

GW230529: OBSERVACIÓN DE LA FUSIÓN DE UNA ESTRELLA DE NEUTRONES Y UN OBJETO COMPACTO DESCONOCIDO

La primera detección directa de [ondas gravitacionales](#) (OGs) en 2015 con [GW150914](#) marcó el amanecer de una nueva era para la astronomía. Desde entonces, se han realizado muchas más detecciones de OGs, procedentes de diferentes tipos de fuentes. Todas ellas han sido **coalescencias de sistemas binarios de objetos compactos**, formadas por estrellas de neutrones (ENs) y/o agujeros negros (ANs). Anunciamos aquí [la detección de GW230529](#), una coalescencia de un sistema binario de objetos compactos observada el 29 de mayo de 2023, durante la primera parte del cuarto periodo de observación (O4a) de los detectores **LIGO-Virgo-KAGRA**, siendo uno de los componentes de naturaleza incierta por tener una masa mayor que el rango esperado para ENs y menor que el rango esperado para ANs.

¿CÓMO DETECTAMOS ESTE EVENTO?

Analizamos los datos de cada uno de los detectores en funcionamiento utilizando la técnica de **filtro adaptado**. Esto implica comparar los datos del detector con las señales predichas para encontrar la predicción que mejor se ajuste, en el caso de que una señal real esté oculta en los datos. Se obtiene así una estimación de la intensidad de la señal en función del tiempo, o una serie temporal de la relación señal-ruido. Si realmente hay una señal astrofísica en los datos del detector, la relación señal-ruido será alta; en caso contrario, será baja. Esta técnica ha demostrado su eficacia a la hora de identificar señales débiles de OGs en los datos del detector, pero no es infalible. Diversas fuentes de ruido pueden interferir en nuestras mediciones o incluso imitar las señales de OGs.

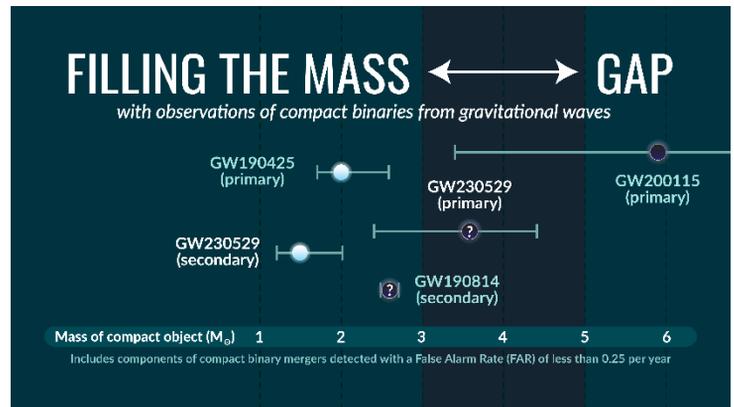


Figura 1: Ilustración que muestra algunas de las masas de los componentes de eventos de OGs que están aproximadamente en la región de 3-5 masas solares, también conocida como la "brecha de masas inferior". Los círculos azules representan fuentes que son ENs, los círculos negros representan fuentes que son ANs, y los círculos negros con un signo de interrogación indican que la fuente podría ser un AN, pero que también hay una posibilidad de que fuse una EN. La masa del componente primario de GW230529 está situada en esta brecha. (Créditos: S. Galadage, Observatoire de la Côte d'Azur.)

¿CÓMO SABEMOS QUE GW230529 ES UN EVENTO REAL?

La mayoría de las veces buscamos señales que coincidan tanto en el tiempo como en los parámetros de la fuente en nuestros diferentes detectores. Pero no nos limitamos a buscar sucesos coincidentes. Hemos refinado nuestras técnicas de análisis de tal manera que un solo detector es suficiente para afirmar con seguridad que se trata de una detección, y afortunadamente así ha sido, ya que permitió la detección del evento excepcional GW230529, cuando los únicos datos utilizables procedían de [LIGO-Livingston](#). Tres **líneas de búsqueda** independientes (o algoritmos de búsqueda) anunciaron la detección de GW230529. Todos ellos utilizan la técnica del filtro adaptado, pero la implementan de forma diferente, y han desarrollado potentes herramientas para discernir los eventos astrofísicos del ruido. La madurez de estas líneas de búsqueda nos permite cotejar sus resultados con confianza.

Por tanto, es extremadamente improbable que el ruido del detector haya podido producir una señal como GW230529. El evento se detectó durante un análisis en tiempo real de los datos del detector y la detección se verificó al final del periodo de observación. El evento se notificó con una **tasa de falsas alarmas** inferior a una por cada mil años. Esto significa que, en ausencia de cualquier señal de coalescencia de sistemas binarios de objetos compactos en los datos del detector, esperamos que tal señal se produzca en el ruido por casualidad menos de una vez cada mil años. En la **Figura 2** se muestra cómo este evento destaca del resto de los candidatos.

Visita nuestras páginas web:

www.ligo.org

www.virgo-gw.eu

gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en



¿POR QUÉ ES INTERESANTE ESTE EVENTO?

La comunidad científica lleva varios años proponiendo la existencia de una **brecha de masas inferior** en la distribución de masas de los objetos compactos, entre $3 M_{\odot}$ y $5 M_{\odot}$ (M_{\odot} hace referencia a la **masa de Sol**), donde esperamos pocos objetos compactos. Sin embargo, observaciones recientes de sistemas binarios a través de [ondas electromagnéticas](#) u OGs han propuesto candidatos para sistemas binarios con un componente en la brecha de masas inferior. Por ejemplo, se estimó que la masa del objeto secundario en [GW190814](#) se situaba, con una probabilidad muy alta, entre $2,50 M_{\odot}$ y $2,67 M_{\odot}$, superior a la de la EN más masiva conocida en el momento de la detección, pero inferior a las masas de ANs proyectadas.

Con una masa primaria estimada de unas $3,6 M_{\odot}$, GW230529 es el primer sistema binario candidato con el componente primario en la brecha de masas inferior, como muestra la **Figura 3**. Dado nuestro conocimiento actual de las poblaciones de ENs y ANs, la masa primaria es consistente (con una probabilidad del 99%) con un AN de masa inferior a $5 M_{\odot}$. Sin embargo, también se estimó la probabilidad de que el componente primario sea una EN, teniendo en cuenta nuestros conocimientos actuales de la teoría y la experimentación de la física nuclear, así como de las poblaciones de fuentes astrofísicas. Esta probabilidad de ser una EN es pequeña pero no nula, y bajo ciertos supuestos puede alcanzar incluso unos pocos tantos por ciento; por tanto, no podemos excluir este escenario con certeza. Por otro lado, el componente secundario de GW230529, cuya masa tiene una probabilidad del 90% de situarse entre $1,2 M_{\odot}$ y $2,0 M_{\odot}$, es casi con toda seguridad una EN.

Figura 3: Distribución de probabilidad de las masas componentes de varios sistemas binarios. Los valores más probables de la masa se indican mediante los picos de las funciones de distribución de probabilidad. El gráfico superior es la distribución proyectada para la masa del componente primario y el gráfico derecho es la distribución proyectada para la masa del componente secundario. También se dibujan líneas discontinuas de igual relación de masas $q = m_2/m_1$. GW170817 (rosa) y GW190425 (verde) eran consistentes con sistemas binarios de ENs. GW200105_162426 y GW200115_042309 (naranja y azul respectivamente) eran coherentes con sistemas EN-AG. La masa secundaria de GW190814 (rojo) puede ser un AN o una EN. La brecha de masas inferior entre 3 y $5 M_{\odot}$ se muestra como una zona sombreada en gris. Vemos que GW230529 (verde azulado) está justo entre los dos sistemas binarios de ENs y los dos EN-AN, con su masa primaria en la región de la brecha de masas inferior.

FIGURAS DE LA PUBLICACIÓN

Para saber más sobre estas figuras y cómo fueron hechas, lee el [preprint](#) gratuito.

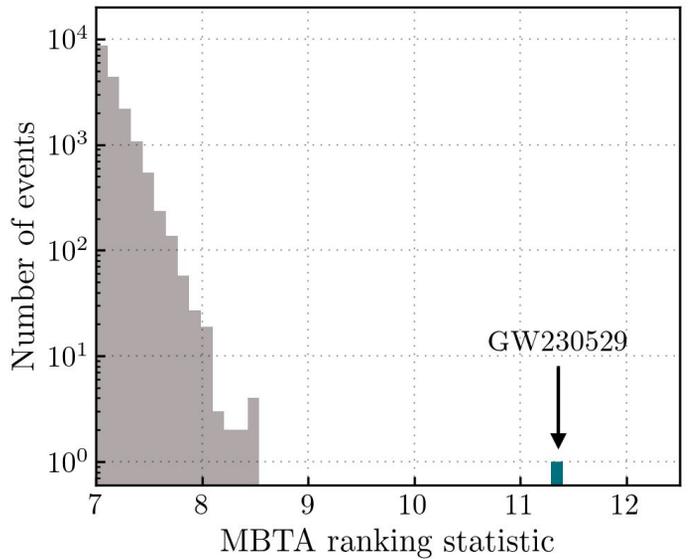
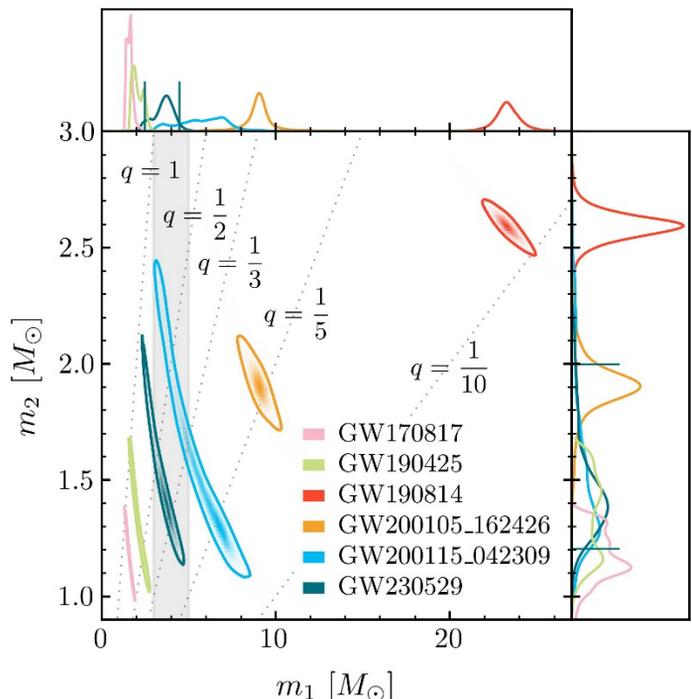


Figura 2: Distribución de la estadística de clasificación de una de las líneas de búsqueda (llamada MBTA) para todos los eventos candidatos en LIGO Livingston durante las dos primeras semanas del cuarto periodo de observación (O4a). El eje horizontal indica el valor de la estadística de clasificación, que se utiliza para clasificar los eventos que han activado la línea de búsqueda y también incorpora varias pruebas para discriminar el ruido. La estadística de clasificación se deduce de la relación señal-ruido; cuanto mayor es el valor estadístico, más significativo es el evento y es más consistente con una señal astrofísica. La distribución gris corresponde a sucesos que no fueron lo suficientemente significativos como para clasificarlos como de origen astrofísico. La zona azul corresponde a GW230529. Vemos que la variable estadística de clasificación de GW230529 es mucho mayor que para el resto de los sucesos, no detectándose ningún suceso con un valor de clasificación superior a 8,5, salvo GW230529, con un valor de clasificación de 11,4.



¿QUÉ NOS ENSEÑA?

Las fusiones EN-AN son eventos poco frecuentes. Por lo tanto, cada detección adicional es extremadamente valiosa para el estudio de las tasas de fusión, así como para caracterizar las poblaciones de ANs y ENs, que es uno de los objetivos de la astronomía de OGs. Esto significa inferir la forma de sus distribuciones de masas, deducir la masa mínima y máxima de los ANs y ENs, y estudiar la abundancia de objetos compactos en rotación de diferentes masas. Utilizando sólo GW230529, la tasa de fusiones inferida para sucesos similares es de unos 39 sucesos por año en un volumen de unos $3,5 \times 10^{28}$ años-luz cúbicos.

Un análisis que incluye otros [sucesos candidatos a EN-AN](#) detectados durante el tercer periodo de observación (O3) arroja unos 61 sucesos al año en un volumen de unos $3,5 \times 10^{28}$ años-luz cúbicos. Otro análisis que incluye candidatos adicionales, menos significativos, da una tasa de fusiones de unos 95 eventos al año en un volumen de unos $3,5 \times 10^{28}$ años-luz cúbicos. De estos análisis se desprende que la tasa de fusiones inferida para sistemas binarios similares a GW230529 es comparable a la tasa de fusiones inferida durante O3 para otros sucesos cuyo componente primario era sin duda un AN. Esto refuerza la hipótesis de que el componente primario del sistema binario GW230529 sea un AN. En la **Figura 4** se muestra la distribución de probabilidad de las tasas de fusión de EN-AN.

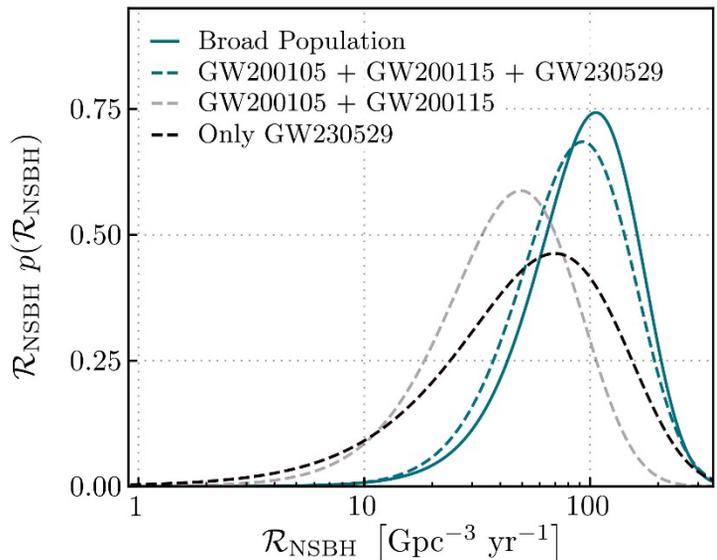


Figura 4: Distribuciones de probabilidad de la tasa de fusión de los sistemas EN-AN. Las funciones de distribución de probabilidad alcanzan su máximo en el valor más probable de la tasa de fusión, que se muestra en el eje horizontal. Las líneas discontinuas se han obtenido utilizando únicamente los modelos de población EN-AN indicados en la figura. La línea continua, denominada "población amplia", se ha obtenido utilizando un modelo de población que incluye otros sucesos menos significativos, como se explica en el texto. Vemos que los valores máximos de las distintas distribuciones están relativamente próximos entre sí, en el sentido de que todas las poblaciones se solapan en cierta medida. En particular, el valor máximo hallado utilizando solo GW230529 es comparable al valor máximo hallado cuando se incluyen otros sucesos EN-AN.

Debido a que su masa primaria se encuentra muy probablemente en la brecha de masas inferior, GW230529 es un candidato ideal para refinar los **modelos de población**. Se consideran tres modelos de población, con el fin de estudiar cómo se ven afectados por la observación de GW230529. Los dos primeros modelos incluyen todos los tipos de objetos binarios compactos (sistemas binarios de EN, sistemas binarios de AN y sistemas binarios EN-AN), mientras que el tercero sólo considera la población EN-AN. La inclusión de GW230529 en los dos primeros modelos no cambia significativamente el resultado, lo que significa que GW230529 no es un valor atípico para estos modelos. El tercer modelo, sin embargo, se altera significativamente, como se muestra en la **Figura 5**. Vemos que en este caso la abundancia de ANs de baja masa aumenta y la masa mínima de un AN se desplaza hacia valores más bajos. Cuando incluimos GW230529, encontramos una masa mínima de unos $3,36 M_{\odot}$ en comparación con el valor anterior de unos $6,04 M_{\odot}$ para este modelo.

El proceso de formación que dio lugar a GW230529 es incierto. Los conocimientos actuales sobre **supernovas de colapso del núcleo** en estrellas masivas no favorecen este escenario como origen del componente primario del sistema binario debido a su baja masa. Un escenario más plausible es una formación por **colapso retardado**, donde un AN se forma después de la supernova debido a la acreción de materia residual por el núcleo. Resultados recientes de modelos numéricos han mostrado evidencias de que la formación de ANs de $3-6 M_{\odot}$ es posible mediante este mecanismo de formación. Las simulaciones del colapso del núcleo de estrellas de helio han predicho masas de ANs tan bajas como la masa máxima de las ENs, aunque el rango de masas por debajo de $5 M_{\odot}$ está menos poblado. A día de hoy, los modelos de colapso del núcleo siguen presentando grandes incertidumbres en cuanto al resultado del proceso, por lo que resulta difícil determinar con precisión los límites de las masas de los objetos compactos. GW230529 es, por tanto, un valioso recurso para restringir estos modelos.

Otro escenario posible para la formación del componente primario es a través de una fusión de un sistema binario de ENs. En este caso podemos imaginar que el componente secundario es miembro de un antiguo sistema triple o cuádruple, o que fue capturado por el componente primario mientras evolucionaba en un cúmulo estelar joven o en un núcleo galáctico activo. Tampoco podemos excluir un origen no estelar, como un **agujero negro primordial**.

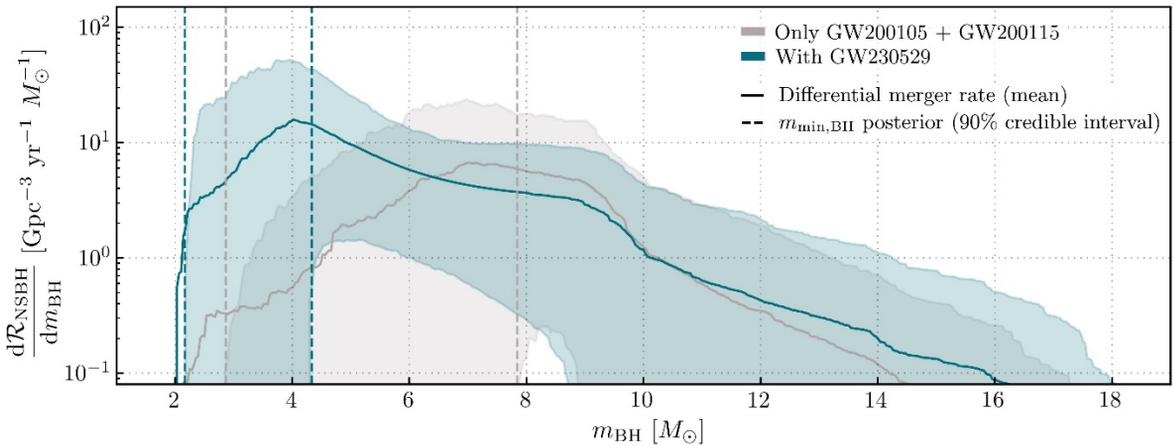


Figura 5: Tasa de fusión de sistemas binarios EN-AN (eje vertical) en función de la masa del AN (eje horizontal) en el sistema. Las curvas continuas muestran las tasas de fusión para dos modelos diferentes y las áreas sombreadas muestran las incertidumbres correspondientes a estos modelos. Las líneas verticales discontinuas muestran el rango esperado para la masa mínima de un AN, con un 90% de probabilidad. El color gris considera un modelo de población de solo EN-AN que excluye GW230529. El color azul también incluye GW230529 en el modelo de población EN-AN. Vemos que la inclusión de GW230529 aumenta la abundancia de sistemas binarios con ANs de baja masa, además de empujar la masa mínima para los ANs hacia valores más bajos.

Una investigación más profunda de los sistemas en la brecha de masas inferior como GW230529 nos permitirá afinar nuestra comprensión de las poblaciones de ANs y ENs. Esto, a su vez, permitirá comprender mejor sus mecanismos de formación y, en el caso de las ENs, su estructura interna.

PARA SABER MÁS:

Visita nuestras webs: www.ligo.org, www.virgo-gw.eu, gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en

Lee el preprint gratuito del artículo científico completo [aquí](#).

Traducción al castellano por Pablo García e Isabel Cordero-Carrión (a partir de la versión original en inglés).

GLOSARIO

Coalescencia de sistemas binarios de objetos compactos: comúnmente abreviada como CBC, consiste en dos ANs, dos ENs, o un AN y una EN que giran uno en torno al otro y finalmente se fusionan. Todo el proceso produce OGs que aumentan en frecuencia y amplitud a medida que los dos objetos se acercan y aceleran. El objeto resultante de la fusión puede ser una EN o un AN, dependiendo del sistema inicial. Los objetos que forman el sistema binario se denominan sus componentes, definiéndose el componente primario como el que tiene mayor masa.

Agujero negro (AN): objeto compacto tan denso que la velocidad necesaria para escapar de sus garras es superior a la velocidad de la luz. Esto hace que aparezca como una región oscura del espacio, ya que ninguna luz procedente de esta región puede llegar hasta nosotros.

Estrella de neutrones (EN): objeto compacto extremadamente denso constituido casi en su totalidad por neutrones con una pequeña mezcla de protones y electrones, ya que los átomos no pueden soportar la presión. Son el resultado del colapso de estrellas másivas tras un proceso denominado supernova de colapso del núcleo. La masa máxima prevista para las estrellas de neutrones es de aproximadamente $3 M_{\odot}$.

Agujero negro primordial: hipotético AN que podría haberse formado en el universo primitivo, poco después del Big Bang. Las masas previstas oscilan entre $10^{-18} M_{\odot}$ y $10^{36} M_{\odot}$.

LIGO, Virgo y KAGRA: situados respectivamente en Estados Unidos, Italia y Japón, son los instrumentos que permiten detectar las OGs. El concepto básico de los detectores LIGO, Virgo y KAGRA consiste en dos brazos de escala kilométrica que forman una "L", con espejos en sus extremos y por los que circula un haz láser. Utilizamos el láser para medir las variaciones relativas en la longitud de los brazos provocadas cuando las OGs atraviesan la Tierra. La distancia entre los brazos de cada detector se controla constantemente y da lugar a los datos en los que buscamos las señales de las OGs.

Filtro adaptado: método que utilizamos para analizar los datos del detector y detectar eventos de coalescencia de sistemas binarios de objetos compactos. Consiste en comparar en todo momento los datos de nuestros detectores con las señales de OGs predichas teóricamente, que dependen de las propiedades del sistema binario, en busca de correlaciones. Cuando una OG real cruza la Tierra deberíamos encontrar una buena correspondencia entre los datos del detector y la señal predicha.

Brecha de masas inferior: un intervalo de masas en el que esperamos que no existan objetos compactos o que existan pocos. Este rango se extiende aproximadamente desde $3 M_{\odot}$ para la masa máxima de una EN, hasta $5 M_{\odot}$ para la masa mínima de un AN.

M_{\odot} o masa solar: masa del Sol, utilizada como unidad de masa estándar en astronomía. Equivale aproximadamente a 2×10^{30} kg.

año-luz: unidad de distancia. 1 año-luz es la distancia recorrida por la luz en un año, calculada a partir de la velocidad de la luz en el vacío. Equivale aproximadamente a $9,5 \times 10^{12}$ km.

Modelo de población: modelo teórico que da la abundancia de objetos compactos de un tipo dado en función de cualquier combinación de parámetros binarios.

Supernova de colapso del núcleo: en una estrella, la presión de su gas compensa constantemente la atracción gravitatoria de su núcleo. Cuando se acerca el final de su vida, la presión disminuye y la estrella ya no puede soportar la atracción gravitatoria. Sufre un colapso gravitatorio extremadamente rápido hacia su núcleo que tiene varias consecuencias posibles. El colapso repentino puede crear una presión extremadamente alta en la estrella y provocar su explosión en forma de supernova, de ahí el nombre de "supernova de colapso del núcleo". La supernova puede dejar tras de sí una EN o un AN en caso de colapso retardado. Si la estrella es demasiado masiva, colapsará directamente en un AN, saltándose el paso de la supernova.

Colapso retardado: en el caso de una supernova de colapso del núcleo que forma una EN, la materia residual puede "retroceder" hacia la EN. Esta acumulación de materia puede aumentar la masa de la EN por encima de su masa máxima y provocar la formación de un AN.

Línea de búsqueda: programa informático que consiste en una cadena de varios procesos. Acondicionan los datos para su análisis, los filtran y, a continuación, calculan diversas cantidades con el fin de rechazar el mayor número posible de eventos ruidosos y estimar la significación estadística de los eventos astrofísicos candidatos. Algunos procesos se ejecutan en tiempo real, otros en diferido y otros de ambas formas. Encontrará más información en la guía del usuario de alertas públicas de IGWN.

Búsqueda en diferido: Los análisis en diferido son búsquedas que se realizan sobre datos de un periodo de observación anterior, normalmente durante las pausas en las que los detectores no están operativos, por mantenimiento y actualizaciones. Complementan el análisis en tiempo real (también llamados análisis en línea o online) que se realizan durante los periodos de observación.

Tasa de falsas alarmas: se utiliza para cuantificar la probabilidad de que un suceso haya sido causado por ruido. Se calcula simulando sucesos precedentes de ruido y observando la intensidad de su señal, para obtener una distribución de la tasa esperada de tales sucesos en función de la intensidad de la señal. En términos más concretos, si un suceso tiene una tasa de falsas alarmas de 1 al día, esto significa que esperamos que el ruido de nuestro detector produzca un suceso de este tipo aproximadamente una vez al día. Por tanto, tendríamos poca confianza de que este suceso tenga origen astrofísico.