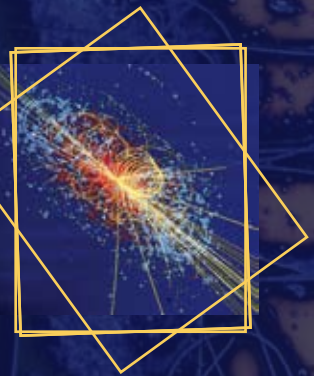


La receta

CÓSMICA

Alberto Güijosa



¿De qué está hecho el Universo? Al tratar de responder esta pregunta nos hemos llevado ya grandes sorpresas, y podemos esperar muchas más.

Para preparar un tipo de pan específico se necesitan siempre los mismos ingredientes básicos, combinados de la misma manera. Éste es un ejemplo de las muchas relaciones predecibles que encontramos a nuestro alrededor: el Universo, en todos sus niveles, está repleto de patrones que se repiten. Durante siglos los seres humanos hemos buscado comprender estos patrones, y como resultado, hemos logrado vislumbrar la receta para hornear no solamente un pan, ¡sino el Universo entero!

Ladrillos básicos

Si tomas un objeto cualquiera y lo miras con un microscopio suficientemente potente, verás que está hecho de bloques muy pequeños, que llamamos átomos. Cada átomo está formado a su vez por un núcleo y electrones que se mueven a su alrededor. El núcleo está compuesto de protones y neutrones. Y hace 40 años descubrimos un paso más en este juego de muñecas rusas que nos presenta la naturaleza: dentro de los neutrones y protones hay componentes todavía más pequeños, que llamamos *quarks*. Se trata, de hecho, de dos tipos de objetos distintos que, por pura diversión, bautizamos como quarks *arriba* y quarks *abajo*.

Hasta donde sabemos, los quarks arriba, los quarks abajo y los electrones no están compuestos de partes más pequeñas. Por eso decimos que son partículas *elementales* o *fundamentales* (como también lo son otros bichos más exóticos que mencionaremos más adelante). No pierdas de vista lo sorprendente que es esto: todos los objetos en el Universo —papel, vidrio, agua, mármol, mariposas, tornillos, aguacates, aire, estrellas, personas, hongos zamoranos y billones más— están hechos de combinaciones de los mismos tres componentes básicos. La diferencia entre un objeto y otro no es la naturaleza de sus ingredientes fundamentales, sino la manera en que están ensamblados, o, en una analogía más adecuada, la danza colectiva que ejecutan.

Choques fantásticos

Las partículas elementales son increíblemente diminutas. Paradójicamente, para estudiarlas necesitamos las máquinas más gigantescas que ha construido la humanidad: los llamados aceleradores de partículas. El más grande y potente de todos es

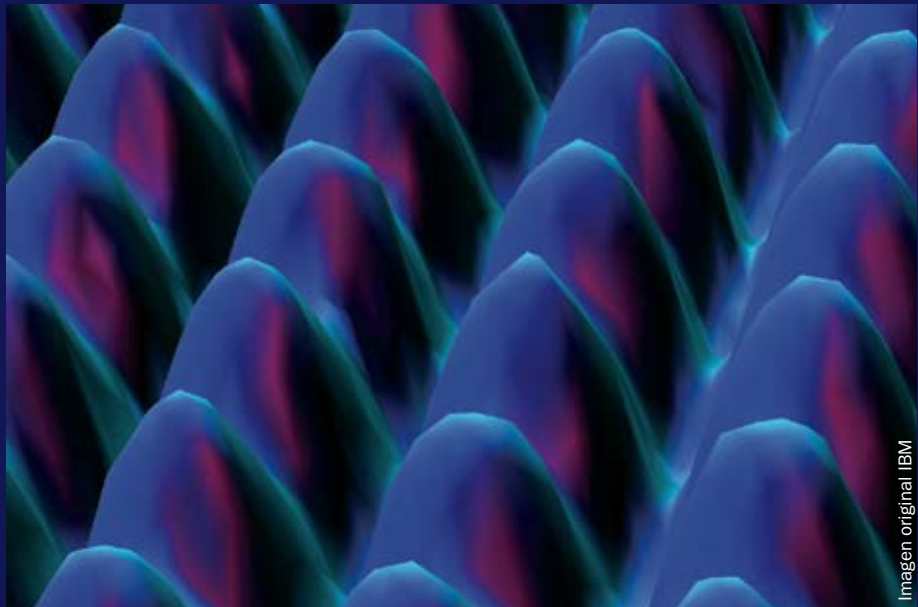


Imagen real (en falso color) de átomos individuales de níquel, tomada por un microscopio de efecto túnel.

el Gran Colisionador de Hadrones (LHC, por sus siglas en inglés) ubicado en la frontera entre Francia y Suiza (ver “El Gran Colisionador de Hadrones”, *¿Cómo ves?*, No. 114). En estas máquinas aceleramos partículas (normalmente electrones o protones) utilizando poderosas fuerzas eléctricas y magnéticas hasta que alcanzan velocidades muy cercanas a la de la luz

(casi 300 000 kilómetros por segundo), y luego las arrojamos unas contra otras, esperando que choquen, justo como los niños hacen chocar cochecitos para ver qué sucede.

Utilizando sofisticados detectores podemos analizar los resultados de cada choque. Lo que encontramos son decenas de partículas de distintos tipos que se alejan del punto de impacto. Parecería que hemos logrado partir las partículas originales en pedacitos, tal como si fueran cochecitos que al estrellarse se hacen añicos. Pero entre los productos finales de algunas colisiones podemos encontrar muchas partículas idénticas a las dos originales, algo imposible de explicar pensando en cochecitos que se rompen. Por ésta y otras razones, nos vemos obligados a concluir que las partículas finales que observamos en nuestros detectores fueron *creadas* al momento de la colisión y no existían antes de ella. Sí, leíste bien: ¡los ladrillos básicos del Universo pueden aparecer y desaparecer!

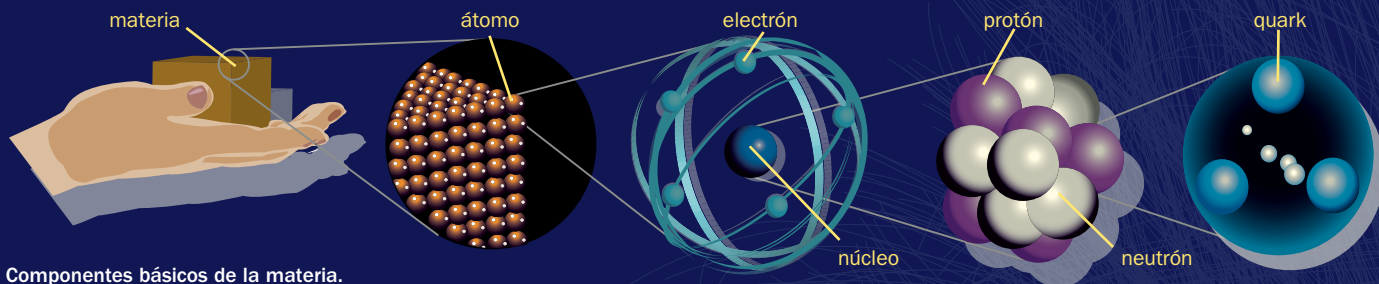
PARTICULITITITITITITITAS

Los átomos miden alrededor de una diezmillonésima de milímetro. Esto significa que, en el grosor de una hoja de papel, caben alrededor de un millón de átomos. La proporción de tamaños dentro del átomo es también muy curiosa: si el átomo fuera del tamaño del estadio Azteca, el núcleo sería del tamaño de un limón y los electrones serían menos que motas de polvo flotando a su alrededor. Los átomos son entonces casi puro espacio vacío, así que no te ofendas la próxima vez que te digan cabeza hueca.

Hasta ahora no hemos detectado que los electrones y quarks tengan un tamaño medible, por lo que deben ser más chicos que las distancias más pequeñas que hemos explorado: miden menos de una milbillonésima de milímetro. En otras palabras, aún si los átomos fueran del tamaño de la Tierra, ¡las partículas fundamentales serían, a lo más, tan grandes como una manzana!

Magia bajo contrato

Para descifrar la receta cósmica se requieren ideas muy extrañas, que van perversamente en contra del sentido común (ver “El Gato de Schrödinger”, *¿Cómo ves?*, No. 8). Por ejemplo, una partícula puede estar, como una canica, en un lugar específico; pero en cierto sentido, ¡también puede estar en varios sitios a la vez!



Componentes básicos de la materia.

Esto, que parece absurdo, resulta crucial para entender por qué la materia, hecha de átomos que son principalmente espacio vacío, nos parece sólida: los minúsculos electrones son capaces de ocupar todo el volumen del átomo del que forman parte.

Si bien las partículas pueden realizar estos espectaculares actos de magia, no lo hacen completamente a su antojo. Las criaturas del fantástico circo microscópico siempre trabajan sujetas a un contrato: se les permite aparecer, desaparecer y hacer algunos otros trucos asombrosos, pero a condición de que cumplan con ciertas reglas mínimas de decencia. Deben, por ejemplo, asegurarse de que la cantidad total de energía no cambie. Por eso en nuestras máquinas aceleramos las partículas iniciales tanto como podemos, para que la enorme energía de movimiento que alcanzan quede disponible para crear partículas (que por el sólo hecho de tener masa poseen energía, como revela la famosa fórmula de Einstein, $E=mc^2$).

El contrato incluye otras cláusulas similares. Por ejemplo, cada partícula

tiene asignado un número llamado *carga eléctrica*, que nos dice qué tanto siente las fuerzas eléctricas, y en cualquier proceso la suma de las cargas eléctricas de todas las partículas debe permanecer constante. Felizmente, la existencia del contrato te permite leer este artículo sin preocuparte de que los electrones y quarks que forman tu cuerpo vayan a desaparecer repentinamente, ya que no podrían hacerlo sin violar alguna de las cláusulas.

Más ladrillos básicos

En nuestros experimentos hemos descubierto que existen otras partículas elementales más exóticas, que sí tienen permitido desaparecer súbitamente incluso cuando están aisladas o quietas. Un ejemplo es el *muón*, que es básicamente una copia pirata del electrón: ambos tienen las mismas propiedades, pero el muón es 200 veces más pesado y mucho menos duradero. El muón tiene el curioso hábito de desaparecer después de unas dos milonésimas de segundo, dejando en su lugar otras tres partículas elementales: su versión original y liviana, el electrón, y otras

dos partículas aún más ligeras, que llamamos *neutrinos*.

Esto explica por qué los muones, a pesar de ser partículas elementales, no sirven para formar coches, árboles ni personas: ¡serían coches, árboles y personas muy poco duraderos! Y sin embargo, sabemos que los muones y otras partículas pirata figuran en la receta cósmica, porque podemos, por ejemplo, crearlos en nuestros aceleradores. De hecho, cada segundo atraviesan tu cuerpo alrededor de 30 muones, creados por choques en la parte superior de la atmósfera entre núcleos de los átomos del aire y partículas (principalmente protones) que bombardean constantemente la Tierra desde el espacio, denominadas *rayos cósmicos*.

Además del muón, mencionamos arriba a otro misterioso personaje: el neutrino (ver “A la caza del neutrino”, *¿Cómo ves?*, No. 74). Los neutrinos, como los ingredientes de los átomos, son partículas duraderas. Aunque no lo notamos, en todo momento estamos inmersos en un verdadero océano de neutrinos: hay 300 millones de ellos en cada metro cúbico del Universo. A pesar de su sorprendente habilidad para pasar inadvertidos, los neutrinos participan en algunos de los procesos que hacen brillar el Sol, así como en las explosiones de estrellas moribundas conocidas como supernovas.

Otra predicción peculiar de nuestras teorías, ampliamente confirmada por los experimentos, es que cada partícula tiene una especie de gemelo, conocido como su *antipartícula*, que es simplemente una segunda partícula con propiedades idénticas, pero con carga eléctrica del signo opuesto. Existe, por ejemplo, el *antielectrón*, también llamado *positrón*, que tiene la misma masa que el electrón pero carga eléctrica positiva. Las antipartículas sueñan a ciencia ficción, pero son tan reales que se utilizan en la técnica para obtener

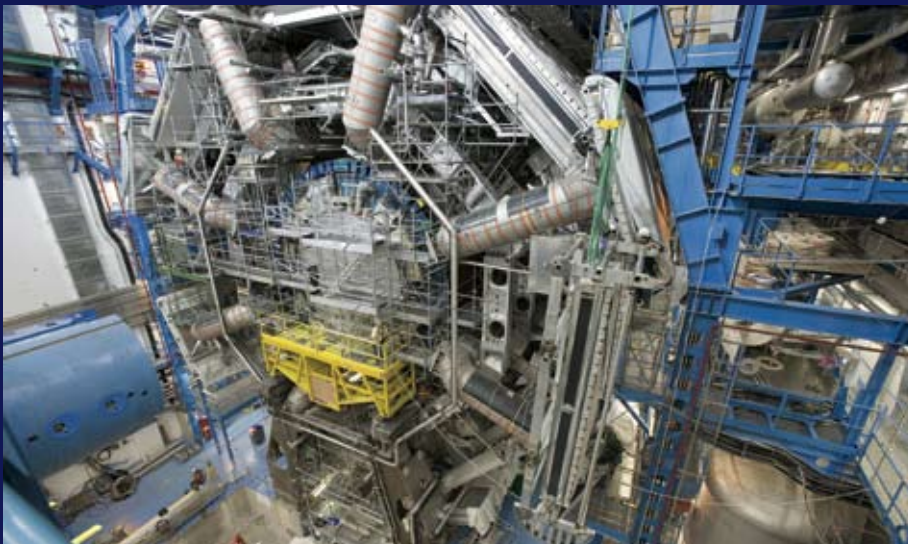


Foto: © CERN

Detector de partículas ATLAS, en el acelerador LHC. Mide 25 metros de altura por 44 de largo, y pesa 7000 toneladas.

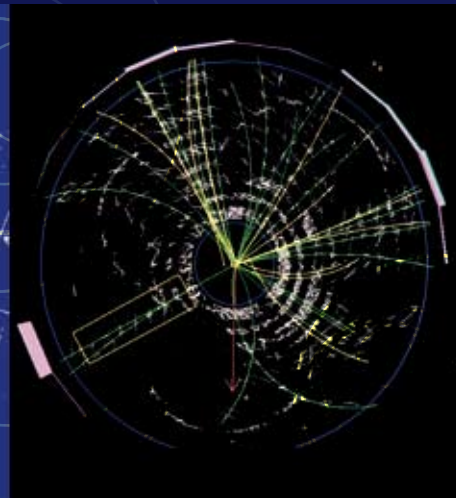
imágenes del interior del cuerpo humano, conocida como tomografía por emisión de positrones (PET).

Al juntar un electrón con un antielectrón la carga total de la pareja es igual a cero, y esto permite la desaparición o aparición de la pareja sin violar las cláusulas del contrato. De hecho, prácticamente todos los electrones y demás partículas existentes fueron creados de esta forma en los primeros instantes del Universo. Una minúscula diferencia entre las propiedades de las partículas y las antipartículas, que aún no entendemos completamente, permitió que un pequeñísimo porcentaje de las primeras y no de las segundas sobreviviera para formar toda la materia que nos rodea.

Efervescencia microscópica

La lista de componentes básicos de la materia es apenas la mitad de la historia. A diferencia de un conjunto de motas de polvo, las partículas elementales no solamente están flotando por ahí, sino que interactúan unas con otras mediante lo que llamamos *fuerzas* o *interacciones fundamentales*. En nuestra vida diaria nos encontramos en todo momento con dos de ellas. La fuerza de gravedad hace, por ejemplo, que la Tierra nos atraiga hacia abajo. La fuerza electromagnética (feliz matrimonio de las fuerzas eléctrica y magnética) ocasiona, en particular, la repulsión con la cual el suelo nos sostiene, impidiendo que lo atravesemos.

Consideremos este último ejemplo más de cerca: pensemos en un electrón del suelo que se aproxima a un electrón de la suela de nuestro zapato. A partir de nuestras investigaciones hemos descubierto que la manera en que cada electrón



Fotos: © CERN / Cortesía Fermilab

Rastros de partículas resultantes de colisiones. A la izquierda, fotografía de los caminos de burbujas que dejan las partículas al atravesar el hidrógeno líquido de una cámara de burbujas en el laboratorio CERN, en 1970. A la derecha, imagen en computadora de las trayectorias de partículas registradas de forma electrónica por un detector del Tevatrón, acelerador del laboratorio Fermilab, en 1995.

repele al otro es arrojándole partículas conocidas como *fotones*, que actúan como mensajeras de la fuerza electromagnética (y resultan ser además las partículas de las que está hecha la luz). La forma más sencilla en que dos electrones pueden interactuar es intercambiando un solo fotón, pero hay una infinidad de posibilidades más complicadas, que involucran el intercambio de más fotones o incluso pares electrón-antielectrón que aparecen y desaparecen.

Si un electrón es capaz de jugar de esta manera con otro, lanzándole partículas o recibiendo algunas de él, entonces también puede, en sus ratos de ocio, jugar solo, arrojándose partículas que luego él mismo atrapa. Así, cada electrón se encuentra siempre rodeado de una especie de nube de fotones, electrones, antielectrones, etc., que continuamente aparecen y desaparecen (y que llamamos *partículas virtuales*).

Lo mismo ocurre con los otros habitantes del mundo microscópico. Suena absurdo, ¡pero el mundo de las partículas es un verdadero circo!

La receta completa...

La teoría que resume todo lo que sabemos con certeza respecto a la receta cósmica se conoce con el modesto nombre de Modelo Estándar. De acuerdo con ella, existen 12 ladrillos básicos de la materia: seis quarks y seis *leptones*. Los leptones incluyen a nuestro viejo amigo, el electrón, así como su copia pirata, el muón, y una segunda copia, incluso más pesada, el *tauón*, además de tres tipos distintos de neutrinos, también copias uno del otro. Los quarks incluyen a nuestros conocidos arriba y abajo, y sus copias pirata *encanto*, *extraño*, *cima* y *belleza*.

Según el Modelo Estándar, estos 12 ladrillos interactúan entre sí por medio de dos fuerzas fundamentales. Habíamos mencionado ya la fuerza electromagnética, generada por el intercambio de fotones. Los protones del núcleo de los átomos se repelen a través de ella, por lo que, para vencer esta repulsión y mantener unido el núcleo, debe existir otra fuerza más intensa. La llamamos *fuerza fuerte* (valga la redundancia) y se origina del intercambio de ocho partículas mensajeras, denominadas *gluones*, que pueden ser emitidas o absorbidas por los quarks, pero no por los leptones.

Las fuerzas electromagnética y fuerte no nos permiten explicar la desaparición



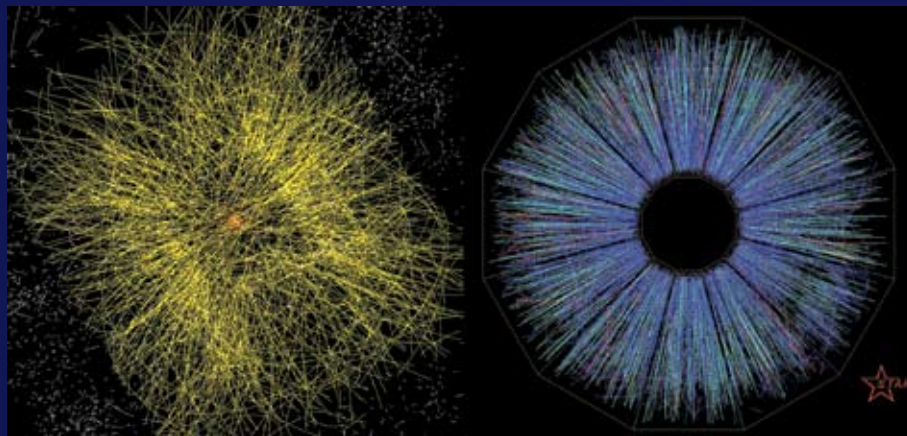
Origen de la repulsión entre dos electrones (en blanco). Las líneas punteadas representan trayectorias de partículas. En el primer proceso, el electrón de la izquierda emite un fotón (en naranja), que es absorbido después por el electrón de la derecha. En el segundo proceso, el fotón emitido se convierte en un tercer electrón y un antielectrón (en verde), que luego desaparecen creando un nuevo fotón, el cual es finalmente absorbido. El efecto combinado de éstos e infinitos procesos más es el que genera la repulsión.

del muón. Éste y otros procesos parecidos ocurren gracias a la llamada *fuerza débil* (valga la contradicción), transmitida por tres partículas mensajeras, conocidas crípticamente como W^+ , W^- y Z . Hace 30 años descubrimos que, aunque dista mucho de ser obvio, esta fuerza y la electromagnética están íntimamente emparentadas, y son en realidad dos distintas manifestaciones de una sola fuerza básica, llamada *fuerza electrodébil*.

... ¡o no tan completa!

Las 24 partículas recién enumeradas son todas las que hemos descubierto hasta la fecha. Pero sabemos que no son las únicas. Curiosamente, sus cargas electrodébiles resultan ser tales que, de sólo existir ellas en el Universo, el contrato prohibiría que tuvieran masa. Como la mayoría sí la tiene, sabemos que nos hace falta algo. El Modelo Estándar propone la solución más sencilla posible: la existencia de un solo ingrediente adicional, que llamamos la *partícula de Higgs*. Falta todavía averiguar si la naturaleza escogió esta opción o alguna más complicada.

Independientemente de esto, tenemos muy claro que el Modelo Estándar no puede ser la última palabra, porque hemos descubierto recientemente que la materia ordinaria, que orgullosamente podemos explicar por completo con las partículas conocidas, representa apenas 4% del contenido del Universo. Otro 22% toma



Trayectorias de miles de partículas creadas en el choque (al centro de cada figura) de dos núcleos pesados. A la izquierda, simulación por computadora para el detector ALICE del acelerador LHC. A la derecha, resultado real observado en el detector STAR del acelerador RHIC.

la forma de lo que llamamos *materia oscura*, que no se ve, pero puede detectarse por la atracción gravitacional que ejerce sobre la materia que sí vemos. La materia oscura probablemente está hecha de un nuevo tipo de partícula elemental, que quisiéramos identificar. El 74% restante es una peculiar forma de energía distribuida uniformemente por todo el espacio, denominada *energía oscura*, que provoca que la expansión del Universo se esté acelerando en lugar de frenarse, como se esperaba hasta hace unos 10 años, y de la cual sabemos todavía muy poco (ver “El Universo oculto”, *¿Cómo ves?*, No. 122).

El Modelo Estándar tiene además otras limitaciones, siendo la más notoria ¡que no describe la gravedad! Contra lo que se podría pensar, la gravedad es la fuerza más débil de todas, y a la escala que hemos explorado en nuestros aceleradores resulta completamente irrelevante. Entendemos muy bien su influencia sobre objetos macroscópicos como los planetas, las estrellas y las galaxias, pero no tenemos aún una buena descripción de su origen microscópico.

A pesar de lo mucho que hemos avanzado, claramente necesitamos entender más. Para ello, estamos por un lado in-

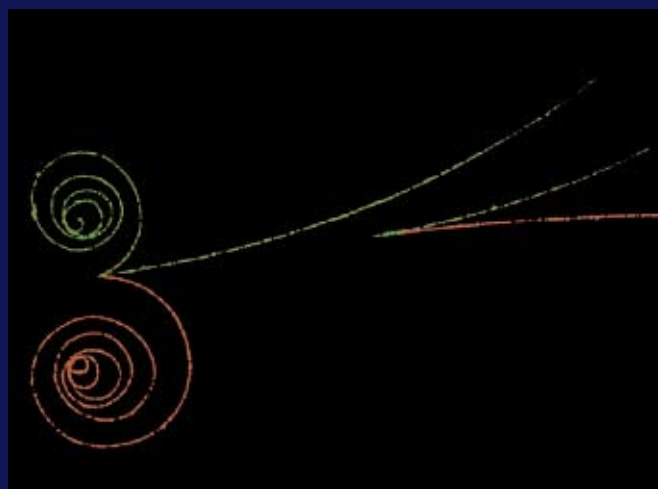
MÁS INFORMACIÓN

- García Fernández, Horacio, *Las huellas del átomo*, ADN Editores y CONACULTA, México, 2000.
- Flores Valdés, Jorge, *La gran ilusión II. Los cuarks*, Col. “La ciencia para todos”, FCE/Conacyt/Sep, México, 1995.
- Menchaca, Arturo, *El discreto encanto de las partículas elementales*, Col. “La ciencia para todos”, FCE/Conacyt/Sep, México, 1996.
- <http://www.solociencia.com/fisica/particulas-elementales-modelo-estandar.htm>

tentando explorar nuevas ideas, como la *teoría de cuerdas* (ver “La física pende de una cuerda”, *¿Cómo ves?*, No. 108), y por otro, realizando mediciones en experimentos más sofisticados, como el LHC y el Observatorio de Rayos Cósmicos Pierre Auger, en Argentina. En estas y otras actividades participan científicos e instituciones mexicanas de diversos puntos del país.

En el futuro cercano debemos esperar nuevas sorpresas. De lo único que podemos estar seguros es que, mientras haya seres humanos, seguiremos tratando de descifrar la receta cósmica. 👁

Alberto Gúijosa es una danza colectiva de trillones de partículas que trabaja como investigador en el Instituto de Ciencias Nucleares de la UNAM. Realizó sus estudios de doctorado en la Universidad de Princeton y es especialista en la teoría de cuerdas. alberto@nucleares.unam.mx



Fotografía real en color falso de rastros que indican la creación de electrones (en verde) y antielectrones (en rojo) dentro del líquido de una cámara de burbujas. A la izquierda, un par electrón-antielectrón se crea a partir de un fotón, partícula que no deja rastro por no tener carga eléctrica. Un segundo electrón sale expulsado de un átomo del líquido; luego de recorrer alrededor de un centímetro, emite un fotón. A partir de éste se crea el par electrón-antielectrón de la derecha.

Foto: Cortesía Laboratorio Lawrence Berkeley

Fotos: © CERN / Lab. Nacional de Brookhaven