

¿De dónde venimos? ¿Qué somos? ¿A dónde vamos?  
John Ellis

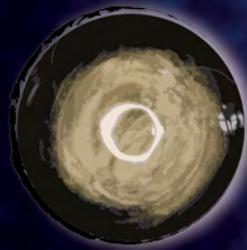
pág. 6

Mensajeros cósmicos  
María Isabel Pedraza

pág. 14

Mi historia del descubrimiento del bosón de Higgs  
Sau Lan Wu

pág. 18



# OBSIDIANA

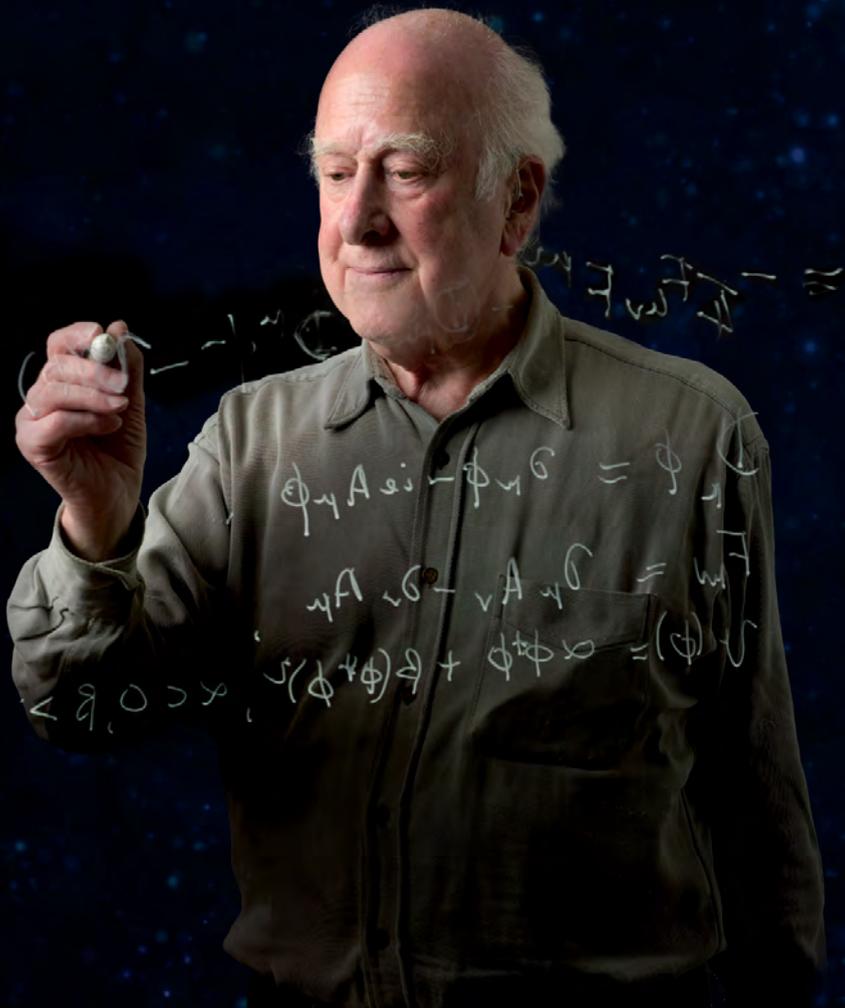
Ciencia y Cultura por México

# SEMILLAS de la realidad

PARTÍCULAS ELEMENTALES

AÑO 2, NÚM. 10.  
MÉXICO, JUNIO DEL 2024

---



# Peter Higgs

"Padre del Bosón de Higgs"  
1929-2024

La física está de luto por el lamentable fallecimiento del profesor Peter Higgs, que junto con otros físicos teóricos predijo la existencia de la partícula que lleva su nombre. Famoso también por huir de las cámaras y por su calidad humana, recibió el premio Nobel de Física en 2013.

Su trabajo, que motivó la construcción del acelerador de partículas más grande del mundo, seguirá inspirando a nuevas generaciones de científicos.

Descanse en paz, Dr. Peter Higgs.

## NUESTRAS REDES SOCIALES

@Obsidianamx @obsidiana\_mex @obsidiana\_mex

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

Web: <https://obsidianadigital.mx/>  
PDF: [https://issuu.com/obsidiana\\_mx](https://issuu.com/obsidiana_mx)



JUNIO 2024

[contacto@obsidianadigital.mx](mailto:contacto@obsidianadigital.mx)



Imagen de portada y contraportada: Campo de Higgs  
Dominguez, Daniel: © CERN.

### 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**  
Dirección general  
**Luisa Fernanda González Arribas**  
Editora en jefe  
**Omar Hernández Godínez**  
Diseño e ilustración editorial

No. 10. Semillas de la realidad.  
Partículas elementales

**Luis Roberto Flores Castillo**  
Editor invitado

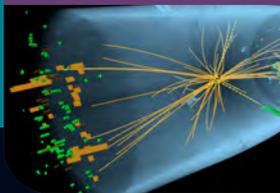


# CONTENIDO

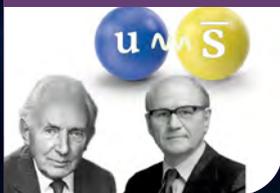
2

Semillas de tierra y realidad  
*Lamán Carranza*

EMERGENTE



FRAGMENTOS



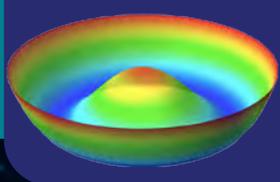
La búsqueda de los bloques  
fundamentales del Universo

4

8

Matemáticas, simetrías y la  
física del bosón de Higgs  
*J. Lorenzo Díaz Cruz*

ESPEJO



ESPEJO



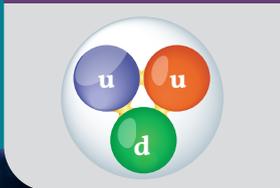
Nuevos mundos: exploración  
y construcción de modelos  
*Myriam Mondragón Ceballos*

10

12

Entre quarks y gluones: la  
cromodinámica cuántica  
*Alejandro Ayala*

ESPEJO



ESPEJO



Tras el bosón de Higgs. De  
la teoría, a colisiones y  
cómputo distribuido  
*Luis Roberto Flores Castillo*

16

20

Vivimos uno de los mejores  
momentos en la historia de  
La física: *Myriam Mondragón*  
*Emiliano Cassani*

TRANSLÚCIDO



TRANSLÚCIDO



22

Reproduciendo gotas del  
universo primitivo  
*Emiliano Cassani*

AMORFO



24

Inspirando a inspiradores.  
El poder del conocimiento  
de "frontera"  
*Jeff Wiener*

INTRUSIÓN



Un viaje inesperado al  
mundo de la física  
*Agnes Chavez*

26

28

Relación arte-ciencia,  
una visión personal  
*Pedro Trueba*

INTRUSIÓN



12

Entre quarks y gluones: la  
cromodinámica cuántica  
*Alejandro Ayala*

REFLEJOS



Hallar el camino entre las  
partículas: *Isabel Pedraza*

30

31

Estudiar lo más  
pequeño, el viaje de  
*Ivonne Maldonado*

REFLEJOS



20

Vivimos uno de los mejores  
momentos en la historia de  
La física: *Myriam Mondragón*  
*Emiliano Cassani*

ESPEJO



La física de partículas  
en nuestras vidas  
*Viani Suhail Morales Guzmán*

32



# SEMILLAS DE TIERRA Y REALIDAD

Lamán Carranza  
DIRECTOR GENERAL

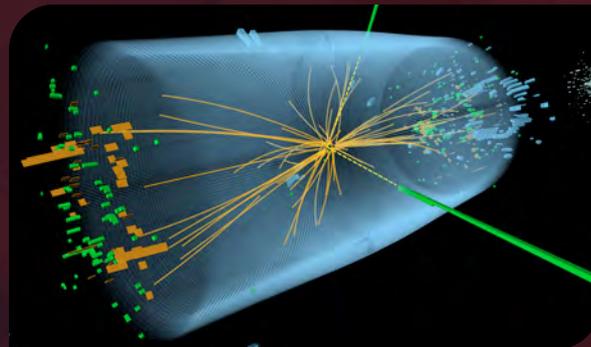
@LamanCarranza

@lamancarranza

@lamancarranza

*“Los pueblos de habla náhuatl, tal vez, hubieran llamado Yojlotl taltikpaktle (semillas del mundo) a las partículas elementales. Este número es una mirada con sabor a México a nuevos aspectos de la realidad que, así como es difícil encuadrarlos en vocablos en náhuatl, también parecen resistirse a ser descritos mediante el lenguaje de nuestra vida cotidiana”.*

Luis Roberto Flores



© CERN.

Castillo nos adentra en la historia del campo de Higgs, que se complementa a la perfección con las vivencias y contribuciones de la reconocida física Sau Lan Wu.

Tal vez cuestiones para qué te sirve todo este conocimiento... Por eso, Viany Morales nos muestra algunas aplicaciones de la física de partículas en tecnologías de la vida cotidiana como el internet, los rayos X y muchas otras.

En la sección Fragmentos nos sumergiremos en la historia cronológica de los hallazgos más importantes en el campo de la física de partículas elementales.

Nos sorprenderemos también con las entrevistas a Myriam Mondragón y Antonio Ortiz Velázquez, y sus respectivas visiones sobre el momento actual de la física.

Junto a Jeff Wiener descubriremos el impacto de la física en los programas de capacitación para profesores de preparatoria, mientras que los artistas Pedro Trueba Zepeda y Agnes Chavez nos invitan a contemplar la fuerte relación entre arte y ciencia, desde diferentes perspectivas.

Conoceremos a científicas que están cambiando el mundo, como Isabel Pedraza e Ivonne Maldonado, quienes nos inspiran con sus grandes historias de perseverancia y dedicación a la investigación científica.

“Las Semillas de la Realidad” es una celebración del intelecto humano y su capacidad para cuestionar, investigar y comprender. Cada página es una invitación a reflexionar sobre nuestra posición en el Universo y a apreciar el esfuerzo colectivo que ha hecho posible nuestro conocimiento actual.

Aquí encontrarán respuestas, pero también preguntas que seguirán alimentando las llamas de la curiosidad y el descubrimiento.

**Viajemos hasta lo más pequeño, ahí justo en el corazón de la materia.**

**P**ara algunos, la realidad que observamos puede llegar a ser incomprensible. Desde tiempos remotos, el hombre ha buscado dar respuesta a preguntas como ¿de dónde venimos?, o ¿de qué estamos hechos? En el corazón de estas preguntas se encuentra el fascinante mundo de la ciencia y la física de partículas.

Hemos tratado de comprender nuestra realidad desde la política, la filosofía o el arte, pero también se hace científicamente. Este número de *Obsidiana*, “Las Semillas de la Realidad”, busca desentrañar los misterios del Universo a partir de las partículas más pequeñas.

Esta edición es una puerta abierta que permite maravillarse con el conocimiento, y nos recuerda que la ciencia no es un campo finito y aislado, sino una fuente constante de descubrimientos que conecta nuestro pasado, presente y futuro. Cada artículo es una invitación a explorar y cuestionar, como lo haría un investigador en busca de nuevos conocimientos.

Destacados científicos comparten sus historias, experiencia y reflexiones sobre la física de partículas, nuestra gran aliada. Desde cómo se encontró el bosón de Higgs hasta la búsqueda de materia oscura, estas páginas de *Obsidiana* hacen un recorrido por diversas colisiones del saber.

¿De dónde venimos? ¿Qué somos? ¿A dónde vamos? Estas preguntas no solo son el eje de la obra del pintor Paul Gauguin, sino también el núcleo de la física de partículas, una rama de la

ciencia que busca y estudia los componentes más elementales de la materia y cómo interactúan entre ellos.

John Ellis nos guía para explorar la formación del cosmos y su evolución, conectando los puntos entre lo infinitamente pequeño y lo inimaginablemente vasto; ciencia al por mayor.

Descubre la belleza de las matemáticas junto a J. Lorenzo Díaz Cruz, quien hace un recorrido fascinante entre números, cálculos y teorías, revelando cómo es que esta disciplina describe la naturaleza y permite enunciar las leyes de la física. Myriam Mondragón nos motiva para no abandonar nuestra creatividad al explorar y analizar las maravillas que observamos a nuestro alrededor.

El viaje que tienes en tus manos va directo al corazón de la materia. Alejandro Ayala nos lleva a conocer el mundo subatómico, donde se esconde la clave de todo lo que vemos, tocamos, olemos y probamos.

El sendero de María Isabel Pedraza Morales surca el cosmos, desvelando los secretos invaluable de las partículas que provienen del espacio exterior.

¿Cómo demostrar la existencia de un campo cuántico? ¿Debe sacudirse! Luis Roberto Flores

# **BSIDIANA**

Ciencia y Cultura por México

La creación de una Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación es un paso significativo para el fortalecimiento del país.

La Dra. Rosaura Ruiz Gutiérrez, como futura titular, enfrentará grandes retos, entre ellos, integrar la ciencia en las políticas nacionales.

Deseamos que esta etapa revalorice el poder del conocimiento y establezca a la ciencia, las humanidades, la tecnología y la innovación como pilares del desarrollo nacional.



#MujeresEnLaCiencia

#ObsidianaMéxico

#CienciayCulturaPorMéxico

## **PROISTMO** **MÉXICO**

EL MOMENTO DE AMÉRICA DEL NORTE ES AHORA  
EL CORAZÓN INDUSTRIAL Y LOGÍSTICO DE MÉXICO



### **PROISTMO**

Somos una empresa mexicana que impulsa los Polos de Desarrollo del Bienestar (PODEBIS) a lo largo del Corredor Interoceánico del Istmo de Tehuantepec (CIIT).



### **CIIT**

El clúster logístico e innovador de manufactura más importante de América y el proyecto prioritario de infraestructura en México.



### **TECHNOPARK**

Centro de innovación de clase mundial que ofrece infraestructura y servicios de tecnología avanzada para impulsar la competitividad empresarial y mejorar el bienestar comunitario, conectando academia, industria, gobierno y sociedad.



### **POSICIÓN ESTRATÉGICA**

La ubicación estratégica del CIIT incluye 304 kms de vía férrea que conecta el Pacífico con el Atlántico optimizando cadenas de suministro globales junto al Canal de Panamá.



### **PODEBIS**

10 áreas geográficas que cuentan con las condiciones ideales para atraer inversión y potenciar capacidades productivas, logísticas y cadena de suministros.



### **EL NUEVO PUENTE DEL MUNDO**

Contamos con cuatro PODEBIS, los cuales suman más de 1,500 hectáreas con beneficios fiscales y facilidades logísticas.

 [info@proistmo.com](mailto:info@proistmo.com)

Texistepec: 481.58 has.

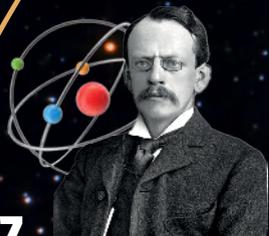
San Juan Evangelista: 360 has.

Santa María Mixtequilla: 502 has.

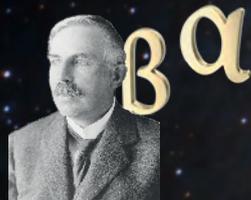
Matías Romero: 185 has.

# LA BÚSQUEDA DE LOS BLOQUES FUNDAMENTALES DEL UNIVERSO

La misión parecía completa: el átomo está hecho por tres partículas (protones, neutrones y electrones); los neutrinos explican los decaimientos radiactivos y el núcleo atómico necesita una partícula que lo mantenga unido (el pion). La partícula alfa está compuesta de neutrones y protones, los rayos beta son electrones y los rayos gamma, fotones.



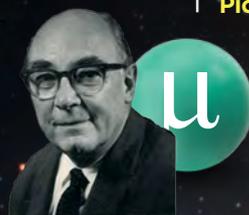
**1897**  
J. J. Thompson descubre el electrón; demuestra que es una partícula mucho más pequeña que el átomo.  
**Electrón**



**1899**  
Ernest Rutherford descubre que el uranio (el elemento más pesado conocido entonces) emite dos tipos de radiación.  
**Partículas alfa y beta**



**1896**  
Por accidente (o casi), Antoine Henri Becquerel descubre la radioactividad.  
**Radioactividad**



**1936**  
Carl D. Anderson descubre el muon. El físico Isaac Rabi recibe la noticia diciendo: ¿y eso, quién lo pidió?  
**Muon**



**1947**  
George Rochester y Clifford Butler descubren una partícula con vida media mucho mayor que la del muon y el pion. Esta y otras partículas similares son llamadas "partículas extrañas".  
**Kaon**



**Antigua Grecia**  
Varios filósofos postulan la existencia de "bloques fundamentales" de la naturaleza.  
**Aire, agua, tierra, fuego**



**1935**  
Hideki Yukawa predice las propiedades de las partículas necesarias para mantener unido el núcleo atómico.  
**Pion**

**1998**  
El detector Super-Kamiokande en Japón demuestra que los neutrinos cambian de identidad espontáneamente.  
**Los neutrinos tienen masa**

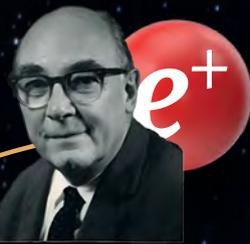
**2012**  
Descubrimiento del bosón de Higgs en los experimentos ATLAS y CMS del LHC del CERN.  
**El bosón de Higgs**



**1947 - 1960**  
Se descubren más partículas extrañas, y varias partículas pesadas que reciben el nombre de bariones.  
**Lambda, rho, omega, sigma, xi, delta...**

**1932**  
Carl D. Anderson descubre el positrón, confirmando las consecuencias de Dirac.  
**Positrón**

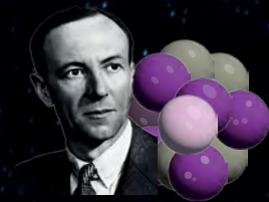
- Etapa 1
- Etapa 2
- Etapa 3
- Propuesta / descubrimiento



**1932**

James Chadwick descubre el neutrón, que permite entender varias propiedades del núcleo atómico.

**Neutrón**



**1930**

Wolfgang Pauli postula la existencia del neutrino para explicar la aparente pérdida de energía en los decaimientos radiactivos.

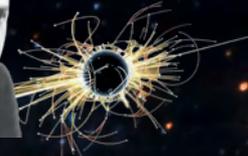
**Neutrino**



**1928**

Paul Dirac combina en una ecuación la teoría de la relatividad y la mecánica cuántica. Predice la existencia de antimateria.

**Antimateria**

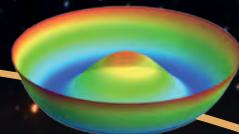


son descubre el firmando una de cías de la ecuación

**1967 - 1970's**

Nuevas partículas encuentran su lugar en el modelo de quarks; se completa la construcción del Modelo Estándar de la física de partículas.

**El Modelo Estándar**



**1964**

Murray Gell-Mann y George Zweig proponen el modelo de quarks.

**Quarks**



**1962**

Murray Gell-Mann y Yuval Ne'eman encuentran cómo clasificar muchas de las partículas conocidas con base en simetrías abstractas.

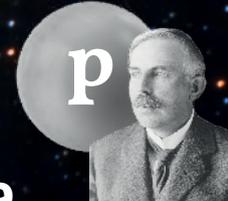
**El "camino óctuple" (the "eightfold way")**



**1919**

Ernest Rutherford descubre el protón.

**Protón**



**1980 - 2000**

Se confirman experimentalmente casi todas las predicciones del Modelo Estándar, con algunas excepciones, como el bosón de Higgs.

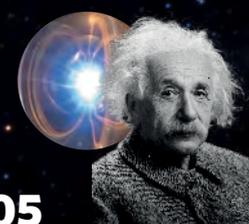
**Masas, probabilidades, tiempos de vida, etc.**

Desde entonces se han encontrado indicios de posibles desviaciones del Modelo Estándar, pero ninguno definitivo. El modelo es incompleto pues, por ejemplo, no explica la masa de los neutrinos o por qué hay mucha más materia que antimateria en el Universo, y no incluye la llamada "materia oscura".

**1905**

Albert Einstein propone el fotón para explicar el efecto fotoeléctrico.

**Fotón**



**1962**

Leon Lederman, Melvin Schwartz y Jack Steinberger descubren otro tipo de neutrino.

**Neutrino muónico**



**1956**

Clyde Cowan y Frederick Reines demuestran experimentalmente la existencia del neutrino predicho por Pauli.

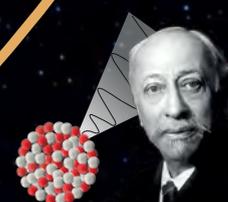
**Neutrino electrónico**



**1900**

Paul Villard descubre un tercer tipo de radiación en el decaimiento del uranio.

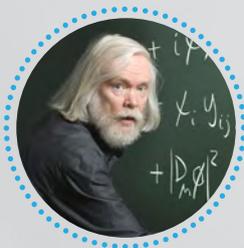
**Rayos gamma**



La lista de partículas subatómicas crece mucho más, y no se entiende qué función tienen ni cómo están relacionadas entre sí. En 1955, Willis Lamb, al recibir el premio Nobel de Física, menciona haber escuchado que, en vez de un Nobel, descubrir nuevas partículas debería ser castigado con una multa de 10 mil dólares.



ESPEJO



# ¿DE DÓNDE VENIMOS? ¿QUÉ SOMOS? ¿A DÓNDE VAMOS?

John Ellis  
KING'S COLLEGE DE LONDRES

# E

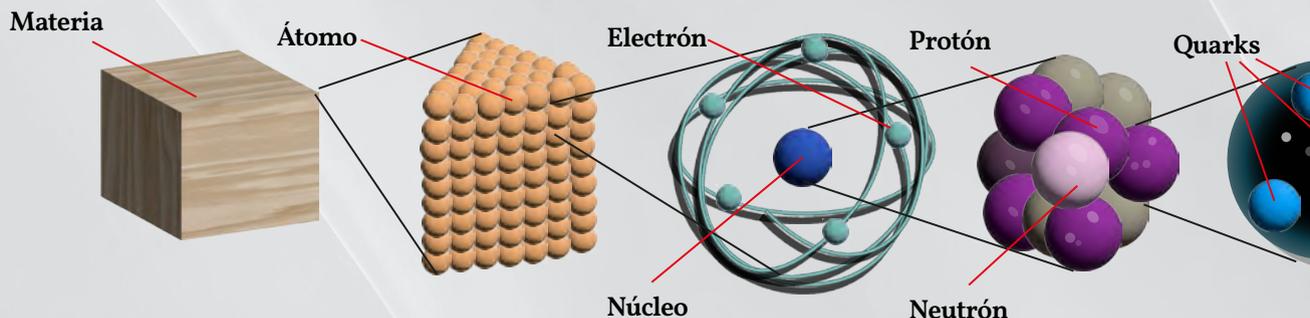
estas tres preguntas fundamentales sobre nuestra existencia y el Universo constituyen el título de una famosa pintura de Paul Gauguin. El objetivo de la física de partículas es darle respuesta científica a estos cuestionamientos y descubrir cómo se formó el Cosmos y la manera en que evoluciona.

Sabemos que la materia visible en el Universo contiene moléculas, las cuales están compuestas de átomos. Estos contienen núcleos compuestos por protones y neutrones, con nubes de electrones alrededor. Los protones y neutrones no son objetos fundamentales, sino que están compuestos de otras partículas: los quarks.

La física de partículas estudia los electrones, los quarks y otras partículas que pensamos que son elementales. Los astrónomos y los cosmólogos nos dicen que, además de esta materia visible, el Universo contiene mucha materia oscura, invisible y desconocida.

Sabemos también que el Universo ha estado en expansión desde hace casi 14 mil millones de años. El astrónomo Edwin Hubble descubrió que la luz emitida por las galaxias distantes parece más roja que la luz en el laboratorio, y que este efecto crece con la distancia, debido a la expansión de las ondas de la luz durante la expansión del Universo.

Las galaxias más distantes que podemos observar están a una distancia de más de 10 mil millones de años luz, pero obedecen a las mismas leyes de física



que se aplican aquí en la Tierra. Sabemos además que el Universo ha sido 3 mil veces más pequeño y más caliente que hoy, porque observamos un fondo cósmico de radiación que fue emitido por los primeros átomos, cuando el Universo tenía una edad de alrededor de 300 mil años.

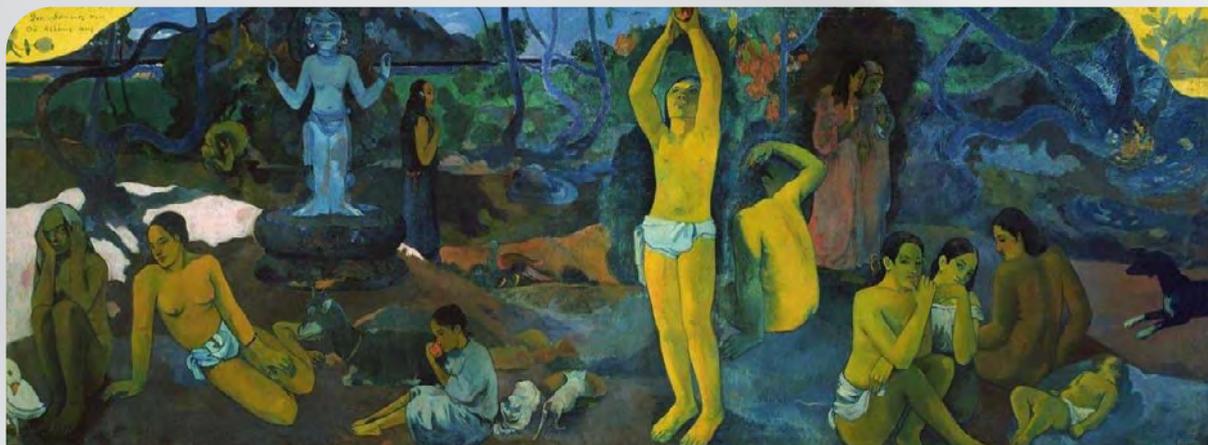
El Universo era mil millones de veces más pequeño y más caliente que hoy cuando tenía una edad de alrededor de tres minutos, porque los elementos livianos nacieron en esa época, gracias a las interacciones nucleares.

La primera pregunta de Gauguin es ¿qué pasó antes en la historia del Universo? Sólo la física de partículas puede dar una respuesta científica: nos permite estimar que los protones y neutrones, componentes de los núcleos de los átomos, nacieron de combinaciones de quarks alrededor de un microsegundo después del inicio del Universo, que las masas de los constituyentes del Universo aparecieron alrededor de un microsegundo después del inicio, y que tal vez durante esta época la materia oscura se separó de la materia visible.

Los vínculos entre la astrofísica, la cosmología y la física de partículas empezaron hace más de un siglo, cuando los rayos cósmicos fueron descubiertos. Los choques de estos rayos energéticos con la atmósfera producen muchos tipos de partículas elementales; por ejemplo, el muon, las partículas extrañas y la antimateria.

Para estudiar más en detalle la física de estas partículas, los físicos construyeron aceleradores, y los choques producidos por estas máquinas reproducen las condiciones al inicio del *Big Bang*. Las predicciones del Modelo Estándar de las partículas propuesto por Abdus Salam, Sheldon Glashow y Steven Weinberg en los años 60, concuerdan casi perfectamente con los experimentos en todos los laboratorios.

El Modelo Estándar incluye las partículas de materia, los quarks y el electrón, y otras relacionadas como el muon y los neutrinos. Además, hay partículas que transmiten las interacciones fundamentales, por ejemplo, el fotón, que comunica el electromagnetismo, y el



Además de la materia visible, el Universo contiene mucha materia oscura, invisible y desconocida.

bosón W, muy pesado, que transmite la interacción débil que causa formas de radioactividad. Algunas de estas partículas tienen masas, como el electrón, los quarks y el bosón W, pero otras no, como el fotón.

¿Cuál es el origen de las masas? Newton explicó que el peso es proporcional a la masa, y Einstein que la energía y la masa están relacionadas, pero ninguno de los dos explicó el origen de las masas. El teórico Peter Higgs sugirió en el año 1964 un mecanismo para generar las masas que implicó la existencia de otra partícula, ahora llamada el bosón de Higgs. Según esta teoría, se puede considerar el espacio vacío como un medio ambiente que fluctúa tal como dicta la mecánica cuántica, siendo el bosón de Higgs el “cuanto” (*quantum*) de estas fluctuaciones.

El Modelo Estándar integra el bosón de Higgs y, en 1975, junto con Mary Gaillard y Dimitri Nanopoulos, escribí el primer estudio detallado de esta partícula hipotética. Su existencia era considerada como muy especulativa en esa época y, al final de nuestro trabajo, escribimos que “no queríamos promover grandes búsquedas experimentales” pero que los físicos experimentales deberían saber cómo podría manifestarse esa partícula.

Afortunadamente, varias décadas después, el CERN (Organización Europea para la Investigación Nuclear) construyó el gran colisionador de partículas (LHC) en un túnel de 27 kilómetros de circunferencia a una profundidad de 100 metros con los siguientes objetivos primarios: revelar el origen de las masas, buscar la materia oscura, estudiar el plasma primordial que llenó el Universo joven, e investigar las diferencias entre las partículas de materia y de antimateria.



<https://copyright.web.cern.ch>

John Ellis es un físico teórico británico, reconocido por sus importantes contribuciones a la física de partículas, la astrofísica, la cosmología y la gravedad cuántica. Ha sido pionero en varios campos, incluido el descubrimiento del gluón y la búsqueda del bosón de Higgs. En 2004, una encuesta de SPIRES lo clasificó como el segundo físico teórico más citado en el mundo.

Es Profesor de Física Teórica James Clerk Maxwell en el King's College de Londres.



“  
El LHC es mucho  
más que un super-  
microscopio capaz de  
descubrir los secretos  
de la materia.”

En el 4 de julio de 2012, los experimentos basados en el CERN anunciaron el descubrimiento de una nueva partícula que fue identificada después como el mítico bosón de Higgs. Así, la física de partículas completó la respuesta a la segunda pregunta de Gauguin: somos combinaciones de quarks y electrones, con masas otorgadas por el bosón de Higgs e interactuando por medio de fuerzas fundamentales que podemos calcular con alta precisión gracias a las leyes del Modelo Estándar.

¿Qué investigan los experimentos en el CERN después de este descubrimiento? Los astrónomos y cosmólogos nos dicen que, además de la materia visible en el Universo, hay también mucha materia invisible, llamada *materia oscura*. Esta hipótesis fue propuesta en los años 30 por el astrónomo Fritz Zwicky. Él estaba observando el movimiento de las galaxias en el cúmulo Coma y descubrió que se mueven demasiado rápido, en el sentido de que el campo gravitacional generado por la materia visible no es suficientemente fuerte para retenerlas en el cúmulo. Zwicky postuló la presencia de materia oscura para explicar cómo queda intacto el cúmulo.

En los años 70, la astrónoma Vera Rubin observó un fenómeno similar en las galaxias mismas: las estrellas también se mueven “demasiado rápido”. Sus observaciones necesitan un campo gravitacional más fuerte que el generado por la materia visible: una prueba más de la necesidad de la materia oscura.

Podría ser que la materia oscura esté constituida por partículas desconocidas, tales como las

buscadas por los experimentos en el LHC. Partículas de materia oscura producidas por los choques de protones en el LHC se escaparían de los experimentos, llevando energía inobservada o “energía faltante”. Pero, hasta ahora, no hay indicios de tales eventos.

Otro objetivo de los experimentos es estudiar la diferencia entre la materia y la antimateria, que podría ser el origen de la materia en el Universo. El físico teórico Paul Dirac sugirió la existencia de antimateria en el año 1928, y partículas de antimateria fueron observadas por primera vez entre los rayos cósmicos en los años 30.

Fue una sorpresa cuando los experimentos revelaron, 30 años después, que hay pequeñas diferencias entre las interacciones de partículas y antipartículas. El físico Andrei Sakharov sugirió que estas diferencias podrían explicar la asimetría cosmológica entre las cantidades de materia y antimateria en el Universo hoy en día. Experimentos en el CERN están tratando de comprobar su hipótesis, que completaría la respuesta a la primera pregunta de Gauguin: ¿de dónde venimos?

Finalmente: ¿a dónde vamos? En este momento el Universo sigue su expansión, pero cálculos en el Modelo Estándar indican que el espacio vacío sería inestable, y que el Universo colapsará. ¿Podría ser que los experimentos en el LHC descubrirán nueva física más allá del Modelo Estándar que salvará el Universo? Vamos a ver...

Estos ejemplos muestran que el LHC no es sólo un super-microscopio capaz de descubrir los secretos de la materia, sino también un super-telescopio capaz de investigar los secretos oscuros del Universo y dar respuestas científicas a preguntas como las de Gauguin.



# MATEMÁTICAS, SIMETRÍAS Y LA FÍSICA DEL BOSÓN DE HIGGS

J. Lorenzo Díaz Cruz

BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

**C**uando se hace un descubrimiento importante en la ciencia, quienes han trabajado en el tema suelen vivir el mejor de los tiempos en su carrera científica. Eso ocurrió, por ejemplo, cuando se anunció, un 4 de julio de 2012, que en el laboratorio de la Organización Europea para la Investigación Nuclear, el CERN, habían encontrado señales de una elusiva partícula, el bosón de Higgs: el remanente del mecanismo responsable de generar la masa de las partículas elementales.

Recuerdo haberle escrito por esas fechas a mi asesor del doctorado, el profesor Gordon Kane, de la Universidad de Michigan, para compartirle mi júbilo. Él me dijo algo como: “es grandioso que eso que pensamos matemáticamente sea real, que ocurra en la naturaleza”. Y ese es un punto que invita a la reflexión, sobre la relación entre la física y las matemáticas, “dos familias de igual rango y calidad”, parafraseando las líneas iniciales de *Romeo y Julieta*.

**A cada partícula elemental le corresponde un ente matemático que llamamos campo cuántico.**

Aunque hay diferentes grados de formalidad en física y matemáticas, e incluso entre diferentes ramas de la física, es notable que el mundo ideal de las matemáticas nos sirva para describir la naturaleza. Albert Einstein lo expresó del modo siguiente: “Es increíble que las matemáticas, habiendo sido creadas por la mente humana, logren describir la naturaleza con tanta precisión”.

Por un lado, las matemáticas son una disciplina estricta y exacta, con verdades o teoremas que deben demostrarse de forma rigurosa. Sus elementos son entes ideales, que viven en un mundo abstracto. Son también una herramienta que permite enunciar las leyes de la física, incluso, podríamos decir que es el lenguaje que mejor expresa las ideas de la física.

En las teorías más establecidas, como la electrodinámica o la mecánica clásica, se conocen muy bien las ecuaciones básicas; en tal caso, el progreso viene del desarrollo de métodos matemáticos para resolver dichas ecuaciones. Por ejemplo, cuando queremos tener una mejor predicción del clima en nuestro planeta, necesitamos computadoras más poderosas que nos permitan resolver numéricamente las ecuaciones de la mecánica de fluidos aplicadas a la atmósfera.

Sin embargo, la historia de la física nos dice que muchas veces las ideas puras formales no permiten avanzar, en especial cuando desconocemos las ecuaciones que describen un sistema o algún fenómeno. O bien, puede ser que se tengan varias ecuaciones que describen un mismo sistema físico.

En ese caso, el puro razonamiento no permite decidir cuál es la ecuación correcta; para poder avanzar es necesario realizar mediciones precisas de las propiedades del sistema físico. La teoría matemática es insuficiente, por lo que se necesita realizar experimentos que permitan discriminar entre las diferentes teorías que pueden describir un mismo fenómeno.

¿Y cuáles son las ecuaciones que describen el mundo de las partículas elementales y sus interacciones? Todos recordamos de nuestros cursos de matemáticas de la secundaria o la preparatoria que las ecuaciones usan símbolos algebraicos. Para el propósito de este artículo, no es necesario usar todos los símbolos y operaciones que las describen de forma completa. Basta decir aquí que a cada partícula elemental le corresponde un ente matemático que llamamos campo cuántico, y se usa alguna letra latina o griega para representarlo y trabajar sus propiedades.

Así, para el electrón, que anda por todas partes, ya sea en las corrientes eléctricas o girando dentro de los átomos, se usa simplemente su inicial  $e$ . El electrón tiene un par de hermanitos más pesados, que los llamamos muon y tau, y a los dos junto con el electrón, se les llama leptones; para denotar el correspondiente campo cuántico se usan las letras griegas  $\mu$  y  $\tau$ .

Los protones y neutrones se denotan también por sus iniciales  $p$  y  $n$ , respectivamente. Cabe decir que ni el protón ni el neutrón son tan fundamentales como el electrón, pues se ha medido que tienen un tamaño.

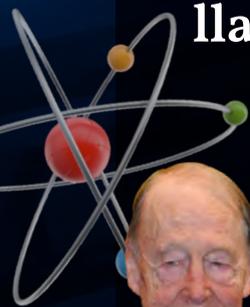


Figura 1

De hecho, sabemos que el protón y el neutrón se conforman por otras partículas, los llamados quarks. Dos de ellos, de los seis en total que se conocen, se denotan por las letras  $u$  y  $d$ , por las iniciales en inglés de arriba ( $up$ ) y abajo ( $down$ ), tal que el protón está formado por una combinación  $uud$ , mientras que el neutrón tiene una composición  $udd$ .

Los quarks se ligan por una interacción más fuerte que el electromagnetismo; esta fuerza también es responsable de mantener unidos a los protones dentro del núcleo atómico, y es tal que debe vencer la repulsión que sienten los protones por tener una carga eléctrica del mismo signo.

En la teoría cuántica, las fuerzas surgen como consecuencia del intercambio de otras partículas, las mediadoras de dichas fuerzas. Esto es como si mirásemos a unos jugadores de básquet y notáramos desde lejos que se mantienen juntos, pero ya de cerca vemos que es así porque están peleando por la pelota.

La pelotita o partícula mediadora del electromagnetismo es el quantum de luz, el llamado fotón, y se denota con la letra  $A$ ; también se tienen otras tres partículas del mismo tipo, los bosones  $W^+$ ,  $W^-$  y  $Z^0$ , que son mediadores de otra fuerza, la llamada interacción nuclear débil. Esta es responsable del decaimiento beta, mediante el cual un neutrón decae en un protón y un electrón. Para que se respete la conservación de la energía en el decaimiento beta, se requiere introducir una nueva partícula, neutra, casi sin masa, llamada neutrino (una especie de neutrón pequeñito, denotado por la letra griega  $\nu$ ). De hecho, a cada uno de los leptones cargados ( $e$ ,  $\mu$  y  $\tau$ ) les corresponde un neutrino diferente ( $\nu_e$ ,  $\nu_\mu$  y  $\nu_\tau$ ).

En el caso de los quarks, la fuerza fuerte es mediada por otras partículas llamadas "gluones" (de *glue*, pegamento en inglés), y esta fuerza tiene la propiedad de aumentar con la distancia, como si fuera un resorte, tal que los quarks están casi libres dentro del protón, pero se resisten cuando intentamos separarlos; a esta propiedad se le llama "libertad asintótica".

Todas las partículas conocidas, seis leptones, seis quarks, ocho gluones, el fotón, los  $W$  y  $Z$ , se describen con un complejo conjunto de ecuaciones, que llamamos "El Modelo Estándar", el cual es tan complicado como poderoso, capaz de describir miles de datos experimentales. Al mismo tiempo, el conjunto de

las ecuaciones es tan sencillo que cabe en una taza (Figura 1).

Un elemento central para poder expresar de forma tan compacta dichas ecuaciones es el concepto de simetría. Las simetrías se ilustran, por ejemplo, con una esfera perfecta que se puede rotar y nunca notaríamos la diferencia. En tres dimensiones, la ecuación de la esfera es muy sencilla:  $r = \text{constante}$  y esta ecuación incorpora la simetría de la esfera. En el caso de las partículas, las simetrías son operaciones que "rotan" los campos asociados con cada una de ellas.

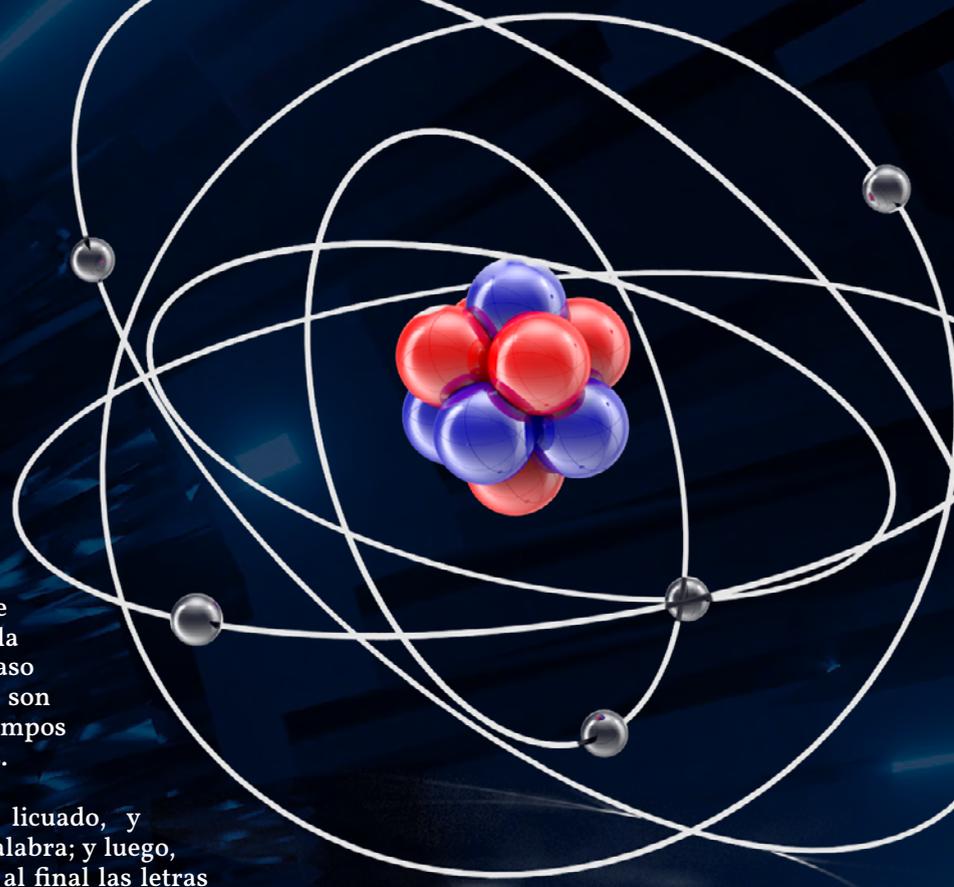
Es como si hiciéramos un licuado, y agregamos las letras de una palabra; y luego, aunque se revuelva la mezcla, al final las letras quedan en el mismo lugar. El conjunto de todas las transformaciones forma un ente matemático llamado "Grupo de Lie"; en la naturaleza, el grupo completo tiene una estructura representada por  $SU(3)_c \times SU(2)_L \times U(1)_Y$ , que representa ocho gluones, un par cargado  $W^+$  y  $W^-$ , así como otro par neutro, el  $Z$  y el fotón  $A$ .

Hay algunas partículas que no tienen masa, como el fotón y los gluones. Mientras que los  $W$ ,  $Z$ , así como todos los quarks y leptones cargados, tienen masa. Resulta que el concepto de masa, no se lleva muy bien con las simetrías. Sin embargo, existe una manera de incluir la masa sin violentar las simetrías.

Para ello preguntamos si las simetrías que asociamos con las partículas son también una propiedad del vacío. Cuando eso no ocurre, aparece el fenómeno de ruptura espontánea de las simetrías. Para implementar esta idea, se usa un ente llamado *campo de Higgs*, que se denota por la letra griega  $\Phi$ , y que corresponde al mínimo de energía.

Para la mayoría de los campos, el mínimo de energía ocurre cuando el valor del campo es cero, pero eso no sucede para el campo de Higgs. La forma de la energía se parece al sombrero mexicano, como se ilustra en la Figura 2, el mínimo está en la base circular del mismo.

Así pues, la masa de las partículas elementales surge de su interacción con el vacío. De alguna manera, la masa es como una señal de imperfección de la teoría. Dado que la



masa es necesaria para que las partículas estén en reposo y tengan tiempo de formar átomos y moléculas, indispensables para que se forme la vida que conocemos, podemos decir que somos hijos de la imperfección. Esto tiene cierto parecido con la forma como se construyen los templos japoneses, que incluyen un elemento diferente, o equivocado, para recordarnos que somos imperfectos.

## Podemos decir que somos hijos de la imperfección.

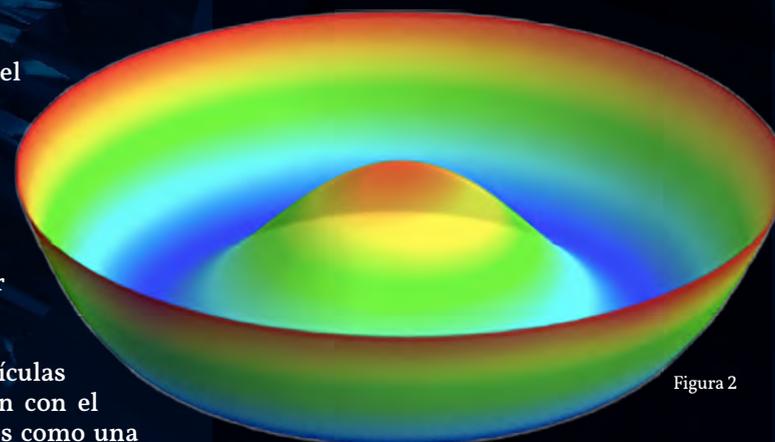


Figura 2

$$\begin{aligned}
 \mathcal{L} = & -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} \\
 & + i\bar{\psi} \not{D} \psi + \text{h.c.} \\
 & + \chi_i^\dagger \gamma_5 \chi_j \phi + \text{h.c.} \\
 & + |D_\mu \phi|^2 - V(\phi)
 \end{aligned}$$



# NUEVOS MUNDOS: EXPLORACIÓN Y CONSTRUCCIÓN DE MODELOS

Myriam Mondragón Ceballos  
INSTITUTO DE FÍSICA, UNAM

C

ómo se preparaban los antiguos exploradores para ir a una tierra desconocida? ¿Qué los impulsaba a dejar sus hogares y aventurarse a otros mundos? Aquellos aventureros utilizaban mapas, barcos, caballos, caravanas, gente y una mezcla de audacia y cautela.

Como ellos, los científicos nos adentramos a tierras desconocidas para descubrir nuevos mundos y, algunas veces también, para irlos construyendo. En compañía de colegas y estudiantes, llevamos herramientas matemáticas y computacionales; usamos la imaginación, guiados tanto por el rigor como por datos experimentales y observaciones. Para nosotros, y supongo que quizás también para ellos, el principal motor era y es la curiosidad.

En el caso de la física de partículas elementales estamos buscando una teoría más fundamental que incluya al Modelo Estándar (ME) y que nos dé explicación a alguno de los fenómenos que este deja sin resolver.

El Modelo Estándar da una muy buena descripción de las partículas más pequeñas que componen la materia y de las interacciones entre ellas. Fue

construido con una retroalimentación entre la teoría y el experimento, entre la rigurosidad matemática y las evidencias experimentales. Sin embargo, existen muchos fenómenos que observamos y que, aunque podemos describirlos en el ME, no sabemos cuál es su origen (algunos más ni siquiera se pueden describir con el ME).

Entre las preguntas abiertas del ME están: ¿Por qué son las masas de las partículas elementales tan diferentes entre sí? ¿Hay únicamente tres generaciones de materia? Y si es así, ¿por qué tres? ¿Son los neutrinos sus propias antipartículas? ¿Hay más bosones de Higgs? ¿Por qué hay más materia que antimateria en el Universo? ¿Qué es la materia oscura? ¿Son realmente cuatro las interacciones fundamentales: electromagnética, débil, fuerte y gravitatoria?

Para encontrar las posibles respuestas a estas y otras preguntas debemos aventurarnos a lo desconocido. Muchas, si no es que todas las incógnitas del ME, involucran automáticamente al inicio del Universo, su evolución y algunos procesos astrofísicos. Hay una interrelación fuerte entre la física de partículas elementales, la cosmología y la física de astropartículas. La cosmología estudia el origen y evolución del Universo, la física de astropartículas estudia las partículas elementales que nos llegan del cosmos, así como los procesos astrofísicos donde la naturaleza de las partículas es esencial.

La primera evidencia de que hay física nueva o física desconocida es la masa de los neutrinos. En el ME los neutrinos se suponen sin masa, pero ahora sabemos que sí la tienen, aunque sea diminuta. La segunda es la existencia de la materia oscura, de la cual tenemos mucha evidencia observacional de astrofísica y



cosmología, pero no sabemos qué es. La suposición más simple es que se trata de una o varias partículas neutras, y que únicamente interactúan gravitacionalmente o muy débilmente con las conocidas. Ninguna de las partículas del ME puede ser materia oscura, la formación de estructura a gran escala de nuestro Universo así lo indica.

“  
**Los científicos nos aventuramos a tierras desconocidas para descubrir nuevos mundos.**”

Si ya sabemos que hay física hasta ahora desconocida, ¿cómo exploramos más allá del Modelo Estándar? El ME ha sido probado experimentalmente con gran precisión. Esperamos que la teoría que lo sustituya reproduzca sus éxitos, a la vez que explique más fenómenos. La manera más directa de buscar esta nueva teoría es “extendiendo” el ME, es decir, lo tomamos como base y agregamos algo. Entre nuestras posibilidades de aventura está el añadir simetrías, partículas, interacciones o, incluso, dimensiones espaciales extra, o todas a la vez... de hecho, muchas de ellas están relacionadas. Agregar interacciones y/o dimensiones espaciales extra implica que hay más partículas elementales de las que conocemos.

Como ya sabemos que los neutrinos tienen masa, la manera más sencilla de extender el ME es añadir

neutrinos derechos o estériles (que sólo interactúan gravitacionalmente), pero hasta ahora no se han observado en la naturaleza.

Suponer que existen nos permite explicar la masa diminuta de los neutrinos conocidos de una manera consistente con las simetrías del ME que, además, apunta a nueva física con consecuencias para la cosmología y las astropartículas (como una posible explicación de por qué hay más materia que antimateria en el Universo y candidatas a materia oscura).

Existe otra manera de extender el ME: suponer que hay más bosones de Higgs, y no solo uno. Esto permitiría entender, parcialmente, por qué las masas de las partículas son tan diferentes; también podrían ser componentes de la materia oscura e indicar la presencia de más simetría en la naturaleza.

El ME está basado en simetrías, por lo que buscar más o extender las simetrías que ya se tienen es, de alguna manera, natural. Una simetría es una transformación que deja a un sistema sin cambio, como al rotar un cuadrado por  $90^\circ$  o girar un círculo, las figuras permanecen iguales o invariantes. En física, una simetría implica una cantidad conservada, por ejemplo, la conservación de la energía proviene de que las ecuaciones de la física son las mismas a diferentes tiempos (invariancia temporal).

Una simetría podría relacionar fenómenos que parecieran desconectados, pero que son similares. Estas teorías, llamadas de Gran Unificación (GUT, por sus siglas en inglés), pueden explicar la carga eléctrica fraccionaria de los quarks, así como establecer predicciones como la existencia de una carga magnética puntual o la desintegración del protón, ninguno de los cuales ha sido observado.

Las partículas elementales se dividen en dos grandes categorías: bosones y fermiones. Los bosones son responsables de llevar fuerzas y energía, y los fermiones son las partículas de materia. Parecen fundamentalmente diferentes, pero ¿qué pasaría si estuvieran relacionados? En las teorías supersimétricas hay una simetría que relaciona estos dos tipos de partículas, donde las ecuaciones para las fuerzas y la materia son iguales.

Las ventajas de estas teorías es que dan respuesta a varias incógnitas del ME y predicen muchas nuevas partículas; a cada fermión le correspondería un

bosón, y viceversa. Algunas de estas nuevas partículas, llamadas supersimétricas, podrían ser materia oscura. También podemos imaginar que hay más dimensiones espaciales que las tres en las que vivimos. ¿Novedoso? Pues no tanto, la idea surgió hace más de 100 años y sigue vigente.

Las consecuencias de las teorías GUT se harían manifiestas solo a escalas de energía muy, muy grandes, inaccesibles para los experimentos terrestres, en el Universo muy temprano. De manera que solo podemos inferir si son correctas indirectamente, por algunas de sus predicciones. Esto es aún más extremo en el caso de las teorías de cuerdas, cuyos efectos únicamente serían observables apenas algunos instantes después del *Big Bang*.

¿Cómo llegamos a energías tan altas o a distancias tan pequeñas? Con aceleradores terrestres. En el Gran Colisionador de Hadrones (LHC, por sus siglas en inglés) del CERN (Organización Europea para la Investigación Nuclear) se buscan partículas nuevas, como bosones de Higgs exóticos, partículas supersimétricas o evidencia de materia oscura. Para explorar más allá de esta frontera ya se están planeando los futuros aceleradores.

Por otro lado, los eventos extremos en el cosmos nos mandan mensajeros, partículas muy energéticas que nos pueden dar información tanto de procesos astrofísicos como de posible física nueva, a energías inalcanzables para nosotros, acercándonos quizás a las teorías más fundamentales. En estas indagaciones destacan los observatorios de rayos cósmicos, de neutrinos y de rayos gamma.

¿Y qué hay de eventos raros o inusuales, que podrían señalar nuevos fenómenos o caminos de exploración? Estas búsquedas las llevamos a cabo en experimentos que producen muchísimos eventos, con detectores extremadamente sensibles. Es la frontera de la intensidad, y es crucial para entender la naturaleza de los neutrinos, que ofrece una ventana al Universo y a las interacciones fundamentales.

Exploramos con energía, con intensidad, con los pies en la tierra y con la mirada al cosmos. Hay muchos caminos por recorrer y examinar, pero la idea es dejar volar nuestra imaginación con la guía rigurosa de las matemáticas y la emoción del experimento. 

**¡No te quedes con dudas! ¡Busca el glosario de este artículo en nuestro portal Web!**

## “ Podemos imaginar que hay más dimensiones espaciales que las tres en las que vivimos.”

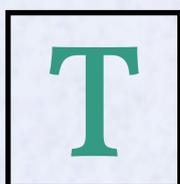




# ENTRE QUARKS Y GLUONES: LA CROMODINÁMICA CUÁNTICA

Alejandro Ayala  
INSTITUTO DE CIENCIAS NUCLEARES, UNAM

*Three quarks for Muster Mark!  
Sure he has not got much of a bark  
And sure any he has  
it's all beside the mark.  
James Joyce, Finnegans Wake*



Tres cuartos de galón, tres graznidos de gaviota, tres dislates para el Señor Mark? Lo cierto es que entre los varios significados posibles de la palabra *quark* en el poema de James Joyce, ninguno apunta al concepto que en 1963 Murray Gell-Mann (premio Nobel de Física en 1969) adoptó para la partícula elemental, más pequeña que un protón o que un neutrón —y confinada dentro de éstos—, cuya existencia permite entender la dinámica de la interacción nuclear fuerte, responsable de mantener unidos a los protones y neutrones dentro de los núcleos atómicos, la llamada *cromodinámica cuántica*, (QCD, por sus siglas en inglés).

Este año celebramos el sexagésimo aniversario del comienzo de la formulación de la QCD, que hoy en día sabemos representa una de las teorías fundamentales en física y que permite explicar importantes fenómenos de la naturaleza, por ejemplo, por qué brillan el Sol y las estrellas,

o la existencia de masa de los objetos visibles en el Universo.

Existen tres tipos de quarks que se distinguen entre sí por una cantidad llamada *carga fuerte*. En cierto sentido, estas cargas son análogas a la carga eléctrica ordinaria, excepto que en QCD son de tres tipos. A principios de los años 1970, Gell-Mann acuñó el nombre *carga de color* para referirse a estas cargas, en analogía a los tres colores primarios: rojo, verde y azul. A partir de entonces, el nombre *cromodinámica* fue establecido.

Para cada tipo de quark existe un *antiquark*, es decir, un quark pero con la carga de color opuesta a la de su correspondiente quark. De este modo, a las cargas de los antiquarks se les conoce como los *anticolores* y en la analogía con los colores primarios se les denomina antirrojo, antiazul y antiverde.

La QCD incorpora uno de los conceptos básicos para toda teoría fundamental: la simetría ante transformaciones que involucran los objetos que describen, en este caso, los quarks. El concepto establece que los tres tipos de quarks, o antiquarks, así como cualquier combinación de unos u otros, es equivalente ante la interacción nuclear fuerte.

Podemos imaginar que para formar estas combinaciones escogemos cualquier lugar alrededor de nosotros; la cocina, la luna o el centro de la galaxia. Más aún, podríamos decidir hacer estas combinaciones hoy en este instante, mañana al mediodía o dentro de un año. La simetría de la QCD establece que no importa dónde ni cuándo hagamos estas transformaciones, la teoría sigue siendo válida.



Casi toda la masa de los protones y de los neutrones proviene de esta energía de interacción.

Es difícil pensar que esto pueda suceder impunemente, sin que algo más cambie como consecuencia de estas transformaciones. Para compensar los posibles cambios, la teoría predice la existencia de objetos que compensen las transformaciones entre quarks: los llamados *gluones*. El nombre gluón hace referencia a la propiedad básica de estos objetos: mantener unidos a los quarks dentro de los protones y los neutrones, como si actuaran a manera de pegamento que mantiene a los quarks dentro de esas partículas.

De la misma manera que los quarks poseen carga de color, los gluones también la tienen. Sin embargo, a diferencia de los quarks existen ocho tipos de gluones. Estos corresponden a las posibles combinaciones de tres colores con tres anticolores donde se excluye la combinación para la cual el color cancela al anticolor. En otras palabras, un gluón sin carga de color no existe.

La QCD es, como toda teoría fundamental, de naturaleza *cuántica*. Esto significa que los objetos que la describen, quarks y gluones, se pueden visualizar como pequeños corpúsculos que, al moverse, transportan energía, así como otras cantidades físicas llamadas *números cuánticos*, por ejemplo, la misma carga de color.

En términos cuánticos, los quarks y los gluones se conocen como partículas. Son tan pequeñas que para todo fin práctico se pueden pensar como puntos sin extensión espacial. En la QCD

1	2	3	ε	ς	τ
<b>Up</b>	<b>Charm</b>	<b>Top</b>	<b>Antitop</b>	<b>Anticharm</b>	<b>Antiup</b>
<b>Down</b>	<b>Strange</b>	<b>Bottom</b>	<b>Antibottom</b>	<b>Antistrange</b>	<b>Antidown</b>

estas partículas son *elementales*, es decir, no poseen estructura interna.

Los quarks, a diferencia de los gluones, tienen masa, por lo que se consideran como las partículas que constituyen la materia, mientras que los gluones son las partículas que transmiten la interacción. La riqueza de la teoría se manifiesta en el hecho de que los gluones no sólo interactúan con los quarks, sino que además pueden interactuar entre sí.

No obstante, la masa de los quarks es muy pequeña y la suma de las masas de los quarks que constituyen los protones o los neutrones no da cuenta del total de la masa de estas partículas. ¿Cómo entendemos entonces la masa de protones y neutrones formados de quarks con masas pequeñas? La respuesta se encuentra en la equivalencia entre energía y masa encontrada por Albert Einstein a principios del siglo XX.

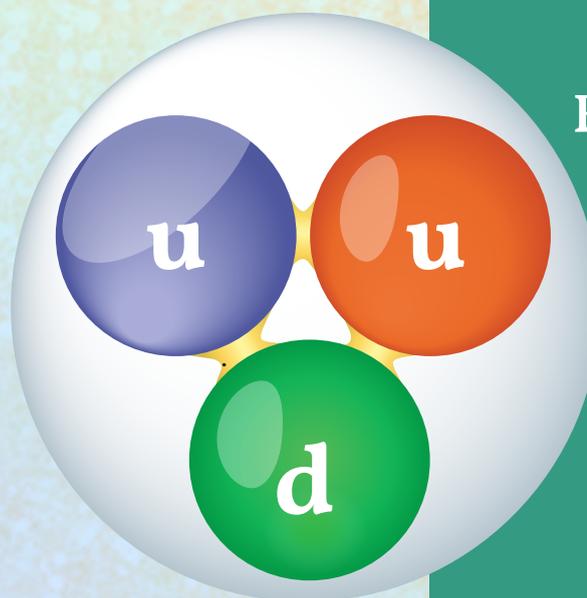
En estos términos, la interacción fuerte es tan intensa que la energía involucrada contribuye significativamente a la masa de los protones y los neutrones. De hecho, casi toda la masa de los protones y de los neutrones proviene de esta energía de interacción. Sin embargo, la interacción es intensa sólo para distancias comparables al tamaño de un núcleo atómico. Cuando la interacción tiene lugar a distancias aún menores, su intensidad disminuye y los quarks y los gluones se comportan como partículas que no interactúan entre sí. La descripción de este importante fenómeno, conocido como *libertad asintótica*, mereció el premio Nobel de Física en 2004.

En la actualidad, uno de los frentes con mayor actividad en ciencia de frontera es el estudio de las propiedades de la QCD en condiciones extremas de temperatura y densidad, como las que se presentan durante la evolución del Universo temprano, al interior de objetos astrofísicos como supernovas, o estrellas de neutrones, o en colisiones de núcleos de elementos pesados producidas en los grandes laboratorios de física de partículas elementales en el ámbito mundial. Un nutrido equipo de investigadores mexicanos distribuidos en instituciones nacionales en todo el territorio realiza importantes contribuciones a estos desarrollos.

Sesenta años de evolución de la QCD han permitido confirmar la existencia de los quarks y los gluones, no sólo como constituyentes de protones y neutrones, sino además de otras partículas producidas en colisiones a altas energías utilizando poderosos aceleradores y midiendo sus propiedades con detectores cada vez más precisos.

Este tipo de experimentos ha motivado el desarrollo de tecnologías que encuentran su utilidad práctica

Un protón, compuesto por dos quarks arriba (u) y un quark abajo (d).



El gluón actúa a manera de pegamento que mantiene a los quarks dentro de protones y neutrones.

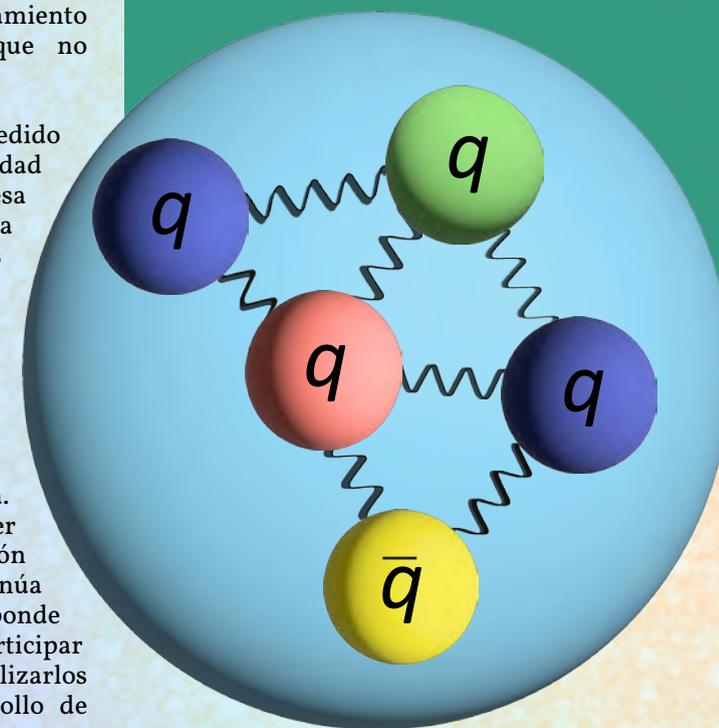
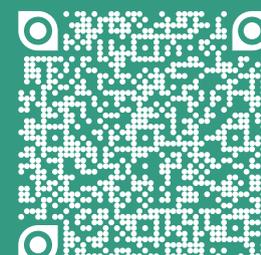
en disciplinas como la medicina, con la fabricación de dispositivos para uso en imagenología o el desarrollo de terapias que utilizan radiación ionizante. El diseño y construcción de dispositivos electrónicos basados en el uso de semiconductores han recibido también un fuerte impulso por parte de la física de altas energías, que requiere métodos de detección cada vez más veloces y exactos.

El desarrollo mismo de la *www* tuvo lugar como respuesta a la necesidad del intercambio de datos producidos en experimentos de la física de partículas. ¿Cómo imaginar estos desarrollos prácticos sin la motivación proveniente de la curiosidad de científicos empeñados en desentrañar las leyes que rigen el comportamiento de la naturaleza? La respuesta es que no sería posible.

Cualquier desarrollo tecnológico es precedido por descubrimientos fruto de la curiosidad de nuestra especie. Cultivar y nutrir esa curiosidad es la mejor estrategia para permitir un futuro con mejores tecnologías que puedan ser aplicadas para la solución de los muchos problemas que como especie enfrentamos y seguiremos enfrentando en el futuro.

Es por lo tanto nuestra responsabilidad continuar haciendo preguntas acerca del comportamiento de la naturaleza. En algún sitio, motivados por entender el brillo de las estrellas o la evolución del Universo, algo increíble continúa esperando a ser descubierto y nos corresponde empeñar nuestro entusiasmo para participar de esos hallazgos y, eventualmente, utilizarlos para un mejor y más equitativo desarrollo de nuestra sociedad. ●

Escanea el código QR y descubre videos con la simulación de campo de gluones.



Un pentaquark es una partícula subatómica formada por cuatro quarks y un antiquark unidos entre sí.



# MENSAJEROS CÓSMICOS

María Isabel Pedraza Morales

CENTRO INTERDISCIPLINARIO DE INVESTIGACIÓN Y ENSEÑANZA DE LA CIENCIA, BUAP

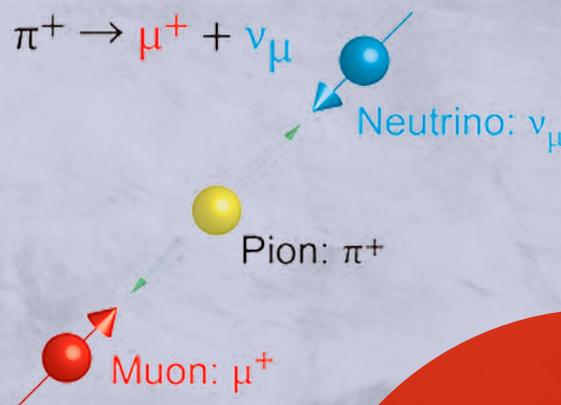
 @isapedrazapage

**L**os rayos cósmicos son partículas energéticas provenientes del espacio exterior, como una lluvia de diminutas gotitas de materia que bañan a la Tierra. Fueron descubiertas por el físico austriaco Víctor Franz Hess en 1912, quien, mediante el uso de globos a grandes alturas, demostró que el número de partículas aumentaba con la altitud. Esto quiere decir que se encuentran en mayor concentración mientras más alejados del suelo estamos, sugiriendo así una fuente extraterrestre. Este hallazgo fue crucial para el avance de la física de partículas y la astrofísica, abriendo un nuevo campo de estudio.

Son importantes por varias razones. Los rayos cósmicos ofrecen pistas sobre los procesos de alta energía que ocurren en el Universo, como las explosiones de supernovas, los agujeros negros y las colisiones de galaxias. Estos eventos son capaces de acelerar partículas a energías que superan con creces las que podemos lograr en los aceleradores de partículas terrestres, incluido el gran colisionador de hadrones (LHC) entre Francia y Suiza, el acelerador de partículas más energético del mundo. Tal es el caso de Amaterasu (*Telescope Array Collaboration*, 2023), el segundo rayo cósmico más energético jamás observado, con un millón de veces más energía de la que podemos generar en el LHC.

Estudiar los rayos cósmicos también nos permite entender mejor otros fenómenos de partículas elementales que ocurren a las más altas energías, como el mecanismo que hace que haya más materia que antimateria en el Universo, la naturaleza de la materia oscura, etc.

Además, tienen un papel relevante en la química atmosférica: al interactuar con los átomos y moléculas en la atmósfera, generan cascadas de partículas secundarias, incluyendo muones, piones, y neutrinos. Estas partículas secundarias pueden influir en la formación de nubes y en el clima terrestre (Brown, 2008). Aunque el alcance exacto de este impacto sigue siendo un tema de investigación, es un área fascinante que une la astrofísica con la ciencia climática.



Los rayos cósmicos también son causantes de la producción de radioisótopos, tales como el Carbono 14 en la atmósfera (Miyake, Masuda y Nakamura, 2013), el cual se fija en las plantas que luego consumimos los seres vivos; una vez en nuestro organismo, se queda ahí y es posible usar su cantidad en nuestros restos para determinar la antigüedad de los mismos.

Otro aspecto interesante de los rayos cósmicos es su influencia en la biología (Globus y Blanford, 2020). A pesar de que la atmósfera y el campo magnético terrestre ofrecen una protección significativa, una fracción de estas partículas

alcanza la superficie de la Tierra. El riesgo para la salud humana en la superficie terrestre es bajo, pero los rayos cósmicos presentan un desafío significativo para la seguridad de los astronautas en misiones espaciales, especialmente en viajes a Marte o más allá, donde la exposición a estas partículas de alta energía es mucho mayor.

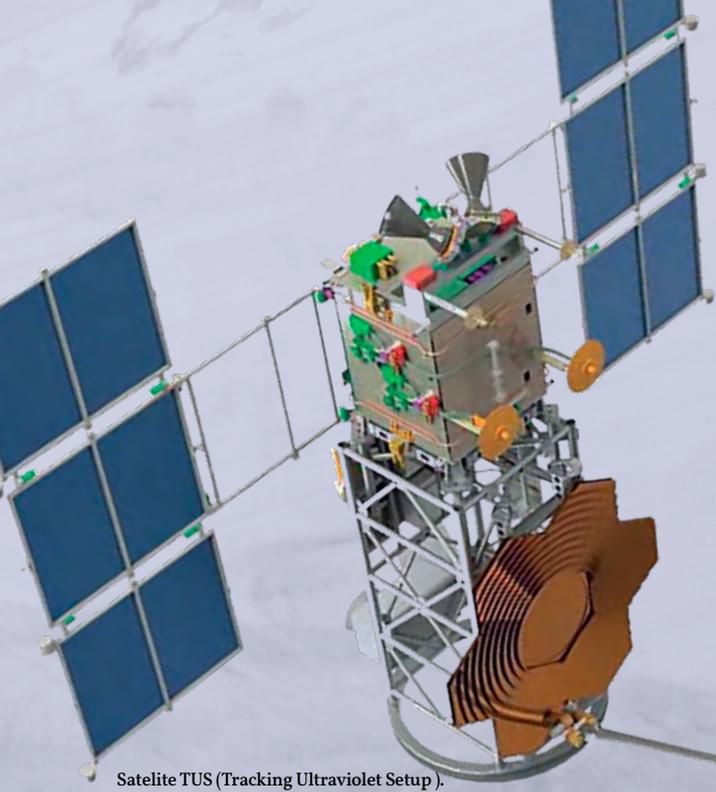
Estos mensajeros cósmicos han capturado la atención de científicos de todo el mundo, incluyendo equipos de investigación en instituciones mexicanas liderados por reconocidas personalidades como Manuel Sandoval Vallarta (pionero en el área), Arnulfo Zepeda, Luis Villaseñor, Humberto Salazar, Óscar Martínez, Gustavo Medina, Karen Caballero, Lukas Nellen y José Váldez, por mencionar algunas de ellas. En México, la investigación sobre rayos cósmicos es un campo de estudio activo y en crecimiento.

México ha estado presente en proyectos internacionales de gran envergadura, por ejemplo, en el Observatorio Pierre Auger, en Argentina; el mayor detector de rayos cósmicos del mundo que busca entender el origen y naturaleza de los rayos cósmicos de ultra-alta energía. Esta colaboración le ha permitido a México estar en la vanguardia de la investigación científica global.

Y no sólo eso, este proyecto impulsó la colaboración y el interés en la industria mexicana por la ciencia básica, creando un modelo único para los detectores Cherenkov, necesarios para cubrir los 3 mil kilómetros cuadrados que componen el área de detección del observatorio. Alrededor de un tercio de los detectores fue provisto por la empresa mexicana Rotoplas.

“  
Los rayos cósmicos son como una lluvia de diminutas gotitas de materia que bañan a la Tierra.”

En el ámbito nacional, nuestro país cuenta con instalaciones propias dedicadas al estudio de los rayos cósmicos. Por ejemplo, el Observatorio de Rayos Gamma HAWC (*High-Altitude Water Cherenkov*) situado en Puebla, es un proyecto liderado por México, en colaboración con instituciones de Estados



Satellite TUS (Tracking Ultraviolet Setup).

mejorado la comprensión de cómo estas partículas interactúan con la atmósfera terrestre y de su potencial impacto en la ciencia del clima terrestre, el clima espacial y en la biología.

Muchos de los proyectos de investigación que se desarrollan en nuestro país involucran a estudiantes de licenciatura y posgrado, proporcionando una formación invaluable en ciencia experimental. Además, a menudo incluyen componentes de divulgación pública y educación, ayudando a incrementar el interés y la comprensión de la ciencia espacial y la física entre el público general y jóvenes estudiantes.

Un ejemplo claro es la creación del piano cósmico, por los doctores Guillermo Tejeda y Arturo Fernández, patentado y presentado en conferencias nacionales e internacionales para la sensibilización del público sobre el fascinante mundo de los rayos cósmicos.

Unidos y otros países. Con el observatorio HAWC se estudian los rayos cósmicos, especialmente los rayos gamma de alta energía, proporcionando datos esenciales para entender los procesos astrofísicos más energéticos del Universo.

Los cazadores de rayos cósmicos en México, no sólo se han quedado en detectores terrestres, sino que se han inspirado para perseguir las pistas de estas elusivas partículas en el espacio con satélites como Tatiana 2 (que fue lanzado en 2009), TUS (lanzado en 2016) y JEM-EUSO, así como con la creación del Laboratorio de Instrumentación Espacial de la UNAM.

Los investigadores mexicanos han hecho contribuciones importantes en el análisis de datos y en el desarrollo de modelos teóricos relacionados con los rayos cósmicos. Estos esfuerzos han

La investigación sobre rayos cósmicos que se realiza en México no sólo contribuye al entendimiento global de estos fenómenos, sino que también fortalece la capacidad científica del país en astrofísica y ciencias relacionadas. El trabajo de los científicos mexicanos en este campo es un ejemplo claro de cómo la colaboración internacional y el compromiso local pueden llevar a avances significativos en la comprensión de nuestro Universo. 🌌

Imagen del observatorio de rayos gamma HAWC (*High Altitude Water Cerenkov*), ubicado en Sierra Negra a 4,100 m de altitud. Está formado por 300 tanques (de 7.2m de diámetro x 5m de altura) llenos de agua, dentro de los cuales hay detectores de radiación gamma. En la cima se ve el GTM. Crédito de la imagen: Observatorio HAWC (J. Goodman, 2016).



## Glosario

**Muon:** Es como un hermano mayor del electrón; tiene carga negativa y es mucho más pesado, pero no vive mucho tiempo. Se encuentra en los rayos cósmicos y nos ayuda a comprender el Universo.

**Pion:** Partículas formadas de dos quarks que actúan como pegamento, ayudando a mantener unidos a los protones y neutrones. No viven mucho tiempo y son clave para entender las fuerzas que operan en el núcleo atómico.

**Neutrinos:** Partículas muy ligeras y casi invisibles que pasan a través de casi todo sin ser detectadas. Son muy comunes, vienen del Sol y de reacciones nucleares, y son esenciales para estudiar procesos astronómicos y nucleares.



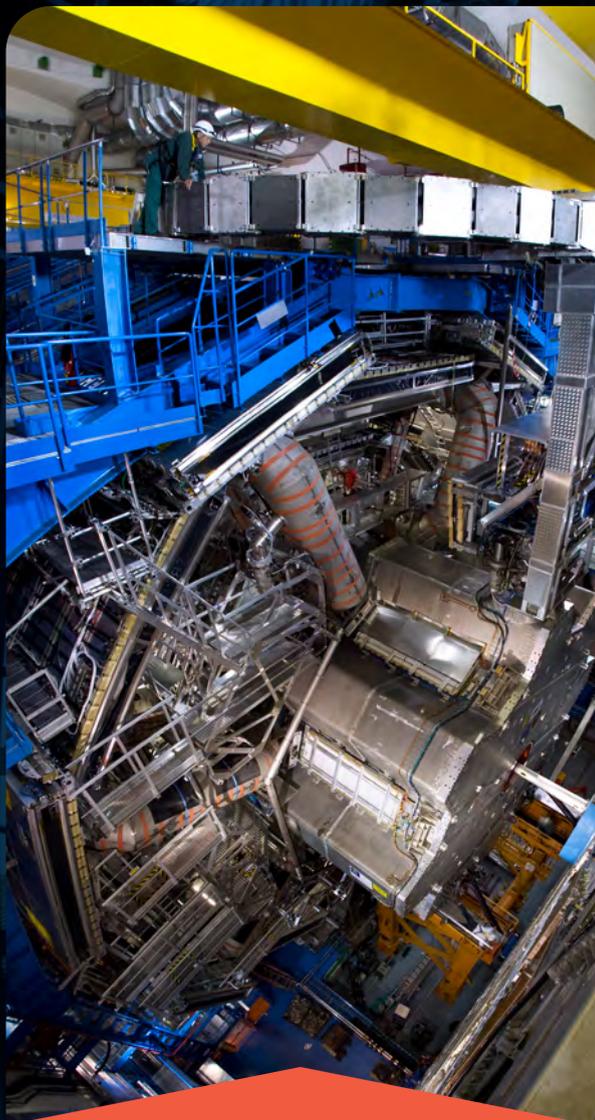
**Ofrecen pistas sobre los procesos de alta energía que ocurren en el Universo.**

# TRAS EL BOSÓN DE HIGGS

## De la teoría, a colisiones y cómputo distribuido

Luis Roberto Flores Castillo  
UNIVERSIDAD CHINA DE HONG KONG

✉ @LRFloresC



Detector de partículas ATLAS, Maximilien Brice, Claudia Marcelloni, © CERN.

¿Cómo se demuestra la existencia de un campo cuántico?  
¡Sacudiéndolo!

**E**l bosón de Higgs es un elemento crucial de la estructura del Modelo Estándar. Su predicción teórica surgió de la observación de que las *simetrías* de los objetos matemáticos con que describimos la naturaleza son *absurdamente* importantes. Por ejemplo, al extender una de las simetrías observadas en la descripción de los electrones (partículas de materia), somos forzados a introducir una partícula nueva que resulta ser el fotón (la partícula de luz, mediadora de la interacción electromagnética), con todas sus propiedades intrínsecas y las de su interacción con los electrones.

De igual forma, al preguntarnos qué sucede si extendemos la siguiente simetría posible (para quienes quieran buscar más información, su nombre es  $SU(2)$ ), es inevitable introducir tres partículas, que se convierten en las mediadoras de la interacción nuclear débil, y, al andar un escalón más y preguntarnos qué pasaría si hacemos lo mismo con la siguiente simetría, ( $SU(3)$ ) obtenemos ocho campos... que son, *exactamente*, los gluones.

Sin matemáticas es muy difícil capturar lo simple pero sorprendente de estas relaciones; es como si, tras años de trabajo para comprender la arquitectura de una ciudad, uno descubriera que basta *una sola regla* para traducir todo lo aprendido sobre esos edificios, iglesias y jardines; en conocimiento detallado acerca de las emociones, amoríos y aventuras de sus habitantes.

A principios de los años sesenta, esta maquinaria matemática permitía predicciones sorprendentemente precisas, pero había un gran problema: las simetrías que dan sustento a toda la estructura, sólo pueden existir en un Universo sin masa, lo cual definitivamente no es el caso del nuestro.

En 1964, varios investigadores (entre ellos Peter Higgs) descubrieron que el problema se resuelve introduciendo un nuevo objeto en nuestra descripción: el llamado “campo de Higgs” (un “campo cuántico” de los que menciona Lorenzo Díaz en su artículo<sup>1</sup>) que debe ser muy distinto

a los demás campos: por ejemplo, el estado base (o de mínima energía) del campo de electrones corresponde a un valor *cero*; por otro lado, para dar masa a las demás partículas en cualquier lugar (y tiempo) en que estas se encuentren, el campo de Higgs debe ser distinto de cero *en todo el universo*. Esto implica que no se trata simplemente de un garabato adicional a incluir en las ecuaciones, sino de un objeto que, de existir, abarcaría todo el espacio, desde el inicio hasta el final del tiempo, es decir, del objeto *más grande concebible* en el Universo.

En las ecuaciones en papel, esta solución al conflicto entre simetría y masa era simple y clara, pero (como decía H.L Mencken) para todo problema complejo hay una solución que es clara, simple... y *errónea*. La naturaleza bien podría haber usado otra forma, imaginable o no para nosotros —y tal vez mucho más económica— de acomodar las cosas; la única manera de determinar si habíamos dado con la solución correcta era buscar evidencia experimental de la existencia del campo de Higgs.

¿Cómo se demuestra la existencia de un campo cuántico? Sacudiéndolo con energía suficiente para generar la partícula correspondiente, en este caso, el *bosón de Higgs*. La importancia de su descubrimiento radica, pues, en que constituye la evidencia de que el campo de Higgs existe, y de que, por consiguiente, la descripción del origen de la masa es básicamente correcta.

Para conseguirlo fue necesario un acelerador de 27 km de circunferencia, el Gran Colisionador de Hadrones (LHC, por sus siglas en inglés), situado en la frontera entre Francia y Suiza, donde dos haces de protones se hacen circular en direcciones contrarias casi a la velocidad de la luz, para hacerlos chocar en el centro de grandes detectores de partículas. Explicar cómo es la tecnología necesaria para producir estas colisiones, y detectar las partículas producidas requeriría un número completo de *Obsidiana...* que vendrá pronto.

A la fecha, es imposible hacer chocar *un* protón contra otro; son demasiado pequeños como para hacerlos coincidir; en vez de eso, para conseguir

<sup>1</sup> *Matemáticas, simetrías y la física del bosón de Higgs*, página 8.

que haya choques entre protones preparamos “nubes” con una gran cantidad de protones, y son esas nubes las que se colisionan.

Cada nube contiene alrededor de *cien mil millones* de protones, y usando campos electromagnéticos obligamos a cada nube a tomar la forma de una aguja de unos diez centímetros de largo por 30 micras de diámetro (es decir, alrededor de un tercio del diámetro del cabello humano). El problema técnico es enorme, pues, siendo todos positivos, los protones dentro de cada nube ejercen (y reciben) una enorme fuerza de repulsión eléctrica que tiende a disgregar el grupo.

El número de protones en cada nube es similar al número de estrellas en nuestra galaxia. Imaginemos dos de estas nubes o galaxias, cada una con cien mil millones de objetos concentrados en un diámetro de 30 micras, chocando una contra otra. ¿Cuántos protones de cada nube crees que encuentran un protón de la nube contraria para chocar con él? ¿Millones? ¿Miles? En promedio, durante el periodo en el que se hizo el descubrimiento, sólo alrededor de *veinte*. La razón de que el número sea tan pequeño es precisamente que los protones son tan extremadamente diminutos que, pese a que 30 micras de diámetro nos parecen muy poco espacio, esos cien mil millones de protones ocupan una fracción muy pequeña del área correspondiente.

Una de las características más extrañas, y más sólidamente establecidas, de las reglas que rigen el mundo subatómico es su carácter probabilístico, por el que, aunque pudiéramos reproducir con toda exactitud las condiciones iniciales de un experimento, el resultado es incierto. Una consecuencia de esto es que, para detectar las partículas más inusuales (o las nunca antes vistas) es necesario producir una enorme cantidad de colisiones, pues sólo de esa manera podemos, primero, producir el objeto esperado y, segundo, medir su frecuencia de aparición (y sus propiedades).

Por ello, el número de colisiones se lleva al extremo permitido por la tecnología usada. En el caso del LHC, las nubes de protones se hacen chocar 40 millones de veces por segundo, y fue necesario utilizar los datos recabados durante un año de operaciones para obtener evidencia suficiente de que el catálogo de la naturaleza incluye al bosón de Higgs.

Por si lo anterior no fuera suficiente, hay una complicación adicional: la cantidad de datos generados. La velocidad de cada protón, que gracias a la archifamosa ecuación  $E=mc^2$  puede producir una partícula mucho más masiva que los protones originales (por ejemplo, el bosón de Higgs), también provoca que, en la gran mayoría de los casos, se produzcan cientos de partículas de masas menores. Cada partícula atraviesa una docena de detectores y deja, en cada uno, señales electrónicas.

Si consolidamos todo lo anterior (40 millones de cruces de nubes por segundo, 20 colisiones protón-protón por cada cruce, cientos de partículas por colisión, decenas de datos por partícula) resulta imposible guardar la información de todas las colisiones, por lo que se almacenan sólo las más interesantes. ¿Cuántas?

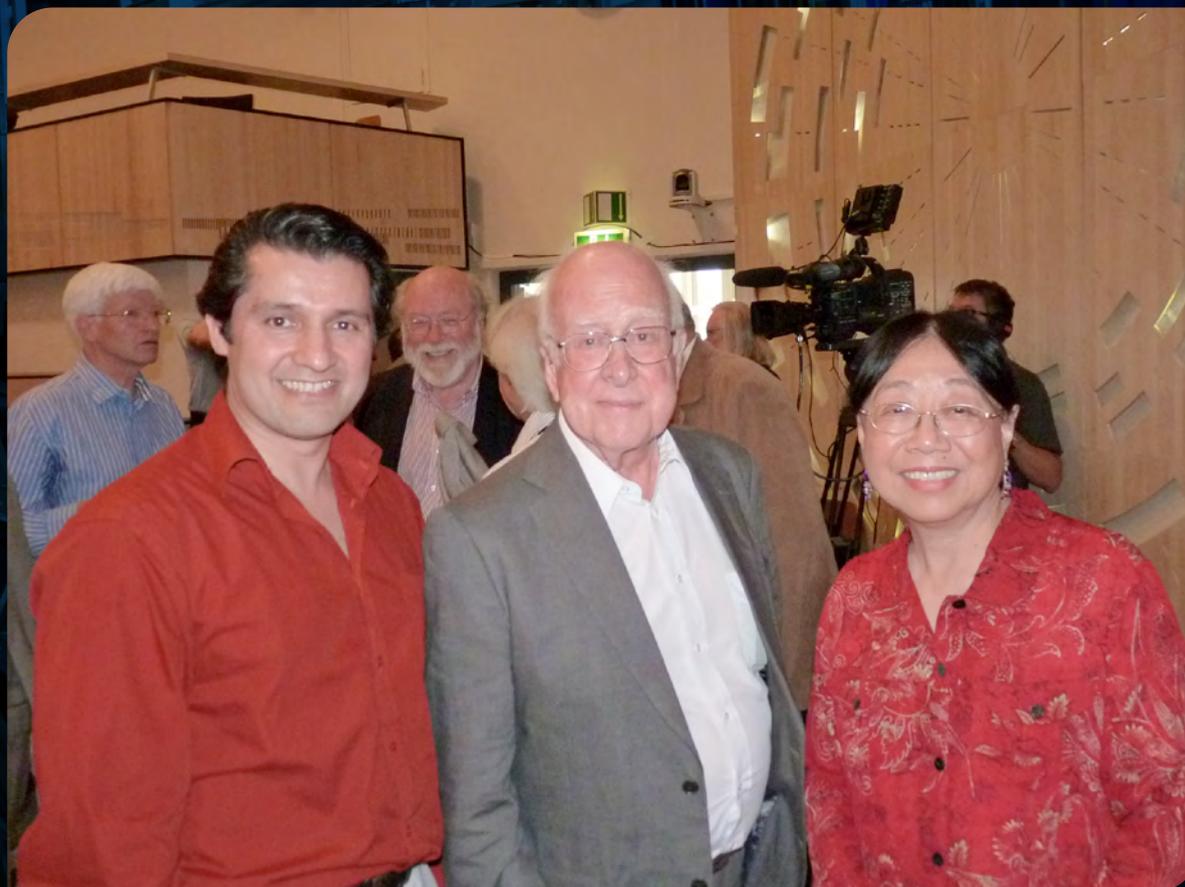
Aproximadamente una de cada *millón* de colisiones. Sin embargo, pese a este enorme factor de reducción, al momento del descubrimiento se habían almacenado unos 120 millones de gigabytes.

El análisis de esta cantidad de datos requiere sistemas especiales para que, en lugar de que los investigadores los copiamos en una computadora de nuestro propio instituto (pues difícilmente cabrían incluso en un centro de cómputo de tamaño mediano), lo que hacemos es enviar sólo el segmento mínimo indispensable de código a los centros de cómputo que almacenan los datos (unos 170 centros de cómputo distribuidos en 40 países, que sumaban alrededor de 250 mil procesadores al momento del descubrimiento). Estos “segmentos mínimos” se incorporan al *software* que descifra y procesa los datos (preinstalado en los centros de cómputo), y se ejecutan en paralelo en gran cantidad de procesadores, lo que permite completar el cálculo en cuestión de días o incluso de horas.

Con estas herramientas, y gracias al trabajo de miles de técnicos, ingenieros e investigadores en el LHC, los centros de cómputo distribuido y los detectores ATLAS y CMS, la búsqueda concluyó exitosamente con el anuncio, en 2012, del descubrimiento de aquella extraña partícula predicha medio siglo atrás.

En el siguiente artículo, Sau Lan Wu describe, entre otras cosas, la enorme satisfacción de ver culminada esta larga y extraordinaria aventura. ©

“  
El número de protones en cada nube es similar al número de estrellas en nuestra galaxia.”



El autor con Peter Higgs y con Sau Lan Wu en CERN, el 4 de julio de 2012 (día del anuncio del descubrimiento).



# MI HISTORIA DEL DESCUBRIMIENTO DEL BOSÓN DE HIGGS<sup>1</sup>

Sau Lan Wu

UNIVERSIDAD DE WISCONSIN-MADISON

## E

l descubrimiento del bosón de Higgs, anunciado el 4 de julio de 2012 en el CERN (Organización Europea para la Investigación Nuclear), fue el resultado de décadas de trabajo por parte de los ingeniosos físicos a cargo del Gran Colisionador de Hadrones (LHC) y de miles de físicos experimentales de los experimentos ATLAS y CMS, que construyeron y ahora operan los detectores.

También diseñaron y ahora gestionan un sistema informático que distribuye datos por todo el mundo, crearon novedosos *hardware* y *software* para identificar las colisiones más interesantes y escribieron los algoritmos que extraen los eventos más pertinentes de las grandes cantidades de datos registrados. Todos trabajaron febrilmente, contribuyendo enormemente al descubrimiento.

Lo que sigue es la historia de mi propia experiencia personal del descubrimiento. Otros grupos de investigación dentro de las colaboraciones ATLAS y CMS observaron el mismo resultado, con la misma emoción. También tienen historias de éxito que contar.

En 1974, como investigadora postdoctoral en el grupo de Samuel Ting, en el Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT, por sus siglas en inglés), participé en el descubrimiento de la partícula, que proporcionó la primera evidencia experimental del quark. Tres años después, como profesora asistente en la Universidad de Wisconsin-Madison, me uní a la colaboración TASSO en el Síncrotrón Alemán de Electrones (DESY). En 1979 lideré el esfuerzo para descubrir el gluón a través de eventos de tres *jets*. Esta fue la observación del primer bosón de gauge no abeliano de Yang-Mills.

Curiosamente, la publicación de 1974 sobre el descubrimiento de la partícula sólo tuvo 14 autores y el descubrimiento del gluón del grupo TASSO, en 1979, tuvo 88. En cambio, el artículo de 2012 sobre el descubrimiento del Higgs por la colaboración ATLAS tuvo 3 mil 172 autores. La dinámica de trabajo, el proceso de toma de decisiones y la asignación de créditos fueron considerablemente diferentes y proporcionalmente más complicados y difíciles.

En 1985, mi grupo experimental y yo tomamos la importante decisión de mudarnos de DESY a CERN, donde yo ya trabajaba con el experimento ALEPH. El traslado nos permitiría concentrarnos en la búsqueda experimental de la partícula de Higgs, que se propuso teóricamente pero aún no se había observado. Debo admitir que en ese momento no pensé que tomaría otros 27 años encontrarla. En 1993, mi grupo se convirtió en el primero de EE.UU. en unirse a la colaboración ATLAS en el LHC.

## La alegría

Permítanme comenzar mi historia del descubrimiento del Higgs citando el artículo *Chasing the Higgs* (en busca del Higgs), de Dennis Overbye en la edición del 5 de marzo de 2013 del *New York Times*:

Encontrar el bosón de Higgs fue el resultado de décadas de trabajo.

“La tarea de confirmar finalmente el descubrimiento del bosón había sido encomendada a otro par de estudiantes de posgrado, Haoshuang Ji, un estudiante de Wisconsin, y Aaron Armbruster de la Universidad de Michigan [...]. Ambos trabajaban para combinar todos los datos del Higgs de todas las maneras posibles en que podría desintegrarse y dejar un rastro en los detectores. [...]

“En la tarde del 25 de junio, el Sr. Ji anunció que había obtenido un resultado de 5.08 sigma, provocando vítores en el pasillo fuera de la oficina de la Dra. Wu; todos corrieron a firmar la impresión. Al día siguiente, el Sr. Armbruster llegó al mismo resultado. ATLAS estaba en 5-sigma.”

Esta fecha del 25 de junio de 2012 fue realmente emocionante. A las 3:00 pm hubo conmoción en el pasillo de Wisconsin en la planta baja del Edificio 32 del CERN. Mi estudiante Haichen Wang decía en voz alta: “¡Haoshuang va a anunciar el descubrimiento del Higgs!”. Nuestra primera reacción fue que era una broma; así que



Vista del detector de partículas ATLAS, construido en el Gran Colisionador de Hadrones. © 2011 CERN, Claudia Marcelloni.

<sup>1</sup> Traducido y adaptado de la edición de *Physics Today* conmemorando los 10 años del descubrimiento. <https://doi.org/10.1063/PT.6.4.20220630c>

cuando entramos en la oficina de Haoshuang, todos sonreíamos. Esas sonrisas se volvieron mucho más grandes cuando pudimos ver el resultado de la combinación de Haoshuang: mostraba el 5.08 sigma cerca de la masa del Higgs de 125 GeV/c<sup>2</sup>. Muy pronto, los vítores resonaron por el pasillo de Wisconsin.

¡ATLAS había hecho un descubrimiento! Alguien dijo: "¡Dios mío, esto es real!" Haichen grabó la emoción. Hicimos una copia grande del gráfico de la señal del Higgs, y todos los miembros de mi grupo la firmaron. Este documento firmado ahora se exhibe en la pared del pasillo de Wisconsin en el CERN.

En medio de los vítores, el historiador de la ciencia Michael Riordan me visitaba a mí y a mi grupo de Wisconsin. Estaba descansando en la oficina de mi postdoctorado Luis Flores Castillo en el pasillo de Wisconsin en el CERN y fue despertado por los gritos. Más tarde me escribió: "Nunca olvidaré despertar en tus oficinas del CERN de mi estupor inducido por el *jetlag* ante los gritos de alegría en la habitación de al lado".

Rolf Heuer, entonces director general del CERN, recibía informes constantes por separado sobre el progreso de las colaboraciones ATLAS y CMS. La planificación del anuncio se concretó en una semana. La idea original era hacer público el descubrimiento en Melbourne, Australia, el 4 de julio de 2012, el primer día de la Conferencia Internacional de Física de Altas Energías (ICHEP). Sin embargo, dado que los experimentos estaban ubicados en el CERN, se decidió anunciar el resultado desde Ginebra, así que se organizó un simposio especial en el auditorio del CERN la mañana del 4 de julio.

El día del anuncio, el auditorio del CERN estuvo cerrado hasta las 9:00 am. Físicos y estudiantes durmieron afuera del auditorio la noche anterior para asegurarse un lugar en el interior. Uno de mis estudiantes de posgrado me guardó un lugar y me llevó al auditorio. El portero me reconoció, y ambos entramos. Terminé sentándome no muy lejos de Peter Higgs.

## La celebración

Higgs, François Englert, Gerald Guralnik y Carl Hagen, cuyo trabajo teórico condujo al descubrimiento, entraron al auditorio entre una ovación de pie. Otro importante contribuyente a la teoría, Robert Brout, lamentablemente ya había fallecido.

Las colaboraciones ATLAS y CMS mostraron gráficas preliminares en el simposio especial del CERN. Las mismas figuras se mostraron en la conferencia ICHEP en Melbourne. Tanto ATLAS como CMS presentaron sus significancias finales, obtenidas combinando todos sus canales de desintegración, con ATLAS obteniendo 5 $\sigma$  y CMS 4.9 $\sigma$ .

Justo después de las presentaciones, Heuer declaró: "Creo que lo tenemos... Hemos encontrado la piedra

Sau Lan Wu es una física de partículas chino-estadounidense, reconocida por su liderazgo integral y participación en los descubrimientos del quark charm, el gluon y el bosón de Higgs. Pocos físicos en la historia han liderado, como ella, el descubrimiento de tres partículas elementales.

Es Profesora Distinguida Enrico Fermi de Física en la Universidad de Wisconsin-Madison y una experimentadora en el CERN. Existe un "planeta menor" nombrado en honor suyo.



angular que faltaba de la física de partículas. Hemos hecho un descubrimiento. Hemos observado una nueva partícula que es consistente con un bosón de Higgs".

Al final del simposio, fui a estrechar la mano a Peter Higgs. "Te he estado buscando durante más de 20 años", le dije. De hecho, me llevó 32 años, desde 1980 hasta 2012. Y siempre atesoraré su respuesta: "Ahora me has encontrado".

El descubrimiento del Higgs cautivó la imaginación de la prensa de todo el mundo. Peter Higgs apareció destacado en la portada del New York Times del 5 de marzo de 2013, junto con cuatro físicos de ATLAS y CMS. Fue un honor ser uno de ellos. Más tarde ese año, Englert y Higgs fueron galardonados con el Premio Nobel de Física.

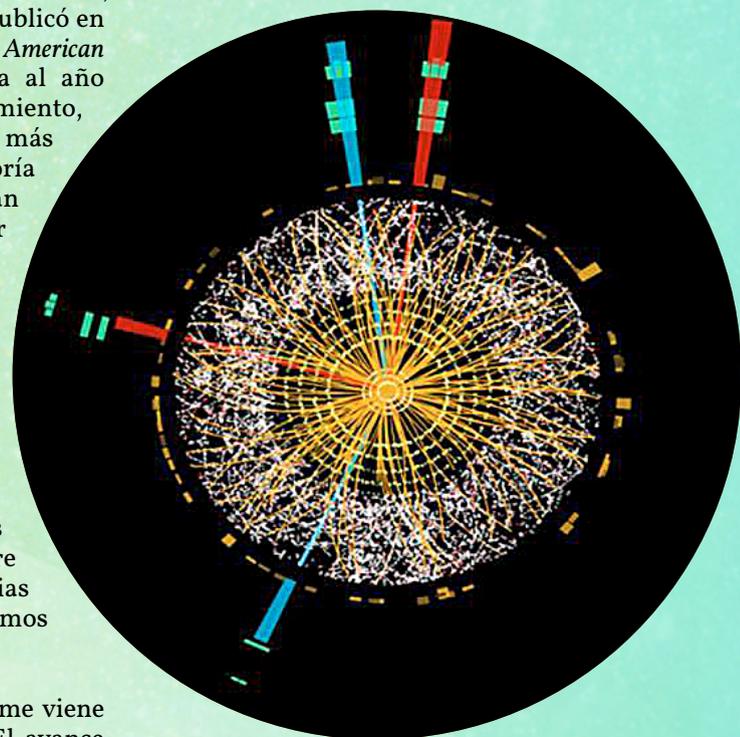
Con Riordan y el ex portavoz de CMS Guido Tonelli, escribí el artículo *El Higgs por fin*, que se publicó en el número de octubre de 2012 de *Scientific American* y en una edición especial de la revista al año siguiente. "Después de décadas de estancamiento, la disciplina está revitalizada una vez más por la embriagadora relación entre la teoría y el experimento", escribimos. "Abundan las preguntas que pueden encontrar respuestas a través de investigaciones adicionales sobre esta fascinante partícula o sus posibles compañeras".

Como es típico de cualquier descubrimiento importante, el descubrimiento experimental de la partícula de Higgs tendrá importantes consecuencias para nuestra comprensión de la física fundamental. Todos tenemos nuestras propias ideas sobre cuáles podrían ser las consecuencias más importantes, y ahora las estamos persiguiendo diligentemente.

Una gran pregunta que inmediatamente me viene a la mente es el problema de la masa. El avance generado por el descubrimiento del Higgs fue que las partículas elementales adquieren sus masas a través de la partícula de Higgs. Una pregunta más profunda

que necesita respuesta es cómo explicar los valores de las masas individuales de las partículas elementales. En mi opinión, este problema de la masa sigue siendo un tema importante a explorar en los años venideros. 

Fui a estrechar la mano a Peter Higgs. "Te he estado buscando durante más de 20 años", le dije.



Partículas producidas por una colisión de protones en la búsqueda del bosón de Higgs. ©CERN.



# VIVIMOS UNO DE LOS MEJORES MOMENTOS EN LA HISTORIA DE LA FÍSICA: MYRIAM MONDRAGÓN

Por Emiliano Cassani

**L**a ciencia mexicana está ávida de que, cada vez, más mujeres se sumen para derribar cualquier estereotipo que se interponga en el camino. “Los científicos están emocionados por el momento que vive la física en el mundo; pero los descubrimientos de la última época han marcado un hito en la historia, por lo cual todos deberíamos sentirnos maravillados. En esta era, los desarrollos tecnológicos han permitido un nivel de observación y experimentación en el que ya se comienza a estudiar física desconocida, con resultados insospechados. Existe tensión respecto a las observaciones acerca de cómo son, tanto la expansión acelerada del Universo, como la energía oscura y la materia oscura”, destacó en entrevista para *Obsidiana*, la doctora Myriam Mondragón Ceballos, jefa del departamento de Física Teórica en la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).

“Quién diría, por ejemplo, que con las ecuaciones de James Clerk Maxwell podríamos generar aplicaciones como un teléfono celular o un aparato para hacer tomografías. Me encantaría que todos los mexicanos y ciudadanos de otras latitudes pudieran dimensionar lo que significa ver la primera imagen de un agujero negro en el Universo, las ondas gravitacionales, o el bosón de Higgs.”, declaró la investigadora mexicana.

## Quehacer científico de la doctora Mondragón

“Trabajo en física teórica de partículas

elementales, entendidas como los bloques fundamentales que construyen todo (aún no sabemos si esas partículas también tienen una estructura dentro). Algunos datos (como la masa de los neutrinos) nos dicen, observacional y experimentalmente, que el Modelo Estándar no es la última palabra. Este fue formulado contemplando neutrinos sin masa, lo que nos hace saber que el modelo necesita un *parche* (dado que sí tienen masa, pero muy pequeña).

“De manera particular he trabajado en un modelo que ha resultado muy exitoso, el de las teorías finitas. Se ha comprobado experimentalmente con mucha precisión, sin embargo, nos deja muchas interrogantes. Sabemos que no es la teoría última de la naturaleza, pero quizás es el límite de bajas energías, de una teoría más fundamental”, detalló la doctora Mondragón, galardonada en 2021 con la Medalla de la División de Partículas y Campos, otorgada por la Sociedad Mexicana de Física.

Además, la doctora recibió en 2003 el premio a la investigación por la Academia Mexicana de Ciencias (AMC), y también fue reconocida por la editorial Elsevier como uno de los 10 físicos más citados de la UNAM en 2012 y 2013.

El artículo que comenzó toda su línea de investigación en teorías finitas, a la cual ha dedicado más estudio, es: *Finite unified models* (modelos unificados finitos). Las conclusiones de este artículo dieron origen a toda su investigación posterior sobre teorías finitas.

Un compendio del quehacer científico de la doctora Mondragón y sus colaboradores en el área se puede encontrar en el artículo: *Reduction of Couplings and its application in Particle Physics* (reducción de acoplamientos y su aplicación en física de partículas).

La reducción de acoplamientos se aplicó al Modelo Estándar y a sus posibles extensiones, adquiriendo verdadero interés físico e importancia fenomenológica. Y en el contexto de las teorías supersimétricas, se convirtió en la herramienta más poderosa conocida hoy en día.

## Derribar estereotipos en la ciencia

“Las chicas deben comprender que decidirse por una carrera científica les permitirá tener una buena vida. Pero necesitamos continuar derribando cualquier estereotipo, la ciencia mexicana está ávida de que cada vez se sumen más mujeres.

“Hay muchas mujeres que trabajan durante cuantiosas horas y, además, sacan adelante a sus familias y nadie las reconoce, es una gran injusticia. Yo decidí dedicar las mismas horas a algo que yo escogí, que me apasiona, bien remunerado, y con lo cual tengo la posibilidad de vivir mucho mejor. En esa situación soy privilegiada”, expresó la doctora Myriam Mondragón.

“**La inversión en ciencia es proporcional a la calidad de vida de las personas.**”



Primer plano de un detector de neutrinos para estudiar los neutrinos.

Mondragón Ceballos nos contó que se casó a los 28 años. Llegó a tener colegas a quienes sus tías les decían que no dijeran que eran físicas cuando conocían a cualquier posible pareja porque, muy seguramente, lo asustarían y se iría. Algo ridículo a los ojos de Mondragón, pero lamentablemente todavía sucede.

En contraste, señala que el departamento de Física Teórica de la UNAM es muy progresista en diversos aspectos, porque nunca ha sentido discriminación por ser mujer, además de que ha vivido en un ambiente muy receptivo que le ha permitido desarrollarse tanto como ha querido.

### Infraestructura científica en México

“A los 6 años, acababa de entrar a la primaria y tenía una fascinación enorme por el Sol. Me llevaron a un planetario y vi una rebanada del Sol a escala, me intrigaba muchísimo la distancia que había entre los planetas. Para mí fue totalmente abrumador entender el tamaño del Sol comparado con otros astros que componen el Sistema Solar. Recuerdo mi cara cuando, además, me di cuenta que el Sol no era lo más grande en el Universo, que existen millones de estrellas por galaxia y que puede haber más de 100 mil millones de galaxias en todo el Universo.

“Si no me equivoco, iba recorriendo el planetario con mi hermano que me sigue en edad, y estaba embelesada al darme cuenta que los seres humanos no seríamos ni siquiera un grano de arena comparados con el tamaño de algunos astros pero, sobre todo, me impresionó cómo es que los humanos habíamos podido observar y darnos cuenta que existían todas esas estrellas.

“Es primordial consolidar en México infraestructura para la divulgación de la ciencia. La ciencia ha avanzado demasiado y está muy alejada de la experiencia cotidiana; para una gran cantidad de la

población, la ciencia es percibida como magia porque no conocen cómo funcionan las cosas. Por eso es sumamente importante que nuestros niños, niñas y jóvenes se den cuenta de que la ciencia no es magia, y para ello necesitamos una buena infraestructura científica y de divulgación de la ciencia para las nuevas generaciones”, indicó la doctora Myriam Mondragón.

Por otra parte, compartió su experiencia en el Día de Puertas Abiertas del Instituto de Física de la UNAM, durante el cual, niños y niñas conocen el quehacer científico de los investigadores. La doctora Mondragón y sus colegas opinan que las mejores preguntas que les han hecho son las que realizan los niños, porque no sienten pena y tienen una intriga genuina por cómo funciona nuestro mundo y el Universo.

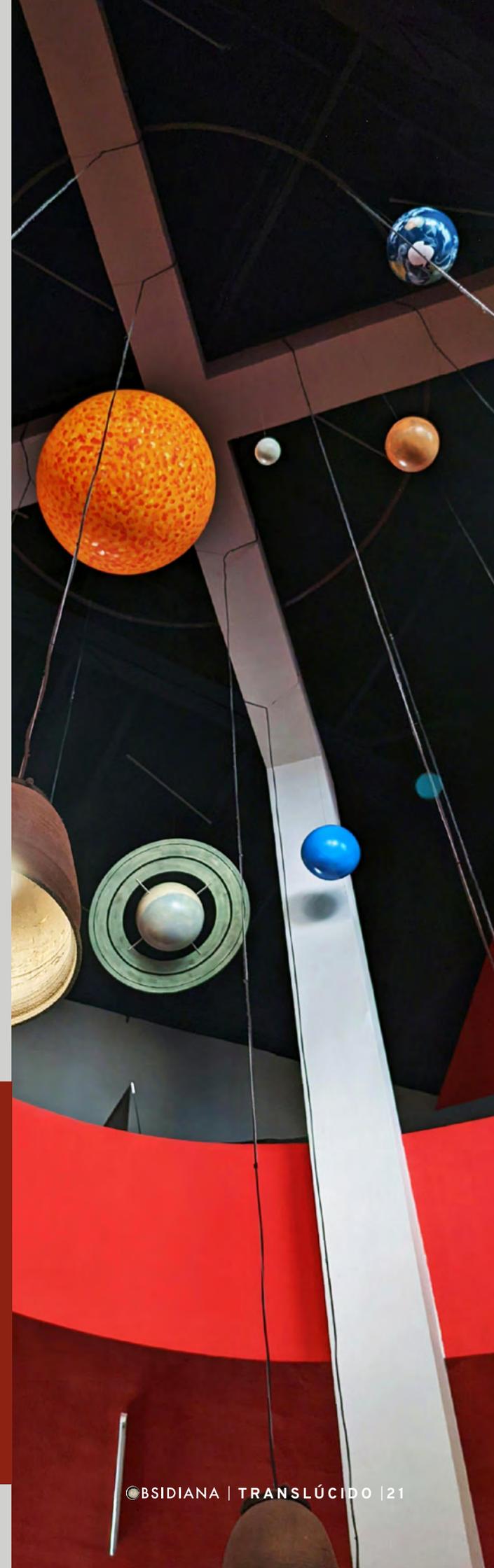
“Nuestro país invierte muy poco en ciencia. Yo se lo atribuyo a que no se ve como parte de la cultura, no hay conciencia de que la inversión en ciencia es proporcional a la calidad de vida de las personas. Necesitamos un país donde los científicos puedan desarrollar ciencia y un sector tecnológico capaz de desarrollar innovaciones, pues eso incrementa la calidad de vida. Además, debemos entrenar a las nuevas generaciones a partir de una buena colaboración internacional.

“Quienes toman las decisiones en este país, específicamente en el ámbito científico y tecnológico, deben comprender que es vital el apoyo e inversión adecuadas, y que la ciencia es una actividad en la que se debe colaborar internacionalmente, no se puede hacer únicamente de forma local.

“En general, los beneficios del quehacer científico se ven a largo plazo, y los países que invierten más y con visión a futuro son los primeros mundistas”, concluyó la doctora Myriam Mondragón Ceballos. 



“  
Necesitamos una  
buena infraestructura  
científica y de  
divulgación de la  
ciencia para las nuevas  
generaciones.



# REPRODUCIENDO GOTAS DEL UNIVERSO PRIMITIVO

Por Emiliano Cassani

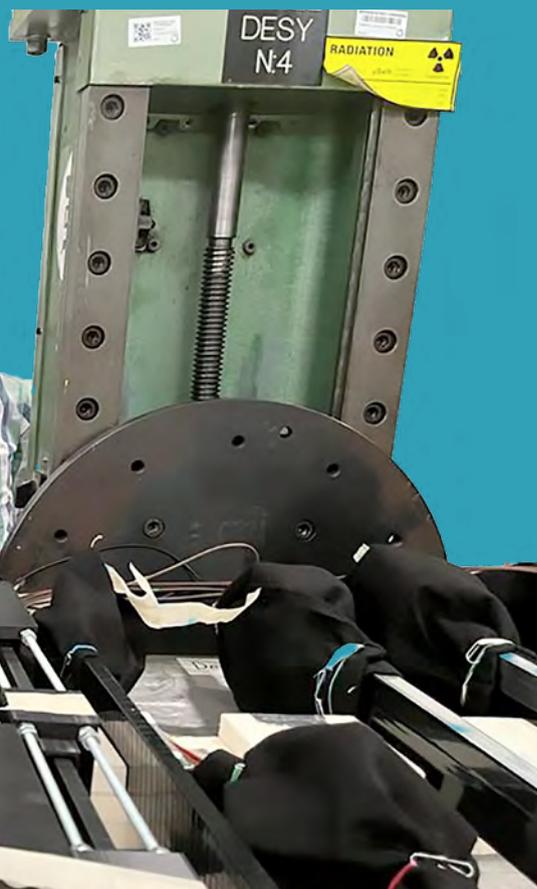
**M**i familia paterna proviene de San Vicente Coyotepec, en el estado de Puebla, y mis abuelos se dedicaban al campo. Cuando las cosas se pusieron difíciles, migraron a la capital, donde se encontraron con dificultades pero supieron salir adelante. Siempre me inculcaron el trabajo honesto y el hacer lo mejor posible en cualquier tarea que desempeñara”. El doctor Antonio Ortiz Velásquez, uno de los principales contribuyentes en varias direcciones del Experimento del Gran Colisionador de Iones (ALICE, por sus siglas en inglés), relata en entrevista para *Obsidiana* que él mismo, y su carrera profesional, son resultado de la influencia de maestros mexicanos de escuelas públicas, comprometidos con la formación de estudiantes interesados en el conocimiento científico.

“Fui a la escuela primaria pública Juan N. Méndez, en Puebla, donde tuve maestros con vocación docente excepcional y que tuvieron una gran repercusión en mí. De forma particular recuerdo a la profesora Sandra Luz León porque intentaba acercarnos a los avances científicos del momento; gracias a ella escuché por primera vez sobre la sopa de quarks y gluones. Incluso había ferias de ciencia en las que participaba. Fueron los inicios de lo que después sería mi carrera científica”, contó

uno de los físicos de partículas más destacados de nuestro país, miembro del Gran Colisionador de Hadrones (LHC).

La denominada sopa de quarks y gluones es resultado de lo que pasó inmediatamente después de la Gran Explosión que dio origen al Universo,

“  
**Antonio Ortiz  
coordina uno de los  
grupos de trabajo  
para planear la  
actualización del  
experimento ALICE.**



en la cual, material 20 veces más denso que un núcleo atómico y con una temperatura tan alta que superaría 250 mil veces la que se presenta en el centro del Sol, se transformó unos microsegundos después y, al enfriarse, ese estado de la materia desapareció, se “condensó” en protones y neutrones para luego formar estructuras más complejas.

Antonio estudió en la preparatoria Emiliano Zapata de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP), donde tuvo excelentes profesores que encaminaron su gusto hacia las ciencias naturales y exactas. Pero se adentró de lleno a la física de partículas elementales hasta que ingresó a la licenciatura de física aplicada en la BUAP. Desde el inicio de su carrera, los científicos mexicanos Arturo Fernández y Luis Villaseñor lo guiaron para involucrarse en un proyecto científico relacionado con el Gran Colisionador de Hadrones.

## La variable Sphericity

El maestro y doctor en ciencias físicas por la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) realizó una estancia posdoctoral en la Universidad de Lund, Suecia, donde se especializó en el estudio del plasma de quarks-gluones (QGP, por sus siglas en inglés) en colisiones de iones pesados.

“Me gusta proponer nuevas direcciones y explorar las anomalías que observamos en los datos. Una de las primeras preguntas que me formulé fue: ¿por qué había colisiones, no de iones pesados, sino de protones, en las cuales se producía un alto número de partículas (multiplicidad), y cuál era su origen? ALICE, el experimento donde trabajo, se enfoca en hacer estudios de colisiones de iones pesados, y tenemos evidencia de que en dichas colisiones se forma el plasma de quarks y gluones fuertemente interactuante al cual llamamos QGP, que es un estado temprano de nuestro Universo, después de la Gran Explosión o *Big Bang*. En colisiones de protones se han observado señales comúnmente atribuidas a la formación del QGP, y en la última década hemos tratado de entender su origen”.

**¡No te quedes con dudas! ¡Busca el glosario de este artículo en nuestro portal Web!**

Primer plano de un detector de neutrones para estudiar los neutrones.

En física de partículas se utiliza el término *jet* para referirse a chorros de hadrones, provenientes de la fragmentación de un quark o un gluón “rápido”, y es una consecuencia del confinamiento. El doctor Ortiz Velásquez demostró que, en las colisiones de protones de alta multiplicidad, hay una contribución importante de los fragmentos de *jets* que pueden afectar las mediciones. Sin embargo, se requiere aislar colisiones de protones lo más parecidas a las colisiones de iones pesados, es decir, que resulten de la fragmentación de múltiples quarks y gluones “más lentos”. Por ello impulsó el análisis que también considera la dependencia en la dureza de la colisión, desde finales de 2012, e introdujo el estudio de la variable Sphericity usando partículas de baja energía.

“Sphericity ha arrojado resultados muy positivos. La propuse por primera vez en un simposio a finales de 2012, en Puebla. A partir de entonces, muchos grupos la explotaron en ALICE y empezaron a medir otros observables en función de Sphericity; incluso otros experimentos en el LHC retomaron la idea en colisiones de protones. Es muy satisfactorio ver tesis doctorales en Europa y Asia que reportan mediciones usando Sphericity. Me convertí en un experto para clasificar las colisiones de protones, para aislar los posibles efectos del QGP; y noté que todavía había ciertos sesgos de selección”, compartió el doctor Antonio Ortiz, quien en 2018 se hizo acreedor al reconocimiento de la UNAM Distinción Universidad Nacional para Jóvenes Académicos, en el área de investigación en ciencias exactas.

## Flattenicity, poderosa herramienta

“Para estudiar el QGP en colisiones de protones debemos aislar colisiones que sean lo más parecidas a las de iones pesados. Propuse entonces, junto con estudiantes y colegas, que la forma del evento no solamente se midiera en el plano transversal, sino que también se considerara la información longitudinal; esto fue en el 2022 y lo nombré Flattenicity. Ahora iremos *más allá* al aislar colisiones frontales de protones.

“Los primeros resultados indican que Flattenicity luce como una herramienta muy poderosa para dar la palabra final en cuanto a observaciones de colisiones de protones. Ya hemos visto incremento de extrañeza y señales de flujo, pero no se ha observado *jet quenching*. Este fenómeno se debe a la interacción de un quark (o gluón) rápido con el QGP, originando efectos medibles en los *jets*. Espero que Flattenicity ayude a mejorar nuestra búsqueda de *jet quenching* en colisiones de protones”, puntualizó.

En física de alta energía, el enfriamiento de chorros o *jet quenching* es un fenómeno que puede ocurrir en



Imágenes: cortesía de Antonio Ortiz Velásquez.

“  
Hace falta inversión  
en educación básica  
para motivar a las  
nuevas generaciones  
a seguir una carrera  
científica.”

la colisión de iones pesados de energía ultra alta. Las colisiones de haces de iones pesados ultrarelativistas crean un medio caliente y denso, comparable a las condiciones del Universo primitivo, y luego los quarks o gluones rápidos interactúan fuertemente con el medio, lo que lleva a una marcada reducción de su energía que se denomina “enfriamiento de chorro”.

“Nosotros creamos un sistema en el cual la materia no se comporta como la conocemos: agarramos “montones” de protones y neutrones y los hacemos colisionar a velocidades ultrarelativistas; en el estado final tenemos quarks y gluones cuasi libres, estado que se asemeja mucho a nuestro Universo temprano, después del *Big Bang*, donde solo había quarks y gluones. La temperatura del Universo temprano era muy alta, el Universo se expandió, se enfrió, comenzaron a formarse los primeros hadrones, protones y neutrones, y justamente eso es lo que tratamos de reproducir en el laboratorio: gotas del Universo primitivo”, expuso el doctor Ortiz.

## Futuro de ALICE

Antonio Ortiz coordina uno de los grupos de trabajo encargados de la actualización del experimento ALICE para los periodos de toma de datos programados en los años 2035 (corrida 5 del LHC) y 2040 (corrida 6 del LHC). Se ha empezado a diseñar los detectores que operarán para responder a las preguntas que aún se mantienen abiertas.

“Para la corrida 5 del LHC se contará con un ALICE completamente nuevo, tendrá una cobertura cinco veces más grande que la actual. Me dieron la responsabilidad de coordinar el diseño del detector de muones y hacer las pruebas de prototipos iniciales; ese detector servirá para estudiar los candidatos a hadrones exóticos (con más de tres quarks constituyentes) en un ambiente único caracterizado por el desconfinamiento. Este esfuerzo involucra a varias instituciones mexicanas”, expresó el doctor, e hizo un llamado a la juventud para que se integre a proyectos de gran envergadura para el país.

“Considero que hace falta una gran inversión en educación básica; hay escuelas que no tienen las condiciones mínimas de operación, y eso difícilmente va a motivar a las nuevas generaciones a seguir una carrera científica. Debemos generar una estrategia nacional que permita identificar y acompañar a niñas y niños talentosos.

“En relación con la inversión en ciencia y tecnología, espero que en algún momento sea un tema prioritario de la agenda nacional; solo así podremos lograr nuestra independencia tecnológica”, concluyó.”



AMORFO



# INSPIRANDO A LOS INSPIRADORES<sup>1</sup>

## El poder del conocimiento de “frontera”

Jeff Wiener

RESPONSABLE DE PROGRAMAS PARA PROFESORES DEL CERN



# L

os programas nacionales e internacionales para maestros de la Organización Europea para la Investigación Nuclear (CERN) inspiran y empoderan a miles de maestros y, a través de ellos, a sus estudiantes.

"La razón por la que quiero hablarles hoy es porque yo mismo tuve un profesor de física muy bueno, por eso estoy aquí, en CERN. Así que gracias por la importante labor que todos ustedes están haciendo. ¡Realmente marcan la diferencia!". Este sentimiento sincero, que refleja la gratitud expresada a menudo por los científicos de CERN al dirigirse a maestros de preparatoria visitantes, encapsula la esencia de los programas para maestros de CERN.

En el último cuarto de siglo, los programas para maestros de CERN han desempeñado un papel vital en cerrar la brecha entre la física de partículas y educadores de todo el mundo. Lo que comenzó originalmente en 1998, cuando tuvo lugar el primer Programa Internacional para Maestros de Escuela Preparatoria, con un pequeño grupo de maestros, se ha convertido en una de las muchas historias de éxito de CERN.

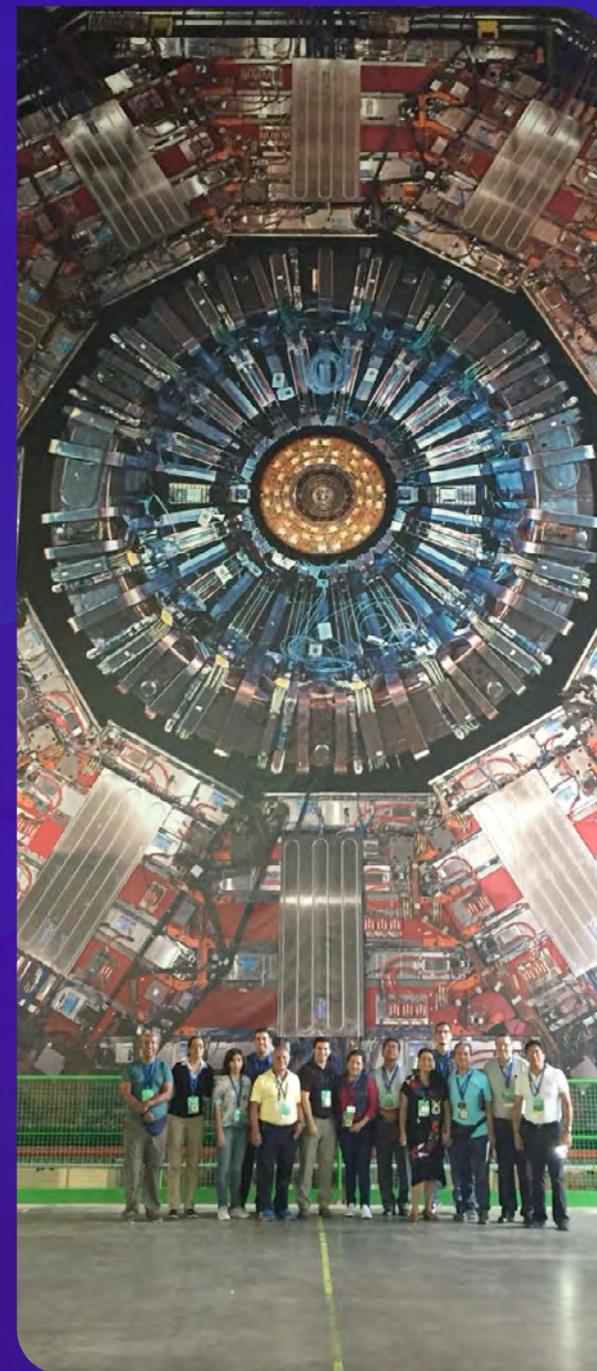
Hoy en día, los programas del CERN para maestros se llevan a cabo casi semanalmente, recibiendo

a unos 1,000 maestros de más de 60 países cada año, lo que los convierte en una de las ofertas de desarrollo profesional más grandes y exitosas para maestros de ciencias de preparatoria en servicio en todo el mundo.

La gran mayoría son programas de una semana, para maestros de un país o de un grupo de idiomas, dirigidos principalmente a profesores de los estados miembros de CERN, estados miembros asociados y, ocasionalmente, estados no miembros.

Además, dos programas internacionales para maestros tienen lugar cada año en verano, ampliando significativamente el alcance. Cada programa internacional dura dos semanas y recibe hasta 48 maestros de todo el mundo.

## Los programas para maestros de CERN han cerrado la brecha entre la física de partículas y educadores de todo el mundo.



Maestros mexicanos en las instalaciones del detector CMS del Gran Colisionador de Hadrones, durante su participación en el programa del CERN en Español.



Gran demanda. Participantes del Programa Internacional para Maestros de Preparatoria en CERN, en 2019. Crédito: J. Wiener

<sup>1</sup> Publicado originalmente en: <https://cerncourier.com/a/inspiring-the-inspirers>. 3 de noviembre de 2023.

Hasta ahora, alrededor de 14 mil 500 maestros de 106 países han participado en los programas nacionales e internacionales para maestros de CERN, y cada año otros 1,000 profesores viajan para asistir a conferencias, visitas en el lugar, talleres prácticos, discusiones y sesiones de preguntas y respuestas.

## Multifacético

Estos programas sirven para múltiples propósitos. En primer lugar, son programas de desarrollo profesional que permiten a los maestros de preparatoria mantenerse al día con los últimos desarrollos en física de partículas y áreas relacionadas, y experimentar un entorno de investigación internacional y dinámico. Como tales, responden al llamado de incorporar más ciencia moderna en el aula, lo que va de la mano con un cambio lento pero constante en el desarrollo del currículo (ver el artículo *Física de partículas en los currículos escolares*<sup>2</sup>).

En segundo lugar, son un reconocimiento del papel crucial que juegan los maestros en la preparación del futuro de la humanidad. Inspiran y empoderan a los maestros y, a través de ellos, a sus estudiantes.

Por último, pero no menos importante, los programas para maestros muestran la importancia de la diplomacia científica, coloquialmente conocida como un poder suave en el mundo de las relaciones internacionales. Por ejemplo, antes de unirse a CERN como estados miembros asociados, varios países trajeron maestros de preparatoria para programas nacionales; estos, a su vez, sirvieron para abrir las puertas en sus respectivos ministerios y respaldaron la solicitud del país para unirse a CERN. Lo mismo ocurre con países lejanos, con los cuales CERN no tiene otras conexiones más que los maestros que participaron en alguno de los programas internacionales.

## Alto impacto

Pero ¿cuál es el impacto de los programas para maestros de CERN? ¿Es posible medir la efectividad de una tal variedad de programas y realizar una evaluación que vaya más allá de documentar las opiniones de los maestros? Combinado con datos anecdóticos de maestros ex alumnos, que frecuentemente regresan a CERN con sus estudiantes o participan en otras actividades educativas como la competencia *Beamline for Schools* (BL4S), y el hecho de que los programas están muy sobre suscritos, la imagen general es clara: la satisfacción de los maestros con estos programas es extremadamente alta.

Para profundizar en el nivel de evaluación de los programas para maestros de CERN y permitir un mayor desarrollo en el futuro, en 2021 se realizó un estudio multi-stakeholder (entre los múltiples interesados) para documentar e ilustrar



“  
La dimensión más importante de estos programas es la social.”

los objetivos de los programas de desarrollo profesional en laboratorios de física de partículas.

Este estudio llevó a una lista jerárquica de los 10 objetivos de aprendizaje más importantes, como mejorar el conocimiento de los maestros sobre conceptos y modelos científicos, y mejorar su conocimiento de los planes de estudio, que ahora representan la línea base para futuras evaluaciones del aprendizaje de los maestros.

Aquí, actualmente está en curso un estudio a gran escala para evaluar su conocimiento en un entorno de pre-post, mediante el uso de mapas conceptuales. El objetivo de este enfoque no es sólo estudiar la progresión del aprendizaje a lo largo de un programa para maestros, sino también apoyarlos en la construcción de modelos mentales significativos y estructuras de conocimiento, que son indicadores clave de educadores exitosos.

De hecho, los programas de CERN para maestros continúan como un banco de pruebas principal de la Organización para los esfuerzos de investigación en educación en física, con un proyecto de investigación doctoral ya completado con éxito y otro en camino. Los futuros proyectos

de investigación tendrán como objetivo evaluar el uso del nuevo conocimiento y habilidades de los maestros después de su participación en los programas de CERN y, en consecuencia, los resultados del aprendizaje de sus estudiantes.

La dimensión más importante de estos programas, sin embargo, es la social. En los últimos 25 años, maestros de diferentes partes del mundo se han reunido en CERN, se han hecho amigos y han mantenido el contacto entre ellos. Esto ha dado lugar a varios proyectos Erasmus transfronterizos, eventos escolares combinados e, incluso, propuestas trinacionales para la competencia BL4S.

Hoy en día, los programas para maestros de CERN son más populares que nunca, con maestros de todo el mundo ansiosos por solicitar uno de los limitados lugares. Un participante del Programa Internacional para Maestros de Escuela Preparatoria de este año incluso tuvo que cambiar la fecha de su boda, que originalmente coincidía con las fechas del programa. Afortunadamente, su prometida entendió y no sólo aceptó la fecha pospuesta, sino que también sonrió cuando él se puso su casco de CERN para la foto de la boda. ©

<sup>2</sup> *Particle Physics in school curricula – CERN Courier*. (2023, 3 noviembre). CERN Courier. <https://cerncourier.com/a/particle-physics-in-school-curricula/>



INTRUSIÓN



# UN VIAJE INESPERADO AL MUNDO DE LA FÍSICA

Agnes Chavez

📷 @agneschavezprojects

📺 @AgnesChavezProjects

📍 @STEMartsLab

🌐 www.agneschavez.com

# A

l crear mis obras e instalaciones me inspiran continuamente preguntas profundas que definen nuestra existencia: ¿Quiénes somos como especie? ¿Cuáles son los componentes fundamentales de nuestro Universo? ¿Dónde encajamos en el Cosmos que nos rodea? En la intersección de la ciencia, el arte y las humanidades, exploro e interpreto estas preguntas.

## Combinar ciencia y arte en mi práctica

Mi formación profesional como artista me llevó a un viaje inesperado al mundo de la ciencia, especialmente la física. El momento crucial ocurrió en la escuela de arte, cuando conocí conceptos profundos como el espacio-tiempo, la teoría de la relatividad de Einstein y la ecuación  $E=mc^2$ . Aunque carecía de formación formal en física, estas ideas cautivaron profundamente mi imaginación.

El arte y la tecnología se convirtieron en un vehículo para comprender e interpretar visualmente estos intrincados conceptos científicos, mientras intentaba entender el Universo a través del lenguaje de la física.

Para explorar aún más este camino, en 2015 comencé a solicitar residencias para artistas en laboratorios científicos. Mi primera oportunidad llegó con una estancia de investigación en el Experimento ATLAS, en el CERN, bajo la dirección del físico Dr. Steven Goldfarb. Esta experiencia marcó un punto de inflexión en mi trayectoria. Regresé cada año al CERN y colaboré con diferentes físicos, incluido el Dr. Luis Flores Castillo. La primera instalación inspirada en la física, *Origination Point* (Punto de Origen), surgió de esta colaboración y fue invitada a la 12ª Bienal de La Habana en Cuba, donde el Dr. Luis Flores Castillo se unió al equipo para enseñar física a los estudiantes de secundaria que participaron en el proyecto. Además, como resultado formé el Colectivo *Projecting Particles* (Proyectando Partículas) con los artistas Markus



Space Messengers © Agnes Chavez.

Dorninger (OMAI) y Steve Tamayo (artista lakota) y, junto con los físicos, dirigimos talleres juveniles y presentamos instalaciones en festivales.

## Arte para ampliar nuestra identidad como ciudadanos planetarios

Mi pasión por la física me impulsa, y este año tuve el honor de ser galardonada con una residencia de artista en Fermilab. Durante esta residencia llevaré a cabo investigación y documentación a través de la plataforma del proyecto *Space Messengers* (mensajeros espaciales) y su exhibición itinerante. Así continúa mi trabajo con el mismo colectivo de artistas y físicos, sumando miembros de Fermilab y estudiantes de STEMarts a la colaboración.

*Space Messengers* es una instalación participativa de realidad mixta (MR) que visualiza reflexiones provocadoras sobre el Universo, alentando a los participantes a reflexionar sobre su papel en él. Sirve como una poderosa herramienta

para despertar la curiosidad científica y el pensamiento crítico, al mismo tiempo que evoca una sensación de asombro a través de la fusión del arte, la ciencia y la tecnología.

A través de esta residencia exploraré tecnologías de Realidad Extendida (XR), incluida la Realidad Aumentada (AR), para visualizar mi investigación sobre neutrinos. Me centro en ellos para adentrarme en el tema de la materia oscura y la astronomía de neutrinos.

## Herramientas para la educación y el aprendizaje

Disfruto compartiendo mi proceso creativo y mi viaje con los jóvenes estudiantes, para empoderarlos a encontrar su camino. Creo arte para inspirar y educar sobre los temas que me apasionan. Por lo tanto, desarrollar herramientas educativas para comunicar la ciencia a través del arte y la tecnología fue simplemente una extensión de mi práctica artística.

Siempre he sido tanto maestra como artista; el arte y la educación están profundamente interconectados para mí. Como artista Cubana-americana, cuando nació mi hijo, en 1994, me inspiré para crear un plan de estudios para maestros de primaria, al que llamé SUBE Enseña Español o Inglés como Segundo Idioma.

“  
Me gusta dialogar constantemente entre lo visible y lo invisible.”



Agnes Chavez es una artista interdisciplinar de nuevos medios y educadora. Su trabajo integra el arte, la ciencia y la tecnología como herramientas para inspirar la alfabetización artística, científica y humanística y concienciar sobre cuestiones humanitarias y ecológicas.

Explora la visualización de datos, la luz, el sonido y el espacio para crear instalaciones inmersivas y educativas que buscan el equilibrio entre mente y materia, ciencia y arte, naturaleza y tecnología.

Es fundadora de STEMarts Lab, que diseña y realiza instalaciones de ciencia-arte y programas STEAM para escuelas, museos, organizaciones de arte y ciencia y festivales; y fundadora de SUBE, programa para maestros de primaria diseñado para enseñar inglés y español a través del arte, la música y el juego. [www.sube.com](http://www.sube.com)

Space Messengers. Fotografía por Malu Tavares.

Por otro lado, fundar STEMarts Lab, organización sin fines de lucro, me ha permitido centrarme en la investigación y desarrollo interdisciplinario sobre la intersección del arte, la educación, la ciencia y la tecnología. Mi mayor satisfacción es que puedo trabajar con un equipo creativo e interdisciplinario para explorar las últimas tecnologías y las artes de nuevos medios, ampliando los límites y descubriendo nuevas estrategias que permitan inspirar y educar a las personas sobre el Universo a través de la mirada de la física y el arte.

## Colaborar con científicos del CERN

Fue un honor para mí ser comisionada por el Centro de Datos del CERN para colaborar con el doctor Johan Sebastian Bonilla y todo el equipo de físicos e ingenieros en el diseño de *Fluidic Data* (datos fluídicos), una instalación permanente de 13 metros de altura que abarca los cuatro niveles del pasillo de la escalera del Centro de Datos del CERN.

Utilizando la interacción del agua y la luz, esta instalación visualiza la magnitud y el flujo de información que proviene de los cuatro principales experimentos del LHC. Combina una serie de mangueras transparentes que contienen líquido coloreado, simbolizando los datos de cada experimento, con una colección de 54 cápsulas termoplásticas que representan las partículas esenciales de cada experimento.

Nuestro mayor desafío fue crear una instalación de arte a gran escala, hermosa y accesible para los visitantes, pero que también comunicara los conceptos de la física de una manera significativa para los físicos. La fusión orgánica de arte y ciencia crea un entorno meditativo, que permite a los visitantes tiempo para la reflexión y la curiosidad.



Fluidic Data. Fotografía de Ordan, Julien Marius © CERN.



© STEMarts Lab / Malu Tavares.



Fluidic Data. Fotografía de Ward, Emma © CERN.



 [www.pedrotrueba.com](http://www.pedrotrueba.com)

**P**ara mí, el arte puede ser sentimental, visceral y gestual. Conceptos como evolución, energía, transformación y movimiento son elementos torales en el conjunto de mi obra. ¿Mi objetivo? Identificar lo esencial de la naturaleza y pintar el alma de las cosas.

### **El arte y Pedro**

Utilizo el arte para enviar mensajes positivos por medio de colores, texturas, formas reales y formas intangibles. Mi intención primordial es anteponer la expresión a la perfección, para crear emociones y mover las del público que entra en contacto con mis obras.

Todo en mi pintura es evolución, parto de lo real y evoluciono a lo irreal, porque me gusta dialogar constantemente entre lo visible y lo invisible.

La conceptualización de una obra es un proceso mental que requiere mayor tiempo que el de realización, que es donde traduzco lo que observo y siento en el resultado final. Así, el objeto de arte se integra por el proceso pictórico y por la fuerza emocional del color en cada obra.

Mis pinturas son reflejo de mis pensamientos, sentimientos y movimientos. El público puede encontrar en ellas soluciones emocionales, racionales, de ilusiones, de creación mental y abstractas.

### **Arte y ciencia: dos formas de ver el mundo**

Sin duda, los artistas procesan la información y el conocimiento de forma distinta a los científicos; son más abiertos, menos motivados por el deseo de encontrar una respuesta o solución a la vida.

Mientras que la ciencia intenta comprender el mundo a partir de conocimiento acumulado, de forma objetiva y con resultados reproducibles, hechos demostrables y contrastados, las artes (escénicas, visuales y literarias) expresan el mundo a partir de experiencias personales, de la intuición, el movimiento y las metáforas.

Por ejemplo, la ciencia estudia y explica los sentimientos. El arte los transmite pero no exige una comprensión racional de ellos.

# RELACIÓN ARTE-CIENCIA, UNA VISIÓN PERSONAL

Pedro Trueba

@PedroTruebaZepeda

@Pedro Trueba Arte

@PedroTrueba

A pesar de sus diferencias, hay muchas conexiones. Ambas disciplinas exploran fenómenos y experiencias para entender la realidad y sus potencialidades utilizando modelos abstractos; valoran la observación cuidadosa de sus entornos para recopilar información a través de los sentidos; aprecian la creatividad; proponen introducir cambios, innovaciones o mejoras sobre lo que existe; y aspiran a crear obras de relevancia universal.

Una de las similitudes inherentes entre el arte, la ciencia y la tecnología es que se desarrollan por personas altamente creativas y visionarias, capaces de ir un paso por delante de donde está la sociedad.

Es fascinante ver a aquellos que trabajan en las artes, pues no son tan diferentes de los científicos en el sentido de que son muy observadores y analíticos.

Mucho de lo que se intenta hacer en la ciencia es percibir patrones que aún no han sido descubiertos, realidades debajo de nuestra visión superficial de las cosas, tratando de profundizar, con instrumentos a veces, otras con teoría. Y creo que algunos artistas también tratan de hacer algo así.

El arte y la ciencia juntos demuestran que ninguno de los dos es puramente empírico o intuitivo. De hecho, confían en ambos. ●



Energía descargada en la colisión de partículas A y B.



Líneas de frecuencia intervenidas.



## Un poco sobre Pedro

El artista plástico Pedro Trueba Zepeda nació en Minatitlán, Veracruz. Estudió en la Facultad de Arquitectura de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). En 2020, la Universidad de Xalapa le otorgó el grado de doctor *Honoris Causa*.

Ha participado en 100 exposiciones nacionales y 27 exposiciones internacionales (individuales y colectivas), ha desarrollado más de 400 proyectos de arte residencial y cerca de 100 proyectos de arte en arquitectura corporativa.

Por su trabajo ha recibido múltiples reconocimientos, entre los que destacan el premio ATIM TOP 60 *Masters in The Museum of Arts and Design* (Museo de Arte y Diseño) en Nueva York, por parte de la organización de artistas *Art Tour International* (2019); y el premio "El Personaje del año", por parte del *Círculo Internacional Periodístico* (2019).

En total ha creado más de 9 mil piezas artísticas, y su obra ha tenido una evolución plástica del realismo a lo abstracto.



# HALLAR EL CAMINO ENTRE LAS PARTÍCULAS: ISABEL PEDRAZA

**L**o que más disfruta de su trabajo es aprender. María Isabel Pedraza Morales es de Puebla y ama la física. A lo largo de su carrera ha realizado trabajo de investigación en tres de los más grandes experimentos de física de partículas y astropartículas en el mundo: el Observatorio Pierre Auger, en Argentina; ATLAS (Aparato Toroidal del LHC) y el Solenoide Compacto de Muones (CMS), en Ginebra Suiza. Pero, ¿cómo llegó ahí?

Cuando era niña, Isabel solía visitar el pueblo de su abuela, en Veracruz, donde había muy poca contaminación lumínica. El cielo nocturno se veía hermoso y, desde entonces, ella decía “quiero estudiar las estrellas”. Uno de sus tíos, que era físico, le explicó: “para estudiar las estrellas, primero tienes que estudiar física”.

En algún momento quiso ser astronauta, pero pronto comprendió que no era posible pues se marea con facilidad. Finalmente encontró su camino, la vida no la llevó a las estrellas, sino a las partículas.

Una vez que terminó su doctorado en física se percató que en ese campo del conocimiento hay

mucha gente calificada y pocas plazas. A pesar de ello, nunca encontró obstáculos para abrirse paso en lo que tanto le apasiona. La única barrera o desventaja grande, como mujer, es que ella trabaja con radiación (las partículas son radiación) y cuando estuvo embarazada, no podía ingresar a algunos laboratorios.

Otra de sus pasiones es la computación, así es que también tiene habilidades para desarrollar nuevas tecnologías que permiten la detección de muones y otras partículas.

Isabel considera que es importante abrir espacios de divulgación de la ciencia para niños, pues es estimulante para su natural curiosidad. Todos los descubrimientos científicos suceden porque alguien tiene curiosidad de saber; para que niños y jóvenes se motiven, deben contar con la información correcta en el momento adecuado sobre el quehacer científico.

Actualmente es profesora en el Centro Interdisciplinario de Investigación y Enseñanza de la Ciencia de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP) y líder adjunta del grupo de investigación de la BUAP en el CMS. Su principal área de investigación es la búsqueda de Higgses cargados

y materia oscura, así como el desarrollo de tecnologías para la detección de muones en el CMS, del Gran Colisionador de Hadrones (LHC) en el Laboratorio Europeo para la Investigación Nuclear (CERN).

Para fortuna de quienes no somos expertos en física de partículas, también hace divulgación científica y es mentora en los programas para estudiantes de verano de la Sociedad Mexicana de Física, del Programa Delfín, así como del programa Mujeres Líderes en STEAM del U.S.-Mexico Leaders Network para niñas de preparatoria.

A las personas jóvenes que tengan interés por dedicarse profesionalmente a la ciencia, Isabel Pedraza les recomienda que sean muy perseverantes y que aprendan a vivir con incertidumbre, “porque nunca terminas de saber todo. Si lo sabes todo, ¿qué vas a investigar?”.

**Contacta a Isabel Pedraza:**  
isabel.pedraza@correo.buap.mx

**Facebook:**  
www.facebook.com/  
isapedrazapage/



# ESTUDIAR LO MÁS PEQUEÑO, EL VIAJE DE IVONNE MALDONADO

**D**esde muy temprana edad supo que estamos hechos de partículas muy pequeñas, y lo interiorizó. Durante su niñez y adolescencia, Ivonne Alicia Maldonado Cervantes siempre tuvo contacto con información relacionada con ciencia y tecnología, y considera que sus profesores de ciencias hicieron un muy buen trabajo.

En tercer grado de secundaria leyó en su libro de texto acerca del espectro electromagnético, y le pareció increíble saber que la luz se compone de partículas, y que las ondas de radio, de microondas, la luz visible y los rayos X y gamma son lo mismo. Desde entonces se interesó por la física de partículas.

Pero lo que definitivamente le hizo elegir la física como carrera fue un artículo de la revista *Muy Interesante* (su papá la compraba muy seguido); allí hablaban acerca de la antimateria y de lo que se hacía en el CERN (Organización Europea para la Investigación Nuclear). Gracias a aquella lectura, Ivonne decidió que quería hacer ese tipo de trabajo, por lo que releó el artículo para saber cuál era la profesión de quienes laboraban ahí, y las opciones eran físico o ingeniero. Eligió la física, pues está orientada

a entender y estudiar a esas partículas tan extrañas que se formaban en el acelerador.

Ivonne es física por la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Se tituló de la maestría en ciencias físicas y del doctorado en el Instituto de Ciencias Nucleares de la UNAM, e hizo un posdoctorado en la Facultad de Física y Matemáticas de la Universidad Autónoma de Sinaloa.

Mientras estudiaba su doctorado, impartió clases de física en secundaria y bachillerato, donde colaboró en la organización de ferias de ciencias, así como de visitas con los estudiantes a diferentes laboratorios. En esa época pudo alentar la participación de las chicas en la ciencia. También ha impartido clases de estática y dinámica para la carrera de ingeniería.

Actualmente es investigadora en el Laboratorio Veksler y Baldin de Física de Altas Energías (*Veksler and Baldin Laboratory of High Energy Physics-VBLHP*) del Instituto Conjunto de Investigación Nuclear (*Joint Institute for Nuclear Research-JINR*), en Rusia.

Participa en la formación de recursos humanos, como parte del comité de tutores de dos estudiantes del posgrado en Ciencias Físicas de la UNAM, y es supervisora de proyecto en los programas INTEREST (*INTERNational REMote Student Training* o Formación internacional a distancia para estudiantes) y START (*STudent Advanced*

*Research Training* o Formación avanzada en investigación para estudiantes) del JINR.

Una de sus contribuciones más significativas al campo es el estudio de “la reconexión de color”, parte de lo que trabajó en su tesis de doctorado. Los físicos de altas energías, antes de construir aceleradores de partículas y sus respectivos detectores, deben simular lo que va a ocurrir cuando hagan colisionar un par de iones o protones. Para eso se generan programas computacionales llamados generadores de eventos MonteCarlo, entre los cuales está PYTHIA 8, el cual sirve para simular la colisión de protones (entre otras partículas) a muy altas energías, como las del Gran Colisionador de Hadrones (LHC, por sus siglas en inglés) y, de acuerdo con los cálculos de ciertas leyes físicas programadas en él, describe la evolución de las partículas que se crean después de la colisión.

Hay muchos generadores de eventos; algunos están más enfocados en el estudio de iones a bajas energías, como UrQMD, y otros en protones a altas energías, como las del LHC, que es el caso de PYTHIA 8. Aquí es donde entra la reconexión de color, uno de los mecanismos que se incluyen dentro de este programa computacional y que se usa para describir la interacción que se da entre los partones (los constituyentes de las partículas que se crean en la colisión).

A las niñas y jóvenes que tienen interés por la ciencia, o por la física en específico, Ivonne les aconseja que continúen cultivando su curiosidad; que lean, tanto libros de divulgación científica como novelas, aventuras, ciencia ficción, política, incluso religión, y también revistas; que visiten museos y exposiciones (varios museos que son gratuitos al menos un día del mes); y que participen en ferias de ciencias, ahí pueden conocer investigadores con proyectos a los cuales unirse. Lo más importante: “nunca dejen de seguir sus sueños, pues ni física, matemáticas, computación, química o biología son más difíciles que cualquier otra carrera. ¡Y pregunten! Siempre hay alguien dispuesto a explicar”.

Contacta a Ivonne Maldonado en:  
ivonne.alicia.maldonado@gmail.com





ESPEJO



# LA FÍSICA DE PARTÍCULAS EN NUESTRAS VIDAS

Viani Suhail Morales Guzmán  
INSTITUTO DE CIENCIAS NUCLEARES, UNAM

**I**magina un mundo tan pequeño que ni siquiera podemos verlo con los microscopios más potentes. Un mundo donde las leyes de la física que conocemos se difuminan y dan paso a fenómenos extraños y fascinantes. Este es el universo de la física de partículas, que estudia cuáles son los bloques fundamentales que nos construyen y cómo lo hacen. La física de partículas no se queda en los laboratorios y aceleradores, su impacto se extiende mucho más allá de los confines de los experimentos científicos.

Una de las áreas más beneficiadas por la física de partículas es la medicina. Alrededor del mundo se utilizan aceleradores que producen rayos X, protones, neutrones o iones pesados gracias a los cuales millones de personas reciben diagnósticos y tratamientos para mejorar su salud. Tal es el caso de la terapia de protones, un tratamiento de radiación altamente preciso para tumores. Los protones se separan de átomos de hidrógeno y se aceleran en un acelerador de partículas. En comparación con otros métodos, se enfoca más energía en el tumor, con menos radiación para el tejido sano. Se estima que los aceleradores médicos han tratado a más de 30 millones de personas.

Otra aplicación de la física de partículas es la tecnología utilizada en los escáneres de tomografía por emisión de positrones (PET), tecnología que se originó directamente a partir de detectores sensibles a la luz, diseñados inicialmente para

experimentos de física de partículas. Los escaneos PET sirven para medir la actividad metabólica de las células de los tejidos del cuerpo, y se usan principalmente para pacientes con condiciones del corazón o del cerebro y con cáncer. ¿Cómo funcionan? Se inyecta una pequeña cantidad de sustancia radiactiva al paciente, esta sustancia decae<sup>1</sup>, dando lugar a la formación de positrones; estos reaccionan con los electrones alrededor suyo y producen fotones que son detectados por las cámaras PET, las cuales son capaces de crear imágenes tridimensionales del área de interés en el cuerpo del paciente para inferir cómo están trabajando las células.

Existe un tipo de acelerador de partículas que ha cambiado nuestras vidas por completo. Me refiero a los maravillosos sincrotrones, que aceleran partículas cargadas en trayectorias circulares. Estos fueron

<sup>1</sup>Decaimiento radiactivo: proceso por el cual un núcleo atómico inestable pierde energía emitiendo radiación. Decaimiento radiactivo: proceso por el cual un núcleo atómico inestable pierde energía emitiendo radiación.

construidos inicialmente para estudiar colisiones entre partículas; sin embargo, los investigadores notaron que producían radiación con propiedades únicas, conocida como *luz sincrotrón*, que se usa para iluminar objetos, observar cómo interactúan con esta luz y, con base en esto, obtener conclusiones muy detalladas acerca de sus propiedades.

“  
El universo de lo diminuto tiene un impacto gigante en nuestra existencia.”

Los sincrotrones tienen mención honorífica entre las grandes máquinas que han cambiado el mundo: avances como los microprocesadores de computadoras y teléfonos inteligentes, tecnologías de energía limpia y medicamentos innovadores son solo algunos ejemplos de los logros que estas máquinas han impulsado. Gracias a la investigación en sincrotrones, se observó la estructura del virus del COVID-19 y, con ello, se generaron las vacunas que tantas vidas han salvado.

Otro de los descubrimientos trascendentales estudiados con luz sincrotrón es la magnetorresistencia gigante (MRG). Imagina un cambio tan pequeño que casi ni se nota, pero que tiene un poder enorme. Así funciona la MRG, un fenómeno donde la resistencia eléctrica de un material cambia drásticamente en presencia de un campo magnético. Si bien la MRG se utiliza principalmente en sensores de campo magnético para discos duros y computadoras, su alcance es mucho más amplio: desde aplicaciones en la industria aeroespacial y automotriz, pruebas no destructivas de materiales, la brújula en teléfonos móviles hasta técnicas biomédicas. El mundo tecnológico moderno tal como lo conocemos no sería posible sin el descubrimiento de la magnetorresistencia gigante.

La física de partículas, ese campo de estudio que parece tan alejado de lo cotidiano, es en realidad una fuente inagotable de avances que transforman nuestra vida diaria. Desde las comunicaciones que nos permiten estar conectados con el mundo, hasta las herramientas médicas que salvan vidas, la física de partículas tiene un impacto directo y tangible en la sociedad. En pocas palabras, el universo de lo diminuto tiene un impacto gigante en nuestra existencia. ●



Sincrotrón ALBA (España).



# ¿DE QUÉ ESTÁ HECHO EL UNIVERSO?

El bosón de Higgs cambió para siempre nuestra comprensión sobre la composición de la materia y el Universo. Pero, ¿qué es? Descúbrelo en menos de cinco minutos, con peras y manzanas, en este video de la BBC:



## ¡BOSÓN, DATE UN VOLTIO CON JAVIER SANTAOLALLA!

La física puede ser compleja cuando no eres experto en el tema. Pero ten calma, que el canal de Javier Santaolalla es el indicado para motivarte a seguir conociendo sobre este tema.

Javi es un físico graduado de la Universidad Complutense de Madrid, y tiene muchos años en el campo de la divulgación científica: realiza comedia (stand up) basada en la ciencia, hace divulgación escrita y también contenido genial para redes sociales. Su canal de YouTube es de los más completos. Santaolalla explica términos físicos con un lenguaje cotidiano; combina su humor con

sucesos actuales y da ejemplos del tema que está exponiendo, por lo que ver sus videos resulta interesante y muy divertido.

Su carisma es un factor que, sin duda, atrapa. La manera en que logra conectar con las audiencias a través de la pantalla es increíble, pues pareciera que está hablándote en persona, además siempre hace un pequeño paréntesis para especificar el significado de las palabras; de esta forma se comprenden mejor. ¿Qué esperas para seguirlo?

ⓧ @JaSantaolalla    @jasantaolalla

Date un Voltio  
(canal principal):



Date un Vlog  
(canal secundario):



Facebook  
Date un Voltio:



Neutralina  
(canal de Youtube):



## NEUTRALINA

Un neutralino es la partícula hipotética más importante de la teoría de supersimetría. Así de relevante fue el motor de Lucía Coll para estudiar arduamente y alcanzar su meta: participar en algún gran experimento de física de partículas. Ahora su sueño es una realidad.

Se graduó de la Pontificia Universidad Católica del Perú, y actualmente realiza un doctorado en Alemania en el laboratorio DESY (Sincrotrón Alemán de Electrones, el mayor centro de investigación alemán de física de partículas). Para nuestra fortuna, desde hace tres años hace divulgación científica en YouTube, Instagram y TikTok.

En su canal Neutralina, Lucía te acerca a la física explicando conceptos en tan solo un minuto de video, y lo hace con detalle y



complementando con fantásticas imágenes. También te hace parte de su día a día; puedes verla desempeñando su profesión y explicando qué hace en los laboratorios. Impregna en cada video su pasión y amor por la física.

Lucía Coll es, sin duda, una inspiración para no dejar de lado la ilusión por cumplir las metas que tenemos. Si eres de los que prefieren los contenidos en formato breve, Neutralina es el perfil ideal para ti. Síguela en:

ⓧ @neutralina\_lu    @neutralina.lu

No te pierdas los libros de Javier Santaolalla:



Inteligencia Física:  
Aprender a ver el mundo con la mente de un físico  
Plataforma Editorial



El bosón de Higgs no te va a hacer la cama: La física como nunca te la han contado  
La Esfera de los Libros



¿Qué hace un bosón como tú en un Big Bang como este? Orgías cósmicas, polvo de estrellas y otras locuras cuánticas  
Océano

[www.obsidianadigital.mx](http://www.obsidianadigital.mx)

 @Obsidianamx  @obsidiana\_mex  @obsidiana\_mex