

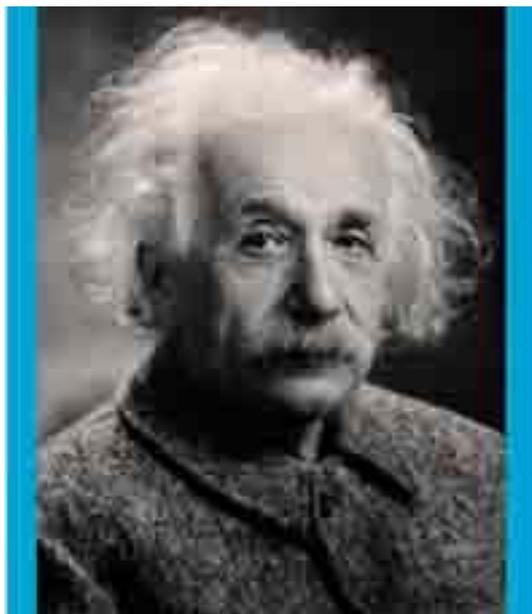
Cien años de agujeros negros

POR ENRIQUE PÉREZ MONTERO (IAA)

En 2015 se cumplía un siglo de la publicación del artículo de Albert Einstein que describe la teoría de la relatividad general, uno de los mayores hitos de la física teórica y cuyas connotaciones y poder predictivo aún no han sido plenamente desarrollados. La teoría de la relatividad siempre se ha asociado de manera popular a la famosa fórmula $E=mc^2$, que suele acompañarse de una foto del propio Einstein, ya en avanzada edad, sacando la lengua. También se suele citar uno de los aforismos menos ciertos que existen, como es "como dijo Einstein, todo es relativo" pero, ¿qué es la teoría de la relatividad?

Velocidad de la luz y espaciotiempo

La teoría general fue precedida por otro trabajo monumental del propio Einstein, publicado en 1905 y bautizado como teoría especial de la relatividad. Esta teoría, ya plenamente confirmada por innumerables experimentos, parte de un hecho físico que es del todo contrario a la intuición y a la observación directa de todos los cuerpos en movimiento que nos rodean: la velocidad de la luz es constante independientemente de la velocidad del cuerpo que la emite y de la velocidad del observador, sea cual sea este. Nuestra percepción intuitiva de la naturaleza nos indica que esto debería ser imposible y que la velocidad que medimos de un cuerpo en movimiento debería depender de la velocidad relativa del observador. Sin embargo, eso no pasa con la luz, que siempre tiene la misma velocidad (299.792 kilómetros por segundo). Einstein dedujo que esto tiene implicaciones serias sobre el espacio, el tiempo y la masa de los cuerpos en movimiento, aunque estos efectos solo son apreciables cuando la velocidad de ese cuerpo se acerca a la propia velocidad de la luz. Para un observador externo, un cuerpo que se mueva lo bastante deprisa parecerá más largo, su tiempo transcurre más despacio y su masa se hará mayor. Muchas veces se ha tratado de explicar esto con la mal llamada "paradoja de los gemelos", ya que no hay nada paradójico en la misma, sino un efecto físico de lo más real, aunque curioso. Dos gemelos se despiden en la Tierra antes de que uno de ellos emprenda un viaje interestelar a una gran velocidad. A la vuelta de su viaje, que ha durado muy poco tiempo para el gemelo viajero, encuentra en casa a su hermano ya anciano.



La teoría general es una ampliación de este concepto en la que Einstein se plantea qué ocurre cuando un cuerpo se mueve en un espacio ocupado por otras masas que ejercen una fuerza gravitatoria sobre el cuerpo que se mueve. De nuevo la intuición física de Einstein fue genial suponiendo que la gravedad, en vez de tratarse de una fuerza, no es más que algo que afecta al espacio y al tiempo de los cuerpos que se mueven en las proximidades de otro cuerpo. El principio en que se basa esta intuición se llama principio de equivalencia y básicamente dice que un cuerpo que se mueve en las proximidades de otro masivo se mueve a velocidad inalterable, pero en un espacio y tiempo alterados. Desde el punto de vista de la relatividad general, la Luna no se ve atraída por la Tierra, sino que se mueve a velocidad constante siguiendo una trayectoria que está curvada por la presencia de la Tierra. La prueba más famosa de la teoría de la relatividad general se produjo cuando se confirmó que los rayos de luz, que no tienen masa y no deberían ser desviados por la fuerza gravitatoria, también ven sus trayectorias alteradas por la curvatura del espacio en torno a un objeto masivo. La posición aparente de las estrellas se ve alterada cuando se encuentran tras el Sol y pueden ser observadas si este se oculta durante un eclipse solar. Es de esta equivalencia entre masa y energía que son alteradas por la curvatura del espacio de donde viene la famosa fórmula $E=mc^2$.

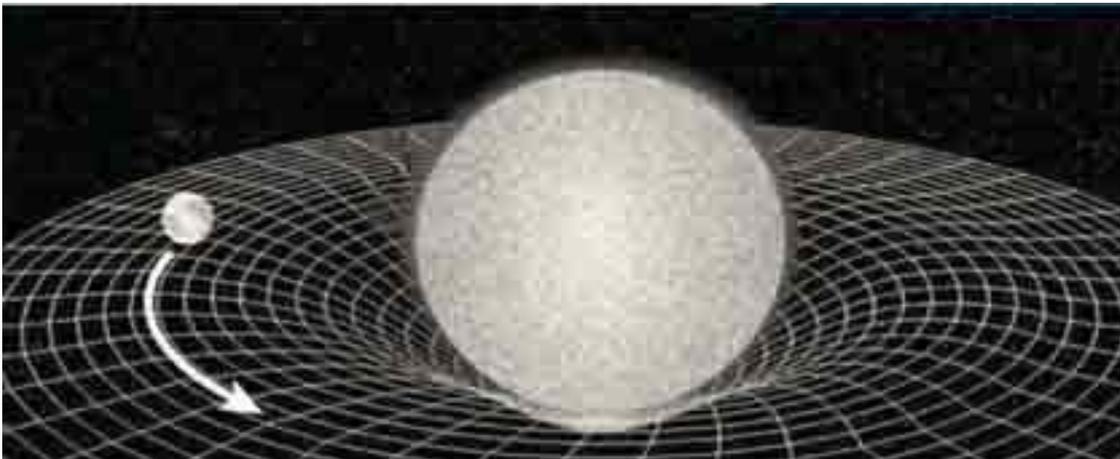
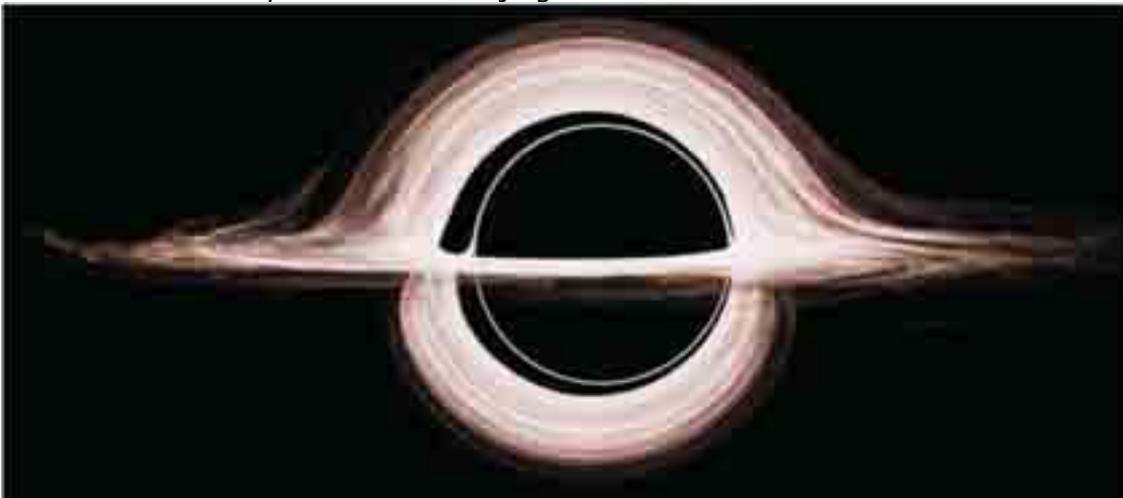


Ilustración de cómo un objeto masivo, como el Sol, curva el espacio-tiempo a su alrededor.

Lo menos intuitivo de la teoría para nosotros, de nuevo, tiene que ver con el tiempo. El tiempo también transcurre más despacio cerca de un objeto muy masivo, y se ha comprobado que las frecuencias de los rayos de luz se ven disminuidas por la gran masa de muchas de las estrellas que la emiten. Es lo que se conoce como desplazamiento al rojo gravitatorio.



Simulación de un disco de acrecimiento en torno a un agujero negro (Double Negative *Classical and Quantum Gravity*, 2015).

Estrellas congeladas en el tiempo

El año siguiente a la publicación de la teoría general, el físico alemán Karl Schwarzschild resolvió las ecuaciones de Einstein en el caso en que una distribución de masa estuviera tan concentrada que curvara de manera extrema el espaciotiempo, dando lugar a un agujero negro. Curiosamente esta solución contradice tres de las características que más se suelen difundir de este tipo de objetos. En primer lugar, no se trata de un agujero, sino de una esfera de tamaño reducido que no emite luz. Una especie de estrella negra muy concentrada, no de un agujero en medio del espacio. En segundo lugar, no es cierto que los rayos de luz no puedan salir del mismo a causa de la atracción gravitatoria, sino a causa de la dilatación temporal. En el horizonte de sucesos de un agujero negro el tiempo se ha dilatado tanto que la frecuencia de la luz se vuelve nula y la luz no puede propagarse. Es como si el tiempo se congelara en esa región del espacio y todo se detuviera desde el punto de vista de un observador externo. Otra característica de los agujeros negros que contradice a lo que se suele pensar de ellos es que no tienen por qué ser muy masivos. Una estrella como el Sol podría convertirse en un agujero negro si toda su masa se concentrara en una esfera de tan solo dieciocho kilómetros de radio. La Tierra, por ejemplo, seguiría rotando igual alrededor del Sol, como lo hace ahora, aunque este se transformara en un agujero negro. De hecho, nada impide la existencia de microagujeros negros que viajen por el universo alterando el espacio y el tiempo de todo lo que ocurre en sus proximidades.

A pesar de la solución de Schwarzschild, el propio Einstein nunca creyó que fuera posible encontrar estas estrellas congeladas en el tiempo en la naturaleza. Tuvieron que pasar cincuenta años para que los físicos aceptaran que una estrella masiva que ha agotado su combustible nuclear pueda sucumbir a los efectos de la curvatura del espaciotiempo en una implosión que termina con la propia estrella; aunque, desde la perspectiva de un observador externo, termina con el tiempo parado en la superficie de una esfera negra de tamaño muy compacto.

Velocidad de la luz y espaciotiempo

Pero entonces, ¿los agujeros negros se han observado o son solo un artefacto que proviene de la teoría? Obviamente, por su propia naturaleza, su observación directa no es posible, pero sí se han observado regiones del espacio que casi con toda probabilidad contienen agujeros negros. La clave está en buscarlos por los efectos que su gravedad tiene en los objetos próximos a ellos. Se sabe, por ejemplo, que en el caso de estrellas binarias, una de cuyas componentes sea un agujero negro, se produce un trasvase de gas desde la otra estrella que se concentra en un disco que rota alrededor del agujero y, a causa de la gran aceleración que adquiere, emite luz de gran energía antes de ser engullido por el agujero. La luz es emitida sobre todo en el rango de los rayos X y ha sido detectada tanto en fuentes asociadas a estrellas binarias en nuestra galaxia como en el centro de otras galaxias, lo que hace pensar en la existencia de agujeros negros supermasivos de millones de masas solares. La observación en el rango del infrarrojo de las estrellas cercanas al centro de nuestra galaxia, la Vía Láctea, también revela que su movimiento está alterado por una masa invisible, casi puntual, que debe tener miles de veces la masa de nuestro Sol. Hoy en día se piensa que todas las galaxias tienen un agujero negro supermasivo en su centro y que este se formó en la misma época en que se formó la galaxia.

En todo caso, los retos asociados al estudio de los agujeros negros siguen estando en pie. Desde el punto de vista teórico queda comprender qué sucede más allá del horizonte de sucesos, lo que permitiría conectar la teoría de Einstein de un espaciotiempo curvo con la mecánica cuántica que rige el mundo de las partículas atómicas. Desde el punto de vista observacional, hacen falta datos directos que

permitan un estudio más preciso de su naturaleza y su formación.

Enrique PÉREZ MONTERO (IAC-CSIC)
Este artículo aparece en el número 48, febrero 2016,
de la revista *Información y Actualidad Astronómica*,
del Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA-CSIC)