconductores deberán operar a 1.9 kelvin —casi el cero absoluto— y generar campos magnéticos de 16

teslas o más, más del doble que los actuales. Los sistemas de vacío, enfriamiento y sincronización del haz requerirán tolerancias mínimas y control en tiempo real.

Desde 2025, el lecho del lago Lemán es cartografiado mediante estudios sísmicos y perforaciones exploratorias para ajustar el diseño definitivo.

México y Latinoamérica en el tablero

Aunque estos proyectos se diseñan en Europa y Asia, América Latina no está al margen. México participa en el LHC mediante detectores, instrumentación y análisis de datos. Existen grupos mexicanos activos en estudios vinculados al FCC, incluyendo universidades como la de Guanajuato, la Autónoma de Sinaloa y la Autónoma de Yucatán.

También hay investigadores mexicanos trabajando directamente en el diseño del sistema de aceleración y guía del FCC-ee, contribuyendo a optimizar la trayectoria y estabilidad de los haces en el futuro anillo de 91 kilómetros.

Participar desde la etapa de concepción ofrece una oportunidad estratégica:

no solo colaborar en resultados, sino influir en el diseño mismo de la próxima infraestructura científica global.

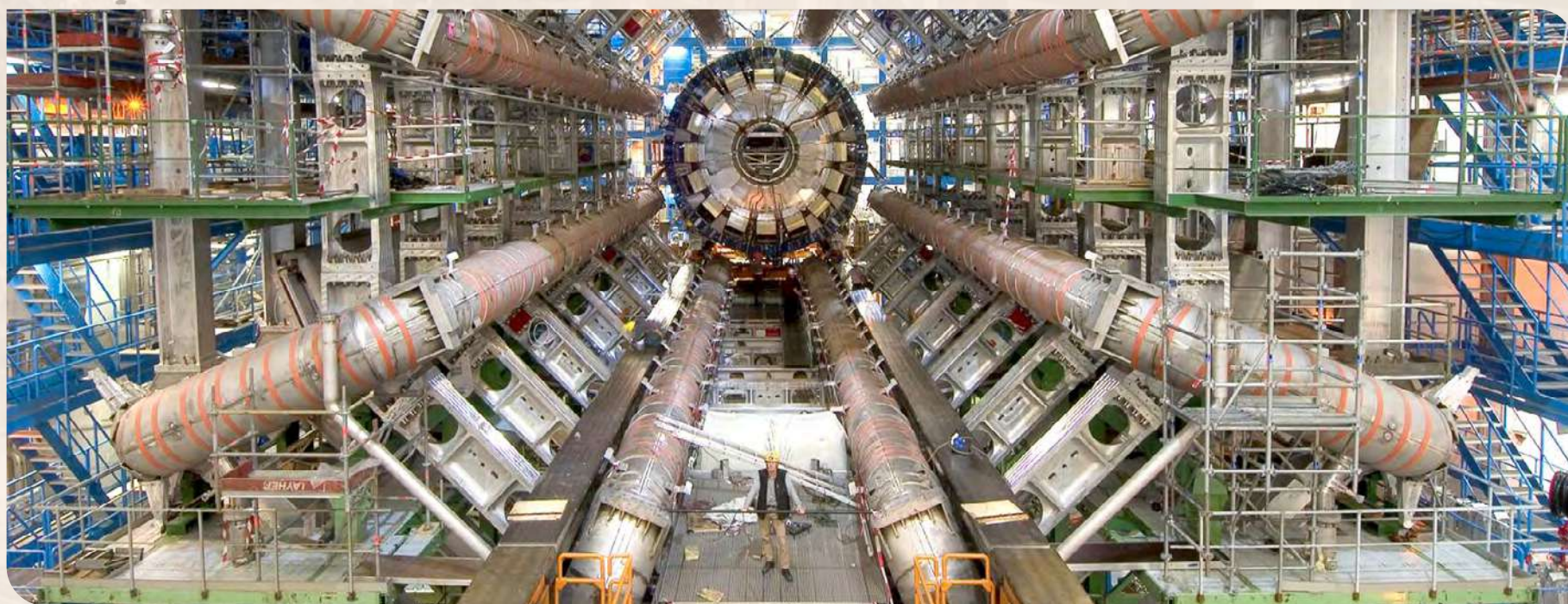
Tiempo, ambición y persistencia

Como el Duomo de Milán, los grandes proyectos científicos superan la vida de quienes los inician. Construir algo que probablemente no veremos terminado es una apuesta cultural y moral, además de técnica.

Entre 2027 y 2028 podría tomarse la decisión política que determine si estas catedrales subterráneas se convierten en realidad o permanecen en planos y estudios.

La factibilidad técnica ya fue demostrada. El siguiente paso no depende de la física, sino de la voluntad colectiva de invertir en una obra que llevará generaciones completar. Su legado no será solo ampliar la comprensión del universo, sino también desarrollar las herramientas, tecnologías y capacidades que permiten explorarlo.

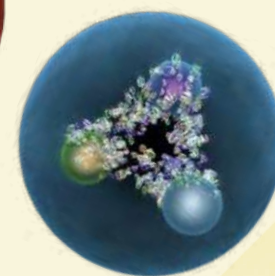
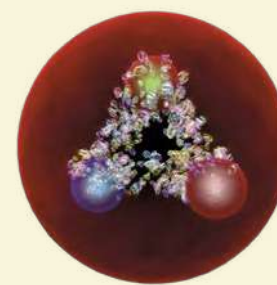
Como las catedrales medievales, estos túneles circulares no solo buscan elevar piedra sobre piedra, sino conocimiento sobre conocimiento. ●



Interior del detector ATLAS durante su construcción en el CERN. La persona en el centro permite apreciar la escala de uno de los instrumentos científicos más grandes jamás construidos. Foto: CERN / Colaboración ATLAS.

ARELY CORTÉS: SEGUIR UNA PARTÍCULA HASTA EL ORIGEN DEL UNIVERSO

Por Diciembre Aguilar



La física de partículas suele imaginarse como un territorio distante, lleno de ecuaciones complejas y máquinas gigantescas. Sin embargo, detrás de esos laboratorios internacionales y detectores del tamaño de edificios hay historias personales que comienzan con algo mucho más sencillo: la curiosidad.

Para Arely Cortés González, esa curiosidad apareció muy temprano. Nació en Pachuca, Hidalgo, pero a los seis años su familia se mudó a Tijuana. Crecer en

una ciudad fronteriza le permitió convivir con personas de distintas regiones y culturas, algo que más tarde reconocería también en la ciencia, donde investigadores de todo el mundo colaboran para responder preguntas fundamentales sobre el universo.

Desde joven disfrutaba especialmente las matemáticas y la física. Durante su formación universitaria en Ingeniería Física Industrial en el Tecnológico de Monterrey, descubrió que la física podía revelar fenómenos invisibles de maneras inesperadas. En una clase dedicada a revisar artículos científicos encontró un ejemplo que cambiaría su rumbo: el uso de detectores de muones para estudiar el interior de las pirámides de Egipto.

atmósfera terrestre. Estas partículas pueden atravesar materiales densos como la piedra. Midiendo cuántos muones pasan por distintas zonas de una estructura, los científicos pueden inferir su densidad y detectar cavidades ocultas sin necesidad de abrirla.

La idea de utilizar partículas invisibles para estudiar estructuras monumentales le pareció fascinante. Poco después buscó una oportunidad de investigación a través de un programa de verano de la Academia Mexicana de Ciencias, lo que la llevó a trabajar con investigadores de la UNAM. Allí participó en el desarrollo de un detector que posteriormente sería instalado en la Pirámide del Sol en Teotihuacán, utilizando rayos cósmicos para estudiar su estructura interna.

Durante ese mismo verano también conoció a científicos mexicanos que colaboraban en ALICE (A Large Ion Collider Experiment), uno de los experimentos del Gran Colisionador de Hadrones (LHC) del CERN. El LHC es el acelerador de partículas más grande del mundo: un anillo subterráneo de 27 kilómetros donde protones y núcleos atómicos chocan a energías extremas para estudiar las leyes fundamentales de la naturaleza.

Aquella experiencia fue breve, pero decisiva. Despertó una fascinación que terminaría guiando su carrera.

Arely continuó su formación con un doctorado en la Universidad de Illinois en Urbana-Champaign, donde se integró al experimento ATLAS (A Toroidal LHC

La ciencia avanza gracias al trabajo colectivo de investigadores de muchas disciplinas y países.

Los muones son partículas subatómicas producidas cuando los rayos cósmicos —partículas de alta energía provenientes del espacio— chocan con la



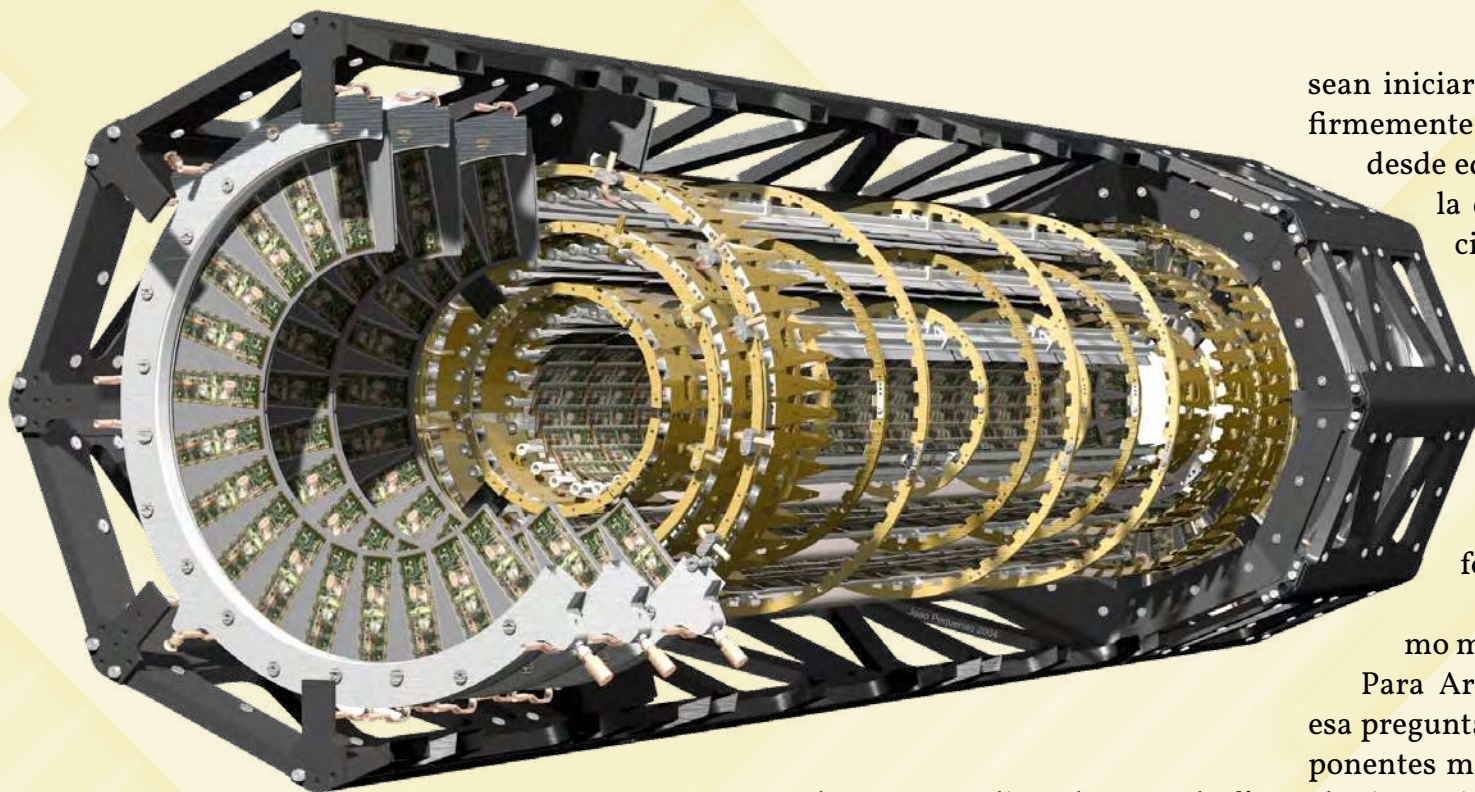


Imagen generada por computadora del detector de píxeles, la capa más interna del detector ATLAS, que registra la trayectoria de las partículas producidas en las colisiones.

ApparatuS), uno de los detectores gigantes del LHC. Este instrumento registra las trayectorias, energías y propiedades de las partículas producidas cuando los protones colisionan a velocidades cercanas a la de la luz.

Trabajar en una colaboración como ATLAS implica mucho más que analizar datos. El experimento reúne a miles de científicos, ingenieros y especialistas en software de decenas de países. Cada resultado surge del trabajo coordinado de equipos que diseñan detectores, desarrollan algoritmos y analizan enormes volúmenes de información.

A lo largo de casi dos décadas en la colaboración, Arely ha trabajado en distintos temas, entre ellos las búsquedas de materia oscura —la forma de materia invisible que constituye gran parte del universo— y los estudios del bosón de Higgs, la partícula descubierta en 2012 que explica cómo otras partículas adquieren masa.

Actualmente coordina el grupo de física del Higgs en ATLAS, una comunidad de más de 600 investigadores dedicada a estudiar con precisión las propiedades de esta partícula fundamental.

Para ella, esta responsabilidad refleja uno de los rasgos más importantes de la ciencia: su carácter colectivo. Ningún descubrimiento ocurre de manera aislada. Cada avance es el resultado de años de trabajo compartido entre científicos de diferentes disciplinas y países.

La participación mexicana en la física de altas energías, señala, ha crecido de forma constante. Investigadores de instituciones como la UNAM y el CINVESTAV participan activamente en colaboraciones internacionales, contribuyendo tanto al análisis de datos como al desarrollo de detectores.

Sin embargo, aún existen retos. En experimentos como ATLAS, las mujeres representan aproximadamente una cuarta parte de la colaboración. Para Arely, ampliar la diversidad en la ciencia es fundamental para fortalecer la investigación y abrir oportunidades a nuevas generaciones.

Por eso dedica también parte de su tiempo a orientar a estudiantes que de-

sean iniciar una carrera científica. Cree firmemente que impulsar la curiosidad desde edades tempranas y fortalecer la divulgación son pasos esenciales para el futuro.

Al final, explica, la física fundamental es una inversión en conocimiento. Sus resultados pueden tardar en traducirse en aplicaciones tecnológicas, pero con el tiempo terminan transformando industrias enteras.

Y todo comienza del mismo modo: con una pregunta.

Para Arely Cortés González, seguir esa pregunta la llevó a explorar los componentes más pequeños de la materia y, al mismo tiempo, a participar en una de las colaboraciones científicas más grandes del planeta.🌐





LA SUPERMÁQUINA SOMOS NOSOTROS: BIOSCÉNICA Y LOS CUERPOS COLECTIVOS

Alejandro Ortiz González
DIRECCIÓN DE ESTRATEGIA Y ALIANZAS BIOSCÉNICA

Cuando se habla de supermáquinas en ciencia, suelen dibujarse imágenes de aceleradores subterráneos, sincrotrones que replican el Big Bang, e infraestructuras cuya complejidad desafía a la imaginación. Pero también existen máquinas menos visibles, construidas a partir de cuerpos, saberes y relaciones. Estas máquinas son sistémicas, orgánicas y transdisciplinares. Están hechas del tejido de la sociedad misma.

Bioscénica —cuerpo digital y transdisciplina— es una de esas supermáquinas vivas. Con 25 años de trabajo en proyectos que cruzan artes, ciencia, tecnología y humanidades, Bioscénica despliega experiencias que redefinen lo que entende-

La
supermáquina
no está solo en los
laboratorios: también
late en los cuerpos
y las relaciones
colectivas.

mos por máquina. No se trata de dispositivos mecánicos o algoritmos independientes, sino de procesos colaborativos que articulan laboratorios, prácticas escénicas, dispositivos tecnológicos y comunidades diversas.

El enfoque transdisciplinar de Bioscénica reconoce que el conocimiento no se construye en compartimentos estancos. El cuerpo individual, el cuerpo digital y el cuerpo social son territorios interconectados. Desde Performance hasta arte inmersivo, desde plataformas digitales hasta festivales colaborativos, lo que emerge no es una obra estática, sino una red de relaciones que se autoorganiza. Una supermáquina distribuida, hecha de cuerpos, lenguajes y tecnologías, que se autorregula y se transforma con cada interacción.

Al igual que un sincrotrón requiere marcos estables, equipos especializados y redes de colaboración global para iluminar la materia a escalas inimaginables, Bioscénica articula una infraestructura de conocimiento en la que la máquina mayor es la comunidad misma. La creación escénica, la investigación y la producción no se separan: se solapan, se contaminan y se potencian mutuamente.

La fuerza de esta supermáquina no está en sus partes aisladas, sino en su capacidad de integrar contextos diversos. El cuerpo tecno-ético, el cuerpo onírico



Alejandro Ortiz González, dirección de estrategia y alianzas.

y el cuerpo social se presentan como interfaces entre cultura y ciencia, entre rito y lógica, entre tecnología y memoria. Las herramientas técnicas se mezclan con los rituales de consciencia; la ciencia y la técnica se convierten en medios para dotar de sentido las realidades múltiples que habitamos día con día.

Como en los grandes sistemas complejos que estudian física y biología, la supermáquina Bioscénica nos recuerda que el todo es más que la suma de las partes. Su funcionamiento es colectivo: solo puede existir si se apoya en la interacción, el diálogo y la solidaridad. Cuando los motores científicos como los sincrotrones encarnan la aspiración del conocimiento profundo, esta otra máquina —la de los cuerpos, los lenguajes y la imaginación— encarna la aspiración del sentido compartido.

La supermáquina no solo es tecnología de frontera, conducto de descubrimientos ópticos y materiales. También es aquello que ocurre cuando el cuerpo, la mente y la comunidad se articulan para crear, explorar y compartir realidades. Esa es la dimensión en la que arte, ciencia y tecnología ya no están separados, sino tejidos en una sola trama. 



Minerva H. Trejo, dirección general.



Empatía, Visita. © Tadeo Valencia



Expo Mitocondria.



Memoria colectiva, julio 2023. © Marco Lara



Transvisible, Expo Mitocondria. © Bioscénica



Empatia. © Bioscénica

CONTACTO

<https://www.bioscenica.mx/>

<https://linktr.ee/Bioscenica>

<http://minerva.org.mx/>

<http://alekostransmedia.com/>

bioscenica@gmail.com

contacto.bioscenica@gmail.com

Fb / Ig / Tik / X / Th @bioscenica

Youtube: @bioscenica2024

5540659341 / 5554755704

IRAIS BAUTISTA GUZMÁN

Por Diciembre Aguilar

Desde niña, Irais Bautista Guzmán encontró en las matemáticas algo más que números: un juego, un lenguaje secreto para descubrir patrones y resolver enigmas. No le bastaba con obtener el resultado; quería entender por qué las reglas funcionaban como funcionaban. Esa curiosidad fue el inicio de su vocación científica.

En la preparatoria, al participar en unas Olimpiadas de Física, descubrió que las matemáticas eran también una herramienta para comprender la naturaleza. En la Facultad de Ciencias Físico Matemáticas de la BUAP asistió a clases y prácticas experimentales que marcaron su decisión. Recuerda especialmente cuando midieron la constante de gravedad y cuando construyeron una pequeña batería. Ver cómo una idea teórica se convertía en un fenómeno real, con materiales simples e ingenio, la convenció de estudiar Física.

Durante el posgrado se interesó por el plasma de quarks y gluones, un estado de la materia que existió microsegundos después del Big Bang. En los experimentos ALICE y CMS del CERN comprendió que, al colisionar iones pesados a energías extremas, es posible recrear en laboratorio condiciones similares a

las del universo primigenio. En cada colisión, la materia deja de comportarse como la conocemos y se transforma en un fluido casi perfecto de quarks y gluones. Estudiarlo es, en cierto modo, asomarse al origen del universo.

A lo largo de su carrera ha confirmado que la ciencia avanza con pequeños pasos y gracias al trabajo colectivo. Cada resultado es producto de la colaboración entre personas de distintas disciplinas y generaciones.

En 2017 recibió la beca L'Oréal-UNESCO-Conacyt-AMC "Para Mujeres en la Ciencia". Más que un logro individual, lo asumió como una oportunidad para visibilizar el trabajo de las mujeres científicas en México y acompañar a nuevas generaciones. Reconoce que ser mujer en la ciencia implica desafíos, pero también la posibilidad de transformar estructuras y abrir espacios más justos y diversos.

A las niñas y jóvenes interesadas en la física les aconseja seguir su curiosidad. Preguntar, equivocarse y cambiar de rumbo es parte del proceso. La ciencia

no consiste en tener todas las respuestas, sino en disfrutar la búsqueda. Para Irais, cada día de investigación es una oportunidad para aprender algo nuevo. Y en esa disposición permanente a seguir aprendiendo se resume el sentido de su trabajo. 

Una práctica de laboratorio bastó para convertir la curiosidad en vocación.



KAREN SALOMÉ CABALLERO MORA: SEGUIR LA CURIOSIDAD HASTA EL CIELO

Cuando Karen Salomé Caballero Mora llegó a Tuxtla Gutiérrez en 2014, el contraste fue inmediato: más verde, más calma, garzas y cotorros en el cielo.

Desde la Facultad de Ciencias de Física y Matemáticas de la Universidad Autónoma de Chiapas continúa una trayectoria que comenzó años atrás, en la Facultad de Ciencias de la UNAM, donde descubrió que podía unir sus tres intereses —astronomía, partículas e informática— en un mismo camino: las astropartículas.

El punto de quiebre fue sencillo pero decisivo. Una materia optativa no se abrió y, en lugar de resignarse, fue a buscar al profesor al Instituto de Ciencias Nucleares. Esa iniciativa la llevó al Observatorio Pierre Auger y al análisis de los primeros datos de rayos cósmicos de ultraalta energía. Ahí entendió que su trabajo consistiría en descifrar el universo a partir de señales invisibles convertidas en datos.

Con el tiempo colaboró en proyectos como IceCube, HAWC y SWGO. Entre los avances recientes más relevantes destaca la confirmación con alta probabilidad del “corte GZK” en el espectro de energía de los rayos cósmicos y nuevas evidencias sobre su composición, que parece

combinar elementos ligeros y pesados. Para Karen, estos hallazgos han redefinido la última década en el área.

También subraya que México no ha sido espectador: empresas y grupos nacionales han participado en el diseño de tanques, detectores y software para estos experimentos, conocimiento que luego se transfiere y fortalece capacidades tecnológicas en el país.

Como integrante de la red Mujeres Sembrando Conciencias, reconoce que la física sigue siendo un espacio donde las mujeres son minoría. En su colaboración internacional es la única investigadora del grupo mexicano y en su facultad es la única profesora de tiempo completo. Esa condición implica retos adicionales en estructuras laborales que aún no contemplan plenamente las responsabilidades de cuidado.

En lo personal, admite que su vida ha estado dedicada casi por completo a la ciencia. No lo plantea como renuncia, sino como elección: ha disfrutado el camino, aunque eso signifique desafiar expectativas sociales.

Su invitación final es directa: leer divulgación científica. Entender cómo funciona el mundo ayuda a no caer en engaños ni en soluciones fáciles. La ciencia es exigente, sí, pero también es hermosa cuando se explica con claridad.

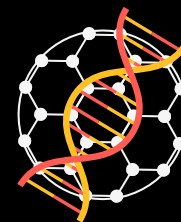


La curiosidad la llevó a tocar puertas; esa decisión marcó su entrada a la astrofísica.





PARTÍCULAS, CÁMARA Y ACCIÓN

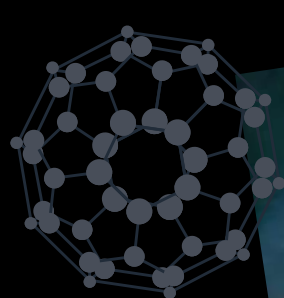


En este número de Supermáquinas, nos sumergimos en las profundidades de la física y en las fronteras de la ciencia. La física de altas energías es también una proeza de la ingeniería pesada. Hablamos de anillos de kilómetros de circunferencia, imanes que operan a temperaturas más frías que el espacio profundo y sensores que capturan colisiones miles de veces por segundo.

Para entender este universo de acero y partículas, hemos seleccionado cuatro recomendaciones que capturan la esencia de lo que significa "pensar en grande".

Desde la tensión real en las salas de control hasta las pesadillas de ciencia ficción que nacen cuando estas máquinas fallan, esta es nuestra selección para el entusiasta de la tecnología extrema.

EL PROBLEMA DE LOS TRES CUERPOS



(Serie – Netflix)

¿Qué ocurriría si las grandes infraestructuras científicas que sostienen nuestro conocimiento del universo dejaran de funcionar? Esta serie, basada en la novela de Liu Cixin, explora la dimensión geopolítica, científica y existencial de la física moderna. Un thriller intelectual que recuerda por qué los grandes experimentos científicos también son piezas estratégicas del mundo contemporáneo.

PARTICLE FEVER

(Documental)

Una mirada privilegiada al interior del CERN durante uno de los momentos más importantes de la física moderna: la búsqueda y posterior descubrimiento del bosón de Higgs. El documental revela el lado humano de una empresa científica colosal, donde equipos internacionales trabajan durante años para responder una de las preguntas más profundas de la naturaleza.



PROYECTO HAIL MARY

(Película – estreno previsto 2026)

Basada en la novela de Andy Weir, esta historia conecta la física, la ingeniería y la exploración espacial en una aventura que recuerda algo fundamental: muchas de las tecnologías que algún día nos permitirán viajar más lejos en el cosmos nacen primero en los laboratorios terrestres.



CERN

(Documental de Nikolaus Geyrhalter)



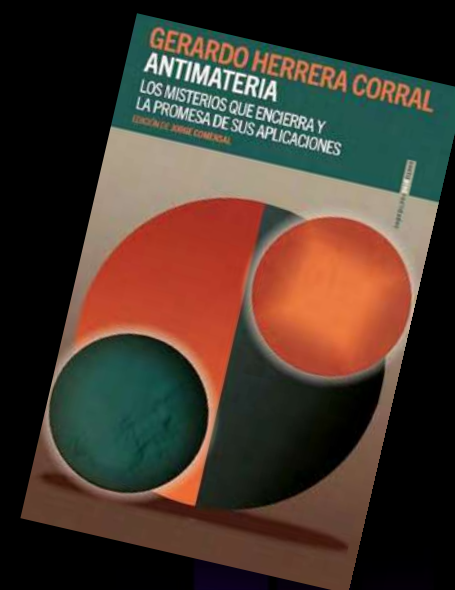
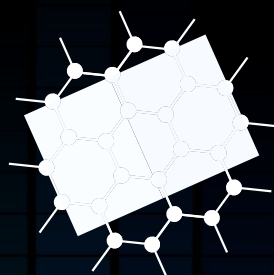
Una experiencia visual contemplativa que retrata la belleza silenciosa de una de las instalaciones científicas más impresionantes del planeta. Los túneles, las estaciones de vacío y las gigantescas estructuras experimentales aparecen aquí como una forma de arquitectura industrial dedicada a explorar la naturaleza más íntima de la materia.



ANTIMATERIA

Gerardo Herrera Corral

En este libro, el físico mexicano Gerardo Herrera Corral explora uno de los mayores enigmas de la ciencia: la existencia de partículas con propiedades opuestas a las de la materia que conocemos. Con un lenguaje claro, el autor explica cómo se descubrió la antimateria, cómo se estudia en los grandes aceleradores de partículas y qué puede revelarnos sobre el origen del universo.

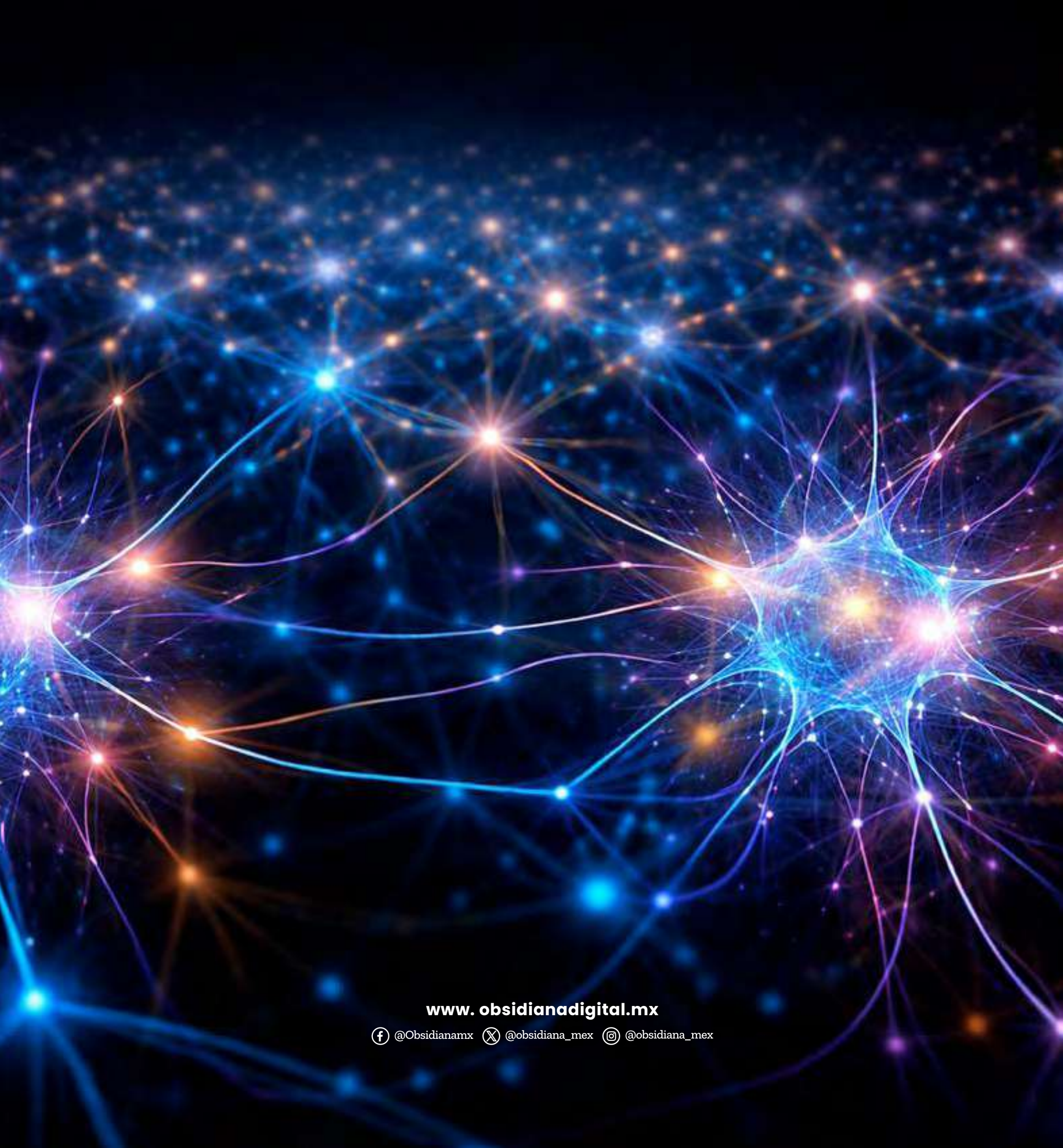


EL BOSÓN DE HIGGS NO TE VA A HACER LA CAMA

Javier Santaolalla

Con humor y ejemplos cotidianos, Javier Santaolalla acerca al lector a los conceptos fundamentales de la física moderna, desde las partículas elementales hasta el famoso bosón de Higgs. El libro combina divulgación accesible con anécdotas de los experimentos del CERN, mostrando cómo funcionan las enormes máquinas científicas que buscan entender de qué está hecho el universo.





www.obsidianadigital.mx

 @Obsidianamx  @obsidiana_mex  @obsidiana_mex