

OBSERVANDO LO IMPOSIBLE

Después de que físicos y astrónomos comenzaron a aceptar la posible existencia de los agujeros negros durante la década de 1960, inicia la búsqueda de huellas observacionales de estos objetos. Sin embargo, existe un problema fundamental; ¿cómo observar un objeto que, por definición, no emite ni refleja ninguna clase de radiación electromagnética? Importantes personajes de la física como Yakov Zel'dovich de la Unión Soviética y Edwin Salpeter de Estados Unidos consideraron que, además de las propiedades de origen geométrico descritas anteriormente, los agujeros negros pueden poseer importantes características debido a la interacción con su entorno, incluyendo la interacción gravitacional con gas interestelar y con estrellas. Por ello, una de las mejores propuestas dentro de las opciones que se tienen para encontrar objetos compactos como estrellas de neutrones o agujeros negros se presenta cuando ellos pertenecen a sistemas binarios en donde la observación directa del movimiento de una estrella compañera permitiría, no solamente evidenciar la existencia del objeto compacto, sino que además permitiría estimar su masa.

A continuación, se discutirán algunos de los efectos gravitacionales de un objeto compacto sobre su entorno y cómo estos pueden permitir evidenciar su existencia. Aún cuando siempre se hará referencia a agujeros negros, debe recordarse que casi todos los efectos y resultados son también aplicables a estrellas de neutrones.

Orbitas de Partículas

Alrededor de un agujero negro pueden existir partículas (planetas, estrellas, estrellas de neutrones, otros agujeros negros, etc.) moviéndose bajo la influencia del campo gravitacional. El estudio de las posibles trayectorias a partir de la relatividad general muestra que estas partículas pueden seguir orbitas que en general son similares a las que se presentan en la descripción Newtoniana. Así, existen orbitas abiertas que semejan las trayectorias hiperbólicas y parabólicas, orbitas acotadas que son similares a las elipses Keplerianas y también existen trayectorias circulares. De hecho, para partículas situadas lejos de la fuente de gravedad, las trayectorias predichas por la relatividad general coinciden completamente con las Newtonianas, pero al acercarse al agujero negro se presentan diferencias interesantes que pueden llegar a ser comprobadas con la observación. Discutiremos solamente las características de las trayectorias acotadas por ser las más fáciles de medir desde el punto de la observación.

Orbitas Elípticas

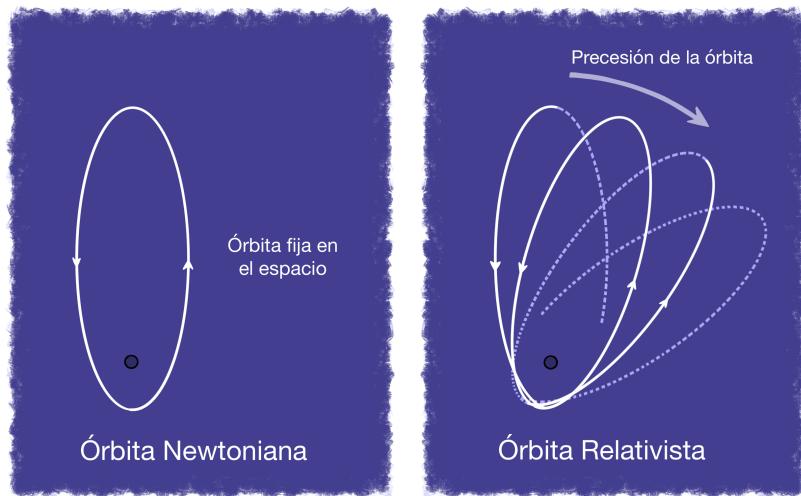
Las trayectorias acotadas presentan los comportamientos más notables y estudiados. Para comenzar, considere una estrella moviéndose alrededor de un agujero negro

supermasivo a una distancia lo suficientemente grande como para que la descripción Newtoniana de la gravedad sea válida. De acuerdo con las leyes de Kepler, la trayectoria de esta estrella será una elipse y la observación cuidadosa de la órbita puede permitir estimar parámetros físicos del agujero negro. En particular, la medición del periodo de movimiento y del semi-eje mayor de la órbita permite estimar de manera muy precisa la masa del agujero negro utilizando la tercera ley de Kepler.

Este tipo de observaciones y estudios han sido realizados por grupos de investigación como el de Andrea Ghez, en la Universidad de California Los Angeles, y el de Reinhard Genzel, en el Max Planck Institute for Extraterrestrial Physics de Munich, Alemania. Ya desde la década de 1990 se ha registrado el movimiento de las estrellas S0, que orbitan alrededor del agujero negro supermasivo Sagittarius A* (Sgr A*), localizado en el centro de la Vía Láctea. Estudiando con detalle estas órbitas se ha logrado estimar que la masa de Sgr A* es del orden de 4 millones de masas solares. En un capítulo posterior se describirá con mucho más detalle el caso del Centro Galáctico sus propiedades, entorno, observaciones, etc.

Ahora bien, cuando las partículas se mueven cerca de la fuente de gravedad y por lo tanto se deben tener en cuenta los efectos relativistas, se presentan diferencias con las predicciones Newtonianas. El ejemplo más importante es que, desde la relatividad general, se predice que las órbitas acotadas no corresponden a elipses fijas en el espacio, sino que estas órbitas elípticas pueden cambiar sus propiedades geométricas (forma, tamaño orientación, etc.) con el paso del tiempo. Algunos de los cambios son periódicos y por lo tanto se compensan o anulan después de un cierto intervalo de tiempo, mientras que otros cambios, denominados *seculares*, presentan efectos que se acumulan con el paso

del tiempo. Estos últimos son mucho más fáciles de medir y tienen las consecuencias más interesantes. Uno de los cambios seculares más importantes se denomina *precesión de la órbita*, y corresponde a una rotación de la elipse alrededor del centro de gravedad.



Diferencia entre las órbitas Newtonianas y relativistas. La mecánica clásica predice órbitas acotadas como elipses fijas en el espacio. La relatividad general muestra que estas órbitas sufren cambios en su geometría y en su orientación espacial. El principal efecto corresponde a la precesión de la órbita, con el cual la elipse rota alrededor del centro de fuerzas.

Este efecto relativista aparece cuando una partícula se mueve alrededor de cualquier fuente de gravedad, incluso en el caso del Sistema Solar. Aún cuando la precesión de las órbitas de los planetas alrededor del Sol es bastante pequeña, ya ha sido medido con bastante exactitud. Por ejemplo, la precesión de la órbita de Mercurio ya había sido reportada para el año 1859 por el astrónomo francés Urbain Le Verrier y aún cuando la mayor parte de el corrimiento observado se explica con un análisis detallado de la

mecánica celeste³², la contribución del efecto predicho por la relatividad general coincide precisamente con el valor observado.

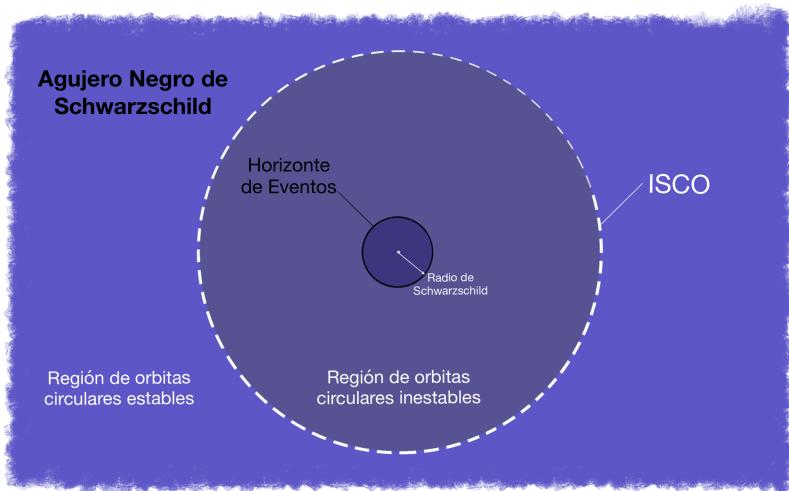
Los cálculos teóricos muestran que el efecto de precesión en el caso de una fuente fuerte, como un agujero negro, es mucho mayor. Un caso de gran importancia corresponde, de nuevo, al movimiento de las estrellas S0 más cercanas a Sgr A*. Por ejemplo, la estrella denominada S0-2 ha sido observada por cerca de 30 años y debido a que su periodo es de alrededor de 15 años, durante el año 2019 pasó por segunda vez por el punto más cercano a Sgr A* a lo largo de su trayectoria (este punto es llamado *pericentro*). Los resultados obtenidos por Abuter et. al. (2020), utilizando el instrumento combinado GRAVITY, corroboran la precesión predicha por la relatividad general. Además, combinando la información del corrimiento con otras observaciones, también será posible estimar con una mayor precisión el valor del momento angular del agujero negro supermasivo. En un capítulo posterior se describirá con detalle el caso de Sagittarius A*, pero para una descripción formal de la precesión de las órbitas de las estrellas S0 se puede consultar el artículo de Dokuchaev, V. I., et. al. (2015).

Órbitas Circulares

Al igual que en la teoría gravitacional Newtoniana, en la relatividad general también aparecen órbitas circulares alrededor del centro de fuerzas. Sin embargo, existe una

³² El corrimiento total observado para Mercurio es de $574.10''$ por siglo. Desde el punto de vista de la mecánica celeste Newtoniana existen fuentes de precesión como la influencia de los demás cuerpos del Sistema Solar y la no-esfericidad del Sol, que en forma conjunta dan cuenta de $531.12''$ por siglo. Los restantes $42.98''$ por siglo corresponden al efecto de la relatividad general.

diferencia fundamental en los dos casos. Mientras en la teoría Newtoniana las órbitas circulares son estables a cualquier distancia del centro de fuerzas, en la relatividad general solamente son estables a partir de un radio determinado por la masa y momento angular del objeto central. Para el caso de la métrica de Schwarzschild, la órbita circular estable más interna, conocida como ISCO por sus siglas en inglés³³, se ubica a una distancia de 3 veces el radio del horizonte de eventos. En el caso de un objeto central descrito por la métrica de Kerr, la ubicación de la ISCO depende del valor de la masa y del momento angular del agujero negro, al igual que de la dirección con la que giran las partículas en la trayectoria circular³⁴.

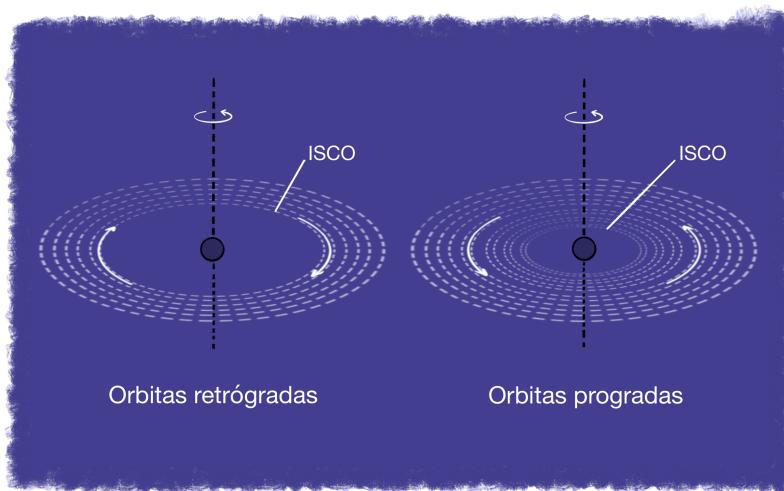


En el caso de los agujeros negros de Schwarzschild, la última órbita circular estable (ISCO) posee un tamaño de tres veces el radio del horizonte. En la región interna a esta trayectoria, las órbitas circulares son inestables bajo perturbaciones.

³³ ISCO: Innermost Stable Circular Orbit

³⁴ Cuando las partículas giran en la misma dirección que la rotación del agujero negro (movimiento progrado), el tamaño de la ISCO es más pequeño que en el caso en que las partículas se mueven en dirección opuesta a la rotación del agujero negro (movimiento retrogrado).

Debido a los tamaños de los objetos astrofísicos, el único caso en el que se puede acceder a esta última órbita estable es en el caso de los agujeros negros (para estrellas, enanas blancas e incluso estrellas de neutrones, la ISCO se ubica dentro de la distribución de materia y por lo tanto no se puede acceder a ella). En el caso del Sistema Solar no pueden observarse las trayectorias inestables, ubicadas a distancias menores que la ISCO, porque están localizadas dentro del Sol. Por otra parte, en el caso de los agujeros negros la localización de la ISCO es crucial en el proceso de acreción como se discutirá a continuación.



En el caso de los agujeros negros de Kerr, la última órbita circular estable (ISCO) posee un tamaño que depende de la dirección de rotación de las partículas. Para órbitas progradas el tamaño de la ISCO es más pequeño que para órbitas retrogradas.

Órbitas de Fotones

Como se ha discutido previamente, dentro de los efectos de la gravedad en la relatividad general se incluye la deflexión o desviación de los rayos de luz. En el caso de los agujeros negros y debido a su extremo campo gravitacional, se puede

dar un comportamiento que difiere completamente de la descripción Newtoniana. Cuando un rayo de luz pasa lo suficientemente cerca del agujero negro no solo es desviado, sino que puede ser atrapado en una órbita circular denominada la *esfera de fotones*. Esta trayectoria es inestable y posee un radio que depende de las propiedades del agujero negro. Por ejemplo, en el caso de un agujero negro de Schwarzschild, la esfera de fotones tiene un radio de 1.5 veces el radio del horizonte de eventos³⁵.



La esfera de fotones corresponde a la trayectoria que siguen los rayos de luz que quedan atrapados debido a la gravedad del agujero negro. Esta trayectoria circular inestable es una característica única de los agujeros negros. Para los agujeros negros de Schwarzschild, el tamaño de esta órbita es de 1.5 veces el radio del horizonte de eventos.

³⁵ En muchas ocasiones se suele pensar que el horizonte de eventos es la superficie donde los rayos de luz permanecen girando, pero no es así. Como se ha definido en secciones anteriores, el horizonte de eventos corresponde al punto donde la **velocidad de escape radial** coincide con la velocidad de la luz. Esto tiene como consecuencia que el horizonte es la superficie donde quedarán “atrapados” los rayos de luz que intentan escapar radialmente.

En el caso de un agujero negro rotante, la ubicación de la esfera de fotones depende del valor de la masa y del momento angular del agujero, al igual que de la dirección con la que se mueven los fotones (trayectoria prograda o retrograda).

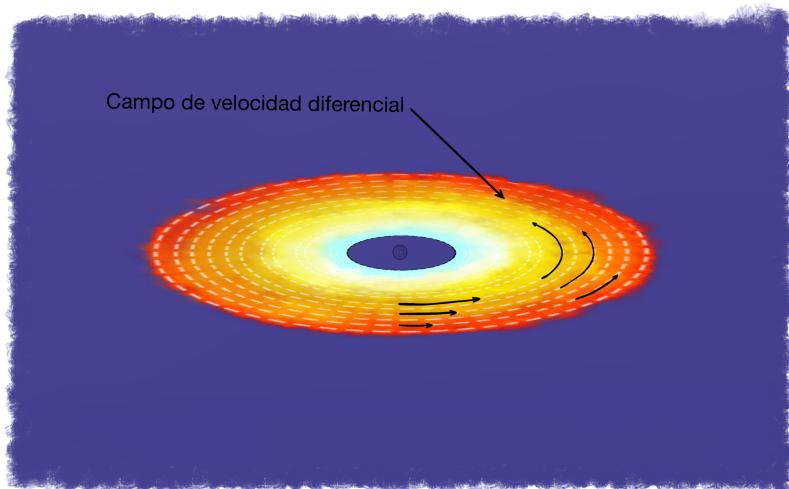
Acreción hacia un Agujero Negro

A nivel astrofísico, es muy común que los agujeros negros tengan la compañía de una estrella (sistemas binarios) o que a su alrededor exista materia en forma de nubes de gas o polvo. En cualquiera de los dos casos y debido a la interacción gravitacional, se puede presentar el proceso de caída de materia hacia el agujero negro. Debido a la existencia de momento angular, el material cae en forma de una espiral alrededor del agujero. Debido al intercambio de momento angular de las partículas que componen la estructura y debido a que el gas se enfriá rápidamente al emitir radiación, es usual que el flujo de gas rápidamente se “aplana”, convirtiéndose en una estructura con forma de disco delgado. A este proceso de caída se le denomina *Acreción* y a la estructura que forma el material se le llama genéricamente *Disco de Acreción*³⁶.

Uno de los aspectos más interesantes de la acreción radica en que el material dentro del disco no rota de forma rígida, sino que las regiones internas se mueven con una velocidad mayor que la de las regiones externas. A este tipo de movimiento se le denomina *rotación diferencial* y tiene como

³⁶ En forma genérica se denomina disco de acreción, pero este nombre general incluye los discos delgados, los discos gruesos, estructuras en formas de toro o donut, etc. La forma específica depende de los detalles del proceso de acreción y del objeto central.

consecuencia que el gas interno que rota rápidamente arrastra el material de las regiones mas externas, perdiendo momento angular y, por lo tanto, cayendo en espiral hacia le centro de fuerza. Este arrastre se manifiesta de forma macroscópica como fuerzas internas de fricción³⁷ o compresión que tienen como resultado el calentamiento del gas de partículas.



Campo de velocidades de las partículas en un disco de acreción. En las regiones internas la rotación es mucho más rápida que en las regiones externas. El arrastre producido y el intercambio de momentum se manifiesta a la forma de una fricción que conlleva a la emisión de radiación electromagnética.

Por lo tanto, el disco de acreción estará compuesto de un gas completamente ionizado y las partículas cargadas que lo componen emiten radiación electromagnética con un espectro continuo con frecuencias que abarcan las ondas de

³⁷ El término fricción no se refiere estrictamente a una viscosidad en el sentido clásico ni a la viscosidad molecular. Usualmente se considera que los campos magnéticos con variaciones rápidas que surgen de la rotación diferencial pueden dar lugar a un término de fuerza análogo a una fricción. Por ello, muchos trabajos modelan la fricción utilizando parámetros desconocidos que luego son ajustados con datos observacionales.

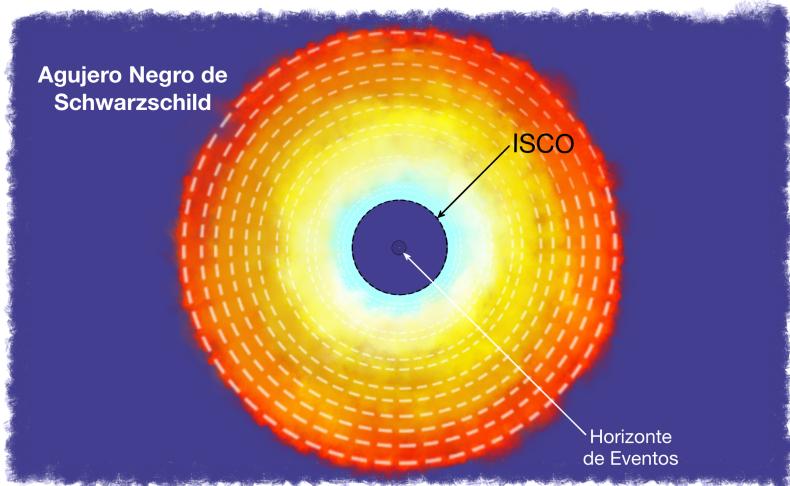
radio, el infrarrojo, pasando por el visible, el ultravioleta y llegando incluso hasta los rayos X. El pico de esta emisión depende de las características particulares de cada disco de acreción y, principalmente, del tipo de agujero negro involucrado. En el caso de agujeros negros estelares, las regiones internas del disco emitirán fuertemente en rayos X e incluso rayos Gamma, mientras que, para agujeros negros supermasivos, la emisión predominante estará en el radio, el visible o el ultravioleta.

Es común pensar que el proceso de acreción puede ser poco energético. Sin embargo, los cálculos indican que la materia en acreción llega a liberar una cantidad de energía equivalente al 10% de su masa y esto significa que la energía producida es de más de 10 veces la energía producida por cualquiera de los procesos termonucleares, haciendo que la acreción sea la forma más eficiente de producción de energía conocida por el hombre.

Disco de Acreción

Al estudiar un disco de acreción alrededor de un agujero negro es usual modelarlo como un conjunto de partículas que se mueven en trayectorias circulares. Debido a las colisiones internas, el momento angular del disco se redistribuye y con ello las partículas pasan desde las órbitas externas a otras cada vez más pequeñas, hasta alcanzar el borde interno del disco, que coincide con la órbita circular estable más interna posible (ISCO). En esta trayectoria las partículas estarán emitiendo la radiación electromagnética más energética del disco de acreción y, al disminuir un poco su momento angular, caerán rápidamente en espiral hacia el objeto compacto. Si este es una estrella de neutrones, las partículas colisionan con su superficie sólida, liberando energía en forma de rayos X mientras que, si el objeto central es un

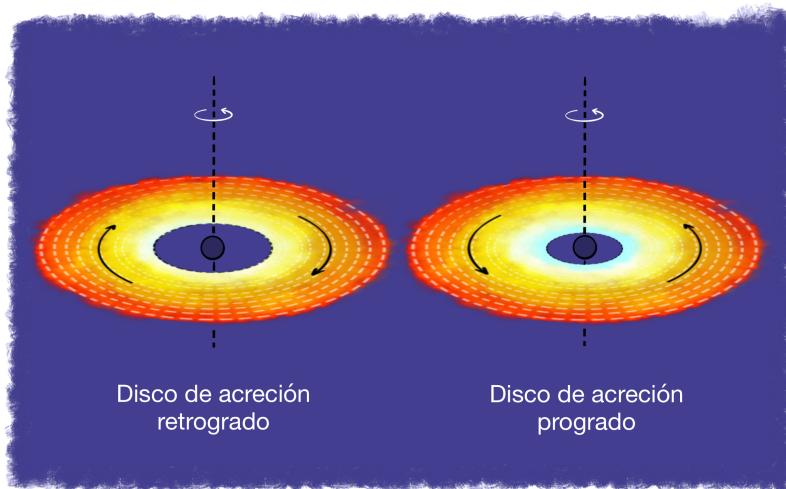
agujero negro, las partículas cruzan el horizonte de eventos y su emisión electromagnética simplemente desaparece para cualquier observador externo debido al corrimiento al rojo extremo.



La última órbita circular estable (ISCO) define el borde interno del disco de acreción. Las partículas que se mueven en esta trayectoria emiten la radiación más energética y la correspondiente frecuencia dependerá de las características del agujero negro central.

Es importante notar que la medición cuidadosa del borde interno del disco de acreción y de la emisión de las partículas en esta trayectoria permite extraer una gran cantidad de información acerca del objeto central, ya que el tamaño de la ISCO depende de la masa y del momento angular del agujero negro central. Adicionalmente, la dirección de movimiento de las partículas en el disco de acreción con respecto a la dirección de rotación del agujero negro también determina el radio del borde interno del disco. Esto se debe a que las partículas con movimiento progrado, es decir aquellas que giran en la misma dirección que la rotación del agujero, pueden acercarse más que las partículas con movimiento

retrogrado (partículas se mueven en dirección opuesta a la rotación del agujero negro).

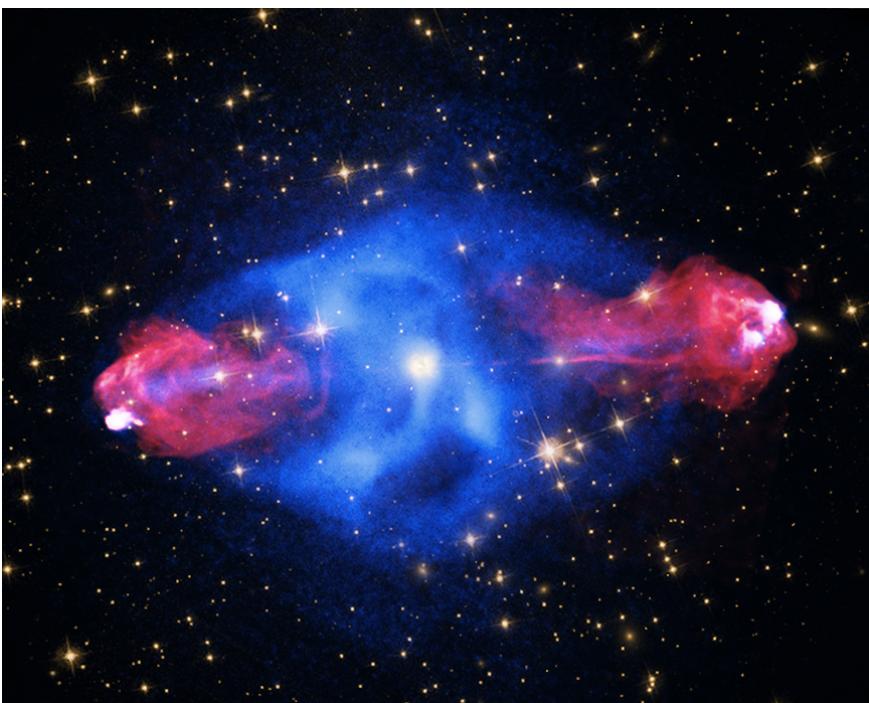


Los discos de acreción retrogrados y progrados alrededor de un agujero negro rotante poseen un borde interno localizado a diferentes distancias debido a que la última órbita circular estable (ISCO) depende del momento angular del agujero negro.

Jets Relativistas

El proceso de acreción tiene otro efecto importante sobre el entorno del agujero negro al producir dos jets compuestos de partículas cargadas que son expulsadas en direcciones perpendiculares al disco. Actualmente no existe un consenso respecto a los procesos físicos que dan lugar a estos jets, sin embargo, hay varias explicaciones posibles. Una de las ideas más interesantes se basa en el comportamiento de los campos magnéticos descrito por Hannes Alfvén. Las propiedades electromagnéticas de un gas ionizado pueden describirse considerando que las líneas de campo hacen parte del fluido. Mientras el gas que compone el disco de acreción se mueve, las líneas de campo se “anclan” al disco, siendo obligadas a rotar. De esta forma, la rotación hace que

las líneas de campo sufren un efecto de torsión alrededor del eje de rotación y, al comportarse de forma similar a un resorte comprimido que se libera, el campo magnético puede generar una fuerza que no solo acelera las partículas, sino que las colima para formar los jets. Las partículas cargadas emiten radiación electromagnética en frecuencias que usualmente están en el rango de las ondas de radio, aunque también se han observado casos particulares en los que se alcanzan emisiones en el visible, el ultravioleta e incluso los rayos X cercanos.



Esta composición de imágenes en rayos X, óptico y radio muestra los jets relativistas que son expulsados desde el centro de la galaxia Cygnus A. El color azul corresponde a los rayos X, emitidos por una nube gigante de gas caliente, detectados por Chandra. El color rojo representa las ondas de radio emitidas por las partículas aceleradas en los jets, detectadas por el VLA.

[Crédito Imagen: X-ray:NASA/CXC/SAO. Optical: NASA/STScI. Radio: NSF/NRAO/AUI/VLA](#)

Esta descripción explicaría la existencia de jets tanto a nivel de agujeros negros estelares como supermasivos, ya que el proceso es independiente del tamaño. Sin embargo, las energías o frecuencias de la radiación producida si dependen de la masa del objeto central.

Los jets relativistas fueron observados originalmente por Herber Curtis en 1917, como haces de luz visible emergiendo del núcleo de la galaxia M87, en la constelación de Virgo. Luego, los avances en la radioastronomía han permitido identificar miles de jets producidos por agujeros supermasivos en galaxias como Cygnus A o producidos por agujeros estelares como, por ejemplo, el sistema binario SS433 ubicado en nuestra Galaxia.