Ilustración
Alejandro Mesa
www.behance.net/alejandromesa

La relatividad general:

cien años de una nueva visión del universo

Por: Carlos Cartagena Marín

Físico-Matemático, Universidad de Antioquia;
Magister en Matemáticas Aplicadas y Docente-Investigador,
Universidad Eafit (Medellín)

En noviembre de este año, la famosa teoría de la relatividad general de Einstein cumple su primer centenario. En el siguiente texto el profesor Carlos Cartagena Marín nos ofrece un instructivo recorrido por algunos postulados y predicciones de esta apasionante teoría, que cambió de forma radical nuestras concepciones acerca del universo.

Introducción

El veinticinco de noviembre de 1915 Albert Einstein (1879-1955) presentó, en una sesión de la Academia Prusiana de Berlín, la versión definitiva de las ecuaciones fundamentales de la relatividad general. Este descubrimiento fue uno de los episodios más notables de la historia de la ciencia del siglo pasado, porque ofreció una visión novedosa de la naturaleza del espacio, el tiempo, la gravedad, la materia y el universo mismo. Ya han transcurrido casi cien años desde que la perspectiva newtoniana del mundo físico, aquella que es más inmediata a nuestra experiencia cotidiana, sufrió el impacto revolucionario de esta teoría, que nos permitió comprender fenómenos as-

>

trofísicos tan fascinantes como los agujeros negros y la estructura a gran escala del universo. La relatividad general es, junto con la mecánica cuántica, uno de los pilares de la física moderna. Describirla de forma exhaustiva excedería los límites de este espacio; no obstante, intentaremos hacer un breve recorrido por sus fundamentos y algunas de sus predicciones más relevantes.

Las ecuaciones de campo de Einstein

Según la teoría de la gravedad de Newton (1642-1727), que concibe el espacio y el tiempo como absolutos, los objetos se atraen debido a sus masas, en virtud de una fuerza que actúa de forma inmediata y a distancia. Dicha teoría permitió explicar no solo los fenómenos asociados con las mareas, la precesión de los equinoccios o las desigualdades planetarias conocidas hasta el siglo XIX, sino incluso descubrir el planeta Neptuno y fundamentar la moderna astronáutica. Sin embargo, con los avances en el electromagnetismo, que describe tanto los fenómenos en que interactúan la electricidad y el magnetismo como los fenómenos ópticos, los conceptos de espacio y tiempo (tan importantes para la mecánica newtoniana) sufrirían una radical transformación: se observó que tales conceptos ya no eran absolutos, pues su medición variaba con respecto al sistema de referencia desde el cual los midiera el observador.

Entonces se planteó la necesidad de buscar una descripción de las leyes de la naturaleza independiente del sistema de referencia del observador y de su estado de movimiento. Esta búsqueda condujo a la formulación de unas relaciones matemáticas (las ecuaciones de invariancia de Lorenz) en las cuales las leyes de la electricidad y el magnetismo no variaban, a pesar de los sistemas de referencia (observadores) utilizados en su descripción. Estas relaciones fueron correctamente explicadas por Einstein en 1905, quien las dedujo de dos postulados básicos:

> Las leyes de Newton y las que describen la electricidad y el magnetismo son las mismas en todos los sistemas de referencia que se mueven a velocidad constante unos con respecto a otros (sistemas inerciales).

> La velocidad de la luz en el vacío es la misma, independiente del estado de movimiento de la fuente que la emite y del observador que la mide.

Estos dos postulados son la base de la teoría especial de la relatividad, algunas de cuyas implicaciones son:

> El reconocimiento de que el espacio y el tiempo son conceptos que dependen del estado de movimiento de los sistemas de referencia (no pueden considerarse entidades separadas, sino que hacen parte de un solo concepto integrador: el de espacio-tiempo). Esto significa que la medición de las longitudes, del tiempo y de la masa dependen del estado de movimiento relativo del observador.

> El descubrimiento de que la masa y la energía son conceptos relacionados, como lo predice la famosa ecuación de Einstein: $E=mc^2$.

Dicha ecuación expresa la equivalencia entre energía y masa, que vienen a ser la misma cosa en dos estados diferentes.

Los éxitos en la observación de las predicciones de la relatividad especial fueron innegables. La pregunta que surgió inmediatamente fue cómo extender las anteriores ideas a sistemas de referencia más generales, es decir, a sistemas físicos

acelerados. Para lograrlo, Einstein reconcilió los dos postulados antes mencionados con la descripción de la gravedad dada por Newton. Esta idea es conocida como principio de equivalencia, y expresa que la aceleración del sistema de referencia (observador) y la gravedad son conceptos equivalentes. Un ejemplo: si nos encontramos en una nave espacial y las ventanillas están cerradas, no distinguiremos si sentimos la fuerza de la aceleración de la nave o la fuerza de la gravedad. Esta forma revolucionaria de considerar los sistemas de referencia fue la que condujo a la llamada teoría general de la relatividad, que es una nueva forma de comprender la gravitación. De hecho, una consecuencia de la extensión de la relatividad especial es que la gravedad empieza a ser concebida como una propiedad geométrica del espacio-tiempo mismo: la estructura de este no existe *a priori*, sino que depende de la gravedad y de sus fuentes de energía o masa.

Las ecuaciones de campo de Einstein, base de la relatividad general, relacionan la materia y la energía con la geometría del espacio-tiempo, donde la materia determina la geometría o, en palabras de John Wheeler (1911-2008), "la materia le dice al espacio-tiempo cómo curvarse y la geometría del espacio-tiempo le dice a la materia cómo moverse". Llegamos así a una visión novedosa de la gravedad: la fuerza de la gravedad como acción a distancia no existe; la gravedad es geometría en espacio-tiempos curvados. Ahora bien, las predicciones de dichas ecuaciones han marcado campos de investigación experimental muy prometedores, tanto en física, astrofísica y cosmología, como en el diseño de sistemas de posicionamiento global (GPS). Veamos a continuación algunas predicciones representativas de la relatividad general.

El avance del perihelio[1] de Mercurio

Con la teoría de la gravitación de Newton, se vio rápidamente que los movimientos de los planetas eran elipses con el sol en uno de sus focos, pero no se veía cómo explicar ciertas deformaciones de las trayectorias a partir de ella. Dichas deformaciones (o desigualdades planetarias) se clasificaban en dos: las *periódicas*, que se corregían después de cierto tiempo (generadas por los campos gravitacionales de Júpiter y Saturno); y las *seculares*, que causaban una desviación creciente del movimiento elíptico previsto en la teoría (por ejemplo, la aceleración del movimiento medio de la luna por efecto de las fuerzas de marea).

Sería Pierre-Simon Laplace (1749-1827) quien demostrara que, en realidad, no hay perturbaciones seculares, sino que todas las perturbaciones gravitacionales de las órbitas planetarias son periódicas, con fases más o menos largas. Pero la verdadera sorpresa llegó en el siglo XIX. Pese a que Laplace explicó todas las discrepancias seculares de su tiempo, en 1845 Urbain Le Verrier (1811-1877) —el mismo que descubrió el planeta Neptuno con las matemáticas de la teoría de Newton— demostró que el perihelio del planeta Mercurio presentaba un avance de 42,96° por siglo, que no era explicable por dicha teoría. Este hecho evidenció la necesidad de una nueva teoría de la gravitación: la teoría general de la relatividad.

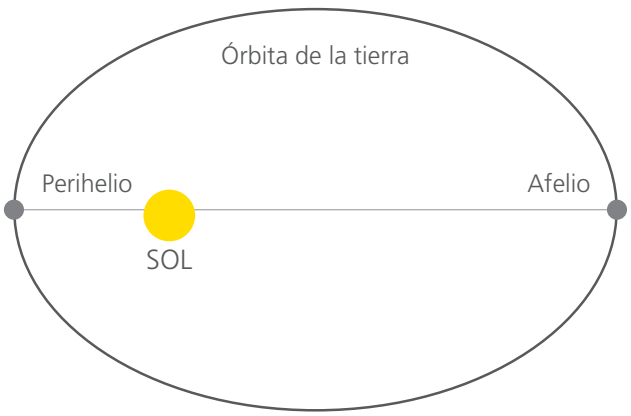

Figura 1. Representación gráfica del perihelio de la Tierra.

Con esta teoría, Einstein nos da una explicación de dicho fenómeno (que, según él, es debido a la pronunciada curvatura del espacio-tiempo alrededor del sol), y obtuvo una desviación del perihelio de la órbita de cualquier planeta, incluyendo Mercurio.

[1] *Se llama perihelio al punto más cercano de la órbita de un cuerpo celeste alrededor del sol; es el opuesto del afelio, que se refiere al punto más lejano de dicha órbita.*

En el caso de Mercurio, la coincidencia es precisa con lo observado y, para otros planetas, se comprobó que la precesión es de 8,52° por siglo para Venus, 3,84° para la Tierra y 1,35° para Marte.

Desviación de la luz por la gravedad

Como hemos visto, la relatividad general de Einstein describe la gravedad como una propiedad geométrica (curvatura) del espacio-tiempo. Esto significa que cualquier partícula de materia y luz se propaga en él siguiendo una trayectoria que podría considerarse como una "recta", pero que no tiene por qué serlo si tenemos en cuenta su recorrido en el espacio de tres dimensiones. Los rayos de luz se desplazan siguiendo la curvatura que la gravedad provoca en el espacio-tiempo, y son desviados si hay una acumulación de masa cerca. ¿Cómo comprobarlo directamente?

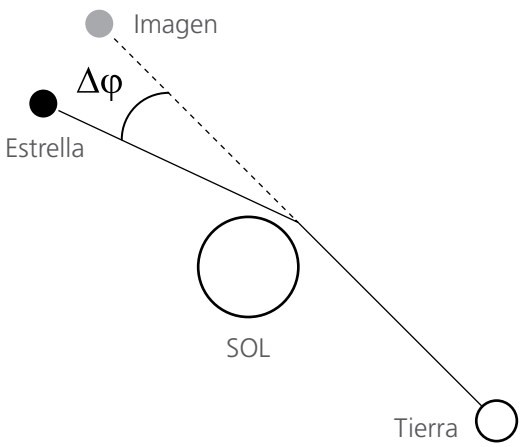

Figura 2. Desviación de la luz por el sol.

Pensemos en nuestro sol. La luz procedente de una estrella experimentará una desviación en su trayectoria (deflexión), que será máxima cuando los rayos pasen muy cerca del borde del disco solar, donde el campo gravitatorio (es decir, la curvatura del espacio-tiempo) es mayor. Einstein predijo que esta desviación tendría un valor máximo de 1,75° de arco.

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 del veintinueve de mayo. Este fenómeno (denominado efecto de lente gravitacional) se puede comprobar actualmente con observaciones sobre los efectos que sufre la luz de galaxias activas muy distantes cuando es desviada por otras galaxias más cercanas a nuestro campo visual; asimismo, es una técnica efectiva para la detección de agujeros negros, captar la materia oscura y localizar exoplanetas. El éxito de esta predicción de Einstein lo convirtió en una celebridad mundial.

Agujeros negros

Otra solución de las ecuaciones de campo de Einstein predice la existencia de regiones en el espacio-tiempo donde la gravedad es tan grande que ni siquiera la luz puede escapar. Una de las primeras soluciones fue obtenida por Karl Schwarzschild (1873-1916), unos meses después de la publicación de Einstein. En ella propone que, cuando un cuerpo masivo sin rotación (con masa M) es contraído por la fuerza gravitacional de un agujero negro, existe la posibilidad de que la luz ya no pueda escapar de él, lo que abre una frontera invisible (llamada horizonte de sucesos o radio de Schwarzchild) entre el exterior y una región donde la gravedad se desborda y crea una singularidad.

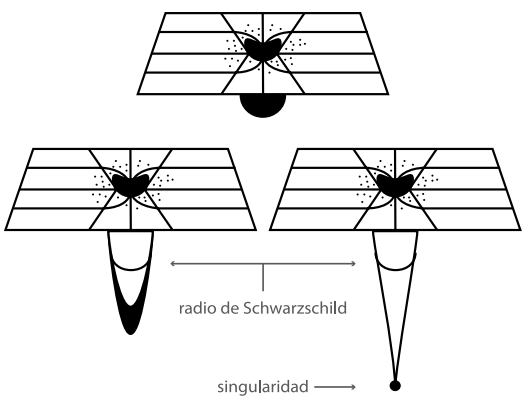

Figura 3. Representación gráfica de un agujero negro.

Al cabo de unas décadas, el concepto de agujero negro adquirió gran importancia en la astrofísica, no solo para explicar el final del colapso de ciertas estrellas masivas o la compleja dinámica de las galaxias activas, sino también la formación de las

> *Los rayos de luz se desplazan siguiendo la curvatura que la gravedad provoca en el espacio-tiempo, y son desviados si hay una acumulación de masa cerca.*

mismas. De hecho, desde el descubrimiento de la fuente de rayos X Cigus X-1 en 1973 se han detectado varios de estos objetos supermasivos, gracias a los efectos gravitacionales que producen al engullir la materia que orbita a su alrededor.

Ondas gravitacionales

En junio de 1916, Einstein publicó el resultado de algunas simplificaciones de sus ecuaciones de campo. En él predecía que los objetos masivos acelerados producen perturbaciones en el espacio-tiempo que se propagan como ondas a la velocidad de la luz; es decir, predijo la existencia de ondas de gravedad que hacen fluctuar la curvatura del espacio-tiempo. La dificultad de esta predicción radica en que detectar directamente ondas gravitacionales es todo un desafío teórico y experimental, debido a su escasa interacción con la materia.

Con todo, a partir de investigaciones realizadas en 1974 en un sistema binario de pulsares (estrellas que son los remanentes del colapso gravitacional de algunas estrellas masivas) conocido como PSR1913+16, Russell Hulse y Joseph Taylor lograron una detección indirecta de ondas gravitacionales, por lo cual recibieron el Premio Nobel de Física en 1993. Actualmente varios grupos de investigación intentan detectar ondas gravitacionales de forma directa, pues nos darían información valiosa acerca de los procesos astrofísicos altamente energéticos que las generan: por ejemplo, sobre la colisión de estrellas de neutrones o de agujeros negros, o sobre la repentina etapa de expansión acelerada y exponencial que experimentó el universo en sus primeras etapas evolutivas (etapa inflacionaria).

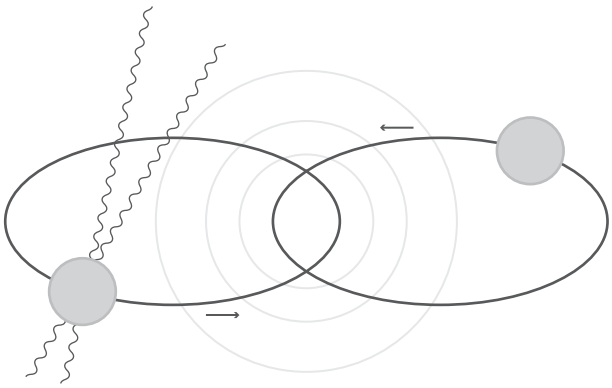

Figura 4. Sistema binario de pulsares.

Modelos cosmológicos

Finalmente, como la teoría de la relatividad general proporciona una descripción adecuada del espacio-tiempo, del contenido de la materia y la energía y de la relación entre estas, se aplicó a la descripción del universo como un todo, es decir, a la cosmología. Para sorpresa de Einstein, sus ecuaciones de campo, que tratan el espacio-tiempo como una entidad dinámica, predicen un universo en expansión, contrario a sus presupuestos filosóficos sobre un universo estático, eterno. Sin embargo, midiendo el corrimiento al rojo en el espectro de luz proveniente de las galaxias distantes, Edwin Hubble (1889-1953) puso de manifiesto que el universo está expandiéndose, hecho que Alexander Friedmann (1888-1925) demostró matemáticamente en 1922, a partir de las mismas ecuaciones de Einstein.

Sin lugar a dudas, la teoría de la relatividad general, cuya formulación definitiva cumple cien años, ha logrado constituirse no solo como uno de los ejemplos más representativos de cómo física y matemáticas se integran, sino que constituye uno de los modelos descriptivos para entender el interior de las estrellas, la dinámica y evolución de las galaxias y la estructura y origen mismo del universo. ◆