GALAXIA ESPIRAL M81 Y SU AGUJERO NEGRO CENTRAL

Ismael Gómez

M81 (Messier 81), también conocida como la Galaxia de Bode, es una prominente galaxia espiral situada a una distancia aproximada de 12 millones de años luz en la constelación de la Osa Mayor. Debido a su relativa cercanía y su brillante núcleo, constituye un laboratorio cósmico excepcional para la investigación astrofísica.

El propósito de este estudio es abordar de manera rigurosa la caracterización de su Núcleo Galáctico Activo (AGN - Active Galactic Nucleus) y estimar las propiedades físicas fundamentales de su agujero negro supermasivo central, denominado M81*.



Figura 1. Galaxia espiral M81, Leoncio Peiro y Miguel Soriano

Clasificación y Estructura de las Galaxias con Núcleo Activo (AGN)

Un Núcleo Galáctico Activo (AGN - Active Galactic Nucleus) es una región compacta localizada en el centro de una galaxia, cuya luminosidad extrema no es producida por estrellas, sino por la acreción de materia hacia un agujero negro supermasivo central.

El Modelo Unificado de los AGN establece que las marcadas diferencias observacionales entre distintas clases de galaxias activas no se deben necesariamente a propiedades físicas intrínsecamente distintas, sino principalmente a la orientación e inclinación del plano de rotación del AGN respecto a la visual de la Tierra. Podemos diferenciar las siguientes cinco clases principales de galaxias con AGN:

- LINER
- Seyfert
- Cuásares
- Blázares
- Radiogalaxias

Según el tamaño y la energía de su núcleo, la galaxia M81 se clasifica como una galaxia LINER de baja energía y moderada extensión.

Componentes del Núcleo Activo AGN

La estructura interna de M81 se compone de tres elementos concéntricos bien definidos:

- Agujero Negro Central Rotante
- Disco de Acreción
- Toroide de Gas y Polvo

Este entorno se caracteriza por una compleja interacción de componentes cinemáticas y térmicas dispuestas de forma concéntrica:

- Agujero Negro Rotante Central: Es el motor energético caracterizado por su masa (M) y momento angular (J).
- Disco de Acreción: Estructura de gas y plasma sobrecalentados que giran a velocidades relativistas y radia intensamente.
- Región de Líneas Anchas (BLR - Broad Line Region): Nubes de gas de alta densidad localizadas cerca del disco de acreción. Presentan velocidades orbitales muy elevadas (miles de km/s), lo que provoca un ensanchamiento Doppler extremo de las líneas de emisión.
- Región de Líneas Intermedias (ILR - Intermediate Line Region): Zona de transición cinética entre la BLR y la NLR.
- Toroide de Polvo y Gas Ionizado: Una estructura densa y opaca con forma de dónut que circunda el disco de acreción, bloqueando y filtrando la radiación según el ángulo de visión del observador.
- Región de Líneas Estrechas (NLR - Narrow Line Region): Nubes de gas de baja densidad ubicadas a distancias macroscópicas (escala de pársecs) por fuera del toroide. Sus velocidades son menores, produciendo líneas espectrales estrechas.
- Chorro Relativista (Jet) y Lóbulos de Radio: Flujos colimados de plasma eyectados perpendicularmente al plano de acreción a velocidades cercanas a la de la luz, que se extienden hacia el medio intergaláctico.

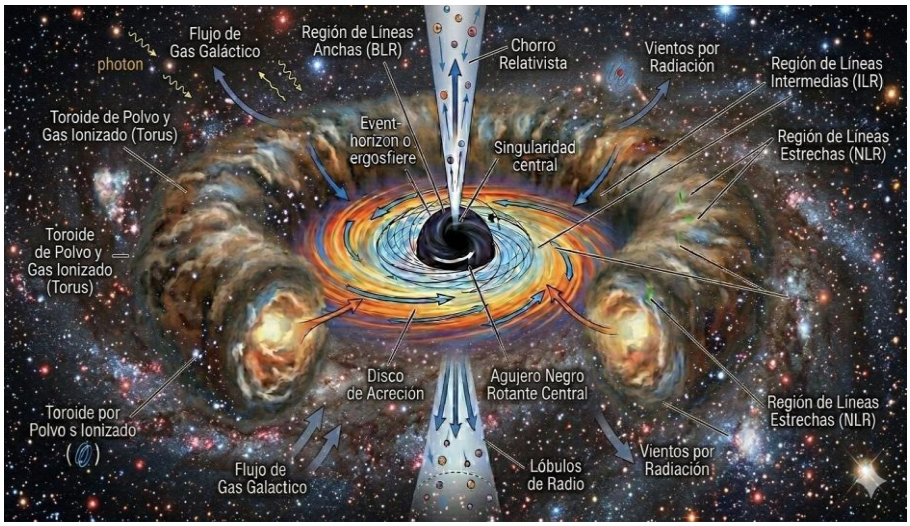

Figura 2. Estructura del AGN

La inclinación y la orientación del plano de rotación del AGN determinan qué regiones (BLR, ILR, NLR o el chorro relativista) dominan en el espectro de radiación captado por el observador.

Modelización del Agujero Negro Rotante (Tipo Kerr)

El campo gravitatorio extremo en el corazón del AGN requiere la aplicación rigurosa de las ecuaciones de Relatividad General de Einstein (1915), descritas de forma tensorial como:

A diferencia de la formulación newtoniana donde la masa es la única fuente de gravedad, en Relatividad General la gravedad o curvatura del espacio-tiempo es dictada por el tensor de energía-momento, que contiene las contribuciones de la masa, energía, presión y flujos de momento.

En 1963, el físico neozelandés Roy Kerr encontró una solución matemática exacta a las ecuaciones de campo de la Relatividad General para el escenario de un cuerpo masivo en rotación. Este modelo es aplicable a los agujeros negros centrales supermasivos galácticos, como nuestro caso de estudio de M81*.

Este modelo de Agujero Negro Kerr se define mediante dos parámetros esenciales: la masa (M) y el parámetro de espín o momento angular por unidad de masa (a = J/M). Su métrica viene expresada en coordenadas de Boyer-Lindquist (ver figura 3.2).

Bajo este régimen relativista surge la Ergosfera Toroidal. Dentro de la ergosfera se produce un fenómeno extremo conocido como arrastre del espacio-tiempo (Frame-dragging o Gravito-magnetismo). El tejido mismo del espacio-tiempo es forzado a rotar solidariamente con el agujero negro, impidiendo que cualquier partícula física o rayo de luz permanezca estático, abriendo la posibilidad de procesos de extracción de energía cinética del núcleo AGN (Efecto Penrose).

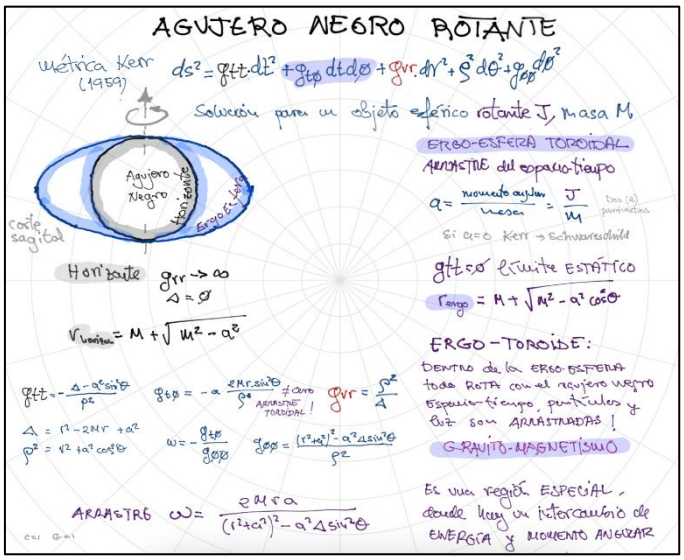

Figura 3. Ecuaciones del modelo de Agujero Negro Kerr

Estimación de la masa del agujero negro central

La masa de los agujeros negros supermasivos centrales puede estimarse indirectamente mediante la dinámica a gran escala del bulbo galáctico anfitrión, ya que su gravedad domina y gobierna la rotación.

Destacamos dos aproximaciones con ecuaciones ajustadas experimentalmente, que establecen una relación directa entre la masa del agujero negro central y la dispersión de velocidades radiales del entorno circundante:

- Ecuación de Sparke-Gallagher (2015)
- Ecuación de Kormendy & Ho (2013)

Toroide de Polvo y Gas Ionizado

El Toroide de Polvo y Gas Ionizado se encuentra en las órbitas más externas del AGN, y por tanto su dinámica la podemos aproximar con ecuaciones clásicas keplerianas. Aplicaremos el Teorema del Virial, cuyo origen está en el equilibrio entre energía cinética y potencial gravitatorio del sistema de partículas circundante, que correlaciona la velocidad orbital con la distancia o radio medio.

De manera lógica asociamos los datos dinámicos de las componentes BLR y NLR con las regiones internas y externas limítrofes del Toroide.

Análisis Espectroscópico de M81

El análisis de la luz integrada proveniente del núcleo galáctico revela la firma espectral combinada de millones de estrellas junto con las emisiones del gas ionizado circundante. La captura del espectro se realizó empleando la configuración instrumental siguiente:

- Telescopio: C11 (focal 2800 mm).
- Red de difracción: Star Analyser SA100 con una rendija de 35 micras.
- Cámara: ZWO ASI585
- Tiempo total de exposición: 2400 segundos (8 tomas de 300 segundos).
- Área nuclear galáctica captada: 3 arcsec.
- Autor: Javier de Elías, Majadahonda (Madrid), 19/04/2026.

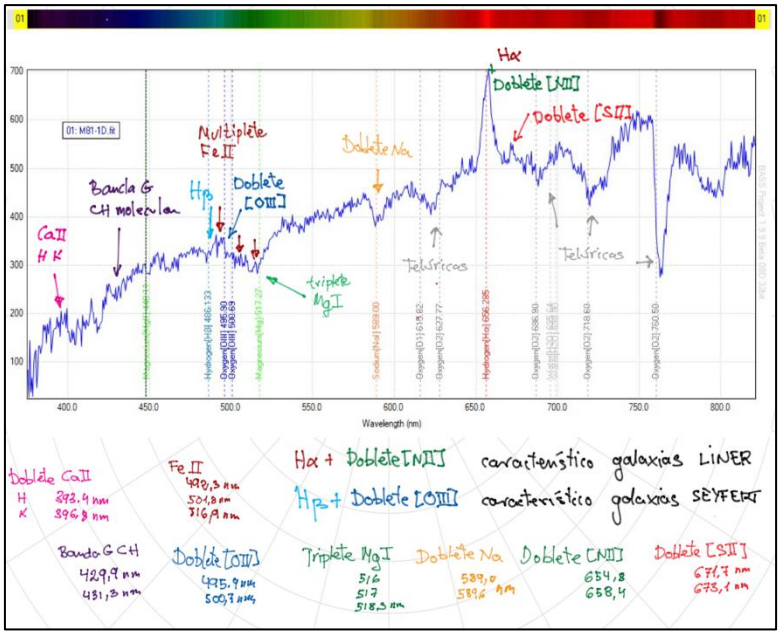

Figura 4. Espectro del AGN de M81 captado por Javier de Elías y analizado por Ismael Gómez

En el espectro obtenido destacan las siguientes líneas de emisión:

- Línea Integrada Compleja: Hidrógeno H-alfa 656,3 nm junto al doblete de Nitrógeno ionizado [NII] 654,8 nm y 658,3 nm.
- Doblete de Azufre [SII]: 671,7 nm y 673,1 nm.
- Doblete de Oxígeno [OIII]: 495,9 nm y 500,7 nm.
- Hidrógeno H-beta (β): 486,1 nm.

El dominio de las líneas de emisión H-alfa y del doblete [NII] son indicios claros para clasificar a M81 como una galaxia de tipo LINER (Low-Ionization Nuclear Emission-line Region), es decir, cuenta con una región central de líneas de emisión nuclear de baja ionización.

Debido a la resolución espectral instrumental (R=280 @656nm), las líneas de H-alfa y el doblete de [NII] aparecen fusionadas en un único gran pico de emisión. Es de esperar que en espectros de alta resolución se diferencien estos tres picos.

El análisis del continuo espectral muestra una morfología análoga a la de una estrella de clase espectral G, indicando que la población estelar del bulbo galáctico captado en el espectro está dominada por estrellas gigantes maduras de tipos G, K y M.

Modelo Espectroscópico Multicomponente

En el análisis espectroscópico de galaxias de tipo Seyfert y LINER (como M81), la región comprendida entre los 650 y 665 nm es muy compleja debido al solapamiento de las líneas de emisión del doblete de nitrógeno ionizado [NII] con H-alfa de Hidrógeno. Debemos considerar y modelizar que la señal del pico de emisión íntegra las siguientes componentes:

- Hidrógeno H-alfa Estrecha (NLR): 656,3 nm, Proviene de la Región de Líneas Estrechas (Narrow Line Region), caracterizada por gas de baja densidad situado a mayor distancia del agujero negro.
- Hidrógeno H-alfa Ancha (BLR): Originada en la Región de Líneas Anchas (Broad Line Region), donde el gas se desplaza a velocidades orbitales extremas debido a la proximidad del pozo gravitatorio.
- Doblete de Nitrógeno [NII]: 654,8 - 658,3 nm, Líneas estrechas que flanquean la emisión de H-alfa.
- Asimetría ("Ala Roja"): Se detecta una extensión asimétrica hacia longitudes de onda más largas en el perfil ancho de H-alfa, consistente con efectos cinemáticos de dispersión o inhomogeneidades en el disco de acreción.

La dispersión de velocidades reales del gas se vincula directamente a la anchura a media altura espectral (FWHM) de la componente, por medio del factor de conversión c traducimos longitudes de onda (nm) a dispersión de velocidades (km/s). Aplicamos un factor de corrección K (mayor que 2.35) para tener en cuenta el ensanchamiento instrumental del telescopio, rendija y espectroscopio.

Para deconvolucionar estas componentes físicamente y extraer información cinemática limpia, se realizó una modelización gaussiana multicomponente con diferentes intensidades y anchuras FWHM.

En este ajuste multicomponente se busca sincronizar el modelo con el espectro medido, de modo que la suma coincida con la línea de emisión integrada medida en el espectro.

Al tratarse de un espectro de baja resolución tenemos un riesgo implícito de degeneración en el ajuste gaussiano aplicado. Hemos aplicado varios criterios astrofísicos tanto a las intensidades y como a las anchuras FWHM de las líneas de emisión componentes.

Cálculos Astrofísicos

A partir del análisis detallado gaussiano multicomponente y del ancho completo a la mitad del máximo (FWHM) obtenido con el software BASS, pudimos separar las contribuciones cinemáticas y así obtuvimos los parámetros físicos del entorno AGN.

Parámetros del Agujero Negro M81*

A partir del ancho FWHM de la componente NLR, se calculó la dispersión de velocidades. Con la ecuación de Gallagher-Sparke se derivó la masa del agujero negro central. Considerando una velocidad de rotación cuasi máxima (a* 0,99) se estimaron los demás parámetros de horizontes del agujero rotante Kerr.

- Masa Agujero Negro: 80 millones de masas solares
- Radio Horizonte de Sucesos: 0,90 AU
- Radio Ergoesfera: 1,58 AU

El valor obtenido con medios amateur para la masa del agujero negro está en el borde superior del intervalo estimado de 55 – 70 millones de masas solares obtenido a partir de medidas de alta resolución con el Telescopio Espacial Hubble.

Parámetros del Toroide de Polvo y Gas Ionizado

A partir del análisis detallado de las componentes de la línea de emisión integrada y de los anchos específicos FWHM de las componentes Hidrógeno BLR y NLR, se calculó la dispersión de velocidades. Utilizando el Teorema Virial se estimaron los radios de las regiones próximas y remotas del Toroide. Consideramos un factor geométrico-inclinación (f) de 4,3.

Parámetro Físico	Valor Estimado	Descripción
Masa del Agujero Negro	80 millones de masas solares	Masa equivalente en masas solares.
Radio del Horizonte de Sucesos	0,90 UA	Límite de no retorno.
Radio de la Ergosfera	1,58 UA	Región de arrastre del espacio-tiempo (Kerr).
Radio Interno del Toroide	0,43 años luz	Comienzo de la zona de polvo y gas molecular.

Parámetro Físico	Valor Estimado	Descripción
Radio Externo del Toroide	9,44 años luz	Extensión máxima de la estructura envolvente.

Tabla resultados agujero negro rotante Kerr y toroide

Conclusiones

El núcleo activo de M81 responde de forma excelente al modelo unificado de AGN de baja energía. El estudio espectroscópico corrobora la naturaleza activa de baja ionización (LINER).

El Núcleo Galáctico Activo (AGN) está compuesto por M81*, un agujero negro supermasivo central (80 millones de masas solares) en rotación rápida, un disco de acreción y un extenso (0,4-9,4 al) Toroide de Gas y Polvo estructurado en una región interna de alta velocidad (BLR) y una externa difusa de líneas estrechas (NLR).

En este estudio amateur hemos podido estimar parámetros cinemáticos y relativistas del Núcleo Galáctico Activo (AGN) con equipamiento amateur (red de difracción SA100 con rendija de 35 micras).