

Lección Inaugural
Curso Académico 2017-2018

RELATIVIDAD Y
ASTROFÍSICA



por
Juan Antonio Miralles Torres
Catedrático de Astronomía
y Astrofísica



Universidad de Alicante
13 de septiembre de 2017

Lección Inaugural

Curso Académico 2017-2018

U n i v e r s i d a d d e A l i c a n t e



RELATIVIDAD Y ASTROFÍSICA

JUAN ANTONIO MIRALLES TORRES
CATEDRÁTICO DE ASTRONOMÍA Y ASTROFÍSICA

Es un verdadero honor pronunciar la lección inaugural del curso 2017-2018 de la Universidad de Alicante. Este año le ha correspondido a la Facultad de Ciencias y agradezco al equipo decanal, así como al departamento de Física Aplicada, el haberme pedido que fuera el ponente de esta lección, tarea que no dudé en aceptar. Es también una satisfacción, y agradezco a las autoridades académicas por ello, el exponer esta lección después de que el pasado curso se hayan iniciado en la Universidad de Alicante los estudios de Física, especialidad fundamental de las ciencias experimentales que, por fin, ofrece nuestra universidad.

El tema que he elegido para la lección, Relatividad y Astrofísica, viene motivado principalmente por dos razones. La primera es que he dedicado toda mi vida profesional al estudio de sistemas astrofísicos en los que la relatividad juega un papel importante. Como nota personal, el primer trabajo que hice a principios de la década de los 80 del siglo pasado fue la obtención de la distribución de temperatura en una estrella de neutrones teniendo en cuenta los efectos de la relatividad. El trabajo me lo propuso el profesor José María Ibáñez, de la Universidad de Valencia, y a él quiero dedicar esta lección inaugural. La segunda razón que me ha llevado a elegir este tema es la reciente detección de ondas gravitatorias, una de las predicciones más fundamentales de la teoría de la relatividad general.

El objetivo de la lección es introducir desde una perspectiva histórica el desarrollo de la teoría de la relatividad y su relación con la astrofísica.

Teoría de la Relatividad Especial

En el año 1905 Albert Einstein publica un artículo titulado “Sobre la electrodinámica de los cuerpos en movimiento”¹. En este artículo se sientan las bases de la teoría especial de la relatividad. Einstein, que desde su juventud se planteaba qué se observaría al perseguir un rayo de luz e igualar su velocidad, llegó a la conclusión de que es inalcanzable. La velocidad de la luz en el vacío resulta ser independiente de la velocidad a la que nos movamos o se mueva la fuente emisora de luz. Este es uno de los dos postulados que eligió Einstein para fundamentar su teoría. Experimentos realizados a finales del

1.- A. Einstein, “Zur Elektrodynamik bewegter Körper”, *Annalen der Physik*, 17, 891-921 (1905).

siglo XIX avalaban esta hipótesis ². El otro postulado, basado también en la experiencia, era conocido desde la época de Galileo ³, y establece la imposibilidad de distinguir, mediante experimentos mecánicos, si estamos en reposo o moviéndonos a velocidad constante. Galileo utiliza como escenario la bodega de un barco para deducir que los experimentos que hagamos en ese recinto no nos podrán indicar si el barco está atracado en el puerto o si, por el contrario, está navegando con el mar en calma.

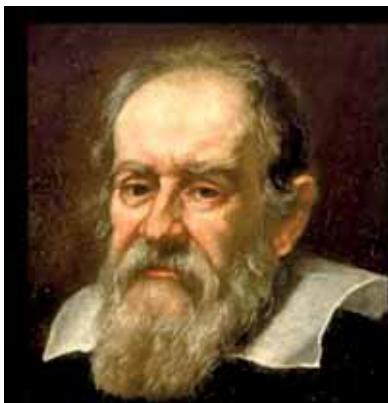
Ese resultado, que se conoce con el nombre de principio de relatividad de Galileo, fue tomado por Einstein como postulado, pero ahora generalizado a cualquier experimento físico, no sólo mecánico, es decir, incluía también fenómenos electromagnéticos como la luz. Con sólo estos dos postulados, y tirando del hilo, fue capaz de sacar a la física del laberinto en el que se encontraba debido a la incompatibilidad de la física Newtoniana y la teoría electromagnética de Maxwell.



Albert Einstein

Al mismo tiempo, Einstein presentaba ideas revolucionarias como que el tiempo transcurrido entre dos sucesos dependía del observador. La incompatibilidad entre la física Newtoniana y el electromagnetismo ya había sido considerada por H. Lorentz ⁴ y H. Poincaré ⁵, quienes habían hecho propuestas para resolverla. Fue Einstein, sin embargo, el que, partiendo de los dos postulados mencionados, establece definitivamente la teoría y abandona la idea del éter, que era el medio en donde, supuestamente, se propagaban las ondas electromagnéticas. Einstein define, de manera precisa pero sencilla, cómo debemos proceder para asignar a cada suceso un instante de tiempo y una posición relativos a un observador dado. En este procedimiento debemos primero realizar una sincronización de relojes mediante la emisión de rayos de luz, ya que su velocidad resulta ser independiente del observador. Einstein se plantea cuestiones que habían pasado casi inadvertidas pero que resultan fundamentales. El concepto de simultaneidad entre dos sucesos, por ejemplo, pierde su estatus de absoluto y pasa a ser un concepto que depende del observador. El hecho de que los efectos predichos por esta teoría no se hubieran observado mucho antes se debe a que

-
- 2.- A. Michelson & E. Morley, “On the Relative Motion of the Earth and the Luminiferous Ether”, *American Journal of Science*, 34 (203): 333–345 (1887).
 - 3.- Galileo Galilei, “Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo Tolemaico, e Copernicano” (1632).
 - 4.- H. Lorentz obtuvo en 1904 lo que hoy en día llamamos transformaciones de Lorentz, que nos permiten relacionar las coordenadas de un suceso en dos sistemas de referencia inerciales.
 - 5.- H. Poincaré en 1895 ya enunció un principio de relatividad en el que incluía los fenómenos electromagnéticos.



Galileo Galilei

la velocidad de la luz es mucho mayor que las velocidades alcanzadas en la vida cotidiana y, en consecuencia, sus efectos resultan ser prácticamente inobservables. Sólo en los experimentos diseñados para poner de manifiesto estos efectos se pueden observar diferencias entre los resultados predichos por la teoría de Newton, que sostiene que el tiempo es absoluto, y la teoría de Einstein.

Ese mismo año de 1905, Einstein publica otro artículo sobre relatividad ⁶ en el que obtiene su famosa ecuación que se ha convertido en un icono, $E=mc^2$, aunque en el artículo de 1905 no utiliza ni la letra E para representar la energía ni la letra c para la velocidad de la luz.

Al principio, la teoría de la relatividad especial no fue aceptada con entusiasmo por la comunidad científica, sólo algunos científicos, aunque de notable valía como es el caso de Max Plank, mostraron interés por ella.

Teoría de la Relatividad General

Una vez establecida la teoría de la relatividad especial, Einstein buscaba una teoría de gravitación que fuera compatible con ella. La teoría de gravitación de Newton se basaba en la ‘acción a distancia’ y admitía una propagación instantánea de la interacción gravitatoria, circunstancia radicalmente incompatible con que la velocidad de la luz en el vacío fuera la máxima velocidad alcanzable. A la búsqueda de esta teoría de gravitación se dedicó sin descanso a partir de 1907. La idea que guiaba su trabajo se fundamenta en el hecho de que los efectos de un campo gravitatorio desaparecen si el observador se mueve con la aceleración que le provoca la fuerza de la gravedad.

Gibt ein Körper die Energie L in Form von Strahlung ab, so verkleinert sich seine Masse um L/c^2 . Hierbei ist es offenbar unwesentlich, daß die dem Körper entzogene Energie

Extracto del artículo de Einstein
de 1905: $E=mc^2$

Si sustituimos la bodega del barco por la cabina de un ascensor que cae libremente, los experimentos que allí se realicen nos darán los mismos resultados que si éstos los realizáramos en el espacio moviéndonos libremente alejados de cualquier cuerpo celeste. Esto se conoce como ‘principio de equivalencia’ y refleja la igualdad entre la masa gravitatoria y la masa inerte. Según este principio, para eliminar los efectos del campo gravitatorio sólo tenemos que ‘dejarnos caer’. La gran potencia de este principio reside en que conocidas las leyes de la física en ausencia de gravedad, su generalización en presencia de gravedad es inmediata. En realidad, los efectos del campo gravitatorio pueden eliminarse sólo si nuestro laboratorio en caída libre es

6.- A. Einstein, “Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig?”, *Annalen der Physik*, 17, 639-641 (1905).



El ascensor de Einstein en caída libre

suficientemente pequeño ⁷. Si no lo es, se observarían efectos, denominados de marea por ser el origen de las mareas en la Tierra ⁸. Einstein elaboró una teoría geométrica sobre la gravedad y explicaba el porqué de la igualdad entre masa inerte y masa gravitatoria, lo que para la Teoría de Newton era una coincidencia sin ninguna explicación.

La geometría del espacio-tiempo no se acomodaba, en presencia de gravedad, a la de la relatividad especial y Einstein tuvo que introducir una geometría con curvatura que daba cuenta de los efectos de marea. Esta geometría había sido desarrollada por Bernhard Riemann ⁹ a mediados del siglo XIX y Einstein identifica un objeto matemático llamado ‘tensor de curvatura’ con el responsable de los efectos de marea. A finales de 1915 Einstein obtiene las ecuaciones del campo gravitatorio, que relacionan el contenido de energía-momento con la estructura métrica del espacio-tiempo ¹⁰. El trabajo completo fue publicado en 1916 y constituye la culminación de la ‘teoría de la relatividad general’, de la que se ha dicho que es la teoría más bella de la física.

Sin embargo, lo que se le exige a una teoría física, más que belleza, es que sus predicciones concuerden con las observaciones, y esto nos lleva al reino de la astrofísica, ya que es en ese marco en donde comenzó a contrastarse la teoría de la relatividad general con la teoría de Newton de la gravitación. Hay que pensar que las dos teorías, aunque conceptualmente muy distintas, nos van a dar resultados muy parecidos, al menos en situaciones no extremas. Tendremos que realizar medidas muy precisas o estudiar sistemas extremos para poder apreciar diferencias en las mediciones. Por estas razones la teoría de Newton se ha mantenido durante más de 200 años sin necesidad de cambiarla.

Hacia mediados del siglo XIX, Le Verrier, que predijo la existencia del planeta Neptuno, observó anomalías en el movimiento

7.- Se utiliza la palabra ‘local’ para indicar esta circunstancia y el término suficientemente pequeño tiene una definición matemática rigurosa.

8.- Son debidas a que la atracción gravitatoria del Sol y la Luna sobre la hidrosfera terrestre es mayor en la zona más próxima y menor en la más alejada.

9.- B. Riemann, “Ueber die Hypothesen, Welche der Geometrie zu Grunde liegen” (1854).

10.- “Die Feldgleichungen der Gravitation”, *Königlich Preußische Akademie der Wissenschaften* (Berlin). *Sitzungsberichte*, 844-847 (1915).

de Mercurio ¹¹ que no podían ser explicadas por la teoría de Newton ¹², al menos que se admitiera la existencia, sin ninguna otra evidencia, de algún otro planeta o asteroides cercanos al Sol. El primer triunfo de la teoría de Einstein es la explicación de esta anomalía en base a que la fuerza de la gravedad ejercida por el Sol sobre Mercurio no decae exactamente con el inverso del cuadrado de la distancia. Einstein obtiene este resultado usando una solución aproximada de sus ecuaciones de campo ¹³. Observaciones astronómicas permiten, por tanto, validar la teoría de Einstein.

$$R_{ik} = \sum_l \frac{\partial \Gamma_{il}^j}{\partial x_j} + \sum_l \Gamma_{il}^j \Gamma_{jk}^l = -\kappa \left(T_{ik} - \frac{1}{2} g_{ik} T \right)$$

Ecuaciones de Einstein del campo gravitatorio (1915)

El espaldarazo definitivo, tanto a su teoría como a él mismo como científico, se produciría cuatro años más tarde. Einstein había predicho en 1911, basándose en su teoría, todavía incompleta, que la luz debía ser curvada por la atracción gravitatoria y obtuvo el ángulo de desviación de la luz ¹⁴. Cuando concluye la teoría de la relatividad general en 1915, Einstein revisa sus cálculos y obtiene que el valor correcto del ángulo de desviación es el doble que el predicho en 1911 ¹⁵. En 1919 dos expediciones se dirigen a observar el eclipse de Sol y a medir la predicción de Einstein. Se toman varias placas fotográficas de las estrellas circundantes al disco solar eclipsado a fin de comparar las posiciones de las estrellas con aquéllas que se obtuvieron sin la presencia del Sol. En noviembre de 1919, Sir Arthur Eddington, organizador de las expediciones, confirma las predicciones de Einstein. Diarios de todo el mundo se hacen eco de la noticia y Einstein se convierte en una celebridad mundial. De nuevo, una observación astronómica pone de manifiesto la veracidad de su teoría.

La conexión entre la teoría de la relatividad, tanto especial como general, con la astronomía y astrofísica se ha mantenido desde la formulación de la teoría de la relatividad. De hecho, fue con una observación astronómica con la que se comprobó, por

11.- U. J. Le Verrier, "Theorie du Mouvement de Mercure", *Annales de l'Observatoire Impérial de Paris*, V, 76 (1859).

12.- El perihelio, punto más cercano al Sol, del planeta Mercurio avanzaba a un ritmo mayor que el predicho teóricamente. La discrepancia era de unos 40 segundos de arco por siglo.

13.- A. Einstein, "Erklärung der Perihelionbewegung der Merkur aus der allgemeinen Relativitätstheorie", *Sitzungsber. preuss. Akad. Wiss.*, vol. 47, No.2, pp. 831-839 (1915).

14.- Para comprobar este resultado se puso en marcha una expedición en 1914 que debía observar, durante un eclipse, un cambio en la posición de las estrellas que se observan cerca del limbo solar, producido por la acción de éste sobre la luz. Esta expedición no pudo cumplir su objetivo por el inicio de la primera guerra mundial.

15.- De haberse podido observar este efecto en 1914, la reputación de Einstein y de su teoría se habrían resentido.

primera vez, que la velocidad de la luz es finita ¹⁶, circunstancia fundamental en la teoría de la relatividad.

Desde el punto de vista puramente matemático, la complejidad de la teoría de la relatividad general es muy superior a la teoría de gravitación de Newton. Las ecuaciones del campo gravitatorio de Einstein resultan ser no lineales, a diferencia de lo que ocurre en el caso de la teoría Newtoniana que se reduce a la ecuación de Poisson.

Dada esta complejidad matemática, Einstein dudaba de la posibilidad de encontrar soluciones exactas no triviales de sus ecuaciones. Sin embargo, en 1916 Karl Schwarzschild ¹⁷ obtuvo, mientras combatía en el frente de la primera guerra mundial, una solución exacta de las ecuaciones. Esta solución se interpretó como el campo gravitatorio, o mejor dicho la estructura geométrica del espacio-tiempo, en el exterior de un objeto esférico de una masa dada, aplicable, por ejemplo, al campo gravitatorio de una estrella. En la solución obtenida por Schwarzschild aparecía una singularidad cuando el objeto tenía un radio inferior a lo que hoy en día se conoce con el nombre de radio de Schwarzschild. De hecho, en ese caso, el objeto colapsaría irremediablemente y ninguna señal del interior de la zona limitada por el radio de Schwarzschild podría salir. El espacio-tiempo quedaría dividido en dos zonas separadas por un horizonte de sucesos que actuaría como una membrana que puede atravesarse en un sentido pero que no permite que se atraviese en sentido opuesto. Años más tarde, ya en la década de los



Noticia del éxito de la teoría de Einstein en The Times

16.- Ole Romer, en 1676 observó que los eclipses de lo, satélite de Júpiter, eran más largos cuando Júpiter se alejaba de la Tierra y más cortos cuando se acercaba. De esta observación dedujo que la velocidad de la luz debía ser finita y midiendo la diferencia entre la duración de los eclipses se pudo obtener un valor aproximado de la velocidad de la luz.

17.- Karl Schwarzschild, "Über das Gravitationsfeld eines Massenpunktes nach der Einsteinschen Theorie", *Sitzungsberichte der Königlich Preußischen Akademie der Wissenschaften* (Berlin), 1916, Seite 189-196.

60 del siglo pasado, se acuñó el término ‘agujero negro’ para designar a este tipo de objetos colapsados, ya que ni siquiera la luz podía salir de ellos.

Ondas gravitatorias

Otra de las predicciones de la teoría de la relatividad general era la existencia de ondas gravitatorias ¹⁸. A mediados del siglo XIX James Clerk Maxwell predijo la existencia de ondas electromagnéticas que se propagaban en el vacío a la velocidad de la luz ¹⁹. Estas ondas consisten en perturbaciones de los campos eléctricos y magnéticos que se propagan a la velocidad de la luz y se pueden producir, por ejemplo, al acelerar cargas eléctricas. Los trabajos de Maxwell fueron publicados en 1865 y unos 20 años más tarde H. Hertz comprobó la validez de la teoría al producir y detectar ondas electromagnéticas en el laboratorio ²⁰.

De forma análoga a la teoría electromagnética de Maxwell, la teoría de la relatividad general de Einstein predice que masas aceleradas producen perturbaciones del campo gravitatorio que se propagan. En 1918 Einstein publica el artículo “Sobre las ondas gravitatorias” ²¹ en el que corrige algunos errores de un artículo anterior y obtiene una expresión aproximada que determina la onda gravitatoria emitida por un sistema, la llamada ‘fórmula cuadrupolar’. En la teoría de Einstein una onda gravitatoria es una perturbación de la geometría del espacio-tiempo, y más concretamente del tensor de curvatura, que se propaga a la velocidad de la luz.

Generar ondas gravitatorias en el laboratorio es mucho más simple que generar ondas electromagnéticas. Basta, por ejemplo, con hacer girar una barra rígida respecto a un eje perpendicular al de simetría. Sin embargo, la energía emitida en forma de ondas gravitatorias mediante este procedimiento, aunque giráramos la barra hasta el punto de ruptura, es tan pequeña que su detección resulta ser actualmente una misión imposible. De nuevo tenemos que considerar fenómenos astrofísicos, mucho más energéticos, aunque con la dificultad de que éstos no los podemos controlar.

A finales de la década de los años 70 del siglo XX se observó la pérdida de energía en un sistema astrofísico formado por

18.- La acción a distancia de la teoría de Newton impedía esta posibilidad ya que, en esta teoría, el movimiento de una masa que produce un cambio en el campo gravitatorio se transmite instantáneamente.

19.- Con esta predicción, Maxwell unificaba el electromagnetismo y la óptica ya que la luz no era más que un tipo de onda electromagnética.

20.- Este experimento dio origen, pocos años más tarde, a la telegrafía sin hilos y, posteriormente, a las emisiones radiofónicas. Hoy en día, las ondas electromagnéticas constituyen la base fundamental de las comunicaciones y su importancia en astrofísica es extraordinaria ya que casi toda la información que recibimos del cosmos nos llega por medio de ondas electromagnéticas, abarcando todo el espectro electromagnético, desde rayos gamma hasta ondas de radio.

21.- A. Einstein, “Über Gravitationswellen”. *Sitzungsberichte der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften Berlin* (1918), 154–167.



Ilustración artística de una onda gravitatoria

dos estrellas de neutrones orbitando alrededor del centro de masas común ²². Este sistema emite ondas gravitatorias que hacen disminuir su energía, y, como consecuencia, las estrellas van poco a poco acercándose entre ellas. Estos cambios en las órbitas han sido detectados y se ha estimado que en unos 380 millones de años se producirá su coalescencia o fusión, con el consiguiente aumento en el ritmo de emisión de ondas gravitatorias. Sería entonces el momento idóneo para detectarlas. Es evidente que de ser este el único sistema adecuado para la detección de ondas gravitatorias habríamos

perdido toda esperanza. Sin embargo, sistemas de este tipo abundan en el universo observable, ya que éste contiene unos cien mil millones de galaxias y cada galaxia contiene del orden de cien mil millones de estrellas.

Basándonos, por tanto, en argumentos estadísticos, las probabilidades de que nos llegue una onda gravitatoria procedente de alguno de estos eventos tan energéticos aumentan considerablemente.

Además de la coalescencia en un sistema binario hay otros fenómenos astrofísicos que son fuentes importantes de ondas gravitatorias. Entre ellos destacamos las explosiones de supernovas, que se producen cuando las estrellas masivas han agotado su combustible nuclear tras millones de años de existencia. De hecho, es en estas explosiones en donde se forman las estrellas de neutrones que posteriormente formarán los sistemas binarios como el descrito anteriormente.

Dependiendo de la masa de la estrella progenitora, al final de su vida, en lugar de una estrella de neutrones se podría formar un agujero negro. Los sistemas binarios constituidos por dos agujeros negros también son posibles fuentes de ondas gravitatorias.

Detección de ondas gravitatorias

Desde la década de los 60 del siglo pasado se han diseñado diferentes tipos de instrumentos a fin de detectar las ondas gravitatorias procedentes de fuentes astrofísicas.

Los primeros detectores de ondas gravitatorias se basaban en que la onda transporta energía que puede ser transmitida

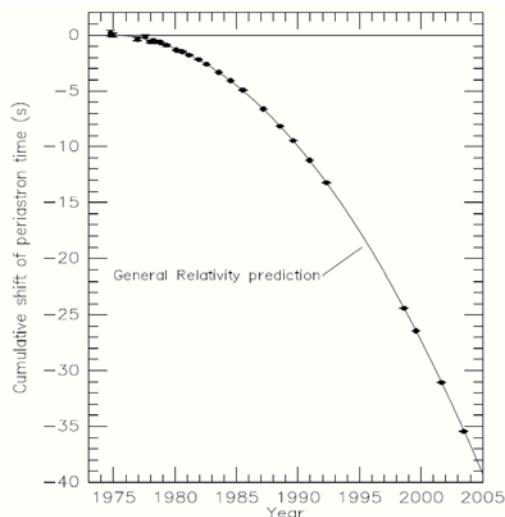
22.- Este sistema (pulsar binario PSR B1913+16) fue descubierto por R. Hulse y J. Taylor en 1974, quienes fueron galardonados con el premio Nobel de Física en 1993.

al detector, típicamente una esfera, provocando que ésta comience a vibrar ²³. Midiendo la vibración del detector podemos inferir características de la onda gravitatoria que la provoca.

Los detectores actuales están basados en que la distancia entre dos masas que dejemos caer libremente viene modulada por la onda gravitatoria que sobre ellas incide. El problema es que esa distancia cambia tan poco que se necesita una precisión extraordinaria. Como el cambio en la distancia es proporcional a la distancia misma, cuanto mayor sea ésta mayor será aquélla. Conviene, por tanto, realizar detectores en los que las masas se sitúen a grandes distancias. Para detectar estos cambios en la distancia entre las masas se utilizan técnicas interferométricas que son las más precisas.

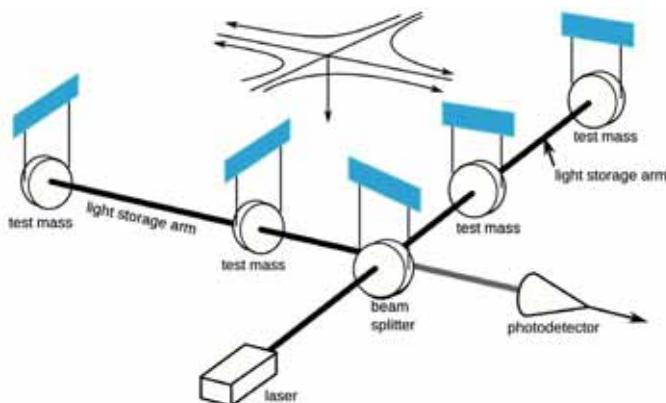
Actualmente el ‘Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory’ (LIGO) ²⁴, constituido por dos detectores en Estados Unidos, cuyos brazos interferométricos tienen una longitud de 4 km, y el observatorio europeo Virgo ²⁵, formado por un detector en Italia, con brazos de 3 km, son capaces de detectar cambios en la distancia entre las masas ²⁶ del orden de la milésima parte del tamaño de un protón. Las dificultades técnicas que se han tenido que superar para conseguir esta precisión han sido enormes, tanto en el proceso de construcción como en el de análisis de la señal proporcionada por los detectores.

Uno de los principales problemas que se tiene para extraer la señal de la onda gravitatoria que llega a los detectores es que sobre ésta se superponen señales ruidosas que llegan a enmascararla casi por completo ²⁷. Para solventar este problema



Disminución del periodo orbital del púlsar binario

- 23.- Joseph Weber diseñó y construyó este tipo de detector en la década de los 60 del siglo XX.
- 24.- Este proyecto comienza a gestarse en la década de los 70 del siglo XX a partir de un diseño de Rainer Weiss. A principios de los 80 Rainer Weiss junto con Kip Thorne y Ronald Drever fundan el proyecto LIGO.
- 25.- A principios de los 80 Alain Brillet del CNRS francés y Adalberto Giazotto del INFN italiano inician una colaboración a fin de diseñar el detector interferométrico. En 2003 se acaba la construcción del interferómetro y en 2007 comienzan las primeras observaciones.
- 26.- A fin de poder utilizar esta técnica interferométrica las masas son espejos que reflejan la luz laser.
- 27.- Como fuentes de ruido en la señal mencionaremos el ruido sísmico, el térmico y el debido a la naturaleza discreta de los fotones ('shot noise').



Esquema del interferómetro para detectar ondas gravitatorias

Así, por ejemplo, mediante simulaciones numéricas en las que se resuelven las ecuaciones de Einstein se obtiene la onda gravitatoria producida en diferentes escenarios astrofísicos, como son la coalescencia de agujeros negros o de estrellas de neutrones. La resolución numérica de las ecuaciones de Einstein nos proporciona soluciones aproximadas y se ha convertido en una verdadera disciplina denominada 'Relatividad Numérica', sin la cual las posibilidades de éxito del proyecto de detección de ondas gravitatorias se hubieran resentido.

La existencia de ordenadores cada vez más potentes en cuanto a rapidez y memoria, junto con el avance en las técnicas numéricas, han hecho posible afrontar uno de los problemas principales de la relatividad numérica: obtener la estructura del espacio-tiempo a lo largo de la evolución y coalescencia de un sistema binario formado por dos agujeros negros.

Hace algo más de una década pudo resolverse este problema y obtener la onda gravitatoria asociada a este proceso ²⁸, pudiéndose utilizar como patrón, según hemos mencionado anteriormente.

Es evidente que empresas como ésta llevan siempre aparejado

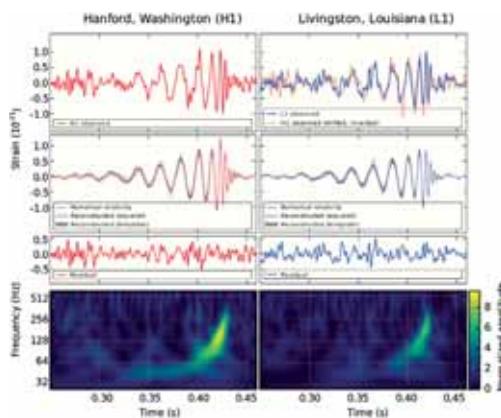


Detector LIGO en Hanford, WA

28.- Frans Pretorius, "Evolution of Binary Black-Hole Spacetimes", *Phys. Rev. Lett.* 95, 121101 (2005).

un gran avance en ciencia y tecnología que acaba revirtiendo en la sociedad.

Pero en lo referente a la relatividad y astrofísica, el gran avance se ha producido cuando septiembre de 2015 los detectores del proyecto LIGO registraron la onda gravitatoria procedente de la coalescencia de dos agujeros negros con la formación de uno nuevo. Este resultado prueba inequívocamente la existencia de ondas gravitatorias, predichas por la teoría de la relatividad general. Además, el análisis de la señal ha permitido determinar las masas de los agujeros negros involucrados en el proceso, confirmándose la existencia de agujeros negros con masas estelares. Hasta el momento han sido confirmadas tres detecciones y los tres casos corresponden a coalescencia de agujeros negros en sistemas binarios ²⁹.



Señal de la onda gravitatoria GR150914 registrada por LIGO

Con la entrada en operación conjunta, el pasado 1 de agosto, del detector europeo Virgo ³⁰ se podrá establecer con precisión la dirección de la fuente de ondas gravitatorias y, en coordinación con observaciones en el espectro electromagnético, se podrá determinar mejor su naturaleza.

Definitivamente se ha abierto una nueva ventana de observación del Universo y, con ella, una nueva era en la Astronomía Moderna con un nivel de impacto conceptual análogo al que supuso, hace más de cuatrocientos años, el uso del telescopio en la observación de Galileo de cuatro lunas de Júpiter. Esta nueva astronomía de ondas gravitatorias va a proporcionar información valiosísima sobre los fenómenos astrofísicos más espectaculares y energéticos del cosmos y, en consecuencia, va a contribuir de manera decisiva a entender mejor el universo en el que vivimos.

29.- LIGO Collaboration.

“Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger” *Phys. Rev. Lett.* 116, 061102 (2016);

“GW151226: Observation of Gravitational Waves from a 22-Solar-Mass Binary Black Hole Coalescence”, *Phys. Rev. Lett.* 116, 241103 (2016);

“GW170104: Observation of a 50-Solar-Mass Binary Black Hole Coalescence at Redshift 0.2”, *Phys. Rev. Lett.* 118, 221101 (2017).

30.- Los consorcios LIGO y Virgo tienen firmado un acuerdo de colaboración.