

# Tema 11

## TESTS DE LA RELATIVIDAD GENERAL

### 11.1 Introducción

Ya hemos hablado de los efectos de dilatación temporal gravitatoria: *desplazamiento gravitatorio al rojo* y *retraso de los relojes* y de algunos experimentos que la han comprobado, como el de la torre de Harvard por Pound y Rebka y el de los relojes voladores de Hafele y Keating, respectivamente. También es posible detectar el desplazamiento al rojo de las líneas espectrales del Sol y de estrellas muy masivas debido a su propio campo gravitatorio, aunque su movimiento peculiar produce desplazamientos Doppler adicionales (mucho mayores que el efecto gravitatorio) que hacen difícil su detección. En el caso del Sol se ha confirmado el efecto con una precisión del 5%.

Ahora revisaremos otros tests de la relatividad general que comprueban diversos aspectos y predicciones de la teoría.

### 11.2 La deflexión de la luz y lentes gravitatorias

La luz sigue trayectorias geodésicas en el espaciotiempo, que está curvado en presencia de una masa. En particular, la luz procedente de una estrella experimentará una *deflexión* (desviación en su trayectoria), que será máxima cuando los rayos pasen muy cerca del borde del disco solar, donde el campo gravitatorio creado por el Sol, es decir la curvatura del espaciotiempo, es mayor (Fig. 11.1). El efecto es muy pequeño y obviamente sólo se puede intentar medir cuando hay un eclipse solar. Es un experimento difícil porque hay que conocer la posición de las estrellas con mucha precisión. La teoría predice una desviación angular en la posición de la estrella:

$$\Delta\varphi = \frac{4G_N M_\odot}{r_0 c^2} \quad (11.1)$$

donde  $r_0$  es la distancia mínima del rayo de luz al centro solar (siempre que ésta no sea muchas veces mayor que el radio solar  $R_\odot$ ) y  $M_\odot$  es la masa del Sol. De este modo Einstein

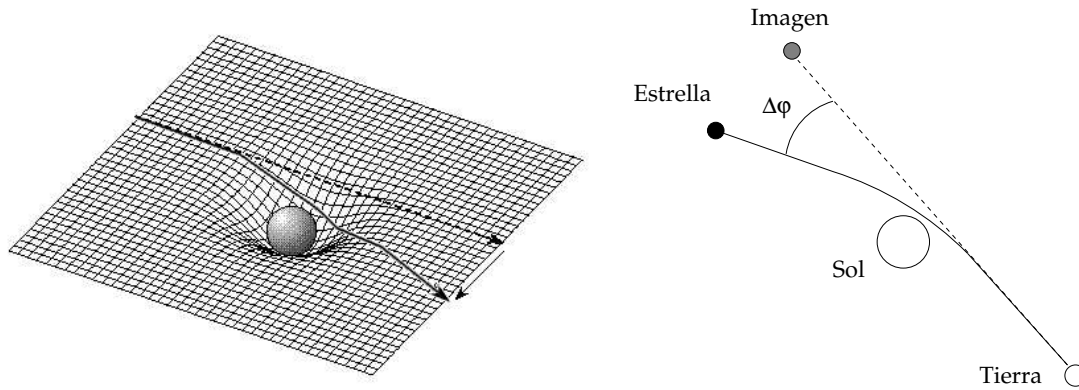


Figura 11.1: Posiciones real y aparente (imagen) de una estrella vista cerca del Sol (muy exagerada).

predijo una desviación máxima (para  $r_0 = R_{\odot}$ ) de  $1.75''$  de arco. Compruébese.<sup>1</sup>

En 1919 sir Arthur Eddington encabezó una expedición al golfo de Guinea (Príncipe) donde observó el efecto esperado en la posición de cinco estrellas, durante el eclipse solar que tuvo lugar el 29 de mayo. Este éxito de la teoría convirtió a Einstein en una celebridad mundial. Desde entonces, se han hecho experimentos similares, en los que la precisión de las medidas no ha mejorado mucho.

Afortunadamente existe un modo alternativo mucho más preciso de medir la desviación por el Sol de la luz procedente de una fuente y que no necesita esperar a un eclipse. Se trata de utilizar una radiofuente, en vez de una fuente luminosa. El mejor ejemplo es el quasar 3C279, que es ocultado por el Sol cada 8 de octubre. Gracias a la interferometría de larga base, puede medirse la posición de la radiofuente con una precisión de  $3 \times 10^{-4}$  segundos de arco. Usando este método se ha podido confirmar la predicción de Einstein con una precisión de 1 parte en 10000.

Otro interesantísimo fenómeno relacionado con la deflexión de la luz es el de las *lentes gravitatorias*. Ocurre cuando la luz procedente de un objeto muy lejano suficientemente brillante (un quasar) pasa muy cerca de un objeto muy masivo más cercano que está justo en la línea de visión desde la Tierra. Entonces la luz puede curvarse y llegar hasta la Tierra pasando por ambos lados del objeto masivo, que actúa como una lente, de modo que se obtienen dos imágenes del quasar. A veces también se obtienen arcos e incluso anillos. La Fig. 11.2 es una foto tomada por el telescopio espacial Hubble en la que se muestra un espectacular ejemplo de lente gravitatoria producida por un cúmulo rico en galaxias (Abell 2218), muy masivo y compacto, que distorsiona las imágenes de objetos entre 5 y 10 veces más lejanos. Lo más evidente son los arcos y anillos pero también se han detectado hasta siete imágenes dobles (se sabe porque los espectros de los objetos repetidos son idénticos) y aumento de brillo en algunos de los objetos.

<sup>1</sup>El resultado de la fórmula (11.1) está en radianes. Recuérdese que  $360^\circ$  son  $2\pi$  radianes y  $1^\circ = 60' = 3600''$ . Datos:  $G_N = 6.67 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$ ,  $M_{\odot} = 1.99 \times 10^{30} \text{ kg}$ ,  $R_{\odot} = 6.96 \times 10^8 \text{ m}$ ,  $c = 3 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$ .



Figura 11.2: Imagen de una lente gravitatoria [<http://www.seds.org/hst/A2218.html>].

### 11.3 El avance del perihelio de Mercurio

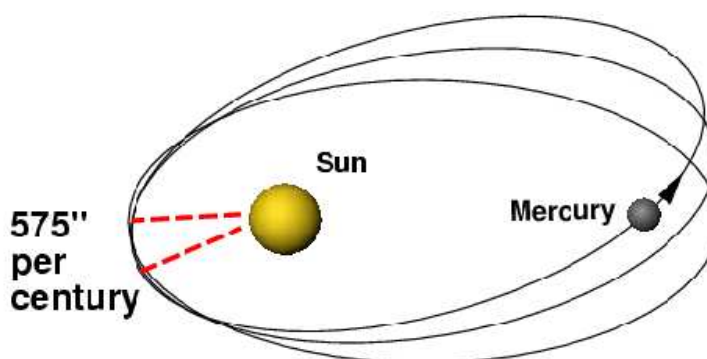


Figura 11.3: Avance del perihelio de Mercurio.

Antes de que la expedición de Eddington comprobara las predicciones de Einstein sobre la deflexión de la luz, su teoría ya había conseguido explicar una anomalía en la órbita de Mercurio que había traído de cabeza a los astrónomos durante mucho tiempo.

La teoría de Newton explicaba con mucha precisión las órbitas de los planetas, hasta el punto de que algunas irregularidades observadas en la órbita de Urano sirvieron a LeVerrier para predecir la existencia y la posición del planeta Neptuno. Las órbitas planetarias newtonianas alrededor del Sol debían ser cerradas (elípticas) y fijas pero la influencia gravitatoria de los otros planetas puede perturbarlas. En particular, se sabía que la posición del perihelio (punto de la órbita planetaria más cercano al Sol) de Mercurio avanza alrededor del Sol a un ritmo de 575'' de arco por siglo (Fig. 11.3). Sin embargo, los cálculos newtonianos sólo eran capaces de dar cuenta de 532'' de arco por siglo, por la influencia de Venus (278''), Júpiter (154''), la Tierra (90'') y el resto de los planetas (10''). La discrepancia de unos 43'' de arco por siglo fue en un principio achacada por el mismo LeVerrier y otros a la existencia de un grupo de pequeños planetas cercanos al Sol, pero enseguida se concluyó que éstos pro-

ducirían otros efectos adicionales que no se habían observado. Parecía necesario abandonar la hipótesis newtoniana de que la fuerza gravitatoria solar disminuye con el cuadrado de la distancia.

En relatividad general, el perihelio de Mercurio avanzaría aunque no existieran los otros planetas, simplemente porque la órbita tiene lugar en un espaciotiempo curvo para el que la ley de Newton no es una perfecta aproximación, pues Mercurio está muy cerca del Sol. El cálculo de Einstein para Mercurio predijo exactamente los  $43''$  de arco por siglo que faltaban. También pudo explicar otras discrepancias menores que también se habían detectado para Venus ( $8.6''$ ) y la Tierra ( $3.8''$ ). En 1949 se encontró Icarus, un asteroide con una órbita muy excéntrica y por tanto muy sensible a este efecto ( $10''$ ) que fue calculado y comprobado experimentalmente con gran precisión.

El 2 de julio de 1974 Hulse y Taylor descubrieron el pulsar binario PSR 1913+16 con el famoso radiotelescopio de 300 m de diámetro de Arecibo (Puerto Rico), lo que les valió el premio Nobel en 1993. Se trata de un par de estrellas de neutrones (objetos muy masivos de unos 20 km de diámetro) que orbitan una alrededor de la otra a una distancia pequeñísima (2.3 segundos-luz). Este sistema es muy interesante porque pone a prueba la relatividad general de forma extrema. En particular, el avance del perihelio de la órbita es enorme,  $4.2^\circ$  por año!, cantidad que está en perfecto acuerdo con la teoría.

## 11.4 Ondas gravitatorias

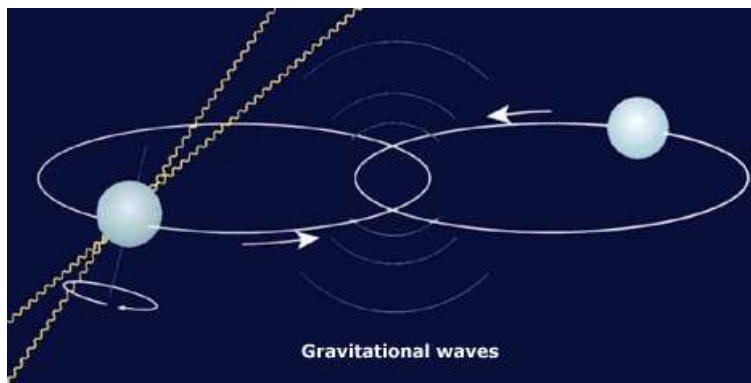


Figura 11.4: Esquema del pulsar binario PSR 1913+16.

El hecho por el que el pulsar binario PSR 1913+16 es más conocido es por confirmar una de las predicciones más esperadas de la relatividad general: la existencia de ondas gravitatorias.

Del mismo modo que cuando una carga eléctrica es acelerada emite ondas electromagnéticas (antena), las ecuaciones de Einstein predicen que cuando una masa es acelerada (equivalentemente, sometida a un campo gravitatorio) ésta emitirá ondas gravitatorias, una deformación del espaciotiempo que se propaga.

Un pulsar es una estrella de neutrones que gira sobre sí misma a gran velocidad y con un gran campo magnético. Las partículas cargadas se mueven a lo largo de las líneas de campo que van del polo norte al polo sur. En los polos estas partículas pueden escapar y dar lugar a una emisión de radio. Como el eje magnético y el eje de rotación del pulsar no coinciden, los dos haces de ondas de radio que emergen de los polos, en un cono bastante estrecho, barren el cielo como si se tratara de la luz de un faro. Esto permite detectar el pulsar (nos llegan pulsos de ondas de radio) y conocer su periodo de rotación (separación entre los pulsos). En el caso del pulsar PSR 1913+16 se detectó que la frecuencia de los pulsos cambiaba y se repetía cada 8 horas, lo que indicaba que se trataba de un sistema binario: el pulsar giraba entorno a otra estrella (invisible) de modo que el efecto Doppler explica los cambios de la frecuencia recibida en virtud del alejamiento o acercamiento de la radiofuente. Los cálculos indicaron que la estrella compañera era otra estrella de neutrones que no se mostraba como pulsar (al menos no emite en nuestra dirección).

Se ha observado que el periodo de la órbita de este sistema binario va disminuyendo gradualmente. La energía que el sistema va perdiendo debe emitirse en forma de ondas gravitatorias en una cantidad que coincide, con una precisión del 0.5%, con la predicha por la teoría. Este hecho se considera la primera prueba de la existencia de las ondas gravitatorias. Existen multitud de experimentos, en curso o en proyecto, intentando detectar *directamente* las ondas gravitatorias utilizando diversas técnicas, pero aún sin resultados positivos.<sup>2</sup>

## 11.5 Agujeros negros

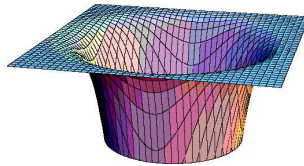


Figura 11.5: Esquema bidimensional del espaciotiempo alrededor de un agujero negro.

Los agujeros negros son una predicción de la teoría de Einstein. Un agujero negro es un objeto tan denso que el espaciotiempo a su alrededor está tan curvado que la luz no puede escapar de él (Fig. 11.5).

En la actualidad existen varios candidatos a ser un agujero negro. El más probable es Cygnus X-1, descubierto en 1973, compañero de una supergigante azul que orbita alrededor de un objeto invisible, y fuente muy intensa de rayos X. Se sospecha que las galaxias NGC 4258 y M87, y también todos los quasars, albergan un agujero negro. La principal pista suele ser la enorme velocidad del gas y el polvo que hay alrededor de objetos invisibles, y en consecuencia una fuerte emisión de radiación, señal de la existencia de un campo gravitatorio muy intenso.

<sup>2</sup>AIGO [<http://www.gravity.pd.uwa.edu.au>], GRAVITY-PROBE-B [<http://einstein.stanford.edu>], IGEC [<http://igec.inl.infn.it>], LIGO [<http://www.ligo.caltech.edu>], LISA [<http://lisa.jpl.nasa.gov>], TAMA [<http://tamago.mtk.nao.ac.jp>], VIRGO [<http://www.virgo.infn.it>].

Para entender *cómo se forma* un agujero negro, conviene repasar las etapas de la evolución estelar: (1) nubes de hidrógeno se condensan en cúmulos cada vez más densos y calientes por acción de la gravedad; (2) cuando la temperatura es suficientemente alta el hidrógeno se fusiona para dar helio, lo que libera energía, principalmente en forma de radiación electromagnética (nuestro Sol está actualmente en esta fase). La atracción gravitatoria está compensada por la presión debida a la agitación térmica; (3) Tras varios miles de millones de años el combustible (hidrógeno) se acaba y la estrella empieza a fusionar helio para producir elementos más pesados. La temperatura del núcleo sube y el tamaño aumenta (ésta es la fase de gigante roja); (4) Cuando todo el combustible se haya acabado hay tres posibilidades dependiendo de la masa de la estrella: (a) Si es menor que unas 8 masas solares, se va enfriando gradualmente radiando su energía térmicamente (enana blanca); (b) Si es mayor que 8 pero menor que unas 30 masas solares, la estrella pasa por la fase enana blanca pero la gravedad es tan fuerte que la estrella colapsa en una gran implosión (supernova) y, en el remanente, los protones y los electrones se funden formando neutrones (estrella de neutrones) que con frecuencia rota a gran velocidad (pulsar); (c) Si la masa es mayor que unas 30 masas solares, pasa también por la fase de estrella de neutrones y sigue colapsando. La atracción gravitatoria es tan fuerte que los neutrones quedan literalmente aplastados y la estrella forma un agujero negro.

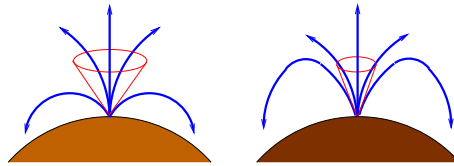


Figura 11.6: Los conos de luz que escapan de la superficie de estrellas más masivas son más estrechos.

Para entender *qué es* un agujero negro imaginemos los rayos de luz que en todas direcciones se emiten desde la superficie de una estrella muy masiva. Ya sabemos que sus trayectorias se curvan, de modo que los que salgan casi paralelos a la superficie acabarán cayendo de nuevo a la estrella y sólo hay un cono de rayos que contiene a los que pueden escapar. Si la estrella es aún más masiva el cono será más estrecho. Si la masa es suficientemente grande el cono se cierra a una determinada distancia del centro (*horizonte de sucesos*). Nada que esté en el interior a esta distancia podrá escapar jamás. El radio del horizonte de sucesos es el *radio de Schwarzschild* y aparece como la distancia a la que la métrica de Schwarzschild presenta una *singularidad*:  $r_S = 2G_N M/c^2$ . Debe notarse que la métrica de Schwarzschild es la solución de las ecuaciones de Einstein para el espacio vacío alrededor de un objeto de masa  $M$  y radio  $R$ . Por tanto la singularidad sólo es física, es decir el objeto *es* un agujero negro, si  $r_S > R$ , o sea, toda su masa está dentro del horizonte. Por curiosidad, el radio de Schwarzschild de un protón es  $10^{-50}$  cm (mucho menor que su radio,  $10^{-13}$  cm), el de la Tierra es 4.4 mm y el del Sol es 2.95 km. Ninguno de ellos es obviamente un agujero negro. Para terminar, se estima que la masa total del Universo es  $2 \times 10^{53}$  kg, de donde su radio de Schwarzschild es 32 mil millones de años-luz, que es algo mayor aunque muy parecido al tamaño del Universo (cuya edad es de unos 15 mil millones de años), si es que el Universo es cerrado. En ese caso, se podría decir que vivimos dentro de un agujero negro.