



Universidad  
del País Vasco

Euskal Herriko  
Unibertsitatea



ZTF-FCT

Zientzia eta Teknologia Fakultatea  
Facultad de Ciencia y Tecnología



---

Trabajo de Fin de Grado  
Grado en Física

---

## 100 años de Relatividad General

Autora:  
Ione Andía

Director:  
José M<sup>o</sup> Martín Senovilla

Leioa, febrero de 2016

## *Resumen*

Recientemente se ha celebrado el centenario de la Teoría General de la Relatividad de Albert Einstein. Desde su aparición ha supuesto una auténtica revolución en el estudio de la gravedad y en concreto en su concepto del espacio-tiempo que era totalmente novedoso con respecto a lo hasta entonces conocido y a nuestra propia intuición. Este trabajo trata de hacer un repaso a la Relatividad General comenzando por la perspectiva de la física básica planteada siglos atrás hasta la explicación de hitos llevados a cabo en la actualidad, queriendo recalcar la importancia de esta teoría en sus 100 años de vida. Asimismo, se quiere poner de manifiesto también su importancia actual.

## *Abstract*

Recently we celebrated the centenary of the Theory of General Relativity of Albert Einstein. It represented a revolution in the study of gravity and particularly in its concept of space-time that was totally novel with respect to previous thoughts and to our own intuition. This memory attempts to make a review of general relativity starting from the perspective of basic physics existing centuries ago up to the explanation of milestones held today, remarking the importance of this theory in its 100 years of life. Moreover, its present importance is also considered and analyzed.

## *Laburpena*

Berriki Albert Einsteinen Erlatibitatearen Teoria Orokorren mendeurrena ospatu dugu. Orduetik grabitatearen ikerketan iraultza bat izan da bereziki espazio-denboraren kontzeptuan, ordura arte ezagutzen zenaren aurka zihoalako eta batez ere, gure intuizioaren aurka. Lan honek erlatibitate orokorrari berrikuspena egin nahi dio duela mendeak zegoen oinarrizko fisikaren ikuspegitik hasiz gaur egun eman diren hainbat gertaera azaltzen bukatzeraino, azpimarratuz teoria honek izan duen garrantzia bere bizitzaren 100 urtetan. Horrez gain, azaldu nahi da zeinen garrantzitsua izaten jarraitzen duen aktualitatean.

# Índice

INTRODUCCIÓN .....	1
<b>1. ANTECEDENTES .....</b>	<b>2</b>
<b>1.1 GRAVEDAD.....</b>	<b>2</b>
<b>1.2 ELECTRICIDAD Y MAGNETISMO .....</b>	<b>4</b>
<b>1.3 TEORÍA DE LA RELATIVIDAD ESPECIAL.....</b>	<b>5</b>
<b>2. TEORÍA GENERAL DE LA RELATIVIDAD .....</b>	<b>7</b>
<b>2.1 BASES.....</b>	<b>7</b>
2.1.1 <i>El principio de relatividad.....</i>	<i>7</i>
2.1.2 <i>El principio de equivalencia débil.....</i>	<i>7</i>
<b>2.2 EXPLICACIÓN .....</b>	<b>8</b>
2.2.1 <i>Las cajas de Einstein .....</i>	<i>9</i>
2.2.2 <i>Geometría.....</i>	<i>10</i>
<b>2.3 LA ECUACIÓN .....</b>	<b>12</b>
<b>3. PREDICCIONES CLÁSICAS DE LA RELATIVIDAD GENERAL.....</b>	<b>14</b>
<b>3.1 PRECESIÓN DEL PERIHELIO DE MERCURIO.....</b>	<b>14</b>
<b>3.2 DESPLAZAMIENTO AL ROJO.....</b>	<b>15</b>
<b>3.3 LA DESVIACIÓN DE LA LUZ.....</b>	<b>15</b>
<b>3.4 EFECTO SHAPIRO.....</b>	<b>16</b>
<b>4. LOS HITOS DE LA RELATIVIDAD GENERAL .....</b>	<b>17</b>
<b>4.1 MEDICIÓN DE LA DESVIACIÓN DE LA LUZ (1919) .....</b>	<b>17</b>
<b>4.2 LA OBSERVACIÓN DE HUBBLE DE LA EXPANSIÓN DEL UNIVERSO (1929).....</b>	<b>19</b>
<b>4.3 LA MÉTRICA DE KERR (1963) .....</b>	<b>21</b>
<b>4.4 EL DESCUBRIMIENTO DEL FONDO DE RADIACIÓN CÓSMICA DE MICROONDAS (1965) .....</b>	<b>22</b>
<b>4.5 TEOREMA DE SINGULARIDAD DE PENROSE (1965) Y LA RADIACIÓN DE HAWKING (1974).....</b>	<b>23</b>
<b>4.6 EL DESCUBRIMIENTO DEL PÚLSAR BINARIO (1974) .....</b>	<b>25</b>
<b>4.7 ONDAS GRAVITACIONALES (2016) .....</b>	<b>27</b>
<b>5. GPS.....</b>	<b>30</b>
<b>5.1 TRIANGULACIÓN.....</b>	<b>30</b>
<b>5.2 CÁLCULO DE LA DISTANCIA .....</b>	<b>31</b>
<b>5.3 SINCRONIZACIÓN.....</b>	<b>31</b>
<b>5.4 POSICIONES DE LOS SATÉLITES.....</b>	<b>32</b>
<b>5.5 OTROS ERRORES.....</b>	<b>32</b>
<b>5.6 PRUEBA DE LA TEORÍA DE LA RELATIVIDAD.....</b>	<b>33</b>
<b>6. LA RELATIVIDAD GENERAL PUESTA A PRUEBA EN EL FUTURO .....</b>	<b>35</b>
<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>36</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>37</b>

# Introducción

Desde el descubrimiento de la ley de la gravitación universal de Newton, la física se basaba en esos conceptos para dar explicación a diferentes problemas del entorno. Esta teoría sobre la gravedad duró muchísimos años y fue capaz de explicar correctamente el movimiento de los planetas, la caída de los objetos a la Tierra y el efecto de las mareas entre otras cosas. Sin embargo, había cosas, como la descripción de la órbita del planeta Mercurio en las que esta teoría empezaba a fallar. Afortunadamente, 10 años después de la teoría de la relatividad especial que sugirió que el tiempo ya no era absoluto, Einstein introdujo la teoría general de la relatividad. En dicha teoría, pudo corregir los fallos que presentaba la teoría de Newton dando una nueva explicación a la gravedad, pasando de ser una fuerza a ser un efecto de la geometría del espacio-tiempo. De este modo, la concepción de la gravedad cambió por completo y junto a ello la forma de entender el universo.

Hace ya 100 años de la introducción de la teoría científica de tal impacto: la teoría general de la relatividad. Esta fue una teoría que se dice que no era necesaria, es decir, teorías como la de la relatividad especial se introdujeron para resolver conflictos físicos cuestionados en la época. La relatividad general, en cambio, surgió de la nada sin intención de dar explicación a ninguna incógnita del momento, aunque años más tarde se haya descubierto que sea la solución para diversas cuestiones científicas.

Con su recién centenario a nuestras espaldas, este trabajo realiza un seguimiento del antes y después de la teoría para poder entenderla en todo su conjunto. Comenzando desde cómo era la física hasta entonces y las cuestiones que había antes de dicha teoría revolucionaria, pasa a explicar la anterior creación de Einstein, la teoría de la relatividad especial. Después, se sumerge en la teoría general de la relatividad explicando, por un lado, las bases y la teoría en sí junto con las ecuaciones de campo y, por otro lado, introduce las primeras predicciones clásicas que se hicieron. A continuación, explica algunos de los hitos acaecidos durante los 100 años transcurridos desde su formulación original, incluido el último de las ondas gravitacionales. Finalmente, acaba con una aplicación cotidiana de la teoría: el GPS, y como cierre, se explican proyectos futuros en los que la teoría se volverá a poner a prueba una vez más.

Este trabajo es, por tanto, un trabajo histórico-bibliográfico que trata de recopilar información de diversas fuentes para poder obtener información fiable y ordenarla de manera lógica. Además, se centra en la divulgación como forma de conmemorar dicha labor llevada a cabo un siglo antes por el científico Albert Einstein. Dicho esto, os invito a recorrer las páginas siguientes para adentraros en el mundo de la física y sobre todo, para adentraros en la mente del gran Albert Einstein.

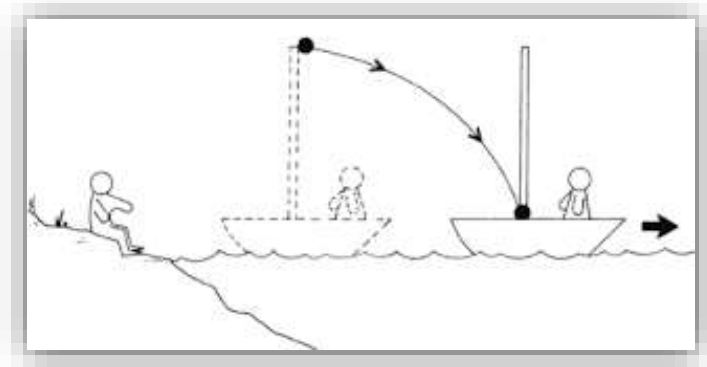
# 1. Antecedentes

## 1.1 Gravedad

Hoy en día la gravedad es una fuerza de la que hablamos con normalidad, pero a lo largo de los años ha habido muchas teorías intentando explicar su procedencia. Se puede decir que todo comenzó con Aristóteles intentando dar explicación a la caída de los objetos al suelo desde cierta altura. **Aristóteles** (384-322 A.C), defendía un modelo geocéntrico situando la Tierra estática en el centro del Universo y relacionó el movimiento de los objetos con su composición en los cuatro elementos (tierra, agua, aire y fuego). Además, afirmó que los cuerpos caerían con más rapidez cuanto más pesados fueran y creó un quinto elemento del cual se formaban los cuerpos celestes para poder así explicar su movimiento, al cual llamó quintaesencia (éter) [36]. El modelo de Aristóteles fue ampliado por **Claudio Ptolomeo** (100-170 d.C) en el siglo II d.C hasta llegar a un modelo cosmológico completo según el cual la Tierra permanecía en el centro rodeada del Sol, la Luna, las estrellas y los cinco planetas conocidos hasta entonces (Mercurio, Venus, Marte, Júpiter y Saturno).

**Copérnico** (1473-1543) fue el primero en plantear un modelo heliocéntrico para el movimiento de los planetas rechazando así lo que Aristóteles creía sobre los cuerpos celestes pero apoyando su idea de las órbitas circulares. El siguiente fue **Galileo-Galilei** (1564-1642) quien siguiendo con el modelo de Copérnico, desechó por completo la teoría de Aristóteles sobre la caída de los cuerpos haciendo experimentos, ya que vio que un cuerpo de doble peso no caía con rapidez doble. Basándose en eso, enunció dos de los principios en los que se basaría más tarde la relatividad general: **el principio de relatividad y el principio de equivalencia débil**. Por un lado, el principio de relatividad consideraba que el movimiento es relativo al observador y en consecuencia postuló que las leyes de la física son las mismas en cualquier sistema de referencia inercial, es decir, que los resultados de experimentos de mecánica obtenidos por un observador que se mueve a velocidad constante serían los mismos que los que obtendría otro observador en reposo [29,41]. El ejemplo más conocido para dar explicación a este hecho es el del barco, representado en la

*Figura 1*. Suponiendo que un observador en un barco en movimiento rectilíneo deja caer una piedra desde lo alto de un mástil, la piedra caerá en línea recta vista desde la referencia de dicho observador y realizará una parábola vista desde la referencia de un observador en reposo fuera del barco [27].



*Figura 1: Ejemplo del barco de Galileo*

Para relacionar los dos sistemas de forma matemática, Galileo sugirió las siguientes transformaciones:

$$x' = x - Vt \quad y' = y \quad z' = z \quad t' = t \quad (1)$$

Por otro lado, con el principio de equivalencia débil Galileo afirmó que eliminando la fricción del aire, todo objeto caería al mismo tiempo al suelo independientemente de su masa. Principio que más tarde explicaremos con más detalle [17].

Después de la gran contribución de Galileo en los estudios de la física, se buscaba encontrar un sistema unificado con el que estudiar todos los fenómenos físicos matemáticamente. Fue **Isaac Newton** (1642-1727) quien hizo que eso fuera posible mediante su obra "Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica" ("Los Principios matemáticos de la filosofía natural") publicada en 1687. En aquella obra, Newton expone sus famosas tres leyes de la mecánica junto con la ley de la gravitación universal [27].

**La ley de la Gravitación Universal** afirma que la fuerza de atracción que experimentan dos cuerpos dotados de masa es directamente proporcional al producto de sus masas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que los separa:

$$\vec{F} = -\frac{G m_1 m_2}{r^2} \hat{r} \quad (2)$$

siendo G la constante de la gravitación universal:  $G = 6.67 \times 10^{-11} \text{ N m}^2 / \text{kg}^2$

Por otro lado, tres fueron las **leyes de la mecánica newtoniana** que actualmente usamos:

- 1) **Primera ley / Ley de inercia:** Un cuerpo seguirá en el estado en el que está, bien sea en reposo o en movimiento uniforme, hasta que se le apliquen fuerzas externas cuya resultante no sea nula.
- 2) **Segunda ley / Principio fundamental de la dinámica:** El resultado de la fuerza aplicada a un cuerpo será proporcional a la masa inercial y su aceleración.

$$\vec{F} = m\vec{a} \quad (3)$$

- 3) **Tercera ley / Principio de acción-reacción:** Toda acción tiene siempre una reacción de mismo módulo pero contraria:

$$\vec{F}_{21} = -\vec{F}_{12} \quad (4)$$

Como resultado de esta obra, pudo deducir el movimiento exacto de los planetas [54]. Aun así, Newton veía un hueco importante en su teoría. Él supo bien cómo explicar el movimiento de los cuerpos masivos frente a una fuerza gravitacional, lo que no dejaba claro era el porqué de su atracción. Fue entonces cuando comenzó a especular sobre un concepto ya mencionado anteriormente: el **éter**. El éter facilitaba la explicación de la atracción gravitacional, ya que se describía como una sustancia sutil imperceptible para los humanos y que ocupaba todo el espacio vacío [27].

## 1.2 Electricidad y Magnetismo

No solo la fuerza de la gravitación actúa a distancia, los cuerpos cargados eléctricamente también se ven afectados por otros cuerpos que los atraen o repelen. En el siglo XVII, era Charles-Augustin de **Coulomb** (1736-1806) quien demostraba que a semejanza de la fuerza gravitacional, los cuerpos cargados eléctricamente también ejercen una fuerza de atracción. De Coulomb en adelante, varios científicos como Hans Christian **Oersted** (1777-1851), André-Marie **Ampère** (1775-1836) o Michael **Faraday** (1791-1867) demostraron distintas leyes con las que relacionaban la electricidad y el magnetismo en un solo concepto. Sin embargo, todos estos fenómenos no parecían más que hechos aislados hasta que James Clerk **Maxwell** (1831-1879) unificó estas leyes mediante ecuaciones en derivadas parciales [8].

Maxwell formuló matemáticamente las leyes del electromagnetismo, los fenómenos unificados de la electricidad y el magnetismo. Mediante esa formulación, logró expresar las leyes descubiertas por Coulomb, Ampère y Faraday en un mismo lenguaje. Dichas ecuaciones son las que relacionan matemáticamente la variación del campo magnético en el tiempo con las variaciones del campo eléctrico inducido en el espacio y hoy en día las conocemos como las ecuaciones de Maxwell:

$$\begin{aligned}\vec{\nabla} \cdot \vec{E} &= \frac{\rho}{\epsilon_0} & \vec{\nabla} \times \vec{E} &= -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \\ \vec{\nabla} \cdot \vec{B} &= 0 & \vec{\nabla} \times \vec{B} &= \mu_0 \vec{J} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}\end{aligned}\tag{5}$$

Una de las conclusiones a las que llegó Maxwell fue la propagación de la radiación electromagnética en el vacío y descubrió que la velocidad de dicha propagación era la misma velocidad que la de la luz, hoy en día denominada como la constante  $c$  de la ecuación (6). Fue Heinrich Rudolf **Hertz** (1857-1894) quien más tarde confirmó dicho fenómeno experimentalmente, mediante la producción de ondas electromagnéticas [50].

$$c = 299.792.458 \text{ m/s}\tag{6}$$

Al igual que hizo Newton, Maxwell también se basó en el concepto del éter como medio físico que transporta las ondas electromagnéticas en el espacio. Aun así, las leyes de Maxwell dejaban de cumplir el principio de relatividad de Galileo. Es decir, sus ecuaciones tomaban distinta forma al pasar de un sistema de referencia a otro. Con ello, se llegó a la conclusión de que las ecuaciones de Maxwell solo podían ser válidas en el sistema de espacio absoluto, sistema donde el éter está en reposo.

En el siglo XIX, la existencia del éter se aceptaba por los físicos, aun así, ninguno era capaz de demostrar su existencia. La única manera de confirmarla era a través de experimentos con la luz, por ello, en 1887 Albert Abraham **Michelson** (1852-1931) y Edward W. **Morley** (1838-1923) trataron de medir la velocidad de la Tierra con respecto al éter mediante el uso de un interferómetro, aparato que les permitió medir distancias y velocidades con enorme precisión utilizando haces de luz en interacción. Como resultado de este experimento, se dieron cuenta de que a pesar del movimiento de la Tierra, la luz no sufría ningún cambio de velocidad, que viajaba

con la misma velocidad en todas las direcciones. Este resultado rompió los esquemas de la física, ya que no encajaba con ninguna de las teorías aceptadas. No obstante, para llegar a darle una explicación al resultado poco esperado del experimento, se empezó a plantear la posibilidad de la contracción de la materia (Lorentz-FitzGerald). Sin embargo, siguieron obteniendo resultados nulos, ya que no eran capaces de determinar la velocidad de la tierra con respecto al éter [27].

Einstein intentó dar solución al aparente rompecabezas rechazando la opción de la existencia de un posible éter, para ello, se basó en el hecho de que ningún observador puede distinguir un estado de reposo de un estado de movimiento con velocidad constante. Con ello, reconoció los límites de la mecánica newtoniana, ya que ésta solo describe los movimientos de objetos que se mueven a velocidad pequeña comparada con la de la luz.

### 1.3 Teoría de la relatividad especial

1905 fue el año en que Albert **Einstein** (1879-1955) publicó uno de los mayores avances científicos: la Teoría de la Relatividad Especial. Fueron cuatro los artículos que publicó en la prestigiosa revista alemana "Annalen der Physik", donde hablaba de la naturaleza cuántica de la luz, el movimiento browniano, la relatividad especial y la equivalencia entre masa y energía. En el famoso artículo titulado "Zur Elektrodynamik bewegter Körper" ("Sobre la electrodinámica de los cuerpos en movimiento") fue donde se originó la relatividad especial.

Viendo que esta era la física a la que se enfrentaba Einstein, podemos llegar a entender las cuestiones que se planteó. Después de aquel experimento de Hertz, Einstein comenzó a plantearse qué es lo que ocurriría si alguien fuese capaz de moverse a la velocidad de la luz. Esa posibilidad no se contemplaba en las ecuaciones de Maxwell, es decir, fallaban al examinar sistemas en movimiento, por lo tanto, había dos posibilidades, o las ecuaciones eran erróneas o no es posible que un observador se mueva a la velocidad de la luz [8].

Para resolver las contradicciones de las ecuaciones, en 1899 el científico Hendrik **Lorentz** (1853-1928) propuso un cambio en las transformaciones de Galileo, creando así las transformaciones de Lorentz que relacionarían las coordenadas entre sistemas separados por una velocidad constante y dedujo la contracción espacial. Así las transformaciones de Galileo, (1), solo serían válidas para velocidades pequeñas mientras que las de Lorentz muestran el resultado a altas velocidades próximas a la de la luz.

Transformaciones de Lorentz:

$$t' = \gamma \left( t - \frac{Vx}{c^2} \right) \quad x' = \gamma(x - Vt) \quad y' = y \quad z' = z \quad (7)$$

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}}$$

donde las coordenadas primadas son medidas en el sistema de referencia que se mueve con velocidad constante V en la dirección del eje x con respecto del sistema de coordenadas sin primar.



Las transformaciones de Lorentz establecieron la base matemática de la teoría de la relatividad especial de Einstein y revolucionaron la mecánica clásica porque planteaban un tiempo que no era invariante. Einstein buscaba un marco conceptual general que se pudiera aplicar a toda la física y basándose en las transformaciones de Lorentz afirmó que el tiempo entre dos sucesos varía dependiendo quien lo mida. Además postuló que las ecuaciones de Maxwell debían tener la misma forma en cualquier sistema de referencia inercial. Como consecuencia, rechazó el concepto de éter y de tiempo o espacio absolutos. Para ello, usó como cimiento para la teoría especial de la relatividad el principio de relatividad de Galileo y el siguiente postulado: la velocidad de la luz en el vacío es constante en todas las direcciones independientemente del estado de movimiento de la fuente en un sistema de referencia inercial. Este último es resultado del experimento de Michelson y Morley [17].

Como consecuencias obtuvo que:

- 1.- El reposo o el movimiento uniforme de un sistema son indetectables desde el propio sistema de referencia.
- 2.- En todo sistema de referencia en movimiento respecto a un sistema inercial dado el tiempo transcurre más lentamente.
- 3.- En todo sistema de referencia en movimiento respecto a un sistema inercial dado los cuerpos se contraen en la dirección del movimiento.
- 4.- En todo cuerpo en movimiento la masa aumenta.

De todo ello, observó que la velocidad de la luz no podía ser superada, ya que en ese caso, el tiempo transcurrido, la longitud y la masa de los cuerpos darían valores imaginarios matemáticamente. Además, al aumentar la masa del cuerpo, aumenta también la energía necesaria para acelerarla siendo infinita para  $v=c$  [45].

## 2. Teoría General de la Relatividad

### 2.1 Bases

La teoría de la Relatividad Especial solo concierne sistemas de referencia con movimiento relativo a velocidades constantes, pero el objetivo de Einstein era describir la realidad. Él quería encontrar una ley física que fuera capaz de describirlo todo. Pero en la realidad, todo varía, las velocidades se aceleran y en ese caso su teoría de la Relatividad Especial no se aplica. Para que la teoría pueda generalizarse, debería poder aplicarse al universo entero, incluso a la gravedad. Por eso Einstein quiso extender su teoría especial a una teoría más general que explique no solo el tiempo, sino también la gravedad. Eso suponía enfrentarse a Newton y su ley de la gravedad planteada más de 250 años atrás ya que, según él, presentaba dos problemas. Por un lado, según la relatividad especial, debido a la contracción de Lorentz, dos observadores no tienen por qué medir la misma distancia, por lo que esto creó una confusión de cuál sería la distancia que habría que introducir en la fórmula de la ley de la gravitación universal. Por otro lado, en la ecuación de Newton no aparece el tiempo, eso querría decir que al alejarse una masa de la otra, las fuerzas cambian de forma inmediata según Newton. Esa idea viola los conceptos relativistas, que establecen que nada puede viajar más rápido que la velocidad de la luz. En consecuencia, comenzó a trabajar en una nueva teoría basándose en el principio de relatividad y el principio de equivalencia débil de Galileo [17].

#### 2.1.1 El principio de relatividad

Ya explicado en el apartado 1.1. Gravedad.

#### 2.1.2 El principio de equivalencia débil

El Principio de Equivalencia Débil establece la igualdad entre la masa inercial y la masa gravitacional ya que sostiene que todos los objetos independientemente de su masa o composición caen con la misma aceleración en presencia de gravedad.

Galileo Galilei comprobó que el movimiento de cualquier objeto en caída libre es independiente de su estructura y composición, y una forma de escribirlo es mediante la segunda ley de Newton:

$$\vec{F} = m_i \vec{a} \quad (8)$$

siendo  $m_i$  la masa inercial, es decir, la resistencia que pone un objeto al ser acelerado por una fuerza. Por otro lado, a un cuerpo inmerso en un campo gravitacional se le asigna un peso:

$$\vec{P} = m_g \vec{g} \quad (9)$$

siendo  $m_g$  la masa gravitacional, es decir, la que determina el peso de un cuerpo en reposo sobre la superficie de la tierra.

Para un objeto en caída libre, ambas fórmulas se pueden igualar  $m_i \vec{a} = m_g \vec{g}$  sacando así la conclusión de la igualdad de la masa inercial y gravitacional

$$m_i = m_g \quad (10)$$

Para llegar a la misma conclusión que Galileo, Newton utilizó péndulos como experimento. Más tarde, **Bessel** (1784-1846) realizaría los mismos experimentos con mayor precisión. Pero fue en 1908 cuando **Eötvös** (1848-1919) consiguió una precisión mayor mediante el uso de una balanza de torsión. Dicho experimento consiste en dos masas colgadas en los extremos de una varilla en la balanza de torsión y un espejo en el centro. La función del espejo no es más que reflejar una luz en un telescopio para que cualquier variación que haya en la rotación de la balanza influya en el cambio de la luz detectada por el telescopio. Así, con la tensión de la cuerda, la gravedad y la fuerza centrífuga de la tierra implicadas en el experimento, Eötvös comprobó con una precisión de  $10^{-9}$  que las dos masas diferentes de la balanza, la gravitacional de las leyes de gravitación de Newton y la masa inercial que depende de las leyes de movimiento de Newton son iguales. Este simple experimento verificó el principio de equivalencia ya mencionado anteriormente en el que Einstein se basaría para la teoría General de la Relatividad [34].

### 2.2 Explicación

Albert Einstein se dedicó durante años a buscar una posible modificación a la teoría de la gravitación de Newton que fuera compatible con el principio de relatividad. Hasta que, en 1907, descubrió la que según él fue la "idea más feliz de su vida" ("*der glücklichste Gedanke meines Lebens*"). Se preguntó qué es lo que pasaría si un hombre cayera de cierta altura. En ese caso, el hombre no sentiría su propio peso, no sentiría nada, sería como si la gravedad desapareciera para él, por lo que no existiría la atracción gravitacional que mencionaba Newton [37]. Este efecto es el mismo que sufrirían unos astronautas cuando se hallan en el espacio en una nave en caída libre, sin aparente gravedad. En realidad, la gravedad no ha desaparecido, sino que sentimos que ha sido eliminada por la caída libre de la nave bajo los pies de los astronautas. En el momento en que la nave acelerara, el astronauta se sentiría atraído por el suelo de ésta. Es decir, en ambos casos ocurriría el mismo fenómeno, en el primer caso, causado por el efecto de la gravedad y en el segundo por la aceleración de la nave. Por esa razón, Einstein propuso que si estuviéramos dentro de una nave que acelera con la misma aceleración que provoca la Tierra sobre cualquier objeto en caída libre, no distinguiríamos si estamos en una nave acelerada o en una habitación en Tierra firme ya que seríamos atraídos por la parte trasera de la nave exactamente con la misma intensidad con la que somos atraídos por la Tierra si estamos en el suelo. Como conclusión a esta idea, Einstein afirmó que la gravedad y la aceleración son equivalentes, enunciando así **su principio de equivalencia** [17].

Si volvemos a la situación de caída libre de la nave, el astronauta verá cómo todos los objetos alrededor flotan ya que él no sentiría gravedad alguna. Si esa misma situación la examina un observador del exterior, verá cómo la nave y todo su contenido son igualmente acelerados a causa de la gravedad. Es decir, estamos diciendo que un simple cambio de coordenadas hace que la gravedad aparezca y desaparezca. Eso implica que la gravedad no puede ser considerada como una fuerza de interacción clásica, al final resulta ser un efecto de la geometría del espacio-tiempo.

### 2.2.1 Las cajas de Einstein

Einstein planteó un experimento mental para poder explicar la relación entre sistemas de referencia no inerciales y sistemas de referencia sometidos a fuerzas gravitacionales.

Hagamos la suposición de que estamos dentro de una caja colocada sobre la superficie de la Tierra. De ese modo, estaremos sometidos a una fuerza gravitacional por la que caerán los objetos dentro de la caja y por la que nosotros mismos nos sentimos atraídos por el suelo. Si situáramos la caja en el espacio vacío, lejos de la influencia gravitacional de cualquier masa (planeta o estrella), al estar la caja en reposo (o en movimiento rectilíneo y uniforme, que según el principio de relatividad eran indistinguibles) todo lo que contenga estará flotando libremente. En el momento en que aceleramos la caja, los objetos “sentirán” una fuerza con la que se verán atraídos por el suelo. Es decir, desde el punto de vista del observador del interior, será como si hubiera gravedad y todos los cuerpos “caerían” hacia el suelo con la misma aceleración independientemente de su masa [27].

Por mucho que una de las ideas establecidas de la gravedad sea que solo afecta a objetos con masa, la relatividad general muestra que no es solo la masa la que genera y siente la gravedad, sino que cualquier forma de energía hará lo mismo. Para ello, podemos imaginar un rayo de luz que se propaga dentro de la caja al igual que en la *Figura 2*. Al estar la caja en reposo, la luz se propagaría en línea recta. Pero, en el momento en que aceleramos la caja, el rayo de luz se curvaría. Ya que la teoría de la relatividad predice que la gravedad y la aceleración son indistinguibles, la luz se ha de curvar en presencia de campos gravitatorios [13].

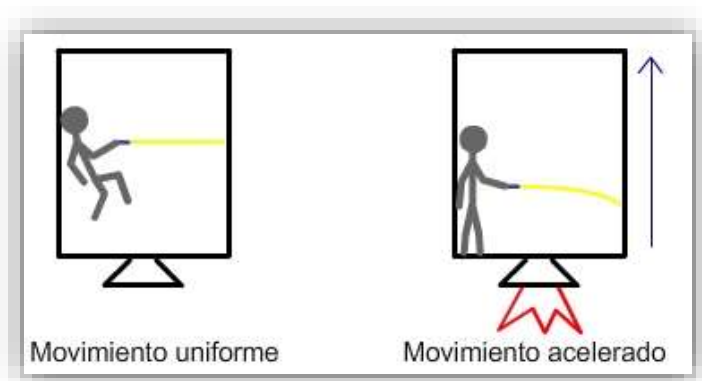


Figura 2: Desviación de la luz en un marco acelerado

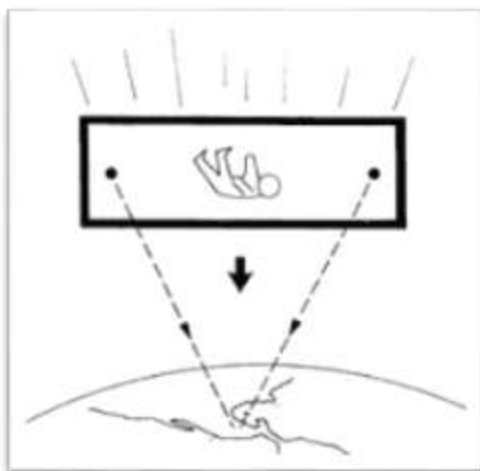


Figura 3: Efecto marea

Sin embargo, la equivalencia entre gravedad y aceleración no se puede extender a todos los casos, solo se cumple localmente, en entornos pequeños alrededor del observador. En el momento en que consideramos situaciones más amplias, aparecerán los llamados **efectos de marea**, como lo observado en la *Figura 3*. Pongamos otra vez el ejemplo de la caja en caída libre. El observador de dentro verá cómo los objetos de su alrededor flotan. En una escala mayor, sin embargo, seguirá sin sentir gravedad alguna por estar en caída libre pero podrá apreciar cómo los objetos que están con él en la caja se acercan unos a otros dado que la gravedad de la Tierra los atrae a su centro. Es decir, las trayectorias de aquellos objetos que en una pequeña escala se veían

paralelas, en realidad no lo son sino que tienen trayectorias convergentes [17]. Esta idea podríamos asemejarla a nuestra visión de la Tierra. Desde nuestro punto de vista, con lo que nos consigue alcanzar la vista, vemos la Tierra como plana. Nuestra escala es mucho menor que la necesaria para poder notar la curvatura. Por eso la humanidad tardó tanto tiempo en deducir que la Tierra no es plana, hecho que hoy en día damos por sentado. De manera que si estuviéramos en el espacio, sin Tierra a la vista, no se darían estas desviaciones de las trayectorias. Por ello, en una caja cerrada, el observador de dentro terminará por determinar si se encuentra en caída libre hacia la Tierra o simplemente en reposo en mitad del espacio. En definitiva, esto quiere decir que el observador no se ve afectado por una geometría plana sino curva. Y como consecuencia, esto nos lleva a pensar que la gravedad no es una simple interacción clásica sino que es un efecto de la curvatura del espacio-tiempo [13].

### 2.2.2 Geometría

Para poder relacionar la gravedad con la geometría del espacio-tiempo, daremos un breve repaso a la geometría. La geometría forma una parte muy importante en la teoría general de la relatividad, por ello, comenzaremos mencionando parte de su evolución.

**Euclides** (325-265 A.C), considerado como “el padre de la geometría”, recopiló y sintetizó todos los conocimientos geométricos de su época en un libro llamado “Elementos”. En aquel libro formuló cinco postulados a partir de los cuales se podía deducir toda la geometría de la época, que más tarde formaron la denominada Geometría Euclídea. Fue Karl Fiedrich **Gauss** (1777-1885) quien intentó modificar la geometría euclídea y formuló su teoría de superficies. En 1912 Einstein se dio cuenta que podía usar la teoría de superficies de Gauss para poder encajar la interacción gravitatoria en su teoría de la relatividad y lo hizo con ayuda del matemático **Grossman** (1878-1936). En esa teoría, Gauss creó una función matemática, la métrica ( $g$ ), que mostrase la información para cada punto de una superficie. Gauss partió de la distancia entre dos puntos próximos en una superficie [38]. El recorrido más corto entre dos puntos situados en un plano es una línea recta. Al situarlos en una esfera, en cambio, aquella línea más corta se convierte en un arco de circunferencia. Estas líneas son denominadas geodésicas, definidas como las curvas de menor longitud entre dos puntos [27].

En una superficie plana, nos podemos basar en el teorema de Pitágoras:

$$ds^2 = dx^2 + dy^2 \quad (11)$$

Para ampliar la teoría a cualquier tipo de superficie, Gauss trabajó con coordenadas generales  $u$  y  $v$ , formulando así el cuadrado de la distancia entre los dos puntos:

$$ds^2 = E(u, v)du^2 + 2F(u, v)dudv + G(u, v)dv^2 \quad (12)$$

siendo  $E$ ,  $F$  y  $G$  funciones de las coordenadas.

Por mucho que Gauss solo se centrara en lo bidimensional, su alumno Georg Bernhard **Riemann** (1826-1866) quiso dar un paso más y generalizó la teoría de Gauss a un número arbitrario de dimensiones:

$$ds^2 = \sum_{i,j}^n g_{ij}dx_i dx_j \quad (13)$$

donde  $g_{ij}$  son también funciones de las coordenadas. Dicho de otra manera, la distancia al

cuadrado de dos puntos próximos irá alargándose y comprimiéndose a medida que nos desplazamos en la superficie. La colección de funciones de la métrica representan todas las irregularidades del relieve de la superficie y se pueden escribir mediante una matriz cuadrada de  $n \times n$  elementos. De este modo, Riemann elaboró una geometría en la que no hay rectas paralelas, es decir, geometría no euclídea. Denominada hoy en día como la Geometría riemanniana.

En el lenguaje matemático, la distancia y la curvatura son invariantes, en otras palabras, se sabe qué forma adoptan en cualquier sistema de coordenadas. Este enunciado, podríamos asemejarlo al principio de la relatividad que decía: “Las leyes de la física adoptan la misma forma desde cualquier sistema de referencia en movimiento uniforme”. Teniendo en cuenta esta relación, se vislumbra una posible unión entre la física y la geometría.

El matemático Hermann **Minkowski** (1864-1909), después de la teoría especial de la relatividad, propuso una fusión entre el espacio y el tiempo formando así una única realidad tetradimensional, el espacio-tiempo. Según sus palabras: “Desde ahora el espacio solo o el tiempo solo están condenados a convertirse en sombras y únicamente cierta unión de los dos mantendrá una realidad independiente”. Desde este punto de vista, el intervalo entre dos sucesos del espacio-tiempo es lo que es invariante (invariante Lorentz) en el espacio de Minkowski. Es decir, si en la geometría euclídea definíamos la distancia entre dos puntos así:

$$ds^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2 \quad (14)$$

en la geometría de Minkowski viene dada por:

$$ds^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2 - c^2 dt^2 \quad (15)$$

De esta manera, hemos introducido el tiempo multiplicándolo por la velocidad de la luz en el vacío,  $c$ , para que tenga las mismas dimensiones de longitud que las tres coordenadas espaciales. Por tanto, al medir la magnitud  $ds^2$  en dos sistemas de coordenadas distintos, obtenemos el mismo resultado  $ds^2 = ds'^2$ , ya que hemos dicho que es una invariante. Mediante esta métrica, las geodésicas que mencionábamos anteriormente en las coordenadas espaciales no eran más que líneas estáticas. En el espacio de Minkowski, en cambio, las geodésicas son trayectorias dinámicas, puesto que también varían en el tiempo. Ya que el tiempo se ha convertido en una coordenada más, pasa a ser una magnitud que define la separación entre dos sucesos [17].

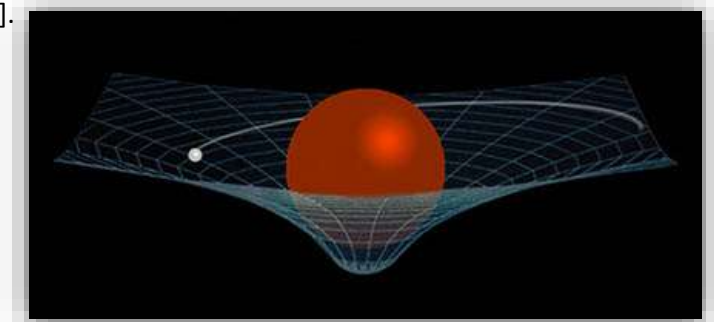


Figura 4: Curvatura espacio-tiempo

A partir de estas ideas, se dedujo que la curvatura del espacio-tiempo se debía a la materia. Fue Einstein quien expresó la relación entre la presencia de masa y la forma del espacio tetradimensional mediante su fórmula de la teoría general de la relatividad.

### 2.3 La ecuación

La famosa ecuación de Einstein de la Relatividad General:

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu} \quad (16)$$

donde los elementos que la forman se definen como:

$R_{\mu\nu}$  es el tensor de curvatura de Ricci<sup>1</sup>: mediante el tensor de Riemann nos brinda información sobre la curvatura del espacio:  $R_{\mu\nu} = R_{\mu\alpha\nu}^{\alpha}$

$g_{\mu\nu}$  es el tensor métrico: describe cual es la distancia espacio-temporal entre dos sucesos infinitesimalmente próximos

$R$  es el escalar de curvatura que obtenemos a partir del tensor de Ricci:  $R = g_{\mu\nu} R^{\mu\nu}$

$T_{\mu\nu}$  es el tensor momento-energía: describe la presencia de materia/energía y detalla su distribución [20].

Las ecuaciones de campo de Einstein forman un sistema de 10 ecuaciones diferenciales parciales acopladas y no lineales en 4 dimensiones para las diez componentes de la métrica  $g_{\alpha\beta}$  ( $\alpha, \beta = 0,1,2,3$ ) [33].

El lado izquierdo de la ecuación, denominado el lado geométrico, representa la curvatura, mientras que el lado derecho representa la materia/energía. Por lo tanto, podríamos considerar que estas ecuaciones representan que en una porción determinada del espacio, su curvatura es proporcional a la cantidad de materia/energía que encierre [17]. El físico John Wheeler lo expresó de la siguiente forma: “El espacio le dice a la materia cómo debe moverse, y la materia le dice al espacio cómo debe curvarse” [48].

Debido a que son ecuaciones compuestas por muchos términos, es muy complejo encontrar una solución exacta. Por esta razón, para poder resolverlas se utilizan casos de alto grado de simetría: simetría esférica o axial, soluciones estacionarias, homogéneas e isotrópicas... Sin embargo, gracias al campo de la relatividad numérica cada vez es posible conseguir soluciones de situaciones astrofísicas más realistas [2].

Poco después de la publicación de estas ecuaciones, Karl Schwarzschild (1873-1916) obtuvo la primera solución. Hoy en día, conocemos la solución como **métrica de Schwarzschild**:

$$ds^2 = -\left(1 - \frac{2GM}{c^2 r}\right) (cdt)^2 + \left(1 - \frac{2GM}{c^2 r}\right)^{-1} dr^2 + r^2 d\theta^2 + r^2 \sin^2 \theta d\phi^2 \quad (17)$$

Esta expresión es la solución más general con simetría esférica. Entre otras cosas, describe en coordenadas esféricas espaciales el campo gravitatorio en el exterior del horizonte de sucesos

<sup>1</sup> El tensor de Ricci es un tensor simétrico obtenido como una traza del tensor de curvatura. Mientras que, el tensor de Riemann o tensor de curvatura supone una generalización del concepto de curvatura de Gauss definido para superficies, a un número de dimensiones arbitrarias [58,59].

de un agujero negro estático sin carga eléctrica ni momento angular, y que se origina tras un proceso de colapso gravitatorio en simetría esférica [21]. Llegados a este punto, con esta solución entre manos, se llegó a la conclusión de que si la curvatura causada por una distribución esférica de materia era tal que si esta se compacta en un radio menor que un radio crítico y proporcional a la masa del objeto, algunos potenciales de la ecuación se hacían infinitos. Dicho radio crítico fue denominado como radio de Schwarzschild:  $r_S = \frac{2mG}{c^2}$  [6].

Al poco de introducir las ecuaciones de campo, Einstein propuso un universo homogéneo, isótropo y estático, con la métrica espacial de una esfera. Sin embargo, se dio cuenta de que ese universo que planteó no podía ser solución de sus ecuaciones. Por lo tanto, para poder ajustar su idea a su formulación, en 1917 introdujo el término de la **constante cosmológica**  $\Lambda$  modificando el lado geométrico. De esta forma, las ecuaciones de campo quedaron así:

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R + g_{\mu\nu} \Lambda = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu} \quad (18)$$

La constante cosmológica da lugar a un universo estático, puesto que actúa como fuerza repulsiva que contrarresta la fuerza atractiva de la materia contenida en nuestro universo. No obstante, a pesar de defender la estaticidad del universo, Einstein tuvo que cambiar de opinión al saber del descubrimiento de Hubble sobre la expansión del universo en 1929 (descubrimiento que explicaremos más tarde en “Los hitos de la Relatividad General”). Como consecuencia, abandonó su universo estático y dejó a un lado el término cosmológico. Sin embargo, recientemente la observación de la aceleración de la expansión del Universo ha llevado a reintroducir la constante cosmológica diferente de cero como una de las posibles explicaciones del fenómeno [7].

En muchas de las situaciones físicas que se plantean, no es necesario recurrir a la relatividad general de Einstein para poder describirlas, ya que la aproximación newtoniana puede ser suficiente. La física de Newton es válida si el campo gravitatorio es suficientemente débil para que la velocidad de escape sea muy pequeña comparada con la velocidad de la luz, es decir, tiene que cumplirse lo siguiente:

$$\frac{2GM}{Rc^2} \ll 1 \quad (19)$$

donde M es la masa del objeto que crea el campo gravitatorio y R la distancia a su centro de masas.

Por otra parte, hay situaciones en las que encontramos singularidades en las soluciones de las ecuaciones de Einstein. En dichos casos, en las proximidades de las singularidades, la relatividad general no es suficiente. Esto parece deberse a que la relatividad general no es válida en situaciones donde se les da importancia a los efectos cuánticos, a distancias muy pequeñas o energías muy altas. En estos casos, necesita ser reemplazada por una teoría más avanzada que aún no conocemos. Con los conocimientos de la física de hoy en día, hay muchas teorías que en un futuro podrían llegar a cumplir los requisitos, como ejemplo la **Teoría de Cuerdas** podría ser una de ellas [20].



## 3. Predicciones clásicas de la Relatividad General

Mediante la relatividad general, Einstein introdujo una nueva definición de la gravedad que se basaba en su equivalencia con la aceleración y en la curvatura del espacio alrededor de los cuerpos. Desde su descubrimiento, hubo varios experimentos intentando comprobar la teoría. A continuación, podremos ver algunas de las predicciones clásicas que fueron confirmadas experimentalmente.

### 3.1 Precesión del perihelio de Mercurio

**Kepler** sugirió la posibilidad de las elipses para describir el movimiento de los planetas alrededor del Sol. Más tarde, **Newton** con su ley de la gravitación universal formuló teóricamente el movimiento elíptico de las órbitas de los planetas tan solo teniendo en cuenta la atracción gravitatoria del Sol. Sin embargo, la teoría de Newton predecía para Mercurio una órbita que no coincidía con las observaciones debido a que, por muy despreciable que parezca, también hay que tener en cuenta las desviaciones de las órbitas a causa de la atracción de los planetas [27].

Así fue como el astrónomo **Le Verrier** descubrió en 1859 una pequeña anomalía en la órbita del planeta más cercano al Sol, Mercurio. El valor observado de la precesión de su perihelio, el punto de la órbita más cercano al Sol, era de 574 segundos de arco por siglo, mientras que Le Verrier al hacer el cálculo obtuvo un valor 38" menor, valor que más tarde se corrigió en 43". La cantidad calculada surgía de sumar las influencias de los demás planetas del sistema solar, sin embargo, no cuadraba con la medición directa. En un intento de dar explicación a esta anomalía, se descartó la posibilidad de la influencia de otros planetas, e incluso se llegó a proponer la existencia del

planeta Vulcano, entre el Sol y Mercurio pero nunca nadie fue capaz de observarlo. Por ello, esta anomalía fue durante años una incógnita para los científicos. Hasta que en 1915, ultimando su teoría general de la relatividad Einstein demostró que bajo los efectos relativistas del Sol, el perihelio de las órbitas de los planetas alrededor se corre lentamente y predijo el resultado para Mercurio de 43 segundos de arco por siglo, el mismo resultado que se había medido años atrás. Así fue como Einstein resolvió una incógnita con la que los científicos no pudieron durante años [46].

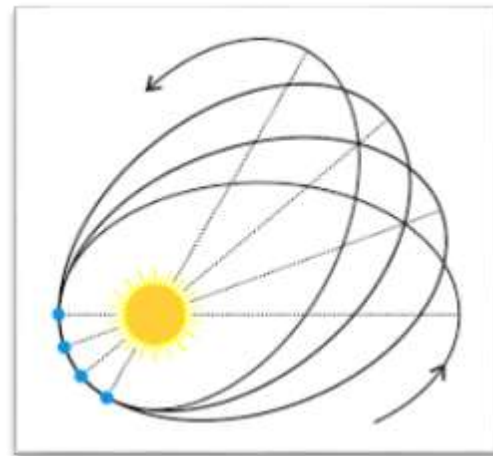


Figura 5: Precesión del perihelio de Mercurio

### 3.2 Desplazamiento al rojo

De acuerdo con el principio de equivalencia que Einstein planteó, los desplazamientos de frecuencia que surgen a causa de la aceleración de una fuente radiante también podrían ocurrir por un campo gravitatorio. Así es cómo podemos relacionar el desplazamiento de frecuencia de la radiación en un campo gravitacional con el desplazamiento Doppler causado por una fuente de luz acelerada. Una de las deducciones que Einstein hizo en 1907 fue que un fotón perderá parte de su energía para escaparse de la atracción gravitacional de un cuerpo masivo. Debido a que la energía de un fotón es proporcional a su frecuencia, esa pérdida de energía equivale a pérdida de frecuencia y se le denomina desplazamiento hacia el rojo gravitacional.

Siguiendo con la misma idea, Einstein dedujo que los fotones emitidos por el Sol producen líneas espectrales corridas ligeramente hacia el lado rojo del espectro. No obstante, este efecto es demasiado pequeño como para poder observarse en el Sol, ya que debido al movimiento de gas en su superficie no se puede medir con precisión. Sin embargo, se hizo el mismo estudio con la enana blanca Sirio B, compañera pequeña de la estrella Sirio A. Esta enana blanca, con masa parecida a la del Sol pero con radio mucho más pequeño, tiene una atracción gravitacional mucho mayor. Por esa razón, en 1924 se pudo detectar el desplazamiento al rojo en su espectro [1].

La mayor prueba de este efecto fue realizada por **Pound, Rebka y Snider**. En 1959 emitieron fotones de una determinada longitud de onda de arriba abajo desde lo alto de una torre de la universidad de Harvard a 22,5 metros de altura. Como resultado de las mediciones obtuvieron que al llegar los fotones, su longitud de onda disminuía, es decir, había un desplazamiento al azul. Por el contrario, cuando los fotones de abajo eran medidos una vez arriba, sus longitudes de onda se incrementaban, es decir, tenían un desplazamiento al rojo de la misma cantidad. Esto se debe a que la parte de arriba y la de abajo están en un campo gravitatorio distinto, y según el principio de equivalencia es como si fuera un sistema acelerado. Al estar en un sistema acelerado, es como si los fotones de arriba estuvieran en movimiento con respecto a los de abajo (y viceversa). En ese caso, notamos el efecto Doppler, pero en vez de con ondas sonoras lo apreciamos con ondas electromagnéticas. Y al haber un cambio de frecuencia en las ondas electromagnéticas, se manifiesta en un cambio de color [53].

### 3.3 La desviación de la luz

Desde el momento en el que Einstein reconoció la equivalencia entre la gravedad y los marcos acelerados, se dio cuenta que la gravedad afectaría la trayectoria de la luz y que, por lo tanto, un rayo luminoso se desviaría por la influencia de la gravitación. Así fue como en 1911 Einstein postuló que la luz se comporta como cualquier partícula material y predijo que al pasar junto a la superficie del Sol, un rayo de luz desviaría su trayectoria en un ángulo de 0,875 segundos de arco e hizo un llamamiento a los astrónomos para poder medir ese efecto.

Al mandar un rayo de luz a través de un área donde el espacio fuera curvo, de acuerdo con su teoría, el rayo de luz se curvaría. Einstein pensó que el Sol sería el objeto perfecto para el

experimento, ya que tiene suficiente gravedad como para curvar el espacio, por lo que la luz de una estrella distante se curvaría al pasar alrededor del Sol y su campo gravitacional. Así fue como Einstein propuso observar las estrellas cercanas al Sol durante un eclipse total de Sol, puesto que sería la única forma de poder observar las estrellas cercanas a este astro. De esta manera, con la comparación de la posición de las estrellas cuando el Sol no se hallara cerca, se podría determinar el ángulo de desviación del rayo de luz [37].

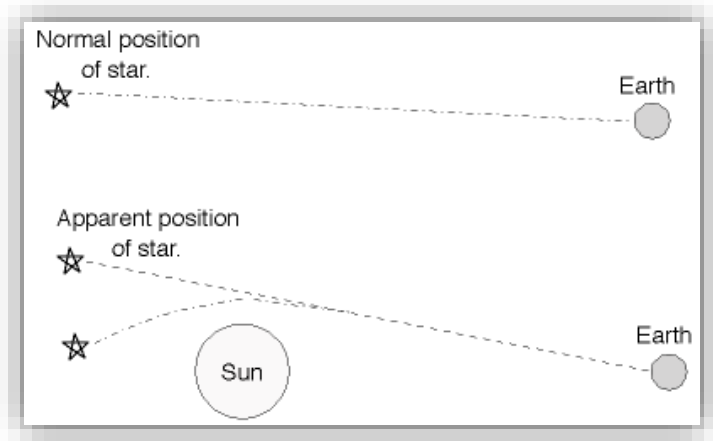


Figura 6: Representación de la desviación de la luz causada por la curvatura del Sol

En 1912 se dio el primer intento en un eclipse en Brasil que fracasó por el mal tiempo. El siguiente fue en 1914 en Crimea, una expedición alemana intentó observar el eclipse cuando se vieron sorprendidos por la declaración de la guerra entre Alemania y Rusia, por lo que hubo muchas complicaciones dado a la Primera Guerra Mundial que se vivía en ese momento. Pero en 1915, Einstein rehízo el cálculo y corrigió el resultado para obtener 1,7 segundos de arco. El primer cálculo era equivalente a la desviación que se obtendría usando la teoría newtoniana para una partícula que se moviera a la velocidad de la luz. Esa duplicación viene porque el valor newtoniano debe ser aumentado por la desviación de las líneas rectas locales relativas a las líneas rectas muy lejos del Sol, como resultado de la curvatura espacial. Por lo que con la simple medición de ese ángulo, se podría ver cuál de las dos teorías estaba en lo cierto, la de Newton o la teoría general de la relatividad de Einstein. Lo veremos con más detalle en “Los hitos de la Relatividad General” [27].

### 3.4 Efecto Shapiro

Después de estos tres primeros efectos elementales de la relatividad general, Irwin **Shapiro** predijo 50 años más tarde, en 1964, un cuarto efecto importante denominado el efecto Shapiro. Este efecto conocido también como la “dilatación gravitacional de desfases temporales”, consiste en un retraso de los tiempos de llegada de los fotones que pasan cerca del Sol, ya que debido a la atracción gravitatoria del Sol se disminuye la velocidad de las partículas que pasan cerca de él y produce un retraso de tiempo en su llegada. Por lo tanto, el efecto Shapiro hizo ver que no solo la trayectoria de la luz se desvía por el campo gravitatorio del Sol, sino que los fotones también son frenados. El experimento que Shapiro realizó para probar esto consistió en emitir fotones y medir el tiempo que tardaban en ir hasta Mercurio y volver. De esta manera, observó que la luz se ralentizaba más cuando su recorrido era próximo a la superficie solar [51].

Otra manera con la que se probó este efecto fue mediante las señales que recogemos de las sondas mandadas al espacio. En las ocasiones en las que la Tierra se encuentra en el lado opuesto del Sol al que está la sonda, se puede apreciar cómo dicha señal se ralentiza en su llegada. Como ocurrió por primera vez con la sonda Viking en Marte [4].

## 4. Los hitos de la Relatividad General

### 4.1 Medición de la desviación de la luz (1919)

En 1919, una vez finalizada la Primera Guerra Mundial, una expedición británica liderada por Frank Watson **Dyson** se dividió en dos para poder observar el eclipse que daría lugar el 29 de mayo de ese mismo año. Una de ellas se instaló en Brasil con Andrew **Crommelin** y la otra en la isla Príncipe frente a la Guinea Ecuatorial dirigida por Arthur **Eddington**. El objetivo de estas expediciones era simple. Durante el eclipse solar, la Luna esconde el Sol por completo dejando ver las estrellas de alrededor. Usando un telescopio y placas fotográficas, los astrónomos cogían fotos del Sol tapado y sus respectivas estrellas cercanas. Esas imágenes, se compararían con otras anteriores de cuando el Sol no está presente. Las imágenes a comparar, están sacadas de noche, unos cuantos meses antes cuando el Sol no está cerca de aquella parte del cielo y las estrellas están en su posición real, sin desviar. En las fotografías del eclipse, en cambio, las estrellas cuya luz está desviada aparecerían desplazadas del Sol relativo a su posición actual. Como la desviación varía inversamente a la distancia angular de la estrella al Sol, las estrellas más lejanas en ángulo desde el Sol son las que determinan los puntos de referencia para comparar el grupo de imágenes.

Para poder realizar las fotografías es conveniente que el cielo esté claro, pero a Eddington le acompañó una tormenta el día del eclipse. En el último momento, el tiempo mejoró y pudieron realizar 16 imágenes de en total 5 estrellas, aunque solo 2 de esas imágenes fueron útiles. Aquellas imágenes comparadas con una placa fotográfica de la Universidad de Oxford verificaron la teoría de la relatividad general con una desviación de  $1.6 \pm 0.31$  segundos de arco.

En noviembre de 1919, anunciaron los resultados de la expedición. Este resultado tuvo un margen de error de un 30%, mientras que con observaciones que se han llevado a cabo después, se ha llegado a una precisión de hasta el 10%. El 10 de noviembre de 1919 "The New York Times" lo anunció con el titular «Los hombres de ciencia, más o menos encandilados con los resultados de las observaciones del eclipse. La teoría de Einstein triunfa.» Esto hizo que Einstein pasara de ser un científico desconocido a que después del anuncio fuera conocido mundialmente. Con esta predicción, Einstein señalaba un nuevo mundo en el que el tiempo y el espacio absolutos se perdían para siempre [60].



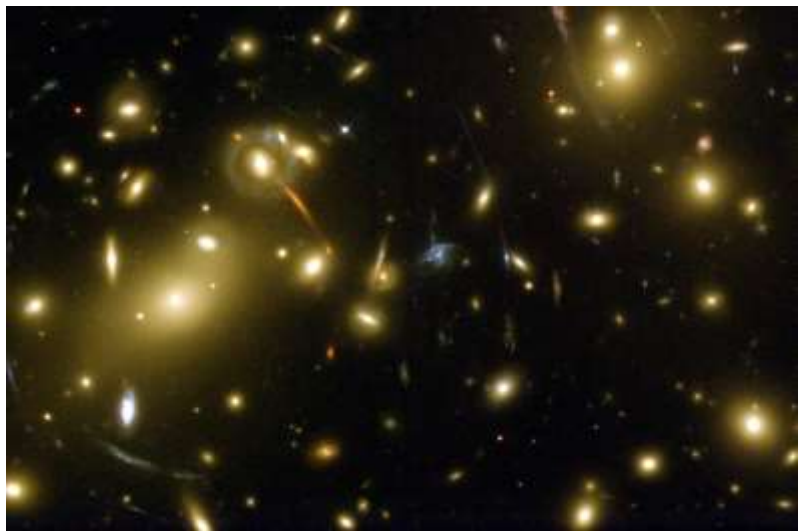
Figura 7: El eclipse solar de 1919 observado por Eddington

Hoy en día, no solo se ha usado la desviación de la luz para poder demostrar la teoría sino que examinando la desviación de ondas de radio emitidas por galaxias o cuásares se ha llegado a la misma conclusión incluso con una precisión de 1% (estas ondas se pueden detectar incluso de día, no hace falta esperar a un eclipse).

#### Lentes gravitacionales

En 1979 los astrónomos **Walsh, Carswell y Weymann** descubrieron el doble cuásar Q0957 + 561, que consistía en dos imágenes de cuásar con una diferencia de 6 segundos de arco con el mismo corrimiento al rojo y un espectro similar. Teniendo en cuenta que los cuásares son supuestamente los objetos más luminosos y distantes del universo, la probabilidad de encontrar dos cercanos el uno al otro era muy baja. Por lo que inmediatamente se percataron de que solo había un único cuásar, pero que una galaxia interpuesta o un grupo de ellas era responsable del desvío de la luz del cuásar produciendo dos imágenes separadas, de esa forma se introdujo el concepto de **lente gravitacional**. Desde entonces, unas 60 imágenes así han sido descubiertas.

Irónicamente, Einstein fue el primero en considerar lentes gravitacionales aunque en un principio no quisiera publicarlo. En 1997 fue cuando se desenterró este dato, estudiando notas antiguas de Einstein de 1912. En aquellos estudios mencionaba la posibilidad de imágenes dobles y la magnificación de su intensidad, aunque sus cálculos fueran erróneos en un factor de 2 ya que usó el valor de la desviación de la luz de antes de la relatividad general, el primer valor calculado. En su libro de la relatividad de 1920, Eddington discutía la posibilidad de lentes gravitacionales y en 1924, **Chwolson** afirmó que la alineación perfecta entre fuente, lentes y observador, conduciría a lo que hoy en día llamamos la imagen de “el anillo de Einstein”. Finalmente, en 1936, convencido por un joven aficionado Einstein publicó una pequeña nota sobre lentes gravitacionales (usando el factor numérico correcto), aun creyendo que nunca podrían llegar a detectarse. Unos meses más tarde, el astrónomo Fritz **Zwicky** sugirió en una publicación en la revista “Physical Review” [62] algunas aplicaciones prácticas de dichas lentes: la posibilidad de poner a prueba la relatividad general, el uso de las lentes gravitacionales a modo de telescopio para poder observar objetos lejanos que con telescopios comunes no podríamos detectar y, por último, propuso calcular la cantidad de materia presente en las galaxias que funcionan como lente, anticipando así la materia oscura [14].



*Figura 8: Cúmulo de galaxias lejanas, Abell 2218, que muestran el efecto de lente gravitacional*

Las lentes han de tenerse en cuenta para interpretar ciertos aspectos de la radiación cósmica de microondas, y para extraer información de ondas gravitacionales emitidas por fuentes a distancias cosmológicas. Cuando la fuente tiene un tamaño angular distinto de cero, las lentes no solo desplazan la imagen de la fuente sino que también distorsionan su forma. Una fuente circular puede ser distorsionada en una elipse, o incluso en un arco. La orientación y formas de dichos arcos luminosos se han usado para deducir la distribución de masa de las galaxias y los grupos de ellas que actúan como lentes, técnica apodada como tomografía gravitacional.

Desde el descubrimiento de la primera lente gravitacional, el fenómeno ha sido explotado para examinar la distribución de masa alrededor de galaxias y grupos de galaxias, y para buscar materia oscura, energía oscura, objetos compactos y planetas extrasolares. Pero las lentes gravitacionales sobre todo produjeron una notable prueba de la desviación de la luz a escalas galácticas [60].

#### 4.2 [La observación de Hubble de la expansión del universo \(1929\)](#)

La idea de que vivimos en un universo en expansión es uno de los descubrimientos más inesperados e importantes de la física del siglo XX. Durante miles de años se ha supuesto que el universo era estático e inmutable en el que los eventos astronómicos tenían lugar. Pero debido a observaciones hechas a partir de los años 1910, este punto de vista empezó a cambiarse.

En 1912 el astrónomo Vesto Melvin **Slipher**, observó por primera vez el desplazamiento de las líneas espectrales en una galaxia pudiendo así deducir su velocidad radial. Dos años más tarde presentó los resultados de sus mediciones hechas a 12 galaxias, con las que concluyó que solo una, la galaxia Andrómeda, se aproxima a nosotros mientras que las otras 11 se alejan [32]. En 1923, el astrónomo Edwin **Hubble** pudo distinguir las estrellas que se encuentran en la galaxia Andrómeda y utilizando la relación de luminosidad-distancia, estimó la distancia a la que se encuentran. Asimismo, Hubble introdujo un sistema de clasificación de galaxias según su estructura y en 1929 comparó las distancias que había calculado para ciertas galaxias con los

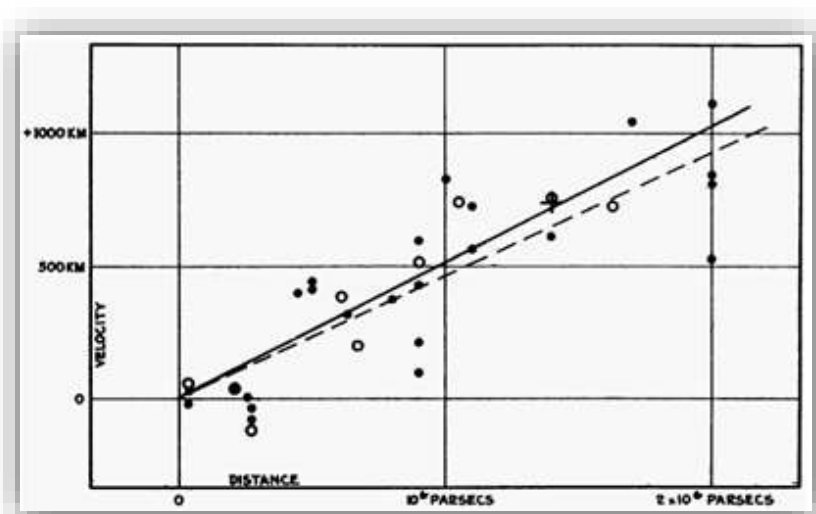


Figura 9: Relación entre velocidad y distancia de nebulosas extragalácticas

desplazamientos hacia el rojo fijados por Slipher de las mismas galaxias. Como resultado, obtuvo la que se conoce como la ley de Hubble. Esta ley determina que la velocidad de una galaxia es proporcional a su distancia, en otras palabras, que cuanto más distante esté, más rápidamente se alejará de nosotros. De esta forma, obtuvo la relación lineal que plasmó en el diagrama de la *Figura 9* [18].

El diagrama original de Hubble muestra que el desplazamiento al rojo de una galaxia aumenta linealmente con su distancia de la Tierra y se introdujo el parámetro de Hubble (H) como coeficiente de proporcionalidad entre ambas magnitudes. En realidad, el propio Hubble solamente mencionó el desplazamiento hacia el rojo, no habló de la expansión. Más tarde, la relación predicha por Hubble se interpretó como una prueba de que el universo entero se está expandiendo exactamente como las ecuaciones de Einstein habían predicho que debería hacer [56]. De esta manera, desafió la creencia de que el universo era estático, idea a la que Einstein se aferró a pesar de que sus ecuaciones de la Relatividad General indicaran todo lo contrario. Después del descubrimiento de Hubble, Einstein abandonó su universo estático y de paso la constante cosmológica (aunque la observaciones harán que vuelva a aparecer 70 años más tarde) y dijo que no haberse dado cuenta de la expansión del universo había sido su “error más grande” [32].

#### La Gran explosión (Big Bang)

Si el universo se está expandiendo, haciendo que su volumen aumente y por lo tanto la densidad de energía disminuya en el tiempo, entonces en algún momento en el pasado debe haber comenzado a partir de un solo punto en el que el volumen tiende a cero y la densidad de energía diverge. Como conclusión, en 1931 Georges **Lemaître** introdujo lo que él llamó “el átomo primordial”, el átomo donde se concentraba toda la masa del universo en el instante inicial. Fue en 1948 cuando los físicos George **Gamow**, Ralph A. **Alpher** y Robert **Herman** desarrollaron la idea de que el universo debía haber empezado en un estado muy denso, caliente, y en un volumen muy pequeño a partir del cual se empezó a expandir. Como consecuencia de esa idea, introdujeron su modelo cosmológico alternativo [7]. No fue hasta un año más tarde cuando Fred Hoyle, uno de los detractores de esta teoría, la bautizó como “Teoría del Big Bang” de forma despectiva [49].



### 4.3 La métrica de Kerr (1963)

Años más tarde de la métrica de Schwarzschild, con el intento de encontrar una generalización rotante, en 1963 Roy Kerr obtuvo la solución de las ecuaciones de Einstein que describe el espacio-tiempo exterior a un agujero negro en rotación y sin carga eléctrica. Ya en 1918 **Lense y Thirring** encontraron el campo exterior de una esfera en rotación a primer orden en el momento angular, fue 50 años después cuando **Kerr** encontró la solución exacta físicamente relevante introduciendo así la métrica de Kerr.

En el artículo original, presentó la métrica de la siguiente forma:

$$ds^2 = - \left( 1 - \frac{2mr}{r^2 + a^2 \cos^2 \theta} \right) (dv - a \sin^2 \theta d\tilde{\phi})^2 + 2(dv - a \sin^2 \theta d\tilde{\phi})(dr - a \sin^2 \theta d\tilde{\phi}) + (r^2 + a^2 \cos^2 \theta)(d\theta^2 + \sin^2 \theta d\tilde{\phi}^2) \quad (20)$$

considerando que  $m = \frac{GM}{c^2}$ , siendo M la masa. Esta solución está escrita en coordenadas análogas a las de Eddington-Finkelstein, mientras que en 1967 Boyer y Lindquist introdujeron un cambio de coordenadas en la métrica:

$$\begin{aligned} dv &= dt + (r^2 + a^2) dr / \Delta \\ d\tilde{\phi} &= d\phi + a dr / \Delta \end{aligned} \quad (21)$$

donde  $\Delta = r^2 - 2mr + a^2$ . De esta manera, la solución queda así:

$$ds^2 = - \left( 1 - \frac{2mr}{\Sigma} \right) dt^2 - \frac{4mar \sin^2 \theta}{\Sigma} dt d\phi + \frac{\Sigma}{\Delta} dr^2 + \Sigma d\theta^2 + \left( r^2 + a^2 + \frac{2ma^2 r \sin^2 \theta}{\Sigma} \right) \sin^2 \theta d\phi^2 \quad (22)$$

donde  $\Sigma = r^2 + a^2 \cos^2 \theta$ . Esta métrica es una solución fundamental biparamétrica de la Relatividad General. Se ha podido demostrar que la de Kerr es la más general que describe agujeros negros estacionarios y de vacío (con el tensor energía-momento nulo) [43]. Por lo tanto, todas las propiedades físicas de un agujero negro en equilibrio y de vacío dependen solamente de su masa (M) y momento angular específico (a,  $a=J/Mc$ ), que justamente son los parámetros propios del espacio-tiempo Kerr. Un agujero negro de Kerr está completamente caracterizado por tan sólo esos dos números y en el caso de que la rotación sea nula ( $a=0$ ) el agujero negro será perfectamente esférico y volvemos a la solución de la métrica de Schwarzschild. Si la rotación no es cero, el agujero negro se deforma hacia fuera cerca de su ecuador y cuanto más rápido gira más se deforma [28]. Por otro lado, en el límite en que la masa tiende a cero, se recupera el espacio-tiempo de Minkowski en coordenadas elipsoidales [39]. De este modo, se llegó a la conclusión de que cualquier cuerpo en rotación que finalmente colapsara y formara un agujero negro, llegaría a un estado estacionario descrito por la métrica de Kerr, siendo esta una solución estacionaria, es decir, que  $g_{\mu\nu}$  no depende de t [33].



#### 4.4 El descubrimiento del fondo de radiación cósmico de microondas (1965)

Una de las predicciones que estableció el Big Bang como modelo cosmológico actual es la existencia del fondo de radiación cósmico de microondas (del inglés “Cosmic Microwave Background Radiation” o CMB), detectada en 1965 por los astrónomos Arno **Penzias** y Robert **Wilson**. Mientras usaban el radiotelescopio de Holmdel, detectaron una radiación de microondas uniforme a temperatura de aproximadamente 3K en el fondo del cielo. Tal radiación había sido predicha anteriormente junto con el Big Bang en 1948 por Gamow, Alpher y Herman, y la reconocieron como un eco que proviene del inicio del universo. Estas observaciones vinieron por tanto a confirmar la interpretación de la ley de Hubble en términos de una expansión generalizada del universo que tenía su origen en una gran explosión.

El físico Robert **Dicke** planteó la idea de observar objetos del universo con grandes desplazamientos hacia el rojo, es decir, situados a grandes distancias, para así poder observar el universo tal y como era instantes después del Big Bang. Ya que, cuando observamos una galaxia lejana, solo podemos observar cómo era cuando el rayo de luz que nosotros ahora vemos fue emitido. Siguiendo con su idea, Dicke construyó un radiómetro espacial. Aun así, no fue capaz de detectar ninguna radiación, pero si la hubiese, concluyó que debía ser de temperatura menor de 20 Kelvin [23].

Poco después, en los Laboratorios de Bell Telephone en Holmdel (Nueva Jersey), Penzias y Wilson construyeron una antena de 6 metros de longitud para observar posibles microondas provenientes del halo de la Vía Láctea. Fue así cuando en 1965 detectaron aquella radiación. Aquello proporcionó la confirmación de las predicciones generales respecto al CMB, puesto que resultó ser isótropa, constante y con un espectro del cuerpo negro de cerca de 3K, además esto supuso un apoyo a la teoría del Big Bang por ser la radiación que poco después de la explosión llenaba el universo. Dicho descubrimiento les llevó a ganar el **premio Nobel de Física en 1978**.

A partir de 1965, numerosos fueron los estudios que intentaron detectar el fondo cósmico de microondas para estudiar su isotropía y medir su temperatura con mayor precisión (2,725 Kelvin). En 1989 la NASA envió al espacio el satélite COBE (“COsmic Background Explorer”), el primer satélite construido especialmente para estudios de cosmología cuyo objetivo era investigar la CMB. En 1992, los investigadores estadounidenses John C. **Mather** y George F. **Smoot** anunciaron la detección de pequeñas irregularidades en dicha radiación debido a la observación del espectro de fluctuaciones en temperatura. Los dos investigadores de la misión COBE recibieron el **premio Nobel de Física en 2006** por su contribución a la cosmología.

Al COBE le sucedió un telescopio con mayor precisión, el WMAP (“Wilkinson Microwave Anisotropy Probe”), que fue lanzado por la NASA en 2001. A principios de 2003 se dieron a conocer los resultados de WMAP que no solo observó con más precisión las irregularidades del fondo cósmico, sino que también llegó a estimar la edad del universo en 13.7 miles de millones de años con una precisión del orden de %1 [5].

En el 2009, un nuevo telescopio espacial fue lanzado por la Agencia Espacial Europea (ESA), el telescopio denominado PLANCK. Este telescopio, después de 4 años y medio observando el firmamento, nos ha proporcionado la imagen más precisa de la historia de la señal de CMB. Ha mejorado con creces los datos obtenidos por COBE y WMAP, con mayor resolución angular, mejor sensibilidad y cobertura en frecuencias mucho más amplias. Como resultado, PLANCK ha realizado el catálogo más exhaustivo hasta la fecha de los principales cúmulos galácticos, además de haber identificado los grupos de materia más densos y fríos de la galaxia a partir de los cuales se podrían formar nuevas estrellas en el futuro [16,19].

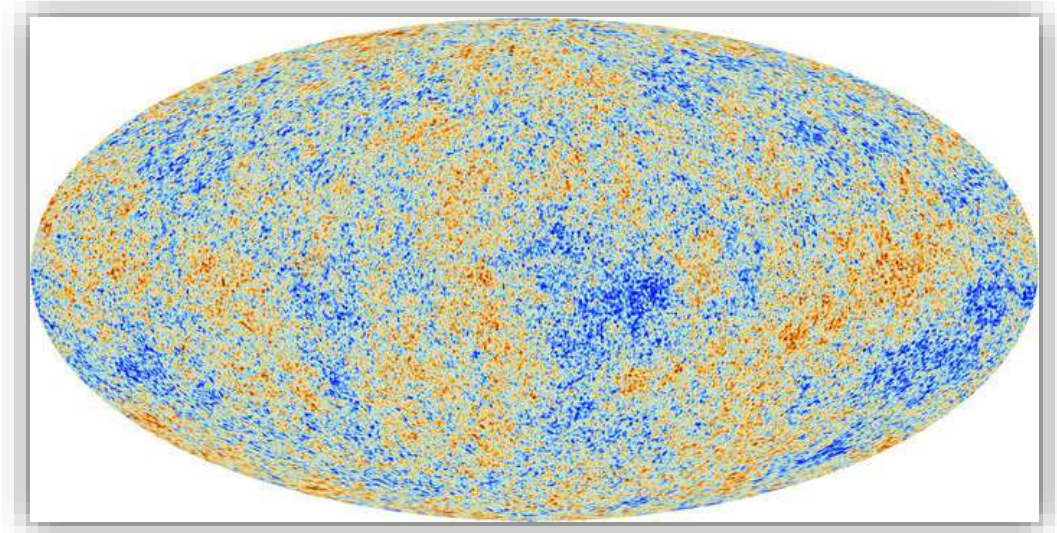


Figura 10: Variaciones de temperatura detalladas del CMB observado por PLANCK

El objetivo que era observar el espectro completo del CMB, se puede predecir a partir de las ecuaciones de campo de Einstein dado un cierto contenido de materia y energía, y un espectro inicial de temperatura. Como resultado del espectro, se obtiene que nuestro universo tiene una geometría espacial plana. Además, obtenemos que solamente un 30% del total es materia y el otro 70% se comporta como un fluido con presión negativa y es responsable de la expansión acelerada que hoy en día ocurre en el universo. Dicha expansión acelerada, fue la causa de que **Riess, Schmidt y Perlmutter** recibieran el **premio Nobel de Física en el 2011** [7].

#### [4.5 Teorema de singularidad de Penrose \(1965\) y la radiación de Hawking \(1974\)](#)

Por mucho tiempo se creyó que las singularidades solo tenían lugar en situaciones con alta simetría, sin embargo, una de las conclusiones fundamentales de la Relatividad General es que son extremadamente comunes. Las condiciones para la existencia de una singularidad son muy variadas, por lo que da lugar a diversos teoremas como el de Penrose y el de Hawking-Penrose. Aunque antes del teorema de Penrose ya hubiera resultados probando singularidades, este teorema tuvo consecuencias muy importantes, ya que se considera el primer gran resultado, matemáticamente riguroso, de la teoría general de Einstein [33].

El físico y matemático Roger **Penrose** quería demostrar que las desviaciones de la simetría esférica no podrían impedir la formación de singularidades, de ese modo, en 1965 introdujo un

teorema de singularidad de las ecuaciones de campo de Einstein [40]. Consideramos singularidad a la zona accesible en el espacio-tiempo en la que alguna propiedad geométrica deja de estar bien comportada [33]. En este caso, nos referimos a una singularidad espaciotemporal que se produce cuando una estrella al colapsar bajo su propia gravedad queda atrapada en una región cuya superficie se reduce en el tiempo a tamaño cero. Al ser nulo su tamaño, lo mismo ocurrirá con su volumen, de tal modo que la densidad de materia y la curvatura del espacio-tiempo se hagan infinitas. Es decir, se crea una singularidad contenida dentro de una región del espacio-tiempo al que denominamos **agujero negro** donde el tiempo deja de existir y dejan de funcionar las leyes de la Física. En su teorema, Penrose relacionó esa singularidad con las denominadas “**superficies atrapadas**”, áreas que se encogen inevitablemente con el paso del tiempo. En otras palabras, cuando se produce un colapso gravitatorio, es decir, cuando hay mucha cantidad de materia/energía en un volumen reducido el efecto de la gravedad es tan potente que ni la luz puede escapar de esa región. La superficie atrapada será la región límite de la cual ya no se puede escapar de la atracción gravitatoria de dicho objeto colapsado. Entonces, el horizonte atrapado será aquella superficie que separa la zona de superficies atrapadas con la zona sin superficies atrapadas, siendo este concepto local e instantáneo. Otra definición útil e importante es la de horizonte de sucesos al que se le denomina al punto de no retorno para la materia y la luz que caen dentro de un agujero negro, siendo este un concepto global [6].

Poco después, Roger Penrose junto con Stephen **Hawking**, quisieron adaptar las conclusiones anteriores al Universo entero y su origen. Fueron desarrollando el teorema de Penrose hasta que probaron otro donde se señala que un universo en expansión debe comenzar a existir a partir de un estado inicial de singularidad instantánea donde la densidad es infinita (el Big Bang). De esta manera, el teorema de Penrose demostraba que las singularidades se forman en el centro de los agujeros negros, mientras que en el siguiente teorema junto a Hawking demostraba que también debió existir una singularidad en los comienzos del Universo.

En 1972, Jacob **Bekenstein** fue el primero en sugerir que los agujeros negros tienen una entropía bien definida, siendo ésta proporcional a su horizonte de sucesos. Más aún, Bekenstein también formuló la segunda ley de la termodinámica generalizada a los agujeros negros. Después del desarrollo de los teoremas, Hawking incorporó aspectos cuánticos a la formación de un agujero negro: comprendió que el área del horizonte de sucesos siempre se incrementa con el tiempo y que un agujero negro, si tiene entropía, debe tener también una temperatura, luego emite radiación [55]. Como consecuencia, Hawking descubrió que las partículas se filtrarían a través del horizonte de sucesos y escaparían del agujero negro, sugiriendo así que los agujeros negros no son negros porque debido al efecto de la Mecánica Cuántica, radian como cuerpos calientes. De esta forma, acabó por confirmar la contribución de Bekenstein. Este conocido trabajo de Hawking sobre los agujeros negros fue publicado en 1974, donde introdujo una nueva unificación de la Relatividad General y la Mecánica Cuántica [31].

#### 4.6 El descubrimiento del púlsar binario (1974)

En 1967 Jocelyn **Bell** y Anthony **Jewish** estudiaban el medio interplanetario empleando un radio telescopio formado por una serie de antenas dispersas en un terreno abierto y encontraron una señal que se repetía con sorprendente regularidad, emitiendo un pulso cada 1.337 segundos. Al poco tiempo empezaron a descubrirse decenas de objetos de este tipo, con distintos periodos de pulsación, y que se denominaron púlsares. Hoy en día los púlsares se definen como estrellas de neutrones que rotan a altas velocidades y que poseen un intenso campo magnético que induce la emisión de pulsos de radiación electromagnética [61]. A partir de ese año se han descubierto muchos púlsares con distintas características, como por ejemplo el púlsar PSR 1913+16 [10].

PSR 1913+16 fue el primer púlsar binario, que fue descubierto con el radiotelescopio de 305m Arecibo. Este descubrimiento fue resultado de una búsqueda de púlsares realizada por Russell A. **Hulse** para su tesis con la ayuda de su guía Joseph H. **Taylor** de la Universidad de Princeton.

Desarrollando un programa rutinario de observaciones, en Julio de 1974 Hulse detectó el púlsar PSR 1913+16, que a pesar de emitir una señal muy débil, pudo calcular su periodo que era de sólo 59ms. Lejos de pensar que sería un púlsar binario, vio que era el segundo púlsar más rápido conocido hasta entonces, después del famoso púlsar del Cangrejo con un periodo de 33ms. Su naturalidad binaria fue descubierta dos meses después, gracias al cuidadoso estudio del periodo. Al medir las pulsaciones de radio, Hulse y Taylor notaron que había una variación sistemática en el tiempo de llegada de las pulsaciones. A veces, las pulsaciones llegaban un poco antes de lo esperado; a veces, después. Estas variaciones cambiaban de manera suave y repetitiva, con un período de 7.75 horas. Se concluyó que el púlsar orbitaba otra estrella muy de cerca a una velocidad alta, y que el período de pulso iba variando debido al efecto Doppler: cuando el púlsar se mueve hacia nosotros, los pulsos son más frecuentes, y a la inversa, cuando se aleja de nosotros menos se detecta en un período de tiempo determinado.

##### -Predicción de la relatividad general

Una de las mayores consecuencias del descubrimiento de púlsares binarios es que proporcionan una muestra evidente de la realidad de la radiación gravitacional en sistemas binarios. Aquella evidencia consistía en la observación del decaimiento secular del periodo orbital que después de años de observaciones se ha confirmado. El periodo orbital del púlsar binario de casi 8 horas decrece a razón de un segundo cada trece mil años. Este efecto se debe a la emisión de ondas gravitacionales, consecuencia de la teoría de Einstein que más tarde explicaremos con más detalle. En este caso, la RG proporciona la explicación teórica de la dinámica orbital del púlsar, pues el ritmo al cual las ondas gravitatorias extraen energía y momento angular del sistema proporciona el ritmo de disminución del periodo orbital, obteniéndose un acuerdo entre teoría y observaciones con una precisión de  $10^{-3}$  [2].

El valor observado de  $\dot{P}_b^{obs}$  se comparó con el valor predicho por Einstein en la teoría general de la relatividad  $\dot{P}_b^{GR}$ , siendo  $P_b$  el periodo orbital:

$$\frac{\dot{P}_b^{(obs)}}{\dot{P}_b^{(GR)}} = 1.3 \pm 0.3$$

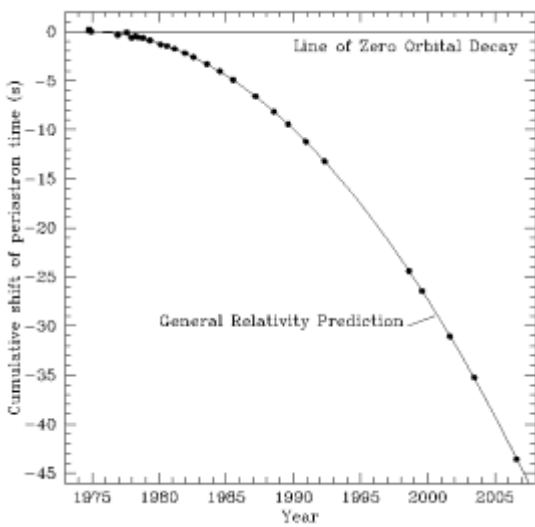


Figura 11: Decaimiento de la órbita del pulsar PSR 1913+16

La observación de  $\dot{P}_b$  en el tiempo de llegada (time of arrival, TOA) de un pulsar binario es un efecto directo de la propagación retardada de la interacción gravitatoria entre la compañera y el pulsar. De ese modo, el pulsar de Hulse y Taylor proporciona una prueba observacional directa de que la radiación gravitacional se propaga a la velocidad de la luz, y tiene una estructura cuadripolar.

El resultado de la anterior fórmula fue mejorado teniendo en cuenta las contribuciones que no tienen que ver con la Relatividad General, provenientes de la aceleración galáctica del pulsar y del Sol. De esta forma, se llegó a un resultado más preciso y concordante con la predicción de la relatividad general:

$$\frac{\dot{P}_b(\text{obs}) - \dot{P}_b(\text{gal})}{\dot{P}_b(\text{GR})} = 0.997 \pm 0.002$$

#### -Pulsar binario y la astrofísica

Estas observaciones proporcionaron la primera medición exacta de las masas de estrellas de neutrones. Otra de las consecuencias a las que se ha llegado por el descubrimiento llevado a cabo en 1974 es sobre la vida de estos sistemas binarios de estrellas de neutrones. El descubrimiento de pulsares binarios muestra la existencia de estrellas de neutrones binarias que emitirán ondas gravitacionales por cientos de millones de años. En algunos cientos de millones de años, el PSR 1913+16 se fusionará, debido a la radiación gravitacional y en los minutos justo antes de juntarse, será un fuerte emisor de radiación gravitacional. Además, se cree que esa acción de unirse producirá eventos catastróficos como la emisión de radiación electromagnética y neutrinos.

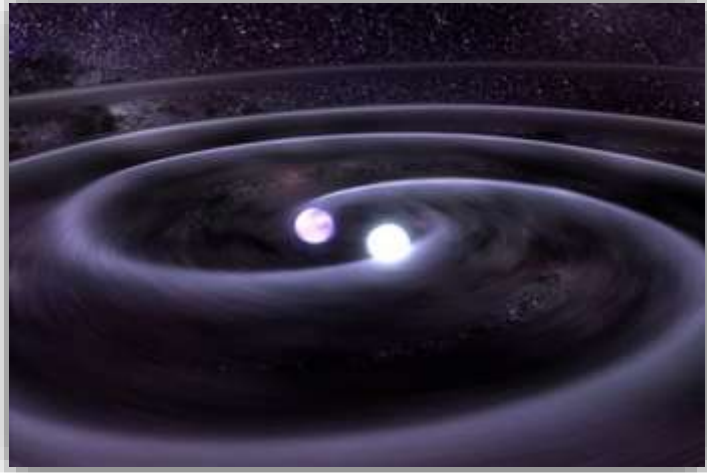
#### -Conclusiones

Este descubrimiento nos ha traído una larga lista de beneficios científicos. El más destacable puede ser la primera prueba experimental de que la teoría general de la relatividad de Einstein es válida más allá del generalmente probado régimen cuasi estacionario de campo débil. En realidad, los datos obtenidos de los pulsares binarios han probado la relatividad general en regímenes que contienen efectos radiactivos y efectos de campo fuerte.

El **premio Nobel de 1993**, fue concedido a Hulse y Taylor “por el descubrimiento de un nuevo tipo de pulsar, descubrimiento que ha abierto nuevas posibilidades para el estudio de la gravedad” [15].

#### 4.7 Ondas gravitacionales<sup>2</sup> (2016)

Einstein descubrió con su teoría de la relatividad general que la aceleración de grandes masas produce cambios en el campo gravitatorio y que estos cambios se propagan por todo el universo a la velocidad de la luz como ondulaciones en el espacio tiempo. Esas ondulaciones son las denominadas ondas gravitatorias y tienen la característica de interactuar muy débilmente con la materia, debido a que la gravedad es la más débil de las cuatro interacciones fundamentales (fuerte, débil, electromagnética y gravitatoria). Es decir, al contrario que la radiación electromagnética, estas ondas no se pueden absorber ni reflejar, eso hace que puedan viajar largas distancias sin ser distorsionadas.



*Figura 12: Representación de dos objetos estelares que orbitan a poca distancia y emiten ondas gravitacionales*

Se sabe que todo objeto con energía en el universo, cualquiera, produce esas ondas en el espacio-tiempo. Sin embargo, debido a su débil impacto estas son generalmente indetectables. Eventos cataclísmicos como las colisiones de agujeros negros, explosiones de estrellas supernova o estallidos de rayos gamma, son fenómenos que emiten intensas ondas gravitacionales. Estas ondulaciones distorsionan todo a su paso, pero a medida que se alejan de su origen, más pequeñas se vuelven y más difíciles de detectar. Es por esta razón que a pesar de que Einstein predijera este fenómeno cien años atrás, creía que eran ondas extremadamente débiles y, por tanto, imposibles de detectar. Hasta el momento, ha habido un gran número de evidencias indirectas de que existen, una de las mayores viene como consecuencia del hito anterior “El descubrimiento del pulsar binario” [25].

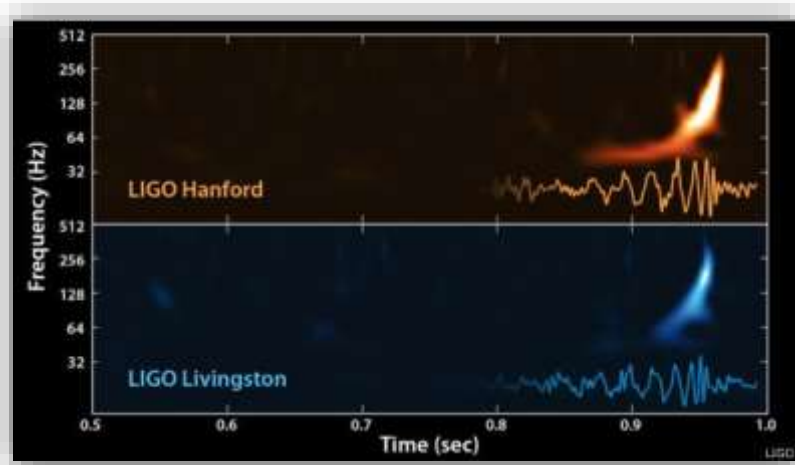
Este mismo mes, en cambio, por fin se ha hecho público el descubrimiento que desde principios de año se estaba esperando. Mediante una rueda de prensa desde Washington, el director ejecutivo de LIGO, David **Reitze** anunciaba: “Hemos detectado las ondas gravitacionales”. Estas ondas se observaron por primera vez el 14 de septiembre de 2015 a las 5:51 am (hora del este de Estados Unidos) en el Observatorio Avanzado de Interferometría Láser de Ondas Gravitacionales, Advanced LIGO, por sus siglas en inglés. El observatorio LIGO consta de dos detectores, uno en Livingston (Luisiana) y otro en Hanford (Washington). La primera versión estuvo en funcionamiento entre 2001 y 2010, sin éxito alguno en la detección de ondas gravitacionales. Por ello, los observatorios se desmontaron para poder construir una versión mejorada, el Advanced LIGO. Con una mejora notable en la tecnología e instrumentación, el Advanced LIGO cuenta con una sensibilidad cuatro veces mayor que el anterior. Este mismo se

<sup>2</sup> Este descubrimiento ha sido reciente (11 de febrero de 2016), mientras este trabajo estaba finalizándose.



ha puesto en funcionamiento en septiembre de 2015 y parece ser que desde sus inicios nos ha proporcionado información más que relevante [57].

Ambos detectores a unos 3.000km de distancia recibieron la misma señal, mostrada en la *Figura 13*, con una diferencia de tiempo de 7 milisegundos, siendo el observatorio de Hanford el que lo recibió más tarde. De esta manera, basándose en la señal observada, los científicos de LIGO han llegado a la conclusión de que procede de la fusión de dos agujeros negros, uno de 29 masas solares y el otro de 36, que produjeron un único agujero negro más masivo. Este evento tuvo lugar a  $1,3 \times 10^9$  años-luz de distancia, y la razón por la que en la actualidad ha llegado a nosotros es que el nuevo agujero negro que se formó era de una masa 62 veces mayor a la del Sol, es decir, que las restantes 3 masas solares se convirtieron en ondas gravitacionales de acuerdo con la fórmula de Einstein  $E=mc^2$ . Una fracción de esto último es lo que hemos sido capaces de detectar [42].



*Figura 13: Las señales de ondas gravitacionales recogidas el 14 de septiembre en los dos detectores de LIGO.*

En cuanto a la detección de las ondas gravitacionales, el observatorio LIGO se basa en el interferómetro de Michelson y Morley. Se compone de dos túneles en forma de L de 4 km a través de los cuales se envían láseres muy precisos. En el momento en que una onda gravitacional incide en forma perpendicular al plano del detector, los brazos del interferómetro se extienden y comprimen. Al superponer los dos haces del láser y estudiar sus interferencias, es posible medir las variaciones de los túneles pudiendo así detectar el patrón de las ondas gravitacionales.

Actualmente, justo después de que haya finalizado el primer periodo de observación, los detectores se están actualizando para poder volver a operar en otoño con una mejor sensibilidad [47]. No obstante, LIGO no es el único observatorio puesto en marcha. También hay otros detectores terrestres como Virgo en Italia o GEO600 en Alemania. Más aún, cuando LIGO sea puesto en marcha otra vez, el detector italiano Virgo se unirá a su red para poder tomar datos de mayor alcance, de hecho, en este hallazgo también participaron científicos de este observatorio. Más tarde, se espera que se sume el detector KAGRA de Japón que en la actualidad está bajo construcción, además de estar a la espera de un posible tercer detector LIGO que se construya en India. De esta forma, en un futuro se espera crear una red mundial de detectores con un alcance mucho mayor que el de sus predecesores [9].

A pesar de la sensibilidad y robustez de los nuevos detectores, el ruido del entorno, en especial las vibraciones sísmicas de la Tierra son causa de la posible alteración de los resultados. Además, hay frecuencias que desde la superficie terrestre no podemos llegar a distinguir y debemos explorar desde el espacio para poder detectar frecuencias de onda más bajas. Por esa misma razón, el satélite LISA Pathfinder se lanzó en diciembre del año pasado con la finalidad de validar la tecnología que se llegará a usar en la futura misión eLISA [35]. Este último será un proyecto en conjunto entre la NASA y la ESA que se espera lanzar en el año 2034 para detectar ondas gravitacionales. Este detector, constará de tres naves espaciales formando un triángulo y orbitando al Sol a cinco millones de kilómetros entre sí [25].

Con descubrimientos de tal calibre, es inevitable pensar en el premio Nobel. A decir verdad, puede parecer obvio que este anuncio se merezca uno, la duda inevitable es quién lo debe recibir. Kip Thorne, Ron Drever y Rai Weiss son los candidatos más obvios al posible premio, ya que son quienes propusieron el desarrollo de LIGO en los años 80. Sin embargo, hay quienes creen que los merecedores de este premio deberían ser los investigadores que han hecho de LIGO lo que es ahora. A unos o a otros, habrá que ver qué ocurre en un futuro [3].

A día de hoy, podemos asegurar que Einstein tenía razón en la predicción que hizo sobre la existencia de las ondas gravitacionales, por mucho que fallara al suponer que no se podrían detectar. Sobra decir que este descubrimiento marca un antes y un después. Es un hallazgo mediante el cual nuestra visión del universo cambiará por completo. Hasta el momento, la radiación electromagnética nos ha aportado los ojos con los que poder observar el universo, la radiación gravitatoria en cambio, nos proporcionará los oídos con los que escucharlo mediante la detección de estas ondas gravitacionales. Es de recalcar sobre todo, la posible futura observación del funcionamiento interno de diversos sistemas. Incluso se cree que dichas ondas nos permitirán ver el origen del universo, lo que pasó justo después del Big Bang. Esto se debe a que en sus primeros años la luz no salía de él por la gran densidad que acumulaba, la radiación gravitatoria por el contrario, no se vio afectada por ello y pudo llegar a escapar [25].

Este hallazgo abre las puertas a la astronomía gravitacional y junto a ella, una nueva era está por llegar. Esto hará que nuevos y sorprendentes descubrimientos se lleven a cabo y que nuestra concepción de lo que vemos en el universo cambie de forma radical puesto que parece que hemos ganado un sentido más en cuanto al estudio del universo se refiere. ¿Qué ocurrirá en un futuro?, es lo que todos nos preguntamos. Desgraciadamente no podemos adelantar nada, nuestra curiosidad deberá ser calmada a pasos lentos puesto que este no será un proceso inmediato. Es cuestión de tiempo.



## 5. GPS

En la vida cotidiana podemos ver reflejado el uso de la teoría general de la relatividad en el GPS. Hoy en día, ¿quién no ha dado uso a uno de esos aparatos para poder encontrar una dirección o incluso para saber situarse en el mapa? Pues bien, esta acción que en la actualidad es tan común no podría haber sido posible sin la contribución de Einstein a la ciencia.

El GPS (Global Positioning System) es un sistema que nos permite determinar la posición de cualquier objeto en todo el mundo y consta de tres partes principales: los satélites, los receptores y el control terrestre, este último formado por cinco estaciones en Tierra.

Aunque parezca contradictorio, la idea general del GPS es utilizar satélites en el espacio como puntos de referencia para ubicaciones aquí en la tierra. Para ser más concretos, el GPS funciona mediante una red de 24 satélites en seis órbitas distintas sobre la tierra con un periodo de unas 12 horas y situados a una altitud de aproximadamente 20.000km de la superficie terrestre, tal y como se representa en la *Figura 14*. Estos satélites emiten señales a nuestros receptores GPS y mediante la medición de nuestra distancia hacia al menos tres satélites es posible triangular nuestra posición en cualquier parte de la tierra.

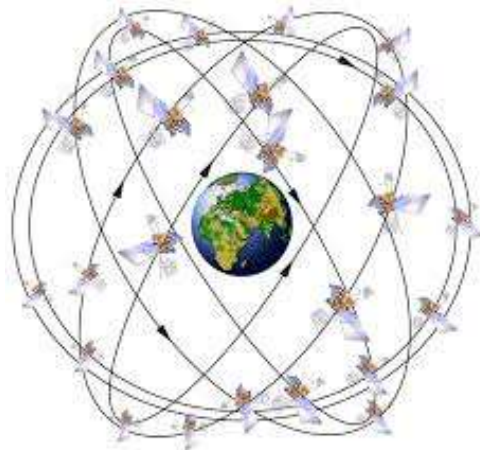


Figura 14: Satélites de GPS en órbita

### 5.1 Triangulación

Comencemos explicando la base de la **triangulación**. Una vez midamos nuestra distancia al primer satélite, nuestra posición se limita a la superficie de una esfera que tiene como centro dicho satélite y cuyo radio es la distancia que hemos medido. En cuanto midamos la distancia a un segundo satélite, lo mismo ocurrirá con este y sumando ambos resultados, veremos que solo podemos situarnos en algún lugar de la circunferencia que resulta de la intersección de las dos esferas. Si ahora medimos nuestra distancia a un tercer satélite, limitaremos nuestra posición aún más, ya que veremos que las 3 esferas solo coinciden en 2 puntos (ver *Figura 15*).

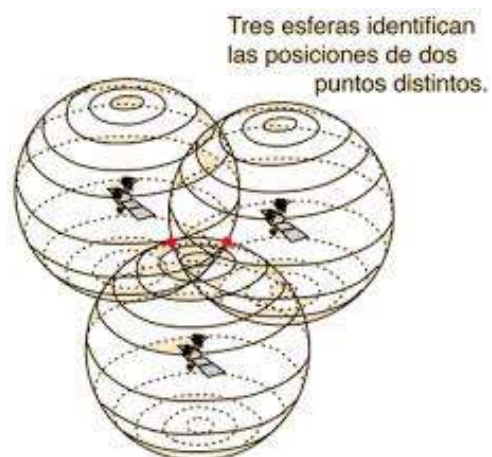


Figura 15: Método de triangulación del GPS

Finalmente, para decidir cuál de aquellos dos puntos es nuestra posición verdadera, haría falta la medición de un cuarto satélite. Sin embargo, uno de los puntos suele ser muy improbable debido a su ubicación lejana de la superficie terrestre y puede ser descartado sin necesidad de un cuarto satélite.

## 5.2 Cálculo de la distancia

A continuación, debemos asegurarnos de medir de forma precisa el tiempo que tarda la señal en llegar al receptor para poder así calcular la distancia a la que se encuentra el satélite en cuestión. Dado que estamos utilizando señales de radio, su velocidad será la de la luz, por lo que conociendo la velocidad y el tiempo, podemos calcular la distancia mediante una simple multiplicación.

Al emitir una señal un satélite, la señal nos llegará con cierto retraso debido a los 20.000km que ha tenido que recorrer. Al receptor le basta con medir ese desfase y multiplicarlo por la velocidad de la luz para poder así calcular la distancia entre ambos. Para poder realizar esta sincronización, los emisores y receptores del GPS utilizan el método "Pseudo-Random Code". Como su propio nombre indica, es un código pseudoaleatorio. Se trata de una señal digital compleja a frecuencia de 1.575,42 MHz, que garantiza que el receptor no se confunda de señal y pueda distinguirse fácilmente. Además, como cada satélite consta de su propio código, es posible que todos los satélites transmitan en la misma frecuencia sin interferirse mutuamente.

## 5.3 Sincronización

No obstante, debemos asegurarnos de medir de forma exacta las distancias y posiciones, y eso lo hacemos midiendo el tiempo que tarda una señal de radio emitida por el satélite en llegar hasta nuestro receptor GPS. Para medir el momento a partir del cual el satélite emite la señal y el receptor GPS la recibe, es indispensable sincronizar de la manera más exacta posible los relojes de estos satélites con los de la superficie terrestre, ya que al ser una señal de radio, viaja a la velocidad de la luz y un desvío de una milésima de segundo podría significar un error de 300km en el posicionamiento.

Los satélites disponen de relojes atómicos de cesio, extremadamente precisos. Sin embargo, si los receptores tuvieran que utilizar relojes atómicos, la tecnología sería inaccesible para muchos porque resultaría demasiado cara. Por esa razón, los receptores poseen un reloj normal de cuarzo, muy poco exacto en comparación.

Por causa de los efectos que predice la teoría de Einstein, los relojes de los satélites se adelantan respecto a los que están en tierra. Ese adelanto es de 38 microsegundos por día, debido a que como consecuencia de la velocidad del satélite su reloj se atrasaría al día 7 microsegundos (relatividad especial) y por efecto de la gravedad se adelantaría 45 microsegundos (relatividad general). La solución a dicha inexactitud, está en una cuarta medición adicional de otro satélite más.

Al no estar sincronizados los relojes entre el receptor y los satélites, la intersección de las cuatro esferas con centro en estos satélites es un pequeño volumen en vez de ser un punto. La corrección consiste en ajustar la hora del receptor de tal forma que este volumen se transforme en un punto. Para poder hacer posible esta práctica, un receptor GPS debe ser capaz de sintonizar al menos cuatro satélites de manera simultánea. En realidad, la mayoría de los GPS acceden a más de 6 satélites a la vez, por lo que esto no presenta ningún problema.

Una vez tenemos la medición del tiempo de la señal asegurado con el código pseudoaleatorio y la medición del cuarto satélite adicional como sincronización de la hora universal, es posible medir con precisión la distancia a un satélite en órbita. Sin embargo, hay un último dato necesario: saber las posiciones concretas de los satélites.

#### 5.4 Posiciones de los satélites

Hemos dicho anteriormente que los satélites se sitúan a unos 20.000km de altura. A tanta altura, no hay atmosfera, por lo que podemos hacer una aproximación diciendo que las órbitas son invariables y que serán predecibles mediante ecuaciones matemáticas sencillas.

Cada satélite fue situado por la Fuerza Aérea de los EEUU en una órbita precisa de acuerdo al Plan Maestro de GPS. De esa manera, todos los receptores que están en tierra tienen programados en sus computadoras donde está cada satélite en el espacio en cada momento. Aun así, para hacer todo con la mayor exactitud posible, las estaciones de tierra utilizan radares muy precisos que comprueban constantemente las posiciones y las velocidades de los satélites y calculan sus posibles errores. Los errores que pueda haber son “errores efemérides”, y son producidos como consecuencia del efecto de las atracciones gravitacionales de la Luna y el Sol o por la presión de la radiación solar en los satélites. Aunque sean errores mínimos, hay que tenerlos en cuenta para llegar a un buen resultado.

Cuando estas efemérides son detectadas, se retransmiten a los satélites para que se incluya esta información sobre su nueva posición corregida en las señales emitidas a los GPS. Esto significa que la señal que recibe un receptor de GPS no es solamente el Código Pseudo Aleatorio con tal de medir el tiempo de la señal mejor. Si no que también contiene un mensaje de navegación con información sobre la órbita exacta del satélite.

#### 5.5 Otros errores

No obstante, sigue habiendo un paso final que hacer. En los procesos anteriores, hemos supuesto que las señales viajan en el vacío. Pero, en realidad, no ocurre así ya que nuestro planeta está rodeado por la atmosfera. De primeras, la señal GPS pasa a través de ella: en su paso por la ionosfera atraviesa zonas con partículas cargadas mientras que al pasar por la troposfera pierde velocidad al atravesar vapor de agua. Por lo tanto, la velocidad de la luz que hemos supuesto no es cierta, ya que esa es la velocidad de vacío.

Para corregir este efecto, se aplica un modelo matemático actualizable que simula el comportamiento de la atmósfera. Además de este método, los receptores militares emplean un segundo método que consiste en la comparación de la velocidad relativa de dos señales diferentes. Es una medición dual de frecuencias muy sofisticada, por eso no es la más común.

Una vez que la señal llega a la superficie de la tierra, puede rebotar varias veces antes de llegar al receptor creando otro error. A este error se le denomina “error de trayectoria múltiple”, ya que una misma señal puede llegar directamente y luego rebotada. Para hacer frente a este error, los receptores solamente tienen en cuenta la primera señal, procedente directamente del satélite.

Aun siendo los satélites muy sofisticados, cualquier mínimo error bien sea de la medición del tiempo o por la posición exacta de los satélites mismos, es inevitable. Además, estos errores pueden incrementar por la “Dilución geométrica de la posición” (del inglés “Geometric Dilution of Precision”, GDOP). Anteriormente hemos mencionado que los receptores tienen más satélites de los necesarios a su disposición. Pues bien, en la selección de estos entra el principio de GDOP. Si el receptor toma satélites que están muy juntos entre ellos, las circunferencias de intersección que definen la posición se cruzarán a ángulos de escasa diferencia, lo que incrementará el margen de error de la posición. Si el receptor elige satélites que están bastante separados, en cambio, los ángulos de las intersecciones de las circunferencias serán prácticamente rectos y, en consecuencia, se minimizará el margen de error. Cuanto mejor sea el receptor, tendrá mayor capacidad de determinar cuáles son los satélites que dan el menor error por “Dilución Geométrica de Precisión” [22, 24, 26].

### 5.6 Prueba de la teoría de la relatividad

Experimentalmente se ha observado que los relojes de los satélites se adelantan 38 microsegundos diarios respecto a los terrestres. Veamos si la relatividad predice la misma diferencia de tiempo. Para ello, utilizaremos la que se considera la primera solución exacta de las ecuaciones de campo de Einstein, la métrica de Schwarzschild, en el caso esféricamente simétrico como lo expresado en la fórmula (16).

Como los satélites se mueven a una altura fija de la Tierra, la coordenada radial será constante:  $dr=0$  y por simplificación si tenemos en cuenta que el satélite que observamos se encuentra alrededor del ecuador:  $\theta=\pi/2$  y  $d\theta=0$ . Como consecuencia la ecuación nos queda:

$$ds^2 = -\left(1 - \frac{2GM}{c^2 r}\right)(cdt)^2 + r^2 d\phi^2$$

Para este cálculo solo queremos tener en cuenta la variación del tiempo, por lo que de la geometría de Minkowski, (14), sustituiremos  $ds^2 = -c^2 dt'^2$  donde  $dt'$  se refiere al tiempo propio del satélite mientras que  $dt$  es el tiempo propio de la Tierra. Dividiendo todo por  $-c^2 dt^2$ :

$$\left(\frac{dt'}{dt}\right)^2 = \left(1 - \frac{2GM}{c^2 r}\right) - \frac{v^2}{c^2}$$

Donde  $v^2 = r^2 \left(\frac{d\phi}{dt}\right)^2$  es la velocidad tangencial del satélite.

$c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$	$v = 3874 \text{ m/s}$	$dt = 1 \text{ día} = 86400 \text{ s}$
$G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2$	$R_{\text{tierra}} = 6,357 \times 10^6 \text{ m}$	$h = 20.200 \times 10^3 \text{ m}$
	$M_{\text{tierra}} = 5,974 \times 10^{24} \text{ kg}$	$R_{\text{sat}} = h + R_{\text{tierra}}$

Tabla 1: Datos necesarios para el cálculo de la diferencia de tiempo

A continuación, realizaremos el cálculo de la diferencia de tiempo de una manera simple, separando las influencias de la velocidad y la gravedad para poder observar cómo afecta cada teoría de la relatividad.

### Teoría especial de la relatividad

Para calcular la variación de tiempo de los relojes debido a la relatividad especial, solo tenemos que tener en cuenta el efecto de la velocidad, no de la gravedad. Por ello solo tenemos en cuenta lo siguiente:

$$\frac{dt'}{dt} = \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \approx 1 - \frac{v^2}{2c^2}$$

Si introducimos los datos necesarios obtenidos de la Tabla 1, conseguiremos que, debido a la relatividad especial, el retraso que experimentará el reloj del satélite respecto al de la tierra en 1 día será  $\Delta t'(RE) = dt - dt' \approx -7\mu s$

### Teoría general de la relatividad

En el caso de la relatividad general, debemos examinar el efecto de la gravedad en el tiempo. Por esa razón, usamos la siguiente expresión:

$$\frac{dt'}{dt} = \sqrt{1 - \frac{2GM}{c^2 r}} \approx 1 - \frac{GM}{c^2 r}$$

Lo que nos interesa aquí es la diferencia entre la Tierra y los satélites, para determinarlo usaremos los datos de la Tabla 1:

$$\Delta t'(RG) = \frac{GM_{Tierra}}{R_{Tierra}c^2} - \frac{GM_{Tierra}}{R_{Satelite}c^2} \approx +45\mu s$$

Por lo tanto, en general, por causa de las dos relatividades la diferencia de tiempo entre relojes será:  $\Delta t' = \Delta t'(RE) + \Delta t'(RG) \approx -7\mu s + 45\mu s = +38\mu s$ . Es decir, el reloj del satélite se adelanta  $38\mu s$  respecto al reloj de la Tierra. Este es el error que el GPS corrige para que el cálculo del posicionamiento sea lo más exacta posible [52].

## 6. La Relatividad General puesta a prueba en el futuro

A pesar de la longevidad de esta teoría y de haber superado tantos obstáculos, todavía se espera ponerla a prueba en más de un aspecto. Por un lado, uno de los principios en los que se basa, el principio de equivalencia, podría ser cuestionado. Primero fue Galileo quien supuestamente dejando caer distintas masas desde la torre de Pisa <sup>3</sup> introdujo este principio. Más tarde, el comandante del Apolo 15, David Scott, utilizó una pluma y un martillo para probar el experimento desde la Luna y demostrar que Galileo tenía razón. En la actualidad, en cambio, se está intentando desarrollar una misión de prueba llamada STEP (Satellite Test Equivalence Principle) en la que se espera recrear en el espacio dicho experimento mediante el uso de cuatro pares de masas hechas de tres materiales distintos: berilio, niobio y platino-iridio [11,12].

Por otro lado, en uno o dos años se espera poner a prueba la teoría general de la relatividad en una situación en la que la gravedad sea fuerte, como por ejemplo cerca de un agujero negro. El obstáculo que se presenta es que los agujeros negros son muy difíciles de ver, debido a su gran masa y pequeño tamaño pero, sobre todo, debido a su lejanía. El agujero negro conocido más cercano a nosotros es el que está ubicado en el centro de la Vía Láctea a unos 26.000 años luz de la Tierra, el Sagitario A\* (Sgr A\*). El proyecto EHT, de las siglas en inglés de Telescopio de Horizonte de Sucesos, espera cambiar las cosas observando dicho agujero negro. Este proyecto consta de una red global de nueve radiotelescopios que actúan como uno solo y tiene como finalidad obtener imágenes de Sgr A\*. Debido al hecho de que un agujero negro no deja escapar la luz, lo que se detecta como imagen será el anillo circular brillante que rodea la sombra oscura que se crea con el atrapamiento de luz. Las dimensiones de este anillo son los datos que habría que comprobar para determinar si la teoría general de la relatividad es adecuada. Se espera que en el plazo de pocos años se consiga la primera imagen de Sgr A\*, incluso hay expectativas de obtener un pequeño adelanto este mismo año [44].

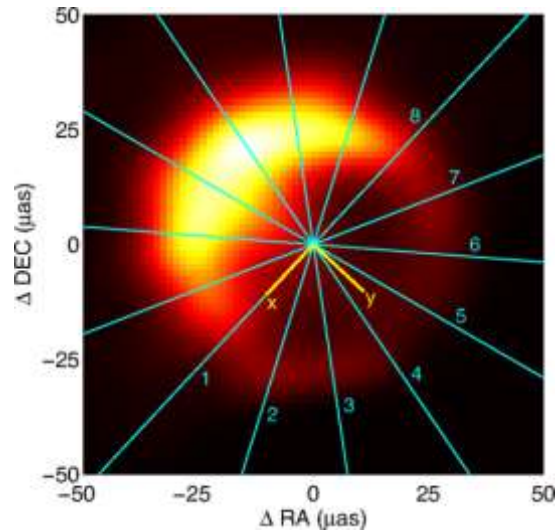


Figura 16: Esta imagen corresponde a una simulación realizada a partir de datos de siete radiotelescopios EHT midiendo durante un día.

De esta manera, la centenaria teoría de Einstein podría situarse en la cuerda floja una vez más. Si, finalmente, a través de estos experimentos se logran resultados contradictorios a la relatividad general, podríamos estar en el comienzo de una nueva teoría de la gravedad. Sin embargo, no es de sabios adelantar ningún acontecimiento, ya que como científicos, no deberíamos dar nada por supuesto hasta ponerlo a prueba.

<sup>3</sup> Este experimento parece ser que nunca sucedió tal y como se cuenta.

## Conclusiones

Después de un largo recorrido en la física, llegamos a la conclusión de que en cada época, durante algún tiempo, la teoría actual es considerada como definitiva. Eso mismo ocurrió con la teoría de Newton hasta que llegó Einstein y lo eclipsó. La teoría de Einstein ha dado lugar a un sinnúmero de avances físicos, algunos de los cuales ya mencionados en el trabajo pero es de mencionar sobre todo, que esta teoría nos ha llevado a un cambio en nuestra percepción del espacio-tiempo. No obstante, aunque hubiera científicos que creyeran que Einstein merecía el premio Nobel por tal descubrimiento, hubo mucha gente reacia a su teoría. Por esa misma razón Einstein no recibió dicho premio por la teoría general de la relatividad, pero sí lo hizo por sus aportaciones a la Física Teórica, en especial por su descubrimiento de la ley del efecto fotoeléctrico. Dicho efecto lo introdujo en uno de sus artículos publicados en 1905 junto con la relatividad especial. El artículo se titulaba “Sobre un punto de vista heurístico concerniente a la producción y transformación de la luz”, y gracias a él Albert Einstein recibió el premio Nobel de Física en 1921.

Albert Einstein falleció en 1955 y no pudo ver muchos de los avances llevados a cabo por su nuevo planteamiento del Universo, ya que su complejidad ha sido causa de la tardía aceptación de esta. Además, a lo largo de los años, se han realizado diversos experimentos para comprobarla y hemos podido observar que la Relatividad General ha superado todas las pruebas a las que ha sido expuesta. Sin embargo, se ha podido ver que esta teoría no es compatible con la Física Cuántica, lo que hace que no sea la teoría que unifica toda la física. Es por eso que hoy en día se sigue intentando buscar una nueva teoría unificada que pueda darnos la explicación de *cómo* funciona el universo. Esta ya es una tarea demasiado complicada como para preguntarnos el *por qué* funciona así, cuestión a la que varios filósofos han tratado de dar respuesta. No obstante, aunque la Relatividad General no sea la teoría unificada que se busca, incluso hoy en día sigue sorprendiéndonos con varios avances. Más aún, este mismo año hemos sido testigos de una de sus predicciones hechas un siglo atrás: las ondas gravitacionales. Descubrimiento que se espera que sea el inicio de un nuevo camino en la física.

Está claro que mientras el ser humano siga buscando e investigando, cosa inevitable debida a la curiosidad que le caracteriza, irá encontrando nuevas realidades incompatibles con lo anterior, por lo menos así ha sido hasta el momento. Uno de los obstáculos que nosotros mismos nos ponemos es el intento de ajustar las nuevas teorías a las ideas preconcebidas que tenemos de hechos anteriores, a nuestro saber acumulado. Es así como incluso a grandes genios como a Einstein se les han escapado aplicaciones de sus ideas. Por lo tanto, no debemos dejarnos cegar por visiones actuales ya que debemos dar por sentado que no son más que la liana de la que actualmente nos colgamos como solución momentánea. ¿Pero, cuánto aguantaremos colgados de aquí? La ciencia se basa en la búsqueda de nuevos conocimientos, dicho esto, son muchos los científicos que tienen como finalidad el avance de la humanidad en una comprensión mayor del mundo que nos rodea. Solo es cuestión de tiempo el volver a ver un cambio de creencias.



## Bibliografía

- [1] Abcienciade. *Desplazamiento gravitatorio al rojo*. 2011.  
<https://abcienciade.wordpress.com/2011/01/24/desplazamiento-gravitatorio-al-rojo/>.
- [2] Alcubierre, Miguel. «La relatividad numérica.» *Revista de Física* 29, nº 4 (2015): 29-33.
- [3] Amos, Jonathan. *Por qué los números no le hacen justicia al descubrimiento de las ondas gravitacionales de Einstein*. 2016.  
[http://www.bbc.com/mundo/noticias/2016/02/160212\\_ciencia\\_ondas\\_gravitacionales\\_einstein\\_como\\_fue\\_gtg](http://www.bbc.com/mundo/noticias/2016/02/160212_ciencia_ondas_gravitacionales_einstein_como_fue_gtg).
- [4] Baccaglioni, Fabio. *El efecto Shapiro*. 2015. <http://www.fabio.com.ar/6600>.
- [5] Bachiller, Rafael. «1965. El eco del 'Big Bang'.» *EL MUNDO*. 2009.  
<http://www.elmundo.es/elmundo/2009/10/28/ciencia/1256724101.html>.
- [6] Barceló, Carlos. «Agujeros negros, sus análogos y termodinámica.» *Revista de Física* 29, nº 4 (2015): 34-39.
- [7] Bastero-Gil, Mar. «Cosmología Relativista.» *Revista de Física* 29, nº 4 (2015): 19-23.
- [8] Bernstein, Jeremy. *EINSTEIN. El hombre y su obra*. McGRAW-HILL/INTERAMERICANA DE ESPAÑA, 2006.
- [9] Caltech, LIGO. *LIGO Press Conference (Washington, DC)*. 11 de Febrero de 2016.  
<https://www.ligo.caltech.edu/detection>.
- [10] Carrasco Licea, Esperanza, y Alberto Carramiñana Alonso. *El pulsar binario*. 2000.  
<http://www.inaoep.mx/~rincon/psrbin.html>.
- [11] Chown, Marcus. «La relatividad a examen.» *Genius BBC*, 2016: 30-37.
- [12] Ciencia@NASA. *El Principio de Equivalencia*. 2007. [http://ciencia.nasa.gov/science-at-nasa/2007/18may\\_equivalenceprinciple/](http://ciencia.nasa.gov/science-at-nasa/2007/18may_equivalenceprinciple/).
- [13] Cuánticos, Cuentos. *Relatividad General 100 años*. 2015. <http://cuentos-cuanticos.com/minicursos-cuentos-cuanticos/relatividad-general-100-anos/>.
- [14] Cuerdas, Cuantos y. *Einstein y sus lentes gravitacionales*. 2013.  
<http://cuantosycuerdas.blogspot.com.es/2013/10/einstein-y-sus-lentes-gravitacionales.html>.
- [15] Damour, Thibault. «1974: the discovery of the first binary pulsar.» *Classical and Quantum Gravity* 32 (2015): 124009.
- [16] Durrer, Ruth. «The cosmic microwave background: the history of its experimental investigation and its significance for cosmology.» *Classical and Quantum Gravity* 32 (2015): 124007.
- [17] EDITEC. *EINSTEIN. El espacio es una cuestión de tiempo*. Madrid: RBA Coleccionables, S.A, 2012.



- [18]Educativa, Astronomía. *Hubble la expansión del universo*. 2016.  
<http://www.astromia.com/biografias/hubble.htm>.
- [19]ESA. *El legado de la misión Planck de la ESA*. 2014.  
[http://www.esa.int/esl/ESA\\_in\\_your\\_country/Spain/El\\_legado\\_de\\_la\\_mision\\_Planck\\_de\\_la\\_ESA](http://www.esa.int/esl/ESA_in_your_country/Spain/El_legado_de_la_mision_Planck_de_la_ESA).
- [20]física, La web de. *Ecuaciones de Einstein*. Octubre de 2004.  
<http://www.lawebdefisica.com/dicc/einstein/>.
- [21]Font, José A. «Astrofísica Relativista.» *Revista de Física* 29, nº 4 (2015): 24-28.
- [22]García Álvarez, José Antonio E. *Así funciona el GPS*. 2015.  
[http://www.asifunciona.com/electronica/af\\_gps/af\\_gps\\_10.htm](http://www.asifunciona.com/electronica/af_gps/af_gps_10.htm).
- [23]García Tardío, Carmen M<sup>a</sup>, Clara Gómez García, y M<sup>a</sup> Jesús Macías Castillo. *Radiación de fondo de microondas*. 2015.  
[http://www.eweb.unex.es/eweb/fisteor/juan/SP/ALUMNOS09/Radiacion\\_de\\_fondo\\_de\\_microondas.pdf](http://www.eweb.unex.es/eweb/fisteor/juan/SP/ALUMNOS09/Radiacion_de_fondo_de_microondas.pdf).
- [24]González, Felipe de la Cruz. *Introducción al GPS*. 2004.  
<http://www.mailxmail.com/curso-introduccion-gps/que-es-gps>.
- [25]González, Gabriela, y Alicia M. Sintés. «Ondas gravitacionales: mensajeras del universo.» *Revista de Física* 29, nº 4 (2015): 14-18.
- [26]Gutovnik, Pedro. *Cómo funciona el GPS en cinco pasos lógicos*. 1999.  
<http://www.elgps.com/documentos/comofuncionagps/comofuncionagps.html>.
- [27]Hacyan, Shahen. *Relatividad para principiantes*. México: FONDO DE CULTURA ECONÓMICA DE ESPAÑA, 2002.
- [28]Hawking, Stephen W. *Historia del tiempo*. Barcelona: Editorial Crítica, 1988.
- [29]hombre, El origen del. *El universo desde Aristoteles a Newton*. 2015.  
<http://www.elorigendelhombre.com/de%20aristoteles%20a%20newton.html>.
- [30]Kron, Rich, y Jordan Raddick. *Hubble*.  
<http://cas.sdss.org/dr6/sp/proj/advanced/hubble/> (último acceso: Enero de 2016).
- [31]Lucas, Javier de. *Ausencia de límites*. 1996.  
<http://platea.pntic.mec.es/~jdelucas/hawking.htm>.
- [32]MacCallum, Malcolm A.H. «Milestones of general relativity: Hubble's law (1929) and the expansion of the universe.» *Classical and Quantum Gravity* 32 (2015): 124002.
- [33]Mars, Marc. «Relatividad General y Matemática.» *Revista de Física* 29, nº 4 (2015): 4-8.
- [34]Martínez Téllez, Armando. *La teoría de la relatividad*. 2009. <http://teoria-de-la-relatividad.blogspot.com.es/2009/03/10-relatividad-general-dos-predicciones.html>.
- [35]Ouellette, Jennifer. *Ya hemos encontrado las ondas gravitacionales ¿Y ahora qué?* 2016. <http://es.gizmodo.com/ya-hemos-encontrado-las-ondas-gravitacionales-y-ahora-1758677431>.

- [36] Pandora, Recuerdos de. *La gravedad según Aristoteles*. 2010.  
<http://recuerdosdepandora.com/ciencia/fisica/la-gravedad-segun-aristoteles/>.
- [37] *Relatividad [Albert Einstein HC] 2013*  
<https://www.youtube.com/watch?v=kpKtL75QbV8>. Youtube.
- [38] Revolucionaria, Alejandría. *Alejandría Revolucionaria*. 2005.  
<http://www.nodo50.org/arevolucionaria/especiales/relatividad.htm>.
- [39] Sandoval, Ignacio Francisco Ranea. «Perturbaciones Gravitacionales a la Métrica de Kerr.» *Tesis de la Licenciatura en Astronomía*. 2009.  
[http://ggac.fcaglp.unlp.edu.ar/archivos/ranea\\_tesis-lic.pdf](http://ggac.fcaglp.unlp.edu.ar/archivos/ranea_tesis-lic.pdf).
- [40] Senovilla, José M.M., y David Garfinkle. «The 1965 Penrose singularity theorem.» *Classical and Quantum Gravity* 32 (2015): 124008.
- [41] Sotelo, Jennyfer Carolina. «El Concepto de gravedad desde las concepciones de Newton y Einstein: Una propuesta didáctica dirigida a estudiantes del Ciclo V.» Universidad Nacional de Colombia, 2012.
- [42] Svitil, Kathy, Kimberly Allen, Ivy Kupec, Susanne Milde, Terry O'Connor, y Benjamin Knispel. «Las ondas gravitacionales detectadas 100 años después de la predicción de Einstein.» *NEWS RELEASE*. 2016.
- [43] Teukolsky, Saul A. «The Kerr metric.» *Classical and Quantum Gravity* 32 (2015): 124006.
- [44] Tomé López, César. *La primera imagen de Sagitario A\* podría ser la prueba "definitiva" de la relatividad general*. 2016. <http://culturacientifica.com/2016/01/27/la-primera-imagen-de-un-agujero-negro-podria-ser-la-prueba-definitiva-de-la-relatividad-general/>.
- [45] Torregrosa, Angel. *Einstein y la relatividad*. 2015.  
<http://www.relatividad.org/bhole/einstein.html>.
- [46] UGR. «Tests de la relatividad general.» 2013. <http://www.ugr.es/~jillana/SR/sr11.pdf>.
- [47] UIB, Grupo de Relatividad y Gravitación. *Las ondas gravitacionales detectadas 100 años después de la predicción de Einstein*. 2016.  
<http://grg.uib.es/ligo/index.php/2016/02/11/las-ondas-gravitacionales-detectadas-100-anos-despues-de-la-prediccion-de-einstein/>.
- [48] Wheeler, John Archibald. «Geons, Black Holes, and Quantum Foam: A Life in Physics.» 235. W.W. Norton & Co, 1998.
- [49] Wikipedia. *Big Bang*. 2016. [https://es.wikipedia.org/wiki/Big\\_Bang](https://es.wikipedia.org/wiki/Big_Bang).
- [50]—. *Ecuaciones de Maxwell*. 2015.  
[https://es.wikipedia.org/wiki/Ecuaciones\\_de\\_Maxwell](https://es.wikipedia.org/wiki/Ecuaciones_de_Maxwell).
- [51]—. *Efecto Shapiro*. 2014. [https://es.wikipedia.org/wiki/Efecto\\_Shapiro](https://es.wikipedia.org/wiki/Efecto_Shapiro).
- [52]—. *Error analysis for the Global Positioning System*. 2016.  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Error\\_analysis\\_for\\_the\\_Global\\_Positioning\\_System](https://en.wikipedia.org/wiki/Error_analysis_for_the_Global_Positioning_System).

- [53]—. *Experimento de Pound y Rebka*. 2015.  
[https://es.wikipedia.org/wiki/Experimento\\_de\\_Pound\\_y\\_Rebka](https://es.wikipedia.org/wiki/Experimento_de_Pound_y_Rebka).
- [54]—. *Isaac Newton*. 2016. [https://es.wikipedia.org/wiki/Isaac\\_Newton](https://es.wikipedia.org/wiki/Isaac_Newton).
- [55]—. *Jacob Bekenstein*. 2016. [https://en.wikipedia.org/wiki/Jacob\\_Bekenstein](https://en.wikipedia.org/wiki/Jacob_Bekenstein).
- [56]—. *Ley de Hubble*. 2015. [https://es.wikipedia.org/wiki/Ley\\_de\\_Hubble](https://es.wikipedia.org/wiki/Ley_de_Hubble).
- [57]—. *LIGO*. 2016. <https://es.wikipedia.org/wiki/LIGO>.
- [58]—. *Tensor de curvatura*. 2015. [https://es.wikipedia.org/wiki/Tensor\\_de\\_curvatura](https://es.wikipedia.org/wiki/Tensor_de_curvatura).
- [59]—. *Tensor de Ricci*. 2016. [https://es.wikipedia.org/wiki/Tensor\\_de\\_Ricci](https://es.wikipedia.org/wiki/Tensor_de_Ricci).
- [60]Will, Clifford M. «The 1919 measurement of the deflection of light.» *Classical and Quantum Gravity* 32 (2015): 124001.
- [61]Yunes, Nicolás. «Einstein, ¿sigue teniendo razón?» *Revista de Física* 29, nº 4 (2015): 9-13.
- [62]Zwicky, Fritz. «Nebulae as gravitational lenses.» *Physical Review* 51, nº 4 (1937): 290.