

Proyecto final Física Moderna

Agujeros negros, quásars, pulsars y blazars

Valeria Torres Gomez*

Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia.

(Dated: 01 de junio de 2023)

El presente proyecto se centró en la comprensión de los agujeros negros, pulsars, quásars y blazars desde diferentes perspectivas, incluyendo su formación, estructura, propiedades físicas básicas y su papel en la evolución y dinámica del universo. Se exploraron conceptos fundamentales como la gravedad, la radiación electromagnética y los fenómenos astrofísicos asociados a estos objetos. Se llevaron a cabo simulaciones computacionales para el análisis y visualización de algunas de sus propiedades. A través del proyecto se logró profundizar en el conocimiento de estos objetos astronómicos y se adquirió una comprensión más sólida de los procesos físicos y matemáticos involucrados en su estudio.

I. INTRODUCCIÓN

En el ámbito de la astronomía y la astrofísica diversos objetos astronómicos han capturado la atención de la comunidad científica por años y han desencadenado un gran interés en la comprensión del cosmos, entre estos se encuentran los agujeros negros, los pulsars, los quásars y los blazars. Su estudio permite explorar los límites de la gravedad, comprender los fenómenos astrofísicos más extremos y obtener información valiosa sobre la evolución y estructura del cosmos.

II. AGUJEROS NEGROS

Un agujero negro es un cuerpo cósmico con una gravedad extremadamente intensa que se forma cuando una estrella masiva colapsa bajo su propio peso. Cuando una estrella agota su combustible interno, su núcleo se vuelve inestable y colapsa hacia su interior, mientras que sus capas externas son expulsadas. La fuerza gravitatoria resultante de la materia que colapsa comprime la estrella hasta convertirla en un punto de densidad infinita, también llamado singularidad.

Las especulaciones sobre la existencia de agujeros negros se remontan al siglo XVIII, cuando John Michell y Pierre-Simon Laplace discutieron la posibilidad de objetos extremadamente compactos con una velocidad de escape que supera la velocidad de la luz. Estos objetos, llamados estrellas oscuras, no emitirían radiación; sin embargo, no se buscó evidencia de su existencia en ese momento [6]. Estos objetos estarían descritos por la mecánica newtoniana como cuerpos de simetría esférica con masa M , en los cuales la velocidad de escape superaría la velocidad de la luz c para un radio R dado por la expresión 1.

$$R < \frac{2GM}{c^2} \quad (1)$$

En 1915, Albert Einstein propuso la teoría de la relatividad general, y en 1916, Karl Schwarzschild descubrió la solución más simple para describir un agujero negro esféricamente simétrico y sin carga eléctrica, conocida como la solución de Schwarzschild. También se encontraron soluciones que describen agujeros negros con simetría esférica y carga eléctrica, como la solución de Reissner-Nordström propuesta por Hans Reissner y Gunnar Nordström [6].

Posteriormente las observaciones astronómicas revelaron fuentes de radiación intensa y extrañas, como los quásars y los pulsars, indicando la presencia de objetos extremadamente densos y compactos, que se creía que eran agujeros negros. Fue en la década de 1970 cuando los astrónomos lograron medir la masa de un objeto compacto en el sistema binario conocido como Cygnus X-1, proporcionando evidencia sólida de la existencia de un agujero negro [3].

Finalmente, en 2019, se logró un hito histórico con la primera imagen directa de un agujero negro supermasivo en el centro de la galaxia M87 por parte del proyecto Event Horizon Telescope utilizando interferometría de larga base. El objetivo principal del EHT fue obtener una imagen detallada del horizonte de sucesos [6].

Estos objetos tienen una estructura característica: en su centro se encuentra la singularidad, oculta por el horizonte de eventos del agujero negro, que actúa como una "superficie". Dentro del horizonte de eventos, la velocidad de escape supera la velocidad de la luz, lo que impide que cualquier cosa pueda escapar [3]. El radio del horizonte de eventos se conoce como el radio de Schwarzschild y es proporcional a la masa de la estrella colapsante. Para un agujero negro con una masa 10 veces mayor que la del Sol, el radio sería de 30 km.

Los agujeros negros son difíciles de observar directamente debido a su pequeño tamaño y falta de emisión

* Correo institucional: v.torresg23@uniandes.edu.co

de luz. Sin embargo, se pueden detectar a través de los efectos de su campo gravitatorio en la materia cercana.

Algunos agujeros negros se forman a partir del colapso de gas interestelar y pueden explicar la gran energía emitida por los quásars y galaxias. También se ha propuesto la existencia de agujeros negros primordiales más pequeños, que podrían desaparecer con el tiempo debido a la radiación de Hawking (radiación térmica expulsada debido a efectos cuánticos) [3].

A. Marco teórico

La métrica de Schwarzschild describe la geometría del espacio-tiempo alrededor de un agujero negro estático (no rotatorio). Fue descrita por el físico alemán Karl Schwarzschild en 1916 como una solución a las ecuaciones de campo de la teoría de la relatividad general, además, implica la existencia del horizonte de eventos [3]. Esta se expresa en coordenadas esféricas, ecuación 2, donde ds es el intervalo de espacio-tiempo, dt el diferencial de tiempo, dr el diferencial de distancia al radio, $d\Omega$ el elemento de ángulo sólido que representa las coordenadas angulares, G la constante gravitacional, M la masa del agujero negro, c la velocidad de la luz, y r la distancia desde el centro del agujero negro.

$$ds^2 = - \left(1 - \frac{2Gm}{r} \right) dt^2 + \frac{dr^2}{1 - \frac{2Gm}{r}} + r^2 d\Omega^2 \quad (2)$$

La primera parte de la ecuación, 3, representa el elemento de intervalo de tiempo. La presencia de la masa m en el término $2Gm$ indica cómo la masa del objeto afecta el tiempo a su alrededor. A medida que nos acercamos al objeto masivo, este factor se vuelve más pequeño, lo que implica que el tiempo se dilata en comparación con un observador lejano.

$$\left(1 - \frac{2Gm}{r} \right) dt^2 \quad (3)$$

El segundo término de la ecuación, 4, representa el elemento de intervalo de distancia radial. Este término muestra cómo la presencia de la masa afecta la geometría del espacio. A medida que nos acercamos al objeto masivo, este denominador se vuelve más pequeño, lo que indica que el espacio está curvado y la distancia radial se contrae.

$$\left(\frac{1}{1 - \frac{2Gm}{r}} \right) dr^2 \quad (4)$$

El último término, 5, representa el elemento de ángulo sólido, y describe las coordenadas angulares en la geometría esférica.

$$r^2 d\Omega^2 \quad (5)$$

El radio de Schwarzschild, r_s , se define como el valor de r para el cual el término 3 se vuelve cero, es el límite en el cual la velocidad de escape se iguala a la velocidad de la luz. Al despejar la ecuación, es posible establecer la relación 6 y obtener el radio r_s en función de la masa m , expresión 7, donde c es la velocidad de la luz.

$$1 - \frac{2Gm}{r_s} = 0 \quad (6)$$

$$r_s = \frac{2Gm}{c^2} \quad (7)$$

B. Simulaciones y análisis

En la métrica de Schwarzschild, el la variable ds^2 está relacionado con la geometría del espacio-tiempo alrededor del agujero negro. Al simular por medio de una gráfica su comportamiento en función de la variable dependiente del radio del agujero negro es posible obtener una estimación básica sobre comportamiento de la métrica en diversas longitudes radiales, figura 1.

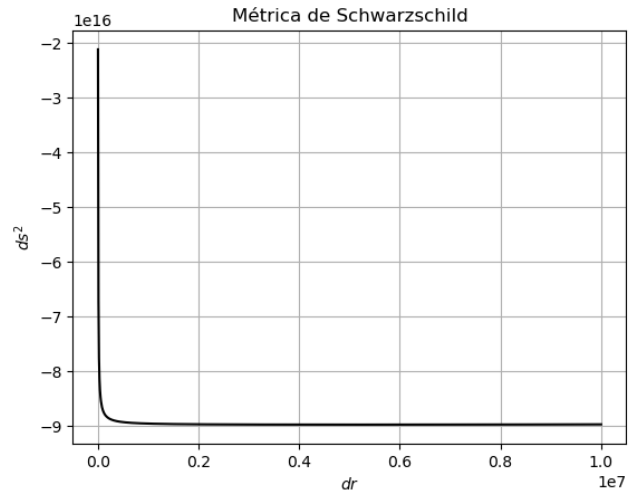


Figura 1. Simulación Métrica Schwarzschild. Se realizó una gráfica de ds^2 en función de dr para diferentes distancias radiales.

Por otra parte, al simular por medio de una gráfica la masa del agujero negro en función del radio de Schwarzschild, es posible obtener una estimación básica sobre el comportamiento proporcional de estas variables, figura 2.

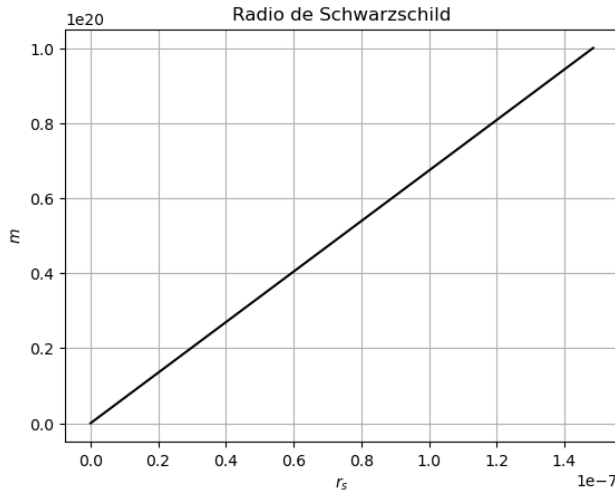


Figura 2. Simulación Radio de Schwarzschild. Se realizó una gráfica de m en función de r_s para diferentes masas.

III. QUÁSARS

Un quásar es un objeto astronómico extremadamente brillante y distante que emite grandes cantidades de energía en forma de radiación electromagnética. Se cree que los quásares son núcleos galácticos activos que contienen un agujero negro supermasivo en su centro. Estos agujeros negros absorben materia circundante y liberan una enorme cantidad de energía durante el proceso, lo que hace que los quásares sean detectables a distancias muy lejanas [11].

El descubrimiento de los quásars fue precedido por observaciones y estudios que indicaban la actividad intensa en los núcleos de las galaxias. Astrónomos como Fath, Slipher, Hubble y Mayall realizaron observaciones de líneas de emisión nuclear fuertes en galaxias, hasta que en 1943, Seyfert llevó a cabo un estudio importante sobre la actividad en los núcleos de seis galaxias, lo que llevó a la denominación de "Galaxias Seyfert". Estas galaxias mostraban similitudes con los espectros de emisión de nebulosas planetarias y gaseosas [10].

En 1963, Hoyle y Fowler publicaron un artículo innovador que amplió el contexto del descubrimiento de los quásares. En su trabajo, discutieron la presencia de objetos estelares masivos en los centros galácticos, acompañados de un disco de gas que transfería el momento angular desde la estrella central. Esta investigación añadió una nueva comprensión de las regiones centrales de las galaxias y estableció las bases para investigaciones posteriores [10]. Fue en este contexto que se identificó el primer quásar reconocido.

En el mismo año, Maarten Schmidt realizó un descubrimiento revolucionario al reconocer que el espectro del objeto estelar identificado con la fuente de radio 3C

273 podía ser interpretado fácilmente mediante un corrimiento al rojo de 0.16 [1], esto significa que la luz emitida por el objeto observado había experimentado un desplazamiento hacia longitudes de onda más largas equivalente a un corrimiento al rojo de 0.16.

Debido a su apariencia casi estelar, se les dio el nombre de "fuentes de radio cuasi-estelares" (en inglés, quasi-stellar radio sources), que en 1964 fue acortado a "quásar" (en inglés, quasar).

Desde principios de la década de 1980, la mayoría de los astrónomos han considerado a los quásars (QSOs) como la variedad de alta luminosidad de una población aún más grande de "núcleos galácticos activos" (AGN, por sus siglas en inglés). Los AGN de menor luminosidad siguen siendo denominados como galaxias Seyfert.

Los quásares y otros AGNs se alimentan de la acreción gravitacional en agujeros negros supermasivos. En algunos casos, el gas cae en el agujero negro y se calienta, formando un disco de acreción cercano al horizonte del agujero negro. Existe un límite máximo de acreción determinado por el límite de Eddington, este es aproximadamente igual a la tasa a la cual el Sol generaría energía a través de la fusión nuclear, que es alrededor de $1.26 \cdot 10^{18}$ kg/s [12].

Hay nubes de gas que se mueven a altas velocidades alrededor del disco de acreción, absorbiendo radiación de alta energía y emitiendo líneas de emisión anchas características de los quásars. Algunos presentan chorros de radio, que son haces de plasma expulsados a lo largo del eje de rotación del disco de acreción [12]. Estos chorros emiten radiación en diferentes longitudes de onda.

La apariencia de un quásar depende de la orientación del disco de acreción con respecto a la línea de visión del observador. Sus diferentes componentes pueden ser más o menos prominentes según este ángulo. Esto resulta en una variedad de fenómenos observados que provienen de fuentes físicamente similares.

A. Marco teórico

El corrimiento al rojo (en inglés, red shift) se refiere al desplazamiento de la luz hacia longitudes de onda más largas, lo que produce una apariencia rojiza. Aunque este fenómeno es similar al efecto Doppler, los corrimientos al rojo observados en objetos astronómicos son principalmente resultado de la expansión del universo. Mientras que los corrimientos Doppler se deben al movimiento relativo de la fuente y el observador, estos corrimientos astronómicos son causados por la expansión del espacio [11].

Este corrimiento se calcula comparando las longitudes de onda observadas de las líneas espectrales en el espectro de un quásar con las longitudes de onda de

referencia. La fórmula utilizada para calcular el corrimiento al rojo z está dada por la expresión 8, donde λ_{obs} es la longitud de onda observada de una línea espectral y λ_{rest} es la longitud de onda de referencia.

$$z = \frac{\lambda_{obs} - \lambda_{rest}}{\lambda_{rest}} = \sqrt{\frac{1 + \frac{v}{c}}{1 - \frac{v}{c}}} \quad (8)$$

Un corrimiento al rojo positivo, $z > 0$ indica que la longitud de onda observada es más larga que la de referencia, lo que significa que el objeto se está alejando. Cuanto mayor sea el valor de z , mayor será el corrimiento al rojo y mayor será la velocidad de alejamiento del objeto [9].

B. Simulaciones y análisis

El fenómeno de corrimiento al rojo (z) depende de la longitud de onda observada λ_{obs} y la longitud de onda emitida por el quásar λ_{res} . Al simular por medio de una gráfica el comportamiento de z en función de la longitud de onda emitida por el quásar es posible obtener una estimación básica sobre el comportamiento del fenómeno bajo diferentes variaciones de λ , figura 3.

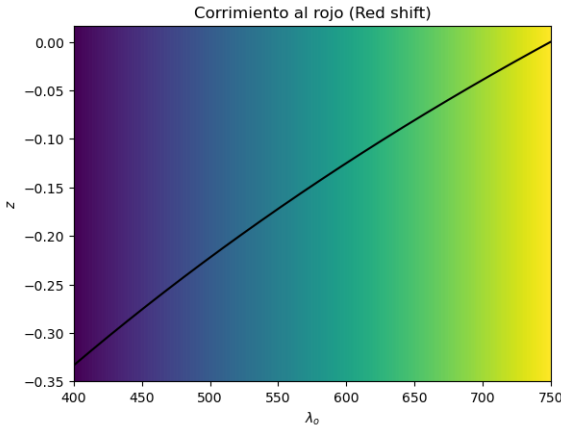


Figura 3. Simulación Corrimiento al rojo. Se realizó una gráfica de z en función de la longitud de onda observada λ_o .

IV. PULSARS

Un pulsar es una estrella de neutrones altamente magnetizada y en rápida rotación. Se forma a partir de los restos de una supernova, cuando el núcleo colapsado de la estrella progenitora colapsa y se compacta en una estrella de neutrones. Los pulsares emiten haces de radiación altamente energéticos desde sus polos magnéticos, y cuando estos haces apuntan hacia la Tierra

en cada rotación, se detectan como pulsos regulares de radiación[8].

Tienen un tamaño muy compacto, con diámetros de aproximadamente 20 km, y campos magnéticos extremadamente fuertes, alrededor de un billón de veces más potentes que el campo magnético de la Tierra. Estos campos magnéticos desvían partículas cargadas, generando radiación electromagnética en forma de haces intensos, y su masa es generalmente de 1,18 a 1,97 veces la masa del Sol [9].

Los pulsars fueron descubiertos por Antony Hewish y Jocelyn Bell en 1967 en la Universidad de Cambridge. Utilizaron un radiotelescopio especialmente diseñado para detectar fluctuaciones rápidas en las fuentes de radio. Durante su investigación, observaron señales de radio muy regulares y pulsantes que provenían del espacio. Inicialmente se creyó que estas señales podrían ser causadas por interferencias; sin embargo, posteriormente se descubrió que las señales provenían de un objeto en rápida rotación que emitía haces de radiación.

Aunque todos los pulsares conocidos muestran un comportamiento similar, presentan una considerable variación en la longitud de sus períodos. En 2006 se observó el pulsar más rápido conocido, J1748-2446ad, con un período de 1,396 milisegundos, una velocidad de giro de 716 rps [7].

Estos pulsares rápidos se conocen como pulsares de milisegundos [7]. Se forman en supernovas al igual que los pulsares de rotación más lenta. Sin embargo, los de milisegundos a menudo se encuentran en sistemas estelares binarios. Después de la supernova, la estrella de neutrones acumula materia de su compañera, lo que hace que el pulsar gire más rápido.

Se considera que existe un límite teórico para estas velocidades, ya que una estrella de neutrones que gire solo unas cuatro veces más rápido se desintegraría como resultado de la fuerza en su ecuador, a pesar de una atracción gravitatoria tan fuerte que la velocidad de escape de la estrella es aproximadamente la mitad de la velocidad de la luz [7].

Los pulsars disminuyen su velocidad de forma gradual, a una tasa de aproximadamente una millonésima de segundo por año. La relación entre su período actual y la tasa de desaceleración proporciona información sobre su edad. Algunos pulsares tienen una edad característica que coincide con su edad real, como el Pulsar del Cangrejo con 1.240 años y el pulsar J0205+6449 con 5.390 años.

Además, son relojes muy precisos debido a su desaceleración gradual [11]. Su fuerte campo gravitatorio permite probar teorías de la gravedad. Los físicos Joseph Taylor y Russell Hulse ganaron el Premio Nobel en 1993 por su estudio de las variaciones de tiempo en el pulsar PSR 1913+16. Descubrieron que el pulsar y su estrella compañera se aceleraban en una órbita cada vez más ajustada debido a la emisión de ondas gravita-

cionales.

A. Marco teórico

Inicialmente, se desconocía la fuente de los pulsos de los pulsars, y se sugirieron incluso transmisiones inteligentes de civilizaciones extraterrestres como explicación. Sin embargo, los períodos cortos y estables descartaron la posibilidad de agujeros negros como origen. Los astrónomos estaban familiarizados con estrellas que emitían de forma pulsante o con variaciones lentas, pero sus períodos naturales eran mucho más largos que los observados en estas.

Para comprender mejor las limitaciones en los períodos de los pulsars, se estableció un límite inferior, basado en la aceleración centrífuga y gravitacional en una estrella en rotación, considerando una estrella casi esférica con masa M y radio R que gira con una velocidad angular Ω , 9, donde P es el período de rotación y G es la constante gravitacional, expresión 10. Este límite debe cumplirse para evitar que la estrella se rompa debido a la fuerza centrífuga [5], lo cual implica la relación 11.

$$\Omega = \frac{2\pi}{P} \quad (9)$$

$$\Omega^2 R < \frac{GM}{R^2} \quad (10)$$

$$P^2 > \frac{4\pi R^3}{3} \frac{3\pi}{GM} \quad (11)$$

B. Simulaciones y análisis

El periodo T de un pulsar depende de su radio R , si se considera como una estrella casi esférica. Al simular por medio de una gráfica el comportamiento de su periodo en función del radio es posible obtener una estimación básica sobre el comportamiento del límite de su periodo de giro, figura 4.

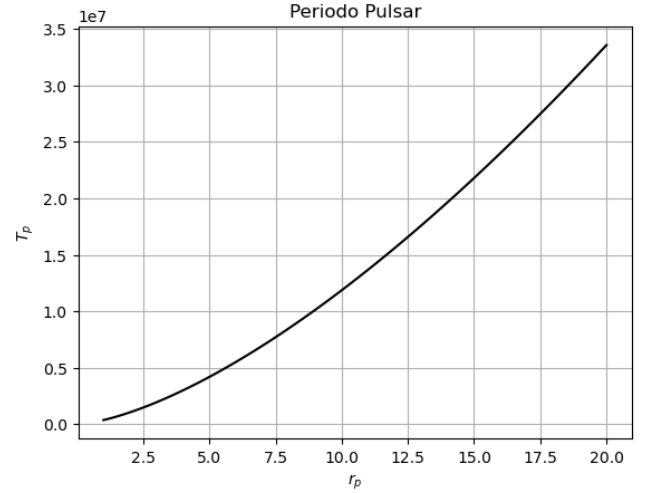


Figura 4. Simulación Límite periodo de un pulsar. Se realizó una gráfica de T en función del radio R .

V. BLAZARS

Un blázar es un tipo de galaxia activa con un núcleo galáctico extremadamente brillante y energético. Se cree que los blazares son galaxias que albergan un agujero negro supermasivo en su centro y emiten grandes cantidades de radiación electromagnética debido a la emisión de chorros de partículas altamente energéticas desde el entorno del agujero negro. Estos chorros apuntan directamente hacia la Tierra, lo que hace que los blazares sean fuentes de radiación muy intensas y visibles incluso a grandes distancias.

En el centro de la mayoría de las galaxias hay un agujero negro supermasivo, el cual pueden tener pueden tener un disco de gas, polvo y escombros estelares a su alrededor. Cuando el material en el disco cae hacia el agujero negro, su energía gravitacional se convierte en luz, lo que hace que los centros de estas galaxias sean muy brillantes y se les llame núcleos galácticos activos (AGN, por sus siglas en inglés) [4].

Cuando una galaxia está orientada de manera que los chorros apuntan hacia la Tierra, se le llama blazar. Es similar a un quásar, pero con una alineación en un ángulo diferente, el primero encontrado fue identificado erróneamente como una estrella inusual. Posteriormente, se descubrió que era un objeto brillante en el centro de una galaxia distante, y se encontraron otros objetos similares a este, llamados objetos BL Lac y luego blazars.

Estudios posteriores demostraron que la luz brillante en radio de los blazars provenía de chorros de material que se mueven a velocidades relativistas [4]. Se determinó que los blazares, los quásars y otros fenómenos brillantes observados en galaxias pertenecían a la mis-

ma familia de objetos, los núcleos galácticos activos.

Se clasifican en dos categorías principales: los BL Lacertae (BL Lac), que presentan líneas de emisión débiles o ausentes en sus espectros, y los cuasares de radio de alta polarización (HPQ), que muestran líneas de emisión prominentes [2]. Los blazars son conocidos por su variabilidad intrínseca y su capacidad para experimentar cambios rápidos e impredecibles en su brillo. Esta característica los convierte en objetos ideales para el estudio de fenómenos astrofísicos transitorios.

VI. CONCLUSIONES

A través de este proyecto se logró avanzar en la comprensión de los agujeros negros, pulsars, quásars y blazars desde diversas perspectivas, incluyendo información sobre su formación, estructura, propiedades físicas básicas y su papel en la evolución y dinámica del universo. A través de básicas exploraciones teóricas y simulaciones computacionales, se ha profundizado en el conocimiento de estos objetos astronómicos y se ha adquirido una comprensión más sólida de los procesos físicos y matemáticos involucrados en su estudio.

En cuanto a los agujeros negros, se exploraron sus conceptos fundamentales, como la formación, estructura y propiedades físicas básicas. Se analizó la métrica de Schwarzschild, que describe la geometría del espacio-tiempo alrededor de un agujero negro estático, y se demostró cómo la masa del agujero negro afecta el tiempo y la geometría del espacio. También se discutió el horizonte de eventos y el radio de Schwarzschild, que define el límite en el cual la velocidad de escape se iguala a la velocidad de la luz.

En relación a los quásars, se comprendió que son núcleos galácticos activos que contienen un agujero negro supermasivo en su centro. Se explicó su origen y descubrimiento, desde las primeras observaciones de líneas de emisión nuclear fuertes en galaxias hasta el reconocimiento de los quásars como fuentes de radio cuasi-estelares.

El proyecto también proporcionó una visión general de los pulsars y blazars, ampliando así el conocimiento sobre estos objetos astrofísicos. Se resaltó que los pulsars son estrellas de neutrones altamente magnetizadas que emiten pulsos regulares de radiación electromagnética y que los blazars son núcleos galácticos activos con chorros relativistas orientados hacia la Tierra.

-
- [1] The physics of quasars. page 227.
 - [2] Frontiers in astronomy and space sciences. 2018.
 - [3] A. Augustyn. Black holes. 2023.
 - [4] E. Clarkson. Blazars: an overview. 2018.
 - [5] J. Condon and S. Ransom. Pulsars - essential radio astronomy. 2017.
 - [6] B. Cosimo. Astrophysical black holes: A review. 2019.
 - [7] E. Gregersen. Cosmic object: Pulsar. 2022.
 - [8] F. Hoyle. *Fronteras de la Astronomía*. Universidad Nacional Autónoma de México, 1st edition, 1960.
 - [9] F. Hoyle. *Introducción a la Astronomía*. W.H. Freeman and company, 1st edition, 1975.
 - [10] K. Kellerman. The discovery of quasars. 2013.
 - [11] H. Kragh. *Historia de la Cosmología*. Oxford University Press, 1st edition, 2008.
 - [12] B. Peterson. Quasars - active galactic nuclei. 2023.