

ESPECIAL AÑO DE LA FÍSICA

MODELANDO EL COSMOS

Ángel R. López Sánchez

«Los eruditos modernos yerran cuando se burlan de James Ussher, el obispo irlandés del siglo XVII que contó los *engendró* (genealogía de la Biblia) y concluyó que “*el comienzo del tiempo... fue en el comienzo de la noche que precedió al vigésimo tercer día de octubre, en el año... 4004 a.C.*”. Lo que importa no es que las cifras de Ussher fueran erróneas, después de todo, sólo se equivocó en un factor un millón, que no es tan malo para los patrones cosmológicos, sino que consideraba que el tiempo *había* tenido un principio, y que el mundo se despliega de formas insospechadas, como una obra teatral».

Timothy FERRIS (1997): *Informe Sobre el Universo*, p. 146.

Nuestra visión cotidiana del mundo está condicionada por la *intuitiva* física clásica de Newton. Pero en los dominios de las galaxias y en el universo de las partículas subatómicas la *lógica* física clásica deja de funcionar. Puedes comprobarlo con un sencillo experimento. Una noche despejada, escápate lejos de las luces de la ciudad para evitar la contaminación lumínica y mira al cielo. Verás muchas estrellas, resplandecientes y coloridas, alguna brillante (quizás un planeta) y muchas débiles, pero todas ellas sobre *el fondo negro* del cielo. ¿Un fondo negro? La física newtoniana no impone límites ni al espacio ni al tiempo: miráramos donde mirásemos, siempre encontraríamos una estrella o una galaxia. *Deberíamos ver un fondo blanco*, por lo que o el espacio no es infinito, o el tiempo no lo es, o ambos no son infinitos. A esta observación se le conoce como la *Paradoja de Olbers* e indica cómo la física clásica no puede explicar algo tan *común* como por qué el cielo es oscuro.

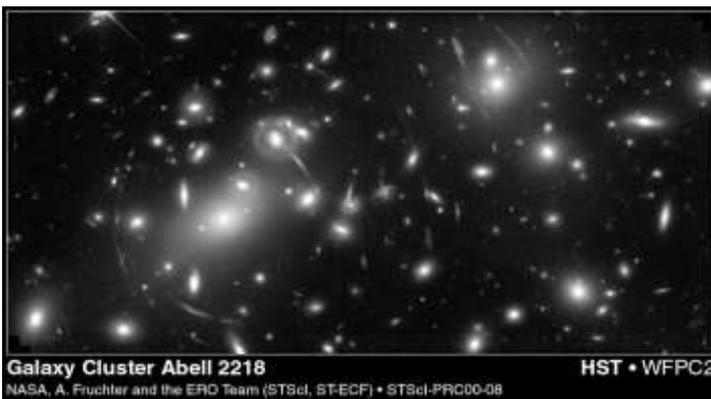
A principios del siglo XX dos revoluciones cambiarían radicalmente la Física: la Teoría de la **Relatividad de Einstein** explicaba el comportamiento del macrocosmos, mientras que el desarrollo de la **Teoría Cuántica** por científicos como Bohr, Pauli, Heisenberg, Planck, Fermi o Dirac daba cuenta de los movimientos del microcosmos. En la **Cosmología** se unen ambos mundos: el de lo muy grande (los supercúmulos de galaxias) y el de lo muy pequeño (las partículas elementales). Ahora sabemos que el Universo se expande y que está lleno de radiación, siendo en sus orígenes tan caliente y denso que constituiría un gigantesco acelerador de partículas. Por lo tanto, para estudiar el Universo y su evolución es necesaria una comprensión de ambas teorías.

LA TEORÍA DE LA RELATIVIDAD

La **Teoría de la Relatividad Especial** de Einstein **NO** significa que *todo es relativo*, sino todo lo contrario: nos habla de la *constancia de la velocidad de la luz desde cualquier sistema de referencia inercial* (aquel que no tiene aceleración). Todo comenzó con la siguiente pregunta: ¿con qué velocidad vería acercarse un rayo de luz si yo voy en otro rayo de luz a su encuentro?. Desde el punto de vista de la Física Clásica, el principio de relatividad de Galileo (y nuestra lógica cotidiana) nos haría pensar que la respuesta es a dos veces la velocidad de la luz: sumamos las velocidades, al igual que decimos que si un coche que se acerca a nosotros a 100 km/h, yendo nosotros también a 100 km/h, la velocidad con la que lo observamos acercarse es de 200 km/h. Este segundo razonamiento es rigurosamente cierto (y la causa de que los accidentes de tráfico sean tan peligrosos), pero no lo es el primero. No importa cómo mires al rayo de luz, siempre medirás que se mueve a una velocidad constante, *c*. En la jerga de los físicos, se dice que en la Teoría de la Relatividad Especial la velocidad de la luz permanece *invariante*. También permanece invariante la energía, siendo el origen de la

famosa equivalencia entre masa y energía, $E = m c^2$. La energía total de un sistema se conserva, pero en el balance debe incluirse también la energía en forma de masa.

El objetivo de la **Relatividad General** es explicar la fuerza de la gravedad de forma que cumpliera la Relatividad Especial. La idea básica es que un movimiento acelerado (no inercial) y un campo gravitatorio son cosas equivalentes. Como en el primer caso no se verifica la geometría de Euclides (en donde la distancia más corta entre dos puntos es una línea recta), en un campo gravitatorio tampoco se cumple. Einstein propone que es la *geometría del espacio* lo que provoca la fuerza de la gravedad: las masas presentes *curvan* el espacio. Los planetas no describen órbitas alrededor del Sol porque existe una *fuerza gravitatoria* entre ambos, sino que siguen *camino de mínima resistencia a través de un espacio curvo*. El espacio cósmico sólo puede representarse de forma precisa usando **cuatro dimensiones**: las tres espaciales y una temporal. El espacio curvo puede formar una *esfera tetradimensional* donde, en analogía a una esfera cotidiana, el universo es finito pero ilimitado: podemos recorrer la superficie de la esfera sin encontrar un límite. De esta manera, desaparece la paradoja del límite del Universo a la que nos referíamos al principio. Existen muchas observaciones que confirman que la Teoría de la Relatividad General es correcta: la variación de la posición aparente de las estrellas cercanas al Sol durante un eclipse, la *precesión* de la órbita de Mercurio (no alcanza su mínima distancia al Sol en la misma posición relativa), o incluso la detección de *lentes gravitatorias* en cúmulos de galaxias.



Cúmulo de galaxias Abell 2218, situado a unos 2000 millones de años luz y formado principalmente por galaxias elípticas. Es tan masivo que su enorme campo gravitatorio curva los rayos de luz que pasan cerca de él, formando una lente gravitatoria: algunos objetos que se encuentran más lejos que él (de 5 a 10 veces más distantes) pueden apreciarse como "filamentos arqueados", como predice la Teoría General de la

Relatividad. En condiciones normales, estas galaxias lejanas no podrían observarse.

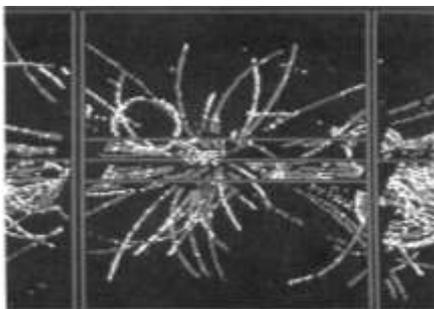
LA TEORÍA CUÁNTICA

La palabra *cuántica* deriva del concepto de *cuanto*, introducido por Planck en el último año del siglo XIX para explicar *la radiación de cuerpo negro* (un objeto que emitiera exactamente toda la luz que recibe, encontrándose en equilibrio térmico). La energía de la radiación no se distribuye de forma continua, sino que lo hace en pequeños paquetes, los **cuantos**, cuya energía es proporcional a su frecuencia (el número de oscilaciones por segundo), $E = h \nu$. La constante de proporcionalidad es la constante de Planck, h , un número muy pequeño que nos indica la unidad mínima de energía que un fotón con cierta frecuencia puede tener. Realizando una analogía fácil, si la constante de Planck indicara el mínimo movimiento que podríamos hacer y su valor fuese de 1 metro por cada movimiento, sólo podríamos desplazarnos un número entero de metros (5 m o 100 km) pero nunca fracciones de metro (0.5 m ó 1 mm).

Con el supuesto de que la energía se encuentra cuantizada, Einstein pudo encontrar solución al *efecto fotoeléctrico* (la velocidad de los electrones liberados por un metal al ser iluminado depende de la frecuencia de esta radiación y no de su intensidad) y Bohr explicó las *líneas espectrales* de los elementos atómicos (los electrones de un

átomo se distribuyen en capas concretas). Otro descubrimiento importante fue realizado por De Broglie, quien introdujo el concepto de **dualidad onda-corpúsculo** al demostrar que una partícula material también podía comportarse como una onda. Pero el verdadero avance llegó cuando Heisenberg encontró en 1927 el **principio de indeterminación**: se puede conocer con precisión exacta o bien la posición de una partícula o bien su movimiento, pero **nunca** ambas a la vez. La cantidad mínima de error (incertidumbre) presente está definida precisamente por h , el cuanto de acción de Planck. La Naturaleza a escalas subatómicas pasó a ser no determinista, basándose el formalismo de la Mecánica Cuántica en estadística de probabilidades. Un electrón, por ejemplo, no se mueve alrededor de un núcleo atómico siguiendo una órbita, sino que existe una función de probabilidad (su *función de onda*) que indica tanto cómo se mueve como dónde puede encontrarse (su *estado*). Pero, ojo, si medimos *alteramos* el sistema.

La Física Cuántica pudo clasificar las partículas en **fermiones y bosones** dependiendo de las leyes estadísticas que gobiernan su conducta. El primer grupo lo forman las partículas de materia, los electrones, protones y neutrones, que obedecen el *principio de exclusión de Pauli* (dos fermiones no pueden ocupar el mismo estado cuántico). Los bosones son las partículas que *transmiten* las fuerzas. Existen cuatro fuerzas (*interacciones*) fundamentales en la Naturaleza: la **fuerza electromagnética** (atracción entre partículas con cargas eléctricas o magnéticas opuestas), la **fuerza nuclear fuerte** (que mantiene unidos a los protones y neutrones en los núcleos atómicos), la **fuerza nuclear débil** (responsable de los procesos de desintegración radiactiva) y la **fuerza gravitatoria** (atracción entre dos partículas con masa, proporcionalmente mucho más débil que las otras tres). El bosón más famoso es el fotón, partícula que trasmite la fuerza electromagnética. Pero, ¿cuáles son los bosones responsables de las otras fuerzas?.

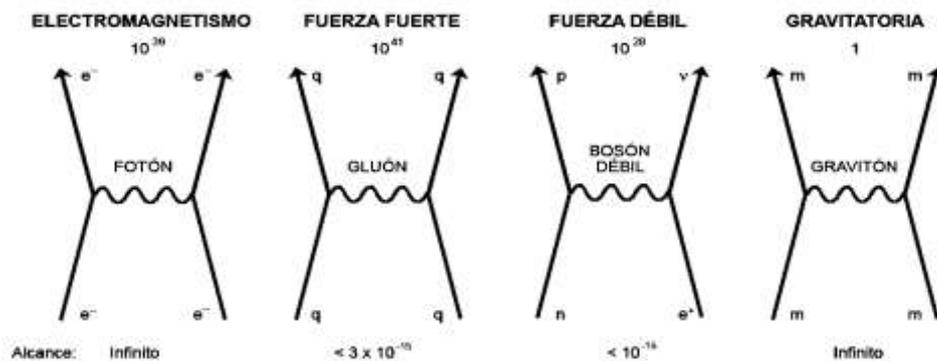


Reconstrucción mediante ordenador de una colisión a muy alta energía de un protón con un antiprotón en el acelerador CERN. Se han producido una gran cantidad de partículas. En 1982, gracias a este tipo de experimentos, se pudieron descubrir los bosones intermedios responsables de la fuerza nuclear débil.

Teorías cuánticas de campos relativistas

Las explicaciones científicas de cómo las diversas partículas se comportan bajo la influencia de las fuerzas electromagnética, nuclear fuerte y nuclear débil se denominan **teorías cuánticas de campo relativistas** porque usan tanto las leyes cuánticas como la teoría Especial de la Relatividad. El electromagnetismo se describe perfectamente por la **teoría de la electrodinámica cuántica** (QED), desarrollada por Dirac. Como consecuencia de una *simetría*, esta teoría predice la existencia de una partícula similar al electrón pero con *carga* opuesta, el *positrón*. En estos términos, una *simetría* no tiene necesariamente que ver con formas geométricas, sino que es una cantidad que permanece invariable bajo una transformación. En la QED, la simetría reside en la *conservación de la carga eléctrica*. Era necesario introducir el positrón para que la carga se conservase en estas interacciones. Además, la masa del **fotón** (el bosón de la interacción electromagnética) debía ser nula. Todos estos hechos fueron confirmados experimentalmente, proporcionando una enorme solidez a la teoría de QED.

A mitad del siglo XX los aceleradores de partículas hacían chocar protones y electrones a alta velocidad para estudiar sus interacciones y su interior. Pero sólo se producían *nuevas partículas*. Conforme más energía se proporcionaba, mayor número de partículas *raras* aparecían. En poco tiempo se descubrieron cientos de partículas. ¡Y no se sabía cómo organizarlas! La única solución es que, al igual que los protones y neutrones, *fuesen entidades compuestas*. Gell-Mann propuso el **modelo de los quarks**: los protones y neutrones estaban compuestos por tres partículas, los *quarks*. Nació la **teoría de la cromodinámica cuántica (QCD)**. La simetría de esta interacción es la *conservación del color de los quarks*. El color de un quark no tiene nada que ver con el color ordinario, pero sirvió para hacer una analogía de cómo se combinan al interactuar. Los portadores de la fuerza de color son los **gluones**, los bosones de la interacción nuclear fuerte. Esta interacción tiene dos comportamientos: la fuerza fuerte se hace más intensa al aumentar la separación de los quarks a tamaños mayores que el de un protón o un neutrón, (de ahí que esté confinada en el interior de estas partículas y sea tan difícil ver quarks libres), pero a muy corta distancia se hace tan débil que los quarks parecen estar libres. Precisamente, el estudio detallado de esta propiedad (que recibe el nombre de *libertad asintótica*) por Gross, Politzer y Wilczek ha sido premiado con el Nobel de Física de 2004.



Las cuatro fuerzas fundamentales descritas según los Diagramas de Feynman, mostrando el intercambio de las partículas de fuerza, los bosones (fotón, gluón, bosón débil y gravitón). En la interacción electromagnética, los electrones (e^-) interactúan con fotones, mientras que en la interacción fuerte los quarks (q) intercambian gluones. En la interacción débil, un neutrón (n) se desintegra en un protón (p) mediante el intercambio de un bosón débil, pero a la vez libera un positrón (e^+) y un neutrino (ν). La fuerza gravitatoria involucra un intercambio de un gravitón entre dos partículas masivas (m). Se indica también el alcance (en metros) y la intensidad relativa de cada fuerza con respecto a la interacción gravitatoria.

La identificación de los quarks también sirvió para comprender la **interacción nuclear débil**, responsable de la radiactividad natural y de los procesos nucleares que provocan la fusión del hidrógeno en las estrellas. La interacción débil se basaba en la desintegración de un neutrón en un protón y un electrón, pero por conservación de la energía también debía crearse otra partícula, muy difícil de detectar porque no tendría masa (o si la tuviese sería muy pequeña) y que no participaría en la interacción nuclear fuerte. Fermi bautizó a esta partícula como **neutrino**. Finalmente, se demostró que existían tres tipos de neutrinos y que poseen una masa distinta de cero. Al demostrarse que los quarks formaban protones y neutrones se formuló una teoría que explicaba la fuerza débil mediante el intercambio de unos bosones *masivos y cargados* (los **bosones intermedios o débiles**), descubiertos en el CERN en 1983 al hacer colisionar protones con *antiprotones* (protones con carga negativa) a muy alta energía. El hecho de que los bosones intermedios sean masivos (varias decenas de veces la masa del protón) hace que la interacción sea de muy corto alcance (sólo de una centésima parte de un protón).

LA UNIFICACIÓN DE LAS FUERZAS FUNDAMENTALES

En los años setenta, Weinberg, Salam y Glashow encontraron una simetría que los relacionaba con el fotón, el bosón de la interacción electromagnética, unificando ambas interacciones en una única fuerza: la **interacción electrodébil**. Pero un fotón no se parece en absoluto a un bosón débil, ¿dónde está la simetría que los une? ¿Qué propiedad permanece invariable en estas interacciones? Ninguna, porque dicha simetría **se ha roto** en algún momento del pasado. La física de partículas puede considerarse como el estudio de las simetrías presentes y de las que están rotas. Las *rupturas de simetría* cuando el Universo era joven han sido las responsables de las diferencias observadas entre bosones intermedios y fotones. Este razonamiento indica una *evolución cósmica*. La simetría rota de la fuerza electrodébil se recuperaría en condiciones de alta energía, como al inicio del Universo o en enormes aceleradores de partículas.

Al igual que se consiguió unir la fuerza débil con la electromagnética, ¿podríamos obtener una unificación de las demás? Se intentó acoplar la interacción electrodébil con la fuerte, creándose unos modelos que se conocieron con el nombre de **Grandes Teorías Unificadas** (GUT), pero no funcionaron. Se necesitaba una simetría que identificara a los fermiones (componentes básicos de la materia) con los bosones (portadores de fuerzas). Esta propiedad se llamó **supersimetría**. La **teoría unificada de la supersimetría** busca las *simetrías rotas entre bosones y fermiones*, siendo capaz de unir todas las partículas bajo un solo conjunto de ecuaciones. Predice un gran número de partículas *raras*, diferentes a las que hemos descrito aquí, que recibieron los exóticos nombres de *fotinos*, *gluinos*, *axinos* o *neutralinos*. Tendrían masa pero interactuarían muy débilmente con la materia ordinaria, propiedad explotada por la Cosmología.

Si la Teoría General de la era capaz de explicar una fuerza como consecuencia de la geometría del espacio, quizás en las demás también lo posible. Esto se consigue representando la Naturaleza en más de cuatro dimensiones. Llegamos a la **Teoría de Cuerdas**, formulada por Green, Schwarz y Witten en 1987, según la que todas las partículas conocidas se representan como objetos muy estrechos y largos (las *cuerdas*) que, dependiendo de su forma de *vibrar*, definen un tipo de partícula u otra. Esta teoría es supersimétrica, une las cuatro fuerzas fundamentales y hace salir *todo* del espacio: las cuerdas son simplemente *espacio curvado*. Para trabajar en ella hay que usar la rama de las matemáticas que estudia las superficies: la **topología**. La Teoría de Cuerdas intenta explicar cómo llegó el Universo de las 10 dimensiones originales necesarias hasta las cuatro observadas actualmente: seis de ellas se colapsaron en una *transición de fase*, mecanismo mediante el cual las fuerzas se dividieron y las partículas que conocemos hoy día se fueron creando a medida que el Universo se expandía y enfriaba.

EL INICIO DEL UNIVERSO

La teoría actualmente aceptada acerca del inicio del Universo es el **Modelo de la Gran Explosión**, también conocida como *Teoría del Big Bang* (irónicamente, el nombre que usaba el astrofísico Hoyle de forma despectiva, pues no creía en ella). No tiene sentido que preguntemos dónde ocurrió la Gran Explosión: sucedió tanto aquí como en la galaxia de Andrómeda o en un cúmulo de galaxias lejano. Pasó en todo el Universo a la vez, creándose además el tiempo (cuesta bastante entender este razonamiento, siempre buscamos “algo fuera”, pero no lo había entonces). ¿Qué pasó? Ya me gustaría saber responder a esa pregunta, quizás hasta ganaba un Premio Nobel. El problema fundamental es explicar *cómo algo surge de la nada*. No profundizaré en temas filosóficos (y religiosos) pero sí apuntaré un aspecto de la teoría de partículas que puede dar una buena pista: el vacío cuántico está lleno de **partículas virtuales**. Se crean

