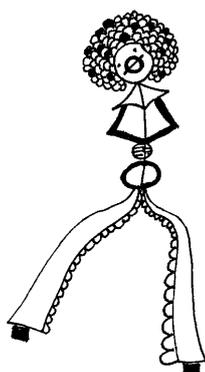


UNA TEORÍA CUÁNTICA

de la relatividad a la luz del centenario de la Teoría de la Relatividad General



Barthélemy Jean – Christian d'Ans Alleman

En este artículo se discutirá el gran impacto de la Teoría de la Relatividad General a la luz de su primer siglo de haber sido publicado por Albert Einstein en 1915. Las precisas predicciones de esta teoría debidamente validadas por la experimentación y la observación en la cosmología hacen de ella una de las teorías de mayor impacto en nuestra concepción del universo. Las ecuaciones de la Teoría de la Relatividad General son estudiadas para buscar una compatibilidad entre la teoría cuántica y la relatividad, y se discutirá los alcances y problemas a solucionar mediante la postulación de nuevas teorías como la teoría cuántica de la relatividad o la teoría de cuerdas, entre otras.

Palabras clave: Relatividad General, Albert Einstein, Teoría cuántica de la relatividad, Teoría de cuerdas.

Introducción

El año 2015 marca el centenario de la presentación de Albert Einstein a la Academia Prusiana de la Teoría de la Relatividad General, la cual representó un cambio inmenso respecto a la Ley de Gravitación Universal de Isaac Newton de 1687, al mostrar que el espacio y el tiempo no son inmutables, sino fenómenos dinámicos sometidos a una evolución. Esto revolucionó la forma de entender la gravedad, mediante la descripción de la fuerza como una deformación de la estructura del espacio-tiempo. Dicha teoría es la base de la cosmología moderna y permitió a la ciencia plantearse preguntas impensables hasta ese momento acerca del origen,

composición y destino del universo como un todo. También ha sido esencial junto con la teoría de partículas (el Modelo Standard) para establecer el paradigma actual del universo, cuyos elementos más importantes son el Big Bang, el modelo inflacionario, la existencia de radiación cósmica de fondo y la existencia de la materia y energía oscuras. Pero a la luz de sus primeros cien años pareciera necesario ir más allá de la teoría de la relatividad general para forjar una visión coherente del mundo físico, donde incluso cabe también cuestionarse sobre la gravitación en sí misma para la comprensión de algunos fenómenos cósmicos y de la evolución del universo.

Presentamos a continuación la fórmula aplicada de la teoría de la relatividad general al campo gravitatorio presentada por Einstein en su publicación de 1915.

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu},$$

La fórmula anterior indica que la gravedad es una manifestación de la curvatura del espacio. El lado izquierdo de la ecuación describe la geometría del espacio (R) y el lado derecho la distribución de masa y energía (T). Los subíndices en letras griegas representan las cuatro dimensiones de espacio y tiempo. Otra presentación común es la siguiente de la fórmula:



$$G_{\alpha\beta} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\alpha\beta}$$

Donde “La parte derecha de esta ecuación describe el contenido de energía de nuestro universo” y “La parte izquierda describe la geometría del espacio-tiempo. La igualdad refleja el hecho de que la relatividad general de Einstein, la masa y la energía determinan la geometría y paralelamente, la curvatura es una manifestación de lo que llamamos gravedad.

Validez de la Teoría de la Relatividad General

Una teoría no tiene valor científico si no genera predicciones específicas que se puedan medir y reproducir en laboratorios o en manifestaciones naturales registrados en observatorios astronómicos. Es así que la Teoría de la Relatividad General de Einstein se ha comprobado experimentalmente y es consistente con las observaciones astronómicas. Explica, por ejemplo, el desplazamiento del perihelio de Mercurio cada año debido a la deformación del espacio-tiempo cerca del Sol, debido a que Mercurio se encuentra tan cerca del Sol que la geometría en la cual se desplaza manifiesta ya una curvatura evidente, lo que hace que su trayectoria orbital tenga una dinámica distinta, solo explicable con las ecuaciones relativistas de la gravedad y que la mecánica de Newton concebida para un universo plano deja de ser válida.

Predijo también la desviación de los rayos de luz al pasar en cercanía de estrellas: la luz sigue trayectorias geodésicas en el espacio-tiempo y la luz procedente de una estrella lejana, debido a la presencia de una masa en su camino experimentará una desviación en su trayectoria, que será máxima cuando los rayos pasen muy cerca del borde del disco solar, por ejemplo, donde el campo gravitatorio creado por el Sol, es decir la curvatura del espacio-tiempo es mayor.

En 1919 sir Arthur Eddington lideró una expedición al golfo de Guinea donde observó el efecto esperado en la posición de cinco estrellas, durante el eclipse solar que tuvo lugar el 29 de mayo. Este éxito de la teoría convirtió a Einstein en una celebridad mundial. Otras validaciones no menos importantes fueron las ondas gravitacionales, cuya existencia fue confirmada indirectamente por observaciones astronómicas de púlsares binarios por Hulse y Taylor en 1975, que el tiempo transcurre más lentamente donde la gravedad es más intensa según mediciones realizadas por J.C. Hafele y R. Keating en 1971. Asimismo, que la frecuencia de la luz es afectada por la gravedad, fenómeno observado por Pound y Rebka en 1960, y los ya muy mencionados agujeros negros vistos múltiples veces por diversos investigadores. Con todo, la mayor confirmación fue la medición del principio de equivalencia comprobado por Roll, Krotkov y Dicke en 1964, en el que la teoría ha sido verificada con gran precisión: la brecha entre la teoría y la experimentación actualmente es de menos de 10^{-13} en términos relativos. Este principio establece que la masa inercial (factor de proporcionalidad entre fuerza y aceleración) es equivalente a la masa gravitacional (tamaño en el que la fuerza gravitatoria es proporcional). Finalmente, una de las últimas verificaciones es que los objetos astronómicos en rotación arrastran el espacio como si este fuera melaza, de acuerdo a las observaciones realizadas por el satélite Gravity Probe B en el 2011.

«Una teoría no tiene valor científico si no genera predicciones específicas que se puedan medir y reproducir en laboratorios o en manifestaciones naturales registrados en observatorios astronómicos. Es así que la Teoría de la Relatividad General de Einstein se ha comprobado experimentalmente y es consistente con las observaciones astronómicas.»

De hecho, la teoría ha sido probada hasta ahora solo en situaciones en las que la intensidad de la gravedad es baja, como es el caso en el Sistema Solar o en el contexto cosmológico. Queda por verse en contextos de campos fuertes con grandes intensidades, por ejemplo en la vecindad de agujeros negros. La relatividad general tampoco ha sido probada en el campo microscópico: las mediciones de las fuerzas gravitacionales a esta escala son muy difíciles porque otras fuerzas o otros efectos incluido el efecto Casimir, debido a las fluctuaciones del vacío cuántico, nublan la medición de los efectos

gravitacionales cuando acercamos mucho dos objetos. Es por ello que hasta ahora solo se pudo medir la gravedad a escalas superiores al micrómetro.

La consistencia matemática de la Teoría de la Relatividad General

Esta teoría sí tiene una consistencia matemática: cada vez que se trata de cambiar incluso solo ligeramente algo en las formulas, aparecen inconsistencias, inestabilidades inherentes. Desde este punto de vista, parece que la Teoría de la Relatividad General es una especie de isla aislada en un mar de teorías inconsistentes. Por otro lado, algunas de las soluciones de las ecuaciones de Einstein (ecuaciones que relacionan la distribución de masa y energía a la geometría del espacio-tiempo) tienen singularidades, es decir puntos de espacio-tiempo en el que ciertas cantidades físicas son infinitas. Estas singularidades que no pueden corresponder a una realidad física se pueden interpretar como una inconsistencia de la teoría, pero la aparición de estas singularidades está probablemente relacionada con el hecho de que la relatividad general haya alcanzado su límite de validez, y los aspectos cuánticos deberían, al menos en estas regiones del espacio-tiempo, tomarse en cuenta.

Hasta ahora las teorías clásicas no cuánticas no pueden constituir alternativas a la relatividad general con satisfacción. Se ha tratado de construir aspectos gravitacionales para explicar algunos aspectos que siguen siendo enigmáticos, por ejemplo, incluyendo el tema de la materia oscura, invocado para explicar la dinámica de las galaxias. La existencia de hipótesis sobre la materia oscura podría ser innecesaria si la fuerza gravitatoria fuese diferente a la indicada por la relatividad general a grandes escalas cósmicas, pero es muy difícil cambiar la fuerza de la gravedad o añadir la intervención de una quinta fuerza fundamental, consistente en diferentes escalas: galaxias, cúmulos de galaxias, etc.

Ninguna teoría parece dar cuenta de todos los niveles a la vez, debido a fuertes restricciones a ser respetados, incluyendo el principio de equivalencia. Y es lo mismo con la cuestión de la energía oscura, que sería responsable de la expansión acelerada del Universo. Por tanto, el esquema preferido utilizado por los cosmólogos



actualmente es apoyarse en la relatividad general (con una constante cosmológica en las ecuaciones de Einstein para explicar la expansión acelerada) y con la hipótesis de la existencia de la materia oscura.

¿Por qué una teoría cuántica de la relatividad?

En el estado actual de los conocimientos, la relatividad general parece

describir adecuadamente la gravedad, entonces, ¿por qué buscamos una teoría cuántica? La gravedad es irreductiblemente de naturaleza clásica pero existen varios argumentos que indican que se necesita una teoría cuántica de la gravedad. Existe primero la singularidad, la relatividad general muestra el centro de los agujeros negros o el origen del *Big Bang*. Estas singularidades plantean preguntas acerca de la estructura del espacio-tiempo en la escala de Planck, una escala natural del orden de 10^{-35} metros construidas por la combinación de las tres constantes fundamentales (G , c , h) de la relatividad general y de la física cuántica. A esta escala, la gravedad se vuelve tan intensa como las otras fuerzas fundamentales que provienen de la teoría cuántica. En ella se describe un mundo donde la materia es discontinua; tal vez incluso el mismo espacio-tiempo. La relatividad general describe un espacio-tiempo dinámico, interactuando con la materia y la energía, mientras que en la física cuántica, el espacio-tiempo es un cuadro pasivo en donde se desarrollan los fenómenos y tienen lugar: estas dos visiones parecen ser contradictorias pero deben de conciliarse.

Esta conciliación también podría afectar y tener consecuencias en la misma teoría cuántica. Hasta ahora se ha fracasado en construir una teoría cuántica de la gravedad de la relatividad general, debido al proceso matemático habitual que se utiliza para pasar de la teoría clásica hasta el equivalente cuántico, pero no funciona con la relatividad general. Es fácil demostrar que la versión cuántica de la relatividad general es “no renormalizable”, es decir que cantidades infinitas aparecen en los cálculos de cantidades medibles y son imposibles de eliminar. Este no es el caso de la electrodinámica cuántica, la versión cuántica del electromagnetismo clásico, en este caso aparecen infinitos en los cálculos, pero se pueden eliminar de forma sistemática, a través de un procedimiento formal



de redefinir los parámetros de la teoría (en este caso, la masa y la carga del electrón) para encontrar sus valores observados. La re-normalización es imposible en la versión cuántica de la relatividad general y toda esta construcción matemática carece de significado físico.

Hay dos enfoques explorados actualmente para construir una teoría cuántica de la gravedad. Una de ellas es “cuantificar” la gravitación olvidando las otras tres interacciones fundamentales, al menos inicialmente. Esto es lo que los expertos llaman las *teorías de la gravedad cuántica*.

Este enfoque está representado en particular por la *gravedad cuántica de bucles* o *gravedad cuántica de recurrencias*, una teoría aún en construcción. Se parte de una formulación matemática especial de la relatividad general (la denominada formulación hamiltoniana), y la transición a la versión cuántica requiere la determinación de algunas parejas de variables relevantes de antemano. En este esquema, se obtiene un espacio-tiempo granular, discreto. Aunque sin terminar, la teoría de la gravitación de bucles se acercó con algunos resultados interesantes, incluyendo la expresión de la entropía (una cantidad termodinámica) de un agujero negro en términos del área de su horizonte de sucesos.

El otro enfoque para lograr una teoría cuántica de la gravedad es abordar la unificación de las cuatro interacciones fundamentales. Este enfoque está representado por la teoría de cuerdas en un mundo de más de cuatro dimensiones (tres de espacio, tiempo), donde las dimensiones extras serían imperceptibles debido a sus minúsculos tamaños y estarían encerrados en sí mismos.

La teoría de cuerdas proviene de estudios de la interacción fuerte de dos quarks en la década de 1970. Esta reapareció en la década de 1980 en el contexto de una teoría más amplia, que considera que los objetos fundamentales de la física no son partículas puntuales sino objetos unidimensionales, cuerdas diminutas cuyos modos de vibración diferentes corresponden a las diversas partículas observadas. Esta teoría solo tiene un parámetro, que corresponde a la longitud mínima de las cuerdas. Sin embargo, por razones de

«En la actualidad seguimos a nivel de la experimentación y observación para ir más allá de la teoría de la relatividad en muchos aspectos, entre otros a poner a prueba el principio de equivalencia, que es una fuerte limitación teórica.»

consistencia interna, se requiere una serie de dimensiones espacio-temporal superior a 4. Se ha pensado en su momento que la teoría solo es consistente a 11 o 26 dimensiones, pero otras posibilidades se han encontrado desde entonces. La teoría de cuerdas enfrascó a la comunidad de investigadores porque parece un marco para unificar las cuatro interacciones fundamentales, además tiene dos propiedades muy atractivas. Por un lado, prevé la existencia de partículas de masa cero y giro (momento angular intrínseco) igual a 2, es decir gravitones que transmiten la fuerza de la gravedad. Por otro lado, es súper simétrica, es decir que tiene una simetría que

hace corresponder a las partículas de espín entero otra con espín semi-entero y viceversa. La súper simetría es un ingrediente clave en los intentos para unificar las interacciones. La esperanza de encontrar una única teoría de cuerdas con predicciones inequívocas tiene complicaciones debido a las dificultades para explicar la inflación (la súbita expansión del universo en sus inicios) y la aceleración actual de la expansión cósmica. Ha habido un cierto éxito, por ejemplo, en el cálculo de la entropía de algunos agujeros negros a partir de sus grados de libertad microscópicos.

Quizá la teoría de cuerdas es más una poderosa herramienta analítica que una teoría del todo. La teoría de cuerdas ha permitido conjeturar una dualidad entre las teorías de la gravedad cuántica similares a los que describe las partículas elementales. Esta dualidad denominada *correspondencia AdS / CFT* es una equivalencia entre una teoría de cuerdas o una súper gravedad definida en una cierta clase de espacio anti de Sitter (AdS) y una teoría conforme de campos (CFT) definida en su frontera con dimensión menor por uno. Es la realización con más éxito comprobada del principio holográfico, una idea especulativa sobre la gravedad cuántica que permite realizar cálculos que no podíamos hacer antes, y parece ser un principio profundo que va más allá de la teoría de cuerdas.

Conclusiones

En la actualidad seguimos a nivel de la experimentación y observación para ir más allá de la teoría de la

relatividad en muchos aspectos, entre otros a poner a prueba el principio de equivalencia, que es una fuerte limitación teórica. Para ello, la misión espacial Microscope prevista para 2016 orbitará para corroborar con una precisión relativa a los 10^{-15} versus la precisión 10^{-13} en la actualidad. También está el proyecto de STE-QUEST, tal vez para 2022, de la Agencia Espacial Europea, el cual buscará poner a prueba también el principio de equivalencia con condensados de átomos ultra fríos. Importante será la detección de las ondas gravitacionales, prevista en los objetivos de los interferómetros AdvancedVirgo o Advanced LIGO. Y para ir más allá de la detección sencilla, la misión espacial de interferometría LISA, prevista entre 2030 y 2034, quiere estudiar directamente el horizonte de los agujeros negros o la coalescencia de agujeros negros súper masivos. Por el lado de los aceleradores de partículas, tal vez en el LHC —aunque es poco probable—, se podría producir micro agujeros negros efímeros, es decir, verificar si el espacio-tiempo tiene dimensiones adicionales.

Cien años después de la presentación de la teoría de la relatividad de Albert Einstein, esta área de investigación aún está en pleno proceso de desarrollo, con las nuevas técnicas y observatorios cada vez más precisos además con las investigaciones teóricas próximamente no tenemos dudas de recibir más de una sorpresa observacional y teórica.

Bibliografía

PENROSE, Roger. *El camino a la realidad*, 1ª edición, Mondadori, 2006.

ROVELLI, C. *Sept brèves leçons de physique*, Odile Jacob, 2015.

MISNER, Charles, entre otros. *Gravitation*, W.H.Freeman & Co Ltd, 2004.

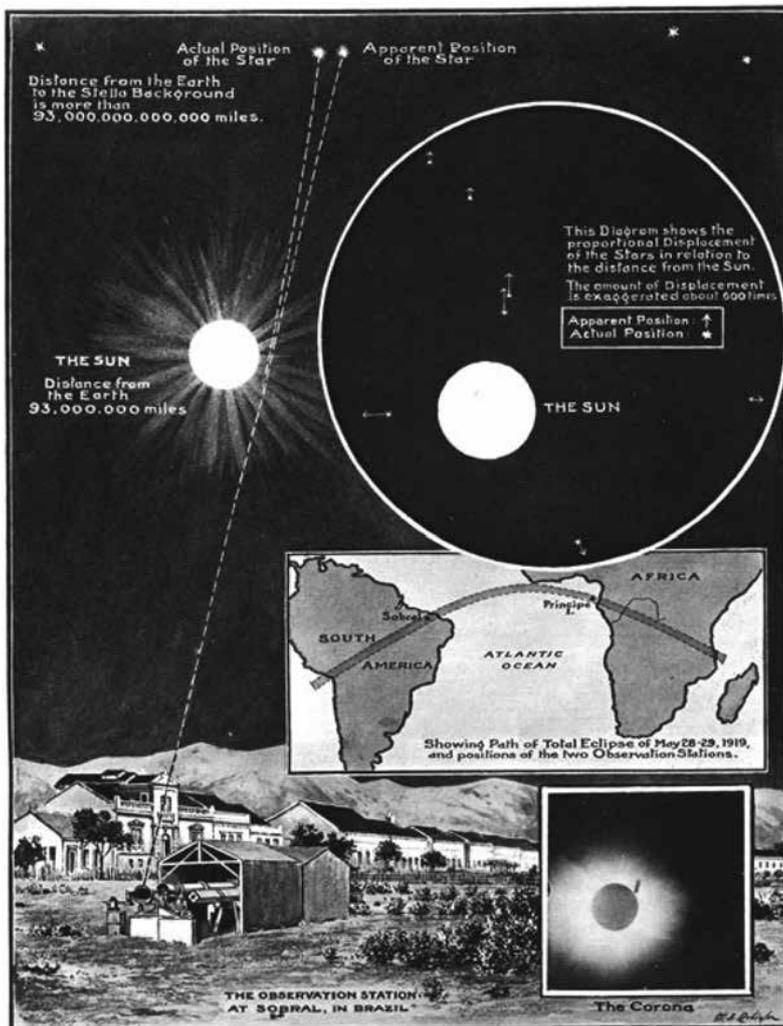


Figura extraída de Illustrated London News del 22 de noviembre de 1919, presentando los resultados de la misión británica para la verificación de la teoría de la relatividad general de Einstein durante el eclipse del 28 de mayo de ese año.