

26a

CONVENCIÓN DE ASTRONOMÍA



SABADELL
14, 15, 16 MARZO
2025

Más allá de la observación, promoviendo la colaboración PRO-AM

Viaje entre los objetos más extremos del Universo

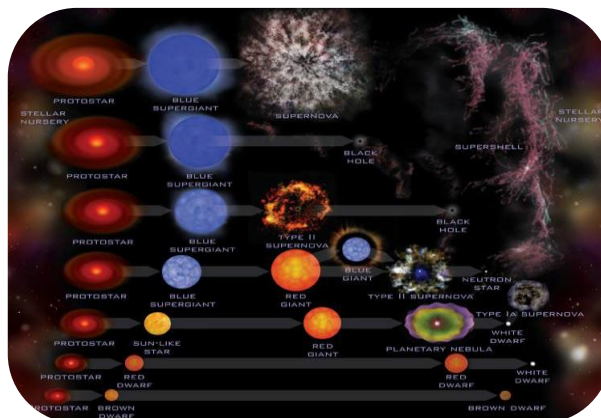
Nanda Rea



Esta noche os hablaré de los objetos más exóticos y extremos del universo, los más violentos de todos. Pero empezaré por mostraros cómo se forman estos objetos raros.

Os muestro cómo se forman las estrellas en una simulación hecha por un grupo de Inglaterra. Veis que las estrellas se forman a partir de nubes de gas y polvo que hay en las galaxias. Y en algunas partes, este gas y polvo llega a unas densidades tan altas que se inician reacciones nucleares y la estrellas se encienden. La mayoría del gas es hidrógeno, también hay un poco de helio y, en mucha menor cantidad, algunos elementos pesados. Entonces en estas grandes nubes se forman las estrellas.

Las estrellas se mantienen estables debido a dos fuerzas contrarias. Por un lado, la gravedad que intenta colapsar la estrella, y por otro lado la presión debida a estas reacciones nucleares que intenta expandir la estrella. En las primeras reacciones nucleares de las estrellas, el hidrógeno se convierte en helio. En este proceso se liberan neutrinos y fotones. Los fotones cruzan la estrella y salen hacia su exterior, por eso las estrellas emiten luz. Los neutrinos, en cambio, nos atraviesan y ni nos enteramos. Esto ocurre en una primera etapa, pero en etapas posteriores, se forman otros elementos químicos: carbono, oxígeno, aluminio, etc... hasta llegar al hierro. Cuando el núcleo de la estrella está hecho de hierro, las reacciones nucleares ya no pueden continuar y la estrella explota en forma de supernova.



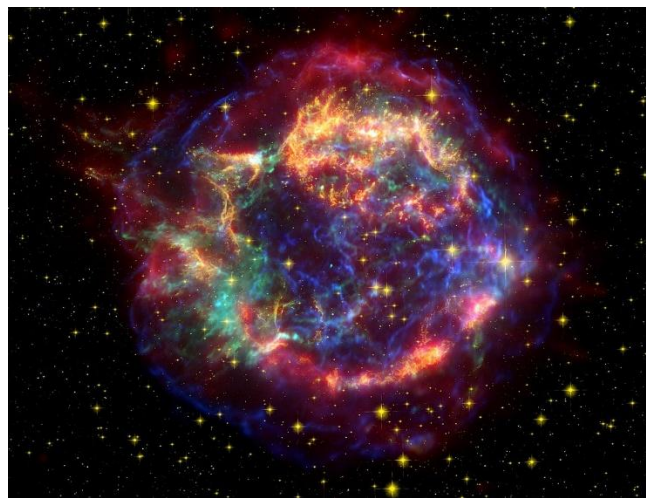
Evolución de las estrellas según su masa inicial

No todas las estrellas explotan como supernovas, sólo lo hacen las estrellas grandes y masivas. Las más pequeñas evolucionan sin explotar, pierden la mayor parte de su gas y acaban en forma de enanas blancas. Por suerte nuestra, las estrellas pequeñas -y también el Sol- duran muchísimos años. En cambio, las estrellas más grandes queman su combustible muy rápidamente y acaban explotando en forma de supernova.

En el proceso de la explosión, la parte central de la estrella se compacta mucho y forma un resto estelar muy denso, mientras que la mayor parte del gas estelar sale despedido hacia el espacio, enriqueciendo el medio interestelar.

Remanentes de supernovas

Vemos muchos restos de supernovas en nuestra galaxia. Este es un ejemplo, llamado Casiopea A y es uno de los restos más famosos. Se ve desde la banda radio hasta la banda de rayos gamma, pasando por todo tipo de luz.



Casiopea A

Y una de las estrellas que conocemos mejor de la constelación de Orión es Betelgeuse, y es una de las estrellas que más probablemente va a explotar como supernova lo más pronto en nuestra galaxia. Y de hecho se está mirando y monitorizando esta estrella por si ocurre esta explosión muy pronto. Ahora bien, muy pronto en término astronómico, puede ser mañana o de aquí 200 años, por lo tanto, no podemos garantizar que la vamos a ver, pero recordad, si un día os despertáis y veis dos soles, uno de estos es probablemente Betelgeuse que ha explotado. Y va a estar muy brillante durante meses.

Os muestro algunos ejemplos de remanentes de supernova, de estas explosiones que, en general, son muy bonitas, con varios colores que son los distintos elementos que contienen. Hay supernovas que tienen mucho carbono, mucho magnesio, mucho oxígeno, etc. Algunos de estos elementos son ionizados, y se pueden tomar espectro en banda óptica, en banda X, o en otras bandas, donde se ve exactamente qué elementos contienen estas supernovas.

En general son muy bonitas, algunas perfectamente circulares porque han explotado en un medio interestelar bastante homogéneo; mientras que otras -las que están en el disco de la galaxia- tienen un medio interestelar alrededor con gran variación de densidades y adquieren formas un poco raras. Y en sus centros hay un puntito muy pequeño que es un objeto compacto: una estrella de neutrones o un agujero negro, los objetos compactos de los que os hablaré está noche.

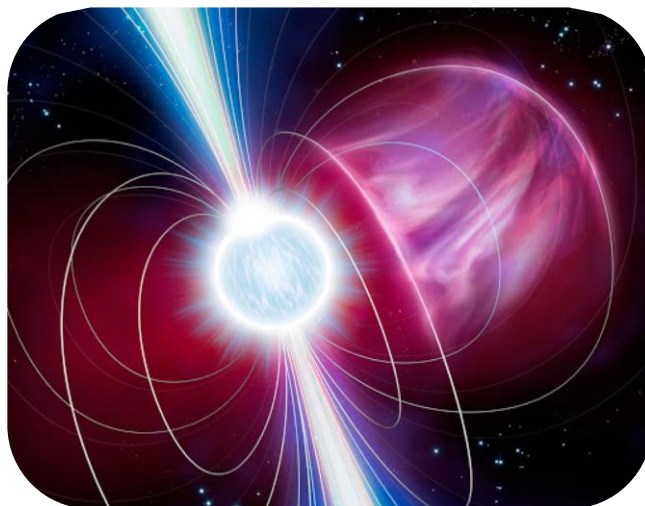
Los objetos compactos

Estos objetos compactos ya no son estrellas porque ya no tienen reacciones nucleares en su interior, y están formados por una materia tan densa que, de hecho, no sabemos de qué está hecha, con una presión enorme, llamada presión de fermi, de origen cuántico, que impide que dos fermiones idénticos estén muy cerca.

La diferencia es que, mientras que, en el caso de una estrella normal, cuanto más masa tenga más grande será, en un objeto compacto, cuanto más masa tenga más pequeña será. Por eso los agujeros negros que nosotros nos imaginamos cosas enormes, en general son bastante pequeños. Eso sí, la densidad es enorme y la gravedad también.

Las estrellas de neutrones

Empezamos por las estrellas de neutrones, que son las más tranquilas de los dos. Una estrella de neutrones os la tenéis que imaginar como una bola de unos 10 kilómetros -el tamaño de una ciudad como Sabadell-, no más, pero con una masa como el Sol. Por lo tanto, es muy, muy densa. Para hacernos una idea, una cucharita de una estrella de neutrones, pesa como toda la Tierra. Además, tiene un campo magnético enorme, y gira muy rápidamente, de hasta mil veces por segundo.



Dibujo de una estrella de neutrones

La primera estrella de neutrones fue descubierta en forma de púlsar en 1968, y por este descubrimiento se concedió el premio nobel en 1974. Y éste es uno de los casos más interesantes de la física en que la teoría se anticipó a las observaciones.

Los neutrones se descubrieron en 1932, y poco después, los astrofísicos ya anticiparon que después de una explosión de supernova se podía formar un astro muy denso. Y años después, una joven estudiante, Jocelyn Bell observó el primer púlsar con una gran antena de radio, con la que estudiaba los cuásares. En una dirección concreta del cielo detectó una señal pulsante muy regular. Esperó un par de días y volvió a detectarla. Y se puso a estudiarla. Al principio incluso se habló de señales extraterrestres.

Hoy en día conocemos miles de púlsares en nuestra galaxia y también en galaxias cercanas. Emiten mucha radiación desde los polos magnéticos, pero también desde su magnetosfera.

Os muestro uno de los púlsares más famosos de todos: el púlsar del cangrejo. Lo vemos con ondas de radio, luz visible, rayos X y el resto de tipos de radiación. Y no solo vemos el púlsar, sino también el viento del púlsar (pulsar nebula). Este objeto tiene la particularidad de tener

una energía tan grande que es una de las fuentes más poderosas de aceleración de partículas a grandes velocidades y produce lo que se conoce como rayos cósmicos.

¿Qué hay dentro de un púlsar? Esta pregunta la intentan responder muchos físicos nucleares, y muchos físicos que trabajan en los aceleradores de partículas, que intentan reproducir, comprender y modelar qué hay dentro de esas estrellas. El problema es que las densidades que tienen son densidades atómicas. Son tan grandes que es muy difícil saber cómo es el comportamiento de esta materia con estas densidades. Lo que sí vemos son las cortezas de estos astros.

En nuestra galaxia conocemos muchos púlsares, la gran mayoría de los cuales están en el disco galáctico porque provienen de estrellas muy masivas que viven muy poco y mueren pronto. Por lo tanto, mueren muy cerca de dónde se han formado, que es el disco galáctico. Si nos alejamos del disco, la población estelar es más antigua y ya casi no encontramos púlsares. Calculamos que sólo en nuestra galaxia debe haber unos 100 millones de púlsares.

¿Y cómo calculamos su campo magnético? Es muy fácil, y por eso probablemente estamos equivocados, pero es la manera más fácil que sabemos hacerlo. De hecho, modelamos un púlsar como un dipolo en rotación. Un dipolo es una antena de la televisión. Si cogéis un dipolo y lo empezáis a girar, emitirá como lo hace un púlsar, a nivel matemático es lo mismo. Entonces, si tenemos un dipolo que gira, sabemos que emite una radiación, llamada emisión de Larmor. De esta manera, los púlsares tienen dos tipos de energía distintas: la radiación Larmor y la energía de rotación. Si las igualamos obtenemos una relación entre la rotación del púlsar y la variación del campo magnético (su ralentización). Entonces, si los observamos con nuestros telescopios, vemos cómo se ralentizan y podemos saber qué campo magnético tienen. Y sabemos que tienen los campos magnéticos más intensos de toda la galaxia.

¿Cómo medimos la rotación de los púlsares? Los observamos con antenas de radio y analizamos la señal que nos llega. Matemáticamente, con la transformada de Fourier, podemos encontrar la periodicidad de la señal, y obtenemos el perfil de nuestro púlsar. Estos astros son los relojes más precisos del Universo ya que, con tan sólo una hora de observación, los podemos medir con una precisión de 10^{-17} , y si los miramos más tiempo podemos llegar a precisiones de 10^{-25} . Antes de la aparición de los relojes atómicos se usaban como referentes del tiempo.

Con tan alta precisión también podemos ver muy bien cómo se ralentizan los púlsares individuales, o cómo un sistema doble de púlsares gira uno alrededor del otro y se van acercando.

Os muestro el “sonido” de distintos púlsares según sus velocidades de rotación (el púlsar de la Vela, que gira a 11 veces por segundo, o el púlsar del cangrejo, que gira a 33 veces por segundo). Imaginad la potencia, la energía que tienen estos objetos que giran tan rápidamente sin romperse porque tiene una densidad muy fuerte.

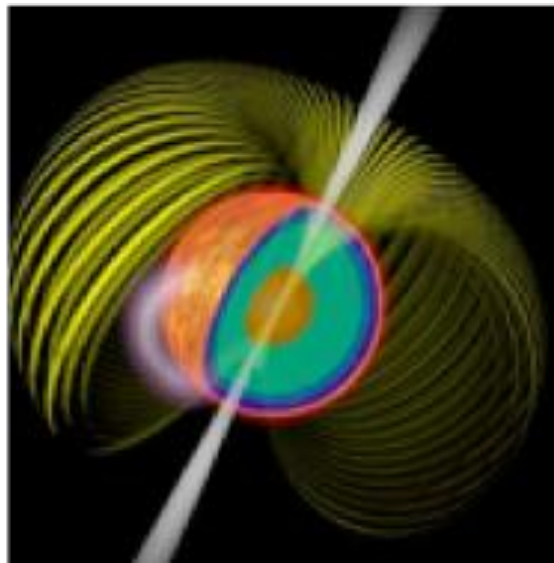
Estos son los récords guiness de los púlsares:

- Son los cuerpos celestes más densos del Universo
- Son los cuerpos celestes con mayor velocidad de rotación del Universo (se mueven a un 15% de la velocidad de la luz)
- El círculo más redondo conocido en el Universo corresponde a la órbita de un púlsar que gira alrededor de una estrella convencional (PSR J1909-3744).
- Son los Relojes más estables (no los más precisos que son los atómicos).
- Son los objetos con mayor magnetismo del Universo.

- Son los test de relatividad general más precisos: Un sistema binario de púlsares sostiene el record Guinness de haber verificado la relatividad general a un 0,05% de nivel de confianza. Einstein está en lo cierto de momento...
- Son los detectores de ondas gravitacionales más económicos: Observando de manera regular púlsares de milisegundos podríamos detectar ondas gravitacionales (International Pulsar Timing Array)
- Son el sistema más económico para determinar masas de planetas del Sistema Solar: Observando púlsares periódicamente permite medir masas de planetas de forma tan precisa como lo harían satélites dedicados a esta tarea. La razón es que la señal del púlsar, para llegar a la Tierra tiene que cruzar los campos gravitatorios de los planetas, y en lugar de ir en línea recta se curva y se retrasa. Midiendo este retraso podemos conocer el campo gravitatorio del planeta, y por lo tanto, su masa.
- Se pueden utilizar como GPS interestelar. Como son relojes muy precisos, se puede triangular sus señales y podemos situarnos en el espacio. Es el único GPS que podemos utilizar fuera del Sistema Solar.

Los Magnetares

Las estrellas de neutrones más extremas de todos se llaman magnetares. En un estallido de un magnetar, llegó tanta energía a la Tierra, que la ionosfera empezó a oscilar al mismo período de rotación que el propio magnetar.



Dibujo de un magnetar

Para hacernos la idea de cuán magnético es una estrella de neutrones y, sobre todo, un magnetar, vamos a ver una escala de objetos magnéticos:

- 1 Gauss: Campo magnético de la Tierra en el Polo Norte
- 100 Gauss: Típico imán-juguete comercial
- 10000 Gauss: Campo magnético de una resonancia magnética
- 10^7 Gauss: Campo magnético más alto generado jamás
- 10^{13} Gauss: Campo magnético típico de un pulsar normal
- 10^{15} Gauss: Magnetares

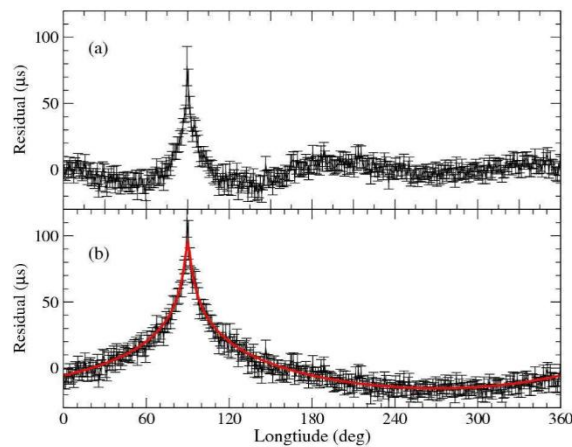
¿Qué aplicaciones hay en estudiar estas fuentes tan magnéticas? Muchísimas, porque la física de lo que le pasa a un plasma con un campo muy fuerte no la conocemos muy bien. Pero cada vez que hemos descubierto un efecto físico debido a la materia en un campo

magnético, hemos obtenido aplicaciones muy interesantes: levitación magnética, almacenamiento de energía por superconductores magnéticos, resonancia magnética y nuclear y otros dispositivos médicos.

Tipos de púlsares raros

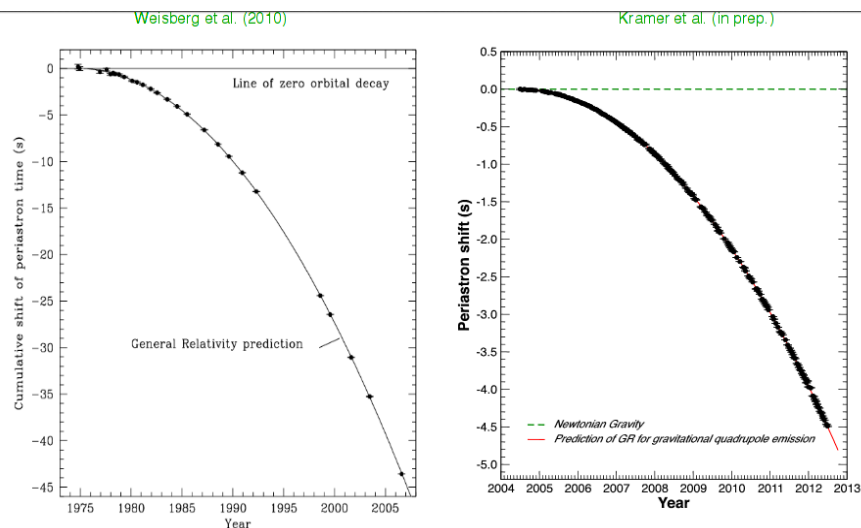
Hay otros tipos de púlsares más raros. En primer lugar, encontramos púlsares en sistemas binarios, formado por una estrella normal y un púlsar. Éste se está comiendo gas de la estrella, y el gas al caer se calienta mucho y emite rayos X.

También encontramos sistemas binarios de dos púlsares, donde podemos medir muchas cosas. Podemos medir todos los efectos gravitatorios predichos por la relatividad general de Einstein, como por ejemplo el efecto Shapiro, donde la radiación presenta un pico debido al tiempo que el fotón que sale de un púlsar necesita para girar alrededor del otro púlsar.



Efecto Shapiro

O también podemos medir cómo va disminuyendo la órbita de los dos púlsares debido a la emisión de ondas gravitacionales. La primera medida de este efecto fue premio nobel para Hulse y Taylor en 1992. Cabe pensar que en la siguiente imagen se ve una línea continua, que es lo que dice la teoría de la relatividad, y superpuesto hay unos puntitos que son las observaciones realizadas. Como puede verse, concuerdan perfectamente.



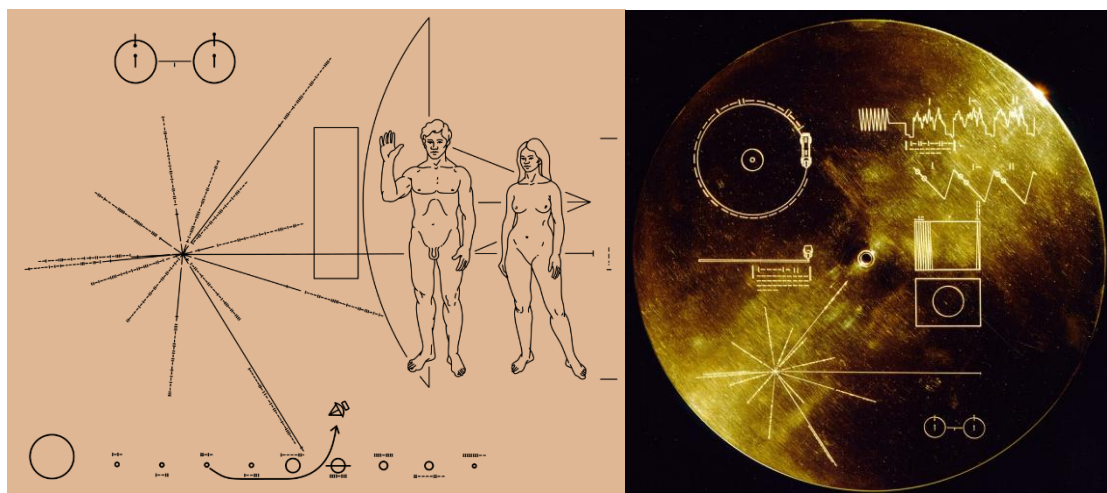
Variación del periodo de dos púlsares dobles

Otro premio nobel fue concedido en 2017 por la detección directa de ondas gravitacionales de estos objetos muy compactos. Llevábamos casi 100 años buscando ondas gravitacionales. Hay muchos físicos que empezaron su carrera construyendo instrumentos para buscar ondas gravitacionales y murieron sin saber si existían o no. Pero por fin, en 2017, se detectaron las primeras.

También se han descubierto sistemas triples formados por un púlsar más dos estrellas o dos enanas blancas. Estudiando el timing que nos llega del púlsar y modelándolo, podemos saber perfectamente las órbitas de los tres astros, sus masas, y cómo varían las órbitas, entre otros parámetros.

Con los detectores actuales detectamos colisiones de dos agujeros negros y de dos estrellas de neutrones, ya que son los emisores de ondas gravitatorias más intensos.

Os conté también que estamos estudiando cómo utilizar el sistema de púlsares como un GPS, y además gratis, sin necesidad de enviar satélites al espacio. Solo tenemos que construir un detector que consiga captar las señales de distintos púlsares y triangular nuestra posición. Esta idea no es nueva, creo que fue de Carl Sagan. Él mismo fue quien ideó las placas que llevan las naves Pioneer, y en ellas también aparecen grabados los púlsares más brillantes, y puede verse un código morse que indica el periodo de rotación que tienen. Y los mismos púlsares aparecen también en los discos de las naves Voyager.



Placas de las naves Pioneer y Voyager

En 2018 se hizo un intento de GPS con púlsares. Se puso en la Estación Espacial Internacional, los astronautas lo han testeado, y funciona. Ha podido posicionar la Estación que se mueve muy rápidamente con una precisión de 10 km, que en el espacio es muy poco.

Los Agujeros negros

Las explosiones de las estrellas más grande en su centro no forman estrellas de neutrones sino agujeros negros. Vamos a hablar un poco de ellos.

Cuando pensamos en un agujero negro, normalmente nos lo imaginamos en dos dimensiones, pero de hecho tiene tres. Un agujero negro es como una estrella, como una bola, pero negra.

¿Qué sabemos de ellos? Lo primero que sabemos es que, matemáticamente, son una discontinuidad del campo gravitatorio, es decir, un punto del espacio donde el campo gravitatorio se vuelve infinito. Claramente esto es un problema de la teoría, pero aún no sabemos exactamente de qué masa están hechos, de qué tipo de partículas están hechos para poder darle una ecuación de estado a este tipo de objetos. Lo que sí sabemos es que son negros porque su velocidad de escape es más grande que la velocidad de la luz. Ni la luz puede escaparse de su interior. Lo que sí puede escaparse de un agujero negro son las ondas gravitatorias. Desde 2017 hemos detectado ondas gravitatorias procedentes de la fusión de dos agujeros negros.

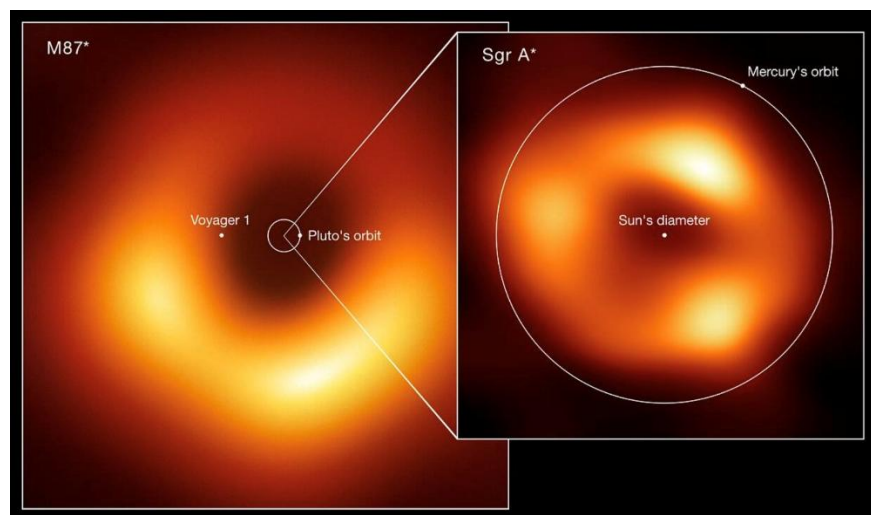
Una cosa interesante de los agujeros negros es que no tienen que tener necesariamente mucha masa. Con una masa terrestre, por ejemplo, se puede hacer un agujero negro. Lo que pasa es que sólo tendría un radio de 9 milímetros, lo que se conoce como el radio de Schwarzschild.

En nuestra galaxia conocemos más de un centenar de agujeros negros de masa estelar, y los conocemos porque están en sistemas binarios, junto con una estrella. Se van tragando el gas de la estrella, formando un disco gas y a veces estallidos. Este disco y los estallidos los podemos ver perfectamente con rayos X, y con ellos podemos deducir cómo es el agujero negro central.

Hay otro tipo de agujeros negros, los agujeros negros primordiales. Creemos que se formaron justo después del Big Bang, y probablemente sean de dónde se empezaron a formar las galaxias. Fueron los atractores de materia que formaron discos, estrellas y galaxias. De momento no hemos detectado ninguno de ellos, no sabemos si existen realmente, pero es una de las teorías de formación de las galaxias más reconocida ahora mismo.

Y también existen los agujeros negros supermasivos, que tienen mucha masa y se encuentran en el centro de casi todas las galaxias, incluida la nuestra.

Os muestro una imagen del Event Horizon Telescope, que es un interferómetro en banda milimétrica que ha conseguido tanta resolución espacial que ha hecho la primera fotografía de un agujero negro, concretamente del agujero negro supermasivo de la galaxia M87.



El agujero negro central de M87

Nuestra galaxia también tiene un agujero negro central, Sagitario A*, y se descubrió gracias al estudio del movimiento de las estrellas centrales de la galaxia. Estudiando sus movimientos

se dedujo que allí había un agujero negro supermasivo de más de 4 millones de masas solares. Este trabajo dio el premio Nobel en 2020 a Andrea Ghez y a Reinhard Genzel.

Otra manera de detectar agujeros negros es por lo que se conoce como eventos de colapso de estrellas en agujeros negros (TDE). Cuando una estrella se acerca a un agujero negro, la deforma, la rompe y se forma un disco de gas a su alrededor. Este disco brilla muchísimo y puede detectarse con grandes telescopios, tanto con luz visible como con rayos X.

En fin, como vemos, los agujeros negros son grandes desconocidos, pero los objetos más interesantes del Universo. Incluso algunas teorías dicen que serían los responsables de la materia oscura, la materia que nos falta y que no vemos directamente.

Espero que este paseo entre los objetos más compactos del Universo os haya gustado. Muchas gracias.