

El 29 de Junio de 2023 marca un hito en la historia de la astronomía gravitacional. La colaboración NANOGrav, junto con otras colaboraciones internacionales, anunciaron ese día el hallazgo en sus observaciones de la primera evidencia de la existencia de un fondo de ondas gravitacionales. Este acontecimiento marca también el principio de la astronomía gravitacional a bajas frecuencias (del orden de nano-Hercios). Junto con las observaciones de la colaboración LIGO/Virgo/Kagra este hecho señala también el nacimiento de la astronomía gravitacional multi-frecuencia.

A continuación describiremos brevemente las ideas principales en las que se basan estas observaciones así como sus resultados y sus posibles implicaciones para la astrofísica y la cosmología.



José J. Blanco-Pillado

Universidad del País Vasco UPV/EHU
josejuan.blanco@ehu.es

Xavier Siemens

Oregon State University
xavier.siemens@oregonstate.edu

LAS ONDAS GRAVITACIONALES COMO UNA NUEVA VENTANA AL UNIVERSO

Hace más de un siglo Einstein postuló la existencia de ondas del tejido mismo del espacio-tiempo. Sin embargo, la detección directa de las primeras ondas gravitacionales no se produjo hasta el año 2015 cuando la colaboración LIGO/Virgo capturó la señal emitida en forma de ondas gravitacionales por el choque de dos agujeros negros de aproximadamente 30 masas solares cada uno.

Desde esa primera detección la colaboración LIGO/Virgo ha continuado observando eventos de este tipo de forma rutinaria hasta el punto de que hoy en día el número total de sucesos registrados similares a aquel primero se acerca al centenar. Este tipo de observaciones realizadas en los interferómetros terrestres nos proporciona una cantidad de información muy valiosa sobre todos los objetos o sucesos en el universo que emiten ondas gravitacionales a una frecuencia del orden de 100 Hercios.

Por otro lado, la historia de la astronomía está plagada de ejemplos donde la observación en un nuevo rango de frecuencias electromagnéticas nos ha permitido descubrir eventos y procesos físicos nuevos. Por ejemplo, observaciones del cielo a ondas de radio muestran un universo muy distinto y complementario al universo que vemos con rayos X, ondas electromagnéticas once órdenes de magnitud mayores en frecuencia. Es por tanto imprescindible ampliar el espectro de frecuencias a las que tenemos acceso directo en el ámbito de ondas gravitacionales también.

Sin embargo, es claro que el rango de frecuencias es tan vasto que los métodos usados para detectar un tipo de ondas de alta frecuencia como las de LIGO/Virgo no son aplicables a otras zonas del espectro de ondas gravitacionales. Esta idea ha dado lugar a distintos métodos para la exploración del espectro de ondas gravitacionales a distintas frecuencias. Desde los interferómetros terrestres como LIGO/Virgo/Kagra hasta los métodos de detección de polarización asociada a la presencia de ondas gravitacionales en el fondo cósmico de microondas a frecuencias extremadamente bajas, el espectro de ondas gravitacionales tiene varias bandas de frecuencia donde los dispositivos y estrategias son muy diferentes.

ESCUCHANDO EL MURMULLO DEL COSMOS

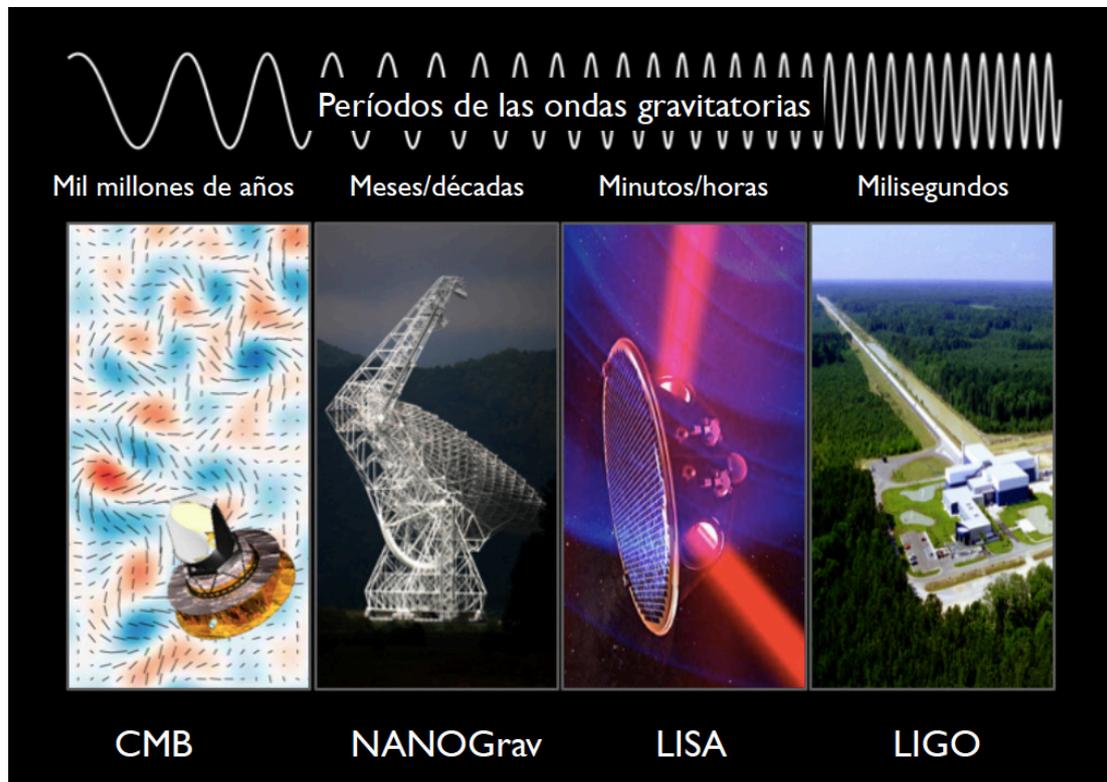


Figura 1. El espectro de ondas gravitacionales abarca muchos órdenes de magnitud en frecuencia, desde ondas gravitacionales que varían en tiempos de milisegundos, como las que detecta LIGO, hasta ondas que duran miles de millones de años como las que se están buscando en el fondo de microondas. [Shami Chatterjee/NANOGrav].

En este artículo nos concentraremos en la detección de ondas gravitacionales cuyos periodos van desde un año hasta una década. Esta técnica esta basada en el uso de una red de púlsares que, observados con los radiotelescopios más sensibles a los que tenemos acceso, nos permiten construir un detector de ondas gravitacionales a escala galáctica. A continuación, detallaremos brevemente el método usado en la detección de ondas gravitacionales haciendo uso de estos pulsares. nos permiten tener un detector de ondas gravitacionales a escala galáctica. A continuación, detallaremos brevemente el método usado en la detección de ondas gravitacionales haciendo uso de estos pulsares.

USANDO PÚLSARES COMO DETECTORES DE ONDAS GRAVITACIONALES

Los púlsares son estrellas de neutrones que se forman después de que su estrella progenitora acabe

su periodo vital mediante una explosión de tipo supernova. Una de las características principales de estos púlsares es la presencia de un haz de ondas electromagnéticas que emana de su polo magnético. La rápida rotación de esta estrella de neutrones produce un fenómeno similar al de un faro en el que el haz barre, de forma periódica, zonas del espacio produciendo en esas direcciones la presencia de pulsos de energía electromagnética. Algunos de estos púlsares en nuestra galaxia dirigen de forma periódica su haz de ondas electromagnéticas hacia la Tierra y se pueden detectar usando radio telescopios. El periodo de alguno de estos pulsares es extremadamente estable, lo que confiere a estos objetos astrofísicos la distinción de ser los relojes naturales más precisos. Es precisamente esta característica natural de los pulsares como relojes cósmicos super-precisos lo que los hace candidatos perfectos para formar parte de un detector de ondas gravitacionales.

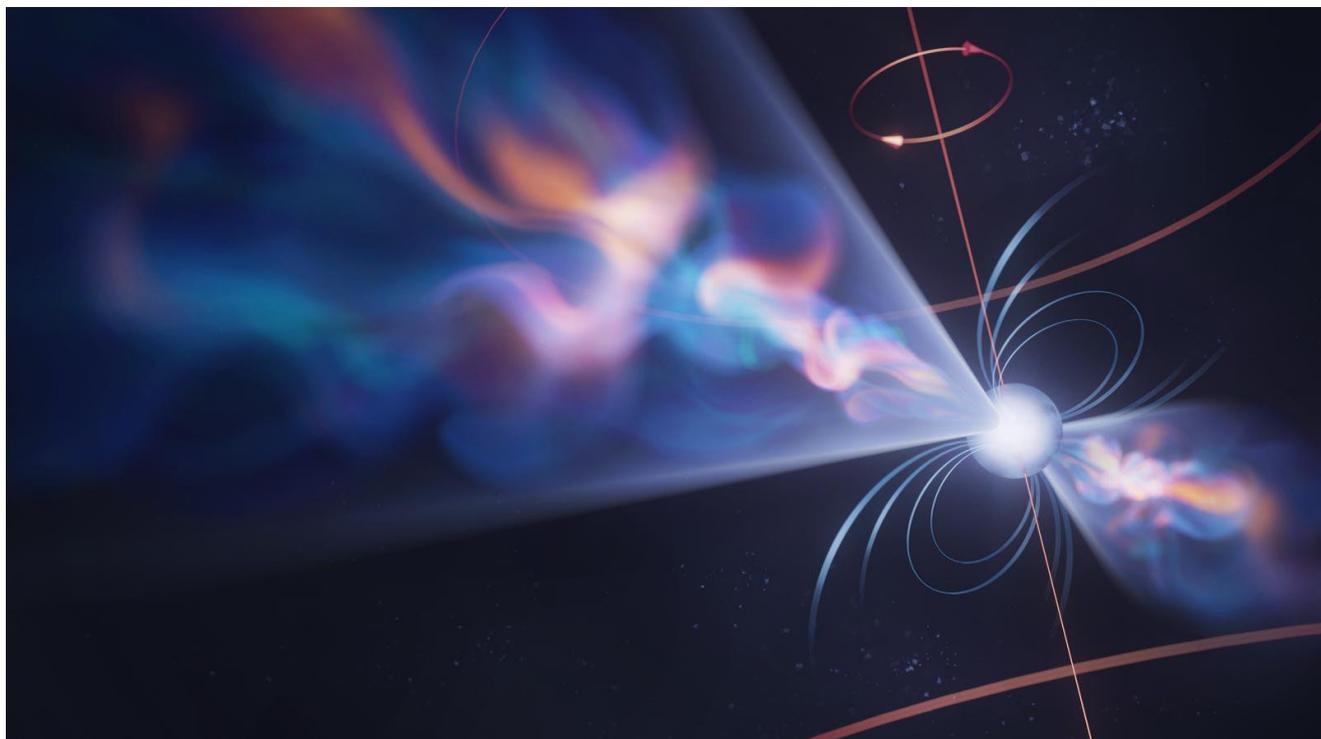


Figura 2. Representación artística de un púlsar. Crédito NANOGrav [3].

Cuando una onda gravitatoria atraviesa el espacio que media entre nosotros y el pulsar, distorsiona el espacio-tiempo. Una manera de entender este efecto radica en considerar que la onda gravitacional altera, a su paso, la distancia efectiva que recorren los pulsos desde el pulsar hasta nosotros. Esto da lugar a una modificación en el instante de llegada del pulso a la Tierra, ya sea anticipándolo o retrasándolo de manera leve. La observación extremadamente precisa de la llegada de estos pulsos es por tanto un método que nos permite, en principio, inferir la existencia de ondas gravitatorias.

No obstante, la detección de este tipo de señales es mucho más complicada debido a la presencia de numerosos fenómenos que pueden enmascarar o simular los efectos de las ondas gravitacionales. Es por esto por lo que es necesario encontrar un método que nos permita eliminar en la medida de lo posible estos otros efectos, así como identificar la señal puramente relacionada con las ondas gravitacionales.

Para poder llevar esto a cabo se necesita en primer lugar entender el tipo de fenómenos que pueden inducir algún tipo de desviación temporal en la llegada de los pulsos a la Tierra. Esto requiere un estudio detallado de las características específicas de los pulsares (sus propiedades intrínsecas, periodo de rotación, posible órbita del pulsar, etc ...), así como de los posibles efectos debidos al recorrido del pulso por el espacio interestelar hasta nosotros.

Una vez que estos factores han sido debidamente considerados, se puede establecer un modelo teórico que pronostica el tiempo de llegada de los pulsos. Cualquier discrepancia con respecto a este modelo se considera potencialmente una señal atribuible a las ondas gravitacionales.

Aún bajo esta consideración exhaustiva, persiste la posibilidad de que algún efecto sea malentendido o, más aún, que la existencia de dicho efecto sea desconocida. Por consiguiente, es necesario emplear

algún procedimiento que permita eliminar cualquier señal que no sea producida por ondas gravitacionales. Afortunadamente la teoría de la Relatividad de Einstein nos proporciona este método, siempre y cuando se usen de forma simultánea los datos obtenidos por un conjunto de púlsares. Es por esto por lo que este tipo de observaciones se ha dado en llamar "Pulsar Timing Array (PTA) Observations" ya que implica el uso de señales provenientes de un conjunto o "array" de púlsares.

El efecto distintivo de las ondas gravitacionales aparece cuando calculamos las correlaciones entre las variaciones en los tiempos de llegada de los pulsos de este conjunto de púlsares. De acuerdo con la teoría de la Relatividad de Einstein, un fondo de ondas gravitacionales, que se presume homogéneo e isótropo, deja su impronta característica en estas correlaciones.

Dicho efecto se concreta en un patrón de correlaciones que exhibe una dependencia en función del ángulo entre las posiciones de los púlsares en el cielo. Esta función angular es conocida como la "curva de Hellings-Downs", y su detección de manera concluyente representa uno de los principales

objetivos de todas las colaboraciones que trabajan en el ámbito de la detección de ondas gravitacionales a través de esta metodología.

LA COLABORACIÓN NANOGrav

NANOGrav, las siglas con las que se conoce la colaboración internacional denominada *North American Nanohertz Observatory for Gravitational Waves*, fue establecida en el año 2007 y desde su creación ha ido aumentando el número de sus miembros hasta los aproximadamente 200 miembros actuales pertenecientes a 70 instituciones. La mayoría de estas instituciones se encuentran en Norteamérica (Estados Unidos y Canadá) pero también cuenta con un pequeño número de centros de investigación en Europa. España participa en NANOGrav con la Universidad del País Vasco (UPV/EHU) a través del grupo de *Early Universe Cosmology* en Bilbao (Spain) (<http://tp.lc.ehu.es/earlyuniverse/>).

A lo largo de un periodo que abarca más de 15 años, la colaboración NANOGrav ha llevado a cabo un meticulosa recopilación de datos relativos a los tiempos de llegada de las señales de los pulsos provenientes de un conjunto de púlsares en nuestra

Figura 3. Los radiotelescopios que utiliza NANOGrav incluyen el Green Bank Telescope, de 100 metros, el Observatorio de Arecibo cuyo telescopio de 300 metros desgraciadamente colapsó en Diciembre del 2020 (NANOGrav utiliza en sus análisis datos de Arecibo hasta su colapso), el Canadian Hydrogen Intensity Mapping Experiment (CHIME) en Canadá, y el Very Large Array (VLA) en Nuevo Mexico.



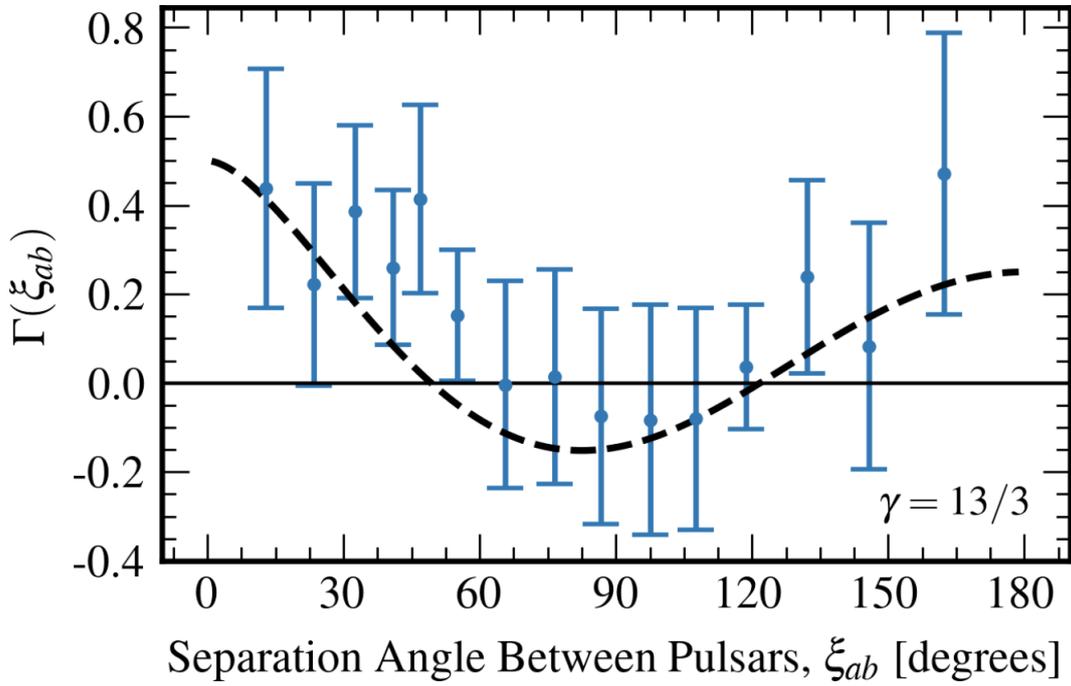
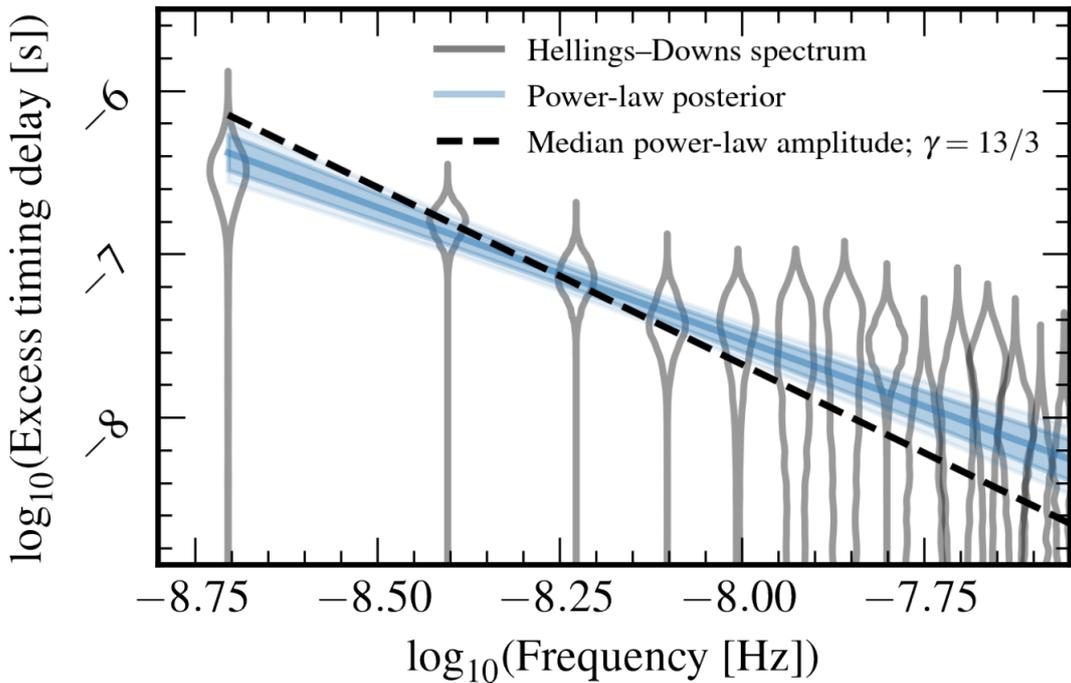


Figura 4. Correlaciones en las desviaciones en los tiempos de llegada de pulsos de púlsares como función de su separación angular. Los resultados de NANOGrav (en azul) comparados con la predicción de Hellings y Downs (en negro). (Para más información ver [1]).

Figura 5. El espectro de la señal encontrada por NANOGrav a distintas frecuencias (gris) se ajusta bien a una ley de potencias (azul, best fit), aunque no coincide exactamente con lo que esperamos de agujeros negros supermasivos (negro) que evolucionan puramente emitiendo ondas gravitacionales. (Para más información ver [1]).



galaxia. Para esta tarea la colaboración ha hecho uso de algunos de los radiotelescopios más grandes del mundo. En particular, los datos utilizados en el último análisis llevado a cabo por la colaboración (15 year data set) se han obtenido gracias al Radio Telescopio de Arecibo (Puerto Rico), y los telescopios de Green Bank (West Virginia, EEUU) y el Very Large Array en Nuevo Mexico (EEUU).

Durante estos años la colaboración ha ido incorporando nuevos pulsares al conjunto de objetos observados periódicamente hasta llegar al número de 67 pulsares en los que se basa el presente estudio. El procedimiento de adquisición de datos implica la observación de los tiempos de llegada de los pulsos con una frecuencia de muestreo típica de un mes. Esto nos permite poder decir algo sobre la potencia de la señal de ondas gravitacionales en periodos que van desde un mes (la cadencia de observación) hasta aproximadamente una década (el periodo total de observación).

El análisis de los datos obtenidos durante todos estos años parece indicar que la espera ha valido la pena! El 29 de Junio de este año, NANOGrav anunció públicamente la observación de la primera evidencia de la presencia de un fondo de ondas gravitacionales en el rango de nano-Hercios. Los resultados obtenidos por NANOGrav de las correlaciones entre los distintos pulsares observados demuestran una semejanza clara con la curva de Hellings y Downs (ver Figura 4). El análisis estadístico de los datos confirma esta evidencia visual. Los resultados se ajustan mejor a esta curva que a otra producida por algún otro tipo de efecto no relacionado con las ondas gravitacionales. Estudiando las propiedades de la señal de los pulsos a lo largo de los 15 años de observación, se puede extraer también información sobre la variación de la potencia del fondo de ondas gravitacionales a distintas frecuencias. El resultado indica la presencia de un espectro de ondas gravitacionales común a todos los pulsares.

El espectro obtenido por NANOGrav (15 year data set) se presenta en la Figura (5). En primera aproximación el espectro se ajusta bien a una ley de potencias caracterizada por una amplitud y un índice espectral. La información obtenida con el cálculo del espectro directamente de las observaciones es una

de las herramientas que nos permite distinguir entre los posibles modelos astrofísicos y cosmológicos que pueden dar lugar a esta señal.

EL ORIGEN DE ESTE FONDO DE ONDAS GRAVITACIONALES

Es importante recalcar una vez más que las observaciones realizadas por NANOGrav indican la presencia de una señal consistente con la existencia de un fondo de ondas gravitacionales. Es decir, a diferencia de lo que se detectó inicialmente en LIGO/Virgo, los resultados de NANOGrav no son atribuibles a una fuente puntual sino que todo indica que es el resultado de la combinación de un número grande de fuentes. Teniendo esto en cuenta la pregunta es clara. ¿Que tipo de objetos o eventos astrofísicos pueden dar lugar a estas fuentes y por lo tanto a este fondo de ondas gravitacionales?

Analizando los posibles objetos astrofísicos que pueden dar lugar a ondas gravitacionales en este rango de frecuencias, destaca un escenario en particular: una pareja de agujeros negros supermasivos de entre 100 y 1000 millones de masas solares orbitando uno en torno al otro. Este espectacular baile cósmico puede parecer a primera vista exótico sin embargo nuestro conocimiento actual de la evolución del universo nos lleva a pensar que este tipo de evento es, en cierto modo, bastante común.

A lo largo de la historia del universo la atracción gravitatoria hace que galaxias cercanas colisionen entre ellas. De hecho, es fácil encontrar ejemplos en los que este tipo de siniestro galáctico es capturado por alguna imagen de un catalogo de galaxias. Por otro lado, usando distintas observaciones astrofísicas hemos llegado también al convencimiento de que cada galaxia alberga en su interior a un agujero negro supermasivo.

Dadas estas circunstancias, es plausible suponer que muchas colisiones galácticas culminen con la formación de un sistema binario con dos agujeros negros supermasivos orbitando en órbitas cercanas a la circular.

Si estos agujeros negros no están acompañados por otra materia que afecte sus trayectorias, continuarán en su danza orbital durante millones de años, emitiendo ondas gravitacionales en el proceso. La

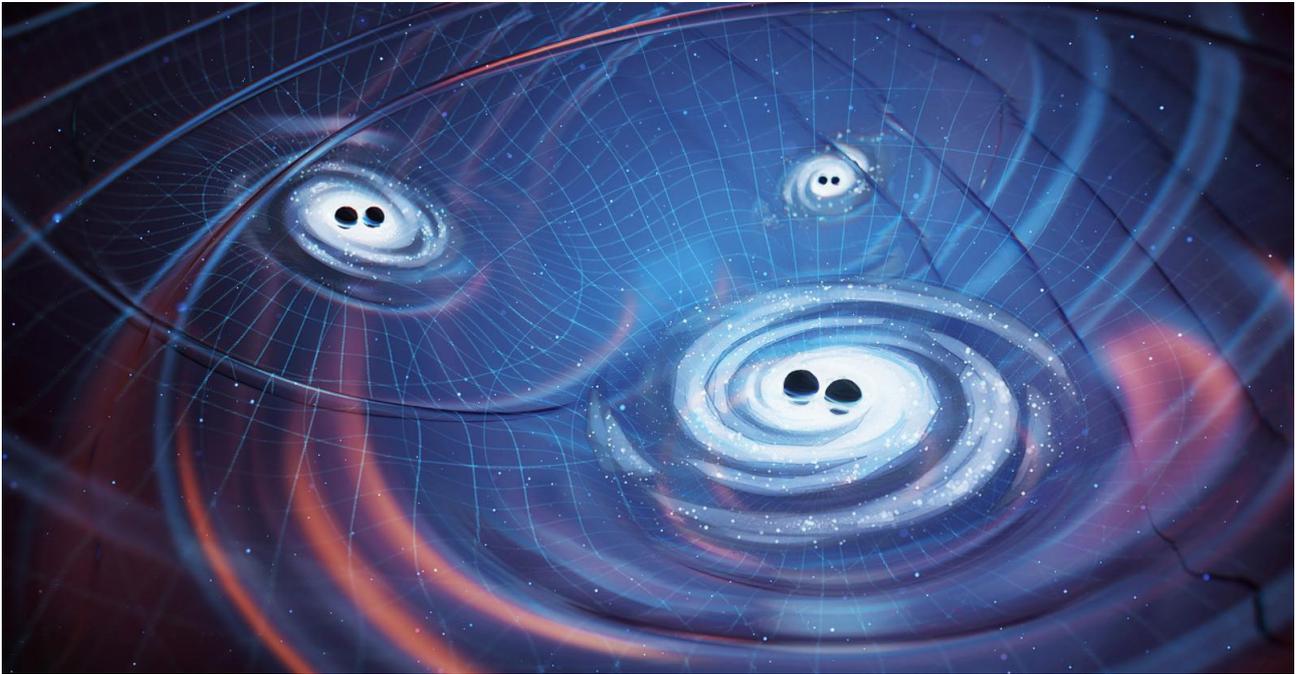
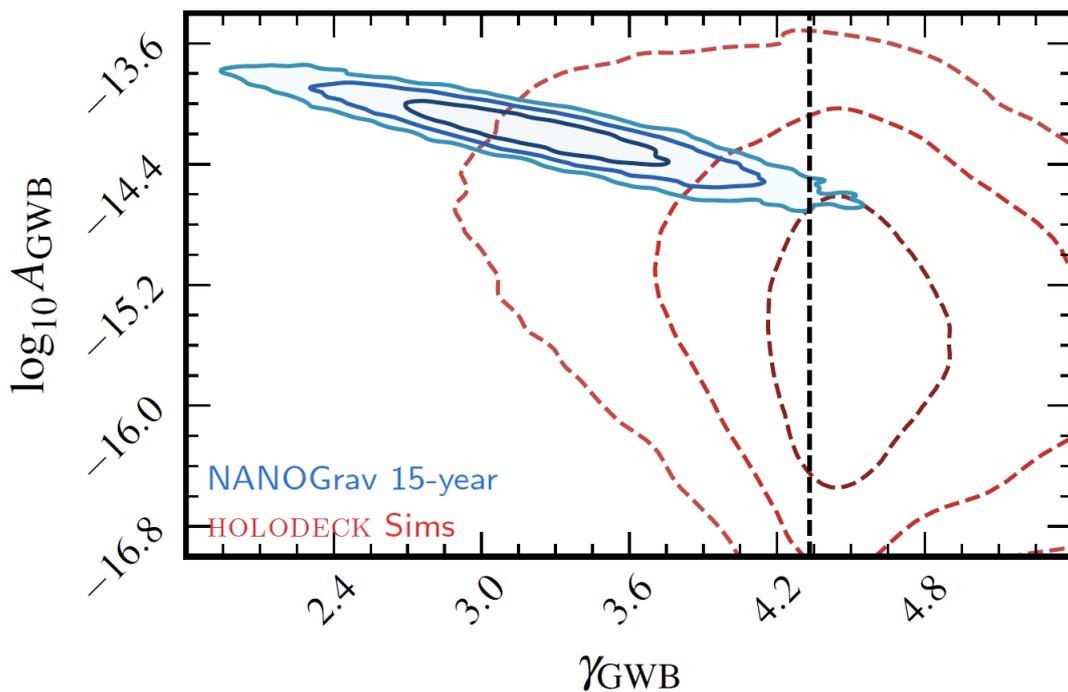


Figura 6. La colisión de múltiples agujeros negros supermasivos contribuye a un fondo de ondas gravitacionales en el rango de frecuencias de observación de los observatorios de PTAs. (Visión artística: NANOGrav website [3]).

Figura 7. Contours de la posterior probability para la amplitud (A_{GWB}) y el índice espectral γ_{GWB} para los datos obtenidos de NANOGrav (15 year data) (azul) comparados con los resultados obtenidos de la simulación de un conjunto de modelos de poblaciones de agujeros negros supermasivos (rojo, discontinuo). La línea vertical discontinua de $\gamma = 13/3$ describe el valor usualmente atribuido al caso de agujeros negros supermasivos en órbitas circulares.



acumulación de la emisión de ondas gravitacionales de todos estos eventos a lo largo de la historia del universo genera un fondo de ondas gravitacionales que debería ser detectable en el rango de nano-Hercios; el rango de frecuencias en el que se realizan las observaciones de NANOGrav. Todo esto nos lleva a concluir que este escenario es ciertamente una de las posibles fuentes de los datos obtenidos recientemente por NANOGrav.

A pesar de que esta fuente astrofísica de ondas gravitacionales es quizás la explicación más plausible de los resultados del NANOGrav existe la posibilidad de que ésta no sea la única contribución a este fondo de ondas gravitacionales. De hecho, los datos parecen indicar una cierta tensión entre el tipo de espectro que uno esperaría en estos modelos basados en agujeros negros supermasivos y el espectro que mejor se ajusta a los datos. Una manera de representar esta posible discrepancia se ilustra gráficamente en la Figura (6). En ella se muestra una comparación entre los parámetros que mejor ajustan los datos y aquellos obtenidos a partir de modelos de agujeros negros en órbitas circulares. Es importante de todas formas darse cuenta de la existencia de una considerable incertidumbre en las predicciones teóricas de modelos astrofísicos fundamentados en agujeros negros. Por lo tanto, podría ser prematuro considerar esta discrepancia como significativa.

Esta potencial discrepancia plantea la posibilidad de la existencia de otra contribución de origen distinto al fondo de ondas gravitacionales en este intervalo de frecuencias. Una de las ideas más interesantes a este respecto es la posibilidad de que fenómenos del universo temprano puedan contribuir a esta señal. Este tipo de fenómenos pueden estar asociados a la evolución misma de espacio-tiempo, como la creación de ondas gravitacionales por procesos cuánticos durante un periodo inflacionario inicial, o su posterior formación por procesos asociados a las posibles transiciones de fase que puedan haber ocurrido a lo largo de la historia del universo, o la evolución de una red de cuerdas cósmicas.

Muchos de estos procesos ocurren en un momento dado en la historia del universo, por ejemplo, el momento en que el universo se enfría lo suficiente como para producir una transición de fase. La producción

de ondas gravitacionales en ese momento particular deja su huella en el espectro de frecuencias de estas ondas mediante la aparición de un pico de señal a una frecuencia característica asociada con ese tiempo. Siguiendo este razonamiento se demuestra que la época cosmológica correspondiente a la escala característica de la banda de frecuencias de NANOGrav hoy en día se encuentra en el universo temprano. Para ser más precisos, la temperatura típica del universo era del orden de 100 MeV cuando se produjeron estas ondas que vemos hoy en día en la banda de nano-Hercios. Esto nos dice que este tipo de experimentos no solo son una herramienta para astrofísica y cosmología, sino que tienen unas implicaciones muy importantes para la física de partículas más allá del modelo estándar.

Es por lo tanto claro que la posible identificación de todo o parte del fondo observado con un proceso en el universo primordial tendría sin lugar a dudas un impacto muy importante en el desarrollo de la física de partículas. Incluso si en el futuro llegásemos a tener la certeza de que toda esta señal es de origen astrofísico, esta observación nos permitirá poner cotas importantes en los parámetros que caracterizan los modelos de física de partículas. Algo que hoy en día no podemos hacer por ningún otro método.

Uno de los artículos recientemente publicados por NANOGrav [2] examina la posibilidad de que algunos de estos modelos del universo primordial puedan dar cuenta de los datos observacionales obtenidos. Los resultados de este estudio indican que, si bien existen varios modelos capaces de explicar los datos, no se observa una preferencia estadística clara de estos modelos frente a aquellos basados puramente en fuentes astrofísicas descritas anteriormente. No obstante, las limitaciones impuestas por estas observaciones nos permiten excluir, a día de hoy, cierto espacio de parámetros en las teorías previamente propuestas.

OTRAS COLABORACIONES

El mismo día del anuncio de NANOGrav, el 29 de Junio de 2023, y de forma coordinada, otras colaboraciones internacionales dedicadas a la detección de ondas gravitacionales con PTAs (EPTA: European Pulsar Timing Array, PPTA: Parkes Pulsar Timing Array, CPTA: Chinese Pulsar Timing Array)

publicaron de forma simultánea el resultado de sus observaciones. Sus resultados son consistentes con los obtenidos por NANOGrav. Este hecho es particularmente relevante teniendo en cuenta que estas observaciones son en gran medida complementarias ya que usan datos provenientes de, en muchos casos, distintos pulsares, así como procesamiento de datos independientes. Todo esto nos da mayor confianza en la existencia real de este fondo de ondas gravitacionales que inunda nuestro universo.

Existe además un consorcio de colaboraciones denominado IPTA (“International Pulsar Timing Array”) que agrupa a los diferentes esfuerzos observacionales a nivel internacional en este rango de frecuencias. Uno de los objetivos de este consorcio es realizar un análisis de los datos obtenidos por el conjunto de todas las colaboraciones de una forma unificada. Esto quiere decir, en la práctica, que el número efectivo de púlsares involucrados en el nuevo análisis conjunto se verá incrementado de forma considerable. La esperanza es que este nuevo análisis, con mayor estadística nos permita alcanzar una evidencia irrefutable de la existencia de la señal estocástica de ondas gravitacionales y una mejor caracterización de esta señal.

FUTURO

Estos resultados marcan, sin lugar a duda, un hito en la historia de la astronomía gravitacional y nos permiten observar el cosmos desde una perspectiva completamente nueva para nosotros. Los próximos años nos deparan un futuro ciertamente excitante en este campo de la astronomía. Por un lado, la mejora continua de los experimentos tanto en el equipamiento como en el tratamiento de datos nos permitirá detectar señales de eventos astrofísicos a los que aun no hemos tenido acceso con los medios actuales. Por otro, la incorporación de un buen número de nuevos púlsares nos servirá también para reducir la incertidumbre de los parámetros que determinan el tipo de espectro observado.

Por todo esto esperamos que en los próximos años los nuevos datos obtenidos puedan proporcionarnos la capacidad de detectar fenómenos para los cuales los datos recopilados por NANOGrav hasta ahora no han encontrado una evidencia. En particular, si la señal observada es efectivamente producida por procesos

astrofísicos, su distribución espacial debería estar correlacionada con la presencia de materia y por lo tanto no debería tener una señal totalmente isotrópica. La evidencia de algún tipo de anisotropía nos permitiría discernir entre las distintas opciones que podrían dar lugar a las observaciones que hemos descrito más arriba. Por ejemplo, muchos de los modelos cosmológicos estudiados hasta la fecha predicen la existencia de un fondo meramente isotrópico.

Por otro lado, en los próximos años deberíamos empezar a ser capaces de observar fuentes puntuales suficientemente cercanas. Esto dependerá por supuesto de cuan claras son estas señales sobre el ruido de fondo, pero las previsiones actuales ponen esta detección en el horizonte de los próximos años.

Todas estas nuevas observaciones nos permitirán dar respuestas a muchos interrogantes relacionados con astrofísica y cosmología y entender mejor nuestro universo. Sin embargo, lo quizás más interesante es pensar en los nuevos fenómenos que podremos descubrir gracias a esta nueva forma de observar el universo. En otras palabras, en el futuro quizás podamos corroborar no solo los modelos que ya conocemos sino aquellos que aún no están escritos.

REFERENCIAS

- [1] “The NANOGrav 15 yr Data Set: Evidence for a Gravitational-wave Background”, NANOGrav Collaboration, Adeela Afzal et al. ; *Astrophys. J. Lett.* 951 (2023) 1, L8; 2306.16213 [astro-ph.HE].
- [2] “The NANOGrav 15 yr Data Set: Search for Signals from New Physics”; NANOGrav Collaboration, Adeela Afzal et al. ; *Astrophys. J. Lett.* 951 (2023) 1, L11; 2306.16219 [astro-ph.HE].
- [3] NANOGrav website (<https://nanograv.org/>).

INFORMACIÓN ADICIONAL

Jose J. Blanco-Pillado está afiliado al EHU Quantum Center de la UPV, es profesor de investigación Ikerbasque y es miembro asociado de la colaboración NANOGrav.

Xavier Siemens es co-director del *NANOGrav Physics Frontier Center* financiado por *National Science Foundation* (NSF).

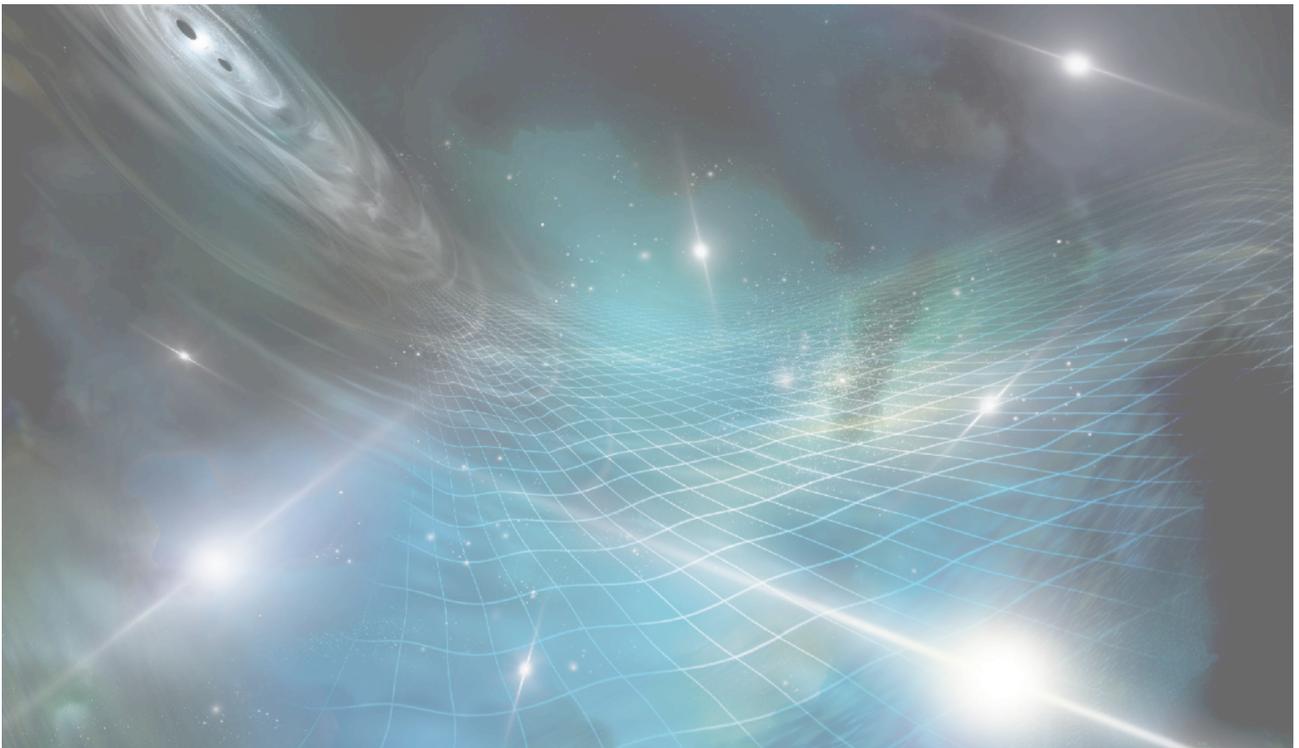


Figura 8. Interpretación artística de una serie de púlsares afectados por ondas gravitacionales producidas por un agujero negro binario supermasivo en una galaxia distante, que ondulan el espacio-tiempo (Aurore Simonnet/NANOGrav).