

# ESPECIAL

---

An abstract visualization of gravitational waves, featuring a central point with several concentric, overlapping rings in shades of yellow, orange, and blue. The background is a deep purple with a subtle, swirling pattern. The overall effect is that of a complex, multi-colored field or wave structure.

# Ondas gravitacionales

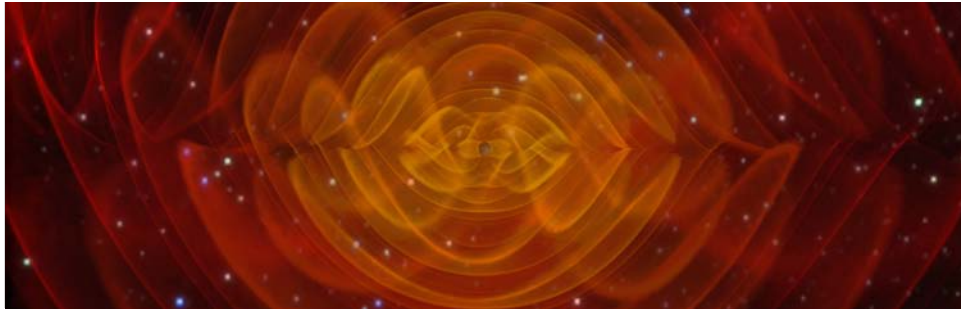
SCIENTIFIC  
AMERICAN™

INVESTIGACIÓN  
Y CIENCIA

# ESPECIAL

# Ondas gravitacionales

## CONTENIDO



Una selección de nuestros mejores artículos sobre la ciencia de las **ondas gravitacionales** y la larga carrera experimental que ha permitido detectarlas.

### **Ondas gravitatorias procedentes de un pulsar orbital**

Joel M. Weisberg, Joseph H. Taylor y Lee A. Fowler  
*Investigación y Ciencia*, diciembre 1981

### **Observatorios de ondas gravitatorias**

Andrew D. Jeffries, Peter R. Saulson, Robert E. Spero y Michael E. Zucker  
*Investigación y Ciencia*, agosto de 1987

### **Ondas en el espacio-tiempo**

W. Wayt Gibbs  
*Investigación y Ciencia*, junio de 2002

### **La detección de las ondas gravitatorias**

Peter S. Shawhan  
*Investigación y Ciencia*, octubre de 2005

### **Los sonidos del espaciotiempo**

Craig J. Hogan  
*Investigación y Ciencia*, marzo de 2007

### **Púlsares y ondas gravitacionales**

Michael Kramer y Norbert Wex  
*Investigación y Ciencia*, abril de 2013

### **Una ventana al primer instante del universo**

Daniel G. Figueroa y Juan García-Bellido  
*Investigación y Ciencia*, diciembre de 2012

### **Cómo oír la gran explosión**

Ross D. Andersen  
*Investigación y Ciencia*, diciembre de 2013

### **La observación de ondas gravitacionales con LIGO**

Alicia M. Sintes y Borja Sorazu  
*Investigación y Ciencia*, febrero de 2017

#### EDITA

Prensa Científica, S.A.  
Muntaner, 339 pral. 1ª, 08021 Barcelona (España)  
precisa@investigacionyciencia.es  
www.investigacionyciencia.es

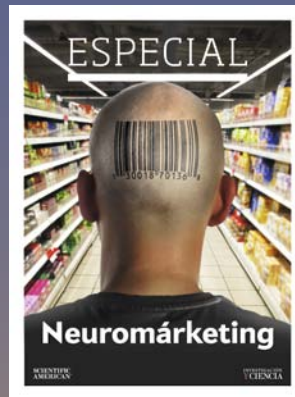
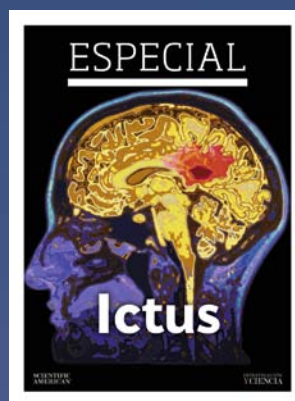
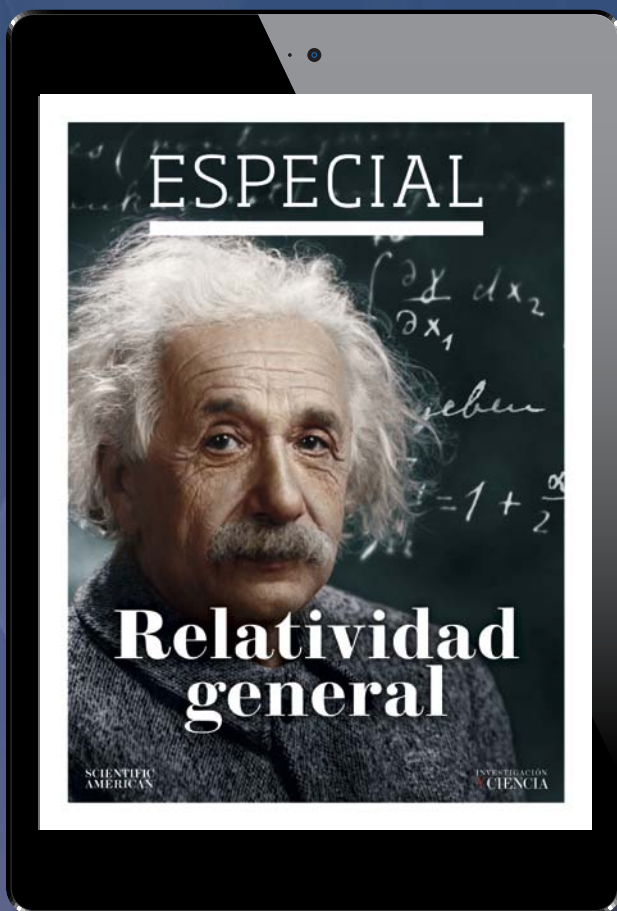
Copyright © Prensa Científica, S.A. y Scientific American, una división de Nature America, Inc.

ESPECIAL n.º 26 ISSN: 2385-5657

# ESPECIAL

## MONOGRÁFICOS DIGITALES

Descubre los monográficos digitales que reúnen nuestros mejores artículos (en pdf) sobre temas de actualidad



[www.investigacionyciencia.es/revistas/especial](http://www.investigacionyciencia.es/revistas/especial)



Prensa Científica, S.A.

# Ondas gravitatorias procedentes de un pulsar orbital

*La predicción, realizada por Einstein en 1915, de que una masa acelerada debía radiar energía en forma de ondas gravitatorias halla su plena confirmación en la contracción lenta de la órbita de un pulsar en torno a la estrella compañera*

Joel M. Weisberg, Joseph H. Taylor y Lee A. Fowler

La teoría de la relatividad general de Einstein, publicada en 1915, predice algo tan extraordinario como lo siguiente: una masa que se acelere deberá radiar energía en forma de ondas gravitatorias. Sin embargo, las ondas son tan débiles y su interacción con la materia tan diminuta, que el propio Einstein puso en duda que pudieran nunca detectarse. La hora de la confirmación llegó en 1974, cuando se descubrió un objeto adecuado para poner a prueba la predicción: el pulsar binario PSR 1913 + 16. La designación indica que el pulsar radioemisor y su compañera radiosilenciosa de órbita están situados en los mapas astronómicos del cielo a la ascensión recta de 19 horas 13 minutos y a la declinación de + 16 grados, lo que sitúa al pulsar binario en la constelación del Águila. En observaciones realizadas con los mayores telescopios ópticos no se ha podido observar objeto alguno que emita destellos periódicos en la posición, determinada por radio, del pulsar. No debe sorprendernos: entre los más de 300 radiopulsares identificados desde que Jocelyn Bell y Anthony Hewish, de la Universidad de Cambridge, descubrieron el primero en 1967, sólo dos son observables como pulsares visibles.

Los astrónomos contemporáneos están en general de acuerdo en que los pulsares son estrellas muy pequeñas, extremadamente densas y en rápida rotación, compuestas principalmente de neutrones, que son los restos de explosiones de supernova. Las estrellas de neutrones en rotación emiten un haz de ondas de radio, fuertemente direccional, que barre el cielo una vez por rotación estelar. El observador recibe un impulso de radioondas siempre que el haz de radio procede de la estrella apunta a la Tierra; de ahí el nombre de pulsar. Se halla éste constituido por ca-

si tanta materia como el Sol, a pesar de tener un diámetro de sólo 20 o 30 kilómetros; sus átomos han sido literalmente machacados hasta perder su naturaleza, debido a las intensas fuerzas gravitatorias. Se observa que los pulsares giran a velocidades de hasta 30 veces por segundo. Parte de esta vasta reserva de energía cinética de rotación se convierte (a través de un mecanismo todavía no aclarado) en radioemisión.

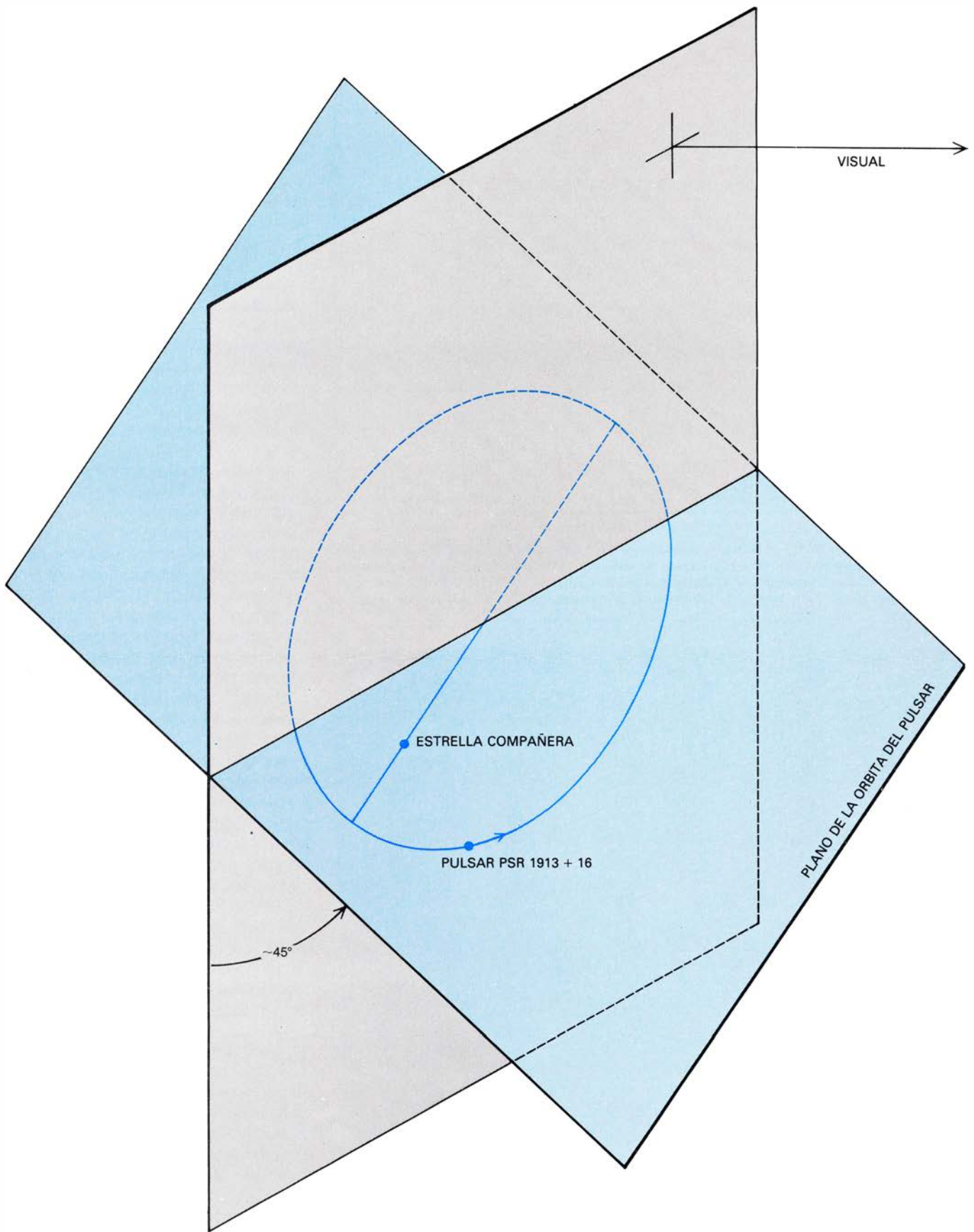
El pulsar binario constituye un banco de pruebas único, que permite contrastar leyes físicas fundamentales. Tanto el pulsar como su compañera silenciosa tienen una masa mayor que el Sol. Se mueven a velocidades que alcanzan hasta los 400 kilómetros por segundo en órbitas muy cerradas, con una separación mínima próxima al radio solar. Estas condiciones convierten al sistema binario pulsar en un laboratorio ideal para el estudio de los campos gravitatorios intensos. En particular, las fuertes aceleraciones experimentadas por el pulsar y su estrella compañera, inducidas gravitatoriamente, deben dar lugar a radiación gravitatoria. Hasta el descubrimiento del pulsar binario, el mejor laboratorio gravitatorio disponible era el sistema solar, donde sólo hay un cuerpo de masa estelar (el Sol) y donde el segundo objeto grande (Mercurio) está a una distancia de más de 65 radios solares y se mueve a una velocidad orbital de menos de 60 kilómetros por segundo. Aunque existan otros sistemas de estrellas binarias que se desenvuelven en órbitas muy cerradas, la presencia de un pulsar en este sistema particular es lo que posibilita someter a prueba, de una manera convincente, los fenómenos gravitatorios.

Un pulsar reúne condiciones únicas a este propósito: la frecuencia de repetición de los destellos (idéntica al número de rotaciones que la estrella efectúa

cada segundo) está fijada con tal precisión que los destellos del pulsar vienen a ser como los "tics" de un reloj dotado de exacta precisión. Entre un destello y otro media un intervalo estable, porque el pulsar actúa como un volante de gran masa en rotación libre, que tiende a girar sin rozamiento durante un tiempo indefinido. El pulsar binario es, por tanto, un preciso reloj en rotación en el seno del intenso campo gravitatorio de otro cuerpo de gran masa. Midiendo cuidadosamente los instantes en los cuales sus destellos llegan a la Tierra, se puede usar el reloj del pulsar para delinear su órbita e investigar sutiles efectos gravitatorios con una exactitud impensable en otro sistema conocido.

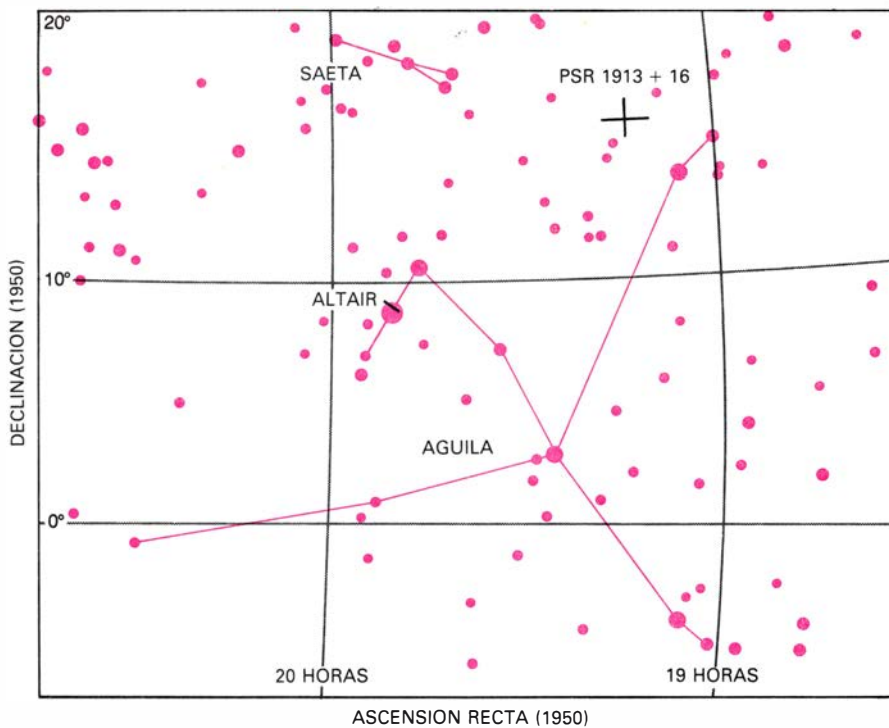
Nuestras medidas de los impulsos o destellos de PSR 1913 + 16, realizadas a lo largo de los seis últimos años, muestran que el sistema pierde energía orbital a un ritmo próximo al que correspondería a la radiación gravitatoria de acuerdo con la teoría general de la relatividad. Nuestras observaciones suministran así la primera indicación clara de la existencia de ondas gravitatorias, constituyendo al mismo tiempo una nueva confirmación de la validez de la relatividad general.

Las leyes de gravitación y del movimiento, descubiertas por Isaac Newton hace más de 300 años, han proporcionado una descripción notablemente exacta de los movimientos de la mayoría de los objetos en órbita entorno a otros. Se sabía desde hace años que la formulación de Newton empezaba a fallar en la proximidad de cuerpos de gran masa. A modo de botón de muestra, digamos que existen ligeras irregularidades en el movimiento orbital de Mercurio que no se pueden explicar fácilmente dentro del marco newtoniano.

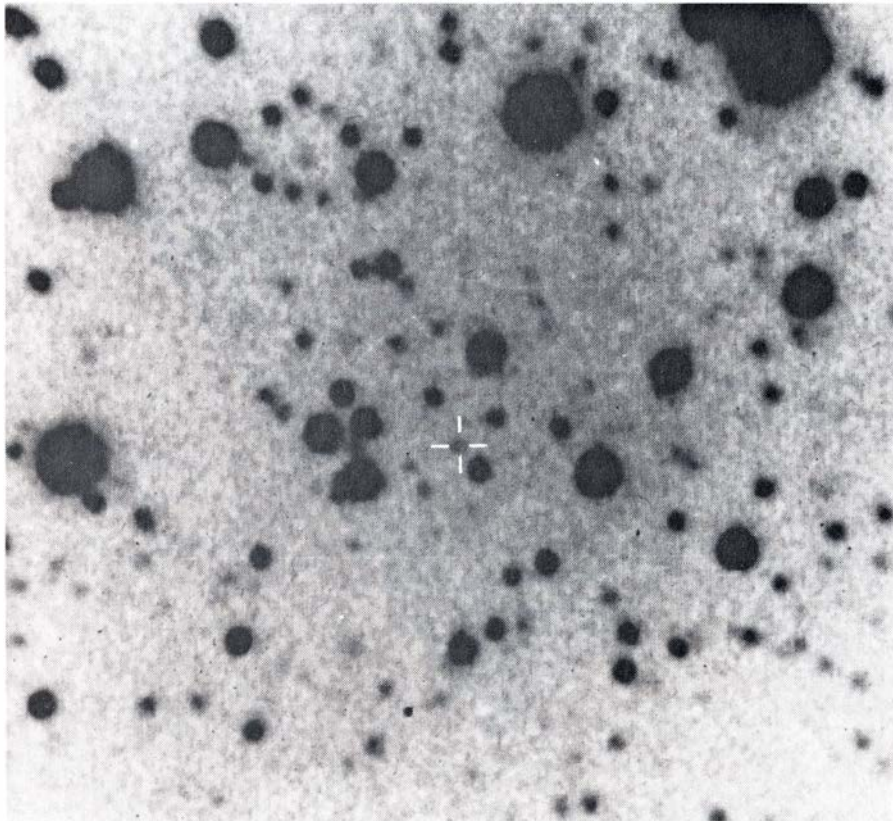


LA ORBITA DEL PULSAR PSR 1913 + 16 yace en un plano inclinado aproximadamente 45 grados respecto a la visual. Como los otros pulsares descubiertos desde 1967 (más de 300), se cree que PSR 1913 + 16 es una estrella de neutrones de 20 a 30 kilómetros de diámetro, que emite un haz de ondas de radio que barre la Tierra a intervalos espaciados en forma precisa y sincronizados con la velocidad de rotación de la estrella. Para PSR 1913 + 16, la velocidad de rotación es de 16,94 revoluciones por segundo. A diferencia de la gran mayoría de los otros pulsares, PSR 1913 + 16 describe una órbita alrededor de una estrella compañera, cuya presencia se dedujo a partir del

corrimiento Doppler en el tiempo de llegada de los destellos del pulsar. Estos arriban con una frecuencia ligeramente mayor cuando el pulsar se está moviendo hacia la Tierra y ligeramente menor cuando se está alejando de ella. A través de mediciones del corrimiento Doppler, combinadas con un análisis de ciertos efectos gravitatorios muy sutiles, predichos por la teoría general de la relatividad, se obtuvo una descripción completa de la órbita del pulsar alrededor del centro de masa del sistema binario. La teoría permitió calcular que el pulsar y su compañera tenían ambos una masa igual a 1,4 veces la del Sol y que la separación de las dos estrellas variaba entre 1,1 y 4,8 radios solares.



PULSAR BINARIO PSR 1913 + 16, sito en la constelación del Aguila a las coordenadas indicadas por su designación: ascensión recta 19 horas 13 minutos y declinación + 16 grados. Su posición queda señalada por la cruz (arriba, a la derecha). Se estima que el pulsar binario se encuentra a 15.000 años-luz de distancia, muy lejano para observarlo ópticamente, ni siquiera con los telescopios más potentes.



POSIBLE COMPAÑERA SILENCIOSA DE PSR 1913 + 16, indicada con una cruz en esta composición realizada con ordenador de los fotones de luz visible recogidos por una videocámara montada en el telescopio de cuatro metros del Observatorio Nacional de Kitt Peak. La observación fue realizada por J. A. Tyson, de los Laboratorios Bell. Se ha sugerido que el objeto en cuestión responde a una estrella de núcleo de helio, esto es, una estrella cercana al final de su vida que ha lanzado al espacio sus capas exteriores dejando tras ellas un denso núcleo constituido principalmente por helio. Pero si la estrella compañera es realmente otra estrella de neutrones, como los autores sospechan, su radiación visible no podría detectarse con los telescopios ópticos existentes. En ese caso, el objeto mostrado sería, probablemente, una débil estrella que se encuentra por casualidad casi en la misma posición del pulsar binario.

Como las de todos los demás planetas, la órbita de Mercurio es una elipse. El punto de la elipse por donde el planeta pasa a la mínima distancia del Sol se llama perihelio. Con el transcurso del tiempo, el perihelio avanza, o gira lentamente, en la misma dirección que la de movimiento del planeta alrededor del Sol. Mirando la órbita de Mercurio desde arriba, es decir, desde el polo Norte del planeta, el avance del perihelio tiene lugar en sentido antihorario. Existe una pequeña discrepancia, que equivale solamente a 43 segundos de arco por siglo, entre el avance del perihelio predicho por la teoría de Newton y el realmente observado. Esta pequeña anomalía se había medido con gran precisión ya en el siglo XIX, antes de que existiera teoría alguna que la explicara.

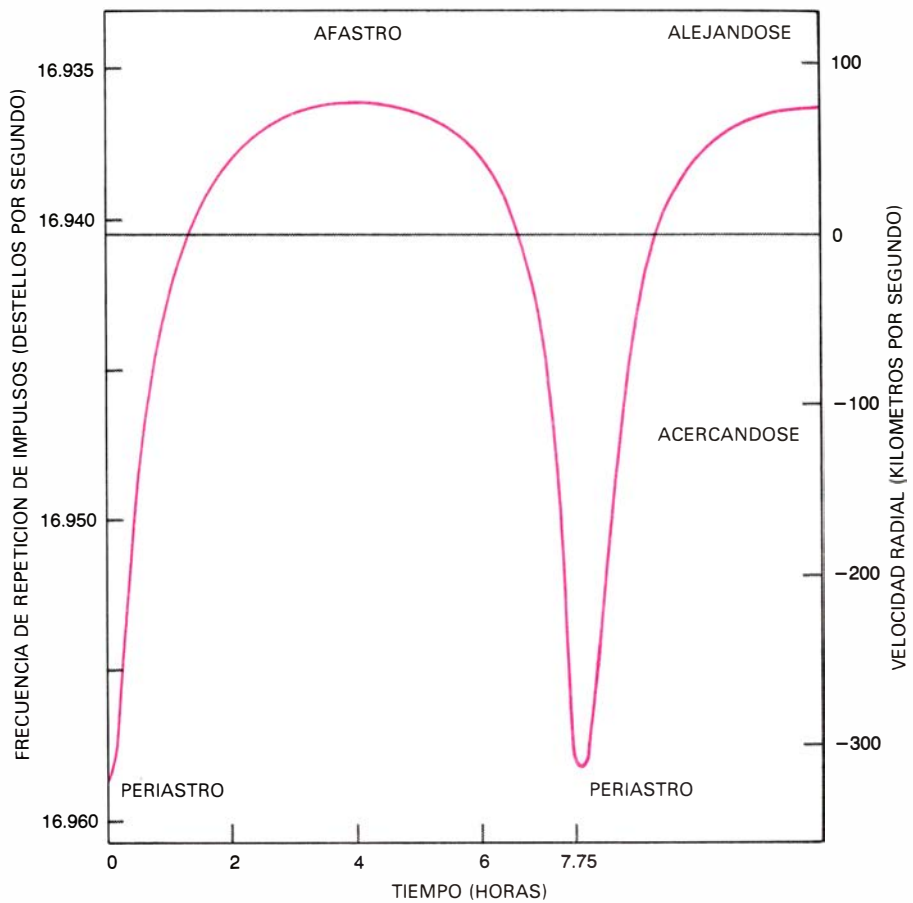
La causa suele atribuirse hoy al hecho siguiente: Mercurio está lo suficientemente cerca del Sol para que allí pierda valor la teoría newtoniana de la gravitación. La discrepancia se toma como un claro argumento en pro de la teoría general de la relatividad, ya que predice un avance del perihelio de exactamente la magnitud correcta. Pero el debate no se ha dado por zanjado y se han buscado otras razones que dieran cuenta de esa discrepancia. Así, algunos físicos (y en forma particular Robert H. Dicke, de la Universidad de Princeton) han sugerido que si el Sol fuera ligeramente aplastado, y no perfectamente esférico, se podría explicar parte, al menos, del efecto. El descubrimiento del pulsar binario intrigó sobre todo a quienes cultivaban las leyes físicas fundamentales; en efecto: el ligero fallo de la gravitación newtoniana observado en el caso de Mercurio debe abultarse enormemente en un sistema binario donde los cuerpos en órbita son ambos de masa algo mayor que la del Sol y están muy próximos.

En la teoría general de la relatividad de Einstein, los conceptos newtonianos de espacio y tiempo absolutos, ambos definibles, son reemplazados por una única magnitud absoluta: el espacio-tiempo. Las fuerzas gravitatorias provienen de distorsiones locales del espacio-tiempo causadas por cuerpos de gran masa. Las trayectorias de los cuerpos en órbita se reducen simplemente a los caminos más cortos que se pueden seguir en un espacio-tiempo alabeado. El propio Einstein demostró que el avance del perihelio de Mercurio es una consecuencia natural de la curvatura del espacio-tiempo en la vecindad del Sol. Una predicción de la teoría

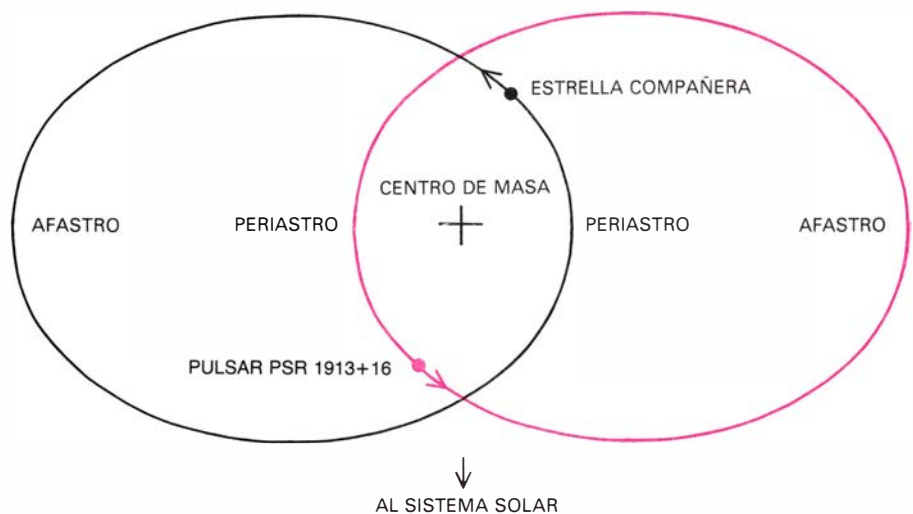
de Einstein relacionada con ello, y confirmada recientemente, establecía que las señales de radio que viajan entre la Tierra y un vehículo espacial situado al otro lado del Sol deben sufrir un ligero retraso al pasar por la proximidad del Sol. Se podría esperar un retraso comparable, de nuevo muy agrandado, si los dos miembros del sistema pulsar binario se orientaran de suerte que las radioondas del pulsar pasaran rasando al compañero silencioso, en su camino hacia la Tierra. Queda claro, pues, que las ecuaciones de la relatividad general son indispensables para un análisis pormenorizado de la órbita del pulsar binario. Como veremos, tal análisis hace posible obtener mucha más información acerca del tamaño y orientación de la órbita y de las masas del pulsar y su compañera de la que era factible extraer mediante la teoría newtoniana.

Pero lo más notable de todo era la oportunidad que nos ofrecía el sistema pulsar binario de poner a prueba una predicción de la relatividad general que no se había podido comprobar en ninguna otra parte del universo: la predicción de que las masas aceleradas (en este caso el pulsar en órbita y su compañera) deben emitir ondas gravitatorias. Tales ondas, arrugas en la curvatura del espacio-tiempo que viajan a la velocidad de la luz, han de emitirlas masas aceleradas, de manera muy parecida a como las ondas electromagnéticas son emitidas por partículas cargadas eléctricamente y sometidas a una aceleración. Las técnicas de laboratorio más sensibles de entre las disponibles no son, ni con mucho, lo bastante para poner de manifiesto directamente la existencia de ondas gravitatorias procedentes del pulsar binario. Ahora bien, de acuerdo con la relatividad general, las ondas gravitatorias deben extraer cierta cantidad de energía del sistema binario. Tal energía debe aparecer como una disminución de la energía orbital del sistema, lo que origina una ligera reducción del tamaño de la órbita con la consiguiente disminución del tiempo necesario para que el pulsar describa una revolución en torno a su compañera. Este último cambio es el que ahora se ha medido, y con considerable precisión.

¿En qué consiste el sistema binario pulsar? Vamos a detenernos en su descripción, comenzando con el descubrimiento del pulsar y siguiendo hasta las medidas más recientes que han hecho posible especificar completamente la geometría orbital y las masas de los dos componentes binarios, así como verificar la teoría general de la



VELOCIDAD RADIAL DE PSR 1913 + 16, calculada a partir de las variaciones en la frecuencia de repetición de los destellos durante todo el período orbital de 7,75 horas mediante el análisis habitual de corrimiento Doppler. La frecuencia es mínima cuando el pulsar se está alejando de la Tierra y está próximo al afastro, punto donde los dos cuerpos en mutua órbita se encuentran a la máxima distancia. La máxima frecuencia de repetición se produce en el periastro, punto de máxima vecindad de los dos cuerpos. La velocidad radial es la componente de la velocidad del pulsar a lo largo de la visual. Los valores negativos indican movimiento hacia la Tierra. La existencia de valores negativos mayores (en valor absoluto) que los positivos demuestra una órbita fuertemente excéntrica, aumentando la velocidad del pulsar al ir de afastro a periastro. (Se han venido midiendo los destellos a lo largo de los últimos 6 años.)



FORMA DE LA ÓRBITA DEL PULSAR, dibujada en color; se determinó a partir de la curva de velocidad radial. En esta órbita fuertemente excéntrica, el pulsar se encuentra en el afastro a una distancia de su compañera cuatro veces mayor que en el periastro. Cuando se descubrió el pulsar, hace siete años, el eje mayor de su órbita era casi perpendicular a la visual, tal como aparece aquí. Del análisis Doppler corriente no se pueden deducir varios parámetros de interés: la inclinación del plano orbital respecto a la visual, el tamaño absoluto de las órbitas del pulsar y de su compañera y las masas de ambos cuerpos. Para conocer esos parámetros hubo que esperar a un análisis basado en la teoría general de la relatividad. El análisis reveló que la órbita de la compañera (*elipse en negro*) era, con un pequeño error relativo, del mismo tamaño que la del pulsar. El eje mayor de la órbita del pulsar resultó valer 4,5 radios solares.