

Este artículo apareció publicado en el Anuario Astronómico del Observatorio de Madrid para el año 1995. Su apariencia puede haber cambiado al ser reprocesado con pdflatex y nuevos ficheros de estilo.

PULSARES Y ONDAS GRAVITATORIAS

Jesús Gómez González

Observatorio Astronómico Nacional

Instituto Geográfico Nacional

Durante la segunda mitad de la década de los sesenta, el grupo de Radioastronomía de la Universidad de Cambridge (U.K.) que dirigía el Profesor Anthony Hewish, se encontraba realizando un estudio sistemático del centelleo interplanetario de radiofuentes. Se trata éste de un fenómeno análogo al centelleo de la luz de las estrellas que se produce a causa de las irregularidades de nuestra atmósfera y que, en el caso de las radiofuentes, se debe a las irregularidades en la distribución del plasma (gas ionizado) interplanetario eyectado por el Sol (el llamado viento solar). Se habían construido para ello equipos de observación capaces de detectar variaciones rápidas (con tiempos típicos del orden de 1 segundo) en las intensidades recibidas de las radiofuentes a su paso por las proximidades del Sol.

Fué así que, en el curso de una sesión de observación a finales de 1967, los radioastrónomos británicos detectaron en sus registros gráficos unas débiles señales separadas por intervalos regulares de 1,3 segundos. El análisis cuidadoso de estas señales a lo largo de semanas de observación llevó al grupo de radioastrónomos de Cambridge a establecer, de manera inequívoca, que tales emisiones procedían de un tipo de objeto astronómico de naturaleza hasta entonces desconocida, situado en algún punto de nuestra galaxia. Pronto se descubrieron varias radiofuentes de este tipo, todas ellas con periodos del orden del segundo, que vinieron en denominarse **púlsares** (contracción inglesa de "pulsating radio sources", radiofuentes pulsantes).

Las subsiguientes observaciones y desarrollos teóricos acabaron de perfilar el modelo básico de estos nuevos objetos: estrellas de neutrones en rotación, con el eje magnético inclinado con respecto a su eje de giro; de manera que sólo cuando aquél se encuentra orientado hacia la Tierra podemos captar la emisión de las ondas radioeléctricas que producen los electrones relativistas (de velocidades próximas a la de la luz) en los intensos campos magnéticos existentes en esas estrellas de neutrones. Auténticos radiofaros cósmicos distribuidos por todo lo ancho del plano de nuestra galaxia. En cuanto a su estructura y naturaleza, las estrellas de neutrones

tienen, aproximadamente, una masa como la del Sol, pero condensada en un radio de tan solo unos ¡10 km!. Esto implica que, en su interior, las densidades son del orden de unos ¡100 millones de toneladas por centímetro cúbico!. Estrellas, como vemos, de sorprendentes características que, hasta entonces, no podían considerarse mas que como meras especulaciones teóricas de unos pocos astrónomos y físicos, y que el descubrimiento de los púlsares vino a situar en el plano de la más tangible realidad física. En 1976 el Profesor Hewish fué galardonado con el Premio Nobel de Física por este descubrimiento.

Hace unos pocos meses, el pasado 13 de Octubre de 1993, la Academia de las Ciencias de Suecia anunciaba la concesión del Premio Nobel de Física de ese año a los radioastrónomos norteamericanos J. Taylor y R. Hulse (y con ellos son ya siete los radioastrónomos galardonados con el Premio Nobel en los últimos 15 años) por su descubrimiento, realizado hace ahora 20 años (en 1974), del púlsar binario PSR 1913+16. Veamos el porqué de la importancia de este descubrimiento.

Desde su primera detección, en 1967, el estudio de las emisiones de los púlsares presentó un doble interés: en primer lugar, el de tratar de conocer las extraordinarias características de su naturaleza y llegar a comprender su génesis y evolución; pero, por otra parte, la peculiar forma de emitir de estos objetos, los convertían en una herramienta de valor inapreciable para el estudio de otros campos de la Astronomía, como son el medio interestelar, los sistemas de referencia fundamentales, la medida del tiempo y, como más adelante veremos, en la más precisa de las teorías de la gravitación: la teoría de la Relatividad General de Einstein. Es en este último campo de aplicación en el que, como vamos a ver, el descubrimiento del púlsar binario PSR 1913+16, realizado por Taylor y Hulse, cobra toda su importancia.

Empezaremos diciendo que los púlsares son los *relojes* más precisos de la naturaleza. Al tratarse de masas tan enormes (1 masa solar) girando en el espacio vacío a velocidades tan altas (actualmente se conocen púlsares con periodos tan cortos como 1 milisegundo, es decir, que giran a 60.000 revoluciones por minuto, o sea, unas diez veces más rápido que los mejores motores de Fórmula 1), sus periodos son tan estables que pueden determinarse con una precisión de 1 parte en diez mil millones. Asimismo, los tiempos de llegada de sus impulsos pueden predecirse con una precisión de una milésima de sus periodos. Es decir, que para un púlsar de periodo 1 milisegundo, los tiempos de llegada de sus impulsos pueden preestablecerse con una precisión de, aproximadamente, 1 microsegundo (millonésima de segundo). Esta precisión es tan alta, que para su determi-

nación experimental es preciso despejar los datos observacionales directos de toda una serie de fenómenos físicos que los enmascaran (ligados, básicamente, a la propagación de los impulsos entre el púlsar emisor y la Tierra). Y en el desbrozado de estas medidas, el astrónomo puede, a su vez, perseguir un doble objetivo: tratar de eliminar esos efectos perturbadores para conocer los fenómenos relacionados con el giro del púlsar (mecanismo de radiación, frenado por emisión dipolar de ondas electromagnéticas, aceleración por disminución brusca de su radio o "terremoto estelar", etc); o bien, utilizar la perturbación producida para estudiar diferentes aspectos del medio o fenómeno físico que las produce (determinación de la densidad electrónica interestelar, movimientos del plasma interestelar, campos magnéticos interestelares, estabilidad de los relojes atómicos utilizados, etc).

¿Qué ocurre entonces con los púlsares binarios (en la actualidad se conocen una treintena) como el descubierto por los recientes premios Nobel de Física Taylor y Hulse?. Pues, en primer lugar, que para determinar sus periodos de rotación referidos al sistema más estable de nuestro entorno, que es el baricentro¹ del sistema solar, no basta con utilizar las ecuaciones clásicas de la Mecánica Celeste basada en la teoría de la Gravitación y en las leyes de la Dinámica de Newton, sino que es preciso tener en cuenta las correcciones que se derivan de la teoría de la Relatividad General (RG), formulada por el genio de Albert Einstein, en 1916.

Sería tema de otro artículo y, ciertamente, muy difícil de explicar en términos comprensibles para personas sin unos conocimientos mínimos de Física, el de los fundamentos y resultados de la RG. Por ello, voy a mencionar tan sólo, y sin mayor explicación o justificación científica (utilizando, además, una terminología nada rigurosa), alguno de estos fundamentos de partida y resultados más importantes de dicha teoría.

Según la RG, el espacio es un continuo físico (no una simple ausencia de materia) cuyas propiedades geométricas (medidas de ángulos y distancias) y temporales (transcurrir del tiempo) se ven alteradas por la presencia de masas materiales (esa interrelación con el tiempo, que resulta esencial en la teoría, hace que, en realidad, el continuo físico del que, en rigor, tenemos que hablar es el de un espacio-tiempo). En esta visión, un cuerpo material (por ejemplo, un planeta) en el seno de un espacio-tiempo perturbado (curvado) por la presencia de otro cuerpo material (el Sol) experimenta, localmente, las mismas leyes de la Física (inercia, propagación de ondas,

¹Baricentro: punto más estable del sistema solar en torno al que realmente giran tanto los planetas como el propio Sol. Muy próximo al centro del Sol aunque no exactamente coincidente con él.

etc) que si estuviera en un espacio-tiempo "plano"(no perturbado). El planeta sigue su órbita (trayectoria) en torno al Sol, no porque sobre él se ejerza ninguna fuerza de atracción a distancia –como establecía la teoría clásica de la Gravitación de Newton– sino porque en el espacio curvado por la masa del Sol, esa órbita (trayectoria) es la que se correspondería con un movimiento uniforme y rectilíneo en el espacio plano (sin perturbación de ninguna masa próxima). Es como si dijéramos, su forma "natural" de estar en ese espacio-tiempo curvado.

Del mismo modo, las ondas electromagnéticas (luz, ondas radio, etc) siguen trayectorias curvadas en las proximidades de cuerpos materiales que han "perturbado" el espacio-tiempo de su entorno. Y aunque, como en el caso anterior, las trayectorias seguidas por las ondas son las que se corresponden con la forma natural de propagación en ese espacio curvado, utilizando la terminología clásica decimos que las ondas son atraídas gravitatoriamente por la masa o masas que causan la perturbación.

Otro aspecto de la RG muy difícil, si no imposible, de intuir, es el de la relatividad en el discurrir del tiempo según el punto en el que nos encontremos situados dentro de un espacio-tiempo perturbado por una masa (en términos clásicos, en un campo gravitatorio), o el del tiempo medido por dos observadores en movimiento relativo (resultado este ya predicho por la Relatividad Especial).

Por último, uno de los resultados más espectaculares (si cabe) de la RG es la predicción de que perturbaciones variables del espacio-tiempo en torno a masas en movimiento, pueden propagarse a grandes distancias en forma de ondas gravitatorias que se mueven a la velocidad de la luz (de modo similar a como perturbaciones electromagnéticas producidas por cargas eléctricas en movimiento producen ondas electromagnéticas). Y así, al igual que una carga eléctrica en reposo, en un espacio no perturbado electromagnéticamente, experimenta un movimiento oscilante al incidir sobre ella una onda electromagnética que puede haberse originado en un punto lejanísimo, una masa debe ponerse en movimiento al paso de una onda gravitatoria originada, también, en un punto muy alejado. Las ondas gravitatorias vendrían a ser como "olas" en el mar del espacio-tiempo.

Veamos pues, sin más dilación, cómo se relacionan las observaciones de los pulsares binarios, como PSR 1913+16, con cuanto acabamos de decir.

Empezaremos señalando que, aunque las desviaciones de las predicciones de la RG con respecto a la teoría clásica de Newton representan correcciones cuantitativamente minúsculas, éstas resultan completamente significativas para el nivel de precisión que se alcanza en la medida de los perio-

dos de estos pulsares. Resulta así, que hay que determinar el movimiento de los planetas en torno al Sol (determinación del baricentro) según las leyes de la Dinámica Relativista y tener en cuenta efectos como el que produce el giro de la Tierra en el retraso de los relojes de nuestros observatorios (relatividad del transcurrir del tiempo para observadores en movimiento relativo), o la curvatura de las trayectorias de las ondas electromagnéticas que constituyen los impulsos del púlsar a su paso por las proximidades de las masas del sistema solar (atracción gravitatoria de la luz). Y sólo así, una vez corregidas nuestras medidas de estos efectos, es posible obtener un conjunto de datos experimentales coherentes acerca de la emisión de las señales del púlsar en el entorno del sistema binario del que forma parte.

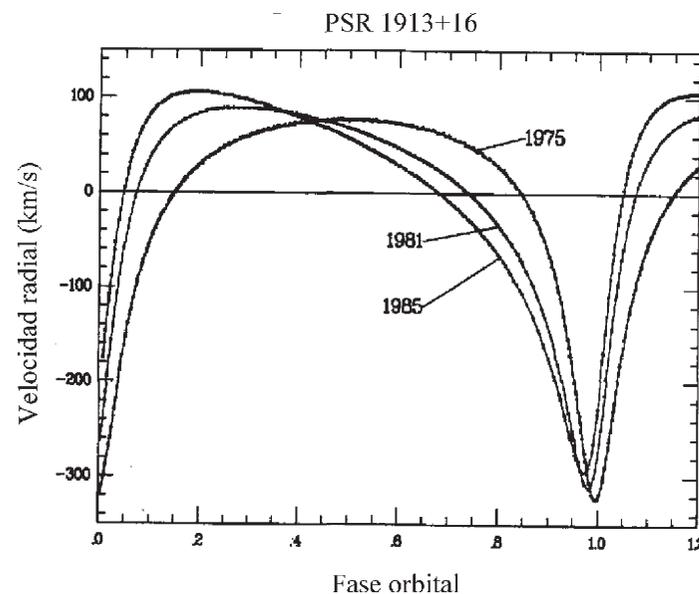


Figura 1: La forma de la curva de la velocidad radial en función de la fase orbital muestra un cambio muy fuerte en los primeros diez años tras el descubrimiento del primer pulsar binario, PSR 1913+16. La causa de ello es la precesión del periastro (más de 4° por año) debida a efectos relativistas.

¿Y qué es lo que se pone entonces de manifiesto?. Para empezar, los dos efectos gravitatorios que hasta ahora constituían la base experimental de la teoría de la RG de Einstein, ésto es, el avance del perihelio (punto más

próximo al Sol) de la órbita del planeta Mercurio y la atracción gravitatoria de las ondas electromagnéticas (curvatura de la luz de las estrellas a su paso por las proximidades del Sol), se manifiestan en el púlsar binario con una intensidad incomparablemente mayor. Por ejemplo, si el avance del perihelio de la órbita de Mercurio alrededor del Sol es de tan solo 43" por siglo, en el caso del púlsar binario descubierto por Taylor y Hulse, este avance es de 42" por día (¡unas 36.000 veces mayor!). Y lo mismo ocurre con el retardo en el tiempo de propagación de los impulsos emitidos por el púlsar a causa del campo gravitatorio de la estrella compañera del sistema binario (tan masiva y densa como aquél).

Aunque ahora determinados con mucha más precisión, los efectos que acabamos de mencionar eran efectos predichos por la RG que ya estaban comprobados experimentalmente. El resultado realmente novedoso que eleva el valor del descubrimiento de Taylor y Hulse a la categoría de merecer un Premio Nobel ha sido el hecho de que, aunque si bien indirectamente, las medidas del púlsar PSR 1913+16 ponen de manifiesto, de manera inequívoca, una de las predicciones más importantes y llamativas (y por ello más buscadas) de la teoría de la RG: la existencia de ondas gravitatorias. Predicción que establece, como hemos visto, que, del mismo modo que dos cargas eléctricas girando una en torno a otra generan y radían energía en forma de ondas electromagnéticas, dos masas neutras suficientemente grandes, orbitando una en torno a otra, generan y radían energía en forma de ondas gravitatorias (perturbaciones en el continuo espacio-tiempo), que también se propagan a la velocidad de la luz. Esta energía gravitatoria radiada es tan débil que, a pesar de los enormes esfuerzos experimentales realizados durante las últimas décadas para detectar directamente las ondas gravitatorias que deben producirse en los fenómenos cósmicos más violentos (explosiones de supernovas, núcleos de galaxias, etc), nada ha podido lograrse hasta la fecha (más adelante haremos mención al último tipo de complejísimo y costoso experimento que se está poniendo a punto para tratar de detectar directamente las ondas gravitatorias). Pues bien, las medidas ultraprecisas de las variaciones en los parámetros de la órbita del púlsar PSR 1913+16 ponen de manifiesto la emisión de una energía por parte del sistema binario, que sólo puede explicarse por la emisión de ondas gravitatorias. Y, además, el acuerdo cuantitativo entre las predicciones de la teoría de Einstein en cuanto a la cantidad de energía que debe ser radiada y los resultados de las medidas (energía orbital perdida por el púlsar) es tan extraordinariamente bueno, que todas las demás teorías de la gravitación alternativas a la de Einstein que todavía permanecían, han quedado completamente descartadas.

Como vemos, no se han detectado las ondas gravitatorias directamente, pero el descubrimiento del púlsar binario PSR 1913+16, realizado por Taylor y Hulse hace ahora veinte años, no deja lugar a duda razonable sobre su existencia. No hemos detectado las olas en el mar del espacio-tiempo, pero hemos descubierto una hélice que está perdiendo energía al agitarlo.

Desde el descubrimiento del púlsar PSR 1913+16 hasta la fecha, se han descubierto un total de, al menos, 29 púlsares binarios. Ha surgido así un nuevo campo de estudio en Astronomía en el que, como para los púlsares aislados, nuestro interés puede centrarse en el conocimiento de la naturaleza y evolución de los propios objetos observados, o bien pueden ser utilizados como herramientas para estudios de otros fenómenos físicos o astronómicos. Por ejemplo, en algunos de estos púlsares binarios, el objeto compañero no parece tener la masa de una estrella, sino más bien la de un planeta. De confirmarse estos resultados, se trataría de la primera detección de un planeta fuera de nuestro sistema solar, planteándose toda una serie de interesantes cuestiones astronómicas y físicas acerca de su génesis y evolución. Pero por otra parte, algunos sistemas Tierra-púlsar o púlsar binario podrían utilizarse como auténticas "antenas" de ondas gravitatorias. Para entender esto mejor, veamos primero en qué se basa el funcionamiento de las nuevas antenas de ondas gravitatorias que se están proyectando y construyendo en Europa y USA.

Dos son los proyectos más importantes que se están desarrollando (el VIRGO en Europa, y el LIGO en USA) para tratar de detectar las ondas gravitatorias procedentes de objetos o fenómenos astronómicos. En ambos casos, la antena diseñada aprovecha el efecto de las variaciones de la distancia entre dos puntos que deben producir las contracciones/dilataciones del espacio que se están propagando y que constituyen la propia onda gravitatoria. La idea, pues, es detectar las variaciones de esa distancia entre dos puntos. Variaciones que serán tanto más grandes cuanto mayor sea la distancia (como la de dos puntos en una goma que se estira). Interesa, pues, que la distancia sea lo más grande posible, aunque, claro está, también resultará más complejo el sistema diseñado para medirla. En ambos proyectos la solución adoptada consiste, básicamente, en detectar las variaciones de fase de un láser que se envía desde un punto a otro situado a varios kilómetros, y que experimenta numerosas reflexiones de ida y vuelta con idea de aumentar el recorrido efectivo en el número correspondiente de veces. Para evitar las fluctuaciones en la fase del rayo debidas a las irregularidades en la atmósfera, el rayo se propaga a través de un túnel en el que ésta es sumamente estable. Se utilizan, además, dos o tres líneas

de base independientes en distintas direcciones, con objeto de descartar aquellos eventos que no se produzcan simultáneamente en todas ellas. El eliminar, o minimizar o controlar, en estas antenas éstos y otros efectos perturbadores (efectos térmicos, vibraciones sísmicas, etc), constituye un desafío técnico que hace sumamente sofisticado y costoso el experimento. A comienzos del próximo siglo se espera obtener los primeros resultados con estas antenas de ondas gravitatorias.

Pues bien, la idea que mencionábamos más arriba de utilizar un sistema Tierra-púlsar o un púlsar binario, se basa en los mismos principios. La precisión de las medidas de los periodos y demás tiempos característicos de estos púlsares de muy corto periodo es actualmente tan grande, que podrían detectarse los efectos de las variaciones de las distancias (Tierra-púlsar u órbita del púlsar binario) producidas por el paso de ondas gravitatorias. Solo hay que tener en cuenta que, al igual que en las antenas de los experimentos anteriores, el periodo de la onda debe ser sensiblemente mayor que el tiempo de medida de la distancia (tiempo de recorrido de ésta a la velocidad de la luz), por lo que las antenas de púlsares solo podrían detectar ondas gravitatorias de muy baja frecuencia. Hemos de decir que ya se ha hecho algún intento de este tipo, aunque todavía sin éxito.

Como hemos tratado de mostrar en este artículo, la Radioastronomía de los púlsares de muy corto periodo (milisegundos), aislados y binarios, está abriendo unos campos de investigación que hace apenas unos años no se podían imaginar, y que tienen unas implicaciones importantísimas en teorías como la Relatividad General, que constituyen la misma base de la Física contemporánea. No será, pues, de extrañar que, en los años venideros, el estudio y observación de los púlsares conduzca a un nuevo descubrimiento que merezca la concesión del que sería el tercer Premio Nobel relacionado con estos singulares objetos astronómicos.