



MAX-PLANCK-GESELLSCHAFT

Isaac Newton no paseaba por el paraíso, sino en un parque inglés. Sin embargo, una manzana apareció en su camino. Más precisamente se estrelló sobre su cabeza. ¿O acaso rodó frente a sus pies? Es difícil decirlo. Incluso, puede ponerse en duda que la historia de la manzana sea cierta. Pero como la mayoría de las leyendas, por lo menos ésta también fue bien armada. En 1728 Henry Pemberton la relata por primera vez en su biografía sobre el famoso físico. El hecho es que la Universidad de Cambridge

Así comienza a mediados del Siglo XVII la historia de la gravedad: esa fuerza que alcanza todos los rincones del universo y que apuntala al mundo.

Más precisamente: "Dos masas puntuales se atraen con una fuerza que es directamente proporcional al producto de las masas, e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que las separa". **La ley de gravedad de Newton** se lleva muy bien con nuestros quehaceres diarios. Explica de

El cosmos vibra

Cómo los investigadores perciben las ondas gravitacionales

permaneció cerrada desde 1665 hasta 1666 debido a la peste, y el profesor tenía mucho tiempo para pensar. Sea como fuere, el día de la manzana fue "fructífero" para Newton. Durante esa jornada habría llegado a la idea de que detrás del movimiento de una piedra lanzada al aire, la órbita de la luna alrededor de la tierra o, justamente, una manzana que cae al suelo, se esconde el mismo fenómeno físico: la fuerza de la gravedad.

igual manera, porque la Tierra gira alrededor del sol, y los teléfonos celulares, obviamente los más caros, siempre caen al piso y se rompen. Hasta aquí todo estaría bien, si no fuera por un defecto: la ley de la gravedad no es absoluta.

Cuando los astrónomos en el Siglo XIX observaban el curso de los astros con herramientas cada vez mejores, se dieron cuenta de que el punto de la órbita de Mercurio más cercano al sol (perihelio) se mueve en el espacio.



A

► **Colisión cósmica: las ondas gravitatorias se producen cuando dos agujeros negros se chocan o bailan uno alrededor del otro – aquí simuladas por un ordenador.**

→ Sin embargo, este efecto se produce en todos los planetas, porque se atraen mutuamente. La **rotación del perihelio de Mercurio** mostró ser muy clara y más fuerte de lo que podría esperarse de acuerdo a la física Newtoniana: por siglo, asciende a 1/80 grados.

¿Estaría actuando un cuerpo celeste desconocido? ¿O es que acaso la estructura de la teoría gravitacional clásica tenía un defecto de construcción? En 1907, en la Oficina de Patentes de Berna, un "experto clase B" piensa intensamente sobre la gravedad. Dos años antes ha presentado cinco trabajos en la revista "*Anales de la Física*", una de las cuales se llamó "Sobre la electrodinámica de los cuerpos en movimiento". En el ensayo, el investigador de tiempo libre sacude los cimientos de la física tanto como en la agenda de tres hojas titulada "¿Depende la inercia de un cuerpo de su contenido energético?" Las dos obras más tarde son denominadas **Teoría de la Relatividad Especial**. El genial autor se llama Albert Einstein y 1905 es considerado como su *annus mirabilis* (año extraordinario). El 20 de julio celebra sus trabajos con su esposa Mileva. En una postal a su amigo Conrad Habicht, describe el final de la desenfadada celebración: "Totalmente borrachos los dos debajo de la mesa".

La Teoría de la Relatividad Especial rompe, entre otras cosas, el dogma Newtoniano del tiempo absoluto, y refuta la afirmación de que las velocidades se suman en forma directa. Por otra parte, según la teoría de Newton, el cambio en el efecto gravitacional

de un cuerpo debería ser apreciable en todo el universo. Esto significa que la gravedad actúa de forma instantánea en todas partes. Esa idea no se hermanaba muy bien con la declaración de Einstein, según la cual, habría un límite de tiempo natural para la propagación de la influencia de fuerzas de cualquier tipo: la velocidad de la luz ($c = 300.000 \text{ km/s}$). Así, el físico se propuso construir las leyes de la gravedad sobre una nueva base. Más tarde recordó: "Fue en 1907, cuando tuve el pensamiento más feliz de mi vida... El campo gravitatorio sólo tiene una existencia relativa, ya que para un observador que cae libremente desde el techo de una casa, no existe ningún campo gravitatorio (al menos en su entorno). En realidad, todo objeto arrojado por el observador permanece en el estado de reposo o movimiento uniforme, independientemente de su naturaleza química o física".

EL PENSAMIENTO DE EINSTEIN

El truco de Einstein se deja explicar en términos simples: él simula la gravedad por medio de la aceleración ya que esta última también genera fuerzas, como ocurre por ejemplo, en un ascensor que se arranca bruscamente. Si la cabina fuera acustizada y hermética a la luz, los pasajeros podrían creer que la gravedad de la Tierra aumentó de repente. Pero ¿es la gravedad en realidad una fuerza, como propuso Newton? El descubrimiento de que la gravedad es, al menos en parte, una cuestión del sistema de referencia, lleva a Albert Einstein a las revolucionarias ideas que publica en 1915, después de ocho años de trabajo: **la Teoría de la Relatividad General**. A partir de ella, surgen minúsculas desviaciones en

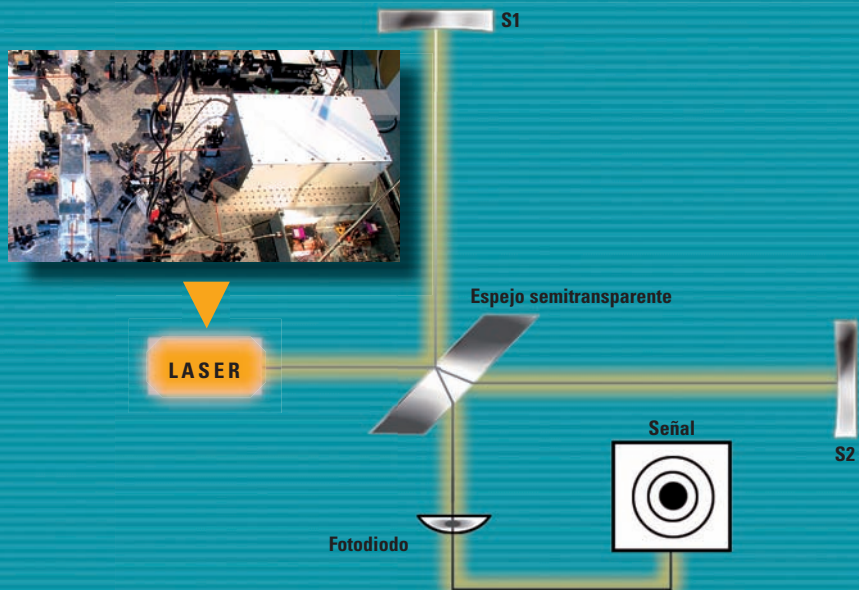
el cálculo del movimiento de los planetas con respecto al modelo de Newton. Estas desviaciones se manifiestan con mayor claridad en Mercurio que, además de estar cerca del sol, posee una veloz rotación, lo que permite explicar y calcular el perihelio con precisión: "Durante algunos días estuve fuera de mí, por tanto entusiasmo", escribió Einstein, después de haber resuelto el misterio.

La teoría de la relatividad general es, en última instancia, una teoría de campo, así como la **electrodinámica de Maxwell**. En sus ecuaciones, el físico y matemático escocés James Clerk Maxwell asocia el campo eléctrico y magnético con cargas y corrientes. Las consecuencias de la electrodinámica hoy las percibimos como evidentes: nos trae a la casa la radio y la televisión, en forma de ondas electromagnéticas. Éstas son generadas por la aceleración de cargas eléctricas. Aunque diferentes en muchos aspectos, la Teoría de la Relatividad General y la electrodinámica poseen algunas similitudes formales. Así, en la electrodinámica, de la distribución de carga resultan los campos que, a su vez, afectan a las partículas de carga, que finalmente vuelven a influir sobre los campos. En la teoría de la relatividad general, la distribución de la materia determina la geometría del espacio-tiempo, que afecta a la distribución de la materia, que en última instancia, cambia la geometría. En ambas teorías aún se esconde otra semejanza: en la teoría de Maxwell, las interferencias en los campos electromagnéticos, por ejemplo una carga eléctrica, se alejan de su fuente a la velocidad de la luz. Para Einstein, el

B

LUZ LÁSER EN LA PISTA

► La idea básica proviene del siglo XIX, el *hardware* del XXI: en la estación GEO600 un sistema láser produce luz con una longitud de onda de 1.064 nanómetros (ver imagen). Un espejo semitransparente divide al rayo láser en dos haces que continúan en ángulo recto. Al final de un "andarivel" de 600 metros de largo cuelga un espejo (S1 y S2) que refleja la luz de regreso. Así, los dos haces vuelven a impactar sobre el espejo semitransparente. Éste, ahora desvía los rayos de tal forma que se superponen. Las ondas de luz que llegan a un fotodiodo vibran con pulsos opuestos: la cresta de una onda se solapa con el valle de la otra, por lo tanto, las ondas de luz se anulan mutuamente. Si una onda gravitacional perturba el sistema cambiando las distancias de medición, las ondas de luz se desincronizan. El receptor ya no permanece oscuro - una señal aparece.



C



▶ Trabajo de campo: en Ruthe, cerca de Hannover, GEO600 extiende sus dos brazos de 600 metros de largo. El edificio principal con el sistema láser es el corazón de la estación (primer plano en la foto izquierda). Los rayos de luz viajan a través de tubos de acero inoxidable corrugado con un espesor de 0,9 mm y 60 centímetros de diámetro (derecha). El sistema está completamente evacuado y amortiguado para evitar vibraciones.

© Instituto Max-Planck de Física Gravitacional / Universidad de Hannover

movimiento acelerado de masas en el campo gravitacional conduce a interferencias que se mueven a través del espacio a la velocidad de la luz. En ambos casos, podemos reemplazar la palabra *interferencia* por *onda*.

Quien salta sobre el trampolín y rebota varias veces, pierde energía (no sólo en forma de calorías) y dispara ondas al espacio-tiempo. Sólo que un hombre tiene una pequeña masa y en comparación salta lento. Por eso, las ondas gravitacionales emitidas por él son inmensurablemente pequeñas. En el espacio, sin embargo, hay grandes masas e incluso un trampolín: el espacio-tiempo. En él todo está en movimiento, porque no hay un cuerpo celeste que permanezca en reposo. Así, la Tierra deforma el espacio durante su rotación alrededor del sol e irradia ondas gravitacionales con una potencia de 200 vatios. Pero incluso éstas son demasiado débiles para ser medidas con un detector.

UN UNIVERSO INQUIETO

Afortunadamente en el universo hay alteraciones mucho más violentas del espacio-tiempo. Este es el caso cuando dos **estrellas de neutrones** o **agujeros negros** chocan o rotan extremadamente rápido uno alrededor del otro (Fig. A). También cuando una estrella masiva explota en forma de **supernova**. Tales acontecimientos cósmicos generan ondas gravitatorias con una potencia de alrededor de 10^{45} vatios. De hecho, los

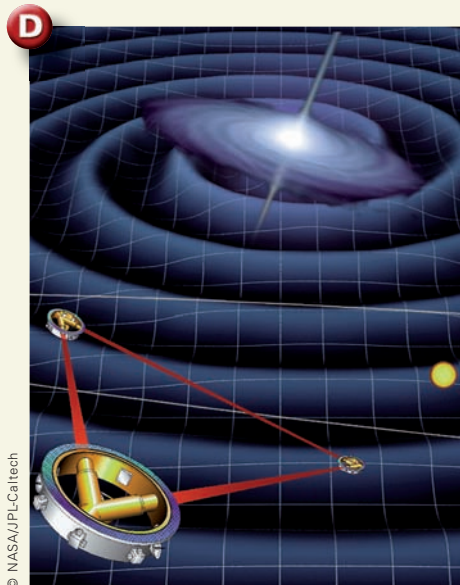
astrónomos estadounidenses Russell Hulse y Joseph Taylor demostraron que el período orbital de las dos estrellas de neutrones PSR 1913+16 disminuye, porque este sistema binario pierde energía que emite en forma de ondas gravitacionales. Esto les valió el Premio Nobel de Física de 1993. Pero ¿cómo pueden captarse estas ondas del espacio-tiempo? ¿Cómo se hacen perceptibles? A tal efecto, mentalmente recortamos un lienzo de goma que dos experimentadores, digamos Isaac y Albert, sostienen cada uno desde dos esquinas. Ahora Albert e Isaac tiran del lienzo retrocediendo dos o tres pasos. Mientras se alejan, sus brazos permanecen pegados al cuerpo. El lienzo se vuelve más largo y delgado. A continuación, Albert e Isaac vuelven a acercarse, extendiendo los brazos: el lienzo se vuelve más corto y grueso al mismo tiempo. Al final, ambos experimentadores vuelven a su posición inicial. Durante el experimento, un retrato de Albert Einstein pintado sobre el lienzo se estiraría y comprimiría de la misma manera que si una onda gravitacional hubiera atravesado el plano del lienzo de abajo hacia arriba distorsionando el espacio.

En un segundo experimento, dibujamos sobre el lienzo dos círculos separados lo más posible el uno del otro. A uno lo llamamos *salida/llegada*, al otro *punto de retorno*. Luego, organizamos una legión de hormigas bien entrenadas. Ponemos a todas dentro del círculo *salida/llegada* y dejamos que, una

tras otra, caminen hacia el *punto de retorno* y regresen en intervalos de tiempo regulares. Debido a que las hormigas viajan a una velocidad constante, todas alcanzan la llegada con el mismo ritmo y distancia con el que lo hicieron en el trayecto de ida. Ahora, Albert e Isaac estiran el lienzo hasta el doble. Así, la formación del escuadrón sufre un estiramiento, y la distancia entre cada una de las hormigas aumenta: éstas van a demorar el doble en regresar a la meta. Pero esta dilatación temporal se produce sólo por un tiempo, porque naturalmente, sólo afecta a las hormigas que justo se encuentran circulando. Si el lienzo se mantiene tensado con la misma fuerza, esas hormigas alcanzarán la meta en el mismo lapso de tiempo. El rítmico estirar y comprimir (que simula la onda gravitacional) genera que las hormigas se sucedan a veces algo más rápido, a veces algo más lento de lo esperado.

GEO600 ABRE LOS BRAZOS

Como se describió anteriormente, las ondas gravitacionales cambian la distancia entre los objetos contenidos en el espacio de forma perpendicular a la dirección de propagación. Medir esto es extremadamente difícil. Imaginemos el peor accidente posible en una **galaxia** cercana: la explosión de una estrella masiva. Las ondas gravitacionales provenientes de este colapso cósmico cambiarían, durante unos pocos milisegundos, la distancia entre la Tierra y el Sol ($1,5 \times 10^{11}$ metros), →



© NASA/JPL-Caltech

▲ El futuro está en el espacio: nunca pueden evitarse por completo las vibraciones en los detectores terrestres, y las mediciones de ondas gravitacionales por debajo de diez Hertzios se ven perturbadas. Por eso, científicos europeos y estadounidenses están planeando en conjunto el proyecto LISA. A partir del año 2013, tres satélites idénticos volarán 50 millones de kilómetros detrás de la Tierra formando un triángulo equilátero con lados de cinco millones de kilómetros. Este interferómetro espacial tendrá una sensibilidad un millón de veces mayor, en comparación a los detectores terrestres.

→ en casi el diámetro de un átomo de hidrógeno (10^{-10} metros). Por eso, Albert Einstein consideró imposible la detección de ondas gravitatorias. Y, sin embargo, los científicos han elaborado instrumentos que podrían cumplir esta tarea. Los dispositivos de la primera generación consistían en sensibles sensores montados en cilindros de aluminio de varias toneladas de peso. El pulso de ondas gravitatorias debía hacerlos vibrar como el badajo de una campana. Pero a pesar de los amplificadores de avanzada, estos detectores de resonancia no dieron ningún resultado. Así fue que los investigadores construyeron receptores mucho más sensibles aún. El principio se basa en el experimento mental del lienzo de goma. Para ello, sustituimos el círculo *inicio/llegada* por un láser, y el *punto de retorno* por un espejo, y pensamos en las hormigas como la frecuencia de onda de una señal luminosa. Para comprobar los ínfimos retrasos en el momento de llegada se debe colocar un segundo camino óptico perpendicular al primero, para que las ondas de luz de los dos brazos se superpongan. Este **interferómetro de Michelson** ya existe desde 1882. Originalmente fue diseñado para probar la constancia de la velocidad de la luz.

LOS POSTULADOS BÁSICOS DE

La Teoría de la Relatividad Especial

- No existe el éter que transporta la luz y las ondas de radio.
- Las leyes de la física son las mismas en todos los sistemas de referencia inerciales.
- El espacio y el tiempo son indisolubles.
- No hay simultaneidad absoluta.
- La velocidad de la luz es una constante universal e independiente del movimiento relativo de la fuente lumínica.
- La energía y la materia son equivalentes, la masa es directamente una medida de la energía contenida en un cuerpo. La luz transfiere masa.

La Teoría de la Relatividad General

- La gravedad no es ninguna fuerza en el sentido tradicional, sino una característica de la geometría del espacio y el tiempo.
- La materia curva al espacio-tiempo, donde el grado de curvatura aumenta con la masa de un cuerpo y disminuye al aumentar la distancia a él. Espacio y tiempo son dinámicos y, a su vez, determinan el movimiento de la materia.
- El tiempo juega un papel fundamental en la teoría de la relatividad general. Por ejemplo, un reloj cercano a un cuerpo celeste masivo corre más lentamente que alejado de él, en regiones que están menos influenciadas por su gravedad.

Equipado con la última tecnología, se vuelve perfecto para la detección de ondas gravitatorias. La estación **GEO600**, que se encuentra en un campo en Ruthe cerca de Hannover, trabaja con el principio del interferómetro de Michelson (**Fig. B**). La luz es producida por varios diodos láser similares a los de un reproductor de CD. Un pequeño cristal transforma la luz en un rayo láser infrarrojo, cuya potencia después de filtrado, sin embargo, sólo es de diez vatios - demasiado débil como para realizar mediciones significativas. Por lo tanto, los investigadores están trabajando con el "reciclado de luz": el interferómetro envía toda la luz no utilizada, devuelta en dirección al láser, y un espejo la encausa de nuevo sobre el camino. Este ciclo se repite varias veces, no sólo aumentando la potencia de la luz circulante hasta alcanzar varios miles de vatios, sino también la sensibilidad del detector. Además, el láser es extremadamente estable: durante varios meses produce luz de una misma amplitud y frecuencia.

Los dos brazos del interferómetro están formados por caños enterrados con un largo de 600 metros cada uno (**Fig. C**). Los rayos láser deberían recorrerlos sin perturbaciones externas. En la práctica es necesario eliminar las vibraciones causadas por el tráfico, los sismos, o las olas del Mar del Norte. Sismógrafos miden las vibraciones que luego se compensan mediante actuadores piezoeléctricos. Además de este sistema activo, todos los componentes ópticos cuentan con otro pasivo: una doble capa absorbente de caucho y acero inoxidable. Suspensores elásticos y péndulos múltiples ejercen el mismo efecto de absorción. Para reducir al máximo las fluctuaciones térmicas que alteran la

densidad del aire, el interferómetro se colocó dentro de tubos de acero inoxidable. Bombas de vacío turbo moleculares crean un vacío ultra alto con una presión menor a 10^{-11} bar.

GEO600 es un proyecto bilateral que, por parte de Alemania, involucra al Instituto Max Planck de Física Gravitacional y a la Universidad de Hannover y, del lado británico, a las universidades de Glasgow y Cardiff. Esta estación es uno de los tantos puestos de escucha de la Tierra, que deben oír el concierto de las estrellas. Los EE.UU. dirigen el proyecto LIGO en dos ubicaciones separadas por 3.000 kilómetros (posee sensores interferométricos, cada uno con un brazo de cuatro kilómetros). Cerca de la ciudad italiana de Pisa esta VIRGO, y los japoneses están trabajando con TAMA 300. Mientras estos detectores entran en funcionamiento, los astrónomos ya están pensando en el año 2013, cuando el interferómetro LISA (**Fig. D**) deba acechar ondas gravitacionales desde el espacio. Veremos quién es el primero en asumir el reto.

PIE DE IMPRENTA

Sociedad Max-Planck, Departamento de Información y Relaciones Públicas, Hofgartenstraße 8, 80539 München / e-mail: presse@gv.mpg.de

Redacción: Dra. Christina Beck

Texto: Helmut Hornung

Traducción: Ing. Agr. Roberto Neuwald

Diseño: www.haak-nakat.de

La versión en español se hizo con el apoyo del DAAD y con fondos del Ministerio de Relaciones Exteriores de Alemania.



SIEMENS

DAAD Deutscher Akademischer Austausch Dienst
Servicio Alemán de Intercambio Académico

BASF
The Chemical Company

