

Comparación de modelos físicos de emisión multi-onda de núcleos activos de galaxias a partir de su distribución espectral de energía

Propuesta de trabajo de grado para optar al título de Física

Laura Natalia Martínez Ramírez^{1,2}

Director: Juan Carlos Basto Pineda ^{1,2}

Co-Director: Luis Alberto Núñez ^{1,2}, Gabriela Calistro Rivera ³

¹Grupo de Investigación en Relatividad y Gravitación GIRG

²Grupo Halley de Astronomía y Ciencias Aeroespaciales

³ European Organization for Astronomical Research in the Southern Hemisphere, ESO

Universidad Industrial de Santander
Facultad de Ciencias
Escuela de Física
Bucaramanga
2020

Índice

1. Resumen	2
2. Introducción	3
3. Marco teórico	5
3.1. Núcleos activos de galaxias	5
3.1.1. Disco de acreción	6
3.1.2. Toro	7
3.1.3. Galaxia anfitriona	8
3.2. Distribución espectral de energía de AGN	10
3.3. Algoritmo bayesiano AGNfitter	11
3.3.1. Modelos físicos para las 4 componentes de emisión	13
3.3.2. Salidas: parámetros físicos y de amplitud	17
3.4. Método bayesiano de cadenas Markov de Monte Carlo	18
4. Planteamiento del problema	20
5. Objetivos	21
5.1. Objetivo general:	21
5.2. Objetivos Específicos	21
6. Metodología	22
7. Cronograma de Actividades	22

1. Resumen

Título: Comparación de modelos físicos de emisión multi-onda de núcleos activos de galaxias a partir de su distribución espectral de energía

Autor: Laura Natalia Martínez Ramírez

Las galaxias activas son galaxias que contienen un núcleo activo conformado esencialmente por un agujero negro supermasivo, alimentado por gas y polvo del disco de acreción. Estas galaxias se caracterizan por un espectro de emisión de radiación electromagnética que no puede ser descrito por la superposición de distribuciones de Planck de las estrellas que la conforman y el espectro de emisión de gas, como en las galaxias carentes de núcleo activo. El estudio del espectro de radiación de las galaxias, a través de la distribución espectral de energía, es una herramienta importante que ha permitido estudiar sus propiedades y entender los procesos de formación, evolución y, en el caso de galaxias activas, la relación de estos procesos con las características del agujero negro del núcleo activo.

Actualmente, se analiza la distribución espectral de energía de núcleos activos a partir del ajuste de datos fotométricos a modelos físicos teóricos y semi-empíricos de las diferentes componentes de emisión. En este trabajo se propone realizar un ajuste a la distribución espectral de energía de galaxias activas en $z < 0,7$ con diferentes modelos de emisión para el disco de acreción, polvo frío y toro, y con base a las propiedades físicas inferidas, determinar la mejor combinación de modelos y su correlación con las propiedades.

Palabras clave: Distribución espectral de energía, núcleos activos de galaxias, galaxias

2. Introducción

Los núcleos activos de galaxias (AGN por su sigla en inglés) son los objetos astrofísicos responsables de los procesos de emisión más energéticos del universo y tienen gran influencia en la evolución de las galaxias que habitan. El estudio de galaxias activas por medio de observaciones y simulaciones ha permitido evidenciar comportamientos como: 1) una correlación entre la luminosidad del bulbo de la galaxia y la masa del agujero negro súper masivo central [19] [18]; 2) que es posible establecer un suministro de energía potencial a las galaxias por parte de los agujeros negros, que supera la energía de enlace de la galaxia [14]; 3) los AGN de baja luminosidad se hallan más frecuentemente en galaxias elípticas, y los de alta luminosidad en galaxias espirales [16]. Estos hechos demuestran la fuerte conexión citada entre los procesos de evolución de la galaxia anfitriona y su AGN.

El estudio de estos procesos evolutivos conjuntos requiere un conocimiento lo más completo posible de las propiedades tanto del AGN como de su galaxia anfitriona, el cual se puede obtener del espectro de emisión total de la galaxia activa, es decir, de su distribución espectral de energía (SED por su sigla en inglés). Pues es conocido que los componentes de la galaxia activa como el disco de acreción alrededor del agujero negro súper masivo central, el toro de gas y polvo caliente que los rodea, las estrellas de la galaxia y el polvo frío de las regiones de formación estelar, experimentan procesos de emisión que imprimen características específicas en distintas regiones del espectro integrado. De esta forma, a partir de la distribución espectral de energía total observada, es posible identificar la contribución de cada una de las componentes físicas principales e inferir algunas de sus propiedades.

El análisis de las SED se realiza por medio del cálculo de los flujos esperados de acuerdo a una serie de modelos teóricos y empíricos de emisión, construídos con catálogos de observaciones de telescopios en diferentes regiones del espectro. A continuación, dichos flujos son combinados hasta lograr el mejor ajuste al espectro observado. En consecuencia, los cambios en los modelo teóricos y los catálogos observacionales usados afectan los modelos de emisión y, por ende, los resultados de los ajustes a las SED. Por esto es necesario entender cómo los modelos de emisión afectan los ajustes resultantes y comprender su repercusión sobre las propiedades físicas inferidas para la galaxia anfitriona y su AGN.

El objetivo de este trabajo de grado consiste en estudiar un conjunto de galaxias activas cercanas [4] a partir del ajuste de sus distribuciones espetrales de energía, variando los modelos físicos de emisión; y comparar las propiedades físicas inferidas de los ajustes. Para tal fin, se usará AGNfitter, un algoritmo bayesiano para ajustar las SED de ese tipo de objetos incluyendo el conocimiento más reciente que tenemos de ellos. Estudios multi-onda, como el planteado en este trabajo de grado, representan altos costos computacionales y en instrumentación, por lo que requieren de colaboraciones internacionales. El presente trabajo se desarrolla en el marco de una colaboración con el Observatorio Europeo Austral (ESO por su sigla en inglés) y es una contribución desde la Universidad Industrial de Santander, al estudio de núcleos activos de galaxias, y la co-evolución de galaxias y agujeros negros.

Esta propuesta está estructurada de la siguiente manera: en el marco teórico se abordan las componentes más relevantes en la emisión de las galaxias activas, se explica brevemente el

funcionamiento del código AGNfitter y, finalmente, se mencionan algunos conceptos sobre el enfoque bayesiano. Posteriormente, se presenta la problemática que demuestra la relevancia de este trabajo y la pregunta de investigación que se pretende responder: ¿existe una correlación entre las propiedades físicas de los AGN y los modelos físicos de emisión empleados para ajustar su distribución espectral de energía? A continuación se presentarán los objetivos de este trabajo de grado y finalmente, la metodología planteada para alcanzarlos.

3. Marco teórico

3.1. Núcleos activos de galaxias

Algunas galaxias, llamadas activas, poseen en su centro una pequeña región caracterizada por un espectro de emisión muy energético en un rango de frecuencias que abarcan desde el radio hasta los rayos X o incluso los rayos gamma. Estos son los llamados núcleos activos de galaxias. Estos núcleos activos fueron descubiertos por Carl Seyfert en 1943, quién notó que los núcleos de algunas galaxias (ahora llamadas galaxias Seyfert) tenían una alta densidad de brillo superficial y emitían líneas espectrales de alta excitación y grosor [25]. A este hecho siguió la posterior identificación de fuentes de radio extendidas con centros puntuales visibles en el óptico con la misma característica: un espectro fuerte y líneas de emisión anchas. Desde entonces se han encontrado diferentes clases de AGN como: galaxias Seyfert, radio galaxias, blazars, cuásares radio-intensos, cuásares radio-silenciosos, objetos BL-Lac, regiones de líneas de emisión nuclear de baja ionización y fuentes variables ópticamente violentas, cada uno caracterizado por espectros con particularidades específicas, pero todos con algo fundamental en común: un espectro fuerte y líneas de emisión anchas.

En las galaxias activas, la energía total del espectro de emisión de radiación electromagnética supera ampliamente, y no puede ser descrita por la superposición de distribuciones de Planck de las estrellas que la conforman, como en las galaxias “normales” (carentes de núcleos activos). En la actualidad sabemos que la fuente de la energía adicional es el material que alimenta el agujero negro súper masivo que existe en el centro de casi todas las galaxias. El material es acelerado a velocidades cercanas a la de la luz a medida que se precipita, alcanzando altas temperaturas debido a la fricción dinámica. Existe además un modelo unificado de AGN según el cual las diferentes clases corresponden a una misma estructura bajo los mismos procesos físicos, pero observada desde distintos ángulos como se muestra en la figura 1. De esta manera se explican los diferentes espectros y líneas de emisión observados entre los distintos tipos de AGN, pero conservando las características comunes.

Según dicho modelo, un AGN está compuesto por un agujero negro súper masivo central con una masa de entre $10^6 M_\odot$ y $10^{10} M_\odot$, alimentado por un disco de acreción muy caliente ($T \approx 10^5$ [K]) debido a procesos magnéticos y viscosos, regiones de gas fotoionizado a alta y baja velocidad, un toro de materia absorbente (obscura) y un chorro relativista [32]. Su gran energía proviene de los procesos de acreción de material, que dan lugar a la transformación de la energía potencial gravitacional en radiación electromagnética. Los núcleos activos son las fuentes de energía más eficientes del universo [6].

A continuación se describen las principales componentes que moldean los espectros integrados¹ de galaxias con AGN.

¹Corresponde a la suma de todos los espectros de los componentes que presentan emisión en la galaxia activa, es decir, es el espectro medido por los telescopios

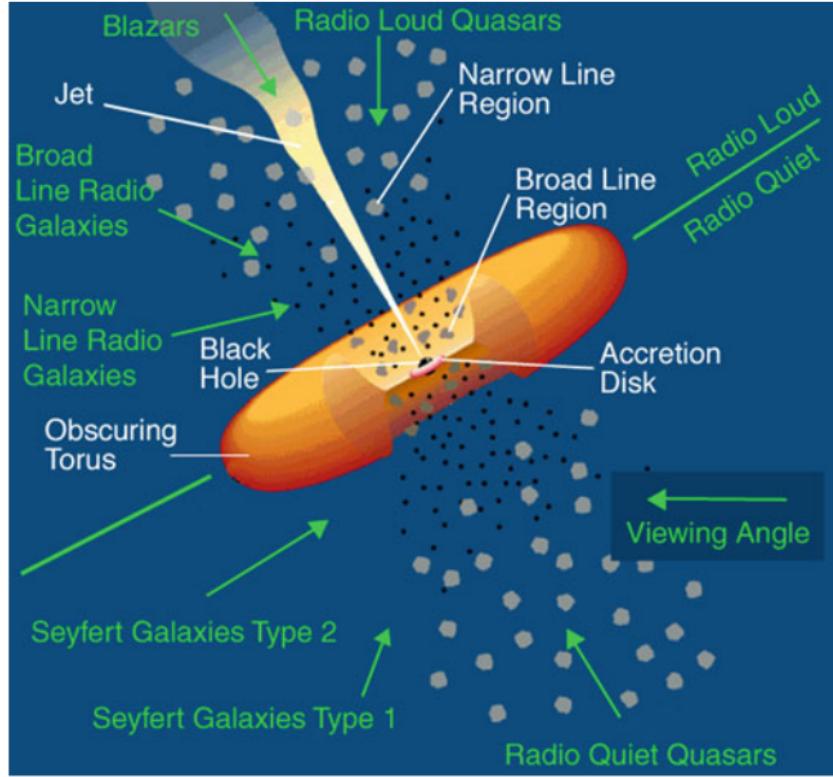


Figura 1: Representación de las estructuras que componen los AGN en el marco del modelo unificado (nombres en blanco). Las flechas verdes corresponden a las líneas de vista, que dan lugar a las diferentes clases de AGN. Tomado de [25]

3.1.1. Disco de acreción

Es la región que rodea el agujero negro super masivo central, compuesta por gas cayendo en él y caracterizada por una fuerte emisión en el continuo en el rango del óptico y el ultravioleta. Este gas se encuentra en rotación alrededor del agujero negro y debido a la conservación del momento angular continua haciéndolo, a mayor velocidad, a medida que cae, transformando su energía potencial en energía interna y cinética rotacional. La pérdida de energía potencial viene dada por [25]:

$$\Delta E = \frac{GM_{\bullet}m}{r} - \frac{GM_{\bullet}m}{r + \Delta r} \approx \frac{GM_{\bullet}m}{r} \frac{\Delta r}{r} , \quad (1)$$

donde G es la constante gravitacional, M_{\bullet} la masa del agujero negro súper masivo y r el radio. Ahora bien, como la rotación del gas es kepleriana, se encuentran diferencias en la velocidad de acuerdo al radio y, por tanto, fuerzas de fricción que calientan el gas. Atendiendo al teorema de Virial, de la energía potencial perdida se transforma: la mitad en energía cinética y la mitad en energía interna, es decir, en un aumento de temperatura. Asumiendo un modelo de disco de acreción ópticamente delgado ², se tiene que el gas caliente emite radiación térmica

²En un material ópticamente delgado hay una baja probabilidad de que un fotón que viaje a través de él

de cuerpo negro. De esta manera, la luminosidad L emitida corresponde a:

$$\Delta L = \frac{GM_{\bullet}\dot{m}}{2r^2} \Delta r = 2 \times 2\pi r \Delta r \sigma_{\text{SB}} T^4(r) , \quad (2)$$

siendo \dot{m} es la tasa de acreción, σ_{SB} la constante de Stefan-Boltzmann y T la temperatura en [K]. En consecuencia, el espectro del disco de acreción se compone de una superposición de cuerpos negros con diferentes temperaturas, que corresponden a los diferentes anillos compuestos de gas rotando, en cada radio, a la misma velocidad. A partir de (2) se tiene :

$$T(r) = \left(\frac{GM_{\bullet}\dot{m}}{8\pi\sigma_{\text{SB}}r^3} \right)^{1/4} . \quad (3)$$

De esta forma se obtiene un espectro de emisión extendido hasta el UV o rayos X suaves y con un máximo en el ultravioleta.

3.1.2. Toro

Es una distribución de gas y polvo con geometría toroidal ubicada alrededor del disco de acreción. Esta estructura absorbe radiación electromagnética en el rango del óptico y el UV proveniente del disco, se calienta y reemite en el infrarrojo. Este proceso es consecuencia de su alta profundidad óptica, es decir, su alta opacidad a la radiación electromagnética. Esto significa que debido a la capacidad de absorción del material que compone al toro, hay una alta probabilidad de que un fotón que viaje a través de este sea dispersado o absorbido. La profundidad óptica viene dada por [15]:

$$\tau_{\nu} = \int_0^z k_{\nu} \rho dz = \int_0^z \alpha_{\nu} dz = \sigma N \quad (4)$$

siendo k_{ν} [cm^2/g] el coeficiente de absorción por unidad de masa, ρ [g/cm^3] la densidad de masa, α_{ν} [$1/\text{cm}$] el coeficiente de absorción, σ [cm^2] es la sección transversal y N [$1/\text{cm}^2$] la densidad de columna. Como se observa en la ecuación (4), hay una dependencia entre la profundidad óptica y la frecuencia de la radiación electromagnética, por lo que el toro puede ser ópticamente grueso para ciertos rangos de frecuencia y ópticamente delgado para otros.

La existencia del toro en el modelo unificado de AGN es clave para explicar las diferencias en los espectros de los distintos tipos como resultado del ángulo de visión respecto al plano del toro [1]. De esta manera, la apariencia del AGN cambia si es visto transversalmente respecto al plano del toro, ángulo en que la región central es visible (AGN tipo 1), o si es visto desde el plano, donde la absorción de radiación por parte del material del toro es máxima, ocultando sea absorbido o dispersado.

su núcleo (AGN tipo 2) (ver figura 2) [33]. Esto afecta en mayor medida a la emisión de líneas anchas, ya que provienen del gas ubicado muy cerca al disco de acreción, y puede ser parcialmente o completamente absorbida por el toro [25].

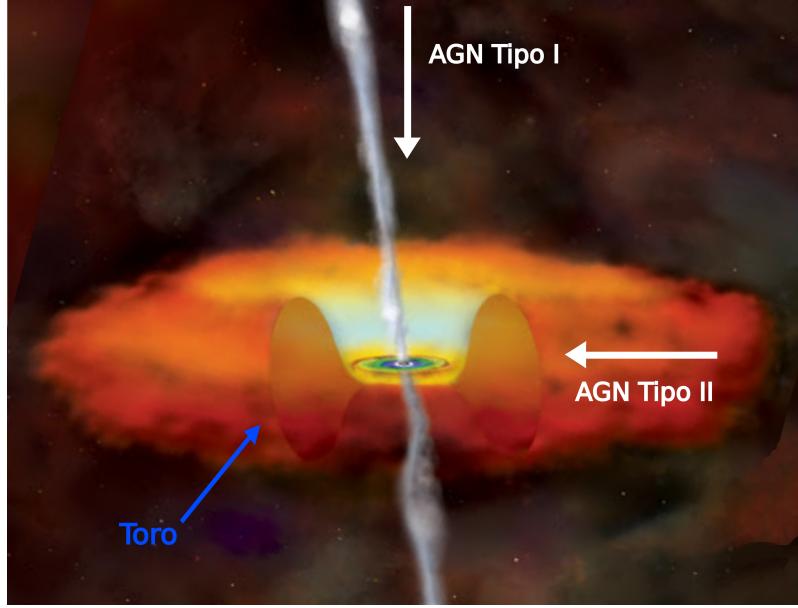


Figura 2: Clasificación de los AGN de acuerdo a su ángulo de visión respecto al plano del toro: un ángulo pequeño corresponde a AGN tipo II y ángulos cercanos a 90 a AGN tipo I. Editado de http://research.iac.es/proyecto/consolider-ingenuo-gtc/index.php?option=com_content&view=article&id=465:los-nucleos-de-galaxias-activas-y-el-toro-que-los-oscurece&catid=49:reportajes&Itemid=72

No obstante, existen modelos que plantean un refinamiento al modelo unificado consistente en un toro conformado por nubes ópticamente delgadas. Esto cambia el panorama mencionado respecto a los diferentes ángulos de observación, pues existe la posibilidad que aún ubicados en el plano del disco no haya absorción por parte del toro, o que ubicados en el eje del toro se observe oscurecimiento total o parcial [25].

3.1.3. Galaxia anfitriona

Es la galaxia que hospeda al núcleo activo en su centro y cuyas propiedades presentan una fuerte correlación con las del agujero negro super masivo de su núcleo activo [18][19][14]. La emisión del gas, polvo y estrellas de la galaxia se superponen al espectro de los AGN, con emisión térmica en el rango de frecuencias desde el UV hasta el infrarrojo cercano. Por ende, su espectro total puede ser aproximado como la suma de los diferentes espectros de Planck (5) de cada una de las estrellas que lo componen, donde cada espectro depende de la masa y la edad de cada una de las estrellas [25], reprocesado por el polvo interestelar, que absorbe energía del UV y la reemite como cuerpo negro frío principalmente en el infrarrojo.

La forma del espectro de cada fuente estelar y del polvo, es dada por la función de Planck según la temperatura del emisor:

$$I_\nu(T) = \frac{2h\nu^3}{c^3} \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1} , \quad (5)$$

donde ν [Hz] corresponde a la frecuencia, h [Js] la constante de Planck, c [m/s] la velocidad de la luz en el vacío, K [J/K] la constante de Boltzmann y T [K] la temperatura. Es interesante notar que debido a la gran luminosidad del espectro óptico continuo del núcleo activo en AGN tipo 1, fue difícil cuantificar la contribución del brillo proviente de la población estelar de la galaxia anfitriona durante mucho tiempo [16]. No fue hasta la llegada de equipos más sofisticados, como el telescopio espacial Hubble, que pudo distinguirse la galaxia anfitriona en este tipo de sistemas, lo que permitió adelantar estudios para correlacionar las propiedades de la galaxia anfitriona y el agujero negro súper masivo.

Actualmente, se sabe que las diferentes clases de AGN están relacionadas con el tipo de galaxia que habitan. Esta relación puede tener uno de sus motivos, por ejemplo en la cantidad gas disponible tanto para el disco de acreción, como para la formación estelar. Así, AGN con bajo corrimiento al rojo y baja luminosidad son hospedados por galaxias masivas y dominadas por el bulbo como las normales de tipo temprano. Además, AGN con alto corrimiento al rojo y alta luminosidad son hospedados por galaxias con poblaciones estelares más jóvenes como las espirales [16].

Entender las propiedades de las regiones de formación estelar en la galaxia anfitriona es importante, además, porque estas contribuyen al espectro de emisión integrado de la galaxia activa. Por tal razón, merecen ser estudiadas con un poco más de detalle a continuación.

Polvo frío de regiones de población estelar

Las regiones de formación estelar son lugares con grandes concentraciones de gas que colapsan gravitacionalmente dando lugar a nuevas estrellas. Están compuestas en su mayoría por hidrógeno molecular, helio, trazas de elementos más pesados provenientes de muertes estelares anteriores y polvo, con temperaturas entre 10 K y 30 K, y alta densidad (10^4 cm^{-3} donde la densidad del medio interestelar es 10^2 cm^{-3} [11]). Una vez se forman las primeras estrellas y comienzan a emitir radiación electromagnética, comienza el proceso de ionización del medio circundante dando lugar a regiones ionizadas H_{II} .

Dentro de estas regiones se dan dos mecanismos principales de emisión: por un lado, la recombinación de átomos ionizados; y por otro lado, la desexcitación de átomos excitados por la colisión con otros átomos, con energía cinética dada por la interacción con los fotones provenientes de la nueva estrella. Ambos procesos dan lugar a líneas de emisión brillantes, como las que se observan en los AGN. No obstante, debido al rango de energía de los fotones producidos por las estrellas, la fuente de líneas de emisión, gas ionizado en torno a estrellas jóvenes o el AGN, puede ser diferenciada por medio de la relación entre las líneas excitadas por colisiones y las producidas por recombinación [25]. Estas relaciones se grafican en un diagrama llamado BPT [2] como se observa en la figura 3, el cual permite separar 3 fuentes de líneas de emisión: regiones de formación estelar (azul), AGN (rojas) y objetos compuestos (gris).

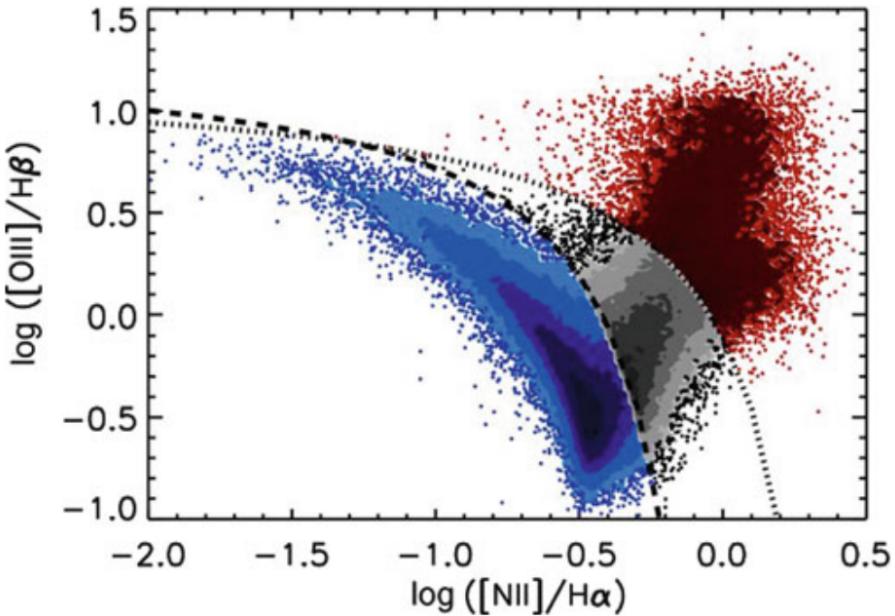


Figura 3: Diagrama BPT para identificar las fuentes de líneas de emisión en galaxias [25]. Los puntos azules corresponden a regiones de formación estelar, los rojos a núcleos activos de galaxias y los grises a galaxias activas con formación estelar. Este diagrama evidencia la necesidad de considerar la emisión del polvo frío y las consecuencias de una errónea interpretación de las líneas de emisión en el espectro.

3.2. Distribuciónpectral de energía de AGN

El análisis de la radiación electromagnética por medio la gráfica de la energía en función de la frecuencia, llamada Distribución Espectral de Energía (SED), permite estudiar propiedades de diferentes fuentes de radiación astronómicas. Esta herramienta ha permitido identificar las componentes de estas fuentes y comprender sus procesos de formación y evolución. Actualmente se analiza por medio del ajuste de datos fotométricos a modelos teóricos o semi-empíricos que reproducen los diferentes procesos de emisión de la fuente de radiación.

En el caso de galaxias con AGN, la SED se caracteriza por un espectro de energía en el rango de frecuencias desde radio hasta rayos-X que en algunas regiones está bien descrito por medio de leyes de potencia [4]. Sin embargo, existen rasgos característicos continuos que no pueden ser modelados por leyes de potencias como: una protuberancia en el infrarrojo debida al toro de gas y polvo; y una gran protuberancia azul (BBB) en el rango entre el óptico y el ultravioleta, debida al disco de acreción [6]. En la figura 4 se observa una SED típica de núcleos activos de galaxias extendida en el espectro desde el infrarrojo hasta los rayos gamma, con las protuberancias en el ultravioleta e infrarrojo.

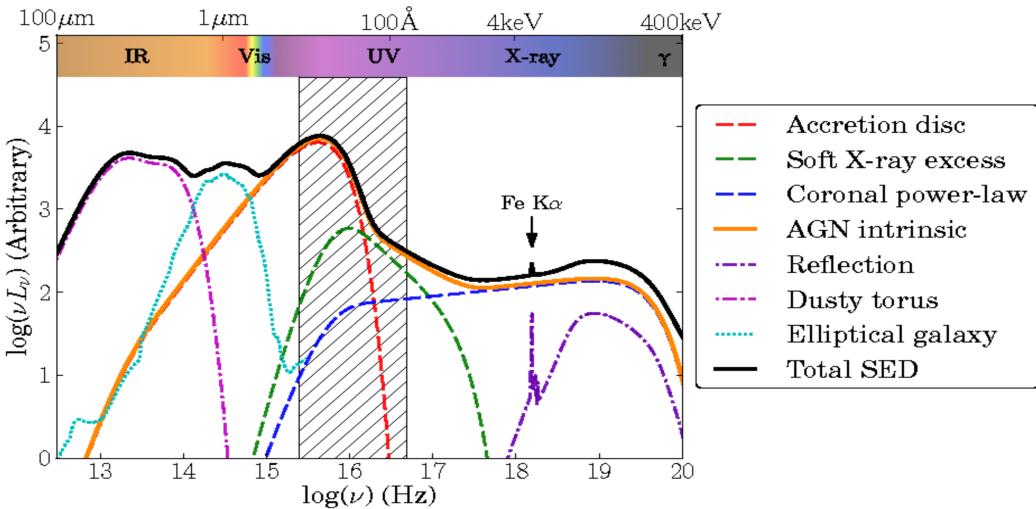


Figura 4: Distribución espectral de energía típica de núcleos activos de galaxias. Las líneas de colores representan la emisión de las diferentes componentes y la debida a fenómenos como el reprocesamiento y reflexión de fotones. La región sombreada corresponde al rango del espectro oscurecido por la absorción del medio interestelar. El papel de las protuberancias en el infrarrojo, ultravioleta y rayos gamma es vital para identificar las componentes del toro, disco de acreción y las reflexiones entre la corona y el disco de acreción al espectro integrado; de forma que la contribución de las demás componentes es la necesaria para completar la curva del espectro observado. Tomado de [9].

3.3. Algoritmo bayesiano AGNfitter

AGNfitter³[6] es un algoritmo para ajustar distribuciones espectrales de energía de galaxias con AGN utilizando estadística bayesiana y cadenas Markov de Monte Carlo (MCMC), implementado en python. Está diseñado para espectros en rangos de frecuencias desde el submillimétrico hasta el UV, y modela la SED como la superposición de la emisión de 4 componentes: disco de acreción, toro, población estelar y polvo frío de regiones de formación estelar [6]. Una de las mayores ventajas de AGNfitter es su enfoque bayesiano, por lo que se calculan las funciones de densidad de probabilidad *a posteriori* para cada uno de los parámetros libres a ajustar (ver figura 5). Esto permite tener un diagnóstico realista sobre nuestro conocimiento de las distintas componentes del sistema y tratar las degenerancias de los parámetros.

Los datos en las distribuciones espectrales de los AGN corresponden a flujos fotométricos reales medidos con telescopios en las diferentes zonas del espectro electromagnético. Por tanto durante el ajuste, es necesario calcular los flujos teóricos de cada una de las componentes de emisión tal y como serían registrados por los telescopios, para así obtener la SED sintética o teórica. Para tal fin, deben tenerse en cuenta los modelos físicos de emisión (F_λ) y las características del telescopio y filtros utilizados a través de la siguiente ecuación:

³Más información en: <https://github.com/GabrielaCR/AGNfitter>

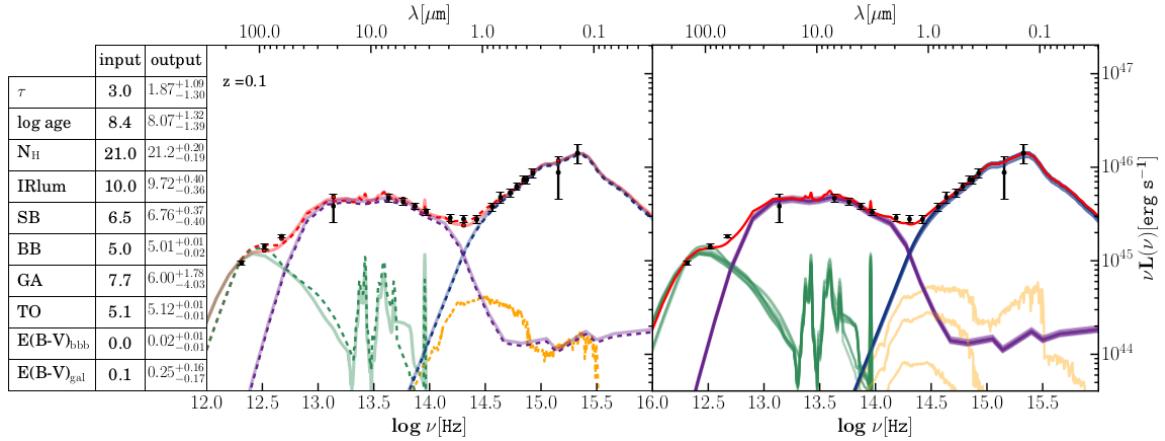


Figura 5: Ejemplo del ajuste de la distribución espectral de energía para una galaxia con AGN obtenida con AGNfitter. *Izquierda:* ajuste para valores de parámetros con probabilidad máxima. *Derecha:* diferentes ajustes para valores de parámetros dentro de un rango alrededor del máximo de la función de densidad de probabilidad. La curva morada corresponde a la emisión del toro, la azul a la del disco de acreción, la verde a la del polvo frío y la naranja a de la población estelar. Tomado de [6].

$$F_S = \frac{\int \lambda F_\lambda S(\lambda) d\lambda}{\int \lambda S(\lambda) d\lambda} , \quad (6)$$

donde $S(\lambda)$ corresponde a la respuesta del detector. Como ejemplo se muestran las curvas de respuesta o función de transferencia de algunos de los filtros y telescopios de interés para este estudio en la figura 6:

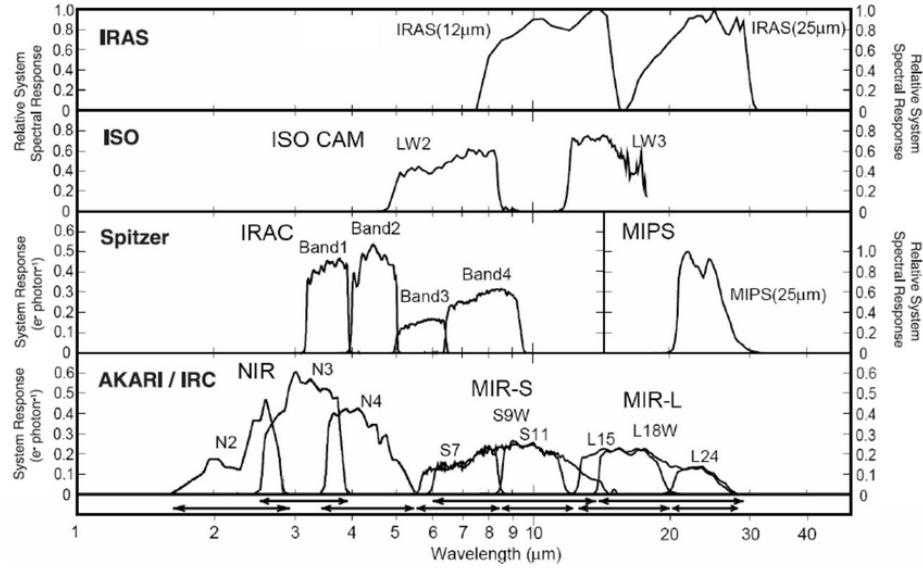


Figura 6: Funciones de transferencia para algunos telescopios conocidos y sus respectivos filtros en el rango del infrarrojo. Representan la respuesta de los telescopios en las diferentes frecuencias, lo cual permite interpretar el flujo medido en términos del flujo que realmente llega al telescopio y de esta manera, desligar su dependencia de los equipos usados. Tomado de [21]

3.3.1. Modelos físicos para las 4 componentes de emisión

A continuación se describirán los modelos de emisión del disco de acreción, toro, población estelar y polvo frío base para reconstruir las distribuciones espectrales de energía. Se explicará brevemente la construcción de cada uno de los modelos basados en catálogos de observaciones y modelos teóricos, y los parámetros libres empleados para ajustarlos a las SED con AGNfitter.

Disco de acreción El modelo para esta componente reproduce la radiación térmica emitida por la materia del disco de acreción cayendo en el agujero negro súper masivo [24], causante del BBB. Para describir esta componente se parte del modelo empírico de Richards et al. [23] construido a partir de datos de SED de 259 QSOs tipo 1 del Sloan Digital Sky Survey⁴, despreciando el régimen de infrarrojo cercano, que será modelado por el toro. Adicionalmente, la región del espectro con longitudes de onda mayores al BBB ($1\mu m - 5\mu m$) es modelada como la cola de la emisión de un cuerpo negro [6]:

$$F_\nu \propto \nu^{-2}. \quad (7)$$

Es posible modelar la emisión del disco de acreción a partir de este tipo de Cuásares, porque corresponden a AGN tipo 1 en los cuales la región central es visible y cuentan con una luminosidad tan alta, que opacan las emisiones de las demás componentes. A continuación se hace una corrección por la extinción debida al polvo; para esto se usa la ley de enrojecimiento de Prevot et al.[22] calibrada en la nube de magallanes $k(\lambda)$ y se parte de la ecuación para el flujo extinguido:

$$f_{red}(\lambda) = f_{em}(\lambda) \times 10^{-0,4A_\lambda}, \quad (8)$$

donde f_{em} corresponde al flujo emitido, f_{red} el flujo luego del apantallamiento y A_λ la extinción total dada por:

$$A_\lambda = k(\lambda)E(B-V)_{bbb}, \quad (9)$$

siendo $E(B-V)_{bbb}$ un parámetro de enrojecimiento que toma valores entre 0 y 1 (figura 7); y $k(\lambda)$, la ley de enrojecimiento de Prevot.

De esta forma, los parámetros libres en AGNfitter para modelar la emisión del disco de acreción son: el parámetro de enrojecimiento $E(B-V)_{bbb}$ con valores entre 0 y 1, y el parámetro de normalización BB con valores entre 0 y 20, que hace referencia a la contribución relativa de esta emisión al espectro integrado.

⁴Fue un catálogo digital óptico construido entre 2000 y 2008 en el Observatorio Apache Point de Nuevo México con un telescopio de 2.5 metros y un sistema fotométricos de filtros. Es el primer catálogo óptico que cubre una parte sustancial del cielo [25].

Toro: La emisión del polvo caliente del toro es reproducida a partir de un modelo empírico de Silva et al. [29] construido con datos de galaxias Seyfert en los rangos de infrarrojo cercano y medio, interpolados por medio de un código de transferencia radiativa llamado GRASIL [28]. Este código simula los efectos del polvo compuesto por granos de silicio y grafito sobre el campo de radiación en el rango del óptico y el UV, es decir, la dispersión, absorción y reemisión de dichos fotones.

Este modelo está dividido en 4 submodelos de acuerdo a la densidad de columna de hidrógeno: $N_H < 10^{22}$ [$1/cm^2$], $10^{22} < N_H < 10^{23}$ [$1/cm^2$], $10^{23} < N_H < 10^{24}$ [$1/cm^2$] y $N_H > 10^{24}$ [$1/cm^2$], lo cual determina el nivel de absorción (ver figura 7). Estos 4 modelos, representan diferentes ángulos de visión del AGN [6]; una mayor densidad de columna implica un ángulo pequeño respecto al plano del toro, y por lo tanto mayor oscurecimiento, y una menor densidad de columna estaría asociada con un ángulo mayor respecto al plano del toro, y por tanto con una mayor visibilidad de la región nuclear. Finalmente, por medio de interpolación entre estos modelos, se tiene una variación de la densidad de columna con $\log(N_H)$ en un rango [21, 25] y variaciones de 0.005.

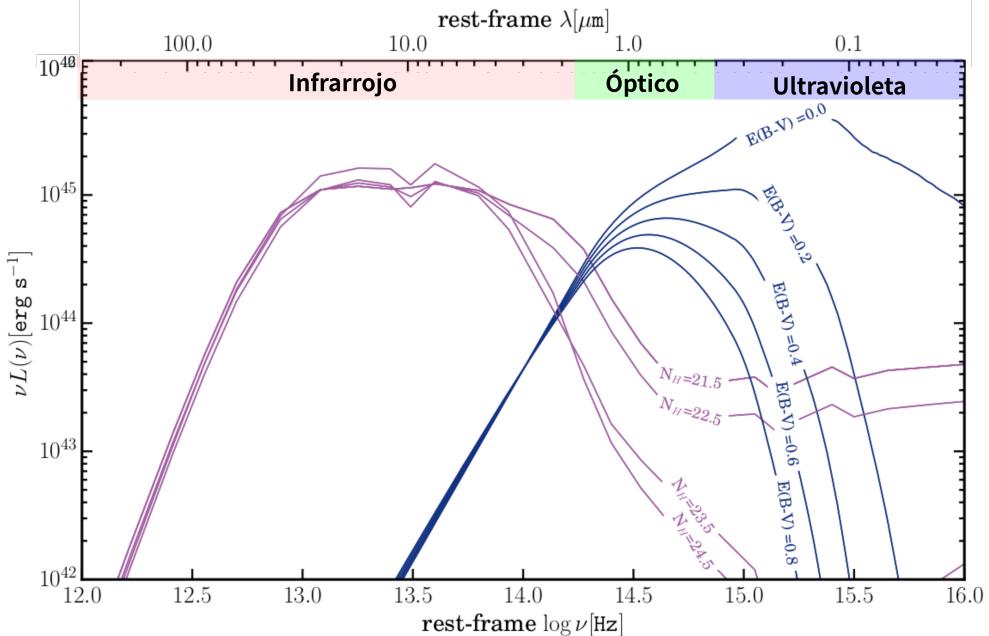


Figura 7: Modelos de emisión usados en AGNfitter para las componentes de disco de acreción y toro. Curva azul: corresponde al modelo para el disco de acreción para diferentes valores del parámetro de enrojecimiento. Curva morada: modelos de emisión del polvo caliente para los 4 rangos de densidad de columna de hidrógeno. Las diferentes curvas evidencian el efecto del cambio de los parámetros al espectro emitido por cada una: en el caso del toro una mayor densidad de columna atenúa la emisión en el óptico y el UV; mientras que para el disco de acreción, un mayor enrojecimiento disminuye la componente en el UV y aumenta ligeramente la del infrarrojo. Tomado de [6].

Los parámetros libres en AGNfitter para modelar la emisión del toro son: la densidad de columna del toro $\log(N_H)$ con valores entre 21 y 25, y un parámetro de normalización TO con valores entre 0 y 20, que se refiere a la contribución relativa del modelo.

Población estelar: Para modelar la emisión de la población estelar de la galaxia anfitriona para diferentes edades y tasas de formación, se usó el modelo de síntesis de población estelar, la aproximación estandar y 90 modelos de emisión estelar de Bruzual & Charlot [5] (figura 8). A continuación se describen brevemente cada uno de ellos:

La síntesis de población estelar busca describir el espectro de las galaxias como la superposición de los espectros de las estrellas, teniendo en cuenta la cantidad de estas con determinada masa, su composición química, su estado de evolución y el cambio de estas propiedades en el tiempo [25]. Para tal fin son necesarias: una función de masa inicial (IMF) $\phi(m)$ que describe la distribución de estrellas con determinada masa en el momento de su nacimiento; una tasa de formación estelar que viene dada por la cantidad de gas convertido en estrellas en el tiempo:

$$\psi(t) = -\frac{dM_{gas}}{dt}, \quad (10)$$

y la energía emitida por longitud de onda y unidad de tiempo para una metalicidad dada $S_{\lambda,Z}(t)$. Donde esta función tiene en cuenta la IMF y el diagrama Hertzsprung–Russell para estimar la emisión. Con base en estos elementos se construye la luminosidad total espectral de la galaxia como:

$$F_{\lambda}(t) = \int_0^t dt' \psi(t-t') S_{\lambda,Z(t-t')}(t'). \quad (11)$$

Ahora bien, debido a que las condiciones del medio interestelar cambian con la formación de estrellas, la tasa de formación estelar también cambia en el tiempo. La aproximación estandar establece que este cambio viene dado por un decrecimiento exponencial de la forma:

$$\psi(t) = \tau^{-} e^{-edad/\tau}. \quad (12)$$

Para modelar la emisión de la población estelar se usaron: una $\phi(m)$ de Chabrier (2003), se supuso una metalicidad Z constante durante el proceso de evolución y un decrecimiento exponencial de la tasa de formación estelar, de acuerdo a la aproximación estandar [20]. Se empleó un rango de tiempos característicos (τ) para el decaimiento de la SFH de 0.1×10^9 – 11×10^9 años y además, un modelo con una tasa de formación estelar constante.

Por otro lado, se incluyeron efectos de extinción de acuerdo con la ley de enrojecimiento en la vía lactea de Calzetti et al. [7] $k_{MW}(\lambda)$, con valores del parámetro de enrojecimiento $E(B-V)_{gal}$ entre 0 y 0.5 con en pasos de 0.05. De esta manera, el flujo extinguido es:

$$f_i(\lambda) = f_o(\lambda) \times 10^{0.4E_s(B-V)k_{MW}(\lambda)}, \quad (13)$$

siendo f_o el flujo observado, f_i el flujo intrínseco, $k_{MW}(\lambda)$ la curva de enrojecimiento de

Calzetti et al. y $E_s(B - V)$ el exceso de color estelar dado a partir del exceso de color de las líneas de emisión de gas nebuloso de la galaxia $E(B - V)_{gal}$:

$$E_s(B - V) = (0,44 \pm 0,03)E(B - V)_{gal}. \quad (14)$$

Los parámetros libres en AGNfitter para modelar la emisión de la población estelar son: la escala de tiempo de la SFH con valores entre 0.1 y 3.0×10^9 años, la edad de la galaxia, el parámetro de normalización GA con valores entre 0 y 20, que se refiere a la contribución relativa del modelo y el parámetro de enrojecimiento $E(B - V)_{gal}$ con valores entre 0 y 0.5.

Polvo frío de regiones de formación estelar: El modelo de emisión de polvo frío corresponde a la unión de modelos semi-empíricos construidos por Chary & Elbaz [8] y por Dale et al. [10] (figura 8). Los modelos de Chary & Elbaz fueron construidos a partir de 105 SED de 4 galaxias típicas con brotes de formación estelar ⁵: Arp220, NGC6090, M82 y M51; y derivados a partir de los modelos de [28] con observaciones de ISOCAM ⁶ en el infrarrojo medio.

Los modelos de [10] representan la emisión de polvo frío compuesto por: granos de polvo grandes en equilibrio térmico, granos pequeños calentados de manera estocástica e hidrocarburos aromáticos policíclicos calentados estocásticamente. Este conjunto de modelos fue construido a partir de los catálogos: IRAS⁷/ISO⁸ con datos de 69 galaxias en un rango de ($3 - 100\mu m$), SCUBA⁹ con datos de 114 galaxias del *Bright Galaxy Sample* (BGS, Soifer et al. [30]), ISOLWS¹⁰ con datos de 228 galaxias en un rango de ($52 - 170\mu m$) y ISOPHOT Serendipity¹¹ (Stickel et al [31]) con datos de 115 galaxias en $170\mu m$ [6]. De esta manera, se tiene en total 169 modelos que fueron interpolados por medio de la interpolación de vecinos cercanos.

Finalmente, el parámetro libre en AGNfitter para modelar el polvo frío es el parámetro de normalización BB con valores entre 0 y 20, que da cuenta de la contribución relativa del polvo frío al espectro integrado.

⁵Traducción del término Starburst

⁶Es una cámara en el infrarrojo medio, ubicada sobre el satélite ISO

⁷InfraRed Astronomical Satellite: fue una misión lanzada en 1983 con un telescopio de 60 cm con el fin de realizar un mapeo completo del cielo en el rango del infrarrojo.

⁸Infrared Space Observatory: Fue un satélite lanzado en 1995 para observar objetos y regiones específicas del cielo con longitud de onda entre 2.5-240 μm [25].

⁹Sub-millimeter Common-User Bolometer Array: Es una cámara bolométrica en el telescopio James Clerk Maxwell que permite mediciones en los regímenes del sub-milimétrico (3-0.3 mm). Más información en: <https://academic.oup.com/mnras/article/303/4/659/1062948>

¹⁰Fue un catálogo de observaciones espectrales realizadas a Sagitario B2 usando el satélite ISO en el espejometro de longitud de onda larga (LWS) en modo Fabry-Pérot

¹¹Es catálogo de datos del cielo que fueron tomados por una cámara ISOPHOT C200 de la misión ISO, cuando el satélite giraba para ir de un objetivo al otro, con el fin de mejorar la eficiencia de la misión

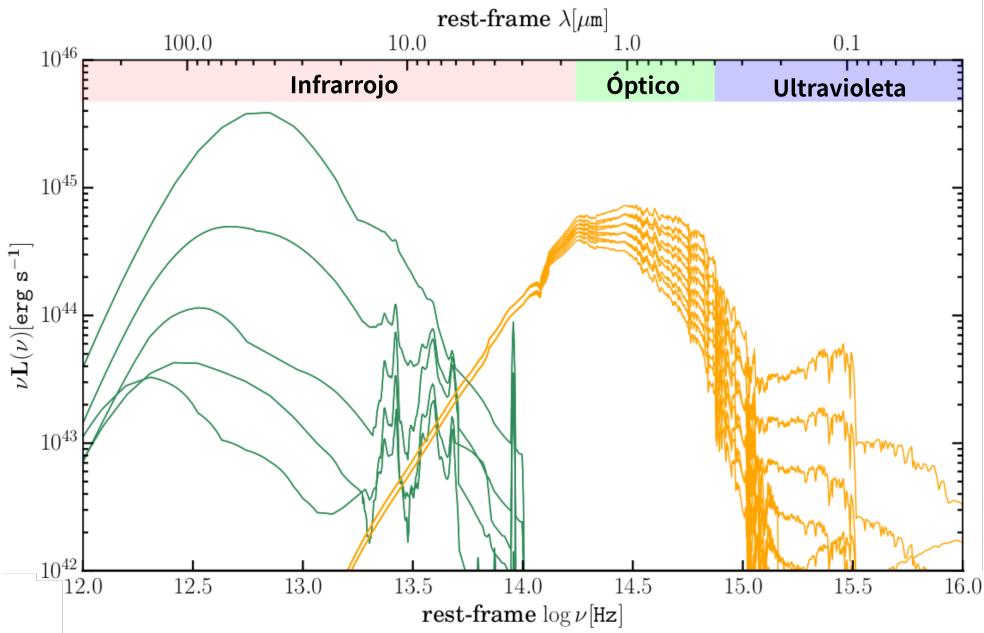


Figura 8: Modelos usados en AGNfitter para las componentes estelar y de polvo frío. Las curvas naranjas corresponden a una pequeña muestra de modelos teóricos de emisión de la componente estelar de [5] para diferentes SFH y edades. Las curvas verdes corresponden a una muestra de los modelos semiempíricos de emisión del polvo frío de las regiones de formación estelar de [8] y [10]. Se evidencia una alta luminosidad de la emisión en infrarrojo de estas regiones de formación de estrellas, debida a las altas temperaturas que alcanzan las nubes moleculares durante estos procesos; y la existencia de líneas de emisión entre $3\mu m$ y $11\mu m$. Tomado de [6].

3.3.2. Salidas: parámetros físicos y de amplitud

Componente	Parámetro	Tipo	Descripción	Rango
Emisión disco de acreción	BB	Amplitud	Normalización de BBB	[0, 20]
Emisión disco de acreción	$E(B - V)_{bbb}$	Físico	Enrojecimiento de BBB	[0, 1]
Emisión del toro	$\log N_H$ [$\log cm^{-2}$]	Físico	Densidad de columna del toro	[21, 25]
Emisión del toro	TO	Amplitud	Normalización del toro	[0, 20]
Emisión estelar	τ [$x10^9$ años]	Físico	Escala de tiempo de SFH exponencial	[0.1, 3.0]
Emisión estelar	$\log edad$ [log año]	Físico	Edad de la galaxia	[10^5 , edad(z)]
Emisión estelar	GA	Amplitud	Normalización de la galaxia	[0, 20]
Emisión estelar	$E(B - V)_{gal}$	Físico	Enrojecimiento de la galaxia	[0, 0.5]
Emisión del polvo frío	$\log IRLum$ [$\log L_\odot$]	Indexación	Indexación de los modelos de brote estelar	[7, 15]
Emisión del polvo frío	SB	Amplitud	Normalización de brote estelar	[0, 20]

Cuadro 1: Conjuntos de parámetros físicos y de amplitud encontrados en el ajuste de las SED.

Al realizar el ajuste de las SED, AGNfitter encuentra las funciones de densidad de probabilidad para 10 parámetros que contienen la información de las 4 componentes de emisión. Estos parámetros se clasifican como: físicos, los cuales tienen que ver con propiedades de las componentes y determinan la forma de la SED; y de amplitud, los cuales tienen que ver con la normalización de cada una de las componentes, y por tanto su contribución relativa a la distribución espectral de energía total [6]. Se presenta una tabla con los 10 parámetros y una breve descripción de cada uno de ellos (cuadro 1).

3.4. Método bayesiano de cadenas Markov de Monte Carlo

Estadística bayesiana: se fundamenta en la interpretación bayesiana de la probabilidad, según la cual se interpreta la probabilidad como la plausibilidad de una hipótesis [17]. En este enfoque, los parámetros son considerados variables aleatorias y con valores inciertos, por lo que deben ser tratados por medio de funciones de probabilidad. Dentro de éstas, existen funciones de probabilidad *a priori*, las cuales contienen conocimiento previo del sistema antes de tener en cuenta evidencia o mediciones.

Este formalismo es una herramienta ampliamente usada para corroborar hipótesis o estimar regiones de confianza de parámetros desconocidos. Se fundamenta en el teorema de Bayes para calcular las probabilidad luego de obtener datos del sistema:

$$P(A|B) = \frac{P(B|A)P(A)}{P(B)} \quad \text{con} \quad P(B) \neq 0, \quad (15)$$

donde $P(A|B)$ es la probabilidad *a posteriori*, $P(A)$ es la función de probabilidad *a priori*, $P(B|A)$ es la función de verosimilitud, es decir, la probabilidad de que B ocurra dado A; y $P(B)$ es la probabilidad de los datos o la evidencia.

Cadenas Markov de Monte Carlo: Una cadena Markov consiste en una secuencia de eventos estocásticos en la cual la probabilidad del evento X_{n+1} , (dados los eventos previos X_1, \dots, X_n) depende únicamente del evento inmediatamente anterior X_n . Así, la cadena Markov está determinada por: 1) la distribución inicial, es decir, la distribución marginal del primer evento (X_1) y 2) la forma de la distribución de X_{n+1} dado X_n , conocida como distribución de probabilidad de transición [3].

El método de cadenas Markov de Monte Carlo (MCMC) corresponde al método de integración Monte Carlo con el uso de las cadenas mencionadas anteriormente. Consiste en generar un caminata aleatoria en el espacio de los parámetros, de forma de consigue tomar una muestra representativa de la distribución luego de determinado tiempo [12]. Es usado con frecuencia para integrar numéricamente modelos de alta dimensionalidad y gran costo computacional.

Aplicación en AGNfitter

En primer lugar, de acuerdo con el teorema de Bayes se plantea la probabilidad *a posteriori*

del modelo $\vec{\rho}$ dado un conjunto de datos fotométricos de la SED observada:

$$P(\vec{\rho} | \text{datos}) = \frac{P(\text{datos} | \vec{\rho}) P(\vec{\rho})}{P(\text{datos})}. \quad (16)$$

Donde $\vec{\rho}$ es un vector 10-D que contiene los 10 parámetros físicos y de amplitud; y el término $P(\text{datos})$ es independiente de los parámetros a encontrar, por lo que puede ser tomado como una constante de proporcionalidad. Además, $P(\text{datos} | \vec{\rho})$ corresponde a la función de verosimilitud de los datos siendo observados, dado el modelo [6]:

$$\mathcal{L}(\text{datos}, \vec{\rho}) \equiv P(\text{datos} | \vec{\rho}) \quad (17)$$

A continuación, suponiendo datos con incertidumbre gaussiana se llega a una función de verosimilitud:

$$\mathcal{L}(\text{datos}, \vec{\rho}) \propto \prod_{i=0}^n \exp \left[-\frac{[\text{datos}_i - f(\vec{\rho} | \nu)]^2}{2\sigma_i^2} \right] \quad (18)$$

Donde $f(\vec{\rho})$ corresponde al modelo completo de emisión construido a partir de las 4 componentes: toro, disco de acreción, población estelar y polvo frío. Finalmente, se calcula la función de densidad de probabilidad de determinado parámetro, integrando los demás parámetros en los rangos dados por el cuadro 1:

$$P(\rho_i) = \int^{k \neq i} d\rho_1 \dots d\rho_k \quad P(\vec{\rho} | \text{datos}) \quad (19)$$

De esta manera el procedimiento consiste en: calcular la función de verosimilitud (18), que debido a 17 debe ser reemplazado en la ecuación de la probabilidad posterior (16), término que a su vez debe ser reemplazado en la densidad de la probabilidad (19) para finalmente, calcular las integrales para cada uno de los 10 parámetros estudiados. Por último, debido a la dimensión de la integral y el tipo de función, la ecuación 19 representa un cálculo complejo computacionalmente, por lo que se decide realizarse por medio de los algoritmos numéricos de cadenas Markov de Monte Carlo.

4. Planteamiento del problema

Los núcleos activos de galaxias ocupan una región muy pequeña en el núcleo de sus galaxias anfitrionas, lo cual dificulta observarlos de forma directa, y aislar la emisión del AGN y de la galaxia debido a la limitada resolución de los telescopios. Esta limitación puede acentuarse en virtud de la geometría del sistema, por ejemplo la orientación del toro respecto a nuestra línea de visión, pudiendo llegar a ocultar por completo el núcleo activo. Además, la alta luminosidad de la emisión del núcleo central puede superar por mucho a la emisión de la componente estelar de la galaxia anfitriona, dificultando la inferencia de sus propiedades [6].

A pesar de esto, cada componente del AGN y la galaxia anfitriona experimenta procesos físicos diferentes, por lo que emite radiación en distintas regiones del espectro, permitiendo realizar un análisis de cada componente a partir de un espectro integrado de energía. De esta manera, el ajuste de las distribuciones spectrales de energía (SED) se presenta como una herramienta invaluable para el conocimiento de este tipo de sistemas, permitiendo estimar la emisión de cada componente de la galaxia activa y su contribución al espectro integrado. Su principal ventaja es el uso de datos fotométricos en todo el espectro, lo cual permite disponer de suficientes fuentes de información para estudiar todos los procesos físicos de emisión.

Existen numerosas herramientas para ajustar SED de galaxias activas [4] [27] [26] [13], las cuales han representado un gran avance en el estudio de los AGN. Sin embargo, la mayoría usan modelos físicos de emisión fijos y han sido validadas principalmente con simulaciones. Hasta ahora, no existen estudios sistemáticos exhaustivos para evaluar la dependencia de los resultados con el conjunto de modelos de emisión asumidos. Además, la mayoría de los algoritmos se concentran en hallar la combinación de parámetros que producen el mejor ajuste, sin ahondar en el cálculo de sus incertidumbres. Es necesario reconocer e interpretar posibles degeneraciones entre los parámetros [6], y tener un panorama más realista sobre el significado de los resultados.

En este contexto surge AGNfitter [6] un algoritmo basado en estadística Bayesiana, que determina las distribuciones de probabilidad *a posteriori* de los parámetros de ajuste a las SED. La disponibilidad de datos de alta calidad y la implementación de los ajustes con AGNfitter, permitirían realizar el estudio de la dependencia de los resultados de los ajustes con los modelos de emisión. Para este estudio, es de vital importancia responder la pregunta de si: ¿existe una correlación entre las propiedades físicas de los AGN y los modelos físicos de emisión empleados para ajustar su distribución espectral de energía?

Ajustar diferentes modelos a un conjunto de SED de galaxias activas puede dar cuenta de la variabilidad de las propiedades físicas inferidas y su dependencia de los modelos, propiciando una mejor comprensión de los núcleos activos de galaxias. Por tal razón, en este trabajo de grado se propone investigar cómo los parámetros físicos inferidos a partir de un conjunto de datos fotométricos de galaxias activas cercanas, en $z < 0,7$ [4], cambian al usar diferentes modelos de emisión para el disco de acreción, el polvo frío de regiones de formación estelar y el toro de gas y polvo, usando el AGNfitter para reproducir la SED.

5. Objetivos

5.1. Objetivo general:

Comparar las propiedades físicas de una muestra de AGN en $z < 0,7$ a partir del modelamiento de sus distribuciones espectrales de energía variando los modelos físicos de emisión.

5.2. Objetivos Específicos

- Identificar el conjunto de modelos físicos más relevantes para la emisión toro, disco de acreción y polvo frío a ser implementados en el ajuste de las distribuciones espectrales de energía.
- Modelar la distribución espectral de energía observada de una muestra de AGN en $z < 0,7$ en longitudes de onda de radio hasta rayos X utilizando el código bayesiano AGNfitter.
- Analizar las distribuciones de probabilidad de los parámetros físicos asociados a cada uno de los modelos haciendo enfasis en su interpretación física.
- Cuantificar las diferencias globales en los resultados de los ajustes efectuados para toda la muestra de AGN con los diferentes modelos.

6. Metodología

Para alcanzar los objetivos propuestos, se seguirá el siguiente orden de actividades:

- 1. Diseñar el experimento
 - 1.1 Seleccionar los modelos físicos de emisión del toro, disco y polvo frío a compararse, teniendo en cuenta su relevancia en los actuales estudios de AGN.
 - 1.2 Establecer el conjunto de modelos y parámetros de base que serán utilizados por AGNfitter durante los ajustes. Esto incluye los modelos físicos asumidos para la población estelar y su evolución; parámetros matemáticos de las cadenas MCMC como el número de *walkers*, pasos y cadenas; y la determinación de los flujos asociados a cada componente, en cada longitud de onda, a partir de los modelos de emisión y la curva de respuesta de cada telescopio.
 - 1.3 Definir la metodología para variar los modelos de emisión de cada componente.
- 2. Ajustar las distribuciones espectrales de energía observadas para cada AGN de la muestra, utilizando AGNfitter para obtener las distribuciones de probabilidad de cada uno de los parámetros físicos optimizados por el código.
- 3. Analizar las distribuciones de los parámetros óptimas para cada AGN y su repercusión en las características de la galaxia anfitriona y los componentes del AGN.
- 4. Analizar los resultados globales en conjunto, para determinar el impacto de los modelos de emisión asumidos en el ajuste sobre los parámetros físicos inferidos para los AGN y sus galaxias anfitrionas.

7. Cronograma de Actividades

Mes/Actividad	1.1	1.2	1.3	2	3	4
Abril						
Mayo						
Junio						
Julio						
Agosto						

Referencias

- [1] R. Antonucci. Unified models for active galactic nuclei and quasars. *Annual review of astronomy and astrophysics*, 31:473–521, 1993.
- [2] J. A. Baldwin, M. M. Phillips, and R. Terlevich. Classification parameters for the emission-line spectra of extragalactic objects. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 93(551):5, 1981.
- [3] S. Brooks, A. Gelman, G. Jones, and X.-L. Meng. *Handbook of markov chain monte carlo*. CRC press, 2011.
- [4] M. Brown, K. Duncan, H. Landt, M. Kirk, C. Ricci, N. Kamraj, M. Salvato, and T. Annan. The spectral energy distributions of active galactic nuclei. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 489(3):3351–3367, 2019.
- [5] G. Bruzual and S. Charlot. Stellar population synthesis at the resolution of 2003. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 344(4):1000–1028, 2003.
- [6] G. Calistro Rivera, E. Lusso, J. F. Hennawi, and D. W. Hogg. AGNfitter: A Bayesian MCMC approach to fitting spectral energy distributions of AGN. *ArXiv e-prints*, June 2016.
- [7] D. Calzetti, L. Armus, R. C. Bohlin, A. L. Kinney, J. Koornneef, and T. Storchi-Bergmann. The dust content and opacity of actively star-forming galaxies. *The Astrophysical Journal*, 533(2):682, 2000.
- [8] R. Chary and D. Elbaz. Interpreting the cosmic infrared background: constraints on the evolution of the dust-enshrouded star formation rate. *The Astrophysical Journal*, 556(2):562, 2001.
- [9] J. S. Collinson, M. J. Ward, H. Landt, C. Done, M. Elvis, and J. C. McDowell. Reaching the peak of the quasar spectral energy distribution–ii. exploring the accretion disc, dusty torus and host galaxy. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, page stw2666, 2016.
- [10] D. A. Dale and G. Helou. The infrared spectral energy distribution of normal star-forming galaxies: Calibration at far-infrared and submillimeter wavelengths. *The Astrophysical Journal*, 576(1):159, 2002.
- [11] B. G. Elmegreen and J. Palous. *Triggered Star Formation in a Turbulent Interstellar Medium (IAU S237)*. Number 237. Cambridge University Press, 2007.
- [12] D. Foreman-Mackey, D. W. Hogg, D. Lang, and J. Goodman. emcee: the mcmc hammer. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 125(925):306, 2013.
- [13] A. Hernán-Caballero, E. Hatziminaoglou, A. Alonso-Herrero, and S. Mateos. The near-to-mid infrared spectrum of quasars. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 463(2):2064–2078, 2016.

- [14] P. F. Hopkins, L. Hernquist, T. J. Cox, T. Di Matteo, B. Robertson, and V. Springel. A unified, merger-driven model of the origin of starbursts, quasars, the cosmic x-ray background, supermassive black holes, and galaxy spheroids. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 163(1):1, 2006.
- [15] J. A. Irwin. *Astrophysics: decoding the cosmos*. John Wiley & Sons, 2007.
- [16] G. Kauffmann, T. M. Heckman, C. Tremonti, J. Brinchmann, S. Charlot, S. D. White, S. E. Ridgway, J. Brinkmann, M. Fukugita, P. B. Hall, et al. The host galaxies of active galactic nuclei. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 346(4):1055–1077, 2003.
- [17] K.-R. Koch. *Introduction to Bayesian statistics*. Springer Science & Business Media, 2007.
- [18] J. Magorrian, S. Tremaine, D. Richstone, R. Bender, G. Bower, A. Dressler, S. Faber, K. Gebhardt, R. Green, C. Grillmair, et al. The demography of massive dark objects in galaxy centers. *The Astronomical Journal*, 115(6):2285, 1998.
- [19] A. Marconi and L. K. Hunt. The relation between black hole mass, bulge mass, and near-infrared luminosity. *The Astrophysical Journal Letters*, 589(1):L21, 2003.
- [20] T. Maschberger. On the function describing the stellar initial mass function. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 429(2):1725–1733, 2013.
- [21] H. Matsuhara, T. Wada, S. Matsuura, T. Nakagawa, M. Kawada, Y. Ohyama, C. P. Pearson, S. Oyabu, T. Takagi, S. Serjeant, et al. Deep extragalactic surveys around the ecliptic poles with akari (astro-f). *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 58(4):673–694, 2006.
- [22] M. Prevot, J. Lequeux, E. Maurice, L. Prévot, and B. Rocca-Volmerange. The typical interstellar extinction in the small magellanic cloud. *Astronomy and Astrophysics*, 132:389–392, 1984.
- [23] G. T. Richards, M. A. Strauss, X. Fan, P. B. Hall, S. Jester, D. P. Schneider, D. E. V. Berk, C. Stoughton, S. F. Anderson, R. J. Brunner, et al. The Sloan digital sky survey quasar survey: Quasar luminosity function from data release 3. *The Astronomical Journal*, 131(6):2766, 2006.
- [24] D. Richstone and M. Schmidt. The spectral properties of a large sample of quasars. *The Astrophysical Journal*, 235:361–376, 1980.
- [25] P. Schneider. *Extragalactic astronomy and cosmology: an introduction*. Springer, 2014.
- [26] J. Selsing, J. P. Fynbo, L. Christensen, and J.-K. Krogager. An x-shooter composite of bright 1 \leq z \leq 2 quasars from uv to infrared. *Astronomy & Astrophysics*, 585:A87, 2016.
- [27] Z. Shang, M. S. Brotherton, R. F. Green, G. A. Kriss, J. Scott, J. K. Quijano, O. Blaes, I. Hubeny, J. Hutchings, M. E. Kaiser, et al. Quasars and the big blue bump. *The Astrophysical Journal*, 619(1):41, 2005.

- [28] L. Silva, G. L. Granato, A. Bressan, and L. Danese. Modeling the effects of dust on galactic spectral energy distributions from the ultraviolet to the millimeter band. *The Astrophysical Journal*, 509(1):103, 1998.
- [29] L. Silva, R. Maiolino, and G. L. Granato. Connecting the cosmic infrared background to the x-ray background. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 355(3):973–985, 2004.
- [30] B. Soifer, L. Boehmer, G. Neugebauer, and D. Sanders. The iras bright galaxy sample. iv-complete iras observations. *The Astronomical Journal*, 98:766–797, 1989.
- [31] M. Stickel, D. Lemke, U. Klaas, C. A. Beichman, M. Rowan-Robinson, A. Efstathiou, S. Bogun, M. F. Kessler, and G. Richter. The isophot 170 μ m serendipity survey. i. compact sources with galaxy associations. *Astronomy and Astrophysics*, 359:865–875, 2000.
- [32] C. M. Urry. Agn unification: An update. *arXiv preprint astro-ph/0312545*, 2003.
- [33] C. M. Urry and P. Padovani. Unified schemes for radio-loud active galactic nuclei. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 107(715):803, 1995.