

LA FÍSICA FUNDAMENTAL ANTE UNA REVOLUCIÓN INACABADA

D. ÁNGEL BALLESTEROS CASTAÑEDA

Profesor Titular de Universidad
Área de Física Aplicada
Departamento de Física, Facultad de Ciencias
Universidad de Burgos

LECCIÓN INAUGURAL DEL CURSO ACADÉMICO 2008-2009

26 de septiembre de 2008

Rector Magnífico de la Universidad de Burgos
Excmo. Sr. Presidente de la Junta de Castilla y León
Rectores Magníficos de las Universidades de Castilla y León
Excmo. Sr. Consejero de Educación
Excmo. Sr. Presidente del Consejo Social de la Universidad de Burgos
Excelentísimas e Ilustrísimas autoridades
Estimados compañeros y alumnos
Señoras y Señores:

Cuando el Decano de la Facultad de Ciencias me propuso dictar esta Lección, honor que deseo agradecerle públicamente, en el momento de pensar sobre la elección del tema me vino a la memoria cómo uno de mis profesores gustaba de clasificar irónicamente las lecciones universitarias en mediocres (aquéllas que todos los estudiantes entendían), normales (las que estaban tan sólo al alcance de los más aventajados), buenas (aquéllas que tan sólo el profesor comprendía) y, por fin, magistrales (cuando ni el propio docente entendía lo que estaba supuestamente explicando).

Obviamente, no pretendo ser adalid de tal modelo de enseñanza-aprendizaje, ni mucho menos ponerlo hoy en práctica, pero esta anécdota me sugirió la idea de intentar transmitirles hoy alguno de los problemas fundamentales que nos estamos planteando en la actualidad sobre la imagen física de nuestro mundo y para los cuales no tenemos, en absoluto, respuestas claras ni definitivas.

En aras de la conveniente brevedad en la exposición que voy a realizar, ésta condensará drásticamente el contenido de la Lección ya editada que tienen en sus manos, y que contiene un desarrollo mucho más pormenorizado y técnico de las ideas que a continuación expondré. A modo de introducción, permítanme esquematizar las más relevantes.

En primer lugar, conviene recordar que las dos grandes Teorías físicas fundamentales actualmente vigentes, la Mecánica Cuántica y la Relatividad, fueron introducidas en los inicios del siglo XX y que desde entonces la validez de ambas ha sido confirmada por innumerables experimentos. Estas Teorías revolucionaron la imagen física del mundo y han conducido a aplicaciones tecnológicas que han cambiado y seguirán cambiando radicalmente nuestra sociedad como los láseres, la microelectrónica, la resonancia magnética nuclear o el sistema de posicionamiento GPS, por citar tan sólo algunas de ellas.

Sin embargo, tanto los pioneros de la Teoría Cuántica como los de la Relatividad percibieron con claridad a mediados del siglo XX que la revolución por ellas iniciada estaba incompleta, porque ambas eran y continúan siendo a día de hoy dos teorías independientes e incluso hasta en cierto sentido incompatibles. Esta es la “revolución inacabada” de la Física Fundamental que da título a esta Lección.

La Física ha podido sobrevivir todo este siglo sin una teoría unificada porque hemos dividido la realidad 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 nuestras nociones habituales de espacio y de tiempo no necesitan grandes modificaciones. En el otro se encuentra el mundo de los planetas, las estrellas, las galaxias y el Universo en su conjunto, compuesto de objetos con masas y energías tremendamente grandes, donde podemos con frecuencia ignorar los efectos puramente cuánticos y construir nuestros modelos a partir tan sólo de la Relatividad.

Pero si deseamos entender –por ejemplo– cómo era la Física del Universo cerca de su gran explosión inicial (el denominado Big-Bang) 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 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 de la naturaleza.

El problema de encontrar una versión unificada de ambas teorías, que denominaremos “Gravedad Cuántica”, ha concentrado durante los últimos cuarenta años el esfuerzo de miles de científicos y sigue abierto, constituyendo así el desafío más importante de la Física Fundamental en este nuevo siglo. Por ello, en esta Lección expondré algunas de las ideas y experimentos con las que nos estamos enfrentando a este reto, y que se enmarcan en algunos descubrimientos recientes en el campo de la astrofísica y de la cosmología que hacen que nuestra visión del Universo sea hoy completamente distinta a la que teníamos hace tan sólo diez o quince años.

Es muy probable que para encajar todas las piezas que vamos a presentar en un esquema unificado debemos introducir modificaciones parciales de la Mecánica Cuántica, de la Relatividad o de ambas teorías. No sabemos todavía exactamente cómo. Pero lo que sí está claro es que quienes profetizaban hace unas pocas decenas de años que la Física estaba a punto de completarse definitivamente se equivocaron tanto como Philipp von Jolly, quien en 1874 advirtió a Max Planck de que a esas alturas en la Física casi todo había sido ya descubierto, y que “lo único que restaba era completar algunas pequeñas lagunas”. Como es bien conocido, Max Planck recibió el premio Nobel en Física por su propuesta de los “cuantos de energía” realizada en 1900, convirtiendo una de las “pequeñas lagunas” de Jolly en nada menos que en la revolucionaria Teoría Cuántica, cuyo esquema conceptual vamos a recordar brevemente.

LA TEORÍA CUÁNTICA

Basada en la hipótesis atómica y en la existencia de los “cuantos de energía” de Planck, la Teoría Cuántica se desarrolló a lo largo de todo el siglo XX bajo el impulso de Einstein, Bohr, Heisenberg, de Broglie, Schrödinger, Dirac, Pauli, Feynman y muchos brillantes científicos más. Las confirmaciones experimentales de esta nueva Teoría fueron pronto apabullantes, abriendo ante nosotros la posibilidad de explorar por vez primera un nuevo microcosmos compuesto por moléculas, átomos, núcleos y partículas elementales. 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 vida.

Sin embargo, esta Teoría contiene en su núcleo algunas ideas sorprendentes y muy poco intuitivas como el principio de incertidumbre, la dualidad onda-corpúsculo, su carácter estrictamente probabilista o la denominada no-localidad de ciertos sistemas cuánticos. En particular, esta última propiedad significa que –en ciertas condiciones- por muy alejadas que puedan estar dos partículas cuánticas, ambas forman parte de un único sistema que “siente” inmediatamente cualquier medida que se realice sobre una de ellas. Y fueron Einstein, Podolski y Rosen quienes pusieron de manifiesto ya en 1934 que este hecho era claramente incompatible con la Teoría de la Relatividad Especial.

En este punto conviene enfatizar que, paradójicamente, los avances actuales en la manipulación de sistemas a escala atómica han aplicado esta idea de no-localidad para realizar experimentos de “teleportación”, mostrando que esta idea otrora propia de la Ciencia ficción es realizable en cierto sentido. Así mismo, la naturaleza intrínsecamente probabilista de la Teoría Cuántica ha generado una nueva disciplina, la computación cuántica, que permite la definición de nuevos algoritmos que se ha demostrado pueden romper barreras inalcanzables por la computación clásica. Se han construido ya en el laboratorio computadores que manejan 7 bits cuánticos, y si se consigue aumentar su número estas nuevas máquinas serán capaces de descifrar muchos de los sistemas de claves informáticas usados actualmente. Existen también aplicaciones tecnológicas ya comercializadas de la denominada criptografía cuántica, donde partículas cuánticas acopladas se usan para transmitir información que no puede ser interceptada sin dejar huella, de modo que cualquier espionaje de la comunicación sea detectado.

Desde el punto de vista teórico, el desarrollo de la Teoría Cuántica de Campos ha conseguido describir satisfactoriamente la fuerza electromagnética y las fuerzas nucleares débil y fuerte, pero no la gravedad. Además, ha encajado todas las partículas detectadas hasta el momento en lo que se conoce como el “**Modelo Estándar**” de la Física de Partículas Elementales.

Este Modelo propone que toda la materia está constituida por tan sólo doce partículas elementales distintas: seis denominadas quarks y otras seis denominadas leptones. Los quarks nunca pueden encontrarse aislados, ya que la interacción nuclear fuerte los mantiene agregados bien de tres en tres (formando partículas como el protón y el neutrón) o bien de dos en dos (formando los mesones). Por el contrario, los leptones son el electrón, el muón y la partícula tau, más tres partículas asociadas a ellos y denominadas neutrinos, y todos ellos pueden encontrarse aisladamente. Con este conjunto de doce elementos es posible explicar toda la materia conocida.

Además, el Modelo Estándar nos dice que las fuerzas actúan mediante el intercambio de otras partículas, que se denominan “mediadoras”. En concreto, la interacción electromagnética supone el intercambio de fotones (que son exactamente los “cuantos” de radiación introducidos por Planck), la interacción nuclear débil implica el intercambio de tres bosones denominados

W y Z, y la interacción nuclear fuerte necesita de ocho más denominados "gluones".

Sin embargo, a pesar de todos los esfuerzos realizados, el Modelo Estándar no ha podido incluir en su descripción a la fuerza de la gravedad. Además, presenta un importante defecto: contiene una lista de 21 constantes cuyo valor debe conseguirse experimentalmente. Estas constantes especifican, por ejemplo, las masas de los quarks y de los leptones o las intensidades de las interacciones fundamentales. Y no hay por el momento ninguna teoría más fundamental que el propio Modelo y que permita justificar estos valores.

Una de las razones para la construcción del LHC (el "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 una nueva: el denominado bosón de Higgs, cuya existencia nos ayudaría a explicar teóricamente las masas de las partículas elementales. Además, el LHC podría detectar las denominadas partículas supersimétricas, un ingrediente esencial de algunas teorías de unificación como ciertas teorías de cuerdas, y debería permitir medidas mucho más precisas de las masas de los quarks, así como avanzar en el problema de la asimetría que existe en nuestro Universo entre materia y antimateria.

Este gran acelerador resulta de la colaboración de miles de científicos y tecnólogos pertenecientes a cientos de Universidades y laboratorios de 34 países distintos. El LHC realizará esencialmente experimentos de colisión entre dos haces de protones que serán acelerados en sentidos contrarios dentro un túnel circular de 27 kilómetros de circunferencia. El LHC, como todas las instalaciones científicas dedicadas a la investigación fundamental, es también un gran desafío tecnológico que impulsará avances en múltiples direcciones. Sirva como ejemplo el hecho de que para confinar y focalizar los protones en el LHC serán necesarios 1600 imanes superconductores refrigerados por 96 toneladas de helio líquido, lo cual le convierte en la mayor instalación criogénica del mundo.

LA TEORÍA DE LA RELATIVIDAD GENERAL

En 1905 Einstein propuso su Teoría de la Relatividad Especial, que fue completada en 1915 con la formulación de la Relatividad General, que es una teoría de la Gravitación en la que el espacio y el tiempo dejan de ser un fondo inmutable y absoluto para convertirse en un único ente, el espacio-tiempo. En él, toda masa y toda forma de energía generan un campo gravitatorio, que debe siempre entenderse como una deformación del espacio-tiempo subyacente. Así, la materia, la energía, el espacio y el tiempo se entrelazan en el Universo a través de la geometría. En resumen, *"el espacio-tiempo dice a la materia cómo ha de moverse y la materia dice al espacio-tiempo cómo ha de curvarse"*.

Y ocurre que objetos tan masivos como estrellas o galaxias deberían perturbar tanto el espacio-tiempo como para hacer observable este efecto de curvatura. Basándose en sus ecuaciones, Einstein predijo que la luz, que en un universo libre de masas se propaga en línea recta, se curvaría al pasar cerca del Sol, y así lo comprobó Eddington en 1919. 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, esta Teoría predice con exactitud las anomalías observadas en las órbita de Mercurio, Venus y de la propia Tierra.

Una de las consecuencias más importantes de la Relatividad General es que la geometría del espacio-tiempo puede evolucionar con el tiempo de forma dinámica. Y en cuanto los investigadores empezaron a aplicar esta idea al Universo en su conjunto encontraron que éste cambiaba con el tiempo, pudiendo expandirse o contraerse en función de la masa y energía que contuviera. Además, la Teoría implicaba que el Universo tenía un principio (lo que ahora conocemos como el Big-Bang, la gran explosión) y también un final, sobre el que luego hablaremos.

Pero desde Aristóteles siempre se había pensado que el Universo era estático e inmutable, y Einstein así lo creía. De hecho, con el fin de encontrar una solución estática a la evolución del Universo él mismo modificó ligeramente sus ecuaciones añadiendo un término constante que representaba la densidad de energía del vacío, y que recibió el nombre de "constante cosmológica". Sin embargo, muchas observaciones astronómicas realizadas desde los años 20 pusieron de manifiesto que el Universo se estaba expandiendo realmente y que la idea de un Universo estático era una ilusión imposible, por lo que la constante cosmológica se desechó y la idea de un Universo en evolución quedó definitivamente asentada.

EL PROBLEMA DE LA ENERGÍA OSCURA Y LA MATERIA OSCURA

Que el universo se expande está claro. Ahora bien, las observaciones de supernovas muy lejanas realizadas a finales de los años 90 han mostrado que la velocidad de expansión del Universo crece 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. Pero resulta que teniendo en cuenta toda la materia y toda la energía conocidas y haciendo los cálculos correspondientes con las ecuaciones de Einstein, encontramos que el Universo *no* debería expandirse aceleradamente. Muy al contrario, debería estar frenando su expansión.

Ante esta tesitura, sólo 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 es que exista una desconocida forma de energía, la "**energía oscura**", que esté repartida uniformemente en todo el Universo y provoque su expansión acelerada. Si es así, esta energía oscura sería matemáticamente equivalente a la introducción de una constante cosmológica positiva en las ecuaciones de Einstein.

¿Cuál es el orden de magnitud de la energía oscura? Realmente muy pequeño. Tan pequeño que es virtualmente imposible detectarlo en el laboratorio, pero suficiente como para que al llenar todo el espacio sea una contribución muy importante a la energía total del Universo. Para hacernos una idea, y por si a alguna persona de la audiencia con iniciativa se le ha

ocurrido pensar en explotarla como potencial fuente de energía, diremos que toda la energía oscura contenida en el volumen de una esfera del tamaño de la Tierra nos daría lo necesario para el consumo anual de electricidad de una ciudad mediana. Por cierto, con respecto a la crisis energética en la que sin duda nos hallamos, no me resisto a recordarles que la cantidad de energía solar que recibe Arabia Saudí anualmente es 1000 veces mayor que la cantidad de energía que produce con todas sus reservas de petróleo y gas natural. De hecho, el destino de la Tierra es morir de calor por el Sol, pero actualmente nos bastaría con aprovechar una pequeña parte de la energía que nos brinda, y en ello deberíamos esforzarnos.

En efecto, se admite que la Tierra acabará absorbida por el Sol cuando la luminosidad y el tamaño de nuestra estrella aumente como consecuencia de su proceso natural de evolución, lo cual acarreará un aumento progresivo de la temperatura en la superficie de la Tierra. Algunos modelos recientes 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 océanos comience a hervir, nos quedan aún unos 5700 millones de años para disfrutar de un Planeta relativamente habitable.

Conviene en este punto recordar que el aumento estimado de la temperatura promedio de la superficie de la Tierra que sufriremos en el siglo actual como consecuencia del efecto invernadero producido, sin lugar a dudas, por la actividad humana, puede llegar a ser de unos 5 grados celsius. Si comparamos este dato con los modelos que 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 años. Esto es, el efecto invernadero habría acertado ya en más un 15% la esperanza de vida de la Tierra.

Pero en lo que se refiere al **futuro del Universo** en su conjunto, la existencia de energía oscura abre grandes incógnitas, sobre todo porque no podemos excluir con los datos experimentales actuales que la densidad de energía oscura (esto es, la constante cosmológica) sea realmente una constante.

Supongamos en primer lugar que la constante cosmológica está aumentando ligeramente. Es fácil deducir que 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 en ese final toda la materia se acabaría desgarrando y deshaciéndose como efecto de la expansión tremendamente rápida del propio espacio-tiempo.

Por el contrario, la constante cosmológica podría también ir disminuyendo lentamente, llegando incluso a hacerse negativa. Una energía oscura negativa significaría un refuerzo de la gravedad que tendería a frenar la expansión del universo y posteriormente a acelerar su contracción para acabar en el denominado “Big Crunch”, la gran implosión. 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 llena 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.

Con el objetivo de aclarar este dilema se ha diseñado un instrumento llamado LSST 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 densidad de la energía oscura. Un poco más adelante, previsiblemente hacia 2020, un satélite llamado SNAP 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 Universo.

Pero tenemos en la actualidad un segundo gran problema que ha aparecido al hacer medidas sistemáticas de las masas de las galaxias. Hay dos formas de hacer estas medidas: la primera es utilizando la Gravitación para deducir la masa a partir de las velocidades a las que orbitan las estrellas lejanas alrededor de la galaxia. La segunda es realizar una medida "directa" de toda la masa observable de la misma galaxia. Se han utilizado los dos métodos para más de un centenar de galaxias, y en el 80% de los casos los resultados son muy discrepantes, y siempre las galaxias parecen tener mucha más masa que la que somos capaces de observar. Una vez más, sólo hay dos posibles explicaciones: o en las galaxias hay mucha "**materia oscura**" que no podemos detectar, o bien nuestra teoría de la gravitación no es la correcta.

A día de hoy una buena parte de los científicos se inclinan por la primera opción, ya que 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 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 y que se recoge en la página 50. Para los amantes de la Arqueología conviene decir que los gránulos de la Figura son el objeto más antiguo jamás observado. Tiene 13700 millones de años de antigüedad y representa las fluctuaciones en la temperatura del Universo tal y como eran tan sólo un millón de años después del Big Bang.

Sin embargo, si la materia oscura existe, para cerrar el problema deberemos poder decir de qué partículas elementales cuánticas está compuesta. Se han propuesto muchos candidatos, pero ninguno de ellos forma parte del Modelo Estándar anteriormente descrito. Entre ellos se encuentran los denominados neutralinos, que algunos autores sostienen podrían ser detectables en el LHC. Además están en marcha algunos experimentos que pretenden obtener alguna pista sobre la interacción (siempre muy débil) de la materia oscura con materia ordinaria. Pero de momento no contamos con confirmación experimental alguna.

Por tanto, no podemos excluir de momento la segunda posibilidad: que tan sólo estemos aplicando **una teoría incorrecta de la gravitación**. Esta idea fue sugerida ya en 1983 por Milgrom, quien propuso 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 muy pequeña, como ocurre en las estrellas que orbitan lejos de las galaxias*. Sorprendentemente, este artificio resuelve perfectamente el problema de la masa de las galaxias, y además *no disponemos de ninguna confirmación experimental* de la segunda ley de Newton para tales aceleraciones que contradiga esta hipótesis.

Esta dinámica newtoniana modificada puede también interpretarse como una alteración de la Ley de la Gravitación de Newton. 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 del orden de 10^{-10} m seg⁻².

Es cierto que esta explicación parece bastante *ad hoc*, si no fuera porque hay dos hechos más que son sumamente desconcertantes y se coaligan exactamente en la dirección propuesta por Milgrom. El primero es que la aceleración de la expansión del Universo es esencialmente la misma 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, lo que nos estaría diciendo Milgrom es 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 no es válida.

Aun así, podemos pensar que esto es sólo una coincidencia numérica. Pero hay más. Las naves Pioneer 10 y 11 fueron lanzadas en 1972 y 1973 por la NASA con el objeto de visitar otros planetas del sistema solar. Una vez finalizada su misión, han seguido alejándose del Sol en direcciones opuestas. El problema es que las trayectorias seguidas realmente por las naves no coinciden con las previstas teóricamente por la NASA, y que la fuente de discrepancia es una aceleración adicional que atrae ambas naves hacia el sol. ¿Y cuál es el orden de magnitud de dicha aceleración de origen desconocido? Asombrosamente, el mismo que el de la aceleración de la expansión del universo y, por tanto, el mismo que el de la aceleración de Milgrom.

Son demasiadas coincidencias para quedarse tranquilo, por lo que hay ya propuestas de sondas espaciales diseñadas específicamente para verificar si existe esta anomalía de la gravitación en el exterior de nuestro sistema solar y poder medir su valor con precisión. Así mismo, se están realizando experimentos muy finos para medir posibles desviaciones de la fuerza de Newton a escala submicroscópica, ya que la validez de la ley de la gravitación sólo ha sido comprobada a distancias de 0,1 mm, pero no menores. Veremos qué ocurre en los próximos años, pero el suspense está servido.

HACIA UNA TEORÍA CUÁNTICA DE LA GRAVEDAD

El objetivo de conseguir una nueva teoría que explique todas las interacciones fundamentales, incluyendo la gravitatoria, ha tenido un protagonista destacado en los últimos veinte años: las "**teorías de cuerdas**". Se denominan así porque su idea básica es que las entidades fundamentales de las que está formado el mundo físico no son partículas elementales puntuales, sino objetos extendidos unidimensionales, esto es, cuerdas. Por supuesto, estas cuerdas serían inapreciables a escala macroscópica e incluso atómica, ya que tendrían una longitud de unos 10^{-35} m. Esta longitud, sobre la que luego volveremos, es la denominada "longitud o escala de Planck" y es tan pequeña con respecto a un protón como lo es un protón con respecto a una esfera de 100 kilómetros de diámetro.

Pero, además, si se quiere que las teorías de cuerdas funcionen habremos de suponer que las cuerdas se mueven en un espacio con dimensiones adicionales. Así, 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). Pero entonces ¿por qué esas dimensiones extra de nuestro Universo no se ven ni tan siquiera a escala atómica? La respuesta es que estarían "enrolladas" o "compactificadas" sobre sí mismas de forma que serían inapreciables y afectarían sólo a los procesos que ocurren en la escala de Planck.

Pues bien, si aceptamos que las cuerdas son las entidades fundamentales del mundo físico, las distintas partículas elementales corresponderían a 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 están todas las comprendidas en el Modelo Estándar, así como otras muchas nuevas familias entre las que se han encontrado candidatos teóricos a ser partículas mediadoras de la interacción gravitatoria, que de ese modo se unificaría con el resto de interacciones.

Por supuesto, no hay ninguna posibilidad de detectar cuerdas directamente en el laboratorio. Tan sólo podemos esperar encontrar trazas de ellas 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 teoría. Sin embargo, estamos lejos de tener a día de hoy un conjunto concreto de predicciones significativas basada en las cuerdas y que sea verificable experimentalmente en un futuro próximo, incluso contando con el LHC. Además, 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 que, a juicio de algunos autores, puede ser insalvable.

En este contexto, a finales de los años ochenta se propuso una nueva teoría alternativa a las cuerdas y denominada "**gravedad cuántica de bucles**", que presenta la ventaja de no necesitar dimensiones adicionales y de ser compatible con una constante cosmológica positiva. La idea fundamental de 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 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 existe una unidad mínima observable de longitud, de área y de volumen y también una unidad mínima observable de tiempo. Este "cuanto de longitud" vendría dado de nuevo por la denominada "longitud de Planck", que es del orden de 10^{-35} m, y el tiempo mínimo de esta teoría sería el "tiempo de Planck", del orden de 10^{-43} segundos. Así, el espacio-tiempo sería una especie de "espuma" construida con mallas cuya distancia entre nodos es del orden de la longitud o del tiempo de Planck.

Partiendo de estas ideas se ha conseguido elaborar en los últimos años una compleja Teoría en la que la Gravedad se describe cuánticamente como una deformación de la espuma que forma el espacio-tiempo, al estilo de la Relatividad General. La idea es sin duda sugerente, pero la pregunta es si este modelo tiene consecuencias experimentales verificables.

La respuesta reside en darse cuenta de que la longitud de Planck que nos define la "espuma cuántica" es una constante universal independiente del estado de movimiento del observador, y 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.

Entonces parece claro que la Relatividad Especial debe modificarse para ser compatible con la espuma cuántica del espacio-tiempo. Estas nuevas teorías de la relatividad existen desde hace unos diez años y se denominan "**Relatividad Especial Doble**" ya que, además de la velocidad de la luz, incorporan como segunda escala fundamental invariante a la propia longitud de Planck. Cabe comentar aquí que la construcción de este tipo de modificaciones de la Teoría de la Relatividad Especial es precisamente una de las líneas de investigación en la que nuestro grupo de la Universidad de Burgos lleva años trabajando en estrecha colaboración con otros grupos de las Universidades de Valladolid, Roma y Florencia.

Y lo interesante es que algunos aspectos de estas nuevas Teorías de la Relatividad pueden ser comprobados experimentalmente de varias formas. Una de ellas es el estudio de las erupciones cósmicas de rayos gamma. Estas erupciones son fenómenos muy violentos que se produjeron en galaxias que están a millones de años luz de distancia. Por tanto, 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 que han atravesado. Efectivamente, la gravedad cuántica de bucles predice que este efecto consistiría en que los rayos gamma con distintas energías tardarían tiempos ligeramente distintos en llegar a la Tierra.

Entre mayo y julio de 2005, el telescopio MAGIC ubicado en el Instituto de Astrofísica de Canarias 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 son compatibles con predicciones basadas en distintos modelos de gravedad cuántica.

Así mismo, el satélite FERMI, lanzado el 11 de junio de 2008, tiene también como uno de sus objetivos medir con precisión esta predicción experimental. En la misma línea se trabaja 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 de muy alta energía que lleguen a las capas superiores de la atmósfera de la Tierra. 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 a muy altas energías, ya que los cálculos basados en esta Teoría muestran que los protones con energías mayores de ese límite no deberían llegar a la Tierra.

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), lo cual apunta a la importancia de las observaciones en astrofísica de partículas para un futuro inmediato.

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. Sin embargo, cuando ambas Teorías se contemplan en conjunto y se confrontan con nuevos datos observacionales obtenidos en los últimos años, resultan claramente insatisfactorias.

Además, a día de hoy nos vemos forzados a aceptar que para que el Universo tenga la expansión acelerada que observamos, 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.

Está claro que nos queda mucho por hacer, pero 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 la Historia, es que debemos ser humildes y abiertos a las sorpresas que, afortunadamente, encontramos cuando nos aproximamos a la realidad sin prejuicios. Porque la verdad sobre la Naturaleza “gusta de esconderse”, como decía Heráclito, y en ello reside el placer de investigar. Además, parece que levantando una vez más nuestra mirada hacia arriba y escrutando las estrellas podremos encontrar muchas indicaciones sobre el camino a seguir.

Pero, pese a nuestro optimismo, no seamos ilusos ni arrogantes. Aunque consigamos completar esta revolución inacabada sobre nuestra imagen física del Universo, ya nos advirtió Max Planck de que, en último término, *“la Ciencia no puede resolver el misterio último de la naturaleza porque, finalmente, nosotros mismos somos parte del misterio que estamos intentando resolver.”*

Y no podemos ni debemos olvidar que en un momento de la Historia de la Humanidad 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”, cualquier persona de este planeta pueda tener la posibilidad de disfrutar de una vida digna que le permita, si ese es su deseo, dedicarse a observar las estrellas.

He dicho.