

# La Gravitación De Newton a Einstein

## La Visión Newtoniana de la Gravedad



En 1687, Isaac Newton publicó su Ley Universal de la Gravitación. Según dicha ley, la fuerza gravitatoria entre dos masas puntuales es proporcional al producto de sus masas dividido por el cuadrado de su separación.

$$F = \frac{GM_1M_2}{r^2}$$

En esta ecuación, los dos objetos tienen masas  $M_1$  y  $M_2$ , y la distancia entre ellos es  $r$ . A la constante de proporcionalidad  $G$  se le conoce como Constante de Gravitación Universal. Una fuerza atractiva empuja las masas una sobre la otra, a lo largo de la línea recta que las une.

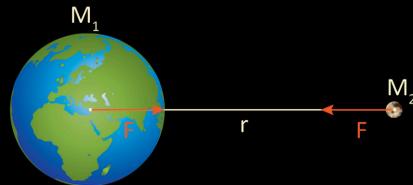


Figura 1: La gran intuición de Newton le llevó a darse cuenta de que la misma influencia que hace que los objetos caigan al suelo en la Tierra es la que mantiene a los planetas y otros cuerpos celestes en sus órbitas.

## La Visión Newtoniana de los Agujeros Negros

En 1783, el filósofo inglés John Michell propuso por primera vez la idea de que había entes tales como "estrellas oscuras", una idea que surgió de la gravedad Newtoniana. La velocidad de escape ( $v_{esc}$ ) es la velocidad mínima que necesita una partícula para escapar a la atracción gravitatoria de un objeto con masa  $M$ :

$$v_{esc} = \sqrt{\frac{2GM}{r}}$$

Obsérvese que la velocidad de escape aumenta con la raíz cuadrada de la masa del objeto, y disminuye con la distancia,  $r$ , al centro del objeto. Si la velocidad de escape fuese igual a la velocidad de la luz,  $c$ , entonces podemos estimar el tamaño físico ( $R_{sch}$ ) de la estrella oscura de Michell:

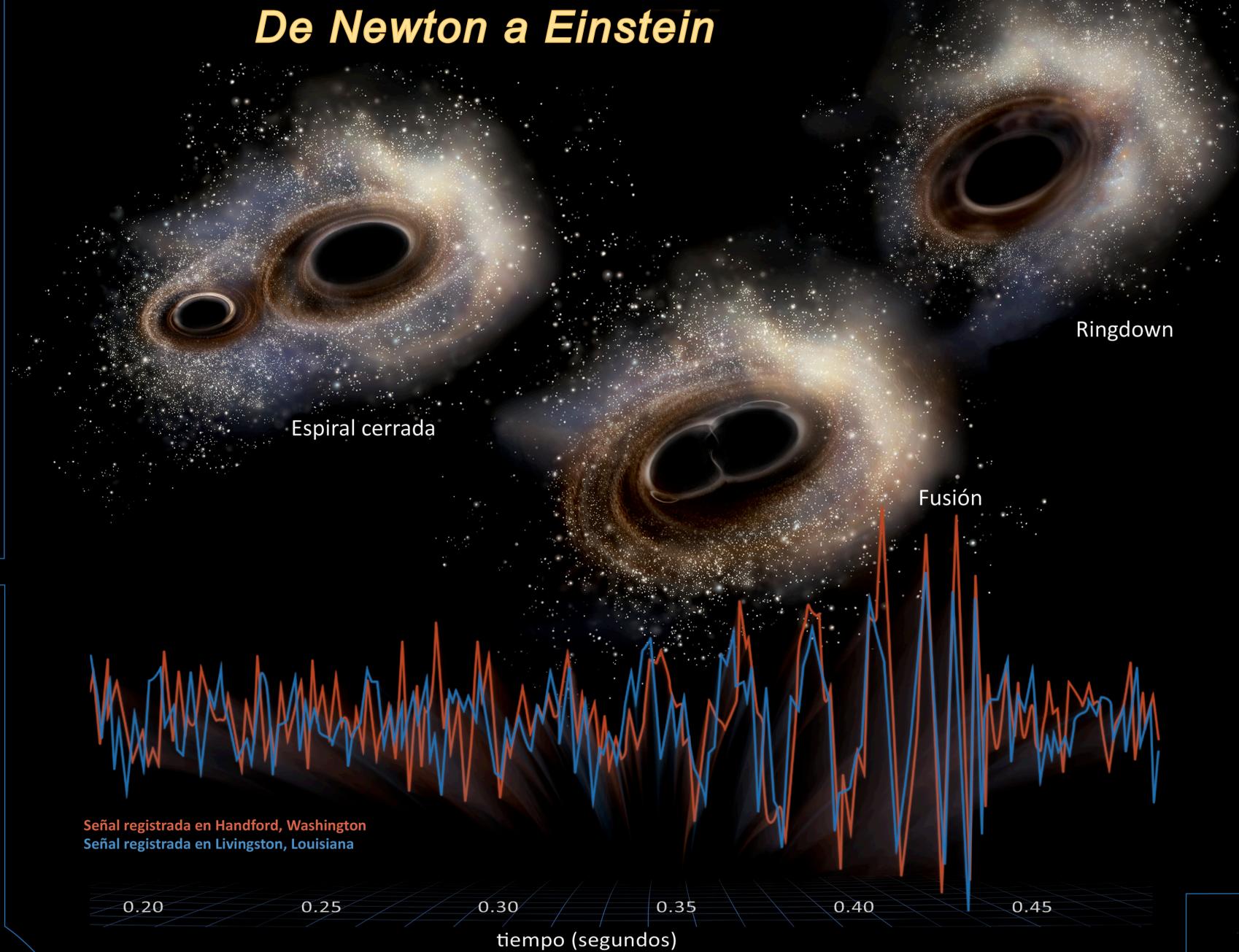
$$R_{sch} = \frac{2GM}{c^2}$$

Como  $c$  es la máxima velocidad posible, un objeto que tuviese toda su masa encerrada en una esfera de radio  $R_{sch}$  tendría una gravedad tan intensa que ni siquiera la luz podría escapar; sería, por ello, "negro".

La misma relación puede ser deducida usando la Teoría de la Relatividad General de Einstein, pero el cálculo es mucho más complicado.

Karl Schwarzschild usó la Relatividad General para encontrar ese "radio de no retorno" de los agujeros negros sin rotación que, en su honor, se conoce como radio de Schwarzschild,  $R_{sch}$ . Es una simple coincidencia el hecho de que el tamaño de los agujeros negros sea el mismo, tanto en la gravedad Newtoniana como en Relatividad General; en el momento en que se forma un agujero negro, la teoría de gravitación Newtoniana ya no es válida y ha de usarse la Relatividad General.

Agradecemos enormemente el apoyo recibido por parte de la Fundación Nacional para la Ciencia en la elaboración de este póster.



Señal registrada en Hanford, Washington  
Señal registrada en Livingston, Louisiana

## Detección Directa de Ondas Gravitatorias

El 14 de septiembre de 2015 se detectaron por primera vez de manera directa ondas gravitatorias, por la colaboración científica LIGO (Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory; Observatorio de Ondas Gravitatorias por Interferometría Láser, en español) y la colaboración Virgo. La figura describe las señales registradas por los dos detectores LIGO, procedentes de un sistema binario formado por dos agujeros negros. Las líneas roja y azul muestran las amplitudes de las señales recibidas en los detectores LIGO, en Hanford (Washington, EEUU) y en Livingston (Louisiana, EEUU), respectivamente. Después de viajar varios miles de millones de años, la señal llegó primero a Livingston y, 7 milisegundos después, a Hanford.

Obsérvese la correspondencia entre las dos señales. Ambas se ajustan muy bien a los modelos teóricos calculados en el marco de la Relatividad General para un sistema binario de agujeros negros girando en una órbita en espiral cerrada hasta su fusión en un único agujero negro. En este sistema, las masas de los dos agujeros negros que se fusionaron eran, respectivamente, 36 y 29 veces la masa solar. En el momento de la fusión, la amplitud de la señal gravitatoria alcanza un máximo y después se amortigua bruscamente (fase conocida como "ringdown"), hasta que se alcanzan las condiciones de equilibrio del nuevo agujero

negro con una masa 62 veces la solar. La energía emitida en forma de radiación gravitatoria equivale a tres veces la masa solar. La composición artística sobre la forma de la onda muestra una visualización del sistema binario de agujeros negros en varios instantes del proceso de fusión. La fase de órbita en espiral cerrada dura entre millones y miles de millones de años antes de la fusión. Los datos muestran, aproximadamente, los últimos 0.15 segundos de la fase espiral previos a la fusión. La señal de la onda gravitatoria es más intensa durante la fusión, lo que tiene lugar entre  $t=0.35$  y  $t=0.44$  segundos en esta gráfica. La fase final de ringdown empieza en, aproximadamente,  $t=0.44$  segundos.

Debido al pequeño valor de  $G$ , la gravedad es considerada la más débil de las cuatro fuerzas fundamentales de la naturaleza. Sin embargo, debido a que habitualmente los objetos implicados son extremadamente masivos, las fuerzas gravitatorias pueden generar considerables cantidades de energía. La energía emitida alrededor del pico de radiación gravitatoria durante los últimos instantes de la fusión de los dos agujeros negros fue más de diez veces superior a la luz emitida por todas las estrellas y galaxias en el Universo observable en ese mismo periodo de tiempo.

## Teoría General de la Relatividad de Einstein



En 1915, Albert Einstein publicó su Teoría de la Relatividad General. En esta teoría, la gravedad ya no es una fuerza sino una propiedad del espacio y del tiempo (en realidad espacio-tiempo, una unión del espacio y del tiempo en la que ambos no pueden ser considerados de forma independiente), en presencia de objetos masivos. Tales objetos distorsionan y deforman el espacio-tiempo; a menudo decimos que curvan el espacio-tiempo cerca de ellos. Lo que experimentamos como gravedad es una consecuencia de objetos que se mueven en un espacio-tiempo curvo.

Einstein expresó los efectos gravitatorios del espacio-tiempo a través de unas ecuaciones conocidas como Ecuaciones de Einstein.

$$G_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

Las Ecuaciones de Einstein pueden ser explicadas usando la famosa cita de John Archibald Wheeler:

*"El espacio-tiempo le dice a la materia cómo debe moverse; la materia le dice al espacio-tiempo cómo debe curvarse".*

En las ecuaciones de Einstein,  $G_{\mu\nu}$  describe la curvatura del espacio-tiempo, mientras que  $T_{\mu\nu}$  describe la distribución de masa y energía. Estas dos entidades matemáticas cuadrí-dimensionales están relacionadas a través de constantes que incluyen la velocidad de la luz,  $c$ , y la Constante de Gravitación Universal,  $G$ . Las ecuaciones de Einstein reproducen la Ley de la Gravitación de Newton en algunos casos.

## Ondas Gravitatorias

La Teoría de la Relatividad General de Einstein predice que dos estrellas formando un sistema binario generarán ondas gravitatorias en su movimiento orbital. Esas ondas transportan energía. Como resultado, las dos estrellas describirán lentamente una espiral cerrada y eventualmente se fusionarán. El periodo orbital irá variando a medida que la órbita se contrae. Alguna de las estrellas puede emitir pulsos regulares (como un púlsar) que nos permiten usarla como un reloj. Este fenómeno fue confirmado por primera vez en un sistema binario descubierto en 1974 por Russell Hulse and Joseph Taylor. En este sistema (conocido como el púlsar binario de Hulse-Taylor, o PSR 1913+16), ambas estrellas son objetos colapsados denominados estrellas de neutrones. Uno de ellos es un púlsar que emite pulsos regulares, los cuales son utilizados para medir la variación del periodo orbital a medida que la órbita se contrae. El diagrama muestra una ilustración artística del púlsar binario y una gráfica de la variación del periodo orbital con el tiempo.

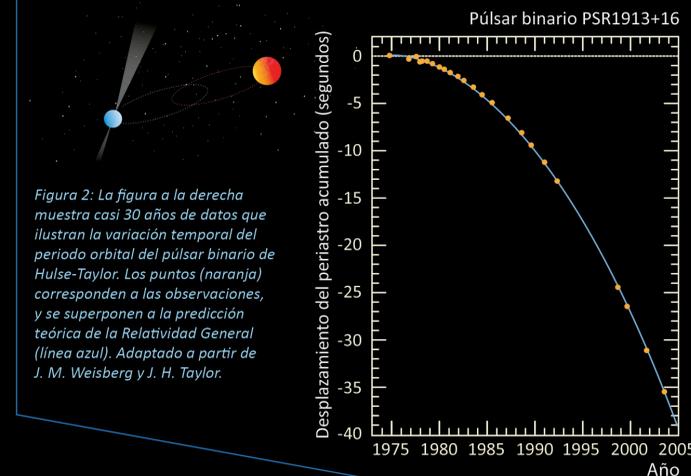


Figura 2: La figura a la derecha muestra casi 30 años de datos que ilustran la variación temporal del periodo orbital del púlsar binario de Hulse-Taylor. Los puntos (naranja) corresponden a las observaciones, y se superponen a la predicción teórica de la Relatividad General (línea azul). Adaptado a partir de J. M. Weisberg y J. H. Taylor.