

La ingravidez de Einstein y el alumbramiento de otro Marconi

(Einstein's weightlessness and the birth of another Marconi)

Martín Martín, Jesús

Univ. de Salamanca

Area Física Teórica

Plaza de la Merced, s/n

37008 Salamanca

BIBLID [1137-4411 (1999), 5; 213-226]

La Teoría Einsteiniana de la Gravitación predice que el campo gravitatorio se puede propagar por el espacio a la velocidad de la luz, al igual que las ondas electromagnéticas. Ya nadie duda de esta predicción, pues se han observado sus efectos sobre el movimiento de algunas estrellas dobles. Esta conferencia pretende analizar esta fascinante historia, así como exponer los esfuerzos científicos realizados para poner de manifiesto la existencia de estas ondas gravitatorias.

Palabras Clave: Relatividad General. Ondas gravitatorias. Teorías Relativistas.

Einsteinen Grabitazioari buruzko Teoriak iragarritakoaren arabera, grabitazio-eremua argiaren abiaduran heda daiteke espazioan zehar, uhin elektromagnetikoak bezala. Egun inork ez du zalantzan jartzen iragarpen hori, zeren eta horren ondorioak behatu baitira zenbait izar bikoitzen higiduran. Historia liluragarri hori aztertzea da hitzaldi honen helburua, bai eta grabitazio-uhin horien existentzia agerian jartzeko buruturiko ahalegin zientifikoak azaltzea ere.

Giltz-Hitzak: Erlatibitate orokorra. Grabitazio-uhinak. Teoria erlatibistak.

Selon la Théorie d'Einstein sur la Gravitation, le champ de gravitation peut se propager dans l'espace à la vitesse de la lumière, de même que les ondes électromagnétiques. Plus personne ne met en doute cette théorie, puisque l'on a observé ses effets sur le mouvement de certaines étoiles doubles. Cette conférence prétend analyser cette fascinante histoire, et présenter les efforts scientifiques réalisés dans le but de mettre en évidence l'existence de ces ondes gravitationnelles.

Mots Clés: Relativité Générale. Ondes Gravitationelles. Théories Relativistes.

INTRODUCCIÓN

La teoría de la Gravitación de Einstein, comunmente llamada Teoría de la Relatividad General, introdujo serias modificaciones en la por todos conocida Ley de Newton de la Gravitación Universal. Estas modificaciones fueron en primer lugar de carácter conceptual, pues afectaban fundamentalmente a la estructura geométrica del espacio, que siempre se había supuesto obediente a las viejas reglas de Euclides. Ahora bien, cualquier teoría física, por encima de las modificaciones conceptuales que aporte, debe someterse tarde o temprano a la verificación experimental, bien a través de la búsqueda y contraste de los fenómenos que ella predice, o bien simplemente mediante la explicación directa de fenómenos previamente conocidos y no suficientemente comprendidos.

La Teoría de la Relatividad General, que no podía ser una excepción a esta situación, conoció pronto su primer éxito al explicar con gran precisión el avance secular suplementario observado, desde hacía mucho tiempo, en el perihelio de la órbita de Mercurio.

Pero además esta Teoría precedía dos importantes fenómenos no sospechados por la Ley de Newton:

- La desviación de los rayos luminosos al pasar cerca de un objeto celeste, tal como nuestro Sol.
- La propagación del propio campo gravitatorio (entendido como la perturbación producida en el espacio por los cuerpos celestes) justamente a la velocidad de la luz, como si de ésta misma se tratase y emulando por tanto la situación provocada el siglo pasado por la teoría de Maxwell y el consiguiente descubrimiento de las conocidas ondas Hertzianas, actualmente llamadas electromagnéticas.

La verificación de la desviación de los rayos luminosos procedentes de una estrella lejana por nuestro Sol fue pronto objeto de observación por parte de una famosa expedición protagonizada por A. S. Eddington, que concluyó con una nueva victoria de la teoría de Einstein.

En cuanto a la verificación experimental de la propagación del campo gravitatorio, a la manera de las ondas electromagnéticas, es una cuestión que actualmente todavía presenta algunas dificultades, más de ochenta años después del nacimiento de la teoría de Einstein. No obstante, ya nadie duda de la existencia de estas ondas gravitatorias, pues se han observado sus efectos sobre el movimiento de algunas estrellas dobles, y por otro lado se espera que su detección directa se produzca en los próximos años.

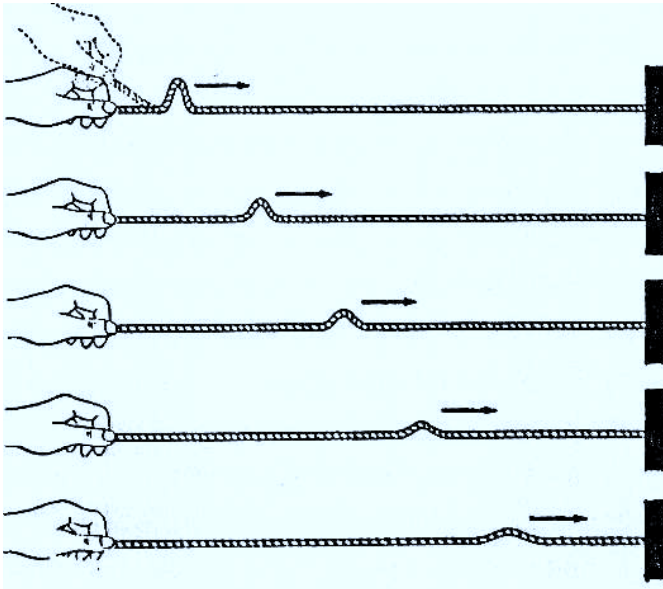
Esta conferencia pretende precisamente analizar someramente esta fascinante historia, así como exponer los esfuerzos científicos ya realizados y los proyectos actualmente en curso para poner de manifiesto la existencia de estas ondas y obtener la información que ellas nos aportan del Universo.

FENÓMENOS ONDULATORIOS: GENERALIDADES

De una manera simple se podría definir un “fenómeno ondulatorio”, o mejor aún una “onda”, como el *movimiento de un movimiento*. Sin embargo, los físicos prefieren decir que una onda es la *propagación a través del espacio de un cambio en una magnitud física*. De esta manera, no sólo se evita la sensación de haber utilizado un juego de palabras, sino que también se amplía el concepto de onda. En efecto, aunque en última instancia un “movimiento” es equivalente a una “propagación” o a un “cambio”, también es cierto que en el len-

guaje habitual se reserva la palabra movimiento para el desplazamiento de objetos materiales, mientras que las palabras propagación y cambio se aplican de una manera mucho más general. Según esto, el concepto de onda puede incluir, desde la propagación de las vibraciones producidas por un diapasón en las moléculas de aire circundante, hasta la propagación de la modificación de una costumbre a lo largo de un territorio por un mecanismo social complejo, pasando por la propagación de un campo eléctrico variable creado por un sistema de cargas eléctricas oscilantes.

Como es natural los fenómenos ondulatorios se pueden estudiar con más sencillez cuando las magnitudes físicas que intervienen son de carácter mecánico, ya que entonces su visualización no entraña dificultad alguna. Así por ejemplo, si damos una sacudida transversal a un extremo de una cuerda tensa resulta que la sacudida se propaga a lo largo de la misma. En este caso se propaga el movimiento transversal de las partículas de la cuerda, o de manera más precisa, el cambio de la magnitud física definida por la posición de las partículas de la cuerda respecto de la recta ocupada inicialmente por ésta (fig. 1).

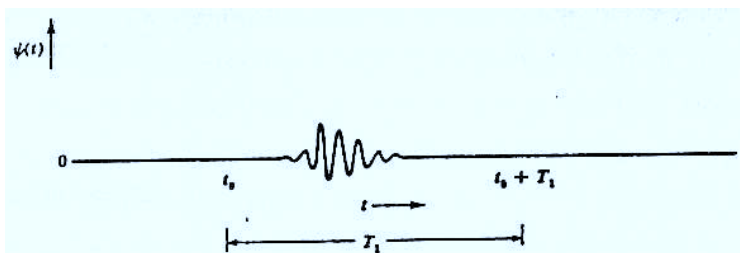


En el ejemplo anterior la magnitud física cuyo cambio se propaga (desplazamiento vertical) es transversal a la dirección de propagación, razón por la que se dice que se trata de una *onda transversal*. Esta transversalidad se puede generalizar de manera simple suponiendo que la sacudida inicial aplicada a la cuerda incluye movimientos en todo el plano transversal. En este caso, sin embargo, es necesario un segmento orientado para definir el desplazamiento de las partículas de la cuerda en cada instante, segmento que recibe el nombre de *vector polarización* de la onda transversal. Cuando la curva descrita por el extremo de este segmento es conocida se dice que la polarización de la onda transversal está bien definida. Así, en el caso en que las partículas de la cuerda se mueven únicamente sobre la recta vertical, se dice que la onda está *polarizada linealmente*. Sin embargo, si la sacudida inicial produce movimientos aleatorios en el plano transversal se dice que la onda no está polarizada.

En ocasiones la magnitud física que interviene en el fenómeno ondulatorio está representada por un segmento orientado que se mantiene paralelo a la dirección de propagación de la onda. En este caso se habla de *ondas longitudinales* y como es lógico no tiene sentido introducir el concepto de polarización. El ejemplo más notable es el de las *ondas sonoras*, que describen en particular la propagación de las vibraciones de las moléculas de un medio elástico.

Un concepto de interés en relación con los fenómenos ondulatorios es el de *frentes de onda*. Para definirlos conviene tener en cuenta que en el caso general la magnitud física asociada a una onda no tiene por qué ser un simple desplazamiento y además podrá tomar valores en una región amplia del espacio. Se definen entonces los frentes de onda como las superficies formadas por el conjunto de puntos del espacio que en un instante dado tienen el mismo valor de la magnitud asociada a la onda. El caso más sencillo es aquel en que estas superficies son planos perpendiculares a la dirección de propagación. En estas circunstancias se habla de *ondas planas*.

La representación gráfica de la magnitud física que se propaga depende de la fuente generadora de la onda. Así, por ejemplo, en el caso de la sacudida sobre el extremo de una cuerda tensa tiene la forma de montaña alta y estrecha y recibe el nombre de *pulso* o también *onda impulsiva*. En general, se dice que una onda es de este tipo si en cada punto solamente es diferente de cero en un pequeño intervalo de tiempo (fig. 2). Por el contrario se dice que una onda es *entretendida* si en cada punto es diferente de cero en un amplio intervalo de tiempo.



En cualquier caso y de acuerdo con un teorema debido a J. B. Fourier, toda onda genérica se puede considerar como una superposición de ondas planas particulares denominadas *sinusoidales*. Este tipo de ondas planas presentan una doble periodicidad: por un lado tienen una periodicidad temporal y por otro una periodicidad espacial. La inversa del período temporal recibe el nombre de *frecuencia* de la onda, mientras que el período espacial se denomina *longitud de onda*. El cociente entre ambas periodicidades determina la velocidad de propagación de la onda.

Según esto una onda genérica “contiene” en principio todas las longitudes de onda posibles, o si se quiere todas las frecuencias posibles, ahora bien, una onda concreta puede tener un espectro de frecuencias relativamente restringido. En particular las ondas entretenidas poseen un espectro de frecuencias mucho más rico que las ondas impulsivas.

ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS

El fenómeno ondulatorio por excelencia es sin lugar a dudas el de las ondas electromagnéticas. Como su nombre indica, representan la propagación a través del espacio de un campo electromagnético que cambia con el tiempo. Además, constituyen una piedra angu-

lar en la física de nuestros días, pues están presentes directa o indirectamente en la mayor parte de los experimentos de precisión que se realizan en la actualidad, amén de ser imprescindibles en la organización social moderna.

La importancia de estas ondas en este contexto radica en que constituyen un magnífico ejemplo para la comprensión posterior de las ondas gravitatorias. Conviene recordar, pues, que una carga eléctrica produce un campo eléctrico, y cuando está en movimiento genera además un campo magnético, los cuales en ciertas condiciones se propagan a la velocidad de la luz, siendo la esencia de las ondas electromagnéticas. Recordemos también que la luz, las ondas de radio, la radiación infrarroja, los rayos X, etc., son manifestaciones de estas ondas para diferentes valores de la longitud de onda.

Cuando un sistema de cargas emite radiación electromagnética pierde una cierta cantidad de energía por unidad de tiempo, que es la que después transportan las ondas emitidas. Esta energía se puede obtener a partir del campo radiante calculando el flujo energético a través de una superficie cualquiera que envuelva a la fuente. El resultado de este cálculo conduce (para la aproximación más baja, denominada *aproximación dipolar*) a la siguiente pérdida de energía por unidad de tiempo:

$$\frac{dE}{dt} = - \frac{2}{3c^3} \ddot{\vec{d}}^2 \quad , \quad (1)$$

siendo c la velocidad de la luz y donde \vec{d} representa el momento dipolar eléctrico del sistema de cargas; los dos puntos situados encima significan doble variación con respecto al tiempo.

LA GRAVITACIÓN DE EINSTEIN: RELATIVIDAD GENERAL

La Teoría de la Gravitación de Einstein, también llamada Relatividad General, es una generalización de la conocida Teoría de la Gravitación de Newton, cuyo enunciado esencial afirma simplemente, como es bien sabido, que los cuerpos celestes se atraen en razón directa del producto de sus masas y en razón inversa del cuadrado de su distancia. Esto significa que la fuerza ejercida sobre un cuerpo 1 por otro cuerpo 2 viene dada por:

$$F_{12} = G \frac{M_1 M_2}{r^2} \quad , \quad (2)$$

donde G es una constante universal y donde M_1 y M_2 representan las masas gravitatorias de los cuerpos considerados, es decir, unos parámetros característicos de los mismos que son los que originan dicha interacción (similares a las cargas eléctricas, que dan lugar a la interacción electromagnética).

Para nuestros propósitos, sin embargo, es mejor recordar la teoría newtoniana en el lenguaje de campos, que se puede resumir como sigue. Se supone que todo objeto celeste de masa M_c crea un *campo gravitatorio*:

$$\mathcal{G} = G \frac{M_c}{r^2} \quad , \quad (3)$$

A partir de este campo gravitatorio se puede calcular la fuerza ejercida sobre un cuerpo de prueba de masa M mediante la expresión

$$F \equiv M\mathcal{G} \quad (4)$$

El movimiento del cuerpo de prueba se determina entonces, como es habitual, utilizando la segunda ley de Newton:

$$M\ddot{G} = F = ma \quad (5)$$

donde a representa la aceleración y m la masa inerte del cuerpo, es decir, la propiedad que mide la resistencia del mismo a cambiar de velocidad. Así pues, en principio, la aceleración del cuerpo de prueba depende del cociente M/m .

La Relatividad General, por su parte, no se puede resumir de una manera tan sencilla y además exige el conocimiento de técnicas matemáticas de cierta altura, lo que le ha conferido una merecida fama de ser complicada. No obstante y a los efectos que aquí interesan, es posible entender con cierta sencillez los aspectos más destacables de la generalización que introduce esta teoría, con respecto a la de Newton, si hacemos para ello una comparación de tipo cualitativo con la teoría electromagnética de Maxwell.

En la teoría de Maxwell los agentes que generan el campo electromagnético son las cargas eléctricas, produciéndose situaciones distintas según que estas cargas estén en reposo, se muevan con velocidad constante o posean un movimiento acelerado.

- En el primer caso generan un campo eléctrico de tipo coulombiano absolutamente similar al gravitatorio de Newton, de manera que basta cambiar cargas eléctricas por masas gravitatorias (amén de efectuar un cambio de signo) para pasar de uno a otro.
- En el segundo caso, cuando las cargas se mueven con velocidad constante, además del campo eléctrico aparece un campo magnético, cuyo efecto más notable es introducir una fuerza suplementaria sobre aquellas otras cargas que también se encuentran en movimiento.

Esta situación no tiene parangón en la teoría de Newton pues las masas en movimiento no generan una fuerza añadida a la gravitatoria habitual. Sin embargo, en el marco de la Relatividad General cuando las masas se mueven aparece, además del campo newtoniano habitual, un campo “extranewtoniano”, que da lugar a una fuerza suplementaria sobre otras masas móviles similar a la fuerza magnética. Dicha fuerza es de la misma naturaleza que la conocida fuerza de Coriolis que actúa sobre un objeto en movimiento situado en una plataforma giratoria, razón por la que a dicho campo extra se le suele llamar campo de Coriolis.

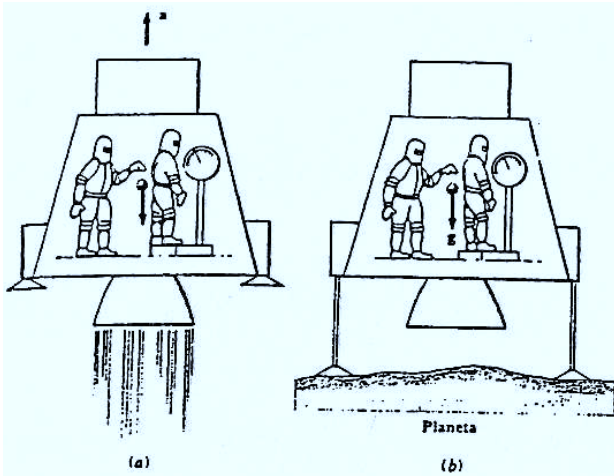
- Finalmente, cuando las cargas eléctricas se aceleran, parte de los campos eléctricos y magnéticos que generan se propaga a la velocidad de la luz, dando lugar a las ondas electromagnéticas. Pues bien, la Relatividad General también predice que cuando se acelera fuertemente un sistema de masas, se produce la propagación de un campo que ni siquiera tiene equivalencia en electromagnetismo (campo de “deformación”), dando lugar a un nuevo tipo de ondas llamadas *ondas gravitatorias*. Estas ondas, al igual que las electromagnéticas, también transportan energía y viajan a la velocidad de la luz, aunque suelen ser de una intensidad notablemente inferior, ya que en situaciones comparables la interacción gravitatoria es muchísimo más débil que la electromagnética.

Principio de equivalencia

La clave primera para construir la Relatividad General, y concluir en las ideas anteriores, la obtuvo Einstein a partir de un hecho admitido desde los tiempos de Newton. Se trata de la igualdad numérica entre la masa gravitatoria y la masa inerte de un cuerpo arbitrario, igual-

dad que se verificó con gran precisión en la época del propio Einstein por el físico húngaro Roland von Eötvös. Esta circunstancia da lugar a que, según la fórmula (5), cualquier cuerpo se mueva con la misma aceleración en un mismo campo de gravitación, propiedad esta que diferencia a la interacción gravitatoria de cualquier otra conocida.

La idea genial de Einstein consistió en darse cuenta de que las fuerzas de inercia, que aparecen en un sistema de referencia no inercial, también tienen la propiedad anterior, por lo que estos sistemas de referencia deben ser en algún sentido equivalentes a los campos de gravitación. Esta afirmación se conoce con el nombre de *Principio de Equivalencia* y es la base del conocido ejemplo del "ascensor de Einstein", habitáculo de ficción que viaja por el espacio interestelar con aceleración constante igual a la de la gravedad terrestre, de manera que una persona situada en su interior no puede distinguir si se encuentra en el ascensor o sobre la superficie terrestre (fig. 3). Resulta pues que, según el Principio de Equivalencia, siempre es posible "generar" un campo de gravitación *ficción* sin más que situarse en un sistema de referencia acelerado.

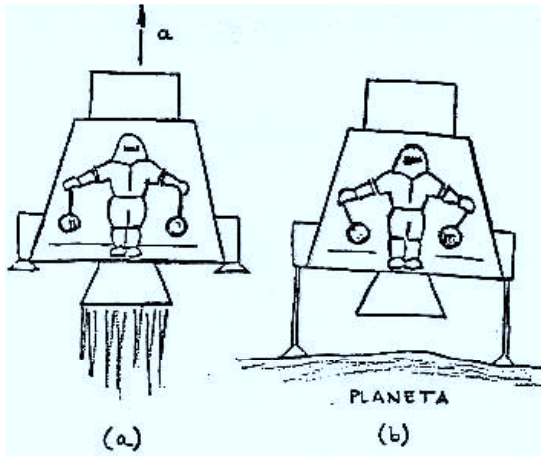


Recíprocamente, y también según el mismo principio, debe ser posible "eliminar" un campo de gravitación *real* situándose en sistemas de referencia adecuados. Estos sistemas de referencia no son otros que los de *caída libre*. En efecto, imaginemos que un observador, junto con sus instrumentos de medida, se deja caer desde una torre elevada. Como las condiciones iniciales son idénticas para todos los elementos del conjunto, el observador y los instrumentos caen continuamente con la misma velocidad, por lo que éste tiene una sensación de "flotación", es decir, de que no existe campo de gravitación. La situación es similar en el interior de un satélite artificial en órbita alrededor de la Tierra, pues también se trata de un sistema en caída libre, aunque con condiciones iniciales diferentes.

En el lenguaje matemático se diría que un campo de gravitación está definido por una geometría pseudoriemanniana sobre el espacio-tiempo. Notemos además que, otra vez según dicho principio, las trayectorias de estas partículas deben de estar determinadas por las "rectas" de esta geometría, ya que en un sistema de referencia inercial serían libres y por tanto describirían rectas de espacio-tiempo.

Falta por precisar hasta donde alcanza la equivalencia entre un campo de inercia y un campo de gravitación. Desde un punto de vista físico se puede aclarar mejor el alcance del

Principio de Equivalencia si analizamos con detalle un ascensor de Einstein o un sistema de referencia en caída libre ("flotación"). En efecto, si en un ascensor de Einstein "colgamos" dos péndulos resulta que sus cuerdas estarán perfectamente paralelas. Ahora bien, si en realidad el ascensor es un laboratorio sobre la superficie de un planeta, los péndulos apuntarán hacia el centro del mismo, por lo que las cuerdas serán ligeramente convergentes (fig. 4), convergencia que será tanto más apreciable cuanto más alejados estén los péndulos entre sí. Análogamente, para un observador que se deja caer desde lo alto de un edificio, sus instrumentos de medida no están en reposo relativo, ya que en realidad todos caen hacia el centro de la Tierra y por tanto se aproximan unos de otros en el transcurso del tiempo. Concluimos así que el Principio de Equivalencia es un principio de carácter *local*, es decir, estrictamente hablando sólo es aplicable a zonas reducidas del espacio-tiempo.



Matemáticamente se pone de manifiesto este carácter local del Principio de Equivalencia calculando la aceleración relativa de dos partículas de prueba que se mueven sobre "rectas" próximas. Esta aceleración, que recibe el nombre de *desviación geodésica*, resulta ser proporcional a un objeto matemático llamado tensor de curvatura, cuya existencia marca la diferencia entre un campo de gravitación y un campo de inercia. Otra manera de decirlo es que la gravitación relativista se caracteriza porque provoca una curvatura del espacio-tiempo, de manera similar a la superficie de una esfera o de una silla de montar.

Las fuerzas que provocan esta aceleración relativa se llaman *fuerzas de marea*, ya que son las responsables de las mareas terrestres, las cuales se producen como consecuencia de que los campos gravitatorios de la Luna y el Sol varían de un punto a otro de la Tierra. Notemos que en virtud del Principio de Equivalencia las mareas serían despreciables si la Tierra fuera muy pequeña.

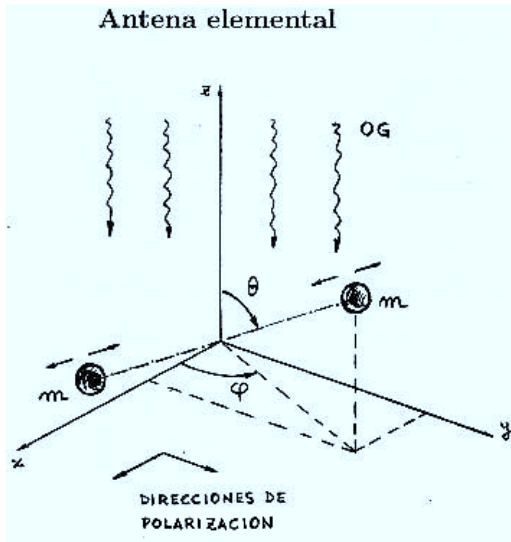
ONDAS GRAVITATORIAS LINEALES

Desde un punto de vista conceptual La Relatividad General introdujo modificaciones esenciales en la teoría de la gravitación de Newton, sin embargo las correcciones introducidas en las medidas observacionales han sido muy pequeñas. En caso contrario no hubiera sido posible que la teoría de Newton consechara tantos éxitos científicos a lo largo de más de doscientos años.

Por estas razones parece natural suponer que en el ámbito astronómico habitual la gravitación no es lo suficientemente intensa como para “curvar” excesivamente el espacio-tiempo. En consecuencia, y a efectos prácticos, basta estudiar la teoría de Einstein en la llamada aproximación lineal, en la que la gravitación de Einstein sigue un camino casi paralelo al electromagnetismo de Maxwell. En particular se concluye que un campo gravitatorio variable se propaga a la velocidad de la luz, dando lugar a las *ondas gravitatorias*.

Al igual que las ondas de radio se detectan con una antena conductora, sobre la que se inducen corrientes eléctricas, las ondas gravitatorias se detectan por las fuerzas de marea que se inducen sobre un sistema de masas. Consideremos, por ejemplo, dos partículas en reposo a una distancia l_0 y orientadas según indica la fig. 5. Si ahora incide una onda plana en la dirección del eje z , se ejerce sobre ellas una fuerza de marea que da lugar a una variación de la distancia, variación que está controlada por la fórmula de la desviación geodésica. Así, la distancia $l(t)$ tiene una expresión del tipo

$$l(t) = l_0 + \text{algo} \tag{6}$$



Notemos que un dispositivo de este tipo constituye una antena idealizada para la detección de dichas ondas.

Al igual que en el caso electromagnético, se puede calcular la energía perdida por la fuente como consecuencia de la emisión de ondas gravitatorias. Este cálculo da como resultado:

$$\frac{dE}{dt} = - \frac{G}{45c^5} \ddot{Q}_{ij} \ddot{Q}^{ij} \tag{7}$$

Esta fórmula es muy similar a la expresión que proporcionaba la pérdida de energía de un sistema de cargas por radiación electromagnética. Sin embargo, presenta tres diferencias notables que conviene comentar. En primer lugar aquí interviene el momento cuadrupolar de la fuente en vez del momento dipolar, pues este último siempre es cero en el caso gravitatorio debido a la ausencia de “masas negativas”. En segundo lugar aparece una derivada ter-

cera con respecto al tiempo y no una derivada segunda, lo que indica que la emisión de ondas gravitatorias exige cambios muy bruscos en la configuración de la fuente. Por último, en este caso la pérdida de energía es inversamente proporcional a la potencia quinta de la velocidad de la luz, mientras que en el caso electromagnético dicha potencia era únicamente la tercera. Esto significa que la pérdida de energía por radiación gravitatoria sólo será apreciable cuando se produzca un cataclismo verdaderamente gigantesco.

Para hacerse una idea de los órdenes de magnitud que intervienen en la emisión de ondas gravitatorias, consideremos una fuente generadora sencilla, como es una masa M que oscila en torno a una posición de equilibrio con amplitud A y frecuencia angular ω [1].

Si tomamos una masa de una tonelada, una frecuencia de 1000 ciclos por segundo y una amplitud de un milímetro, es decir,

$$M = 10^3 \text{kg} \quad , \quad \omega = 2\pi 10^3 \text{Hz} \quad , \quad A = 10^{-3} \text{m} \quad (8)$$

la señal sería tan extraordinariamente pequeña que si pretendiéramos detectarla mediante la antena elemental considerada más arriba, situándola a un metro de la fuente anterior, nos encontraríamos con que deberíamos ser capaces de medir desplazamientos relativos del siguiente orden

$$\frac{\delta l}{l_0} = \frac{l(t) - l_0}{l_0} \approx h_+ \approx 3 \times 10^{-40} \quad (9)$$

es decir, ser capaces de medir el diámetro de la Vía Láctea con la precisión de una millonésima del radio nuclear. Por otro lado, la fracción de energía gravitatoria emitida por el oscilador es de 10^{-44} en cada oscilación, es decir, a lo largo de toda la vida del Universo esta fuente sólo habría emitido una parte en 10^{27} de su energía original.

Fuentes de ondas gravitatorias

A la vista de los resultados anteriores, es evidente que una onda gravitatoria sólo tendrá una intensidad importante si tiene su origen en un fenómeno astronómico que involucre enormes cambios de masa y energía. Sin embargo, desde el punto de vista de su detección en un laboratorio terrestre, debemos tener en cuenta que la señal puede llegar extremadamente debilitada como consecuencia de la lejanía de la fuente. Por esta razón, cuando se pretende analizar los tipos de fuente presuntamente interesantes, es necesario considerar la amplitud de la señal correspondiente cuando llega a la Tierra y también el ritmo con que se produce el fenómeno, pues carecería de interés esperar, por ejemplo, dos o tres siglos entre dos fenómenos consecutivos.

El fenómeno que se considera mejor candidato para la emisión de ondas gravitatorias y su posterior detección en el Tierra es el de las *supernovas*. Este fenómeno no es otra cosa que la explosión de una estrella ordinaria en su fase final, cuando, después de haber agotado todo su combustible nuclear, colapsa violentamente dando lugar a una enana blanca o a una estrella de neutrones. Se supone que este colapso no es perfectamente esférico y que durante un breve lapso de tiempo emite una importante cantidad de radiación gravitatoria, capaz de producir un efecto sobre la antena muchísimo mayor que (9). Consideraciones de carácter muy general, y por tanto sin excesivas garantías, predicen que estos fenómenos se producen en el cúmulo de galaxias de Virgo con una frecuencia cuasi diaria y en el Grupo Local una vez cada pocos años, en cuyo caso cabría esperar una señal bastante asequible para nuestros detectores.

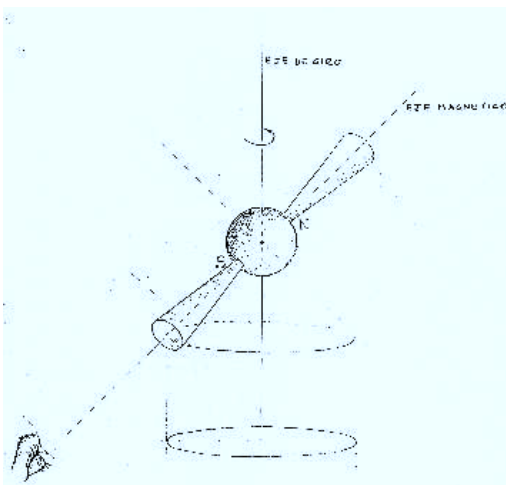
Los detectores terrestres actuales, basados en la resonancia mecánica de un objeto extenso como consecuencia de las fuerzas de marea, no han permitido todavía poner en evidencia la existencia de ondas gravitatorias. Esto es debido fundamentalmente a la debilidad de las señales esperadas, lo que exige una sensibilidad que sobrepasa la capacidad tecnológica actual. Sin embargo, la nueva generación de detectores, previstos para dentro de una década, pretende medir los efectos de marea de las ondas gravitatorias mediante métodos interferométricos, procedimiento que seguramente proporcionará la sensibilidad exigida. En particular existe un proyecto de situar en órbita alrededor del sol un gran detector interferométrico, objetivo que podría ser la gran esperanza en esta aventura de la detección de ondas gravitatorias.

En cualquier caso ya se tiene una evidencia indirecta de la existencia de tales ondas a través de las observaciones realizadas por Hulse y Taylor [3] en un objeto celeste muy particular. La importancia de este trabajo, que ha merecido el premio Nobel de Física del año 1993, merece también una exposición independiente.

El púlsar PSR 1913+16

Los púlsares son estrellas muy compactas (su densidad es similar a la del núcleo atómico) y con una masa de aproximadamente 1.4 masas solares. Consecuentemente tienen un tamaño muy reducido, que no excede de unas pocas decenas de kilómetros. Por otro lado tienen dos propiedades importantes que les son características.

- En primer lugar giran rápidamente, con una velocidad de rotación que oscila entre unas pocas vueltas por segundo y varias centenas. Como es fácil de comprender esas impresionantes velocidades de rotación sólo son posibles en estrellas que tienen la densidad citada, y por tanto una intensidad del campo gravitatorio sobre la superficie extremadamente elevada, pues de otro modo se desintegrarían por la simple acción de la fuerza centrífuga.
- La segunda propiedad importante de los púlsares es que poseen un campo magnético al igual que nuestra Tierra, pero con una intensidad que sobrepasa ampliamente los valores imaginables.



Las dos características descritas provocan que los púlsares emitan una intensa radiación electromagnética en la dirección de su eje magnético con un alto grado de focalización, de manera que podemos imaginar que la radiación sale por dos conos muy estrechos orientados según el Norte y el Sur Magnéticos de la estrella. Ahora bien, como en el caso de la Tierra, el eje magnético no coincide con el eje de giro, con lo cual los conos estrechos de radiación describen a su vez un cono en torno al eje de rotación, y si da la casualidad de que en esta precesión uno de los conos estrechos barre la Tierra (fig. 6), nosotros detec-

taremos una señal electromagnética de tipo impulsivo en cada vuelta de la estrella alrededor de su eje, fenómeno que justifica el nombre de púlsares atribuido a este tipo de estrellas. La duración y el aspecto del impulso electromagnético recibido en la Tierra dependen respectivamente de la abertura y de la forma de los haces de radiación.

El púlsar PSR1913+16 fue descubierto por Hulse y Taylor en 1974. El código numérico significa que se trata de un objeto situado en un punto de la esfera celeste cuyas coordenadas astronómicas son 19 horas y 13 minutos de Ascensión Recta y 16 grados de Declinación Norte (positiva), lugar que pertenece a la constelación del Aguila. La duración del impulso electromagnético que emite es de 8 milisegundos y su aspecto (representación de la intensidad de la señal en función del tiempo) el de una pareja de montículos muy picudos separados por un valle, lo que indica que el cono estrecho de radiación no es simplemente conexo, es decir, se trata de un cono hueco. Además, este impulso se repite aproximadamente cada 59 milisegundos, de donde se deduce fácilmente que la estrella gira a razón de 17 vueltas por segundo.

- La primera propiedad fundamental del PSR1913+16 es la extraordinaria estabilidad de la duración, aspecto y período de los impulsos electromagnéticos que emite, lo que le convierte en un reloj de precisión capaz de competir con los mejores relojes atómicos utilizados en la Tierra. Esta propiedad es importante si se tiene en cuenta que el púlsar está seguramente sometido a enormes tensiones centrífugas como consecuencia de la alta velocidad de rotación, y por tanto con tendencia a serias perturbaciones en sus características internas.
- La segunda propiedad fundamental del PSR1913+16 es que forma parte de un sistema binario, es decir, una pareja de estrellas que describen órbitas elípticas en torno al Centro de Masas del sistema, circunstancia por otro lado bastante frecuente en estrellas de tipo corriente. La presencia de la estrella compañera es detectable únicamente gracias al movimiento del púlsar protagonista, ya que desde la Tierra no se detecta ninguna señal electromagnética emitida por ella. Se trata probablemente de otro objeto de características similares, pero cuyos haces estrechos de radiación no barren la Tierra. Su masa es muy similar a la del púlsar, por lo que las dos órbitas resultan ser también muy parecidas, circunstancias que, unida a una elevada excentricidad de las mismas, conduce a unas variaciones muy importantes en la velocidad de ambos objetos en el transcurso de un período orbital, cuyo valor es aproximadamente de 7 horas y tres cuartos. En cuanto a la inclinación del plano orbital del sistema con respecto a la línea de visión desde la Tierra es de unos 44 grados.

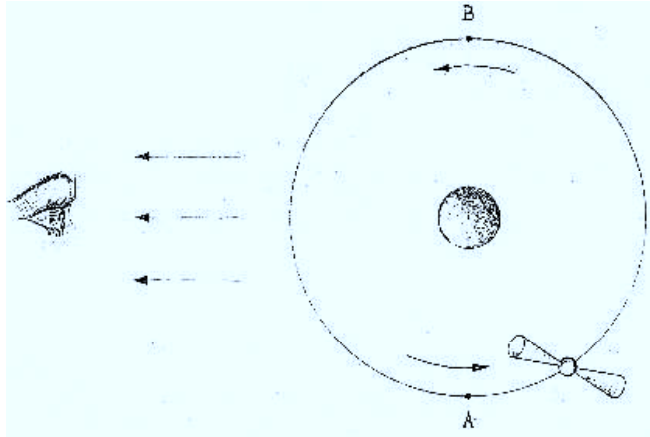
Las dos propiedades anteriores del PSR1913 + 16 se complementan de una manera sutil, dando lugar a que Hulse y Taylor hayan podido poner en evidencia que el sistema binario donde está integrado este púlsar emite ondas gravitatorias. En este contexto las observaciones de Hulse y Taylor constituyen la primera prueba, aunque indirecta, de la presencia de tales ondas en la Naturaleza.

Como ya se ha indicado más arriba, los componentes del sistema binario PSR1913 + 16 sufren fuertes aceleraciones en su movimiento, con lo cual, de acuerdo con lo expuesto en el epígrafe anterior, este sistema debe de emitir energía en forma de radiación gravitacional debido a las variaciones bruscas de su momento cuadrupolar. Ahora bien, si esto es cierto, la pérdida de energía correspondiente se traducirá en una aproximación de las órbitas de los componentes del sistema, y consecuentemente en una disminución de los períodos orbitales de los mismos. Precisamente es esta disminución del período orbital lo que han medido Hulse

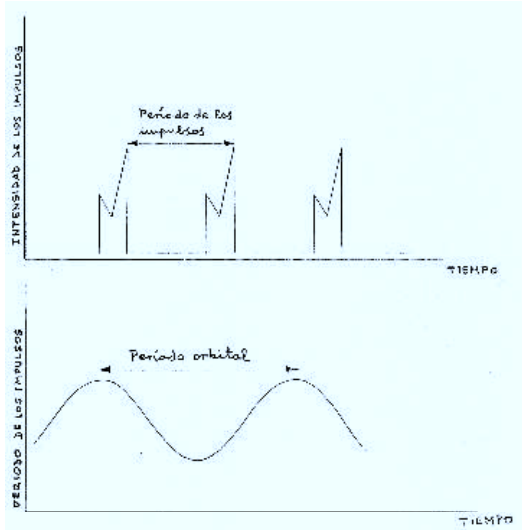
y Taylor, obteniendo resultados acordes con las predicciones de la Relatividad General y poniendo así de manifiesto la emisión de ondas gravitacionales.

Para explicar el mecanismo mediante el cual se ha podido realizar la medida anterior vamos a simplificar la situación. Imaginemos en primer lugar que la masa de la estrella compañera del púlsar es muy superior a la de éste, de manera que aquella permanece quieta y el púlsar describe una órbita a su alrededor.

Supondremos además que esta órbita es circular y que el plano en que está contenida también contiene a la línea de visión desde la Tierra (fig. 7). Según este esquema, cuando el púlsar se aleja de la Tierra se debe producir, por efecto Doppler, una disminución de la frecuencia de recepción de los impulsos electromagnéticos del púlsar.



Por el contrario, cuando el púlsar se acerca a la Tierra el mismo efecto Doppler provocará un aumento en la frecuencia de recepción de estos impulsos. Estas variaciones en el período entre los impulsos electromagnéticos recibidos en la Tierra tendrán la periodicidad orbital, de manera que una medición de las mismas indica no solamente el movimiento del púlsar, sino también su período orbital (fig. 8). Notemos que el proceso descrito no tiene sentido en el supuesto de que el plano de la órbita sea perpendicular a la línea de visión desde la Tierra, por lo que la inclinación que tiene realmente el sistema binario de Hulse y Taylor debe de considerarse como otra de las propiedades notables del mismo.



Una vez que se conoce el período orbital del púlsar es fácil verificar si se mantiene constante o no en el transcurso del tiempo. Pues bien, desde el descubrimiento de este objeto en 1974 hasta el presente, lo que representa más de 20 años, se ha podido detectar una disminución en dicho período de aproximadamente unos 14 segundos, cantidad que concuerda de una manera impresionante con la predicha por la teoría de Einstein.

Resumiendo, se puede afirmar que las observaciones de Hulse y Taylor constituyen un ejemplo de investigación experimental de alta precisión y con una proyección teó-

rica de gran alcance, pues coloca la última guinda que le faltaba a la teoría de la Relatividad General de Einstein. Además, a mi juicio, reafirman las esperanzas depositadas en el éxito futuro del proyecto de construcción de detectores interferométricos de ondas gravitatorias, que sin duda abrirán el paso a la Astronomía Gravitacional, es decir, la observación del Cosmos mediante este tipo de ondas en sustitución de las electromagnéticas. Este avance, si se produce, permitirá el acceso a una información inédita del Universo, pues las ondas gravitacionales no se detienen ante casi ningún obstáculo intermedio entre la fuente y el detector, mientras que las ondas electromagnéticas son absorbidas en buena medida por todos los objetos celestes.

BIBLIOGRAFÍA

- (1) José ALBERT LOBO. "Radiació gravitatòria". Revista de física, n.2 (1992). Societat catalana de Física.
- (2) José ALBERT LOBO. "La radiación gravitatoria". Revista Española de Física, 8 n. 1 y 2 (1994). Real Sociedad española de Física.
- (3) Jesús MARTÍN. "Nobel de Física. Púlsares y relatividad general". Investigación y Ciencia, febrero, 1994.