

LIGO, ondas gravitacionales, física y astronomía

Hector Vucetich

FCAGLP-UNLP

Tandar: 21/04/2016



Parte I

Introducción



Relatividad General

La Relatividad General es, en este momento, la **Teoría de la Gravitación** que **concuera con todos los fenómenos observados**, dentro de los errores de observación.



Relatividad General

La Relatividad General es, en este momento, la **Teoría de la Gravitación** que **concuera con todos los fenómenos observados**, **dentro de los errores de observación**.

Pero no siempre fue así, pues la **complejidad de la teoría** y la **dificultad de interpretar sus predicciones teóricas** hicieron muy difícil aplicar sus predicciones a fenómenos astronómicos, excepto los **tres efectos cruciales**.



Progreso

Pero durante los últimos cincuenta años



Progreso

Pero durante los últimos cincuenta años
hubo desarrollos tanto teóricos como experimentales y
observacionales



Progreso

Pero durante los últimos cincuenta años
hubo desarrollos tanto teóricos como experimentales y
observacionales
que permitieron aclarar en gran medida las dificultades de la
teoría



Progreso

Pero durante los últimos cincuenta años
hubo desarrollos tanto teóricos como experimentales y
observacionales
que permitieron aclarar en gran medida las dificultades de la
teoría
y confrontarla con la observación y el experimento.



Plan del seminario

En esta charla trataré de explicar

- ▶ El **fundamento físico de la Relatividad General**,



Plan del seminario

En esta charla trataré de explicar

- ▶ El **fundamento físico de la Relatividad General**,
- ▶ La **predicción de ondas gravitacionales**,



Plan del seminario

En esta charla trataré de explicar

- ▶ El **fundamento físico de la Relatividad General**,
- ▶ La **predicción de ondas gravitacionales**,
- ▶ Su **detección indirecta**,



Plan del seminario

En esta charla trataré de explicar

- ▶ El **fundamento físico de la Relatividad General**,
- ▶ La **predicción de ondas gravitacionales**,
- ▶ Su **detección indirecta**,
- ▶ y su **detección directa**.



Parte II

Gravitación



Newton

En la **teoría Newtoniana de la gravitación**, esta última se representa como **una fuerza entre pares de partículas** (a, b) que obedece la ley

$$\mathbf{F}_{ab} = -G_N m_a m_b \frac{\mathbf{r}_{ab}}{r_{ab}^3}$$

Con esta hipótesis Newton desarrolló su teoría de la gravitación. Pero él mismo no estaba convencido. . .



Campo

*That gravity should be... so that **one body may act upon another** at a distance through a vacuum, **without the mediation of anything else**,... is to me **so great an absurdity** that I believe no man who has in philosophical matters a competent faculty of thinking can ever fall into it. **Gravity must be caused by an agent acting constantly according to certain laws**;...*

(Carta de Newton a Richard Bentley)



Campo, Laplace y Poisson

Científicos posteriores, entre ellos Laplace y Poisson, introdujeron la idea de un campo gravitacional: “un agente que actúa constantemente” de acuerdo con las leyes siguientes

$$\mathbf{F} = m'\nabla\phi(\mathbf{r}) \qquad \nabla^2\phi(\mathbf{r}) = 4\pi G_N\phi(\mathbf{r})$$

En esta teoría, si la masa m cambia de posición, el campo a una distancia r cambia simultáneamente.



Einstein

- ▶ Desde 1907 Einstein intentó adaptar la teoría newtoniana a la Relatividad Especial (1905), en donde nada puede propagarse a velocidad mayor que c , la velocidad de la luz.



Einstein

- ▶ Desde 1907 Einstein intentó adaptar la teoría newtoniana a la Relatividad Especial (1905), en donde nada puede propagarse a velocidad mayor que c , la velocidad de la luz.
- ▶ Para hacerlo, se guió por la ley de Galileo: “Todos los cuerpos caen con la misma aceleración”.



Einstein

- ▶ Desde 1907 Einstein intentó adaptar la teoría newtoniana a la Relatividad Especial (1905), en donde nada puede propagarse a velocidad mayor que c , la velocidad de la luz.
- ▶ Para hacerlo, se guió por la ley de Galileo: “Todos los cuerpos caen con la misma aceleración”.
- ▶ En 1911, la extendió a todos los fenómenos físicos en la forma “En un Sistema de Referencia en Caída Libre, todos los fenómenos físicos ocurren como si se tratase de un Sistema de Referencia Inercial”.



Einstein

- ▶ Desde 1907 Einstein intentó adaptar la teoría newtoniana a la Relatividad Especial (1905), en donde nada puede propagarse a velocidad mayor que c , la velocidad de la luz.
- ▶ Para hacerlo, se guió por la ley de Galileo: “Todos los cuerpos caen con la misma aceleración”.
- ▶ En 1911, la extendió a todos los fenómenos físicos en la forma “En un Sistema de Referencia en Caída Libre, todos los fenómenos físicos ocurren como si se tratase de un Sistema de Referencia Inercial”.
- ▶ Este enunciado se conoce como Principio de Equivalencia.



Gravitación y geometría

- ▶ Si todos los cuerpos, incluso los que no se pueden tocar o pesar, como la luz o el calor, caen con la misma aceleración, el campo gravitacional no debe afectarlos directamente.



Gravitación y geometría

- ▶ Si todos los cuerpos, incluso los que no se pueden tocar o pesar, como la luz o el calor, caen con la misma aceleración, el campo gravitacional no debe afectarlos directamente.
- ▶ El campo gravitacional debe afectar al espacio-tiempo: lo que todos los objetos naturales tienen en común.



Gravitación y geometría

- ▶ Si todos los cuerpos, incluso los que no se pueden tocar o pesar, como la luz o el calor, caen con la misma aceleración, el campo gravitacional no debe afectarlos directamente.
- ▶ El campo gravitacional debe afectar al espacio-tiempo: lo que todos los objetos naturales tienen en común.
- ▶ El campo gravitacional deforma la geometría del espacio-tiempo.



Espacio deformado

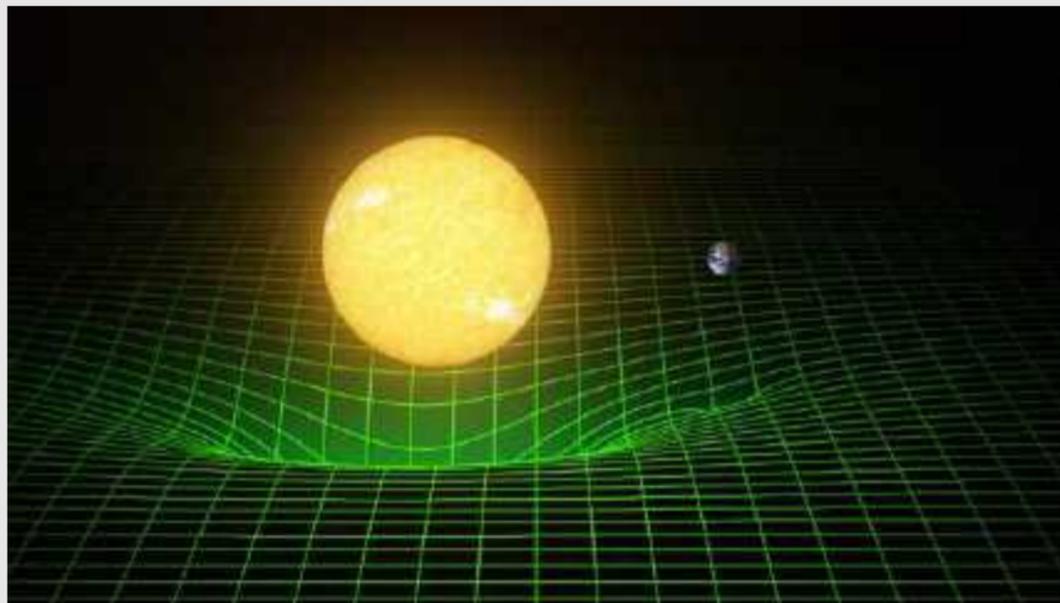


Figura: Sol y Tierra deforman el espacio.



Parte III

Relatividad General



Geometría deformada

Toda la información sobre la geometría del espaciotiempo está contenida en el **tensor métrico** $g_{\mu\nu}(x)$, que **generaliza el teorema de Pitágoras para un espacio deformado**. Si dx^μ indica la diferencia de coordenadas entre dos puntos próximos, la **distancia entre ambos está dada por**

$$ds^2 = g_{\mu\nu}(x) dx^\mu dx^\nu \quad (1)$$

y el ***Teorema Egregio de Gauss*** (generalizado por Riemann) afirma que toda la geometría del espacio se puede reconstruir si se conoce $g_{\mu\nu}(x)$ en todo el espacio.



Ecuaciones del campo

Las ecuaciones de campo, halladas por Einstein y Hilbert en noviembre de 1915, tienen la forma

$$G_{\mu\nu} = \frac{8\pi G_N}{c^4} T_{\mu\nu} \quad (2)$$

en donde $G_{\mu\nu}$ es el **tensor de Einstein**, que describe la estructura geométrica del espaciotiempo y $T_{\mu\nu}$ es el **tensor energía-impulso de la materia**.

Estas ecuaciones generalizan la ecuación de Poisson a la física relativista.



Dinámica relativista

En Relatividad General, **no hay fuerzas gravitacionales** como en la Teoría Newtoniana. En su lugar, un **punto masa** describe la **curva más corta entre dos puntos** (a, b) del espaciotiempo deformado, llamada una **curva geodésica**.

$$\text{mín} \int_a^b ds$$

De este modo, tanto los puntos masa como los rayos luminosos obedecen una variante del **Principio de Fermat**.



"Geodésica" de la Tierra

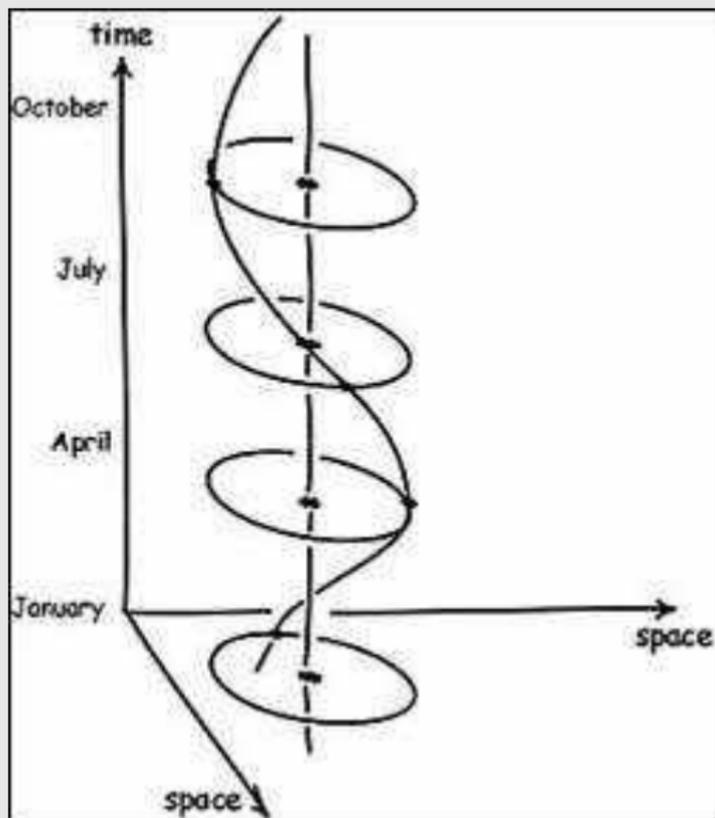


Figura: Geodésica de la Tierra alrededor del Sol



Relatividad General y Experimento (1)

La comprobación más importante de la RG es la **Universalidad de la Caída Libre** (Galileo, 1638). Si llamamos a_A , a_B y g a las aceleraciones de dos cuerpos y a la aceleración de la gravedad, el **parámetro de Eötvös**

$$\eta(A, B) = \frac{a_A - a_B}{g}$$

determina un posible apartamiento de la **UCL**. Se encuentra

$$\eta(\text{Al}, \text{Ti}) < 10^{-14}$$

$$\eta(\odot, \oplus) < 10^{-14}$$



Relatividad General y Experimento (2)

Los **movimientos planetarios** comprueban la **Relatividad General** en **campo débil**, donde las correcciones relativistas son

$$\frac{v^2}{c^2} \sim \frac{GM_{\odot}}{rc^2} \leq 10^{-8}$$

Para hacerlo, se utilizan los **parámetros post-newtonianos** β, γ ($\gamma = 1$) en **RG**, que se miden estudiando la **dinámica del Sistema Solar**. Se encuentran los resultados

$$|\gamma - 1| \leq 10^{-5}$$

$$|\beta - 1| \leq 10^{-5}$$

que corresponden a **errores de algunos metros** y (en el sistema Tierra-Luna) de **algunos milímetros**.



Relatividad General y Experimento (3)

El descubrimiento de varios **púlsares binarios** permitió estudiar la **Relatividad General** en condiciones de **campo más fuerte**

$$\frac{v^2}{c^2} \sim \frac{GM_{\odot}}{rc^2} \leq 10^{-6}$$

El más estudiado es el **púlsar PSR B1913+16**, cuyas parámetros orbitales se han obtenido **con altísima precisión**.
Hay muy buena concordancia entre teoría y observación.



Parte IV

Ondas gravitacionales



Ecuación para el campo débil

En 1916, Einstein analizó la propagación de ondas gravitacionales. Suponiendo campo débil

$$g_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu} + h_{\mu\nu}$$

Es fácil ver que las perturbaciones “normalizadas”

$$\psi_i^k = h_i^k - h^l \delta_i^k$$

satisfacen la ecuación de d'Alembert

$$\square \psi_i^k = \frac{16\pi G_N}{c^4} \tau_i^k$$

Esta ecuación puede resolverse usando potenciales retardados, como en electromagnetismo.



Propagación de ondas gravitacionales.

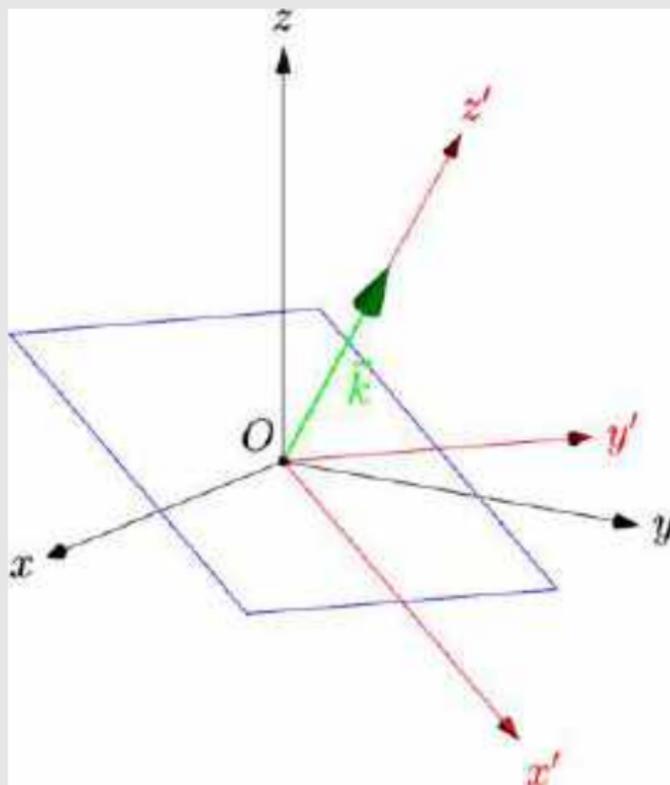


Figura: Propagación de una onda plana



Propiedades de las ondas gravitacionales

Una **onda plana sinusoidal monocromática**, con número de onda k , tiene la forma

$$+\psi_i^k = h e_i^k \exp i(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} - \omega t)$$

en donde h es la amplitud de la onda, e_i^k un tensor de polarización.

Hay **dos modos distintos de polarización** de las ondas gravitacionales, que se llaman convencionalmente h_+ y h_\times . La figura muestra esquemáticamente el **comportamiento de puntos del espacio** (marcados por partículas) en ambos modos de polarización.



Polarización de ondas gravitacionales

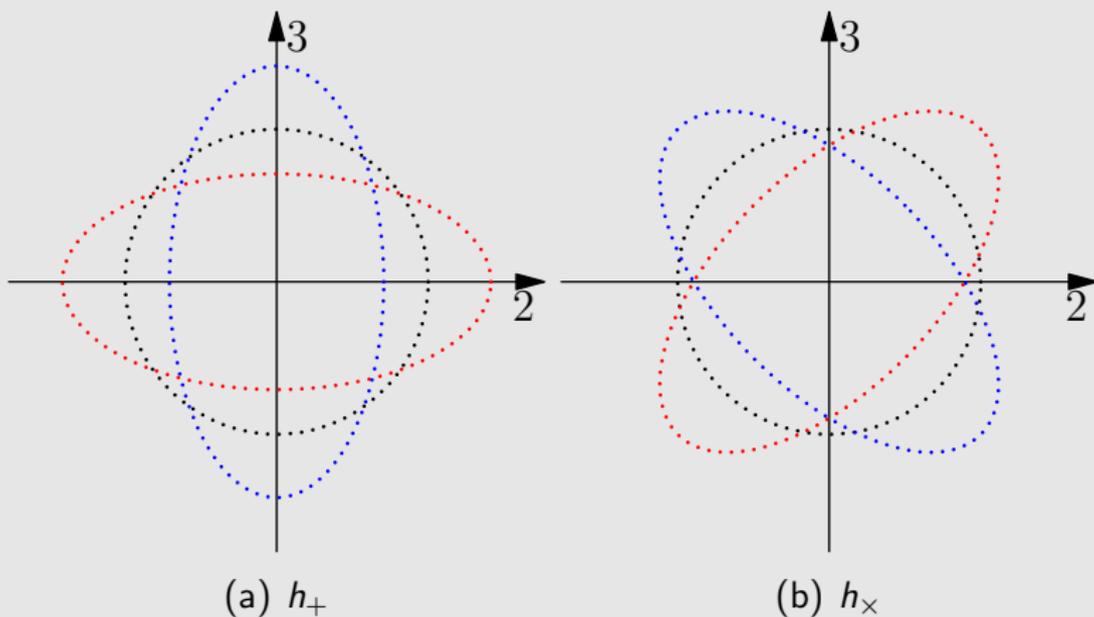


Figura: Modos de polarización de una onda gravitacional.



Energía de las ondas gravitacionales

Las ondas gravitacionales **transportan energía**. El vector flujo de energía (análogo al vector de Poynting) vale

$$S_{\alpha}^{(g)} = \frac{c^2}{32\pi G_N} (\dot{h}_{23}^2 + \dot{h}_{22}^2)$$

Este es un **flujo de energía grande**, pues

$$S_{\alpha}^{(g)} \sim 0,3 \text{ W/m}^2 \sim 10^7 I_0$$

pero la **interacción del campo gravitacional con la materia es tan pequeña** que los efectos son insignificantes.



Emisión de ondas gravitacionales

Un sistema físico emite ondas gravitacionales si **su masa tiene un momento cuadrupolar variable $Q(t)$** . La energía total perdida y el módulo del flujo de energía valen

$$\dot{E} = \frac{G_N}{45c^5} \ddot{D}_{\alpha\beta}^2$$
$$S_g = \frac{G_N}{36\pi c^5 R_0^2} \left[\left(\frac{\ddot{D}_{22} - \ddot{D}_{33}}{2} \right)^2 + \ddot{D}_{22}^2 \right]$$

La emisión es importante **sólo en sistemas relativistas, con campo mediano o fuerte**

$$\frac{v^2}{c^2} \sim \frac{G_N M}{rc^2} \lesssim 1$$



Parte V

Detección indirecta de ondas gravitacionales



Descubrimiento de B1913+16

En 1975, R. A. Hulse y J. A. Taylor detectaron señales de un púlsar que formaba parte de un sistema binario. Los datos orbitales mostraban que las correcciones relativistas eran importantes, tanto que la emisión de ondas gravitacionales produciría efectos medibles.

Un púlsar funciona como un reloj, ya que su periodo de emisión es muy estable y pedecible. En un púlsar binario, el efecto Döppler cambia ligeramente la frecuencia observada y eso permite reconstruir la órbita kepleriana, incluídos los efectos relativistas.



Observaciones de B1913+16

El Pulsar Binario PSR B1913+16

Descubierto por Hulse & Taylor en 1975

Periodo del pulso: 59 ms

Periodo orbital: 7h 45m

Es un sistema binario con dos estrellas de neutrones

Velocidad en el periastró:
~ 0.001 de la velocidad de la luz

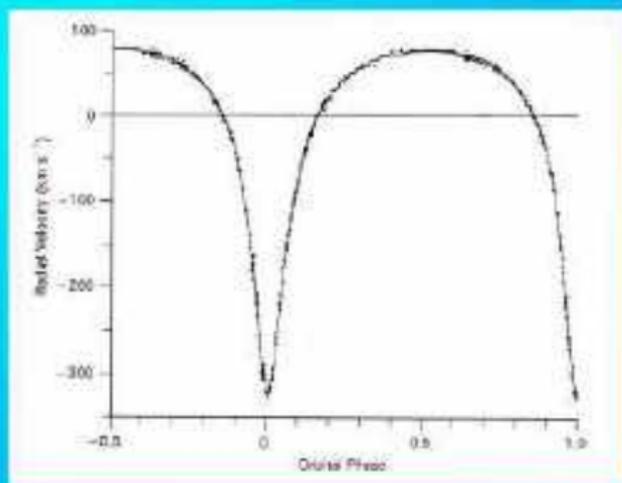


Figura: Observaciones del pulsar binario



Efecto de la emisión de ondas gravitacionales

La emisión de ondas gravitacionales es detectable, porque la pérdida de energía mecánica e impulso angular del púlsar introducen un retardo en el movimiento orbital

$$a^3\omega^2 = G_N M_{\text{tot}} \qquad \omega(t) = \omega_0 + \alpha t$$

en donde a es el eje mayor de la órbita, T el periodo, $\omega(t)$ la velocidad angular (movimiento medio) y α la aceleración angular inducida, cantidades que pueden medirse con precisión usando las técnicas astronómicas conocidas.



Determinación de la deceleración

Es fácil ver que la aceleración angular α de un sistema binario por emisión de ondas gravitacionales es

$$\alpha = \dot{\omega} = -\frac{128}{15} \frac{G_N^2 M_r M_t^2}{c^5 a^3} f(e)$$

Las características del sistema **exaltan la emisión de ondas gravitacionales** y α se determinó con **sólo cuatro años de observación**.



Resultados (2010)

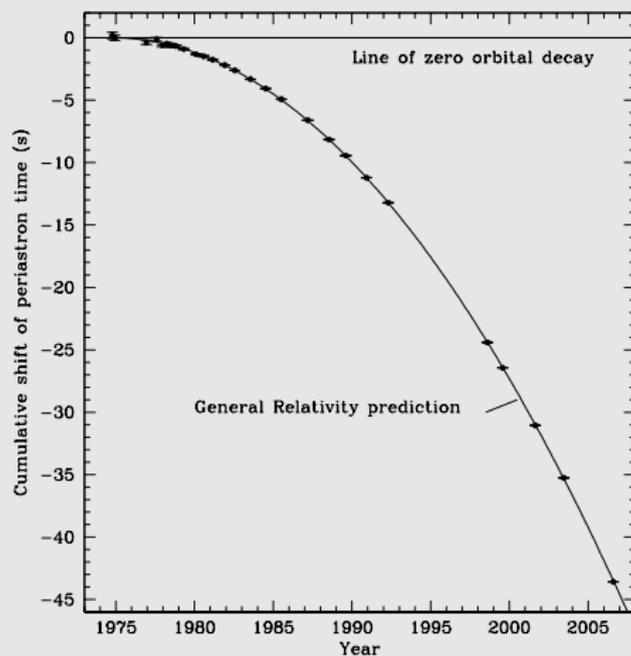


Figura: Retardo del Púlsar Binario B1913+16



Un premio Nobel muy tardío

En su último trabajo Taylor y colaboradores concluyen

*We have analyzed **the full set of Arecibo timing data on pulsar B1913+16** to derive the best values of all measurable quantities. . . The measured rate of orbital period decay continues to be **almost precisely the value predicted by general relativity**, providing **conclusive evidence for the existence of gravitational radiation**.*

El premio Nóbel de Física 1993 fue otorgado a Hulse y Taylor por su descubrimiento, que permitió una comprobación casi completa de la Relatividad General.



Parte VI

Detección directa de ondas gravitacionales



El observatorio LIGO

La detección directa de ondas gravitacionales implica **construir un “telescopio” con un detector adecuado**: un objeto **cuyas propiedades medibles se alteren con el paso de la onda gravitacional**. En 1989 se propuso la construcción de **LIGO**, acrónimo de **Laser Interferometric Gravitational-Wave Observatory**: un observatorio de ondas gravitacionales con un **detector interferométrico**.



Fundamento del método

Si una onda gravitacional h_k^i llega a una *distancia patrón* L desde una dirección $\hat{\mathbf{k}}$ la *distancia física entre ambos puntos* *variará en la forma*

$$h = \frac{\Delta L}{L} = F_+(\hat{\mathbf{k}})h_+ + F_\times(\hat{\mathbf{k}})h_\times \quad (3)$$

en donde los factores F_+ y F_\times proyectan el tensor h en la dirección \overline{AB} . La cantidad h (llamada *deformación*) es muy pequeña pero haciendo L *muy grande es posible obtener un desplazamiento medible* ΔL .



Detalles del sistema

La idea del detector es usar un **interferómetro de Michelson** para medir las distancias entre **dos direcciones ortogonales**, ya que una onda gravitacional las deforma de distinta manera. El rayo de luz de un láser ($\lambda = 1064 \text{ nm}$), llega al espejo semiplataado (“beam splitter”), se divide y entra en los espacios entre los espejos. Éstos forman **sendos interferómetros de Fabry-Pérot**, donde los haces se reflejan ~ 75 veces, **incrementando la distancia efectiva** a $L_{\text{ef}} \sim 500 \text{ km}$ y esto **produce un desplazamiento medible**

$$\Delta L \sim 0,1 \text{ fm} \frac{h}{10^{-21}}$$



Sofisticación

Para lograr la sensibilidad deseada, es necesario un sofisticado sistema de controles para estabilizar el sistema. Como un ejemplo de esta sofisticación, la Figura muestra el sistema de péndulos que sostienen los espejos, para aislarlos del sistema de amortiguación de vibraciones, que ya de por sí es capaz de limitar las perturbaciones del ambiente a 10^{-13} m.



Sistema de amortiguación



Figura: Amortiguador de vibraciones



Sensibilidad en 2015

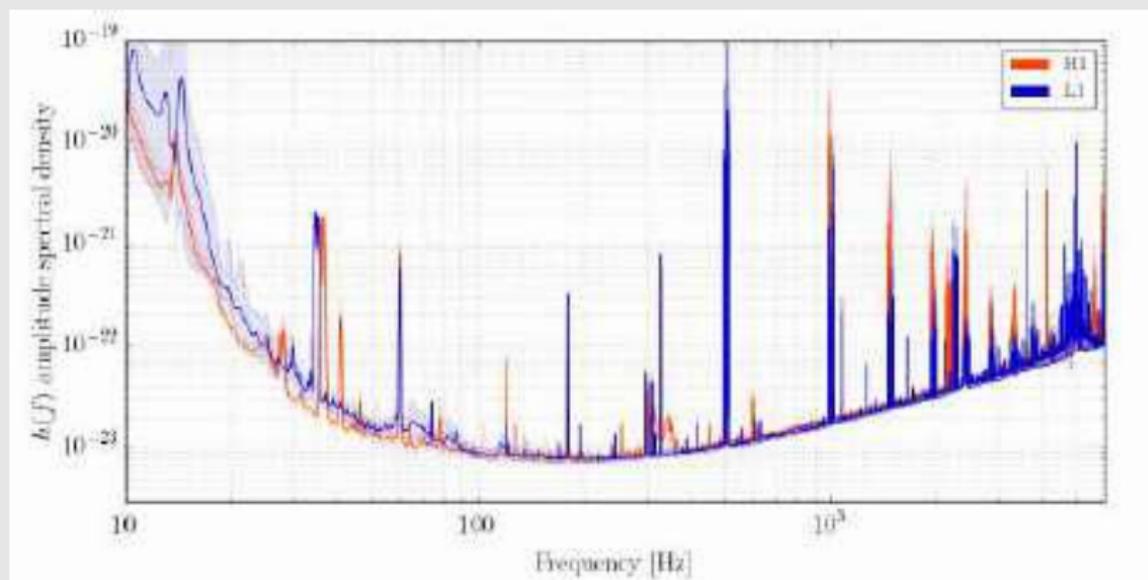


Figura: Sensibilidad de LIGO en 2015



Identificación de una señal

En un ambiente tan ruidoso, ¿cómo se identifica una señal detectada con el telescopio interferométrico como el paso de una onda gravitacional?

Esto se hace de dos maneras

- ▶ Comparando la señal con una biblioteca de formas de onda calculadas teóricamente, que puedan producirse en distintos fenómenos astrofísicos.



Identificación de una señal

En un ambiente tan ruidoso, ¿cómo se identifica una señal detectada con el telescopio interferométrico como el paso de una onda gravitacional?

Esto se hace de dos maneras

- ▶ Comparando la señal con una biblioteca de formas de onda calculadas teóricamente, que puedan producirse en distintos fenómenos astrofísicos.
- ▶ Buscando coincidencias entre los tiempos de llegada de la señal a dos o más interferómetros separados por una gran distancia.



Biblioteca de formas de onda

Distintos fenómenos astrofísicos producen señales gravitacionales características. Por ejemplo, en un **choque de agujeros negros que colapsan para formar otro**, ocurren varios fenómenos durante el choque

1. Los dos agujeros negros **orbitan uno alrededor del otro**, en una espiral, **emitiendo ondas gravitacionales que se llevan energía e impulso angular del sistema.**



Biblioteca de formas de onda

Distintos fenómenos astrofísicos producen señales gravitacionales características. Por ejemplo, en un **choque de agujeros negros que colapsan para formar otro**, ocurren varios fenómenos durante el choque

1. Los dos agujeros negros **orbitan uno alrededor del otro**, en una espiral, **emitiendo ondas gravitacionales que se llevan energía e impulso angular del sistema**.
2. **Los agujeros negros se fusionan**, formando un agujero negro mayor, **cuya superficie (el *horizonte de eventos*) es irregular**.



Biblioteca de formas de onda

Distintos fenómenos astrofísicos producen señales gravitacionales características. Por ejemplo, en un **choque de agujeros negros que colapsan para formar otro**, ocurren varios fenómenos durante el choque

1. Los dos agujeros negros **orbitan uno alrededor del otro**, en una espiral, **emitiendo ondas gravitacionales que se llevan energía e impulso angular del sistema**.
2. **Los agujeros negros se fusionan**, formando un agujero negro mayor, **cuya superficie (el *horizonte de eventos*) es irregular**.
3. El agujero negro **se regulariza emitiendo ondas gravitacionales** hasta llegar a uno **estacionario (Agujero negro de Kerr)**.



Forma de onda

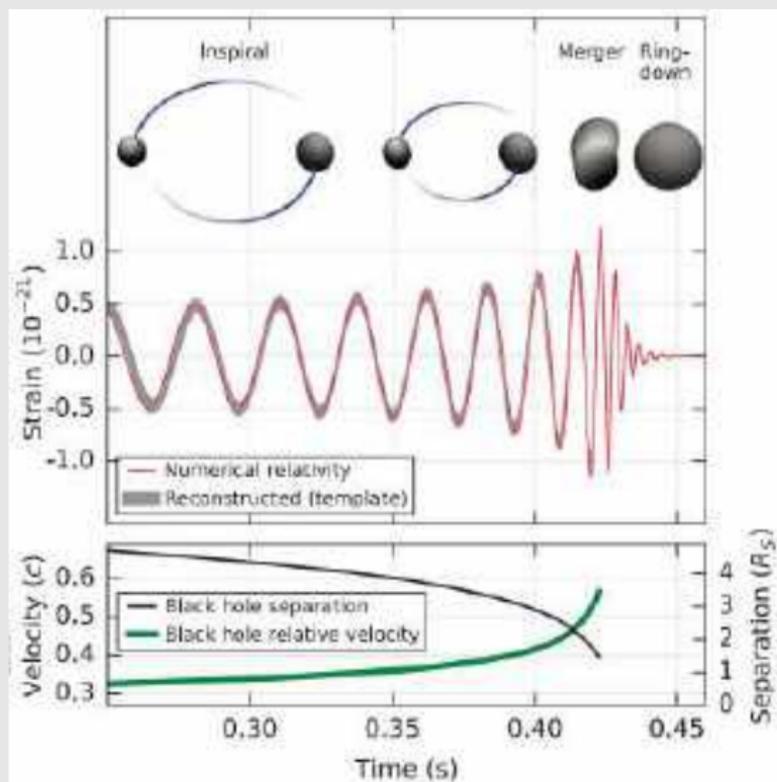


Figura: Forma de onda para una fusión de agujeros negros.



Método de coincidencias

Una manera de distinguir señal y ruido es que dos interferómetros separados por grandes distancias midan señales similares, independientemente uno del otro. Esto tiene la ventaja de que la diferencia de tiempos de observación de la señal es un indicador de la dirección de llegada de la misma. El observatorio LIGO está formado por dos interferómetros idénticos, en los observatorios coordinados LIGO-Hanford y LIGO-Livingstone, separados por unos 3000 km entre sí. Actualmente hay tres observatorios en funcionamiento (GEO600, en Alemania), y otros tres en proyecto o construcción: INDIGO (en India, proyectado), VIRGO (en Italia, en mejoramiento, comenzará a operar en 2016) y KAGRA (en Japón, en construcción).



Observatorios de ondas gravitacionales

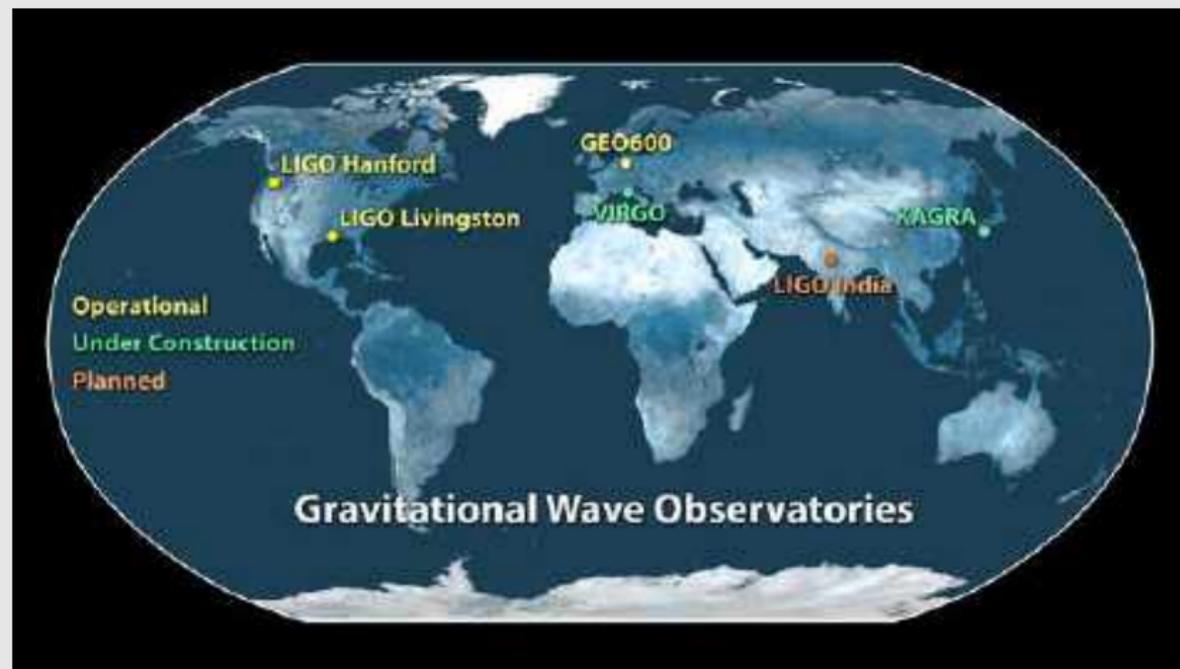


Figura: Observatorios de ondas gravitacionales



Parte VII

El evento GW150914



La detección

El 14 de noviembre de 2015, a las 09:50:45 UTC, un pulso fue detectado casi simultáneamente en los interferómetros de LIGO-Hanford y LIGO-Livingstone. Lamentablemente, VIRGO se encontraba inaccesible y GEO600 en modo de ingeniería y no pudieron contribuir a la detección.

La detección de Hanford fue $6,9 \pm 0,4$ ms posterior a Livingstone, lo que dio cierta información sobre la dirección de llegada. La superposición de las señales desplazadas es excelente. En la misma figura puede apreciarse que el nivel de ruido es alto.



Señal detectada

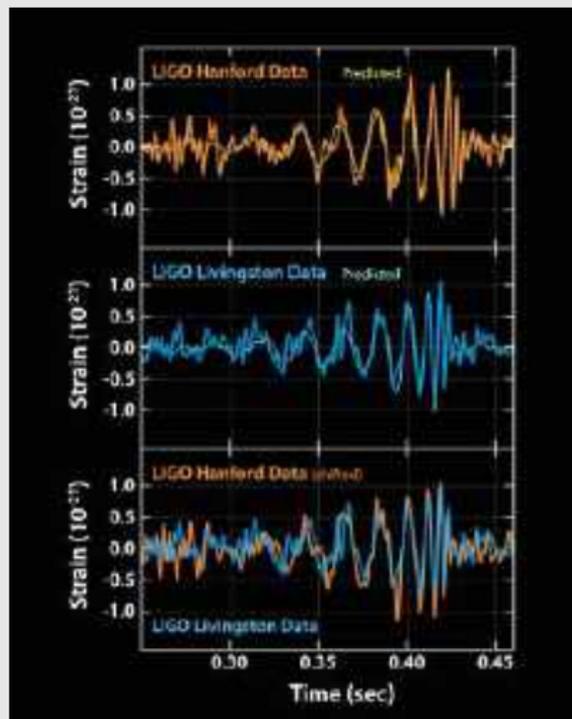


Figura: Observaciones en Hanford y Livingstone.



Análisis de los datos

La forma de onda se reconstruyó usando varios filtros distintos para eliminar ese ruido (que en parte no es gaussiano) y el resultado se comparó con una biblioteca de ~ 200000 formas de onda precalculadas. También se compararon las lecturas de ambos observatorios con desplazamientos a lo largo de 16 días para encontrar posibles señales coincidentes. Sólo se encontró otra señal posible, con bajo nivel de significación, llamada LVT151012.



¿Rayos γ del evento?

Casi a la misma hora, el satélite FERMI con su instrumento GBM, detectó una señal ~ 5 veces mayor que el ruido, con una dirección mal constreñida, pero consistente con el área determinada en LIGO. La señal no parece coincidir con ningún otro fenómeno celeste. Pese a su bajo nivel de significación, esta señal ha originado varios trabajos sobre su origen y significado.



EL evento de fusión

Masa del agujero negro principal	$M_1 = 36 \pm 4 M_{\odot}$
Masa del agujero negro secundario	$M_2 = 29 \pm 4 M_{\odot}$
Masa del agujero negro resultante	$M_0 = 62 \pm 4 M_{\odot}$
Energía irradiada	$\Delta E = 3,0 \pm 0,5 M_{\odot} c^2$
Potencia máxima	$L = 200 \pm 30 M_{\odot} c^2/s$
Distancia de Luminosidad	$D_L = 400 \pm 170 \text{ Mpc}$
Corrimiento al rojo	$z = 0,09 \pm 0,04$

Cuadro: Propiedades del evento de fusión.



Análisis físico

El evento **confirma predicciones de la Relatividad General**

1. La existencia de agujeros negros y su fusión.



Análisis físico

El evento **confirma predicciones de la Relatividad General**

1. La existencia de agujeros negros y su fusión.
2. La **relación de dispersión de las ondas gravitacionales** es indistinguible de la de la luz $m_g c^2 < 10^{-22}$ eV.



Análisis físico

El evento **confirma predicciones de la Relatividad General**

1. La existencia de agujeros negros y su fusión.
2. La **relación de dispersión de las ondas gravitacionales** es indistinguible de la de la luz $m_g c^2 < 10^{-22}$ eV.
3. La **velocidad de propagación de las ondas gravitacionales** coincide (dentro de límites estrechos) con la **velocidad de la luz** .



Análisis físico

El evento **confirma predicciones de la Relatividad General**

1. La existencia de agujeros negros y su fusión.
2. La **relación de dispersión de las ondas gravitacionales** es **indistinguible de la de la luz** $m_g c^2 < 10^{-22}$ eV.
3. La **velocidad de propagación de las ondas gravitacionales** coincide (dentro de límites estrechos) con **la velocidad de la luz**.
4. **Se han contrastado predicciones de la Relatividad General en condiciones de campo fuerte**

$$\frac{v^2}{c^2} \sim \frac{G_N M}{rc^2} \lesssim 1$$



Análisis astronómico

Por primera vez en astronomía, se ha “visto” un evento “invisible”

1. Se ha comprobado la existencia de agujeros negros “grandes” $\sim 30M_{\odot}$, que vagan por el espacio y pueden chocar.



Análisis astronómico

Por primera vez en astronomía, se ha “visto” un evento “invisible”

1. Se ha comprobado la existencia de agujeros negros “grandes” $\sim 30M_{\odot}$, que vagan por el espacio y pueden chocar.
2. Este evento se observó con un nuevo tipo de señal: un pulso de ondas gravitacionales.



Análisis astronómico

Por primera vez en astronomía, se ha “visto” un evento “invisible”

1. Se ha comprobado la existencia de agujeros negros “grandes” $\sim 30M_{\odot}$, que vagan por el espacio y pueden chocar.
2. Este evento se observó con un nuevo tipo de señal: un pulso de ondas gravitacionales.
3. Se trata de la primera observación en la Astronomía de ondas gravitacionales.



Parte VIII

Conclusiones



Resultados y perspectivas

La detección de ondas gravitacionales en LIGO ha tenido consecuencias interesantes y prometedoras:

- ▶ La comprobación de la Relatividad General en condiciones de campo fuerte.



Resultados y perspectivas

La detección de ondas gravitacionales en LIGO ha tenido consecuencias interesantes y prometedoras:

- ▶ La comprobación de la Relatividad General en condiciones de campo fuerte.
- ▶ La observación de la fusión de agujeros negros, hasta ahora inobservable.



Resultados y perspectivas

La detección de ondas gravitacionales en LIGO ha tenido consecuencias interesantes y prometedoras:

- ▶ La comprobación de la Relatividad General en condiciones de campo fuerte.
- ▶ La observación de la fusión de agujeros negros, hasta ahora inobservable.
- ▶ La iniciación de una nueva especialidad de la astronomía: la Astronomía de ondas gravitacionales.



Final

Como toda ciencia que florece, física y astronomía resuelven problemas viejos mientras plantean nuevos.



Final

Como toda ciencia que florece, física y astronomía resuelven problemas viejos mientras plantean nuevos.

Lo admirable no es que el Universo sea tan grande sino que el hombre haya sido capaz de medirlo.

ANATOLE FRANCE
El jardín de Epicuro
(1895)

