



UNIVERSIDAD DE BURGOS

D. ÁNGEL BALLESTEROS CASTAÑEDA

Profesor Titular de Universidad

Área de Física Aplicada

Departamento de Física, Facultad de Ciencias

LA FÍSICA FUNDAMENTAL ANTE UNA REVOLUCIÓN INACABADA

LECCIÓN INAUGURAL DEL CURSO ACADÉMICO 2008-2009

**BURGOS
2008**

Edita: UNIVERSIDAD DE BURGOS. SECRETARÍA GENERAL

SERVICIO DE PUBLICACIONES E IMAGEN INSTITUCIONAL

Edificio Biblioteca Universitaria

Pza. de la Infanta Doña Elena, s/n.

09001 Burgos - España

Depósito legal: BU-389. – 2008

Fotocomposición: RICO ADRADOS, S.L.

Imprime: AMÁBAR, S.L.

“¿Por qué motivo tendría que ocuparme en buscar los secretos de las estrellas si tengo continuamente ante mis ojos a la muerte y a la esclavitud?”

Pregunta planteada a Pitágoras por Anaxímenes¹

“No nos preguntamos qué propósito útil hay en el canto de los pájaros, cantar es su deseo desde que fueron creados para cantar. Del mismo modo no debemos preguntarnos por qué la mente humana se preocupa por penetrar los secretos de los cielos ... La diversidad de los fenómenos de la Naturaleza es tan grande y los tesoros que encierran los cielos tan ricos, precisamente para que la mente del hombre nunca se encuentre carente de su alimento básico.”

Johannes Kepler, “Misterium Cosmographicum”

¹ Según Montaigne [29].

Índice

ÍNDICE	9
1. INTRODUCCIÓN	11
1.1. Modelos y Teorías	14
2. UNA REVOLUCIÓN INACABADA	19
3. LA TEORÍA CUÁNTICA	22
3.1. El principio de incertidumbre	26
3.2. q-bits y computadores cuánticos	27
3.3. No-localidad cuántica versus Teoría de la Relatividad Especial	30
3.4. El Modelo Estándar de la Física de Partículas Elementales .	32
3.5. El bosón de Higgs y el LHC	36

4.	LA TEORÍA DE LA RELATIVIDAD	38
4.1.	La Teoría de la Relatividad Especial	39
4.2.	La Teoría de la Relatividad General	42
4.3.	La constante cosmológica	44
4.4.	El problema de la energía oscura	46
4.5.	El problema de la materia oscura	49
4.6.	Una alternativa: ¿es incorrecta la Teoría de la Gravitación?	53
4.7.	El final del Universo	57
5.	HACIA UNA TEORÍA CUÁNTICA DE LA GRAVEDAD	61
5.1.	Teorías de cuerdas y dimensiones adicionales	62
5.2.	Gravedad cuántica de bucles y cuantización del espacio-tiempo	66
5.3.	¿Ha de modificarse la Teoría de la Relatividad Especial? .	69
6.	CONCLUSIONES	75
7.	BIBLIOGRAFÍA	79

Lección

1. Introducción

El físico alemán Max Planck comenzó sus estudios de Física en la Universidad de Munich en 1874. Y lo hizo a pesar de que Philipp von Jolly, profesor de esa Universidad, le había advertido de que a esas alturas del siglo XIX en la Física casi todo había sido ya descubierto, y que “lo único que restaba era completar algunas pequeñas lagunas”. Afortunadamente, Planck le contestó que su objetivo principal no era descubrir cosas nuevas, sino tan sólo entender los fundamentos de las ya conocidas, y perseveró en su decisión. Como es bien conocido, Max Planck recibió el premio Nobel en Física por su propuesta de los “cuantos de energía” realizada en 1900, idea que convirtió una de las “pequeñas lagunas” de Jolly en el primer pilar de una revolucionaria transformación de nuestra imagen física del mundo, la Mecánica Cuántica.

Sin embargo, profetizar el cercano final de la Física era frecuente a finales del siglo XIX. Lord Kelvin lo formuló así: *“Ya no hay nada por descubrir en la Física. Todo lo que nos queda es medir con más y más precisión”*. En la misma línea se pronunciaba Albert A. Michelson, quien llegó a afirmar con rotundidad lo siguiente:

“Todos los hechos y leyes más importantes de la Física han sido ya descubiertos, y están tan firmemente establecidos que la posibilidad de que sean sustituidos como consecuencia de nuevos descubrimientos es extremadamente remota ... Nuestros descubrimientos futuros deberán buscarse a partir del sexto decimal”.

No deja de ser sorprendente que fuera un experimento realizado en 1887, entre otros, por el propio Michelson, el que estableciera la constancia universal de la velocidad de propagación de la luz [25], hecho a partir del cual Albert Einstein introdujo la Teoría Especial de la Relatividad, que puede considerarse el segundo pilar de la revolución de la Física iniciada en los primeros años del siglo XX.

De modo que, tal y como ha venido confirmando testarudamente la historia de la Física (y, me atrevería a decir, de todas las Ciencias) a todos aquéllos falsos profetas que han augurado el cierre definitivo de nuestra comprensión del Universo y, con ella, el fin de la propia Física, los acontecimientos se han ocupado de desmentirles con rotundidad.

El mensaje que me gustaría transmitir en esta Lección es que esta gran revolución de la Física iniciada hace ya un siglo y basada en dos innovadoras Teorías, la Mecánica Cuántica y la Relatividad, está todavía inacabada porque el problema de la relación profunda entre ambas sigue sin resolverse. Es más, en estas páginas intentaré convencerles de que los interrogantes sobre nuestra visión del Universo están aumentando, y que nuestro mapa actual de la Física Fundamental contiene muchos y profundos problemas que no han hecho sino multiplicarse desde hace unos veinte años, y que incluyen hechos sorprendentes y todavía inexplicados. Además, convendrá recordar que algunos de los más sofisticados y ambiciosos experimentos jamás diseñados en Física, se están poniendo precisamente en funcionamiento durante estos meses para aportarnos datos (y probablemente sorpresas) que pueden ser decisivos en el devenir de la Física de los próximos decenios.

Y es que parecería como si, tras un siglo de Cuántica y de Relatividad, ambas Teorías han dado de sí todo lo que podían en su formulación actual y, pese al tremendo esfuerzo realizado por miles de físicos durante todo este tiempo, no ha sido posible unificarlas satisfactoriamente en un único marco teórico general. Esta es la gran tarea pendiente para completar la revolución de la Física del siglo XX, pero a estas alturas es evidente que habremos de hacerlo desde nuevas perspectivas y con herramientas teóricas y experimentales diferentes a las utilizadas hasta ahora. Sin embargo, parece que en cualquier caso deberemos tener presente la idea común a todos los intentos de unificación de ambas Teorías realizados en los últimos 50 años: la existencia de una longitud fundamental, muy pequeña², a partir de la cual la descripción de la Naturaleza necesita irremediamente la compatibilidad entre Teoría Cuántica y Relatividad. Tal y como detallaremos en estas páginas, ésta es la denominada “longitud de Planck”, sobre la que previsiblemente orbitará gran parte de la Física Fundamental de los próximos años.

Este panorama, lejos de resultar desalentador, invita a imaginar que, probablemente, en los próximos decenios veremos surgir nuevos e imaginativos conceptos y teorías físicas, así como nuevas y sorprendentes predicciones sobre el Universo en que vivimos. Y también, como siempre ha sucedido, es seguro que estos nuevos conocimientos fundamentales promoverán a medio plazo innovaciones tecnológicas hoy inimaginables que, como siempre, podrán ser usadas en beneficio de todos o tan sólo en provecho de unos pocos. Pero ése es otro problema que, aún cayendo fuera del ámbito de esta Lección, como científicos y ciudadanos no podemos ni debemos olvidar³.

² O, complementariamente, de una energía fundamental, en este caso muy grande.

³ A este respecto conviene hacer referencia a [14] y [30], dos completas, modernas y rigurosas aproximaciones al papel de la Ciencia en nuestra sociedad contemporánea.

Antes de entrar en detalles sobre algunas de las facetas de esta revolución inacabada de la Física, quisiera abordar un problema metodológico que considero esencial. Ya que, si de ahora en adelante vamos a hablar continuamente de lo que conocemos o desconocemos, deberemos en primer lugar fijar con precisión qué significa “conocer” en Ciencia y cuáles son los límites de nuestro conocimiento.

1.1. *Modelos y Teorías*

Es importante recordar que cuando los Físicos decimos que “conocemos”, por ejemplo, el núcleo de un átomo, nos estamos refiriendo a que tenemos un “modelo físico” consistente de ese sistema. Esto significa que ese “modelo físico” debe dar cuenta de la estructura del núcleo y de su evolución en el tiempo de forma consistente con todos los resultados de las observaciones experimentales directas o indirectas que realicemos sobre el núcleo en cuestión. Así mismo, por construcción, todo modelo físico tendrá un ámbito de aplicación limitado por el tipo de sistema considerado, el tipo de propiedades que se quieren estudiar y el rango dinámico del mismo que deseemos explorar.

Todo modelo físico está compuesto por dos ingredientes esenciales: por un lado, una serie de conceptos físicos acompañados de imágenes mentales sobre las propiedades de los entes que componen el sistema, una “representación esquemática del sistema real o conjeturado” [9]. En nuestro caso, podemos por ejemplo describir el núcleo como una entidad compuesta de partículas más elementales (protones y neutrones) que interactúan entre sí. Pero también podemos pensar en el núcleo como una cierta distribución espacial continua de carga positiva. Cada uno de estos puntos de vista dará lugar a modelos distintos, y probablemente las hipótesis realizadas sobre la naturaleza del modelo limitarán el ámbito de aplicabilidad del mismo.

En segundo lugar, el modelo debe incorporar un conjunto de leyes físicas escritas siempre en forma de ecuaciones matemáticas⁴. Estas ecuaciones nos describen cuantitativamente tanto el comportamiento estático como la dinámica del sistema, y solucionándolas es posible predecir la evolución del mismo bajo un conjunto de condiciones dadas, lo cual nos permitirá comprobar experimentalmente la validez de nuestros conceptos, hipótesis y modelos matemáticos. Este es un punto crucial en lo que sigue: *no hay modelo científico si no hay capacidad predictiva, directa o indirecta*. Esta es la diferencia entre la Física y la especulación, y también la característica que ha hecho de la Ciencia moderna un motor de transformación del mundo a través de la Tecnología.

Por ejemplo, si bombardeamos ese núcleo con un haz de partículas cargadas (por ejemplo, protones) podremos medir la forma en la que sus trayectorias se ven afectadas al acercarse al núcleo en estudio. Paralelamente, con nuestro modelo matemático del núcleo deberemos calcular teóricamente las trayectorias previstas, que dependerán de la estructura que asignemos al núcleo y del tipo de interacciones que consideremos entre sus componentes y también entre el núcleo y las partículas con que lo bombardeamos. Si experimento y cálculo teórico coinciden dentro de los márgenes de error previstos, nuestro modelo funciona. En caso contrario, deberemos mejorar nuestro modelo (en alguna, o en todas sus facetas) de modo que pueda dar cuenta correctamente de los resultados de la experiencia.

En este sentido, el papel de la experimentación no consiste en repetir medidas de lo ya conocido con cada vez mayor precisión sino, fundamental-

⁴ Si se quiere, con mayor generalidad, un modelo debe incorporar una cierta estructura matemática en la que haya una relación biunívoca entre magnitudes y conceptos físicos y entes matemáticos. No debe olvidarse que “el papel de las matemáticas en la ciencia moderna es dual: formación de conceptos y computación” [9].

mente, realizar cada vez mejores y más imaginativos experimentos para buscar fallas en los modelos actualmente aceptados. Sólo así será posible descubrir las condiciones o alteraciones de los sistemas que no son descritas por dichos modelos, estableciendo de forma más clara sus límites de aplicabilidad y, en ocasiones, generando crisis que necesariamente abrirán la puerta a puntos de vista completamente diferentes.

Conviene recordar aquí que podemos contar con dos tipos de experimentos para confrontarlos con nuestros modelos: aquéllos en los que directamente estamos comprobando un cierto modelo y aquéllos otros en los que indirectamente obtenemos información sobre el mismo mediante datos que, provenientes de otras experiencias sobre otros sistemas en principio diferentes, están relacionados con el nuestro. Como veremos a lo largo de la discusión que sigue, este tipo de evidencias indirectas cobra mucha importancia cuando pretendemos experimentar sobre sistemas que no son (ni serán jamás) reproducibles en uno de nuestros laboratorios. ¿Cómo conocer, por ejemplo, propiedades del “Big-Bang”, de la gran explosión que creemos generó nuestro Universo? Jamás podremos crear réplicas del Big-Bang para experimentar con ellas, pero deberemos pensar cómo podemos detectar –por ejemplo– trazas de esa gran explosión en nuestros telescopios. Idear nuevos tipos de evidencias experimentales indirectas constituye uno de los mayores desafíos de la Física de nuestro tiempo.

Todos (y recalco esto) los modelos científicos tienen aplicabilidad limitada: ninguno de ellos es “la verdad”. Son representaciones de la realidad, más que la realidad en sí misma⁵. Los modelos sólo funcionan y hacen

⁵ La noción de “realidad” en Física exige un tratamiento muy cuidadoso desde el punto de vista epistemológico, que excede con mucho los objetivos de esta Lección. Una aproximación a este problema en el contexto de la Física Cuántica puede encontrarse en [33].

predicciones correctas bajo ciertas circunstancias, y permiten conocer únicamente facetas concretas y limitadas de la realidad.

Es cierto que hablaremos de “teorías” cuando nos refiramos a modelos de aplicación muy amplia, que normalmente se basan en conceptos físicos muy fundamentales y de aplicación universal, e incluyen una estructura matemática muy bien conocida. Los dos ejemplos básicos de este tipo de macro-modelos que centrarán nuestra atención son la Teoría Cuántica y la Teoría de la Relatividad. Pero no hemos de olvidar que éstas no son en absoluto inamovibles y que están sujetas a la misma contrastación experimental que cualquier otro modelo. Que durante muchos años hayan sobrevivido con éxito a todas las pruebas experimentales que sobre ellas se han planteado no implica que eso siga siendo así en el futuro.

Quisiera terminar esta reflexión metodológica con una observación que me parece importante. La Física, desde Newton, ha tomado un rumbo decidido: sustituir la sensación por la abstracción. Nunca ha tenido miedo a esta última y el tiempo ha dado la razón a este planteamiento, con el que el propio Newton cosechó muchos éxitos: la explicación del sistema planetario, la aplicación práctica de su mecánica, la construcción de aparatos ópticos... Las Ciencias Naturales se han desarrollado siempre progresando en esta línea de abstracción, desde Newton hasta nuestros días. Y, paradójicamente, gracias a la búsqueda de la máxima generalidad en sus conclusiones, las realizaciones prácticas que han inducido las Ciencias en el campo de la Técnica han cambiado la faz del mundo⁶.

⁶ Una reflexión muy interesante en este sentido puede encontrarse en el artículo de Heisenberg titulado “La tendencia a la abstracción en el arte y en la ciencia modernos”, incluido en [19].

Sin duda, las Ciencias son muy importantes para la formación de los estudiantes porque, entre otras cualidades, implican el ejercicio continuado de la abstracción. Porque una mente formada se caracteriza por su capacidad de abstracción, de extracción de características comunes desde fenómenos aparentemente inconexos y que, tras la reflexión adecuada, resultan relacionados y permiten predecir nuevos comportamientos basándose en el conocimiento adquirido. En un contexto cultural como el nuestro, tan predominantemente audiovisual, observamos todos los días que a nuestros estudiantes retener imágenes y visiones superficiales les resulta fácil e incluso tanto más atractivo cuanto menor sea el tiempo de permanencia de la información ante sus sentidos. Pero ante esta tentación, debemos esforzarnos en mostrarles que hacer Ciencia es precisamente lo opuesto al “zapping”: que significa, sobre todo, observar, reflexionar con rigor y crear conceptos abstractos capaces de explicar los comportamientos individuales y de desbrozar la información recibida con capacidad crítica. Y esta actitud es aplicable a todos los órdenes de la vida y de la Cultura porque, en muchas ocasiones, ante el exceso de información que sufrimos aquélla auténticamente relevante no suele ser la que nos llega a propuesta de otros, sino la que nosotros hemos de buscar.

Como veremos en las páginas que siguen, el desarrollo de la Física Fundamental en el último siglo se ha basado en sucesivas abstracciones que perseguían la idea de una teoría unificada de todos los fenómenos físicos mediante la introducción de nuevos conceptos y estructuras cada vez más generales. Y en Física esos conceptos abstractos sólo tienen un lenguaje para definirse y utilizarse: las matemáticas. Así, en ocasiones los físicos reclamaban nuevas matemáticas para expresar sus nuevos conceptos y en otras los matemáticos ofrecían sus nuevos desarrollos por si eran de utilidad. Esta simbiosis ha resultado muy fructífera y, sin duda, seguirá siendo muy necesaria.

En este contexto quizás haya quien piense que las nuevas teorías que puedan construirse serán ininteligibles e inescrutables, aptas sólo para mentes privilegiadas y, por decirlo suavemente, un tanto excéntricas. A quienes apuntan en esta dirección conviene recordarles que en los años inmediatamente sucesivos a la introducción de la Teoría de la Relatividad muchos decían que esta Teoría no podría ser comprendida más que por un puñado de personas en el mundo. Actualmente se enseña todos los años a decenas de miles de estudiantes (que, por supuesto, acaban entendiéndola), y lo mismo ocurrirá previsiblemente dentro de cien años con desarrollos teóricos que hoy nos pueden parecer extremadamente difíciles. No dejemos que se alimente la idea de que la Física (y en general, todas las Ciencias) son disciplinas exóticas y para unos pocos. No es verdad. Lo que ocurre es que –como cualquier otro oficio– necesitan de un aprendizaje de sus técnicas propias y, ciertamente, para conseguir el dominio de alguna de ellas es preciso mucho trabajo y dedicación. No dejemos que se califique a las Ciencias como un núcleo difícil del árbol del saber y hagamos el esfuerzo de conectarlo con el resto de nuestra Cultura, porque hoy más que nunca la Ciencia y la Técnica configuran nuestra sociedad y, por su complejidad, ésta necesita más que nunca de una aproximación seria, rigurosa, veraz y honesta a sus problemas.

2. Una revolución inacabada

Las revoluciones en Física son sinónimo de revoluciones en los modelos y teorías físicas. Teniendo claro el esquema planteado anteriormente deducimos que una teoría será revolucionaria si introduce conceptos físicos radicalmente distintos, estructuras matemáticas esencialmente nuevas o ambas cosas. Habitualmente, las teorías revolucionarias amplían el rango de aplicabilidad de las teorías anteriores, a las que suelen reducirse en condiciones limitadas. Así, las propiedades características de la Mecánica Clásica

emergen cuando aplicamos la Mecánica Cuántica a sistemas cuya acción característica es mucho mayor que la constante de Planck [22]. O las transformaciones de coordenadas de Galileo aparecen como límite de las transformaciones de Lorentz de la Relatividad Especial cuando la velocidad relativa es pequeña con respecto a la velocidad de la luz [15].

En cualquier caso, la nueva teoría alcanzará su plena vigencia mediante su coherencia con observaciones experimentales (antiguas o nuevas) que no puedan explicarse con las teorías actuales. Como veremos a continuación, en Física Fundamental estamos empezando a vislumbrar un horizonte cercano a esta situación.

Podemos afirmar sin duda que vivimos en uno de esos grandes periodos revolucionarios de la Física, que dura ya más de un siglo, y que viene marcado por la introducción de la Teoría Cuántica y de la Teoría General de la Relatividad. Probablemente el anterior periodo similar está marcado en su inicio por la revolución de Copérnico a principios del S.XVI, durante la cual se desmoronaron las nociones aristotélicas sobre el espacio, el tiempo, el movimiento y la cosmología, y finalizó dos siglos más tarde con la publicación de los *Principia* de Newton en 1687.

La Teoría Cuántica y la Teoría General de la Relatividad han supuesto una ruptura radical con la física newtoniana y han transformado nuestra imagen física del mundo, conduciendo además a aplicaciones tecnológicas que han cambiado y seguirán cambiando radicalmente nuestra vida, como los láseres, la microelectrónica la resonancia magnética nuclear o los actuales sistemas de posicionamiento (como el GPS), por citar tan sólo algunas de ellas.

Sin embargo, tanto los pioneros de la Teoría Cuántica como los de la Relatividad percibieron que esta revolución estaba incompleta, porque ambas

teorías eran y continúan siendo a día de hoy –y tras ímprobos esfuerzos– dos teorías independientes e incluso hasta en cierto sentido incompatibles.

La clave de la situación actual estriba en que la Física ha sobrevivido todo este siglo sin una teoría unificada porque, desde el punto de vista de la experimentación, hemos sido capaces de dividir al Universo en dos mundos prácticamente disjuntos. Por un lado, el mundo de lo atómico presidido por la Física Cuántica, donde la gravedad resulta despreciable frente al resto de fuerzas involucradas y podemos por tanto tratar el espacio y el tiempo en manera casi Newtoniana. Por otro lado, el mundo de los planetas, las estrellas y el Universo en su conjunto, compuesto de objetos con masas y energías tremendamente grandes, donde podemos con frecuencia ignorar los efectos cuánticos y construir nuestros modelos a partir de la Teoría General de la Relatividad.

Pero si deseamos entender –por ejemplo– cómo era la Física del Universo cerca de su explosión inicial nos veremos obligados a disponer de una teoría que conjugue compatiblemente la Física Cuántica y la Relatividad. ¿Por qué? Por que en esos momentos iniciales todo el Universo estaba concentrado en un volumen muy pequeño, donde la densidad de materia y de energía era tal que la interacción gravitatoria no podía despreciarse con respecto a las otras fuerzas, ni era por supuesto irrelevante cuánticamente.

Y es más, lo que nos están diciendo alguna de las observaciones que se están realizando en los últimos veinte años es que es posible que no podamos entender la estructura actual del Universo y, mucho menos, predecir su futuro si no somos capaces de comprender con más profundidad la Teoría Cuántica y sus consecuencias a escala cosmológica. Y recíprocamente, que una descripción más fundamental del mundo cuántico ultramicroscópico sólo será posible si somos capaces de incorporar a ese nivel nociones propias de la Relatividad General, esencialmente una descripción adecuada y compatible del espacio-tiempo.

Pero antes de profundizar más en estos problemas, describiremos brevemente cuáles son los elementos básicos de ambas teorías, tal y como las concebimos a principios del siglo XXI.

3. La Teoría Cuántica

“Dios es capaz de crear partículas de materia de distintos tamaños y formas... y quizás de densidades y fuerzas distintas, y de este modo puede variar las fuerzas de la naturaleza, y hacer mundos de tipos diferentes en partes diferentes del Universo. Yo por lo menos no veo en esto nada contradictorio.”

Isaac Newton, “Óptica”.

Puede parecer extraño, pero apenas si ha pasado un siglo desde los días en que casi nadie, científico o profano, negara la continuidad de la materia. Si bien se había venido conjeturando desde la Antigüedad que dividiendo sucesivamente la materia se llegaría a unos componentes indivisibles y minúsculos, pocos pensaban a finales del siglo XIX que alguna vez se demostraría su existencia. La revolución cuántica de la Física se inició en 1900 y guardó precisamente relación muy estrecha con la confirmación experimental de que la materia se compone de átomos.

En 1900 Max Planck propuso una explicación de las medidas obtenidas de la distribución energética del espectro de la radiación térmica del “cuerpo negro” suponiendo que la energía de la radiación se intercambiaba en pequeños “cuantos” discretos de radiación. Este fue el inicio del desarrollo de una teoría completamente nueva de la materia y de la radiación, la Teoría Cuántica, basada en la hipótesis atómica y que se desarrolló en los 30 años siguientes bajo el impulso de Einstein, Bohr, Heisenberg, de Broglie, Schrödinger,

Dirac, Pauli y muchos brillantes científicos más. Las ecuaciones de la Mecánica Cuántica tienen como consecuencia que ciertas magnitudes, como por ejemplo la energía de un átomo, pueden tomar valores discretos a diferencia de lo que ocurre en el mundo macroscópico descrito por la mecánica de Newton, en la que los valores de la energía son un continuo. En consecuencia, en los sistemas a escala atómica no cualquier valor de la energía es posible. Por tanto, la transferencia de energía proveniente de la desexcitación de un átomo desde un nivel superior de energía a otro inferior debe realizarse en “paquetes” (cuantos de energía) que corresponden exactamente a la diferencia de energías entre los dos niveles de energía involucrados en la transición.

Las confirmaciones experimentales de esta nueva teoría fueron pronto apabullantes, y con ella se abrió ante nosotros la posibilidad explorar por vez primera un nuevo cosmos compuesto por moléculas, átomos, núcleos y partículas elementales, en lo que parece una cadena sin fin de viajes hacia lo extremadamente pequeño. La Teoría Cuántica predice con éxito las propiedades de las moléculas, los átomos, las partículas elementales y de las fuerzas con que interactúan, y en ella se fundamentan la química, la electrónica y, en el siguiente nivel de complejidad, la acción de las enzimas y de otras grandes moléculas que forman parte de los elementos fundamentales de la vida⁷.

Usando las más recientes técnicas de microscopía atómica de fuerza o de microscopía túnel, somos hoy capaces de tomar imágenes de átomos individuales, e incluso de manipularlos. Es importante que nos hagamos una imagen mental de lo reducido del tamaño de los átomos y de lo impresionante que es el que seamos capaces de visualizarlo. Por ello, les invito a que

⁷ Incluso, recientemente, cada vez son más frecuentes los estudios sobre las posibles analogías entre la dinámica de los sistemas cuánticos y la de sistemas como el propio cerebro humano (véanse, por ejemplo, [28] y [38]).

hagan el siguiente ejercicio: pensemos en el átomo más sencillo, el de hidrógeno, compuesto de un núcleo con un único protón y de un electrón que “orbita” alrededor del núcleo en lo que se denomina su “estado fundamental”. Ese átomo tiene en realidad un diámetro del orden de dos diezmilmillonésimas de metro ($2 \cdot 10^{-10}$ m). Para que nos hagamos una idea de lo que esto significa, ampliemos esta imagen utilizando una herramienta mental de tipo “Google Earth”: supongamos que agrandamos el átomo de hidrógeno hasta que tenga un diámetro de 10 metros, entonces ¿a qué distancia se habrá agrandado en esa nueva escala uno de nuestros antiguos metros? Pues a 50 millones de kilómetros, que es casi la distancia mínima que hay entre la Tierra y Marte.

Y si ahora nos preguntamos cómo es de pequeño el núcleo atómico con respecto al tamaño total del átomo, encontraremos que el tamaño del núcleo es del orden de una cienmilésima del diámetro del átomo⁸. Esto significa que si visualizamos nuestro átomo de hidrógeno como una esfera de 10 metros de diámetro, el núcleo (en este caso, un protón) sería un punto diminuto situado en el centro de la esfera y con un tamaño de una décima de milímetro, prácticamente indistinguible a simple vista.

Así de pequeños son los átomos y así de vacío está nuestro mundo. No hemos de olvidar que el núcleo atómico concentra la mayor parte de la masa de los átomos, ya que la masa del electrón es aproximadamente $1/1836$ veces la masa del protón. Este hecho fue ya observado por Ernest Rutherford en 1909, cuando estudió la dispersión de partículas α (núcleos de helio) al chocar con láminas de oro que tenían un espesor de tan sólo unas pocas átomos. Encontró que sólo una de cada 8000 partículas α volvían repelidas

⁸ En concreto, en el caso del átomo de hidrógeno, un protón tiene un diámetro de aproximadamente $1,65 \cdot 10^{-15}$ m.

en la dirección de incidencia, lo cual significaba que eran muy pocas las que impactaban directamente sobre el núcleo, que debía ser necesariamente muy pequeño. Igualmente, veremos que a escala cosmológica lo predominante en el momento actual de la evolución del Universo no es la materia, sino el “vacío”. Por ello, cómo realizar la descripción física del “vacío” será un problema que condicionará de forma decisiva nuestras predicciones la estructura, el pasado y el futuro del conjunto del Universo.

Es fundamental considerar el factor de escala a la hora de valorar los tremendos cambios conceptuales que supone abordar la descripción física (y, por tanto experimental) del mundo atómico. Parece claro que las reglas de nuestra intuición sensible no van a funcionar para describir este mundo aunque –y esto es lo más interesante– existen estructuras matemáticas que nos permiten dar cuenta de sus propiedades con toda precisión. Si nos basáramos tan sólo en la intuición sensible, intrínsecamente limitada por nuestras percepciones macroscópicas, no podríamos conocer mundo de los átomos. Las matemáticas y los conceptos en ellas expresables son, asombrosamente, el microscopio que nos ha permitido acercarnos al lenguaje del microcosmos. Esta idea está muy presente en los iniciadores de la Teoría Cuántica, y resulta pertinente recordar el siguiente texto, escrito por el físico alemán Werner Heisenberg en los años 30, y que corresponde a un artículo denominado “Lenguaje y realidad en la Física Moderna” [19]:

“Durante mucho tiempo se pensó que el problema del lenguaje jugaba en las Ciencias de la Naturaleza un papel puramente secundario ... Nuestro lenguaje se formó a partir del mundo que nos rodea y que podemos percibir por los sentidos. Sin embargo, la Física Moderna ha penetrado en un mundo (el del átomo) cerrado a nuestros sentidos. ... Al adentrarse en terrenos que ya no son asequibles a ellos, ha empezado a fallarnos también el lenguaje, cuyos conceptos quedan convertidos en herramientas embotadas, que no podemos utilizar con soltura, que no pueden calar en los nuevos terrenos del conocimiento.”

3.1. *El principio de incertidumbre*

En este contexto se comprende uno de los más famosos conceptos introducidos por la Teoría Cuántica: el principio de incertidumbre⁹. Su origen es sencillo y se basa en que para conocer necesitamos siempre medir, lo cual implica la existencia de un aparato de medida que interactúe con el sistema objeto de medida. Así, para medir la temperatura de un litro de agua con un termómetro de mercurio, deberemos introducir el termómetro en el recipiente que contiene el agua y esperar un poco para que los dos alcancen la misma temperatura. Y esto implica que la medida de la temperatura del termómetro no será nunca exactamente la temperatura del agua *antes* del experimento, sino la temperatura del sistema compuesto por el agua *más* el termómetro, y este último siempre modificará ligeramente la temperatura inicial del agua al introducirlo.

Es cierto que si la masa del termómetro es despreciable frente a la masa de agua este error generado por el propio proceso de medida resulta irrelevante, y puede despreciarse. Sin embargo, debido a su tamaño, los sistemas cuánticos son tremendamente sensibles a la medida de sus propiedades, y es prácticamente imposible realizar una medida sobre un átomo sin perturbar su estado. El problema de una formulación coherente de la teoría de la medida surge así como uno de los desafíos fundamentales de la Teoría Cuántica. Por ejemplo, si quiero medir con exactitud si un átomo se encuentra en una posición concreta del espacio deberé, por ejemplo, dirigir hacia ese punto un haz de fotones (cuantos de luz) y colocar un detector de fotones detrás. Si el átomo se coloca en ese punto en un instante determinado, uno de esos foto-

⁹ Para analizar éste y otros aspectos conceptuales de la Mecánica Cuántica es muy recomendable el ameno libro de Gilmore [18]. Con un punto de vista más técnico, pero conceptualmente muy sugerente, siempre es instructivo recurrir a Lévy-Leblond [22].

nes incidirá sobre el átomo, chocará con él y saldrá dispersado en otra dirección de modo que no detectaré el fotón en mi detector. De este modo podré decir que el átomo estaba exactamente ahí en el momento en el que el fotón impactó sobre él, pero habré perdido prácticamente toda la información sobre la velocidad del átomo, ya que el choque con el fotón le ha transferido energía cinética en cantidad desconocida. Es imposible, por tanto, conocer simultáneamente la posición y la velocidad de una partícula cuántica, lo cual es una de las muchas formulaciones posibles del principio de incertidumbre.

Esta indisolubilidad cuántica entre el observador y lo observado, así como otras paradojas conceptuales no resueltas a pesar de haber pasado más de ochenta años desde su formulación inicial (como la dualidad onda-corpúsculo o el carácter estrictamente probabilista de todas las predicciones realizadas por la teoría) hacen que muchos físicos piensen que, a pesar del indudable éxito cosechado hasta ahora, la Teoría Cuántica esconde algo esencial sobre la naturaleza que todavía no ha sido aclarado.

3.2. *q-bits y computadores cuánticos*

No obstante, nos encontramos con que los avances tecnológicos realizados en los últimos años y sus aplicaciones en la manipulación de sistemas a escala atómica han transformado este tipo de problemas otrora interpretativos de la Teoría Cuántica en fuente de aplicaciones tecnológicas con gran potencial. Así, la naturaleza intrínsecamente probabilista de la Teoría Cuántica ha conducido a una nueva disciplina, la computación cuántica, basada en la definición de nuevos algoritmos que se ha demostrado pueden romper barreras inalcanzables por la computación clásica.

Es conocido que los sistemas de computación clásica están basados en unidades de información (“bits”) que pueden tomar tan sólo dos valores,

0 ó 1. Los computadores actuales están basados en sistemas físicos regidos por las leyes de la Física Clásica en los que un bit se implementa como sistema clásico que sólo puede estar en el estado 0 ó en el estado 1. Esencialmente, la computación cuántica se basa en el hecho de que cualquier sistema cuántico de dos estados (el denominado “quantum bit” o “q-bit”) admite configuraciones en las que el sistema se encuentra *simultáneamente* con cierta probabilidad de estar en el estado 0 y con la probabilidad complementaria de estar en el estado 1. Esto permite construir toda una nueva familia de algoritmos (que se agrupan en la denominada teoría de la computación cuántica) que trabajen con estos q-bits “probabilistas” y con los que se pueden realizar los mismos cálculos que con los computadores clásicos, pero en algunos casos a una velocidad mucho mayor. En este sentido es importante insistir en que los computadores cuánticos no presentan un avance por su miniaturización, sino por el cambio en la teoría de computación subyacente, y sólo son realizables en sistemas que físicamente se comporten de manera cuántica¹⁰.

Entre las aplicaciones más buscadas de los computadores cuánticos está la implementación del algoritmo cuántico de Shor, que permite la descomposición de un número en sus factores primos en un tiempo de cómputo exponencialmente menor que en los algoritmos “clásicos” utilizados hasta ahora. Ha de tenerse en cuenta la importancia práctica de este problema, ya que el sistema criptográfico de clave pública RSA se basa en la dificultad práctica de la factorización, ya que un número suficientemente grande no puede factorizarse en tiempo reducido usando los algoritmos

¹⁰ La computación cuántica y la teoría de la información a ella asociada se ha convertido en los diez últimos años en un campo de investigación muy activo, tanto desde el punto de vista teórico como experimental. Una introducción a esta nueva rama de la Física puede encontrarse en [8].

“clásicos”. La primera realización experimental del algoritmo cuántico de Shor fue conseguida en 2001 a través de un computador cuántico de 7 q-bits realizado en un experimento de Resonancia Magnética Nuclear, y permitió factorizar el número 15 como 3×5 (véase [36]). Es importante destacar que en la actualidad son muchos los sistemas cuánticos de dos niveles que se están utilizando para intentar implementar algoritmos de computación cuántica de manera controlada¹¹.

A este respecto, el problema fundamental de carácter práctico que encuentra la construcción de computadores cuánticos es el denominado problema de la decoherencia: si queremos realizar un cálculo con un número grande de q-bits, es necesario acoplar muchos sistemas cuánticos de dos niveles de forma que se mantengan muy aislados del entorno mientras se realiza el cálculo, ya que la interacción con el entorno macroscópico provoca la pérdida de las propiedades estrictamente cuánticas del sistema y hace que el ordenador deje de funcionar. Si este problema se resuelve técnicamente y se consigue que los prototipos actuales de computadores cuánticos aumenten su capacidad de cómputo, algo tan abstracto como el carácter probabilista de la Mecánica Cuántica hará que deban replantearse de forma radical muchos de los sistemas de claves informáticas que se utilizan en nuestra vida cotidiana.

Pero hay un aspecto esencial de la Teoría Cuántica que planteó desde el principio problemas de compatibilidad conceptual con la Teoría de la Relatividad, y que resulta pertinente discutir en este momento.

¹¹ Entre ellos pueden citarse las trampas iónicas, retículos ópticos, Resonancia Magnética Nuclear de líquidos y sólidos, uniones superconductoras, redes de espines, condensados de Bose-Einstein, etc.

3.3. *No-localidad cuántica versus Teoría de la Relatividad Especial*

En un artículo publicado en 1935, Einstein, Podolski y Rosen plantearon un experimento mental (conocido como la “paradoja EPR”) en el que la aplicación de la Teoría Cuántica ponía de manifiesto una propiedad esencial de los sistemas cuánticos que denominaremos “no-localidad” [16]. En los últimos treinta años este experimento ha sido realizado –en alguna de sus muchas versiones posibles– en numerosas ocasiones, y los resultados obtenidos son siempre coincidentes con las predicciones de la Teoría Cuántica.

Supongamos que un cierto átomo emite simultáneamente dos fotones idénticos (llamémoslos A y B) que comienzan a viajar en direcciones opuestas del espacio. En ciertas condiciones perfectamente realizables hoy en día en el laboratorio¹², la Teoría Cuántica predice que si yo mido una cierta propiedad de uno de los fotones (por ejemplo, su estado de polarización) automática e inmediatamente la realización de la medida afecta al sistema en su conjunto. Esto significa que si yo mido el estado de polarización del fotón A, inmediatamente sabré cuál es el estado de polarización del fotón B sin necesidad de medirlo. Evidentemente, lo que se hace en los experimentos es comprobar ambas cosas: se mide primero el estado de A y tras un pequeño intervalo de tiempo T medimos sobre B, obteniendo siempre la predicción que nos proporciona la teoría.

Pero en este punto la Teoría de la Relatividad nos dice que no hay ninguna señal que pueda propagarse con velocidad mayor que la de la luz. Y nada nos impide esperar a que los dos fotones se distancien mucho para realizar nuestras dos medidas. Y si esta distancia entre los fotones es mayor que el producto de la velocidad de la luz por T será imposible que al fotón A le dé

¹² Por ejemplo, que el estado de polarización del sistema formado por los dos fotones sea un estado singlete.

tiempo a informar al B de cuál debe ser su estado antes de que pase un tiempo T. Por tanto, la medida sobre B se realiza sin que éste pueda recibir ningún tipo de información de A, y a pesar de todo, los resultados de los experimentos siempre nos dicen que B sabe inmediatamente lo que le pasa a A.

Hay dos posibles explicaciones de esta paradoja. La primera es aceptar que los sistemas cuánticos son intrínsecamente no-locales, es decir, que por muy alejados que puedan estar los dos fotones, ambos forman parte de un único sistema cuántico que “siente” inmediatamente cualquier medida que se realice sobre alguno de los componentes del sistema.

La segunda opción consiste en pensar que la Teoría Cuántica es incompleta en algún sentido, y que en la actual descripción cuántica de este sistema se nos escapa algún tipo de estructura adicional que dé cuenta de la correlación entre las medidas sobre los dos fotones sin necesidad de acciones instantáneas a distancia¹³. Sin embargo, han sido muchos los intentos de modificación de la Teoría Cuántica en este sentido, pero no parece que haya soluciones realmente satisfactorias¹⁴.

Por otro lado, las confirmaciones experimentales de esta no-localidad en el comportamiento de algunos sistemas cuánticos (que se denominan “entrelazados”) son abrumadoras y cada vez más frecuentes. Así, una de las consecuencias más llamativas de esta idea de no-localidad son los denominados experimentos de “teleportación”, en los que haciendo uso de la correlación entre las propiedades de dos componentes causalmente desconectadas de un único sistema cuántico es posible replicar el estado de una de las

¹³ Como puede inferirse del propio título del artículo original [16], ese era el punto de vista de los autores, y sobre todo del propio Einstein, que fue siempre favorable a la incompletitud de la Teoría Cuántica.

¹⁴ Véase, por ejemplo, [7] y [32] para una discusión detallada.

partes del sistema en la otra. Otras aplicaciones tecnológicas en desarrollo y basadas en los fenómenos de tipo EPR se encuentran en la criptografía cuántica, donde partículas entrelazadas se usan para transmitir información que no puede ser interceptada sin dejar huella, de modo que cualquier espionaje de la comunicación es detectado. Finalmente, cabe mencionar que también en el campo de la computación cuántica el entrelazamiento está siendo utilizado para diseñar sistemas que realicen computación cuántica en paralelo.

3.4. *El Modelo Estándar de la Física de Partículas Elementales*

Las dificultades en clarificar la fundamentación de la Teoría Cuántica no frenaron en absoluto el desarrollo de su formalismo y de sus innumerables aplicaciones, que se centraron primero en el campo de la física atómica y que después se extendieron en dos direcciones opuestas: de un lado, proporcionando una explicación física de las propiedades de moléculas, agregados atómicos y sólidos. De otro, profundizando en la estructura del núcleo atómico y, posteriormente, en las características de las partículas elementales que progresivamente se iban descubriendo como constituyentes cada vez más primarios de la materia.

A la vez, la Teoría Cuántica ha permitido continuar el proceso iniciado en 1864 por Maxwell al unificar los fenómenos eléctricos, magnéticos y ópticos en su Teoría Electromagnética. Los trabajos pioneros de principios de siglo realizados por Planck y Einstein sobre la radiación del cuerpo negro y el efecto fotoeléctrico, respectivamente, permitieron comenzar a identificar las propiedades cuánticas del campo electromagnético. En 1927 Dirac inició la descripción cuántica rigurosa de la interacción entre materia y radiación, que fue completada por Feynman en los años 40, dando lugar a la teoría que actualmente se conoce con el nombre de Electrodinámica Cuántica (conocida

como QED, “Quantum Electrodynamics”). La unificación de la QED con la interacción nuclear débil necesitó otros veinte años y dió lugar a finales de los 60 a la denominada “Teoría Electrodébil”¹⁵. Finalmente, la interacción nuclear fuerte fue descrita a través de la denominada Cromodinámica Cuántica (QCD, “Quantum Chromodynamics”) en un duro proceso de gestación que duró desde los años 60 hasta aproximadamente 1980¹⁶. Este esquema cuántico de unificación que contiene tanto todas las interacciones conocidas, salvo la gravedad, como todas las partículas elementales detectadas hasta el momento recibe el nombre¹⁷ de “Modelo Estándar” de la Física de Partículas Elementales¹⁸.

De forma muy sintética y cualitativa, el Modelo Estándar de la Física de Partículas Elementales propone que toda la materia está constituida por tan sólo doce partículas elementales distintas: seis denominadas quarks¹⁹ y otras seis denominadas leptones. Todas ellas son fermiones, esto es, cumplen el denominado “Principio de Exclusión de Pauli”. La característica fundamental de los quarks es que nunca pueden encontrarse aislados, ya que la interacción nuclear fuerte los mantiene agregados bien de tres en tres (formando los denominados bariones, como el protón y el neutrón, que son agregados de tres quarks) o bien de dos en dos (formando las partículas que se denominan mesones). Los quarks interactúan además a través de la fuer-

¹⁵ La unificación electrodébil fue realizada a lo largo de los años 60 por Glashow, Weinberg y Salam. En 1971, ‘t Hooft y Veltman mostraron que la teoría era renormalizable, lo cual permitiría realizar cálculos basados en teoría de perturbaciones.

¹⁶ La historia de la QCD está ligada inicialmente a los nombres de Gell-Mann y Zweig, pero a ella han contribuido un gran número de investigadores. Para una perspectiva histórica más completa de las denominadas teorías *gauge* unificadas referimos a [20].

¹⁷ La autoría de este nombre se atribuye habitualmente a Steven Weinberg.

¹⁸ Véanse [11] y [13] como obras de referencia introductorias.

¹⁹ Los seis quarks se denominan: up, down, charm, strange, top y bottom (u,d,c,s,t,b).

za débil y de la electromagnética. Por el contrario, los leptones no sufren la acción de la fuerza nuclear fuerte y, por ello, pueden encontrarse aisladamente. Son el electrón, el muón y la partícula tau, más tres partículas asociadas a ellos y denominadas neutrinos. Con este conjunto de doce elementos, agrupados adecuadamente, es posible construir toda la materia conocida²⁰.

Además, la Mecánica Cuántica del Modelo Estándar nos dice que dos partículas interactúan entre sí (se atraen o repelen, por ejemplo) intercambiando otras partículas, que se denominan “mediadoras” y que son siempre bosones, esto es, partículas que no cumplen el principio de exclusión de Pauli. Por tanto, el modelo estándar se completa mediante la introducción de una nueva fauna de partículas mediadoras que corresponderán a la fuerza electromagnética y a las fuerzas nucleares débil y fuerte. En concreto, las partículas que interactúan electromagnéticamente se intercambian fotones (que son exactamente los “cuantos” de radiación introducidos por Planck), la interacción nuclear débil implica el intercambio de tres bosones denominados W^+ , W^- y Z , y la interacción nuclear fuerte se realiza mediante el intercambio de ocho nuevas partículas denominadas “gluones”²¹.

Desde un punto de vista más técnico, la estructura básica que articula la unificación del modelo es la simetría subyacente (denominada simetría “gauge”, traducido en ocasiones como “de contraste”). Matemáticamente, la simetría de un modelo se expresa mediante la existencia de un grupo de

²⁰ El neutrino muónico fue descubierto en 1963 por Lederman, Schwartz y Steinberger. El leptón tau fue descubierto en 1975 por Perl, y tiene una masa que casi duplica la del protón. El muón es el más antiguo de la familia, y fue observado por vez primera en 1936 por Anderson. Es unas diez veces más masivo que el electrón.

²¹ Los bosones W y Z fueron detectados por vez primera en 1983 en el CERN, como fruto de un gran experimento dirigido por Rubbia y van der Meer. El quark “top” fue creado experimentalmente en 1995 y el neutrino tau en 2000, ambos en el Fermilab.

simetrías del mismo, y en este caso el Modelo Estándar se construye a partir del grupo de simetría denominado $U(1) \times SU(2) \times SU(3)$. Las partículas elementales y las interacciones están siempre relacionadas con ciertas representaciones irreducibles de este grupo de simetría subyacente. En este sentido (y ésta es una idea que se ha mostrado extremadamente útil en Física de Partículas) la simetría es la estructura básica de toda teoría física fundamental, y de su realización concreta dependerá el número y tipo de las partículas e interacciones que el modelo pueda incorporar. Desde este punto de vista, no es extraño que todas las generalizaciones del Modelo Estándar se intenten construir modificando adecuadamente sus simetrías.

Sin embargo, además de no incluir la gravedad, el Modelo Estándar presenta un importante defecto: contiene en su definición una lista de 21 constantes cuyo valor debe conseguirse mediante medidas experimentales directas. Estas constantes especifican, por ejemplo, las masas de los quarks y de los leptones o las intensidades de las interacciones fundamentales. Sin embargo, no hay por el momento ninguna teoría más fundamental que el propio Modelo que permita predecir los valores de estas constantes fundamentales. Es, en cierta medida, un modelo demasiado empírico para ser satisfactorio teóricamente, ya que desconocemos el origen de los mecanismos físicos que determinan que las masas de las partículas elementales sean los que medimos en los grandes aceleradores de partículas construidos al efecto. Además, la reciente constatación de que los neutrinos son partículas con una pequeña masa²² (a través de la medida de las oscilaciones de los neutrinos provenientes del sol) implica necesariamente que el actual Mode-

²² Nótese que el neutrino, al no poseer carga eléctrica, resulta muy débilmente interactuante con la materia y, por tanto, muy difícil de detectar. De hecho, sobre cada centímetro cuadrado de nuestro cuerpo están incidiendo cada segundo tantos neutrinos procedentes del sol como habitantes tiene nuestro planeta... y no los notamos.

lo Estándar es incompleto, ya que la predicción sobre el valor de la masa de los neutrinos queda fuera de su capacidad predictiva²³.

3.5. *El bosón de Higgs y el LHC*

El Modelo Estándar predice además la existencia de una nueva partícula elemental, el bosón de Higgs, que no ha sido todavía encontrada experimentalmente ya que su hipotética detección requiere disponer de aceleradores de partículas de gran energía. Sin embargo, la importancia teórica de esta partícula es muy elevada, ya que el bosón de Higgs es el mediador asociado a un campo, el campo de Higgs, que podría explicar el mecanismo de generación de las masas de las partículas elementales del Modelo Estándar.

Una de las razones para la construcción del LHC (el Large Hadron Collider, “Gran Colisionador de Hadrones”) en el Centro Europeo de Investigaciones Nucleares de Ginebra (el CERN) es precisamente disponer de un gigantesco acelerador de partículas con la energía suficiente para detectar el bosón de Higgs, si es que existe. Además, las energías en él disponibles podrían ser suficientes para detectar partículas supersimétricas, un ingrediente esencial de algunas teorías de unificación como ciertas teorías de cuerdas a las que más adelante nos referiremos²⁴. Además, el LHC debería permitir medidas mucho más precisas de las masas de los quarks, así como estudiar con detalle el problema de la ruptura de simetría entre materia y antimateria²⁵.

²³ En palabras de Kerson Huang: “El nombre de Modelo Estándar... es una forma de describir un trabajo en curso. Con su profusión de estructuras elementales, constantes de acoplamiento y masas, es difícil creer que no exista algo más fundamental bajo su superficie” (traducción libre de [20], p. 179).

²⁴ También podría, en principio, generar micro-agujeros negros y monopolos magnéticos.

²⁵ De alguna forma, nuestro Universo ha preferido la materia frente a la antimateria, situación que es “menos simétrica” que la de un mundo en que coexistieran.

Este gran acelerador tiene prevista su inauguración oficial en octubre de 2008, y constituye un gran desafío a la colaboración científica internacional²⁶. El LHC será el acelerador de partículas más grande y potente jamás construido, y resultará de la colaboración de más de 2000 científicos pertenecientes a cientos de Universidades y laboratorios de 34 países distintos. El LHC realizará esencialmente experimentos de colisión de dos haces de protones que serán acelerados en sentidos contrarios dentro un túnel circular de 27 kilómetros de circunferencia y 3,8 metros de diámetro ubicado en las instalaciones del CERN (ubicado en la frontera franco-suiza cerca de Ginebra), a una profundidad de entre 50 y 175 m. Los protones tendrán una energía de 7 TeV²⁷, lo cual significa una energía de colisión de 14 TeV. Para mantener los protones confinados en el anillo acelerador serán necesarios 1232 imanes superconductores, que se unirán a otros 392 destinados a focalizar los haces de protones para aumentar la probabilidad de impacto. Para refrigerar estos imanes superconductores será necesario disponer de 96 toneladas de helio líquido, lo cual convierte al LHC en la mayor instalación criogénica del mundo a esa temperatura²⁸.

Desde la introducción del Modelo Estándar de la Física de Partículas elementales han sido muchos los intentos teóricos y experimentales para ampliar el modelo e incluir en él la interacción gravitatoria. Un modelo de este tipo que combinara la Teoría Cuántica y la Relatividad General podría

²⁶ En <http://lhc.web.cern.ch/lhc> puede encontrarse información detallada y actualizada del LHC.

²⁷ Recuérdese que $1 \text{ TeV} = 10^{12} \text{ eV}$. El eV (electrón-Voltio) es la unidad de energía que se emplea frecuentemente a escala atómica, y su equivalencia es $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ julios}$. Es importante recordar este orden de magnitud energético para compararlo con el de los experimentos de física de astropartículas.

²⁸ El coste final estimado del LHC puede llegar a ser de 6400 millones de euros.

dar cuenta –por ejemplo– de la física del Universo en sus primeros instantes de vida después del Big Bang, ya que en ellos la densidad de masa sería tal que la interacción gravitatoria sería comparable con el resto de fuerzas, y por tanto habríamos de tenerla en cuenta al describir el comportamiento cuántico de la materia. Hasta el momento, las tentativas de una teoría unificada de este tipo no resultan satisfactorias, tal y como describiremos en páginas posteriores. En cualquier caso, si el LHC no fabrica bosones de Higgs, toda una gran familia de modelos de Gran Unificación tendrá que replantearse.

Para intentar entender las dificultades conceptuales que, en cualquier caso, presenta esta unificación, pasamos a continuación a describir brevemente nuestra visión actual de la interacción gravitatoria.

4. La Teoría de la Relatividad

Simultáneamente a la revolución cuántica, en los primeros veinte años del siglo XX Einstein propuso su Teoría General de la Relatividad, donde el espacio y el tiempo dejaron de ser el fondo inmutable y absoluto en el que acontecía todo para convertirse en un único ente, el espacio-tiempo, tan dinámico como la propia materia. En esta Teoría el propio espacio-tiempo evoluciona y se transforma indisolublemente con la materia y la energía, que son realidades equivalentes y generan interacción gravitatoria. En definitiva, la Teoría General de la Relatividad es una teoría de la gravitación en la que ésta se entiende como una deformación de la geometría del espacio-tiempo.

4.1. *La Teoría de la Relatividad Especial*

“La materia es lo movable en el espacio. El espacio que es igualmente movable, se llama material, o también espacio relativo; aquél en el que debe pensarse por último todo movimiento (que es, por tanto, asimismo absolutamente inmóvil) se denomina espacio puro, o también espacio absoluto.”

Immanuel Kant,
*“Principios metafísicos de la Ciencia de la Naturaleza”*²⁹

Einstein publicó en primer lugar (septiembre de 1905) la Teoría Especial de la Relatividad, que se basaba en una ruptura con la noción de espacio absoluto propia de la Física de Newton, donde se suponía que existía un sistema de referencia privilegiado en el Universo que se encontraba en reposo absoluto. Por el contrario, Einstein propone el “Principio de Relatividad Especial” que afirma que las leyes de la Física deben ser las mismas para cualesquiera dos sistemas de referencia que se muevan relativamente entre sí con velocidad constante. No existiría, por tanto, ningún sistema de referencia inercial que fuera privilegiado.

Esta hipótesis es consistente con la confirmación experimental –realizada por Michelson y Morley en 1887– de que la luz se propagaba con una velocidad universal constante, que era independiente de la velocidad con la que se moviera la fuente emisora de la luz. Este hecho implicaba que debíamos modificar la ley de composición de velocidades a que estamos acostumbrados: si se lanza una pelota dentro de un vagón de tren en la misma dirección en la que se mueve el tren, un observador exterior medirá que la pelota se mueve con una velocidad total que es la suma de ambas velocidades, la

²⁹ Capítulo I, Enunciado 1 [21].

del vagón y la de la pelota. El experimento de Michelson y Morley consistió en medir con mucha precisión esta composición de velocidades, utilizando la propia Tierra como vagón que se desplaza en el espacio a unos 30 kilómetros por segundo, y tomando la luz como la pelota que se lanza. Sorprendentemente, el resultado es que la velocidad de la luz era siempre la misma, estuviera o no emitida en la misma dirección del movimiento de la Tierra³⁰.

¿Qué significaba esto? Que la ley de composición de velocidades que veníamos utilizando no era la correcta, lo cual implicaba que debíamos modificar la forma en que describimos matemáticamente la medida de la posición y de la velocidad de un objeto con respecto a dos sistemas de referencia que se mueven con velocidad constante entre sí. Einstein propuso que las ecuaciones de transformación clásicas, denominadas transformaciones de Galileo, fueran sustituidas por unas nuevas ecuaciones de transformación de coordenadas: las transformaciones de Lorentz. Con ellas se explicaba perfectamente el resultado obtenido por Michelson y Morley y, además, se predecía que ningún objeto en movimiento podría alcanzar jamás una velocidad superior a la de la luz, a diferencia de la física Galileana en la que no existe límite alguno para la velocidad de los móviles. Por supuesto, las transformaciones de Galileo se recuperaban como límite de las transformaciones de Lorentz cuando la velocidad relativa entre los sistemas de referencia es muy pequeña con respecto a la velocidad de la luz.

³⁰ El experimento de Michelson-Morley se planteó para determinar la existencia del éter luminoso, fluido que debía llenar todo el espacio para posibilitar la propagación de las ondas de luz y que debía encontrarse en reposo con respecto al sistema de referencia “absoluto”. Como la Tierra debía moverse con respecto a dicho éter y éste se movía solidariamente con el “sistema de referencia universal”, cabía esperarse que la velocidad de propagación de la luz variara cuando se medía en distintas posiciones de la Tierra escogidas a lo largo de su órbita. La respuesta fue claramente negativa.

La velocidad de la luz se convertía así en una constante universal de carácter fundamental. Pero, además, las transformaciones de Lorentz eran matemáticamente muy distintas a las de Galileo ya que mezclaban de forma indisoluble las coordenadas que nos indican la posición y el tiempo de un determinado evento. Esto es, si la naturaleza se comporta conforme a la relatividad de Einstein, tenemos que aceptar que el espacio y el tiempo no sólo no son marcos absolutos e inamovibles, sino que ambos conceptos son parte de un único todo, el espacio-tiempo relativista, y que nuestras determinaciones de longitudes y de intervalos de tiempo no son independientes de la velocidad relativa con que se mueven los observadores que las realizan.

Como puede pensarse, esta afirmación –contrastada experimentalmente desde entonces en multitud de ocasiones– inauguró una segunda revolución en nuestra visión física del Universo, que fue contemporánea a la de la Mecánica Cuántica, y propició grandes discusiones de contenido filosófico. Pero las sorpresas no acabaron ahí. Al estudiar Einstein las consecuencias de la nueva teoría en lo que se refería a las medida de las energías de las partículas, se desveló que la teoría especial de la relatividad implicaba un nuevo concepto revolucionario: la equivalencia entre masa y energía. A una partícula en reposo con masa m_0 le debía corresponder una energía dada por la famosa fórmula de Einstein: $E=m_0 c^2$. Por tanto, cabía pensar que la masa pudiera convertirse en una fuente gigantesca de energía, como se demostró en los años 30 al estudiar los procesos de desintegración nuclear.

4.2. *La Teoría de la Relatividad General*

“La Geometría es el arquetipo de la belleza del mundo”

Johannes Kepler

Ahora bien, probablemente la contribución más importante de Einstein a la Física se gestó entre 1907 y 1915, cuando se propuso encajar en su nuevo

esquema relativista la descripción del movimiento de los cuerpos (y en general, de todas las leyes de la Física, incluyendo la gravitación) con respecto a sistemas de referencia que puedan estar acelerados. La resolución de este problema de forma consistente con todo lo que hemos descrito anteriormente llevó a Einstein a proponer el Principio de Relatividad General: *“Todas las leyes de la Física deben ser las mismas para todos los observadores, sea cual sea el estado de movimiento relativo –acelerado o no– entre ellos”*³¹.

Añadiendo a este postulado la equivalencia entre masa inercial y gravitatoria, y utilizando toda la maquinaria matemática de la geometría Riemanniana desarrollada en el siglo XIX, Einstein construyó su Teoría General de la Relatividad, una teoría esencialmente geométrica de la gravitación, que fue publicada en 1916. En ella se nos propone una descripción de la fuerza de la gravedad y del propio espacio-tiempo que es completamente nueva³².

La idea esencial derivada de la equivalencia entre masa inercial y gravitatoria es que toda masa y toda energía generan un campo gravitatorio (no olvidemos la equivalencia masa-energía de la Relatividad Especial)³³. Además, la gravedad debe entenderse realmente como una deformación del espacio-tiempo debida a la presencia de esa fuente de masa, de energía o de ambas. Para hacernos una idea de este modelo, pensemos en el espacio-tiempo como en una sábana que mantenemos tensada y horizontal entre varias personas. Si alguno de nosotros arroja una bola de billar encima de la sábana, la bola acabará parándose en el centro y creando una deformación de la

³¹ Véase, por ejemplo, [15]. Con una perspectiva más técnica, véase [37].

³² Recordemos que en 1907 Minkowski introdujo el espacio-tiempo que lleva su nombre, mediante el cual pudo realizar la formulación geométrica de la relatividad especial que serviría de precursora para los desarrollos posteriores.

³³ Recordemos que en la Teoría de la Gravitación de Newton la fuente del campo gravitatorio es tan sólo una cierta propiedad de la materia: la masa.

sábana hacia abajo. Esto es, la presencia de cualquier masa curva hacia ella el espacio-tiempo (nuestra sábana). Si ahora dejamos una canica sobre la sábana, la canica va a acabar su movimiento junto a la bola de billar, porque se ha visto atraída hacia ella a través de la deformación del espacio-tiempo que esta última ha creado. Eso es exactamente la atracción gravitatoria, y lo mismo pasa con todos y cada uno de los cuerpos y de las distintas formas de energía: todos ellos distorsionan la geometría del espacio-tiempo generando atracción gravitatoria. La materia, la energía, el espacio y el tiempo se entrelazan a través de la geometría curva en la que consiste nuestro Universo. Parafraseando a Wheeler [39], podemos resumir la Relatividad General de la siguiente forma: *“el espacio-tiempo dice a la materia cómo ha de moverse y la materia dice al espacio-tiempo cómo ha de curvarse”*.

Pero, una vez más, el factor de escala es esencial. Es verdad que todos nosotros deformamos el espacio-tiempo a nuestro alrededor (en función de nuestra masa y de nuestra energía), pero debido a nuestra pequeña masa esa deformación es totalmente inapreciable (pensemos en nuestra sábana pero sustituyendo la bola de billar por una mota de polvo). Sin embargo, los objetos como estrellas, galaxias o agujeros negros tienen masas suficientes como para hacer observable este efecto de deformación del espacio-tiempo circundante. Así, Einstein predijo genialmente que la luz, que en un universo libre de masas se propaga en línea recta, se curvaría al pasar cerca de un objeto tan masivo como el sol³⁴. La comprobación experimental de este hecho en 1919 por parte de Eddington supuso el espaldarazo definitivo de esta Teoría, y convirtió al propio Einstein en el científico más famoso de su tiempo.

³⁴ La curvatura de los rayos de luz por campos gravitatorios intensos ha conducido al concepto de “lente gravitacional” un campo muy activo de la astronomía que nos permite conocer propiedades de dichos campos gravitatorios analizando cómo curvan la luz que pasa próxima a ellos.

Además, cuando las masas implicadas son suficientemente grandes, la Teoría General de la Relatividad proporciona correcciones a las trayectorias calculadas mediante la ley de la Gravitación de Newton. De hecho, la explicación por parte de Einstein de las pequeñas anomalías observadas en la órbita de Mercurio constituyó el primer éxito de esta Teoría³⁵, y sus predicciones se han confirmado con precisión para otros planetas, como Venus y la Tierra.

4.3. *La constante cosmológica*

Que la geometría del espacio-tiempo puede evolucionar con el tiempo de forma dinámica es una de las afirmaciones básicas de la Relatividad General. Sin embargo, el propio Einstein se vio sorprendido por su teoría en cuanto los investigadores empezaron a aplicarla al Universo en su conjunto. Se encontraba así que el Universo evolucionaba en el tiempo, pudiendo expandirse, contraerse e incluso pudiendo tener un principio (lo que ahora conocemos como el Big-Bang, la gran explosión) y también un final. Desde Aristóteles siempre se había pensado que el Universo era estático e inmutable, y Einstein se resistió a abandonar esta idea³⁶.

Por ello, en cuanto los primeros modelos cosmológicos basados en sus ecuaciones empezaron a desarrollarse, fue claro que en ellos el Universo podía variar de tamaño en función de la cantidad de materia y energía de que esté constituido en su totalidad. Sin embargo, Einstein creía que la idea

³⁵ Obsérvese que la anomalía en el perihelio de Mercurio era la *única* discrepancia experimental de la gravitación newtoniana conocida antes de la formulación por Einstein de la Relatividad General en 1916 (en concreto, la primera observación de este efecto databa de 1859).

³⁶ No olvidemos que en la época de Einstein el conocimiento de nuestra galaxia era todavía limitado, y las observaciones astronómicas de otras galaxias eran muy escasas.

de la inmutabilidad del Universo era irrenunciable, y se dio cuenta de una manera de mantenerla: modificar ligeramente sus ecuaciones iniciales añadiendo un término que diera cuenta del hecho de que la densidad de energía del espacio vacío fuera una constante ligeramente distinta de cero. Esta densidad de energía del vacío debía además ser la misma para todos los observadores y en todos los puntos del espacio-tiempo, por lo que recibió el nombre de “constante cosmológica” (y habitualmente se designa con la letra griega Λ).

En las ecuaciones de Einstein, la materia tiende a contraer el Universo a través de la atracción gravitatoria que ejerce sobre sí misma. Sin embargo, si esta constante cosmológica Λ era distinta de cero y positiva su efecto era el contrario, generando una expansión acelerada del Universo. Por tanto, con la presencia de Λ ambas tendencias podrían cancelarse adecuadamente y conseguir que en conjunto el Universo ni se expanda ni se contraiga, siempre que se consiga ajustar adecuadamente el valor de la constante cosmológica.

Sin embargo, pronto se vio que la solución estática era una situación de equilibrio inestable que exigía un finísimo ajuste *ad hoc* de la constante cosmológica, algo ciertamente improbable. Además, las observaciones de Hubble y otros astrónomos a finales de los años 20 pusieron de manifiesto que el Universo se estaba expandiendo, lo cual era consistente con una solución de las ecuaciones de Einstein (sin Λ) que había sido encontrada por Friedman. Al final de su vida, Einstein diría que la constante cosmológica fue su error más importante. Sin embargo, como veremos a continuación, la sombra de la constante cosmológica es alargada y llega hasta nuestros días.

4.4. *El problema de la energía oscura*

“Pero Aristarco de Samos escribió un libro conteniendo algunas hipótesis, en el cual las premisas conducían al resultado de que el tamaño del Universo es muchas veces superior a lo que ahora recibe este nombre.”

Arquímedes de Siracusa, *“El calculador de arena”*.

El problema de la constante cosmológica ha cobrado inusitada actualidad desde que las observaciones de explosiones de supernovas muy lejanas realizadas a finales de los años 90 indicaron que la velocidad de expansión del Universo³⁷ crecía actualmente con una aceleración constante y pequeña, pero no nula, hecho que ha confirmado recientemente el análisis detallado de la radiación de fondo de microondas. Ha de considerarse que, en cualquier modelo posible de evolución, la aceleración en la expansión del Universo ha tenido que ser durante mucho tiempo lo suficientemente pequeña como para que hayan podido formarse galaxias y estrellas, lo cual impone una cota bastante restringida para los valores de dicha aceleración.

Pero lo sorprendente es que teniendo en cuenta toda la materia y energía conocidas, e incluso toda la nueva materia oscura (de la cual hablaremos más tarde) y haciendo los cálculos correspondientes con las ecuaciones de Einstein, encontramos que el Universo *no* debería expandirse aceleradamen-

³⁷ Iniciada en la “gran explosión” (Big Bang) hace unos 13700 millones de años. Es el modelo cosmológico del origen del Universo que mejor encaja actualmente con todas las medidas experimentales realizadas, y fue propuesto por vez primera por Lemaitre. La idea actual es que el Universo se originó desde una “condición inicial” tremendamente caliente y densa (que el modelo no explica), y se expandió muy rápidamente durante un corto periodo de tiempo (el periodo inflacionario) para luego disminuir rápidamente su velocidad de expansión, que es de magnitud relativamente pequeña desde entonces, tal y como Hubble detectó por primera vez a finales de los años 20.

te. Muy al contrario, con la masa y energía que conocemos debería estar haciendo justamente lo contrario: desacelerando su expansión.

Ante esta tesitura, hay dos soluciones posibles. La primera es que quizá la Relatividad General no es aplicable para todo el Universo en su conjunto, y sólo funcione bien a escalas más pequeñas como nuestro sistema solar o el interior de una galaxia. La segunda alternativa es que exista una desconocida forma de energía, la “energía oscura”, que esté repartida uniformemente en todo el Universo y provoque la aceleración de su expansión. Pero en términos de la Teoría General de la Relatividad, esta energía oscura puede identificarse exactamente con la existencia de una constante cosmológica positiva, recuperando la idea denostada por el propio Einstein. Esta es la interpretación estándar en este momento, y la constante cosmológica ha encontrado 80 años más tarde una justificación como el reflejo de la medida de la energía oscura del Universo.

¿Cuál es el orden de magnitud de la energía oscura, de la densidad de energía del vacío necesaria para explicar la expansión actual del Universo? Realmente muy pequeño. Tan pequeño que es virtualmente imposible detectarlo en el laboratorio, pero que al repartirse uniformemente en todo el espacio realiza una contribución muy importante a la energía del todo el Universo. Para hacernos una idea, y teniendo en cuenta la equivalencia masa-energía, la energía oscura sería equivalente a tener cinco átomos de hidrógeno por cada metro cúbico de espacio. De otro modo, y por si a alguna persona de la audiencia se le ha ocurrido pensar en explotarla como potencial fuente de energía, toda la energía oscura contenida en el volumen de una esfera del tamaño de la Tierra sería equivalente a la energía necesaria para el consumo anual de electricidad de una ciudad de tamaño mediano [17]³⁸.

³⁸ Con respecto a la crisis energética en la que sin duda nos hallamos inmersos, no me resisto a citar un dato debido a Rubbia y que pone de manifiesto el papel clave que desem-

En el fondo, los físicos han sido siempre conscientes de que la mayor parte de las teorías cuánticas de campos predecían precisamente que la densidad de energía del vacío no podía ser nula. De forma muy simplificada, cabría decir que esto es debido al propio principio de incertidumbre, por el que nunca podremos afirmar que en un determinado volumen de espacio hay energía cero, ya que esto implicaría realizar una observación de esa zona durante un tiempo infinito. Por tanto, incluso a temperatura cero, todo sistema cuántico tiene una energía que es la denominada “energía del vacío” y que proviene de las inevitables “fluctuaciones cuánticas” del mismo. Cuando se hacen los cálculos y se estima a qué constante cosmológica correspondería este efecto cuántico, se encuentra un resultado disparatado: una constante cosmológica que sería 120 órdenes de magnitud superior al límite máximo que podemos admitir experimentalmente. Un universo con constante cosmológica como la que –erróneamente– nos proporciona la actual teoría cuántica se habría expandido desde su inicio a tal velocidad que no existirían ni galaxias, ni estrellas, ni planetas... ni existiríamos nosotros. Esta es, quizás, “la peor predicción jamás realizada por una teoría científica” [34].

De este modo, el problema de la constante cosmológica se ha convertido en el nudo más evidente de la incompatibilidad actual entre la Teoría Cuántica y la Teoría General de la Relatividad. Antes del descubrimiento de la expansión acelerada en 1998, parecía que ciertas teorías cuánticas muy sofisticadas que comentaremos más adelante, las famosas teorías de cuerdas, podían dar una explicación cuántica de una constante cosmológica que fuera cero o negativa. Pero nos hemos dado cuenta de que esto no coincide con la realidad.

peña la energía solar para nuestro futuro: la cantidad de energía solar que recibe Arabia Saudí anualmente es 1000 veces mayor que la cantidad de energía que se produce con todas sus reservas de petróleo y gas natural en el mismo periodo. No cabe duda que ninguna otra fuente conocida de energía nos garantiza un flujo comparable de energía *gratis* durante tantos millones de años.

4.5. *El problema de la materia oscura*

“La naturaleza gusta de esconderse”

Heráclito de Efeso (llamado “el Oscuro”)

Dejando aparte los problemas de su relación con la Mecánica Cuántica y de la inclusión o no de la constante cosmológica, parecería que nuestra comprensión de la Gravedad parecía bastante completa y definitiva. Las predicciones de la Relatividad General coincidían con gran precisión con lo observado del movimiento de los planetas, las galaxias y sus agrupaciones, y el hecho de que la luz sea curvada por las grandes masas estelares nos permite calcular estas últimas realizando observaciones con nuestros telescopios. Además, la ley de la Gravitación Universal de Newton no es más que una consecuencia de las ecuaciones de Einstein cuando se consideran masas no demasiado grandes y movimientos con velocidades pequeñas comparadas con la de la luz, por lo que sigue siendo aplicable en muchos contextos. Sin embargo, en los últimos años nos hemos encontrado alarmantes y sistemáticas evidencias experimentales de que quizás aquí tampoco el suelo es muy seguro.

Los problemas han aparecido al hacer medidas de las masas de un número importante de galaxias. Hay esencialmente dos formas de medir la distribución de masa de una galaxia: la primera es utilizando la Gravitación para deducir la masa a partir de las velocidades a las que orbitan las estrellas dentro de la galaxia (o también analizando el movimiento de otras galaxias respecto a la primera). La segunda es realizar una medida “directa” de la masa sumando las contribuciones de todas las estrellas, el gas y el polvo de la galaxia que se pueden observar directamente utilizando toda nuestra instrumentación astronómica y en todo el rango del espectro electromagnético.

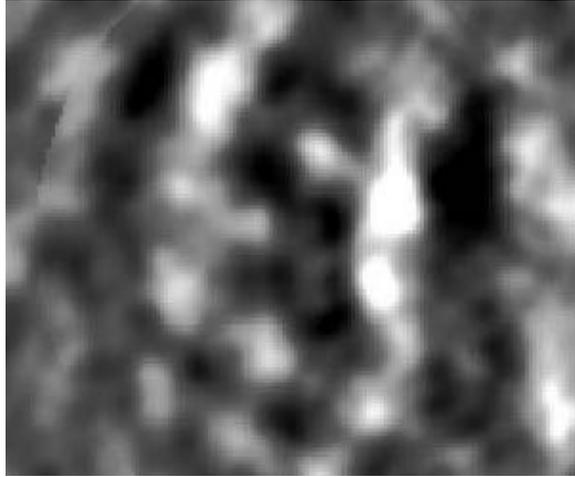


Figura 1. Los modelos actuales del Big-Bang, la gran explosión con que se cree comenzó nuestro Universo, implican que la radiación de fondo de microondas del Universo sólo puede tener la apariencia granular que se muestra en la Figura si se tiene en cuenta la contribución de cantidades apreciables de materia y energía oscuras. Aquí se muestra el perfil inhomogéneo de la radiación de fondo, obtenido en medidas recientes realizadas en el VSA (“Very Small Array”), un moderno grupo de telescopios de microondas del Observatorio del Teide, en Tenerife. Los gránulos de la Figura son el objeto más antiguo jamás observado, y representan fluctuaciones en la temperatura del Universo tan sólo un millón de años después del Big Bang. Esto es, estamos ante objetos “arqueológicos” con aproximadamente 13700 millones de años de antigüedad³⁹.

Se han realizado numerosas medidas de este tipo y los resultados deberían coincidir independientemente del método utilizado. No es así. En concreto, se han medido las masas de más de un centenar de galaxias utilizando ambos métodos, y en el 80% de los casos los resultados son discrepantes. En muchas galaxias las dos medidas de la masa difieren incluso en un factor 10 (e incluso más) y el error es siempre del mismo tipo: las estrellas suficientemente lejanas se mueven con velocidades que corresponden a masas de las galaxias que son mayores que las que somos capaces de observar.

³⁹ Figura tomada de <http://antwrp.gsfc.nasa.gov/apod/ap020529.html>.

Una vez más, sólo hay dos posibles explicaciones: o bien en las galaxias hay mucha más masa que la que observamos, o bien nuestra teoría de la gravitación no predice de un modo correcto el movimiento de las estrellas orbitando alrededor de las galaxias.

Como hemos visto con anterioridad, para que la expansión del Universo se produzca con la aceleración actual sería necesario contar con grandes cantidades adicionales de energía y de materia (que denominamos “oscuras”). La hipótesis de la existencia de materia y energía oscura ha sido fuertemente reforzada por las medidas recientes de la radiación de fondo de microondas que llena todo el Universo como residuo del Big Bang, la gran explosión inicial. La conclusión, basada en un análisis muy complejo y detallado de las pequeñas inhomogeneidades de esta radiación, es que sólo un universo que contara en su inicio con notables cantidades de materia y energía adicionales a las conocidas sería consistente con la estructura “granular” de la radiación de fondo que ahora observamos (ver Figura 1).

En consecuencia, a día de hoy la mayor parte de los científicos se inclinan por la primera opción, lo cual supone admitir la existencia en las galaxias de mucha más masa de la que vemos⁴⁰. Como todas las formas de materia que conocemos emiten luz en alguna región del espectro, si existe una materia que no vemos en absoluto ésta debe ser un nuevo tipo de materia que no interacciona electromagnéticamente con la materia y, por tanto, ni emite ni absorbe ni refleja la luz. Además, como las discrepancias son tan

⁴⁰ En 2006 se ha anunciado la primera “detección directa” de materia oscura mediante la observación de los rayos X que provienen de un agregado de galaxias originado por una colisión. Parece ser que el comportamiento de la materia oscura durante la colisión podría explicar la estructura actual del “cluster”. Si es así, esta “detección” de materia oscura sería independiente de la teoría de la gravitación que se considere, aunque se está todavía a la espera de resultados más concluyentes.

numerosas y relevantes, debemos concluir con asombro que algunas galaxias están compuestas mayoritariamente de esta “materia oscura”, una gran cantidad de materia que “debe estar ahí” aunque no podamos verla.

La primera medida de la anomalía de la masa esperada de las galaxias fue realizada por Zwicky en 1933, pero hasta finales de los años 60 no se realizaron medidas sistemáticas por parte de la astrónoma Vera Rubin. Desde entonces se han realizado muchas y más precisas medidas, que no han hecho sino aumentar progresivamente la contribución de la materia oscura a la masa de las galaxias. Aunque hay alguna galaxia (como NGC 3379) que parece no tener prácticamente materia oscura, el caso extremo lo encontramos en VIRGOHI21, una galaxia descubierta en 2005 y que parece estar compuesta casi exclusivamente de materia oscura. Esta galaxia contendría aproximadamente una décima parte de la masa de nuestra galaxia, la Vía Láctea, que se piensa puede tener aproximadamente 10 veces más de materia oscura que ordinaria. Parece que este tipo de “galaxias oscuras” deberían ser bastante comunes, atendiendo a predicciones basadas en los modelos actuales del Big Bang y de la formación de galaxias, pero VIRGOHI21 sería el primer caso observado.

De modo que, recapitulando, a día de hoy se acepta que (véase, por ejemplo, [2] y [4]) para que el Universo tenga la expansión acelerada que observamos ahora, debe contener nada menos que un 70% de energía oscura. Del resto, un 26% debe ser la materia oscura de la que acabamos de hablar y tan sólo un 4% quedaría para la materia y la energía ordinarias a las que estamos acostumbrados, descritas por el Modelo Estándar de la Física de Partículas Elementales y que han sido el objeto de estudio de la Física, la Química, la Geología y la Biología hasta el día de hoy. En concreto, toda la materia contenida en las estrellas brillantes sería tan sólo el 0,4% de todo lo que existe en un Universo que, en los últimos 20 años, se nos ha convertido de repente en un inmenso desconocido.

Ahora bien, si queremos seguir por esta vía de explicación tendremos que hacer alguna hipótesis sobre la naturaleza y origen de esta materia oscura en términos de la Teoría Cuántica de Partículas Elementales. Son muchos los candidatos que se proponen para este fin, pero ninguno de ellos forma parte del Modelo Estándar que hemos descrito con anterioridad. Es cierto que se han propuesto diferentes extensiones del modelo estándar que proporcionan candidatos de nuevas partículas masivas que no interactúan electromagnéticamente, pero ninguna de ellas ha sido detectada hasta el momento.

Entre los candidatos a convertirse en WIMPs (“Weakly Interacting Massive Particles”, partículas masivas débilmente interactuantes) se encuentran los neutralinos, que podrían generarse de forma estable a partir de algunas variantes del Modelo Estándar, denominadas modelos supersimétricos. Algunos de estos modelos predicen que los neutralinos podrían tener masas de entre 100 y 300 GeV, lo que les colocaría como posibles partículas detectables en el LHC (para hacernos idea de lo que significa la creación de un neutralino a partir de un choque de protones, un átomo de uranio tiene una masa de 235 GeV). Además están en marcha algunos proyectos como el DAMA (Dark Matter) en Italia o el CDMS (Cryogenic Dark Matter Search) en EE.UU., que persiguen la detección de algún tipo de evento que muestre la interacción (siempre muy débil) de la materia oscura con materia ordinaria.

4.6. *Una alternativa: ¿es incorrecta la teoría de la Gravitación?*

La segunda alternativa al problema de la rotación de las estrellas dentro de las galaxias es sencilla, pero da un cierto vértigo: podría ocurrir que no exista clase alguna de materia oscura sino que tan sólo estemos aplicando una teoría equivocada. En otras palabras, que algo no funciona con la gravitación.

Esta idea para resolver el problema de la rotación de las estrellas en las galaxias fue propuesta ya en 1983 por Milgrom [26] y es muy sencilla: consiste en proponer una modificación de la segunda ley de Newton (la ley de la dinámica que habitualmente se enuncia como fuerza igual a masa por aceleración) que sería aplicable *sólo cuando la aceleración a que se ve sometido el móvil sea muy pequeña*. Podría pensarse que es una idea peregrina, pero resulta que a suficiente distancia de una galaxia los valores de la aceleración a que se ve sometida una de sus estrellas son realmente pequeños y se da la casualidad de que *nunca hasta ahora* se había realizado una comprobación experimental de la segunda ley de Newton en esas condiciones. Sorprendentemente, la modificación propuesta por Milgrom explica muy bien la mayoría de las discrepancias en el conjunto de las más de cien galaxias observadas.

Obviamente, esta dinámica newtoniana modificada⁴¹ puede también interpretarse como una modificación de la Ley de la Gravitación de Newton. En esta interpretación, la razón por la que las estrellas que orbitan alrededor de una cierta galaxia se mueven con más velocidad de la esperada es que a esas escalas galácticas la fuerza de la gravedad es mayor que la que Newton propuso. En concreto, todo encajaría sin necesidad de la hipótesis de la materia oscura si suponemos que a partir de cierta distancia del centro de la galaxia la gravedad no varía como el inverso del cuadrado de la distancia, sino tan sólo como el inverso de la distancia. Esta distancia característica es muy grande y es justamente la distancia a partir de la cual la aceleración de la gravedad producida por la galaxia es tan sólo de $1,2 \cdot 10^{-10} \text{ m seg}^{-2}$.

En general, es difícil abandonar la Ley de la Gravitación de Newton tal y como la conocemos por muchos motivos. Entre ellos, porque una fuerza que es proporcional al inverso del cuadrado de la distancia es realmente

⁴¹ Conocida como MOND (“MOdified Newtonian Dynamics”).

significativa desde el punto de vista matemático de la teoría de campos sobre espacios planos. Además, de adoptar esta postura habríamos de modificar también la teoría General de la Relatividad de modo que en el límite adecuado nos proporcionara esta teoría modificada de la gravitación newtoniana, con todo lo que esto implica.

Sin embargo, a día de hoy no es tampoco razonable abandonar la idea de la gravitación newtoniana modificada en favor de la de la materia oscura. En primer lugar, porque no hay ninguna propuesta concreta verificada sobre en qué consiste la materia oscura y en segundo lugar, porque hay dos hechos más –uno teórico y otro experimental– que son sumamente desconcertantes y se coaligan exactamente en la dirección propuesta por Milgrom.

Empecemos por el argumento teórico. Resulta que la constante cosmológica necesaria para explicar la energía oscura puede escribirse en términos de una cierta distancia R , que sería una especie escala cosmológica natural. La escala R resulta ser tremendamente grande, del orden de aproximadamente 10^{25} m, esto es, de unos 10000 millones de años luz. Existe también una aceleración natural asociada a esta escala, que es justamente la aceleración de la expansión del Universo dada por la constante cosmológica y que se calcula como c^2/R , donde c es la velocidad de la luz en el vacío. ¿Y cuál es el valor de esta aceleración? Aquí viene la sorpresa: es aproximadamente el mismo que la aceleración característica a partir de la cual empieza a funcionar la gravitación newtoniana modificada en las galaxias: del orden de 10^{-10} m s⁻².

Por tanto, tenemos en nuestras manos una asombrosa coincidencia que apunta una conexión insospechada: parecería que cuando un móvil se mueve bajo la acción de la gravedad con una aceleración tan pequeña como la de la expansión de nuestro propio Universo, la ley de la gravitación de Newton ya no funciona bien. Si se quiere, otra forma de interpretar la acele-

ración de Milgrom en su conexión cosmológica sería la siguiente: si un móvil empieza a moverse desde el reposo con esa aceleración, alcanzaría la velocidad de la luz en un tiempo aproximadamente igual a la edad actual del Universo.

Bien, pero quizás esto es sólo una malévola conspiración numérica sin mayor fundamento. Y aquí aparece la segunda coincidencia sospechosa. Las naves Pioneer 10 y 11 fueron lanzadas por la NASA con el objeto de visitar otros planetas del sistema solar⁴². Una vez finalizada su misión, han seguido alejándose del Sol en direcciones opuestas, y sobre ellas se ha realizado un seguimiento sistemático de sus trayectorias desde el JPL (Jet Propulsion Laboratory) de Pasadena (California).

El problema que se han encontrado los científicos del JPL es que las trayectorias seguidas realmente por las naves no coinciden exactamente con las calculadas, a pesar de que en sus sofisticados cálculos se tiene en cuenta –entre otros factores- la atracción gravitatoria del sol, los planetas y demás objetos de nuestro sistema solar. Pero lo asombroso es que la fuente de la discrepancia es una aceleración adicional que atrae ambas naves hacia el sol. ¿Y cuál es el valor de dicha aceleración de origen desconocido?: del orden de $0,8 \cdot 10^{-10} \text{ m s}^{-2}$, que es una vez más del orden de la aceleración de la expansión del universo y también de la aceleración característica de la gravitación newtoniana modificada.

Aunque es cierto que los datos actuales sobre la anomalía de las naves Pioneer no pueden tomarse como concluyentes, la preocupación por este fenómeno ha hecho que se estén realizando propuestas de sondas espaciales

⁴² La Pioneer 10 fue lanzada en 1972, y ha sido el primer objeto artificial en abandonar el sistema solar. La Pioneer 11 fue lanzada un año más tarde.

diseñadas específicamente para verificar si existe esta anomalía de la gravitación en el exterior de nuestro sistema solar. Así mismo, complementariamente a este tipo de medidas se están realizando experimentos muy finos para medir posibles desviaciones de la interacción gravitatoria a escala submicroscópica, ya que la validez de la ley de la gravitación de Newton sólo ha sido comprobada a distancias de 0,1 mm, pero no menores⁴³.

Veremos qué ocurre en los próximos años, pero sería increíble para todos nosotros que tengamos que modificar todos nuestros libros de texto y cambiar la ley de Newton de la Gravitación Universal y, junto a ella, las ecuaciones de Einstein de la Relatividad General. Pero no es imposible. Porque la Física es una Ciencia –como todas ellas– en constante transformación.

4.7. *El final del Universo*

“Desplazar un objeto hacia atrás en el Pasado equivale a reducirlo a sus elementos más simples. Recorridas tan lejos como sea posible en la dirección de sus orígenes, las últimas fibras del compuesto humano van a confundirse ante nuestros ojos con la trama misma del Universo.”

Teilhard de Chardin, “El Fenómeno Humano”

Se admite habitualmente que la Tierra acabará absorbida por el Sol cuando el tamaño de este último aumente como consecuencia de su proceso natural de evolución estelar, lo cual acarreará un aumento progresivo de la temperatura en la superficie de la Tierra. Algunos modelos recientes⁴⁴ estiman que, si tomamos como referencia para indicar la imposibilidad absoluta de la pervivencia de vida sobre la Tierra el momento en el que el agua de los

⁴³ Véase [34].

⁴⁴ Véase [17] para una discusión detallada de esta estimación.

océanos comience a hervir, nos quedan aún unos 5700 millones de años para disfrutar de un Planeta relativamente habitable.

Conviene en este punto llamar la atención sobre lo siguiente: es conocido que el aumento estimado de la temperatura promedio de la superficie de la tierra que sufriremos como consecuencia del efecto invernadero producido por la actividad humana⁴⁵ será de unos 5 grados celsius en el siglo actual (tomando una de las predicciones relativamente conservadoras). Si comparamos con los modelos que nos predicen el calentamiento de la Tierra por efecto del envejecimiento del sol, encontramos que un aumento de 5 grados sería justamente el provocado por el sol en los próximos 800 millones de años⁴⁶. Esto es, el efecto invernadero habría acortado ya en más un 15% la esperanza de vida de la Tierra.

En lo que se refiere al futuro del Universo en su conjunto, una vez más nos encontramos con grandes diferencias respecto a lo que se pensaba hace tan sólo diez años. En aquel momento parecía que lo más probable era que el Universo se expandiera lentamente por siempre, que acabarían apagándose las estrellas y que habría un enfriamiento progresivo e infinito del Universo, cada vez más lento. Dado que todos los sistemas físicos disipan algo de energía⁴⁷, no habría ninguna estructura en el Universo que durara para siempre sin acabar desintegrándose, por lo que el final previsible de todo sería la denominada “muerte térmica”.

⁴⁵ Y salvo que actuemos globalmente de manera muy decidida reduciendo drásticamente las emisiones de gases de efecto invernadero. A tenor de lo que estamos viendo, este escenario no parece muy probable.

⁴⁶ Nótese que el aumento de temperatura debido al envejecimiento del Sol no es lineal con el tiempo, e irá creciendo a mayor velocidad conforme nuestra estrella envejece.

⁴⁷ También un agujero negro, que emitiría la denominada “radiación de Beckenstein-Hawking”.

Sin embargo, la existencia de energía oscura puede cambiar radicalmente este panorama, sobre todo porque no podemos excluir con los datos experimentales actuales que la constante cosmológica sea realmente una constante. En otras palabras, podría ocurrir que la densidad de energía oscura del Universo haya variado a lo largo de la Historia. Es cierto que los márgenes de posible variación de la constante no son muy grandes, pero permiten algunas especulaciones admisibles que conducen a escenarios totalmente contrapuestos.

Supongamos en primer lugar que la constante cosmológica está aumentando ligeramente. El fin del Universo sería entonces el “Big Rip”, el gran desgarramiento. En la versión más extrema de este escenario permitida por los datos observacionales actuales el fin del Universo llegaría en unos 21000 millones de años, poco más que su edad actual, y en ese final toda la materia se acabaría desgarrando y deshaciéndose como efecto de la expansión tremendamente rápida del propio espacio-tiempo. Lo más sorprendente de este escenario es que, al ser la expansión exponencialmente creciente, si existe vida inteligente cerca del fin de los tiempos, podrá observar efectos directos de esa expansión, cada vez más rápidos conforme más cerca estemos del final.

Y esto ocurrirá porque la expansión muy rápida del Universo tiene como efecto secundario el que, para un observador concreto, la región que observa del Universo es cada vez menor. Esto es debido a que, si la expansión del Universo se realiza aceleradamente, llegará un momento en que la velocidad de expansión (esto es, la velocidad con la que aumenta la distancia entre dos objetos cualquiera del Universo, por ejemplo una galaxia lejana y nosotros mismos) superará incluso la velocidad de la luz. A partir de ese momento, crecerá tan rápidamente la distancia entre una galaxia dada y nosotros mismos que la galaxia desaparecerá de nuestro horizonte porque la luz que ha emitido jamás podrá recorrer la distancia que nos separa, cada

vez más grande. En un escenario de expansión acelerada, el Universo accesible a un observador es cada vez más pequeño, y el espacio acaba creciendo tan rápidamente que la materia ve aumentar exponencialmente la distancia que separa a todos sus constituyentes, generando al final un gigantesco desgarramiento cósmico en el que todo se pulveriza.

Pero, por el contrario, no hay nada que impida, en principio, que la constante cosmológica pueda ir disminuyendo lentamente, llegando incluso a hacerse negativa. Una energía oscura negativa significaría un refuerzo de la gravedad que tendería a, en primer lugar, frenar la expansión del universo y posteriormente a acelerar su contracción para acabar en el denominado “Big Crunch”, la gran implosión. Si, una vez más, tomamos la situación límite que nos permiten los márgenes actuales de error de la constante cosmológica, encontraríamos que también en este supuesto estaríamos aproximadamente ya en la mitad de la vida de nuestro Universo. En este escenario el final vendrá provocado por el calentamiento progresivo de todo el Universo, que al reducir su tamaño irá aumentando la temperatura de su radiación térmica de fondo, que cubre todo el espacio. Al final el Universo disminuiría su tamaño hasta convertirse en algo tan pequeño e increíblemente denso y energético como lo era en su origen, en el Big Bang.

Tanto un escenario de gran desgarramiento o de gran implosión son posibles, aunque las opciones aquí mostradas muestran los casos límite y podemos estar en cualquiera de las situaciones intermedias. Para inclinarse por una u otra opción es esencial conocer mucho más sobre la materia y la energía oscuras con el fin de determinar, entre otras cosas, si la constante cosmológica es realmente una constante. En general, la pregunta sobre si las “constantes de la naturaleza” (como la velocidad de la luz, la constante de Planck, la constante de la ley de la gravitación universal, etc.) son realmente constantes o han variado su valor a lo largo de los tiempos, es de gran tras-

endencia ya que pequeñas modificaciones en alguna de ellas podrían acarrear cambios drásticos en la fisonomía del Universo⁴⁸.

Si así fuera, la forma de variación de la constante cosmológica proporcionaría muchas pistas sobre cuándo y cómo podemos esperar el fin de nuestro Universo. Con este objetivo se ha diseñado un instrumento llamado LSST (Large Synoptic Survey Telescope) que, previsto para ser operativo en 2012, tiene como objetivo tomar medidas muy detalladas de cómo se agrupan las galaxias, lo cual nos ayudará a entender mejor la energía oscura⁴⁹. Un poco más adelante, previsiblemente hacia 2020, un satélite llamado SNAP (Supernova Acceleration Probe) nos proporcionará información sobre miles de supernovas de galaxias muy lejanas, que se espera conducirán a medidas mucho más precisas de la aceleración de la expansión del Universo⁵⁰.

5. Hacia una Teoría Cuántica de la Gravedad

“La teoría cuántica y la teoría de la relatividad, evidentemente, no pueden acoplarse sin dificultades. Después de los resultados obtenidos en los últimos años, se evidencia plenamente fundamentada la afirmación de que para que se puedan acoplar estas dos teorías es necesario contar con la tercera estructura fundamental, ligada a la existencia de una longitud universal.”

Werner Heisenberg,

“El descubrimiento de Planck y las bases filosóficas de la atomística”⁵¹

⁴⁸ Véase [6] para una discusión detallada de este problema.

⁴⁹ Los detalles sobre el LSST pueden consultarse http://www.lsst.org/lsst_home.shtml

⁵⁰ Véase la página web del proyecto SNAP en <http://snap.lbl.gov/>.

⁵¹ Conferencia impartida el 24 de abril de 1958 y recogida en [19]. En aquel momento Heisenberg (y otros autores) pensaban que esa longitud fundamental debía ser del tamaño del núcleo atómico, unos 10^{15} m. Ahora pensamos que es unos 20 órdenes de magnitud más pequeña.

Como puede comprobarse, hay muchos frentes actualmente abiertos en la Física Fundamental, y todos ellos apuntan a que muchas de las respuestas a los problemas planteados pueden encontrarse entrelazadas en el campo de confluencia entre la Física Cuántica de las partículas e interacciones fundamentales y la teoría del espacio-tiempo-materia-energía que nos proporciona la Relatividad General. Si seguimos confiando en la existencia de una solución a través de una teoría que contenga todas las interacciones fundamentales, incluyendo la gravitatoria, tendremos que seguir intentando construir nuevas teorías unificadas. A día de hoy, la mayor parte de las propuestas existentes, muy atrevidas y con un contenido bastante especulativo por el momento, proponen abordar el problema modificando una vez más nuestras nociones de espacio y de tiempo. Y lo hacen de manera muy radical, aunque de forma distinta en cada caso. En las páginas siguientes intentaremos describir brevemente las dos familias de intentos que más concentran actualmente la actividad de la comunidad científica.

5.1. *Teorías de cuerdas y dimensiones adicionales*

En los años setenta se construyeron una serie de modelos de Física de Partículas que parecían predecir de forma automática la existencia de unas nuevas partículas sin masa y con espín 2. Al explorar sus propiedades se comprobó que estos nuevos entes, de existir, presentarían exactamente todas las características necesarias como para ser consideradas las partículas (bosones, ya que tendrían espín entero) mediadoras de la interacción gravitacional, que quizás podría así finalmente unificarse con el resto de interacciones en un mismo esquema mecano-cuántico que generalizara el Modelo Estándar.

Estos nuevos modelos son las denominadas “teorías de cuerdas”, cuya idea básica data de 1960 y consiste en pensar que las entidades fundamenta-

les de las que está formado el mundo físico no son partículas elementales puntuales, sino objetos extendidos unidimensionales, las denominadas cuerdas⁵². Por supuesto, estas cuerdas serían inapreciables a escala macroscópica e incluso atómica, ya que una cuerda podría tener una longitud de unos 10^{-35} m. Esta longitud, sobre la que luego volveremos, es la denominada “longitud o escala de Planck”. Esto significa que si un protón tuviera 100 km de diámetro, una cuerda sería del tamaño de un protón. Es decir, el mundo del átomo sería un mundo ultramacroscópico con respecto a los efectos de la teoría de cuerdas⁵³.

Pero, además, hay una hipótesis adicional aun más sorprendente que debe introducirse si se quiere que las teorías de cuerdas funcionen: habremos de suponer que las cuerdas se mueven en un espacio con dimensiones adicionales. Sí, además de las tres dimensiones espaciales y una temporal a las que estamos acostumbrados, las teorías de cuerdas suponen que el espacio tiene seis, siete o incluso veintidós dimensiones adicionales (según el tipo de teoría de cuerdas que se considere)⁵⁴. Pero entonces ¿por qué esas dimensiones extra no se ven ni tan siquiera a escala atómica? La respuesta consiste en pensar que esas dimensiones extra estarían “enrolladas” sobre sí mismas de forma que serían inapreciables, salvo que pudiéramos “ver” a la escala de Planck.

⁵² En sus versiones más sofisticadas y modernas, incluyen objetos elementales con más dimensiones espacio-temporales, denominados “membranas”.

⁵³ Una introducción relativamente accesible a las ideas de las teorías de cuerdas puede encontrarse en [41]. Una aproximación más técnica sería la proporcionada en [42].

⁵⁴ Uno de los problemas más desconcertantes es que realmente sólo puede hablarse de “las teorías de cuerdas”, en plural, porque existe una infinitud de ellas. De hecho, hay autores que sostienen que las teorías de cuerdas son más un marco para la construcción de modelos que un modelo en sí mismo, lo cual plantea importantes problemas epistemológicos (véase la extensa discusión al respecto en [34]).

Una forma sencilla de visualizar en este proceso de “compactificación dimensional” es pensar que tenemos un rectángulo de papel con dos de sus lados mucho más largos que los otros dos (independientemente de cómo se corte, el papel es un objeto plano, de dos dimensiones). Ahora podemos enrollar el rectángulo pegando los dos lados largos, y obtendremos un tubo de papel cuyo diámetro será tanto menor cuanto más corto fuera el lado corto del rectángulo inicial. Visto desde lejos, el tubo del papel nos parecerá una línea, esto es, un objeto unidimensional. Pero realmente lo que existe es una dimensión adicional (el lado corto) que se ha enrollado en forma de circunferencia en cada punto del lado largo del rectángulo. Eso es lo que nos propone la teoría de cuerdas, pero añadiendo más dimensiones extra y considerando que la longitud del lado corto del rectángulo sería inapreciable incluso a escala atómica.

En este punto hemos de recordar que la idea de añadir dimensiones extra al espacio para intentar unificar interacciones data de 1919, año en el que Kaluza y Klein encontraron que una versión en cinco dimensiones (cuatro espaciales más una temporal) de la Teoría General de la Relatividad permitía unificar con ella el electromagnetismo, convirtiendo a este último en una consecuencia de esa quinta dimensión adicional. Desde entonces, la idea de las dimensiones adicionales ha circulado por la mente de los físicos teóricos con frecuencia⁵⁵.

Pues bien, si aceptamos que las cuerdas son las entidades fundamentales del mundo físico, las distintas partículas elementales corresponderían a

⁵⁵ De hecho, la propia Teoría de la Relatividad puede entenderse en este sentido como construida sobre una ampliación del espacio tridimensional al espacio-tiempo en cuatro dimensiones. La diferencia es que, en este caso, el significado físico de esa cuarta dimensión –el tiempo– es claro.

distintos modos de vibración de las cuerdas. Estos modos de vibración tendrían distintas energías y, por tanto, darían origen de forma natural a partículas con distintas masas. Entre estas partículas estarían las comprendidas en el Modelo Estándar, así como otras nuevas familias de partículas. Por supuesto, no hay ninguna posibilidad de detectar cuerdas directamente en el laboratorio. Tan sólo podemos esperar que con aceleradores de partículas muy potentes o mediante medidas de astrofísica de partículas podamos obtener información de procesos de tan alta energía que hagan intervenir a todas las interacciones fundamentales, proporcionando información contrastable y detectando, si es posible, alguna de las propiedades derivadas de la naturaleza extensa de las cuerdas o alguna de las nuevas partículas predichas por la teoría⁵⁶. Sin embargo, no está claro a partir de qué energías podrían empezar a ser visibles estos efectos, aunque parece que debiera contarse con aceleradores de partículas millones de veces más potentes que el LHC.

Por ello, esta familia de teorías –muy sugerentes desde un punto de vista matemático y que han concentrado la atención de multitud de físicos teóricos en las dos últimas décadas– no ha conseguido realizar a día de hoy un conjunto suficiente de predicciones significativas y que sea verificable experimentalmente en un futuro próximo. Además, como ya hemos comentado, las teorías de cuerdas presentan serios problemas para hacerse compatibles con un Universo con constante cosmológica positiva, lo cual constituye en este momento una dificultad muy importante. En general, las obstrucciones cosmológicas de las teorías de cuerdas provienen de que son teorías “dependientes del fondo”, en el sentido que se construyen sobre un espacio-tiempo concreto y fijo, que no evoluciona con el sistema. Esta idea es opuesta a la Relatividad General, que preconiza la “independencia del fondo” de la interacción gravitatoria a través del principio de equivalencia,

⁵⁶ Entre ellas se encontrarían las denominadas “partículas supersimétricas”.

así como la interdependencia entre el espacio-tiempo y la dinámica del sistema. A juicio de algunos autores, esta discrepancia constituye una dificultad insalvable⁵⁷.

5.2. *Gravedad cuántica de bucles y cuantización del espacio-tiempo*

Por supuesto, las teorías de cuerdas no están siendo el único enfoque utilizado para abordar el problema de una descripción cuántica de la gravedad. Los twistores, la supergravedad y la geometría no conmutativa (por enumerar alguna de las “palabras mágicas” más frecuentes en los últimos años) son otros intentos en la misma dirección, que no podemos analizar aquí en detalle.

Sin embargo, sí voy a discutir los aspectos esenciales de una nueva teoría alternativa denominada “gravedad cuántica de bucles”, introducida a finales de los años ochenta por Ashtekar, Jacobson, Rovelli y Smolin, y que hace uso de herramientas matemáticas basadas en ideas anteriores de Penrose⁵⁸. Esta teoría presenta la virtud de no recurrir al uso de dimensiones adicionales y de ser conceptualmente más compatible con la Relatividad General, al menos en el sentido de que es una teoría “independiente del fondo”. Además, aunque está todavía en un estado bastante preliminar, ha permitido ya hacer cálculos concretos que hacen factible la verificación experimental de alguna de sus predicciones en un plazo muy breve de tiempo⁵⁹.

⁵⁷ Una discusión muy completa de este aspecto, técnico pero fundamental de cara a la unificación entre la Teoría Cuántica y la Relatividad General, puede encontrarse en [34].

⁵⁸ Las denominadas “redes de espines”.

⁵⁹ El libro de Rovelli [31] constituye una excelente monografía que recapitula todos los aspectos conceptuales y técnicos relevantes en esta nueva teoría de la gravedad cuántica. Para una introducción divulgativa a la gravedad cuántica de bucles recomendamos [35].

La idea fundamental que subyace en la gravedad cuántica de bucles es, de nuevo, una modificación radical de nuestra idea de espacio-tiempo, pero en una dirección completamente distinta: se nos propone abandonar la idea de que el espacio y el tiempo son un continuo, y asumir por el contrario que a escala ultramicroscópica el propio espacio-tiempo tiene una estructura intrínsecamente cuántica y discreta. ¿Qué significa esto?

Recordemos que uno de los principios fundamentales de la teoría cuántica es que la energía sólo puede intercambiarse en forma de “cuantos” discretos e indivisibles. Pues bien, es posible pensar que el propio espacio y el tiempo estén también “cuantizados”. Esto significa que si tuviéramos a nuestra disposición un microscopio infinitamente potente con el que fuéramos penetrando en la materia, llegaría un momento en que percibiríamos que el espacio y el tiempo no son un continuo, sino que existe una unidad mínima observable de longitud (y por tanto de área y de volumen) y también una unidad mínima observable de tiempo.

Así, podemos imaginarnos el espacio tridimensional como formado por cubos elementales apilados, que denominaremos “cuantos de volumen”. Del mismo modo, un plano se convierte en un mosaico teselado por “cuantos de área”, y cada uno de ellos sería la superficie más pequeña físicamente posible. Finalmente, la línea más corta posible será un “cuanto de longitud”. Y jamás podremos profundizar más en la estructura del espacio, jamás podremos medir una longitud, un área o un volumen más pequeño. Como vemos, esta idea choca contra la visión tradicional del espacio como un continuo, que nos permitiría seguir utilizando nuestro microscopio todo lo que queramos sin límite alguno y sin observar jamás cambio alguno en lo que vemos. Es más, a esa escala también percibiríamos que el tiempo no fluye continuamente, sino que la evolución de los sistemas se produce a pequeños intervalos de tiempo de modo que existe un tiempo mínimo por debajo del cual no seríamos capaces de distinguir dos acontecimientos como separados temporalmente.

Pero ¿de qué longitudes y tiempos estamos hablando? El “cuanto de longitud” vendría dado de nuevo por la denominada “longitud de Planck”, que es del orden de 10^{-35} metros⁶⁰. El tiempo mínimo de esta teoría sería el “tiempo de Planck”, que es del orden de 10^{-43} segundos. Todas las longitudes medidas deben ser múltiplos de la longitud de Planck, y todos los tiempos que midamos serán múltiplos del tiempo de Planck. Así, el espacio-tiempo no sería un continuo, sino una “espuma” construida a través de mallas cuya distancia entre nodos es del orden de la longitud o del tiempo de Planck (según avancemos en una dirección espacial o en una temporal). Para hacernos una idea de estos órdenes de magnitud, pensemos que el cuanto de volumen es tan pequeño que hay más cuantos de volumen en un centímetro cúbico que centímetros cúbicos en el todo el Universo.

Pues bien, partiendo de estas ideas se ha conseguido elaborar en los últimos años una compleja teoría matemática en la que la Gravedad se describe aparentemente de forma compatible con la Teoría Cuántica al convertirla en una deformación de la red cuántica que forma el espacio-tiempo. Los avances teóricos basados en esta teoría son significativos, e incluyen una derivación de la fórmula correcta para el cálculo de la entropía de los agujeros negros. Además, este modelo de gravedad cuántica parece ser capaz de incorporar sin problemas la idea de un Universo con constante cosmológica positiva.

⁶⁰ Esta es la escala de longitudes de la que hemos hablado cuando discutíamos la teoría de cuerdas. La longitud de Planck se denota L_p y su cuadrado se define como

$$(L_p)^2 = \hbar G / c^3,$$

donde c es la velocidad de la luz, G es la constante gravitatoria y \hbar es la constante de Planck. Es interesante destacar que la longitud y el tiempo de Planck fueron introducidos por el propio Planck como parte de un sistema natural de unidades definido únicamente a partir de las constantes fundamentales de la naturaleza (véase [6] para una discusión detallada).

Por supuesto, la longitud de Planck es ridículamente pequeña incluso para la escala de una partícula elemental al igual que el tiempo de Planck es irrelevante si miramos la duración de los procesos que se producen a escala atómica. Parecería pues que esta hipótesis de un espacio-tiempo discreto es de nuevo inverificable experimentalmente pero, sorprendentemente, podemos estar cerca de conseguir medidas experimentales sistemáticas que nos permitan contrastar estas ideas.

5.3. *¿Ha de modificarse la Teoría de la Relatividad Especial?*

La clave para este desafío experimental está en darse cuenta que un espacio-tiempo cuántico del estilo del propuesto en la gravedad cuántica de bucles no puede ser compatible con la Relatividad Especial tal y como la conocemos. La razón de esta observación estriba en que la longitud de Planck que nos define el retículo “cuántico” en que se ha convertido el espacio es una constante universal independiente del estado de movimiento del observador. Esto es totalmente incompatible con la Teoría de la Relatividad Especial en su formulación actual, ya que para ella no existe ninguna longitud mínima que esté exenta de los fenómenos de contracción y dilatación de longitudes.

Por tanto, puede ocurrir que la Relatividad Especial no sea estrictamente correcta a la escala de Planck, y que tengamos que construir una generalización de la misma que sólo estaremos forzados a utilizar cuando tratemos con longitudes próximas a esa escala. Estas nuevas teorías de la relatividad han sido construidas en los últimos diez años y se denominan “Relatividad Especial Doble” (conocidas como Teorías DSR, “Double Special Relativity”) ya que incorporan dos escalas fundamentales y universales: la velocidad de la luz y la longitud de Planck. Por supuesto, si en estas teorías relativistas dobles hacemos tender a cero la longitud de Planck, recuperamos las transformaciones habituales propias de la relatividad especial y todo el esquema recuperaría la consistencia debida.

Conviene comentar también que, en algunos contextos, es más útil considerar la energía de Planck E_p como segunda escala invariante de los modelos de relatividad especial doble (véase, por ejemplo, [24]). La energía de Planck se define como $E_p = h c / L_p$. Es una energía muy grande, del orden de 10^{29} eV, y puede interpretarse como la energía de un fotón cuya longitud de onda fuera la longitud de Planck L_p . En general, es de esperar que todo proceso que tenga lugar con energías del orden de la de Planck o superiores tenga que ser descrito necesariamente por un nuevo tipo de leyes físicas, de las que sólo conocemos algunos retazos.

Un indicio matemático de que las ideas de la DSR encajan con conceptos fundamentales de la mecánica cuántica es que en ellas emerge la denominada “geometría no conmutativa” del espacio-tiempo. Esto significa que una vez se han introducido las nuevas transformaciones de coordenadas relevantes a la escala de Planck, resulta que las propias coordenadas del espacio-tiempo ya no son números sino operadores matemáticos que no conmutan, que no pueden multiplicarse en cualquier orden. Esto implica automáticamente la existencia de nuevos principios de incertidumbre, y la estructura cuántica del propio espacio-tiempo no nos permite medir simultáneamente con precisión infinita las coordenadas espaciales y la coordenada temporal de una partícula. Utilizando otro tipo de imagen gráfica, la estructura del espacio-tiempo a la escala de Planck tendría la apariencia de un cuadro de la escuela puntillista, en el que las pinceladas (el continuo) se sustituye por puntos de colores puros (los cuantos de espacio-tiempo)⁶¹.

Una vez que disponemos de estas nuevas Teorías de la Relatividad que se ven afectadas por fenómenos que suceden a la escala de Planck, la pregunta clave es si podemos disponer en breve de alguna indicación expe-

⁶¹ Esta imagen ha sido propuesta en [35].

rimental macroscópica de que realmente hay cosas que no encajan con la Relatividad Especial de Einstein. Y la respuesta puede estar en el estudio de la radiación que recibimos en la Tierra proveniente de erupciones cósmicas de rayos gamma.

Estas erupciones se produjeron a millones de años luz de distancia y los rayos gamma que nos llegan de ellas han recorrido distancias tan enormes que tal vez podamos observar en ellos el efecto acumulado de la estructura de “espuma cuántica” del espacio-tiempo. La gravedad cuántica de bucles predice que este efecto podría consistir en que los rayos gamma con distintas energías se desplacen en el espacio con velocidades ligeramente diferentes, lo cual implicaría que tardarían tiempos ligeramente distintos en llegar a la Tierra y, por tanto, en ser detectados (suponiendo que la emisión de rayos gamma se produjo simultáneamente en todas las energías)⁶².

Entre mayo y julio de 2005, el telescopio MAGIC ubicado en el Instituto de Astrofísica de Canarias⁶³ examinó dos “llamaradas” de rayos gamma provenientes del núcleo de la galaxia Mkn 501. El análisis escrupuloso de los datos obtenidos ha llevado más de tres años, y tan sólo hace un mes el equipo del MAGIC ha hecho público el resultado: se ha observado por vez primera una diferencia entre los tiempos de llegada de los rayos gamma que depende sistemáticamente de la energía de los mismos, con datos que pueden ser compatibles con predicciones basadas en distintos modelos de gravedad cuántica⁶⁴.

⁶² En otras palabras, este efecto supone que el vacío no tiene exactamente índice de refracción 1 debido a su estructura de espuma espacio-temporal cuántica.

⁶³ El telescopio MAGIC (“Major Atmospheric Gamma-ray Imaging Cerenkov telescope”) está ubicado en el Observatorio del Roque de los Muchachos de la isla de La Palma. Para más información véase <http://www.magic.mppmu.mpg.de/>.

⁶⁴ El resumen de estos resultados puede consultarse en el servidor <http://xxx.lanl.gov/> con el código arXiv:0708.2889v2, y es de fecha 28 de agosto de 2008.



Figura 2. Primer mapa de rayos gamma del cielo proporcionado el 28 de agosto de 2008 por el equipo del telescopio Fermi. La imagen, en colores falsos, toma como referencia el plano de la Vía Láctea (“Milky Way”), que se coloca en el centro. A lo largo de él se observa una nube de rayos gamma producida por la difusión de rayos cósmicos de alta energía en el gas y polvo interestelar. Se han destacado algunas fuentes muy intensas de rayos gamma, como estrellas de neutrones o púlsares, y galaxias distantes muy activas, conocidas como “blazars”. Este mapa es el resultado de tan sólo cuatro días de observaciones, y la información es equivalente a la que podía obtenerse con la anterior generación de telescopios en un año⁶⁵.

El satélite FERMI, lanzado el 11 de junio de 2008⁶⁶, tiene como uno de sus objetivos medir con precisión esta predicción experimental que, de confirmarse, supondría un espaldarazo importante a la gravedad cuántica de bucles y significaría que tenemos ya en nuestra mano la exploración directa de la escala de Planck. La gran capacidad de observación de este Telescopio (ver Figura 2) permitirá explorar muchos de los fenómenos de alta energía del Universo con nitidez y precisión desconocidas hasta la fecha.

En la misma línea se encuentran otros experimentos en curso con el objetivo de medir desviaciones respecto de las predicciones de la Relatividad Especial. Uno de ellos es el experimento basado en el observatorio de rayos cósmicos AUGER, consistente en una red de cientos de detectores repartidos en 3000 kilómetros cuadrados de la Pampa Argentina y que recogerán la cascada de partículas y radiación producida por la incidencia de rayos cósmicos (en concreto, protones) de muy alta energía que lleguen a las capas superiores de la atmósfera de la Tierra⁶⁷. Si mediante este experimento se confirma la llegada a la Tierra de protones con energías superiores a 10^{20} eV, estaríamos posiblemente en presencia de una violación de la teoría especial de la relatividad. La razón es que esta energía es el denominado límite GZK (de Greisen, Zatsepin y Kuzmin, que predijeron este efecto, véase [34]): Esencialmente, según dedujeron estos autores haciendo uso de la Física de Partículas y la Relatividad Especial comúnmente admitidas, los protones con energías mayores de 10^{20} eV no deberían llegar a la Tierra ya serían capaces de interactuar con la radiación de fondo del universo, y perderían energía en ese proceso.

⁶⁵ Imagen tomada de <http://antwrp.gsfc.nasa.gov/apod/ap080828.html>.

⁶⁶ Las características de la misión FERMI (anteriormente denominada GLAST) y su desarrollo en tiempo real puede seguirse en <http://glast.gsfc.nasa.gov>.

⁶⁷ Véase <http://www.auger.org/>.

Démonos cuenta de que si se produce la violación relativista del límite GZK, sería todavía más probable que la Relatividad Especial no funcione cuando nos acerquemos a energías del orden de la energía de Planck (10^{29} eV). De hecho, AGASA, un experimento japonés realizado con anterioridad⁶⁸ ha detectado 8 eventos extraños de este tipo con energías superiores a 10^{20} eV, que han de confirmarse mediante las medidas de AUGER. En este punto es importante enfatizar que las energías características de estos rayos cósmicos son al menos decenas de millones de veces superiores a la energía prevista para los eventos del LHC (que es tan sólo del orden de 10^{13} eV). Por ello es difícilmente imaginable⁶⁹ que algún día se construyan aceleradores de partículas capaces de explorar el rango de energías que nos proporcionan ya directamente los rayos cósmicos.

Con estos experimentos en mente algunos físicos han propuesto en los últimos años distintos modelos de Relatividad Especial Doble. Uno de ellos da cuenta de la posible dependencia de la velocidad de propagación de la luz con la energía en un contexto de gravedad cuántica de bucles [1]. Otro explica una posible modificación del límite GZK como efecto de la existencia de una segunda escala invariante relacionada con la energía de Planck [24]. Pero puede haber más posibilidades, ya que la construcción de deformaciones de la Relatividad Especial que contengan escalas fundamentales es un problema complicado que ha comenzado a estudiarse desde los años 90 en el contexto de los denominados “grupos cuánticos” y de la “geometría no conmutativa” del espacio-tiempo⁷⁰. Las deformaciones posibles son bastan-

⁶⁸ Para más información, consúltese <http://www-akeno.icrr.u-tokyo.ac.jp/AGASA/>.

⁶⁹ Y probablemente no tiene ningún sentido plantearse, ni desde el punto de vista científico ni tampoco desde la racionalidad económica. La astrofísica de alta energía parece pues la alternativa más sensata para la exploración experimental de la Física a la escala de Planck.

⁷⁰ Los modelos de Relatividad Especial Doble se basan en la introducción de las denominadas “deformaciones cuánticas” de los grupos de transformaciones del espacio-tiempo

tes, y de cada una de ellas se deduce un tipo diferente de Relatividad Especial Doble que conduce a distintas predicciones físicas. Pero, afortunadamente, parece que los experimentos en curso ya mencionados podrán decirnos pronto si existen observaciones incompatibles con la hasta ahora intocable Teoría de la Relatividad de Einstein y, en este caso, será el momento de decidir cuál de las modificaciones de la Relatividad resulta la más adecuada para dar cuenta de esos nuevos datos.

6. Conclusiones

En definitiva, nos encontramos en un momento paradójico y apasionante para la Física. En los últimos cien años la Teoría Cuántica y la Teoría de la Relatividad nos han permitido desvelar muchos de los secretos del microcosmos y del macrocosmos, transformando profundamente muchas de nuestras concepciones sobre la Naturaleza y sobre nuestro lugar en ella. Las aplicaciones tecnológicas derivadas directa o indirectamente de estas dos Teorías han contribuido también la radical mutación de nuestros modos de vida en el mundo desarrollado, y prometen continuar haciéndolo en el futuro.

Sin embargo, cuando ambas Teorías se contemplan en conjunto resultan insatisfactorias. Por tanto, como científicos, se nos impone la tarea urgente de trabajar por conciliarlas en un marco común que sea a la vez lo más sólido y lo más sencillo posible.

Es más, en los últimos diez años nos hemos persuadido de que, a pesar de todo el esfuerzo de tantos durante tantos años, nuestra ignorancia sobre el Universo, lejos de disminuir, se acrecentaba. Y es que resulta que la materia

relativista, en concreto del denominado grupo de Poincaré. Las primeras deformaciones cuánticas de este grupo fueron introducidas y analizadas con detalle en [10], [23] y [5].

y la energía, nuestras viejas conocidas desde hace tres mil años, han quedado degradadas con el calificativo de “ordinarias” ante la aparición de sus competidoras, las “oscuras”, que parece conforman el 96 por ciento de nuestro Universo y de las cuales desconocemos casi todo.

Pero, en mi opinión, esta situación de sobresalto inicial ha de contemplarse en términos muy positivos. Si la Ciencia (y en general, todo el conocimiento) nos han enseñado algo a lo largo de nuestra Historia colectiva, es que debemos ser humildes y abiertos a las sorpresas que, afortunadamente, encontramos inevitablemente cuando nos aproximamos a la realidad honestamente y sin prejuicios. Porque la verdad sobre la Naturaleza “gusta de esconderse”, como decía Heráclito, pero es cierto que conviene recordar –como Smolin acertadamente apunta en [34]– que aunque la hipótesis atómica fuera inverificable en la Grecia antigua, el propio Heráclito podía haber medido sin problemas y en su propia época la aceleración de la gravedad. No había nada que técnicamente se lo impidiera, tan sólo le faltaba el marco teórico adecuado que propiciara esas medidas.

Por tanto, en este momento nos corresponde utilizar al máximo nuestra imaginación para extraer toda la información posible de los experimentos que somos ya capaces de realizar. Sin duda, tenemos que seguir explorando los fenómenos de muy alta energía del Universo si queremos comprender lo que en él acontece y cómo esto se relaciona con la estructura ultramicroscópica de la materia a la escala de Planck. Pero hemos de ser conscientes que con el LHC la construcción de aceleradores de partículas ha llegado, probablemente, a su límite. Sin embargo, como ha ocurrido desde siempre a la Humanidad, parece que levantando nuestra mirada hacia arriba y mirando a las estrellas podemos encontrar mucha inspiración y, quizás, las indicaciones adecuadas para encontrar nuevas respuestas.

Pero, pese a nuestro optimismo, no seamos ilusos. Aunque consigamos completar esta revolución del conocimiento, ya nos advirtió Max Planck de que hemos de ser conscientes de que, en último término, *“la Ciencia no puede resolver el misterio último de la naturaleza. Y esto es así porque, finalmente, nosotros mismos somos parte del misterio que estamos intentando resolver.”*⁷¹.

Y no podemos ni debemos olvidar que en un momento de la Historia como el actual, en el que por primera vez tenemos una percepción cada vez más global de nuestro Planeta, hay otra revolución imprescindible que tan sólo acaba de comenzar y a la que todos tenemos el deber de contribuir. Sin excusas, tenemos que convencernos de que todos los seres humanos estamos hechos del mismo polvo de estrellas y somos radicalmente iguales en dignidad y derechos. Y tendremos que asumir como tarea inexcusable el conseguir que, sea cual sea su *“raza, color, sexo, idioma, religión, opinión política o de cualquier otra índole, origen nacional o social, posición económica, nacimiento o cualquier otra condición”*⁷², cualquier persona de este planeta pueda tener las mismas posibilidades que nosotros de disfrutar de una vida digna que le permita, si ese es su deseo, dedicarse a observar las estrellas.

He dicho.

Burgos, 26 de septiembre de 2008.

⁷¹ Traducción libre de [6], p. 23.

⁷² Declaración Universal de los Derechos Humanos, Artículo 2.1.

Referencias bibliográficas

- [1] G. Amelino-Camelia, “*Testable scenario for relativity with minimum length*”, *Physics Letters B*, vol. 510, p. 255 (2001).
- [2] AA. VV., *Revista Española de Física*, vol. 19, n. 4 (2005). Número especial con motivo del Año Mundial de la Física.
- [3] J. Baez, “*The Quantum of Area?*”, *Nature*, vol. 421, p. 702 (2003).
- [4] N. A. Bahcall, J. P. Ostriker, S. Perlmutter y P. J. Steinhardt, “*The cosmic triangle: Assessing the state of the universe*”, *Science*, vol. 284, p. 1481 (1999).
- [5] A. Ballesteros, F.J. Herranz, M.A. del Olmo y M. Santander, “*A new null-plane quantum Poincaré algebra*”, *Physics Letters B*, vol. 351, p. 137 (1995).
- [6] J.D. Barrow, “*The constants of Nature*”, Ed. Vintage (2003).
- [7] J.S. Bell, “*Lo decible y lo indecible en Mecánica Cuántica*”, Alianza Editorial (1990).
- [8] G. Benenti, G. Casati y G. Strini, “*Principles of Quantum Computation and Information*”, World Scientific (2005).
- [9] M. Bunge, “*Filosofía de la Física*”, Ed. Ariel (1978).

-
- [10] E. Celeghini, R. Giachetti, E. Sorace y M. Tarlini, “*Three dimensional quantum groups from contractions of $SU_q(2)$* ”, Journal of Mathematical Physics, vol. 31, p. 2548 (1990).
- [11] G.D. Coughlan, J.E. Dodd y B.M. Gripaios, “*The ideas of Particle Physics*”, Cambridge University Press (2006).
- [12] T. de Chardin, “*El fenómeno humano*”, Ed. Orbis (1974).
- [13] A. Das y T. Ferbel, “*Introduction to Nuclear and Particle Physics*”, Ed. John Wiley & Sons, Nueva York (1994).
- [14] J. Echeverría, “*La revolución tecnocientífica*”, Fondo de Cultura Económica (2003).
- [15] A. Einstein et. al., “*La teoría de la Relatividad*”, Selección de L. Pearce Williams, Alianza Universidad (1983).
- [16] A. Einstein, N. Rosen y B. Podolski, “*Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete?*”, Physical Review, vol. 47, p. 777 (1935).
- [17] J. Gribbin, “*Biografía del Universo*”, Ed. Critica (2006).
- [18] R. Gilmore, “*Alicia en el País de los Cuantos. Una alegoría de la Física Cuántica*”, Alianza Editorial (2006).
- [19] W. Heisenberg, “*Más allá de la Física*”, BAC (1974).
- [20] K. Huang, “*Fundamental Forces of Nature*”, World Scientific (2007).
- [21] I. Kant, “*Principios metafísicos de la Ciencia de la Naturaleza*”, Alianza Editorial (1989).
- [22] J.M. Lévy-Leblond y F. Balibar, “*Quantique: Rudiments*”, Inter-Editions (1984).

-
- [23] J. Lukierski, A. Nowicki y H. Ruegg, “*New quantum Poincaré algebra and k-deformed field theory*”, Physics Letters B, vol. 293, pp. 344 (2001).
- [24] J. Magueijo y L. Smolin, “*Lorentz invariance with an invariant energy scale*”, Physical Review Letters, vol. 88, p. 190403 (2002).
- [25] A.A. Michelson y E.W. Morley, “*On the Relative Motion of the Earth and the Luminiferous Ether*”, American Journal of Science, vol. 34, p. 333 (1887).
- [26] M. Milgrom, “*A modification of the Newtonian Dynamics as a Possible Alternative to the Hidden Mass Hypothesis*”, Astrophysics Journal, vol. 270, p. 365 (1983).
- [27] I. Newton, “*Principios Matemáticos de la Filosofía Natural y su Sistema del Mundo*”, Editora Nacional (1982).
- [28] R. Penrose, “*Shadows of the Mind*”, Oxford University Press (1994).
- [29] C. Sagan, “*Cosmos*”, Ed. Planeta (1982).
- [30] J.M. Sánchez Ron, “*El poder de la Ciencia*”, Ed. Crítica (2007).
- [31] C. Rovelli, “*Quantum Gravity*”, Cambridge University Press (2004).
- [32] F. Selleri, “*El debate de la Teoría Cuántica*”, Alianza Editorial (1986).
- [33] A. Shimony, “*Realidad del mundo cuántico*”, Investigación y Ciencia, p.28 (1990).
- [34] L. Smolin, “*Las dudas de la Física en el siglo XXI*”, Ed. Crítica (2007).
- [35] L. Smolin, “*Cuantos de espacio-tiempo*”, Investigación y Ciencia, marzo, (2004).
- [36] L.M.K. Vandersypen, M. Steffen, G. Breyta, C.S. Yannoni, M.H. Sherwood y I.L. Chuang, “*Experimental realization of Shor’s quantum factoring algorithm using nuclear magnetic resonance*”, Nature, vol. 414, p. 883 (2001).
-

-
- [37] R.M. Wald, "*General Relativity*", University of Chicago Press (1984).
- [38] G. Vitiello, "*My Double Unveiled. The dissipative quantum model of brain*", John Benjamins Publishing Company (2001).
- [39] J.A. Wheeler, "*Un viaje por la gravedad y el espacio-tiempo*", Alianza Editorial (1994).
- [40] Wikipedia, <http://www.wikipedia.org>.
- [41] E. Witten, "*The Universe on a string*", Astronomy Magazine, p.42, junio (2002).
- [42] B. Zwiebach, "*A First Course in String Theory*", Cambridge University Press (2004).

