

SOBRE GRAVEDAD CUÁNTICA

UN DESEO LLAMADO GRAVEDAD CUÁNTICA

¿POR QUÉ HAY QUE ACERCAR LA RELATIVIDAD Y LA CUÁNTICA? ¿CÓMO DE CERCA ESTAMOS DE CONSEGUIRLO?

Por Carlos Barceló (IAA-CSIC)

SIEMPRE HEMOS VIVIDO EN EL MISMO MUNDO, O POR LO MENOS NO HEMOS NECESITADO HASTA EL MOMENTO PARA EXPLICAR NUESTRO MUNDO que sus reglas fundamentales hayan ido cambiando. Lo que sí hemos cambiado en varias ocasiones es nuestra forma de imaginarlo y entenderlo. Cuando a un niño se le esconde un muñeco poniéndole encima una caja invertida, al principio imagina que ha desaparecido, que las cosas pueden desaparecer, le parece lógico y no le preocupa. Más adelante comienza a sospechar que quizá sea mejor imaginar que las cosas no desaparecen, que simplemente no se ven, pero que permanecen en el mismo lugar. Solo le hace falta hacer el experimento de, valientemente, levantar la caja para corroborar que la nueva explicación, la nueva teoría, funciona. Pues bien, las civilizaciones, a través de los científicos, sus eternos niños, funcionan exactamente igual. Cuando algo resulta extraño por cualquier razón, se busca una nueva teoría que haga ese algo más natural y consistente con los otros algos. Este algo es en muchas ocasiones un fenómeno observado, ya sea directamente en la naturaleza o en un laboratorio. En otras, este algo puede ser de naturaleza teórica o incluso estético-metafísica, por ejemplo, una inconsistencia lógica, una hipótesis extraña o una falta de armonía. Existe una manera de entender nuestro mundo, que llamaré mecanicista, que creo sigue siendo en la actualidad la más sencilla para los profanos en física, y para algunos profesionales entre los que reconozco me encuentro. Imaginemos que el mundo está hecho de trocitos de materia repartidos por el espacio y moviéndose con el tiempo. Este espacio no es más que lo que nuestra intuición sugiere: un cubo vacío de tres dimensiones, muy grande o quizá infinito, donde la suma de los ángulos de los triángulos es obviamente 180 grados. Por su parte, el tiempo es un marcador universal del devenir de todos los acontecimientos. El que esta descripción sea sencilla no significa que sea simple: de hecho, el funcionamiento completo de este mundo podría dar lugar a situaciones de gran complejidad.

...PERO HUBO UNA SORPRESA: AL FINAL, EN VEZ DE UNA NACIERON DOS TEORÍAS MELLIZAS. CADA UNA DE ELLAS CUESTIONABA DISTINTOS ASPECTOS DEL MUNDO MECANICISTA

A principios del siglo XX esta imagen mecanicista del mundo empezó a resultar insatisfactoria para los científicos. Una nueva teoría del mundo estaba a punto de nacer... Pero hubo sorpresa: al final en vez de una nacieron dos teorías mellizas. Cada una de estas teorías cuestionaba distintos aspectos del mundo mecanicista.

La luz como detonante de las revoluciones

En el marco mecanicista la materia puede entenderse como constituida por elementos básicos discretos irreductibles (hipótesis atómica), o como una serie de sustancias continuas. Dentro de las diversas sustancias que pueblan el espacio

se sabía desde antaño de la existencia de una singular, a la vez que ubicua: la luz. Para imaginar un mundo mecanicista como el que describía arriba, nada más sencillo que tomar una hipótesis atómica para toda la materia incluyendo la luz. Construir un mundo mecánico fundamental con elementos discretos y continuos en interacción es algo que suele dar lugar a problemas de consistencia, cuando no producir una sensación de falta de armonía. Por lo tanto, en primera instancia, mejor pensar que todos los elementos tienen la misma naturaleza ya sea discreta, como digo la que se me antoja más sencilla, o continua.

Durante mucho tiempo, y siguiendo las ideas de Newton, la luz era imaginada como constituida por corpúsculos elementales, luego perfectamente encajable en un mundo mecánico discreto. En la práctica estos corpúsculos parecían viajar a una velocidad fija y enorme, aunque dentro de la conceptualización mecanicista nada indica que no pueda conseguirse que viajen a más velocidad. Sin embargo, durante el siglo XIX la luz afianzó una descripción ondulatoria (por ejemplo, a través del experimento de la doble rendija de Young y sus franjas de interferencia, un fenómeno típicamente ondulatorio): la luz se comportaba como una onda en un estanque especial, hecho de una sustancia hipotética llamada éter luminífero. La hipótesis atómica para la materia no lumínica, hipótesis que se afianzó con la entrada en el siglo XX, conllevaba por tanto un problema de consistencia con la materia lumínica. Como veremos, esta hipótesis atómica mecanicista tuvo una existencia efímera.

La revolución cuántica

La teoría cuántica nació al cuestionar por razones experimentales la naturaleza de los constituyentes elementales de la materia no lumínica. Pero también puede decirse que surgió para intentar conciliar las descripciones de las materias lumínica y no lumínicas. Para explicar principalmente los experimentos con espectros atómicos (la esencia de la interacción luz-materia no lumínica) era mejor dejar de concebir los constituyentes de la materia no lumínica (las partículas elementales) como diminutas bolitas con una posición y una velocidad determinadas. En la interpretación más estándar de la mecánica cuántica, estos descriptores de la configuración de una partícula no son propiedades que "poseen" las partículas, sino que aparecen solamente cuando en un experimento se pregunta sobre ellos. Además, solo aparecen de forma complementaria: hay propiedades que no pueden aparecer simultáneamente, como son la posición y la velocidad (o momento) de una partícula. Es como si situar una partícula en una posición precisa determinada hiciera que su velocidad se desdibujara. En esta nueva teoría, eran ahora los constituyentes de la materia no lumínica los que pasaban a asemejarse a la luz ondulatoria: dejaban de ser imaginados como partículas puntuales para parecerse más a ondulaciones en estanques especiales, algo más plástico y con capacidad para distribuirse por el espacio.

Ahora bien, estas ondas no lumínicas no se conceptualizan como ondas con una realidad física completa, sino más bien como ondas de probabilidad. A partir de conocer la onda asociada a una partícula de materia –su configuración en el espacio a un tiempo dado– se puede conocer probabilísticamente qué sucedería si pasado un tiempo se hiciera un experimento para conocer un determinado descriptor de la situación o estado de la partícula. Desde la perspectiva cuántica la materia clásica de nuestra conceptualización mecanicista no es más que el resultado de colocar juntas una infinidad de partículas elementales cuánticas de tal forma que en promedio se comporten de manera (casi) completamente determinada. Dada una descripción mecanicista de un sistema de materia, se dice que el sistema es cuantizado cuando se genera una versión cuántica de los ingredientes del sistema original. A esta nueva descripción cuántica se suele llegar siguiendo unas reglas de cuantización bien establecidas. La teoría cuántica de la materia supuso una

revolución en nuestra forma de entender la materia. Crucial para lo que sigue, sin embargo, es destacar que en esta teoría cuántica el espacio y el tiempo seguían siendo los viejos conocidos del modelo mecanicista.

La revolución relativista

En paralelo con el desarrollo de la teoría cuántica se dio otra revolución. La teoría de la relatividad nació al explorar qué sucedería si la velocidad de la luz fuera en realidad un límite infranqueable (el postulado de la luz). En la nueva dinámica, los conceptos de espacio y tiempo del modelo mecanicista se antojaban innecesarios y sin valor operacional. La simultaneidad de dos sucesos que ocurren en lugares distantes pasaba a ser una cuestión dependiente del observador, dejaba de haber un tiempo universal. El concepto de separación espacial entre objetos también pasaba a tener un carácter no universal (solamente un nuevo concepto, el intervalo espaciotemporal, tenía un sentido invariante y universal).

AHORA ERAN LOS CONSTITUYENTES DE LA MATERIA NO LUMINICA LOS QUE PASABAN A ASEMEJARSE A LA LUZ ONDULATORIA

A esta primera revolución relativista (conocida como relatividad especial), le siguió una segunda que involucraba la interacción gravitatoria (relatividad general). Según Newton todos los cuerpos con masa se atraen con una fuerza proporcional a sus masas e inversamente proporcional al cuadrado de su distancia –es la fuerza que mantiene a los planetas en sus órbitas y a nosotros pegados a la Tierra–. Esta fuerza se transmitía a distancia de forma instantánea, es decir, a velocidad infinita, y entraba en contradicción con la idea de que ninguna información pudiera viajar a más velocidad que la luz. La búsqueda de una teoría relativista de la gravitación nos llevó mucho más lejos de lo que podía sospecharse en un inicio. Esta búsqueda se convirtió en sinónimo de replantear completamente la descripción del espacio y el tiempo. El espacio y el tiempo del mundo mecanicista ejercen efectos sobre la materia (al definir qué es un movimiento inercial) pero no se ven afectados por ella. Esta situación insatisfactoria es modificada en la teoría de la relatividad general. El espacio y el tiempo dejan de ser externos e inmutables para conformar un sistema plástico y dinámico, el espaciotiempo, en relación directa con la materia que contiene. El fenómeno gravitatorio se reducía nada menos que a entender la estructura geométrica del espaciotiempo. El espaciotiempo se curva en presencia de materia de una forma precisa que especifican las ecuaciones de Einstein. En zonas apartadas de la materia esta curvatura se hace cero, dando lugar al espaciotiempo plano de la relatividad especial.

El imperio del campo

El resultado de este periodo revolucionario fue por una parte la teoría cuántica, que tiene un concepto de materia modificado pero un concepto de espacio y tiempo mecanicista, y la teoría relativista, que tiene un concepto mecanicista de materia pero un concepto modificado de espacio y tiempo. Visto así es inmediato desear hacer una teoría que contenga ambos conceptos, los de materia y espaciotiempo, modificados. También es directo intuir que ya que ninguna de estas teorías se hizo pensando en la otra, combinarlas podría no ser sencillo.

Un primer intento por acercar relatividad y cuántica se hizo imponiendo solamente el requisito de velocidad máxima a la teoría cuántica, es decir, dejando a un lado la gravedad, o lo que es lo mismo, la plasticidad del espaciotiempo en relación a la distribución de materia. Así se llegó, después de un impás llamado teoría cuántica relativista en el que se descubrieron nuevas inconsistencias, a lo que hoy se conoce como teoría cuántica de campos relativistas (a la que nos referimos hoy día cuando

hablamos sobre teoría cuántica fundamental). Esta síntesis de ideas proporciona una visión uniforme de las materias lumínica y no lumínica. A cada tipo de constituyente elemental le corresponde un campo (una entidad continua, asimilable a un tipo de estanque). Las excitaciones ondulatorias de cada uno de estos campos corresponden a las diferentes partículas elementales, ya sean fotones para la luz o diversos tipos de fermiones (electrones, quarks, etc.) para la materia no lumínica. Estos campos son cuánticos, lo que significa que su forma no está perfectamente determinada, solamente a un nivel probabilístico. Esta teoría proporciona un marco explicativo muy poderoso sobre la estructura de la materia y se ve refrendada en los laboratorios de altas energías diariamente.

Volviendo la mirada a la gravedad, la geometría del espaciotiempo, vemos que ella también puede considerarse un campo. Por tanto, se puede decir que la física contemporánea imagina el mundo como un serie de campos en interacción donde uno de ellos, el gravitatorio, desempeña el papel especial de contenedor o soporte del resto. Hasta aquí todo maravilloso, el problema es que el campo gravitatorio de la relatividad general no es cuántico y el resto sí.

Inconsistencia clásico cuántica

Como ya hemos apuntado, las ideas de la mecánica cuántica material se pueden trasladar del espacio y el tiempo usado en la descripción mecanicista a un espaciotiempo relativista, siempre que este espaciotiempo sea fijo y externo a la teoría cuántica. El punto crucial es que en la mecánica cuántica estándar el espaciotiempo no es cuántico. La relatividad general nos dice, sin embargo, que el espaciotiempo debe su forma a la distribución de materia que contiene. Pero entonces, ¿cómo puede ser compatible tener un espaciotiempo perfectamente determinado si la materia que lo determina en última instancia es cuántica y, por tanto, no perfectamente determinada? En general, parece que tener entidades clásicas y cuánticas en interacción conlleva inconsistencias. Por ejemplo, un famoso análisis de Eppley y Hannah de 1975 mostraba cómo una interacción clásico-cuántica en gravedad llevaría a violaciones de la conservación del momento, del principio de incertidumbre o del postulado de la luz. Estas inconsistencias llevan a pensar en la necesidad de cuantizar la gravedad o, lo que es lo mismo, la estructura del espaciotiempo.

LA BÚSQUEDA DE UNA TEORÍA RELATIVISTA DE LA GRAVITACIÓN NOS LLEVÓ MUCHO MÁS LEJOS DE LO QUE PODÍA SOSPECHARSE. ESTÁ BÚSQUEDA SE CONVIERTE EN SINÓNIMO DE REPLANTEAR COMPLETAMENTE LA DESCRIPCIÓN DEL ESPACIO Y EL TIEMPO

Desde un punto de vista exclusivamente lógico se podría concluir igualmente que evitar inconsistencias necesita de la existencia de una teoría clásica para la materia, que maneje los hilos de la mecánica cuántica, o una teoría híbrida en la que no hubiera ni aspectos puramente clásicos ni cuánticos. La primera vía ha suscitado muchos argumentos de imposibilidad (teoremas que dicen esencialmente que no se puede reducir lo cuántico a lo clásico); además, volver a formulaciones clásicas para la materia se antoja anticuado. Por su parte, la segunda vía viene siendo explorada pero de forma muy minoritaria y no tiene todavía una formulación precisa y completa. Probablemente el sabor fundamental de lo cuántico y la previsión de que incorporaría aspectos discretos a la descripción del espaciotiempo –cosa atractiva, entre otras cosas, por su potencial eliminación de infinitos en teoría de campos (ver más adelante) y por sugerir la existencia de un límite al desmenuzamiento del mundo en ingredientes más y más pequeños– han estado detrás de que la vía más explorada haya venido siendo la cuantización de la gravedad. Sin

embargo, creo que es bueno tener presente que gravedad cuántica podría ser cualquier teoría que contuviese de forma armónica lo cuántico y lo espaciotemporal.

Problemas con la cuantización

La forma más directa de cuantizar la gravedad era seguir las reglas del resto de teorías de campos cuánticos sobre un espacio-tiempo plano. La cuantización perturbativa, como viene a llamarse, evidenció dificultades considerables cuando se aplicó a la gravedad. Cuando se calcula por medio de las teorías cuánticas de campos estándar el valor de magnitudes medibles en laboratorio, en vez de dar lugar directamente a números reales finitos (3.33, 7.5, etc.) aparecen divergencias, números infinitos. No obstante, existe un procedimiento matemático con una sólida base física y conocido como renormalización con el se pueden controlar estos infinitos y extraer de ellos los resultados finitos buscados (por ejemplo, estos cálculos dan lugar en el caso del campo electromagnético cuántico a resultados muy precisos). Sin embargo, se demostró que la teoría cuántica del campo gravitatorio es no renormalizable perturbativamente, es decir, los infinitos que aparecen en los cálculos no pueden ser absorbidos en un número finito de parámetros, lo que los hace parecer incontrolables. La gravedad empezó así a adquirir fama de arisca y el problema de cuantizar la gravedad fama de difícil, a la vez que fundamental.

El problema debía ser abordado de forma más sutil o indirecta. Antes de pasar a describir algunas de las estrategias alternativas de cuantización de la gravedad que se han venido y vienen investigando, creo adecuado hacerse una pregunta como si de abogado del diablo se ejerciera:

¿Tenemos que preocuparnos?

Consistencia y más consistencia. Tener una forma satisfactoria y armónica de imaginar el mundo no es desdeñable, pero ¿qué pasaría si en la práctica no hubiese ningún fenómeno que requiriese del uso simultáneo de la mecánica cuántica y de la relatividad general? Dado un fenómeno, solamente habría que catalogarlo en primera instancia como cuántico o gravitatorio y a partir de ahí tendría una explicación satisfactoria. Sin embargo, no parece que este sea el caso. Existen al menos tres situaciones en las que entender el fenómeno parece requerir poseer una teoría de gravedad cuántica, entendida en su forma más amplia.

El colapso estelar. La relatividad general nos dice que cuando una estrella colapsa bajo su propia gravedad hay un momento en que nada puede detener el colapso, lo que conduce a la formación de un agujero negro. En el interior de un agujero negro astrofísico cantidades ingentes de materia acabarían compactándose en regiones de tamaño subatómico. Es de esperar que entender cómo se comportan estas regiones requiera apelar tanto a la gravedad (situación con mucha materia y por tanto con gran curvatura espaciotemporal), como a la cuántica (situación con elementos microscópicos). La gravedad cuántica debería tener la llave para desentrañar el comportamiento de tales regiones extremas, que pueden afectar a toda la física del agujero negro, especialmente a su horizonte de sucesos.

Un origen explosivo para el universo. El universo que habitamos parece ser el producto de la expansión de una de estas regiones extremas, una que contendría un embrión completo de universo. De nuevo, entender el desarrollo embrionario del universo necesita de la gravedad cuántica.

La energía oscura. Observaciones en la última década indican que las galaxias se expanden en la actualidad de forma acelerada, contrariamente a como se espera

debido a la gravedad estándar. Es como si el universo estuviera lleno de una materia repulsiva, denominada energía oscura. Resulta que el vacío cuántico se comporta gravitatoriamente justo como este tipo de materia. Quizá entender el comportamiento del universo a gran escala requiera entender la naturaleza del vacío a escala microscópica, una vez más un maridaje entre lo cuántico y lo espaciotemporal.

Líneas de investigación

El problema de la gravedad cuántica se viene atacando desde diferentes perspectivas desde hace ya más cuarenta años. En este tiempo hemos avanzado enormemente en el entendimiento de los diferentes problemas estructurales que han ido apareciendo. Aún así, podemos decir que a día de hoy no hay una teoría de gravedad cuántica completamente satisfactoria.

Hay un problema central y recurrente en los distintos intentos por construir una teoría de gravedad cuántica. Debido probablemente a cómo nació, la teoría cuántica se encuentra a gusto cuando hay estructuras fijas a priori en la construcción. Por el contrario, la relatividad general parece repudiar este tipo de estructuras. Parece necesario aliviar esta tensión. Unas aproximaciones al problema se inclinan por salvaguardar en lo posible las nociones cuánticas, otras por salvaguardar las relativistas. La receta perfecta probablemente esté aún por llegar. Sin entrar en detalles técnicos (y sin pretender que se entiendan completamente dado lo breve de las reseñas), voy a mencionar algunas de estas aproximaciones para dejar un sabor del tipo de estructuras bajo análisis.

Gravedad cuántica de lazos. Es un tipo de cuantización no perturbativa que parte de la inexistencia de estructuras espaciotemporales fijadas a priori (a veces se habla de independencia del fondo). La geometría del espacio es discreta teniendo estados donde las áreas y volúmenes aparecen solo en unidades de unas áreas y volúmenes elementales. Todavía no se sabe controlar completamente la versión espaciotemporal. El nombre lazos le viene de la forma de lazo de una de las variables fundamentales que aparece en su descripción matemática.

Teoría de supercuerdas. Esta teoría supone que los constituyentes elementales son cuerdas (no partículas) enrolladas microscópicamente hasta hacerse pasar por partículas. Sorprendentemente, una de las excitaciones de una cuerda cerrada se comporta precisamente como un elemento espaciotemporal (un gravitón). Es por esto que la teoría de cuerdas se considera una teoría de gravedad cuántica. La teoría además contiene de forma unificada la materia y el espaciotiempo. Utiliza como elemento fiduciario el espaciotiempo plano de la relatividad especial. Aunque es una teoría con un alto nivel de consistencia, tiene el grave problema de que su dinámica puede ser tan compleja que no es fácil extraer de ella predicciones claras.

LA GRAVEDAD CUÁNTICA COMENZÓ ASÍ A ADQUIRIR FAMA DE ARISCA Y EL PROBLEMA DE CUANTIZAR LA GRAVEDAD FAMA DE DIFÍCIL, A LA VEZ QUE FUNDAMENTAL

Salvaguarda asintótica. Dijimos que la gravedad cuántica perturbativa no era renormalizable. Sin embargo, aún podría ser renormalizable no perturbativamente. Esto sucedería si la teoría tuviera un punto fijo del llamado flujo de renormalización, algo que no se conoce todavía. En la actualidad se está viendo que los múltiples infinitos que aparecen en la cuantización perturbativa pueden ser más manejables de lo que se pensó inicialmente. Las técnicas de integral de camino son fundamentales en esta aproximación.

Gravedad emergente. Esta aproximación parte de la hipótesis de que quizá la gravedad no tenga que ser cuantizada, sino que solamente tenga sentido clásico, y que los ingredientes que subyacen a la materia cuántica y al espaciotiempo pudieran tener una naturaleza muy distinta a la de los campos con los que estamos acostumbrados a tratar. Esta aproximación al problema recoge lecciones sobre cómo aparecen distintos comportamientos colectivos en la física de la materia condensada.

Epílogo

Posiblemente gran parte de la dificultad en construir una teoría de gravedad cuántica tenga su origen en la inaccesibilidad de los fenómenos gravito-cuánticos a la observación y experimentación. Sin una retroalimentación experimental es difícil progresar paso a paso. Además, difícilmente se llegará a una teoría única exclusivamente por argumentos de consistencia formal. El juez supremo en todas las cuestiones físicas es siempre la naturaleza y a ella tendremos que recurrir finalmente. Afortunadamente, también aquí se ha avanzado mucho y quizá pronto tengamos observaciones con un marcado carácter gravito-cuántico (por ejemplo, se espera tener pronto la fotografía del horizonte de un agujero negro).

Las observaciones a su vez requieren del aparataje teórico: sin las gafas teóricas adecuadas los hechos pueden fácilmente pasar desapercibidos. No sabemos a qué altura del camino estamos por lo que lo mejor es seguir caminando. La búsqueda de la gravedad cuántica tiene el sabor romántico de la búsqueda de Shangri-La, El dorado o el Santo Grial, una última frontera desde donde todo se verá iluminado. Es una debilidad humana creer en últimas fronteras, y una debilidad maravillosa pues nos motiva a emprender caminos realmente arduos que solo al tiempo empiezan a verse salpicados de sabiduría. Si de algo estoy seguro es de que la gravedad cuántica no será la última frontera de la física. Sin embargo, les puedo asegurar que el camino hacia este deseo de unidad es iluminador y apasionante.

Carlos BARCELÓ (IAC-CSIC)
Este artículo aparece en el número 45, marzo 2015,
de la revista *Información y Actualidad Astronómica*,
del Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA-CSIC)