

GUÍA DEL VIAJERO INTERESTELAR

CRÓNICAS DEL UNIVERSO VIOLENTO

MANEL PERUCHO Y JOSÉ ANTONIO FONT

El universo, a diferencia de lo que podría parecer desde nuestro punto de vista, es extremadamente violento. Las explosiones de estrellas masivas, las estrellas binarias de rayos X y rayos gamma y las galaxias activas están relacionadas con la presencia de objetos compactos, ya sean estrellas de neutrones o agujeros negros. Procesos como el acrecimiento de materia o la formación y lanzamiento de chorros de plasma relativista son responsables de la generación de grandes cantidades de radiación de alta energía, debido a la aceleración de las partículas elementales, y tienen un impacto relevante en sus entornos. Además, están relacionados con la generación de ondas gravitatorias, vibraciones en el espacio-tiempo producidas por la aceleración de objetos compactos masivos que producen fuertes curvaturas. Estos sistemas se estudian en el marco de la teoría de la relatividad especial y general. En este artículo se resumen varios de los escenarios astrofísicos más extremos conocidos, y se ofrecen descripciones breves de lo que conocemos sobre ellos en la actualidad.

Palabras clave: relatividad, agujeros negros, estrellas de neutrones, galaxias activas, hidrodinámica.

Desde este nuestro rincón observamos el universo como quien, no habiendo salido nunca de su terruño, mira desde la distancia y juzga todo cuanto acontece en otros lugares con los mismos criterios con los que juzga las cosas de casa. Y estos procesos no son observados de manera objetiva, sino que pasan por el filtro de la lente que nos ponen nuestros condicionantes externos.

He aquí el error: miramos hacia arriba sin caer en la cuenta de que si acaso nos planteamos cualquier cosa es porque existimos y tenemos conciencia e inteligencia. Conciencia de ser e inteligencia para la reflexión. Pero aún cometemos un error más grave si pensamos que podemos extrapolar nuestras condiciones a cualquier lugar del universo: si nosotros existimos y tenemos conciencia es porque no se ha dado ningún acontecimiento astronómico terrible en nuestro entorno en los últimos millones de años. Dicho esto sin ánimo de dramatizar, sino simplemente de describir aspectos relevantes. Cabe decir que vivimos en una galaxia relativamente tranquila y la población estelar de nuestro entorno no parece ser muy violenta.

**«SI EXISTIMOS Y TENEMOS
CONCIENCIA ES PORQUE
NO SE HA DADO NINGÚN
ACONTECIMIENTO
ASTRONÓMICO TERRIBLE
EN NUESTRO ENTORNO EN
LOS ÚLTIMOS MILLONES DE
AÑOS»**

Pero el universo es violento (y moralmente neutro, como añadía acertadamente aquel personaje de Woody Allen en la película *Septiembre*), y si la vida se ha desarrollado en este nuestro pequeño planeta se debe a que, por ejemplo, no había ninguna fuente de rayos gamma (la radiación más energética), ya fuese persistente, o ocasional y extremadamente potente, relativamente cerca.

O también porque nuestra estrella no es lo suficientemente masiva como para agotar la fase de fusión de hidrógeno en tan solo algunos millones de años para luego morir en una explosión violenta.

Hay, curiosamente, un aspecto que relaciona la mayoría de los escenarios astrofísicos en los que se producen fenómenos muy energéticos o violentos: la presencia o formación de objetos compactos. En astrofísica entendemos por objeto compacto aquel que es masivo

y con un tamaño (relativamente) pequeño. Precisamente aquellos en los que la descripción newtoniana de la gravedad y la mecánica clásica dejan de ser válidas y se hace necesaria la descripción geométrica de la gravitación que publicó Albert Einstein en 1915. El campo de la

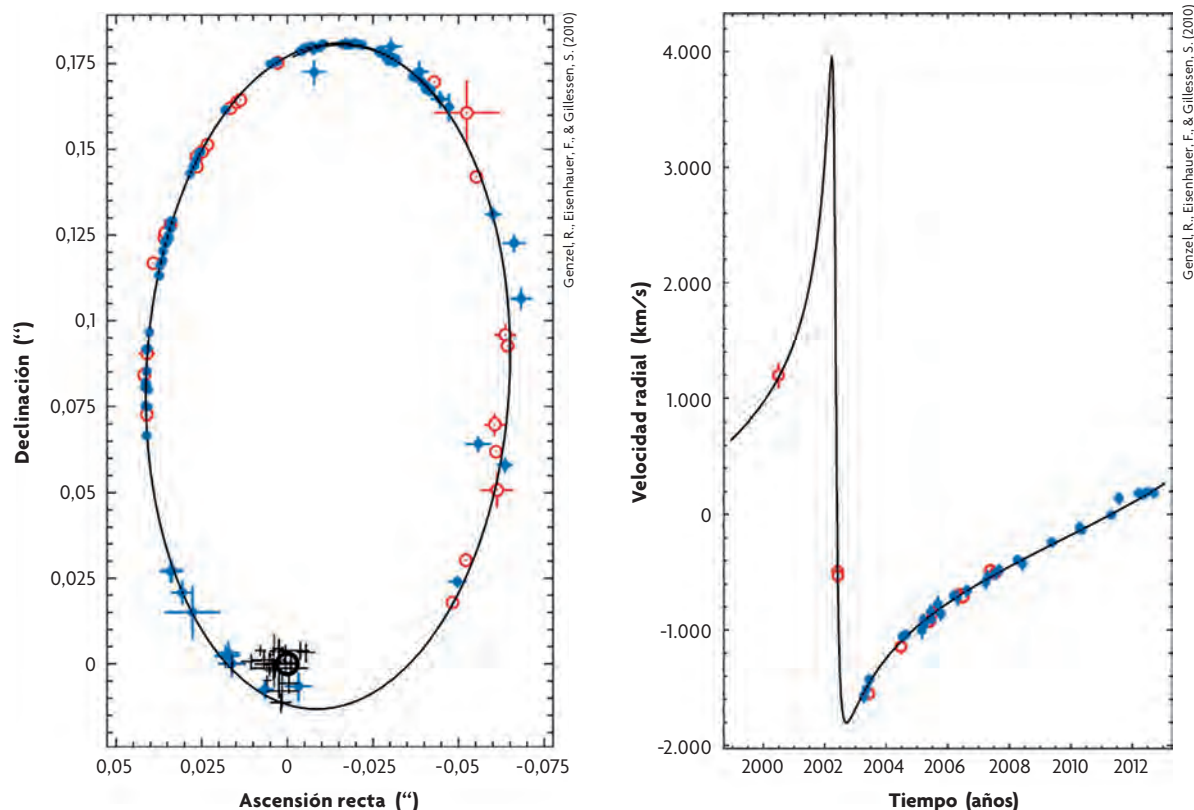


Figura 1. El seguimiento de las estrellas más cercanas al centro de nuestra galaxia mediante telescopios infrarrojos (VLT y Keck) durante dos décadas ha permitido dibujar perfectamente sus órbitas y calcular la masa del objeto central alrededor del cual orbitan. La imagen muestra la órbita de la estrella más próxima al objeto supermasivo (a la izquierda) y su velocidad radial (a la derecha). Los puntos azules corresponden a medidas realizadas con el VLT, mientras que los rojos corresponden a medidas realizadas con el telescopio Keck. Las cruces indican las barras de error en la medición de la ubicación del objeto. La posición de Sagitario A* se marca con un círculo negro, y para el que se ha calculado una masa de cuatro millones de masas solares.

astrofísica que se dedica a estudiarlos, además de todos los procesos que se producen tanto en su formación como, una vez formados, a su alrededor, se conoce desde los años sesenta del siglo XX como «astrofísica relativista» (Shapiro y Teukolsky, 1983/2007).

Este campo creció de la mano del desarrollo de la astronomía más allá del espectro óptico, ya que esta estrecha ventana a través de la que nuestro ojo y nuestros telescopios tradicionales observan el cielo no revela toda la información que nos llega del cosmos. Además, no es en esta banda en la que se detectan principalmente los fenómenos asociados a la astrofísica relativista. En estos escenarios, partículas como los electrones, o su antipartícula, el positrón, son aceleradas a velocidades muy cercanas a la de la luz, y llegan a tener una energía total de varios órdenes de magnitud el valor de su energía en reposo. Las partículas que adquieren estas energías emiten radiación desde las ondas de radio hasta los rayos gamma, dependiendo del proceso mediante el cual radian. Nuevamente, la mecánica clásica no nos vale y recurrimos a la teoría de la relatividad especial de Einstein de 1905.

■ EVIDENCIAS OBSERVACIONALES: LOS NÚCLEOS GALÁCTICOS

Estos escenarios extremos se dan con frecuencia en presencia de objetos compactos relacionados con las últimas fases de la evolución estelar (enanas blancas, estrellas de neutrones y agujeros negros). A escalas mucho mayores, existen evidencias que apuntan a la presencia de agujeros negros supermasivos en el núcleo de galaxias y cuásares (Netzer, 2013). Tanto las enanas blancas como las estrellas de neutrones han sido directamente observadas en diferentes bandas del espectro electromagnético. Sin embargo, en el caso de los agujeros negros, la observación directa es obviamente imposible, ya que la curvatura que producen en el espacio-tiempo atrapa incluso la luz. Podemos decir que el interior del agujero se encuentra causalmente desconectado del exterior. A la superficie que separa el «interior» del «exterior» se la conoce como «horizonte de sucesos». Sin embargo, las predicciones teóricas nos dicen que hay diversas formas de detectarlos de manera indirecta y las observaciones de alta resolución así lo confirman.



Por ejemplo, el efecto Doppler de la luz que nos llega desde emisores en movimiento (semejante al efecto Doppler en las ondas sonoras) ha permitido realizar medidas directas de periodos orbitales de estrellas en un sistema binario o de los periodos de sus cambios de brillo, y con ello, medir la masa del objeto invisible que las acompaña. En muchos de estos sistemas, el objeto compacto (sea una estrella de neutrones o un agujero negro) puede atraer el gas de las capas externas de la estrella compañera cuando esta crece en sus últimas fases de evolución y dichas capas se aproximan lo suficientemente al objeto. En este proceso de canibalización estelar se produce radiación de alta energía en forma de rayos X, así como de rayos gamma en algunos casos.

En lo que respecta a los agujeros negros en los centros de las galaxias, la teoría nos dice que se da una «dilatación temporal» en regiones del espacio-tiempo curvadas por un objeto masivo respecto a regiones circundantes sin curvatura. Esta «dilatación» produce un corrimiento al rojo de la radiación electromagnética. En consecuencia, esta llega a un observador lejano con una frecuencia menor a la de emisión (debido a esta dilatación temporal) y por tanto con una longitud de onda mayor, más roja. Este efecto ha sido observado en los centros de galaxias activas, en líneas de emisión (línea K-alfa del hierro) que se ensanchan más hacia el rojo que hacia el azul, lo que indica claramente un corrimiento al rojo gravitacional.

En el caso del centro de la Vía Láctea tenemos una evidencia aún mayor: el estudio de las órbitas de diferentes estrellas alrededor de un mismo punto ha permitido una descripción kepleriana de estas (igual que la de un planeta alrededor de una estrella) alrededor de un objeto compacto e invisible de unos cuatro millones de masas solares (véase la figura 1), es decir, un agujero negro supermasivo conocido como Sagitario A*. A pesar de ello, ahora mismo se desarrollan nuevos detectores que pueden darnos una imagen clara del entorno más inmediato del supuesto agujero negro. En esta línea encontramos por ejemplo el Event Horizon Telescope (EHT), un observatorio interferométrico¹ a longitudes de onda milimétricas formado por

«UNA DE LAS CLAVES PARA LA OBSERVACIÓN DE UN AGUJERO NEGRO ES LA CURVATURA QUE PRODUCE EN LOS RAYOS DE LUZ QUE PASAN POR SU ENTORNO»

radiotelescopios ubicados en Chile, Hawái, Arizona, España, Francia y la Antártida. O también un nuevo experimento que se llevará a cabo en el Very Large Telescope (VLT), un conjunto de telescopios ópticos e infrarrojos ubicados en Chile y que se basan en la interferometría en estas franjas del espectro. Se espera que estos dos observatorios, junto con futuros instrumentos como el Square Kilometer Array, permitan observar el contorno del agujero negro, lo que se conoce como su «sombra» (véase, por ejemplo, Goddi et al., 2016), próximamente.

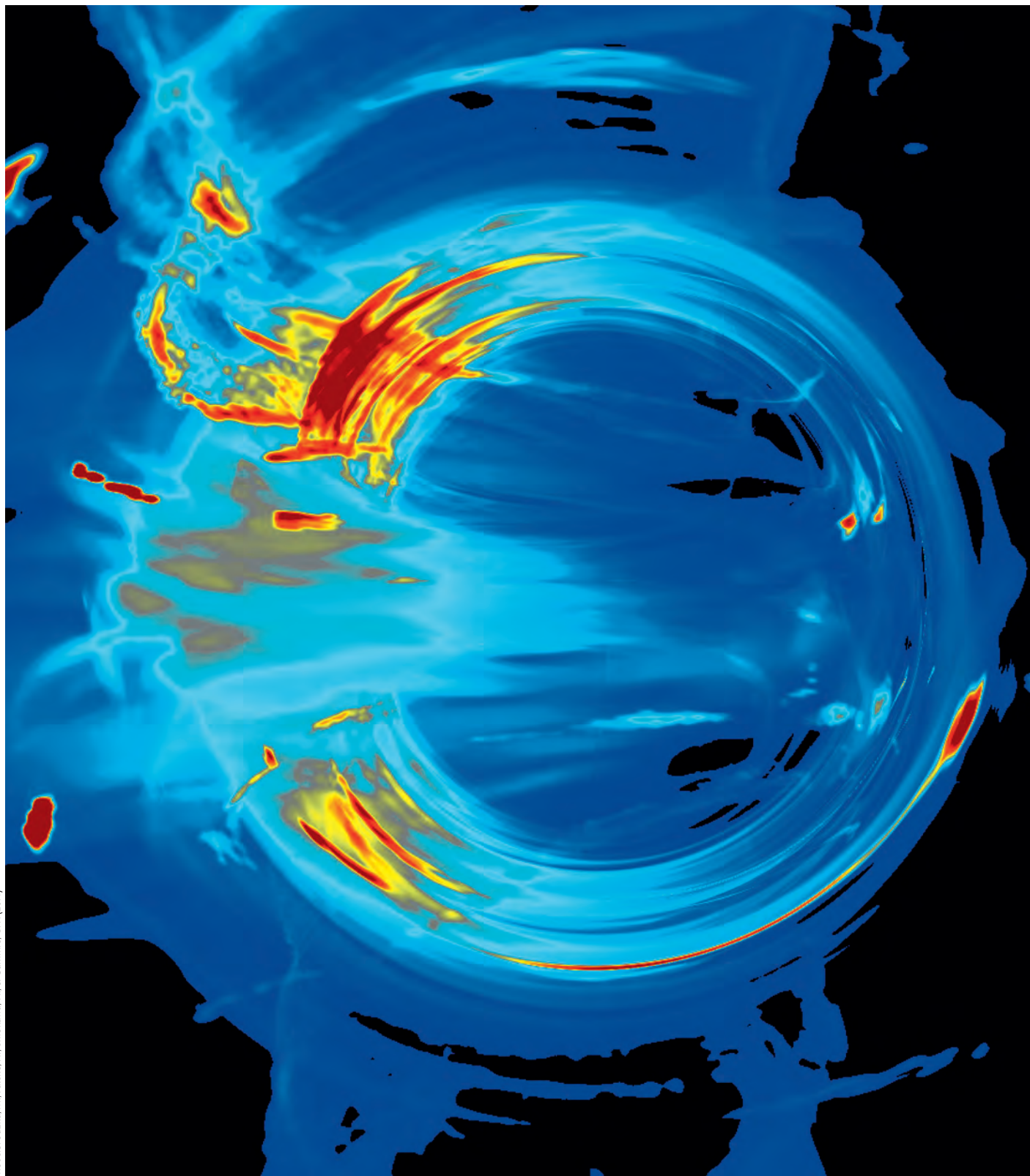
Una de las claves para la observación indirecta de un agujero negro es la curvatura que produce en los rayos de luz que pasan por su entorno. El experimento de Sir Arthur Eddington en 1919 durante un eclipse de Sol demostró que este efecto predicho por la teoría de la relatividad general era correcto. En el caso de los agujeros negros, la curvatura extrema de los rayos de luz emitida en sus alrededores, por ejemplo desde el

disco de materia que cae sobre él, le daría una apariencia parecida a la mostrada en la figura 2, muy similar a la imagen popularizada en la película *Interstellar* del ficticio agujero negro *Gargantúa*. La observación del agujero negro del centro de nuestra galaxia, Sagitario A*, es posible, ya que es el más cercano a nosotros, aunque se necesitarán observaciones muy precisas para percibir su sombra.

De hecho, su tamaño angular en el cielo es de unos 37 microsegundos de arco, el tamaño equivalente aproximado a observar desde la Tierra una pelota de frontón sobre la Luna o a observar una bacteria a 20 km de distancia.

A pesar de que todos los escenarios que hemos descrito se observan en nuestra galaxia, el término «astrofísica relativista» no surgió en torno a observaciones de objetos galácticos, sino que se utilizó por vez primera en el marco del descubrimiento de los cuásares. En 1962, Maarten Schmidt anunció la detección de líneas espectrales de hidrógeno en el espectro del cuásar 3C273. Se trataba de líneas de emisión claramente desplazadas al rojo, lo que indicaba que 3C273 es una fuente lejana, extragaláctica, teniendo en cuenta la ley de Hubble. Pronto se dedujo que se trataba de una galaxia, y que su apariencia cuasiestelar (de aquí el nombre *quasi stellar object*, QSO, o *quasar* para las fuentes que emiten en radio) se debía a que la mayor parte de la radiación que recibimos de ella se produce en una región pequeña de esta. En este caso, un agujero negro supermasivo, con alrededor de cien o mil

¹ La interferometría es una técnica que consiste en la observación simultánea de un objeto con diferentes detectores separados entre sí para conseguir una observación equivalente a la que se obtendría con un detector tan grande como la distancia que los separa. En el caso de antenas separadas por distancias continentales, esto representa el equivalente a tener un telescopio con un tamaño de miles de kilómetros.



Mościbrodzka, M., Falcke, H., Shiokawa, H., & Gammie, C. F. (2014)

Figura 2. La imagen muestra la «sombra» de un agujero negro en rotación calculada mediante simulaciones numéricas. Se espera que los nuevos detectores como el EHT o el experimento Gravity del VLT nos proporcionarán imágenes de esta región para el agujero negro supermasivo del centro de la Vía Láctea, Sagitario A*, en un futuro cercano.

veces más masa que Sagitario A* (esto es, de cien mil a mil millones de masas solares) situado en el centro de una galaxia, atrapa materia de un disco de gas que se ha formado a su alrededor. El ritmo de caída de materia sobre el agujero es del orden de una masa solar o una fracción de ella por año. Esta cantidad de materia produce cantidades de energía comparables a la conversión de la masa de la Tierra en energía ($E_0 = m c^2 \sim 10^{40-41} \text{ J}$)² cada segundo.

■ LOS FENÓMENOS MÁS VIOLENTOS DEL COSMOS: SUPERNOVAS Y ERUPCIONES DE RAYOS GAMMA

Al final de su evolución termonuclear, las estrellas con una masa inicial entre 9 y 30 masas solares (donde una masa solar equivale a $1.989 \cdot 10^{30} \text{ kg}$) no son capaces de producir suficiente energía en su interior para sostener su masa. Así pues, la estrella colapsa sobre sí misma. Este colapso se detiene cuando la materia alcanza densidades superiores a las de los núcleos atómicos ($\sim 10^{17} \text{ kg/m}^3$), y se forma una estrella de neutrones. Si las estrellas progenitoras de este proceso son suficientemente masivas, el colapso puede no detenerse y dar como resultado la formación de un agujero negro. En una estrella de neutrones la materia está tan comprimida que una cucharada de la misma tendría una masa superior a 100 millones de toneladas.

Tras la parada brusca del colapso en ese objeto central compacto, se produce un violento rebote en el que se libera una energía (gravitacional) del orden de 10^{46} J , mediante una onda de choque que empuja las capas externas de la estrella y produce la explosión supernova. La dinámica de este proceso extremo solo puede estudiarse mediante una descripción relativista del mismo y el cálculo numérico con superordenadores. Los laboratorios virtuales que nos proporcionan los superordenadores nos permiten escrutar escenarios imposibles de reproducir en laboratorios (véase, por ejemplo, Janka, 2012).

Tal y como hemos anticipado, el resultado de estas violentas explosiones puede ser la formación de una estrella de neutrones o un agujero negro. Las primeras tienen un radio del orden cien mil veces menor que el del Sol (que es de $6,96 \cdot 10^8 \text{ m}$) y, por tanto, un potencial gravitatorio de superficie mucho mayor y una velocidad de escape del orden de la tercera parte de

la velocidad de la luz. Las estrellas de neutrones nos siguen ocultando su composición interna y sus propiedades termodinámicas. Estos aspectos se estudian también a través de simulaciones numéricas, pues los resultados obtenidos variando parámetros críticos de los modelos teóricos pueden ser comparados con propiedades observacionales (por ejemplo, las oscilaciones superficiales de estas estrellas). Además, algunas estrellas de neutrones (los púlsares) emiten rápidos pulsos de radiación en frecuencias de radio debido a una combinación de altas velocidades de rotación e intensos campos magnéticos en su superficie. El primero de ellos fue observado en 1967 por Jocelyn Bell y Antony Hewish (Hewish, Bell, Pilkington, Scott y Collins, 1968). Finalmente, algunas estrellas de neutrones se observan indirectamente como fuentes periódicas de rayos X o rayos gamma en sistemas de estrellas binarias, donde una de las componentes del sistema es precisamente uno de estos objetos compactos.

En el colapso de una estrella de gran masa y la posterior formación de un agujero negro, o en los instantes finales de la colisión en espiral de dos estrellas de neutrones que forman un sistema binario en el que las dos estrellas ya han pasado por la explosión supernova, se produce uno de los fenómenos energéticamente más violentos del cosmos: las erupciones de rayos gamma. En función

«EL RESULTADO DE UNA EXPLOSIÓN SUPERNOVA PUEDE SER LA FORMACIÓN DE UN AGUJERO NEGRO»

de su duración, se clasifican en dos grupos: los destellos de larga duración ($\sim 20 \text{ s}$) asociados con un colapso estelar «fallido» (lo que se conoce como modelo colapsar, ya que no se forma una estrella de neutrones) y los destellos de duración corta ($\sim 0,2 \text{ s}$) asociados con la colisión de dos objetos compactos. Por fortuna para la vida en la Tierra, estas erupciones de rayos gamma son eventos extragalácticos que solo se observan a distancias cosmológicas (billones de años luz), ya que podrían destruir nuestra atmósfera si ocurriesen en regiones próximas a la galaxia (Piran y Jiménez, 2014). El hecho de que se observen a tan grandes distancias implica que trata de un fenómeno extremadamente brillante en el que se liberan ingentes cantidades de energía en forma de rayos gamma, del orden de 10^{44} J . En el tiempo que dura una erupción de este tipo se podría estar transformando en radiación gamma el equivalente a una masa solar. Esta radiación no se emite de forma isotrópica, sino colimada en la dirección de propagación de las partículas. Se trata de un conocido efecto relativista y que se debe a que las partículas que la emiten se propagan a velocidades cercanas a la de la luz formando un *jet*. Así pues, la radiación se emite focalizada a lo largo de un

² $1 \text{ J} = 1 \text{ kg m}^2/\text{s}^2$, unidad internacional de energía.

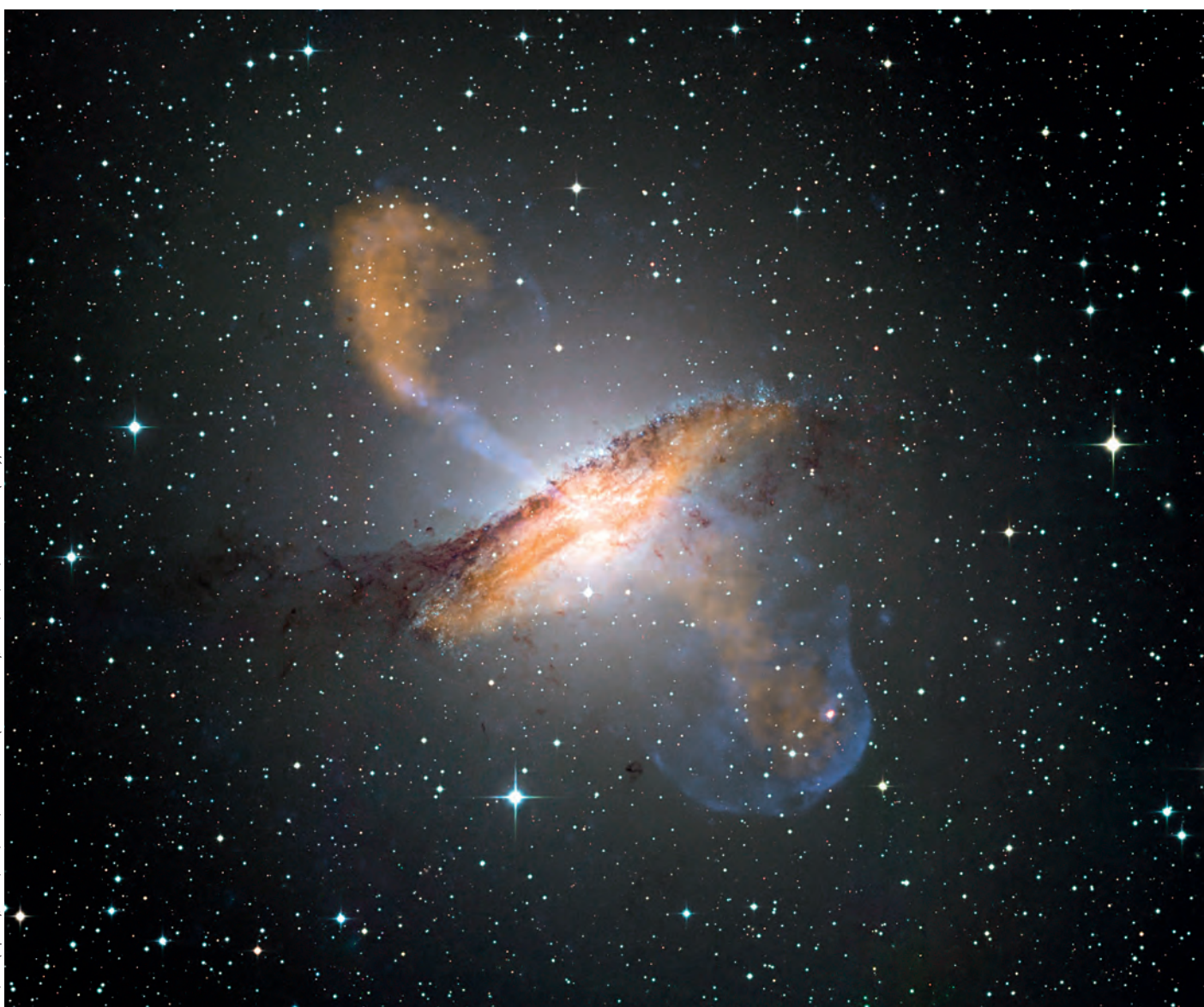


Figura 3. Combinación de las imágenes en radio, en el óptico y en rayos X de la radiogalaxia Centauro A. Las galaxias activas contienen en su centro un agujero negro supermasivo rodeado por un disco de acrecimiento. El material del disco genera enormes cantidades de energía en su caída hacia el objeto central. En este proceso, el más eficiente energéticamente que conocemos, las partículas pueden ceder entre un diez y un cuarenta por ciento de su masa en energía. De esta manera la región central de estas galaxias es mucho más brillante que una galaxia normal. En una parte de estas galaxias se forman chorros de materia y energía que se propagan a velocidades relativistas a lo largo de grandes distancias, ejerciendo una gran influencia en su entorno y en la evolución de la propia galaxia en que se forman.

haz estrecho. Las estimaciones realizadas indican que las partículas se propagan a velocidades ultrarrelativistas superiores a $0,9999\ c$, siendo c la velocidad de la luz (Gehrels, Ramírez-Ruiz y Fox, 2009).

■ LOS MONSTRUOS MÁS TEMIBLES

El físico alemán Karl Schwarzschild obtuvo la primera solución de las ecuaciones de Einstein apenas un mes después de la publicación de la teoría de la relatividad general en 1916. Dicha solución proporciona la distribución del campo gravitatorio estático en el exterior de un objeto masivo con simetría esférica y en ausencia de cargas eléctricas. La solución ofrece la relevante (y singular) conclusión de que para cada masa, distribui-

da en una esfera, existe un radio por debajo del cual ni siquiera la luz puede escapar de la correspondiente superficie, es decir, anuncia la posibilidad de la existencia de agujeros negros. Posteriormente, en 1963, el matemático neozelandés Roy Patrick Kerr obtuvo una nueva solución añadiendo la posibilidad de rotación del objeto a la solución de Schwarzschild. Este tipo de soluciones definen lo que se denomina *métrica* de un espacio-tiempo, ya que determinan las relaciones temporales y espaciales entre los eventos del mismo. La derivación de la métrica de Kerr no solo fue contemporánea al trabajo de M. Schmidt sobre los cuásares, sino que esta solución se convirtió en la base teórica con la que poder explicar la generación de energía en tales objetos.

En efecto, la captura de materia por un agujero negro de Kerr puede convertir la región que lo rodea en una intensa fuente de radiación. Este proceso, que se conoce como «acrecimiento», ocurre típicamente a través de un disco de materia en rotación. La viscosidad en el disco provoca que las partículas pierdan energía y calienten el disco mientras caen hacia el horizonte de sucesos del agujero. La energía liberada por unidad de masa en este proceso es diez veces mayor que la que se libera en la fusión nuclear en el núcleo de las estrellas ($\sim 0,07 c^2$) en el caso de agujeros negros de Schwarzschild y puede llegar hasta un 40 % de la masa en reposo de cada partícula en el caso de agujeros negros de Kerr. Esta alta eficiencia proporciona un modelo teórico robusto para explicar la actividad galáctica, de la que los cuásares son un caso arquetípico. Parte de esta energía se libera en forma de radiación en una región relativamente pequeña alrededor de un agujero negro supermasivo (véase Netzer, 2013).

Es precisamente en los alrededores de los agujeros negros supermasivos donde se forman chorros de materia y energía que se propagan a velocidades cercanas a la de la luz a lo largo del eje de rotación del objeto central. Estos chorros atraviesan distancias enormes, cruzando toda la galaxia progenitora, y alterando la posterior evolución de la galaxia y su entorno (véase la figura 3). La formación de los chorros relativistas está asociada a la extracción de energía del sistema: energía proveniente de la rotación del propio agujero negro sobre sí mismo (mecanismo de Blandford-Znajek; Blandford y Znajek, 1977) o de la rotación del disco a su alrededor (mecanismo de

Blandford-Payne; Blandford y Payne, 1982). Una de las propiedades observacionales de estos chorros es que algunas zonas de emisión intensa en radio se propagan de manera aparente a velocidades superiores a la de la luz. Esta ilusión óptica se produce cuando la materia se mueve a velocidades muy próximas (pero inferiores) a dicha velocidad límite, acercándose casi frontalmente al observador. Este fenómeno ha sido observado en muchas radiogalaxias y cuásares, habiéndose medido valores de hasta cincuenta veces la velocidad de la luz para esta velocidad aparente.

Se desconoce aún el mecanismo de formación de los agujeros negros de gran masa. Las teorías actuales incluyen la formación por el colapso inicial de estrellas de gran masa, o el colapso de grandes nubes de gas en el centro de las protogalaxias en edades tempranas del universo. Sí que existe consenso en que su aumento de masa con el tiempo se debe a la fusión con otros agujeros del mismo tamaño y al acrecimiento de gas y estrellas.

En nuestra propia galaxia existen versiones reducidas de este tipo de sistema, relacionadas con las estrellas binarias en las que una de ellas explota como supernova al final de su fase termonuclear. Cuando se forma la nueva estrella de neutrones o agujero negro, se puede dar el proceso de atracción de las capas externas de la estrella compañera, todavía en fase termonuclear, por parte del nuevo objeto compacto. La caída de material sobre este genera emisión en rayos X y también la formación de chorros relativistas que impactan con el medio interestelar y que emiten en radio. Los chorros formados en binarias también son candidatos

**«LAS ERUPCIONES DE RAYOS
GAMMA PODRÍAN DESTRUIR
NUESTRA ATMÓSFERA SI
OCURRIESEN EN REGIONES
PRÓXIMAS A LA GALAXIA»**

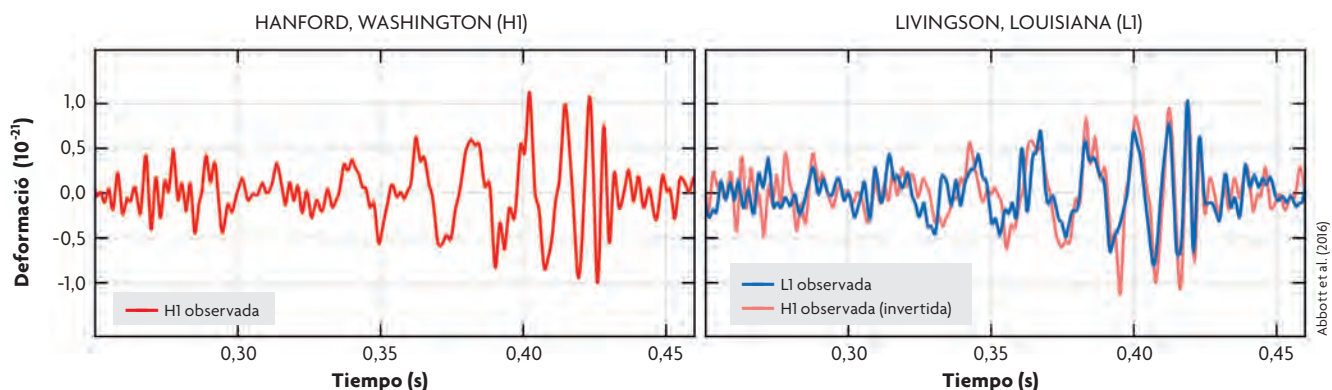


Figura 4. Primera señal de ondas gravitatorias, GW150914, detectada por Advanced LIGO, en septiembre de 2015. La línea azul (L1) muestra la señal recibida por el detector de Livingston (Louisiana, EEUU), mientras que la línea roja (H1) muestra la señal recibida en Hanford, en el estado de Washington (EEUU) de la misma detección. Esta señal histórica abre una nueva ventana al universo e inicia una nueva revolución en la astrofísica y la cosmología, comparable a la que supuso en el siglo xx el desarrollo de la astronomía en todo el espectro electromagnético.

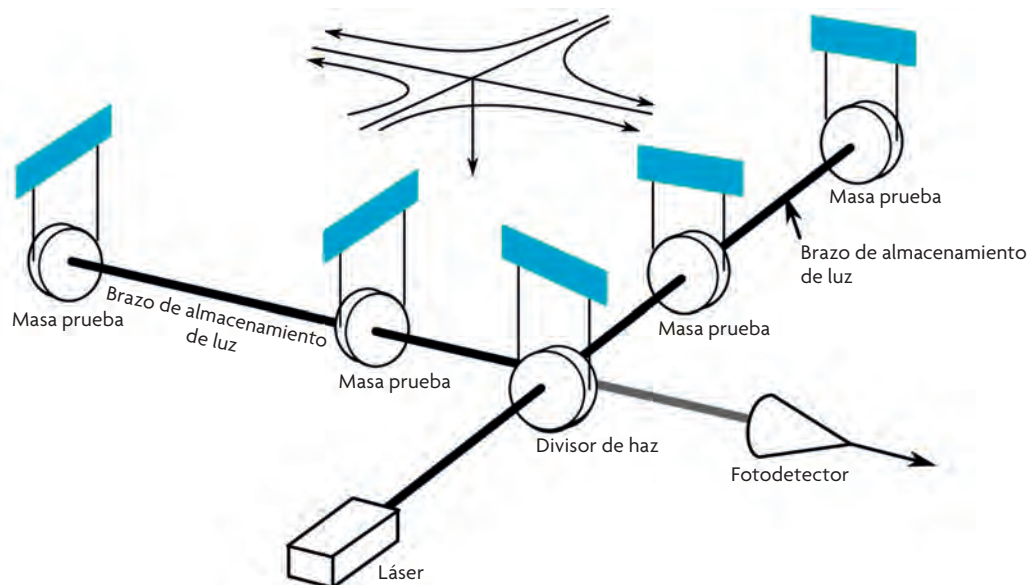


Figura 5. Representación esquemática de un interferómetro Michelson-Morley con cavidades resonantes Fabry-Perot, como los utilizados por los detectores Advanced Virgo y Advanced LIGO. Las fuerzas de marea asociadas con el paso de una onda gravitatoria modifican infinitesimalmente la distancia entre las masas prueba, por lo que el haz del láser (que ha sido subdividido en dos en el divisor de haz) tarda tiempos diferentes en recorrer cada brazo del detector. De esta forma, al recombinar el haz en la salida del interferómetro, se produce una interferencia no perfectamente destructiva que es captada como franjas de interferencia por el fotodetector.

a ser fuentes de radiación gamma en algunos casos. En nuestra galaxia conocemos una veintena de este tipo de objetos, situados a miles de años luz, siendo uno de ellos el que proporcionó las primeras evidencias indirectas de la existencia de los agujeros negros: Cygnus X-1 (Bolton, 1972; Webster y Murdin, 1972).

■ UNA NUEVA VENTANA AL UNIVERSO EXTREMO

La radiación gravitatoria también es una consecuencia de la teoría de la relatividad general. Esta radiación se asocia a ondulaciones de la curvatura del propio espacio-tiempo, es decir, oscilaciones del tejido del universo que se propagan a la velocidad de la luz transportando información sobre las fuentes astronómicas que las originan. La radiación gravitatoria puede ser producida a niveles detectables por la aceleración de grandes masas compactas, como en las colisiones de agujeros negros o estrellas de neutrones, o en la formación de estos objetos, pues estos procesos originan intensas deformaciones del espacio-tiempo. El pasado mes de septiembre de 2015 se consiguió detectar por vez primera este tipo de radiación (detección GW150914, Abbott et al., 2016; véase la figura 4). De la información obtenida se pudo

«LA RADIACIÓN GRAVITATORIA SE ASOCIA A ONDULACIONES DE LA CURVATURA DEL PROPIO ESPACIO-TIEMPO; ES DECIR, OSCILACIONES DEL TEJIDO DEL UNIVERSO QUE SE PROPAGAN A LA VELOCIDAD DE LA LUZ»

deducir que la radiación gravitatoria detectada fue originada durante los últimos instantes (milisegundos) de la colisión en espiral de dos agujeros negros de Kerr en un sistema binario. Tales objetos tenían unas 36 y 29 masas solares respectivamente en el momento de la colisión y en el proceso se liberó una energía equiva-

lente a 3 masas solares en forma de radiación gravitatoria. En este tipo de sistemas, en el que dos objetos compactos se aceleran mutuamente, la emisión de ondas gravitatorias extrae energía y momento angular del sistema, de manera que los objetos acaban cayendo uno sobre el otro, y se produce entonces una enorme distorsión del espacio-tiempo en el momento del colapso. Así, cada tipo de colapso produce una señal diferente, cuyas formas de onda teóricas son construidas utilizando tanto aproximaciones teóricas

para la fase de acercamiento (en espiral) de los objetos como simulaciones numéricas de las ecuaciones de Einstein en la fase de fusión de los dos objetos.

La observación de GW150914 ha aportado la primera evidencia directa de la existencia de agujeros negros de Kerr, predichos teóricamente en el año 1963. Las ondas gravitatorias solamente habían sido «detectadas» con anterioridad de manera indirecta, en cone-



xión con el descubrimiento en 1974 del púlsar binario PSR 1913+16 por Russell Hulse y Joseph Taylor (1975). En este caso, se relacionó la medida precisa de la disminución del periodo orbital del sistema con la pérdida energética debida a la emisión de radiación gravitatoria. Una segunda detección directa el día 26 de diciembre de 2015 (GW151226) permite afirmar que nos encontramos ante el inicio de una nueva revolución en nuestra comprensión del universo.

El detector que tuvo el honor de abrir esta nueva ventana al universo más extremo con las dos primeras detecciones es Advanced LIGO. Este detector, al igual que los instrumentos Advanced Virgo y KAGRA, es un interferómetro Michelson-Morley (figura 5) a escala kilométrica con el que pueden medirse variaciones de longitud extraordinariamente pequeñas.³ Estas distancias son comparables a medir la distancia Tierra-Sol con una precisión del orden del tamaño de un núcleo atómico. Por su diseño, estos detectores son sensibles a las frecuencias típicas de la radiación gravitatoria producida en las explosiones supernova o en la colisión de estrellas de neutrones o agujeros negros de masa estelar (~ 50-2000 Hz). El futuro interferómetro espacial eLISA será sensible a las frecuencias de la radiación gravitatoria emitida en la colisión de enanas blancas o en capturas de objetos de masa estelar por agujeros negros supermasivos (mHz-Hz). También hay detectores basados en la medición precisa de los periodos de rotación de los púlsares (*pulsar timing*), como IPTA o el futuro SKA, sensibles a frecuencias ultrabajas (nHz) (véase, por ejemplo, Font et al., 2015, y referencias allí citadas). Todos estos detectores abren un nuevo espectro en el que observar el universo, nuevas ventanas, de la misma manera que en el siglo XX se desarrolló la astronomía más allá de la banda óptica del espectro electromagnético. Igualmente también los nuevos descubrimientos seguramente influirán en nuestra manera de entender el universo, así como en el pensamiento moderno, al igual que lo hicieron los que se realizaron a lo largo del siglo pasado. ☺

REFERENCIAS

Abbott, B. P., Abbott, R., Abbott, T. D., Abernathy, M. R., Acernese, F., Ackley, K., ... Zweig, J. (2016). Observation of gravitational waves from a binary black hole merger. *Physical Review Letters*, 116(6), 061102. doi: 10.1103/PhysRevLett.116.061102

³ El efecto de las fuerzas de marea –dilataciones y contracciones espacio-temporales con un efecto semejante a las mareas terrestres– originadas por las ondas gravitatorias en masas de prueba es minúsculo.

«LOS NUEVOS DESCUBRIMIENTOS SEGURAMENTE INFLUIRÁN EN NUESTRA MANERA DE ENTENDER EL UNIVERSO, ASÍ COMO EN EL PENSAMIENTO MODERNO»

- Blandford, R. D., & Payne, D. G. (1982). Hydromagnetic flows from accretion discs and the production of radio jets. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 199(4), 883–903. doi: 10.1093/mnras/199.4.883
- Blandford, R. D., & Znajek, R. L. (1977). Electromagnetic extraction of energy from Kerr black holes. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 179(3), 433–456. doi: 10.1093/mnras/179.3.433
- Bolton, C. T. (1972). Identification of Cygnus X-1 with HDE 226868. *Nature*, 235, 271–273. doi: 10.1038/235271b0
- Font, J. A., Sintes, A. M., & Sopuerta, C. F. (2015). Gravitational waves with the SKA. En M. A. Pérez-Torres (Ed.), *The Spanish Square Kilometer Array white book* (pp. 29–36). Barcelona: Sociedad Española de Astronomía. Consultado en: <https://arxiv.org/abs/1506.03474>
- Gehrels, N., Ramírez-Ruiz, E., & Fox, D. B. (2009). Gamma-ray bursts in the Swift era. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 47, 567–617. doi: 10.1146/annurev.astro.46.060407.145147
- Genzel, R., Eisenhauer, F., & Gillessen, S. (2010). The Galactic Center massive black hole and nuclear star cluster. *Reviews of Modern Physics*, 82, 3121–1395. doi: 10.1103/RevModPhys.82.3121
- Goddi, C., Falcke, H., Kramer, M., Rezzolla, L., Brinkerink, T., Bronzwaer, T., ... Zhidenko, A. (2016). BlackHoleCam: fundamental physics of the galactic center. *International Journal of Modern Physics D*, 1730001. doi: 10.1142/S0218271817300014
- Hewish, A., Bell, S. J., Pilkington, J. D. H., Scott, P. F., & Collins, R. A. (1968). Observation of a rapidly pulsating radio source. *Nature*, 217, 709–713. doi: 10.1038/217709a0
- Hulse, R. A., & Taylor, J. H. (1975). Discovery of a pulsar in a binary system. *Astrophysical Journal*, 195, L51–L53. doi: 10.1086/181708
- Janka, H. T. (2012). Explosion mechanisms of core-collapse supernovae. *Annual Review of Nuclear and Particle Science*, 62, 407–451. doi: 10.1146/annurev-nucl-102711-094901
- Mościbrodzka, M., Falcke, H., Shiokawa, H., & Gammie, C. F. (2014). Observational appearance of inefficient accretion flows and jets in 3D GRMHD simulations: Application to Sagittarius A*. *Astronomy & Astrophysics*, 570, A7. doi: 10.1051/0004-6361/201424358
- Netzer, H. (2013). *The physics and evolution of active galactic nuclei*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Piran, T., & Jiménez, R. (2014). Possible role of gamma ray bursts on life extinction in the universe. *Physical Review Letters*, 113(23), 231102. doi: 10.1103/PhysRevLett.113.231102
- Shapiro, S. L., & Teukolsky, S. A. (2007). *Black holes, white dwarfs, and neutron stars: The physics of compact objects*. Nueva York: Wiley Online Library. (Obra original publicada en 1983). doi: 10.1002/9783527617661
- Webster, B. L., & Murdin, P. (1972). Cygnus X-1 —A spectroscopic binary with a heavy companion? *Nature*, 235, 37–38. doi: 10.1038/235037a0

Manel Perucho Pla. Profesor titular de Física de la Universitat de València. Su investigación se centra en el estudio de los fluidos relativistas en diferentes escenarios astrofísicos a través de simulaciones numéricas de hidrodinámica y magnetohidrodinámica relativistas. Entre los escenarios que estudia se encuentran los chorros generados en núcleos activos de galaxias o en estrellas binarias de rayos X y rayos gamma. Ha sido investigador principal de diferentes propuestas de cálculo en superordenadores y de un proyecto internacional de observación con el telescopio espacial ruso Radioastron.

José Antonio Font Roda. Profesor titular de Física de la Universitat de València. Su campo de investigación es la astrofísica relativista. En particular, estudia las estrellas de neutrones, los agujeros negros y la radiación gravitatoria, mediante herramientas computacionales como la hidrodinámica o la magnetohidrodinámica relativistas y la relatividad numérica. Ha sido presidente de la Sociedad Española de Gravitación y Relatividad. Es coordinador del grupo de Valencia en la Colaboración Virgo y actualmente es director de Departamento de Astronomía y Astrofísica de la Universitat de València.