

Universidad Nacional Autónoma de México



Doctorado en Ciencias (Astrofísica)
Instituto de Radioastronomía y Astrofísica

Proyecto Doctoral

EL ENTORNO DE LOS NÚCLEOS ACTIVOS DE GALAXIAS

Presentado por
Donaji Catalina Alejandra Esparza Arredondo

Asesorada por
Dra. Omaira González Martín
&
Dra. Deborah Dultzin Kessler



8 de mayo de 2017

Índice general

1. Introducción	1
1.1. Clasificación de los AGNs	1
1.1.1. Componentes y modelos del AGN	1
1.1.2. Tipos de AGNs	2
1.2. Relación entre el AGN y la galaxia anfitriona.	2
1.3. Los AGNs en el Infrarrojo	3
1.4. Los AGNs en rayos X	3
2. Trabajo previo	5
3. Objetivos	6
3.1. Coevolución entre el AGN y la formación estelar de la galaxia anfitriona	6
3.1.1. El campo de radiación del AGN	6
3.1.2. Estudiar la formación estelar en el entorno del AGN	6
3.2. Las propiedades del toro mediante el ajuste simultáneo de espectros en rayos X y el MIR	6
4. Metodología	7
4.1. El campo de radiación del AGN	7
4.2. Estudiar la formación estelar en el entorno del AGN	7
4.3. Las propiedades del toro mediante el ajuste simultáneo de espectros en rayos X y MIR	7
5. Índice tentativo para la tesis	9
6. Cronograma	10
Bibliografía	11

Introducción

Los agujeros negros (BHs, por sus siglas en inglés) son objetos con densidades extremas cuya atracción gravitacional es tan grande que ni siquiera la luz puede escapar de ellos. La existencia de estos objetos fue propuesta desde el siglo XVIII por Laplace, y fue confirmada por Einstein a principios del siglo pasado. Pero fue en 1969 cuando se le dio el nombre de “agujero negro” por primera vez, y varios años después se dieron las pruebas observacionales de su existencia. Actualmente se han encontrado BHs de diferentes tamaños que abarcan un gran rango de masas, desde $3 - 30 M_{\odot}$, remanentes del colapso de un núcleo estelar en supernovas tipo II, hasta los conocidos como agujeros negros supermasivos (SMBHs, por sus siglas en inglés) cuyas masas son del orden de $10^6 - 10^9 M_{\odot}$ y se encuentran en el centro de las galaxias. Los SMBH que tienen alrededor de ellos un disco acreciendo material hacia el mismo son conocidos como “Núcleos Activos de Galaxias” (AGNs, por sus siglas en inglés). En el Universo local ($z < 0.1$), alrededor de una de cada 50 galaxias contiene un SMBH con acreción eficiente, mientras que una de cada tres contienen un SMBH de acreción ineficiente. La energía liberada por un AGN está en el rango de $10^{38} - 10^{48} \text{ erg s}^{-1}$ y emite en todas las longitudes de onda.

La teoría sobre los AGNs explica que en la parte más interna del disco de acreción se emite radiación no térmica. Esta emisión no térmica es producida en su mayor parte por la conversión de masa (en reposo) en energía y en menor porcentaje por emisión de electrones ultra-relativistas, efecto Compton inverso, aniquilación de pares y procesos de radiación coherente de plasma [e.g. Blandford & Rees, 1992]

1.1. Clasificación de los AGNs

1.1.1. Componentes y modelos del AGN

Debido a que los AGNs son fuentes compactas no resueltas ($\sim 1 \text{ kpc}$) y en muchos casos variables, su estudio es complejo. Hoy en día pensamos que la mayoría de los AGNs tienen las siguientes componentes:

- **Disco de acreción.** Un flujo de acrecimiento dominado por rotación, el cual forma un disco ópticamente grueso que puede ser geoméricamente delgado o grueso.
- **Región de líneas anchas (BLR).** Nubes de gas con alta densidad ($\sim 10^{10} \text{ cm}^{-3}$) rotando a velocidades típicas del orden de $\sim 2500 \text{ km s}^{-1}$ alrededor del disco de acreción.
- **Toro de Polvo.** Una estructura polvorienta axisimétrica con un radio entre $\sim 0.1 - 10 \text{ pc}$.
- **Región de líneas Delgadas (NLR).** Nubes de gas ionizado con baja densidad ($\sim 10^4 \text{ cm}^{-3}$). Las velocidades de dispersión típicas de las nubes son $\sim 500 \text{ km s}^{-1}$. El gas se extiende desde afuera del toro hasta cientos de kilómetros a lo largo de la dirección de apertura del toro.
- **Chorros relativistas** Chorros de material en forma de plasma eyectado desde el disco de acreción en dirección perpendicular a este.

La localización de cada parte de la estructura mencionada ha dado lugar a una serie de modelos para explicar las diferentes propiedades observacionales en los AGNs. El esquema más aceptado se conoce como modelo unificado [*Unified Model*, UM Antonucci, 1993; Urry & Padovani, 1995]. El UM propone que las diversas propiedades observacionales en los diferentes AGNs dependen sólo de algunos parámetros físicos como: 1) La posición del toro respecto a la línea de visión del observador, 2) La luminosidad de la fuente, o 3) la presencia de chorros relativistas. La Fig.1.1 muestra un esquema incluyendo las componentes del AGN de acuerdo con el UM. Sin embargo, otros modelos proponen una conexión entre los diferentes AGNs por medio de una evolución inducida por las perturbaciones del entorno más próximo por la caída del gas al núcleo [e.g. Krongold et al., 2003; Koulouridis, 2014]. Finalmente, algunos autores apuntan a que estas componentes pueden verse modificadas. Por ejemplo, el disco de acrecimiento a veces puede no existir y ser sustituido por una corona ineficiente. Otro ejemplo clásico es la desaparición del toro de polvo en AGNs de baja luminosidad [e.g. Elitzur & Netzer, 2016; González-Martín et al., 2017].

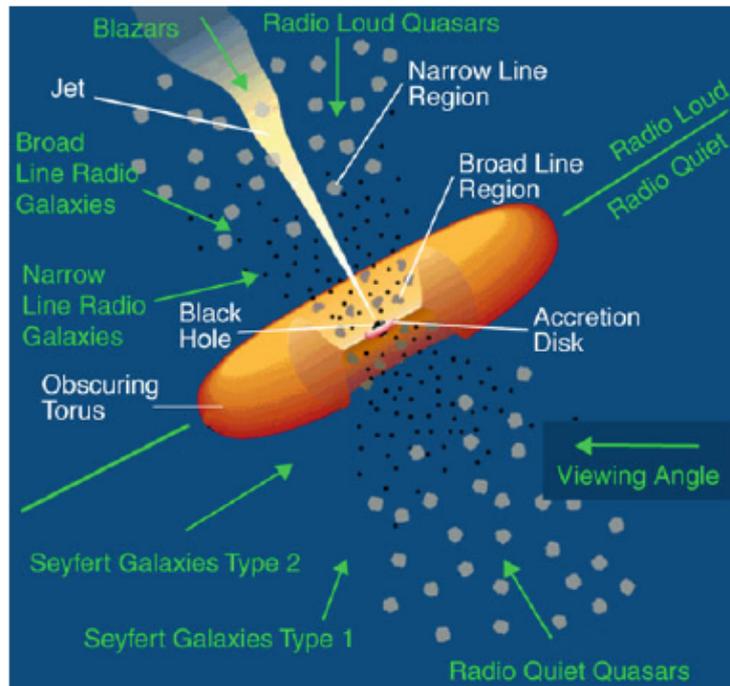


Figura 1.1: Esquema del UM presentado por Urry & Padovani [1995]. La clave de esta unificación entre AGN tipo 1 y tipo 2 reside en la existencia del toro de polvo ópticamente grueso alrededor de la fuente combinado con la orientación. Para ciertos ángulos de visión la BLR es bloqueada, escondiendo así las líneas de emisión anchas en el espectro y permitiendo tan sólo ver las propiedades físicas de la región más alejada del AGN como es la NLR. En este caso, observacionalmente el objeto se clasifica como un AGN de tipo 2. Si el toro de polvo no obstaculiza la línea de visión entre fuente y observador se puede apreciar la NLR y BLR, clasificando así el AGN como tipo 1. Credito: NASA.

1.1.2. Tipos de AGNs

Hoy en día, sabemos que existen muchos tipos de AGNs, pero este trabajo se centrará solamente en los siguientes dos grupos:

- **AGN tipo I** Estas fuentes muestran líneas de emisión anchas ($1,000 - 20,000 \text{ km s}^{-1}$) permitidas y semiprohibidas. Casi todos los AGNs tipo I de baja e intermedia luminosidad, muestran fuertes líneas de emisión angostas ($300 - 1,000 \text{ km s}^{-1}$) de alta ionización muchas de las cuales son prohibidas. Estos AGNs son conocidos como Seyfert tipo I (Sy1) o QSOs.
- **AGNs tipo II** Estas fuentes contienen fuertes líneas de emisión angostas ($300 - 1,000 \text{ km s}^{-1}$) en el cercano infrarrojo-óptico-UV. Dichas líneas son más amplias que las observadas en galaxias con líneas de emisión. Las líneas muestran claras indicaciones de fotoionización por una fuente no estelar. Estos AGNs son conocidos como Seyfert tipo II (Sy2).

1.2. Relación entre el AGN y la galaxia anfitriona.

El estudio de la relación entre el AGN y la galaxia anfitriona ha sido un campo muy activo en las últimas décadas [Magorrian et al., 1998; Ferrarese & Merritt, 2000; Kormendy & Ho, 2013]. Algunos estudios han encontrado, por ejemplo, una correlación entre las masas del SMBH y el bulbo de la galaxia. Para explicar estas y otras relaciones se han propuestos diversos escenarios. Algunos autores han propuesto que el gas alrededor del centro de la galaxia es el responsable del crecimiento del SMBH y del enriquecimiento de la formación estelar [Sanders & Mirabel, 1996] También se ha sugerido que el apagado de la formación estelar (SF) podría estar relacionado con la retroalimentación del SMBH [Silk & Rees, 1998]. Las simulaciones numéricas proponen un escenario donde los procesos a gran escala pueden estar relacionados con los fenómenos a menor escala [Hopkins and Quataert, 2010; Netzer, 2013]. De acuerdo con estos estudios, las fusiones mayores o las mareas producen perturbaciones que puede estar relacionadas con la acreción del SMBH y la SF. Otros autores proponen un escenario donde el campo radiación de la fuente central es capaz de detener la SF, imponiendo un balance entre ambos [e.g. Wu et al., 2009].

Estudiar la SF circunuclear en los AGNs es importante pues puede darnos importantes pistas sobre la relación entre la actividad del núcleo y la galaxia anfitriona. Sin embargo, no es trivial porque los trazadores clásicos de SF pueden estar contaminados por la propia emisión del AGN. En este trabajo de tesis ahondaremos en el estudio de estos trazadores con el objetivo de profundizar en los mecanismos de coevolución entre AGN y la SF de las galaxias anfitrionas.

1.3. Los AGNs en el Infrarrojo

En longitudes de onda del mediano infrarrojo (MIR, por sus siglas en inglés) se pueden analizar líneas de emisión que proceden tanto del AGN como de la SF nuclear de la galaxia anfitriona. Particularmente, para el caso de trazar la SF se utilizan las emisiones debidas a los Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (PAHs, por sus siglas en inglés). Los PAHs son moléculas, de entre 20-100 átomos de carbono e hidrógeno, calentadas a altas temperaturas debido a estrellas jóvenes tipo B.

La emisión de PAHs ha sido observada en la región nuclear y circunuclear de los AGNs [González-Martín et al., 2013; Alonso-Herrero et al., 2014]. Diamond-Stanic et al. [2010] encontraron una fuerte correlación de la SF nuclear en escala de kpc usando el PAH de $11.3\mu\text{m}$ y el continuo a $24\mu\text{m}$ para galaxias Seyfert. La emisión de PAHs es débil o ausente en fuentes tipo Sy1 [e.g. Mason et al., 2007]. Estos autores han relacionado la ausencia de PAHs con la destrucción o ionización de las moléculas responsables de esta emisión por el campo de radiación del AGN.

La mayor parte de estos trabajos se basan en la comparación de SF nuclear y circunuclear, utilizando el espectro nuclear de telescopios terrestres (es decir, con la mejor resolución espacial posible) y el espectro circunuclear de satélites [es decir, con menor resolución espacial, e.g. Esquej et al., 2014]. Sólomente algunos estudios hacen un análisis detallado de la emisión circunuclear utilizando distintas aperturas radiales centradas en el núcleo activo para unos pocos objetos [e.g. Alonso-Herrero et al., 2014].

Otra línea observada en el rango del MIR es el [SIV] a $10.5\mu\text{m}$, esta emisión surge de iones con un potencial de excitación de 35 eV. Ésta ha sido observada en un gran número de objetos como son las nebulosas planetarias, regiones HII galácticas y ULIRGs [Gillett et al., 1972].

El origen de la línea de [SIV] en los núcleos activos es controvertido, apuntando a que puede producirse por regiones de SF y/o fotoionización por el AGN [Pereira-Santaella et al., 2010; Groves et al., 2008]. Además, la emisión en continuo en el mediano MIR está dominada por el polvo calentado por el AGN. Así, se puede estudiar las propiedades del toroide de polvo de los AGNs modelando este continuo con códigos de transferencia radiativa [Nenkova et al., 2008; Hönl, 2008; Ramos Almeida et al., 2009, 2014]. Estos modelos asumen un toro grumoso (es decir, no homogéneo) cuyos parámetros son el grosor, el número de nubes en el plano ecuatorial del toro, el perfil de densidad dependiente del radio, el radio externo, la profundidad óptica de las nubes, ángulo de inclinación, etc.

1.4. Los AGNs en rayos X

Los rayos X son también un rango espectral donde hay importantes pistas de las componentes de los AGNs. Específicamente, en estas longitudes de onda existen ciertas características que pueden ayudar a diagnosticar las propiedades del toroide [Bassani et al., 1999; Panessa et al., 2006; González-Martín et al., 2009], que serán de especial interés para este trabajo. Estas particularidades son las siguientes:

- Una componente cuyo pico se encuentra aproximadamente a 20 KeV debido a la baja dispersión de los fotones en rayos X duros. En concreto, esta componente se produce por el reprocesado de emisión del disco en una corona íntimamente ligada al mismo y que emite por Compton inverso en rayos X duros. Esta componente es conocida como **la joroba Compton** (en inglés *Compton hump*) o componente intrínseca.
- La segunda característica es debida a la reflexión de los electrones en el gas altamente ionizado. La radiación reflejada es una imagen del continuo intrínseco, que depende únicamente del factor de cobertura geométrico ($f_c = \Omega/4\pi$, donde Ω es el ángulo sólido subtendido por el material reflector). En cuanto al origen del material reflector existen dos hipótesis. En la primera este material reflector es el propio disco de acrecimiento. En este caso se espera que la componente de reflexión obedezca a cambios en el continuo del AGN rápidamente. En el segundo caso este material reflector es el toro. Debido a la lejanía del toroide en estos casos no esperamos cambios a corto plazo en la componente de reflexión.
- La tercera componente es la emisión de la línea de hierro neutra a 6.4 KeV (F_{K_α}). Esta emisión está asociada a la componente reflejada. De este modo estas líneas son anchas y de alta ionización si se originan en la superficie del disco de acreción central, o serán delgadas y ocasionalmente de baja ionización si se originan debido a la iluminación de rayos X del gas frío en el toro. Sólo se han detectado unos pocos

casos de líneas de hierro neutro anchas. En el caso donde el continuo en rayos X no es oscurecido el ancho equivalente (EW, por sus siglas en inglés) de la línea angosta de K_α depende del número de fotones absorbidos. El $EW(K_\alpha)$ depende del factor de cobertura y la densidad columnal de hidrógeno. Por lo tanto, el EW de esta emisión es una firma clara de la existencia o no del toro central en los AGNs [Guainazzi et al., 2005]. En una fuente muy oscurecida se esperan anchos EW grandes, pues la línea llega al observador, pero la mayor parte de la radiación del continuo central es bloqueada por el toro [Ghisellini et al., 1994].

Actualmente, existen diferentes modelos para poder reproducir las componentes de toro en rayos X [por ejemplo, ComPS y mytorus incluidos en el software de ajuste espectral Xspec Jordan et al., 1994]. Estos modelos consideran diferentes parámetros como: temperaturas, profundidad óptica, ángulo de inclinación, etc. En la figura 1.2 se muestra el espectro de un AGN en rayos X y se especifica la contribución de cada una de estas características.

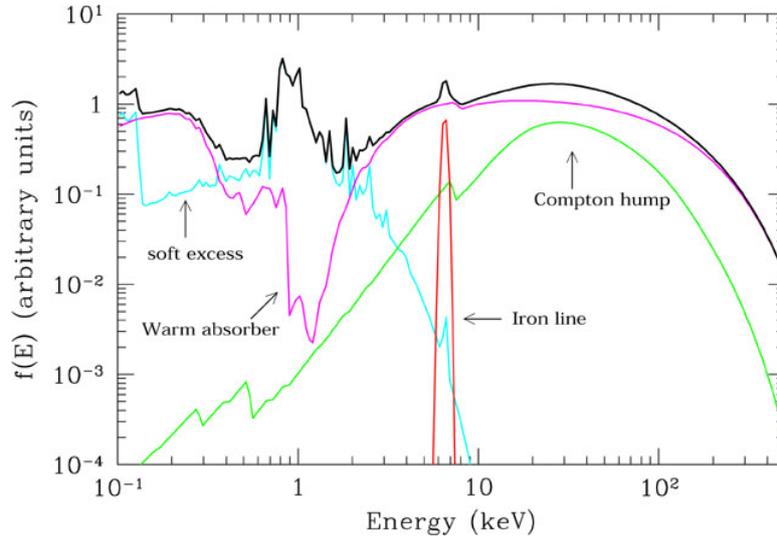


Figura 1.2: Espectro con las componentes en rayos X de un AGN.

Trabajo previo

Durante la maestría se exploró la relación entre la SF circunuclear y la actividad del AGN. Para esto utilizamos una muestra de 19 AGNs locales con alta resolución espacial usando espectros de rendija larga de T-ReCS, CanariCam y *Spitzer*. En este trabajo se usó el PAH en $11.3 \mu\text{m}$ como trazador de SF y la línea de [SIV] a $10.5 \mu\text{m}$ como trazador del campo de radiación del AGN. En este trabajo se exploraron las emisiones de ambas líneas a diferentes distancias del núcleo, usando distintas aperturas (véase Fig.2.1).

Específicamente, encontramos que la línea de [SIV] puede ser un buen trazador de la luminosidad del AGN en los casos donde el núcleo se encuentra aislado de la galaxia anfitriona. A escala mayores consideramos la posibilidad de que la emisión de [SIV] puede estar contaminada por SF. Descartamos que la SF trazada por el PAH en $11.3 \mu\text{m}$ fuera la misma que contamina al [SIV] a estas escalas. Por otro lado, exploramos la relación propuesta por los diferentes modelos teóricos entre tasa de formación estelar (SFR, por sus siglas en inglés) y la luminosidad del AGN a diferentes distancias del núcleo [Ruschel-Dutra et al., 2017]. Utilizamos la luminosidad del PAH en $11.3 \mu\text{m}$ para calcular SFR siguiendo la relación propuesta por Shipley et al. [2016]. Encontramos que nuestros datos y los modelos de coevolución están en un buen acuerdo para distancias $\geq 50 \text{ pc}$. Sin embargo, a escalas menores encontramos que existe un déficit de PAHs, que podría estar relacionado con la posible destrucción de las moléculas por el campo de radiación del AGN [Diaz-Santos et al., 2010]. Estos resultados están próximos a enviarse para su publicación.

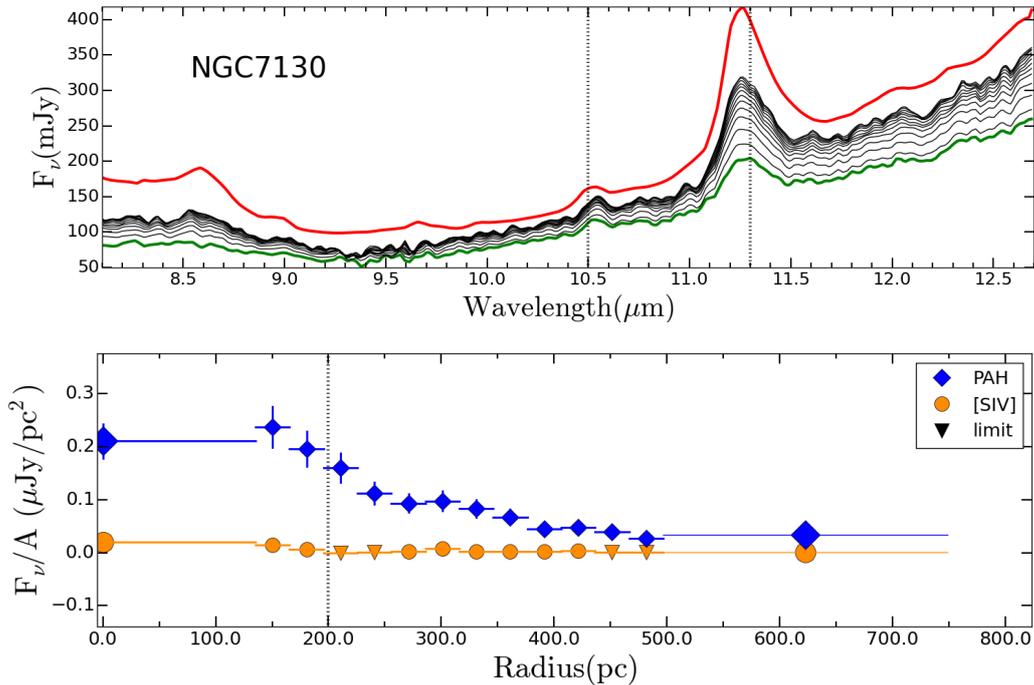


Figura 2.1: (Superior): Espectros extraídos a diferentes distancias del núcleo para NGC 7130. La línea roja representa al espectro obtenido por *Spitzer*, la línea verde es el espectro nuclear y las líneas en negro corresponden a los espectros extraídos a diferentes aperturas por T-ReCS/Gemini. Las líneas punteadas muestran la localización del PAH estudiado y la línea de [SIV]. (Inferior): Perfiles de brillo superficial para NGC 7130. Los perfiles radiales del PAH y el [SIV] se muestran con diamantes azules y círculos naranjas, respectivamente. Los símbolos más grandes (diamantes o círculos) corresponden a las mediciones en los espectros nucleares y de *Spitzer*, respectivamente. El resto de los símbolos representan las mediciones en los espectros a diferentes aperturas. La línea punteada señala una distancia de 200 pc del núcleo. Los triángulos representan valores límite.

Objetivos

Esta tesis estará dividida en dos grandes bloques. Para la primera parte del trabajo continuaremos con la investigación acerca de la coevolución entre la SF y la actividad nuclear, que hemos presentado en el trabajo previo. La ventaja del trabajo que proponemos consiste en que podremos explorar la distribución de brotes de SF y/o fotoionización nuclear usando imágenes de alta resolución espacial. Actualmente, solamente disponemos de espectros de rendija larga. El segundo bloque de este trabajo consistirá en estudiar el toro del AGN a través de códigos para generar modelos de SED haciendo ajustes simultáneos de espectros en el MIR y rayos X.

3.1. Coevolución entre el AGN y la formación estelar de la galaxia anfitriona

3.1.1. El campo de radiación del AGN

En el trabajo previo encontramos que la línea de [SIV] puede utilizarse como trazadora de fotoionización del AGN hasta ciertas escalas. Sin embargo, no es claro el grado de contaminación por SF. Por lo tanto, nuestro primer objetivo será estudiar el comportamiento de esta línea junto al de otras líneas que sabemos trazan fotoionización nuclear (por ejemplo, [OIII] a 5700 Å). Nótese que para esto contamos con imágenes de alta resolución en los archivos de CanariCam, T-ReCS y *Spitzer* para el MIR. Además, existen datos disponibles del telescopio espacial Hubble (HST, por sus siglas en inglés).

3.1.2. Estudiar la formación estelar en el entorno del AGN

En nuestro trabajo anterior estudiamos la coevolución entre AGN y SFR circunuclear por medio del PAH en 11.3 μm . Sin embargo, no logramos clarificar si los PAHs eran buenos trazadores de SF cerca del AGN (< 50 pc). Además, en muchas de nuestras fuentes no existen registros de SF por medio de otros trazadores. Por lo tanto, nuestro segundo objetivo es explorar que tan buen trazador de formación estelar puede ser el PAH en 11.3 μm ante la presencia de un AGN. Para esto combinaremos imágenes de alta resolución de MIR y óptico. Las imágenes se encuentran disponibles en archivo de los mismos telescopios mencionados para el [SIV].

3.2. Las propiedades del toro mediante el ajuste simultáneo de espectros en rayos X y el MIR

En trabajos previos se han presentado modelos de toros usando códigos de transferencia radiativa para estimar las propiedades en el MIR [Nenkova et al., 2008; Hönig & Kishimoto, 2010] y rayos X [e.g. mytorus¹ Murphy & Yaqoob, 2009]. Sin embargo, no se han logrado restringir correctamente los parámetros del toro [Ramos Almeida et al., 2014]. Por lo tanto, nuestro último objetivo consistirá en obtener por primera vez una buena estimación de los parámetros para modelar las componentes del toro de polvo. Para ello combinaremos por primera vez los espectros en rayos X con los espectros en el MIR, con lo cual realizaremos un ajuste simultáneo. Esto nos permitirá a estudiar si el toro tiene propiedades distintas dependiendo del tipo de actividad del AGN.

¹<http://mytorus.com/>

Metodología

4.1. El campo de radiación del AGN

Para analizar la emisión de [SIV] crearemos una muestra de AGNs locales. Nuestra selección se basará en las observaciones disponibles en archivo de CanariCam, T-ReCS y el catálogo de [Asmus et al., 2014]. Este catálogo contiene observaciones en diferentes filtros e instrumentos de telescopios terrestres en el MIR. Una vez seleccionada la muestra, desarrollaremos un método capaz de aislar la línea de [SIV] usando imágenes del continuo para su sustracción. Para esto utilizaremos algunas rutinas de python como lo son astropy, scipy, numpy, entre otras. Con las imágenes resultantes se creará un catálogo. Las imágenes de este catálogo serán analizadas e interpretadas como trazadores de fotoionización nuclear, siguiendo los resultados propuestos por Groves et al. [2008].

Para continuar el estudio del [SIV], descargaremos las imágenes disponibles en óptico del HST de las fuentes del catálogo. Buscaremos que las imágenes seleccionadas contengan algún trazador de fotoionización nuclear (e.g. [OIII] a 5007 Å). Es importante mencionar, que hemos hecho una búsqueda preliminar en el archivo del HST y consideramos que la mayoría de los datos están disponibles. Después de reducir las imágenes en óptico, graficaremos sobre cada imagen los contornos en MIR correspondientes a cada fuente. Debido a que los rayos X pueden ser un buen trazador del campo de radiación del AGN, también consideramos la posibilidad de combinar las imágenes en óptico y/o MIR con las disponibles para esta longitud de onda. Es decir, podemos tener imágenes en el óptico que compararemos tanto con los rayos X como con el MIR. Este proceso nos permitirá saber si el [SIV] es tan buen trazador del campo de radiación como el [OIII] y los rayos X. En caso de que el [SIV] se encuentre trazando SF, esperamos que la combinación con imágenes en óptico y/o UV nos clarifique la edad de las estrellas que traza.

4.2. Estudiar la formación estelar en el entorno del AGN

Esta parte del trabajo comenzará con la selección de una muestra de AGNs con observaciones disponibles en archivo en la banda del PAH en 11.3 μm . La instrumentación de esta parte del trabajo es esencialmente la misma que en el apartado anterior. Igualmente emplearemos el método desarrollado en el análisis del [SIV] para crear imágenes de PAHs descontaminadas del continuo subyacente. Este tipo de metodología ha sido ya probada para el caso de los PAHs en el trabajo de Ruschel-Dutra et al. [2017] para unos pocos AGNs locales. Dicho trabajo se centra en estimar la SFR nuclear a través de imágenes. Nosotros extenderemos el método a una muestra mucho más grande y explotaremos la morfología extendida. Crearemos un catálogo con las imágenes resultantes después de aplicar este método.

Buscaremos las imágenes de las fuentes de nuestro catálogo entre los archivos del HST (óptico y UV), pues en esta longitud de onda existen diferentes trazadores de formación estelar (e.g. $\text{H}\alpha$). Reduciendo estos datos, procesaremos nuestras imágenes de MIR y UV para crear mapas de contorno que graficaremos sobre las imágenes en óptico de cada fuente. Estos nos permitirá confirmar si las emisiones del PAH corresponden a regiones de formación estelar. Incluso podría ayudarnos a ubicar regiones de SF circunucleares no consideradas en trabajos previos.

4.3. Las propiedades del toro mediante el ajuste simultáneo de espectros en rayos X y MIR

El trabajo partirá creando un código a partir de los disponibles (e.g. mytorus, Xspec), para hacer un ajuste simultáneo de los parámetros del toro en MIR y rayos X. Como se mencionó en la introducción en el MIR y en rayos X existen modelos que permiten estimar las propiedades del toro en ambas longitudes. Utilizaremos el software Xspec el cual permite ajustar datos de múltiples satélites de rayos X a una gran variedad de modelos.

Los datos en rayos X deben ajustarse con este software (a uno similar conocido como Sherpa), porque se necesita incluir en el ajuste las matrices de respuesta de los instrumentos. Para este trabajo pretendemos hacer un ajuste simultáneo de datos en MIR y rayos X. Para esto necesitamos convertir el espectro del MIR y el modelo de toro de polvo del código de transferencia radiativa a un lenguaje que pueda ser manipulado por Xspec.

La ventaja de unir rayos X y MIR es que existen parámetros en cada modelo que coinciden (e.g. absorción en la línea de visión, ángulo de inclinación del toro y los flujos integrados). Por lo tanto, esperamos que este código nos ayude a mejorar la degeneración entre los parámetros del toro. Una vez finalizado dicho código seleccionaremos un objeto prueba con suficientes observaciones en tanto de MIR como rayos X. Los archivos de *Chandra*, *XMM-Newton*, *NuSTAR*, *CanariCam/GTC* y *Spitzer* disponen de muchas observaciones para un gran número (miles) de AGNs. Existen observaciones simultáneas al menos para 100 objetos publicados recientemente por [Gonzalez-Martin et al., 2015b]. Así las observaciones están garantizadas para esta parte del proyecto. Para comprobar la funcionalidad de nuestro código realizaremos tres pruebas: 1) Ajustaremos los datos y el modelo obtenido a partir de usar solamente el código en rayos X, 2) Ajustaremos los datos y el modelo obtenido solo para el caso de considerar MIR, y 3) Ajustaremos datos y nuestro modelo (el cual hace un ajuste simultáneo de ambas longitudes de onda). Con estas tres pruebas concluiremos si el ajuste simultáneo mejora nuestra estimación de los parámetros, cuantificar cuales mejoran y cuanta es la mejoría usando técnicas estadísticas como *ftest*, *chi2*, *cstat*, etc.

La siguiente fase de nuestro trabajo consistirá en crear una muestra de AGNs locales, cuyos datos de MIR se encuentren disponibles en el catálogo de *CASSIS/Spitzer* y del grupo Piratas (*CanariCam/GTC* y *T-ReCS*). Conjuntamente también se buscarán que los datos estén disponibles para rayos X en los telescopios mencionados en el párrafo anterior. Utilizaremos la muestra para hacer una estimación de los parámetros para modelar las componentes del toro de polvo a partir de introducir las fuentes en nuestro código. El objetivo final es estudiar si el toro cambia con los parámetros del AGN, tales como la dureza de la SED, la tasa de acrecimiento, la masa del agujero negro, o la luminosidad bolométrica.

Índice tentativo para la tesis

★ **Capítulo 1: Introducción**

- Los AGNs y sus propiedades a diferentes longitudes de onda
- El AGN y su galaxia anfitriona
- Justificación

★ **Capítulo 2: Coevolución usando espectros desde tierra en el MIR.**

★ **Capítulo 3: Coevolución usando imágenes de alta resolución**

- Selección de la muestra
- Reducción de datos
- Análisis de los datos
- Resultados
- Discusión

★ **Capítulo 4: Propiedades del toro en MIR y rayos X.**

- Selección de la muestra
- Reducción de datos
- Código de ajuste simultáneo para imágenes en rayos X y MIR.
- Análisis de datos
- Resultados
- Discusión

★ **Capítulo 5: Conclusiones**

★ **Capítulo 6: Trabajo a futuro**

Cronograma

A continuación, presentamos un cronograma con el trabajo a realizar en cada semestre del doctorado. Como se puede observar hemos especificado al final de cada línea el objetivo involucrado: 1) Estudiar el campo de radiación del AGN a través del [SIV], 2) Estudiar la SF circunuclear o 3) Estudiar las propiedades del toro en MIR y rayos X.

■ Primer semestre

- ★ Definir los temas a tratar durante el doctorado. Para esto se hará un repaso de la literatura reciente en el campo de los AGNs a diferentes longitudes de onda.
- ★ Seleccionar una muestra de AGNs locales para estudiar la emisión de [SIV], basándonos en los datos disponibles de los archivos de CanariCam, T-ReCs y el catálogo de Asmus et al. [2014] (*Objetivo 1*).
- ★ Buscar una colaboración con investigadores expertos en la emisión de [SIV] como lo son: 1) Dr. Michael Dopita, 2) Dr. Brent Groves y la Dra. Elisabete da Cunha (*Objetivo 1*).
- ★ Corregir y enviar el artículo con el trabajo previo mencionado en la sección 2. El texto se encontraba totalmente redactado, pero falta añadir los comentarios de los coautores antes de enviar a la revista.
- ★ Presentar trabajo previo en congreso: Multi-scale star formation.
- ★ Preparar el proyecto para el doctorado.

■ Segundo semestre

- ★ Desarrollar un código capaz de aislar la línea de [SIV] y la emisión de PAH usando imágenes del continuo (*Objetivo 1 y 2*).
- ★ Crear un catálogo a partir de la muestra seleccionada de AGNs para el [SIV] y procesadas con el código de sustracción del continuo (*Objetivo 1*).
- ★ Analizar e interpretar las imágenes de [SIV] de nuestro catálogo siguiendo los resultados propuestos por Groves et al. [2008] (*Objetivo 1*).
- ★ Descargar las imágenes en óptico del HST de las fuentes de nuestro catálogo (*Objetivo 1*).
- ★ Combinar imágenes en óptico con las disponibles en MIR y rayos X (*Objetivo 1*).
- ★ Analizar los resultados obtenidos y redactar artículo sobre el campo de radiación del AGN (*Objetivo 1*).
- ★ Crear un código para integrar los espectros en MIR en el código Xspec de rayos X. Con esto se podrán hacer ajustes simultáneos de parámetros en rayos X y MIR para el toro de polvo en AGNs (*Objetivo 3*).
- ★ Responder el arbitraje del artículo enviado el semestre anterior.

■ Tercer semestre

- ★ Revisar y enviar el artículo sobre los resultados del campo de radiación del AGN (*Objetivo 1*).
- ★ Seleccionar una muestra de AGNs con imágenes disponibles en el óptico y MIR (*Objetivo 2*).
- ★ Descargar y reducir los datos de la muestra (*Objetivo 2*).
- ★ Aislar la emisión del PAH en $11.3 \mu\text{m}$ usando el mismo código que para el [SIV] (*Objetivo 2*).
- ★ Combinar imágenes en óptico con las disponibles en MIR y rayos X para el PAH (*Objetivo 2*).
- ★ Analizar los resultados obtenidos y redactar artículo sobre la SF usando como trazador el PAH (*Objetivo 2*).
- ★ Hacer el estudio piloto del código de ajuste simultáneo creado el semestre anterior (*Objetivo 3*).

- ★ Presentar la candidatura.

- **Cuarto semestre**

- ★ Responder el arbitraje sobre los resultados del campo de radiación del AGN (*Objetivo 1*).
- ★ Revisar y enviar artículo sobre la SF usando como trazador el PAH (*Objetivo 2*).
- ★ Crear una muestra con datos en MIR y rayos X para el análisis del toro (*Objetivo 3*).
- ★ Descargar y reducir los datos en MIR y rayos X para la muestra seleccionada (*Objetivo 3*).
- ★ Presentar en un congreso internacional los resultados obtenidos hasta el momento.

- **Quinto semestre**

- ★ Utilizar la muestra creada el semestre anterior para parametrizar las propiedades del toro utilizando el código desarrollado de ajuste simultáneo (*Objetivo 3*).
- ★ Estancia en el IAC con la Dra. Cristina Ramos Almeida. La estancia servirá para aprender sobre la física detrás del toro de polvo en los AGNs (*Objetivo 3*).
- ★ Responder el arbitraje del artículo sobre la SF usando como trazador el PAH (*Objetivo 2*).
- ★ Comenzar a redactar la tesis doctoral.

Nótese que llegado a este punto esperamos que gran parte de la tesis esté ya escrita en publicaciones científicas, de manera que la redacción de la tesis tomará poco tiempo.

- **Sexto semestre**

- ★ Análisis de resultados obtenidos sobre las componentes del toro (*Objetivo 3*).
- ★ Redactar y revisar el artículo correspondiente donde presentemos los resultados sobre las propiedades del toro (*Objetivo 3*).
- ★ Añadir los resultados obtenidos a la tesis doctoral.

- **Séptimo semestre**

- ★ Redacción final de la tesis doctoral.
- ★ Asistir a un congreso internacional para mostrar los resultados obtenidos sobre el toro del polvo en AGNs.
- ★ Revisar y enviar tercer artículo sobre propiedades del toro de polvo en rayos X y MIR (*Objetivo 3*).

- **Octavo semestre**

- ★ Responder arbitraje del artículo sobre propiedades del toro de polvo en rayos X y MIR (*Objetivo 3*).
- ★ Resolver trámites burocráticos.
- ★ Defensa correspondiente del grado.

Guía de tiempos del proyecto

En la tabla 6.1 se muestra una estimación del tiempo dedicado a cada uno de los objetivos propuestos: 1) Estudiar el campo de radiación del AGN, 2) Estudiar la SF circunuclear o 3) Estudiar las propiedades del toro en MIR y rayos X. Además, en la fila llamada **otros** consideramos los tiempos invertidos para preparar trabajos en congresos, preparar candidatura, escritura de tesis, resolver burocracia, etc. Las estrellas en naranja representan el tiempo dedicado a preparar el proyecto de doctorado (1 semestre) o la candidatura (3 semestre) y las estrellas en rojo representan los tiempos dedicados a preparar y presentar la tesis (7 y 8 semestre).

	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8
Objetivo 1	★ ★ ★	★ ★ ★	★	★				
Objetivo 2	★	★	★ ★ ★	★ ★	★ ★			
Objetivo 3		★	★	★ ★	★ ★ ★	★ ★ ★ ★	★ ★	★
Otros	★ ★	★	★	★	★	★ ★	★ ★ ★ ★	★ ★ ★ ★ ★

Tabla 6.1: Guía de tiempos del proyecto.

Bibliografía

- Alonso-Herrero, A., Ramos Almeida, C., Esquej, P., et al. 2014, MNRAS, 443, 2766
- Antonucci, R. 1993, ARA&A, 31, 473
- Asmus, D., Hönig, S. F., Gandhi, P., Smette, A., & Duschl, W. J. 2014, MNRAS, 439, 1648
- Bassani, L., Dadina, M., Maiolino, R., et al. 1999, ApJS, 121, 473
- Blandford, R. D., & Rees, M. J. 1992, American Institute of Physics Conference Series, 254, 3
- Diamond-Stanic, A.M., Rieke, G.H. 2010, ApJ, 724, 140
- Díaz-Santos, T., Alonso-Herrero, A., Colina, L., et al. 2010, ApJ, 711, 328
- Elitzur, M., & Netzer, H. 2016, MNRAS, 459, 585
- Esquej, P., Alonso-Herrero, A., González-Martín, O., et al. 2014, ApJ, 780, 86
- Ferrarese, L., & Merritt, D. 2000, ApJ, 539, L9
- Ghisellini, G., Haardt, F., & Matt, G. 1994, MNRAS, 267, 743
- Gillett, F. C., Merrill, K. M., & Stein, W. A. 1972, ApJ, 172, 367
- González-Martín, O., Masegosa, J., Márquez, I., Guainazzi, M., & Jiménez-Bailón, E. 2009, A&A, 506, 1107
- González-Martín, O., Rodríguez-Espinosa, J. M., Díaz-Santos, T., et al. 2013, A&A, 553, A35
- Gonzalez-Martin, O., Masegosa, J., Marquez, I., et al. 2015, VizieR Online Data Catalog, 357,
- González-Martín, O., Masegosa, J., Hernán-Caballero, A., et al. 2017, arXiv:1704.06739
- Groves, B., Nefs, B., & Brandl, B. 2008, MNRAS, 391, L113
- Guainazzi, M., Matt, G., & Perola, G. C. 2005, A&A, 444, 119
- Hönig, S. F. 2008, Ph.D. Thesis,
- Hönig, S. F., & Kishimoto, M. 2010, A&A, 523, A27
- Hopkins, P. F. and Quataert, E., 2010, MNRAS, 407, 1529
- Jordan, J. M., Jennings, D. G., McGlynn, T. A., et al. 1994, Astronomical Data Analysis Software and Systems III, 61, 71
- Kormendy, J., & Ho, L. C. 2013, ARA&A, 51, 511
- Krongold, Y., Dultzin-Hacyan, D., & Marziani, P. 2003, Active Galactic Nuclei: From Central Engine to Host Galaxy, 290, 523
- Koulouridis, E. 2014, A&A, 570, A72
- Magorrian, J., Tremaine, S., Richstone, D., et al. 1998, AJ, 115, 2285
- Mason, R. E., Levenson, N. A., Packham, C., et al. 2007, The Central Engine of Active Galactic Nuclei, 373, 493
- Murphy, K. D., & Yaqoob, T. 2009, MNRAS, 397, 1549

- Nenkova, M., Sirocky, M. M., Ivezić, Ž., & Elitzur, M. 2008, *ApJ*, 685, 147-159
- Netzer, H. 2013, *The Physics and Evolution of Active Galactic Nuclei*, by Hgai Netzer, Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2013
- Panessa, F., Bassani, L., Cappi, M., et al. 2006, *A&A*, 455, 173
- Pereira-Santaella, M., Alonso-Herrero, A., Rieke, G. H., et al. 2010, *ApJS*, 188, 447
- Pier, E. A., & Krolik, J. H. 1992, *ApJ*, 401, 99
- Ramos Almeida, C., Levenson, N. A., Rodríguez Espinosa, J. M., et al. 2009, *ApJ*, 702, 1127
- Ramos Almeida, C., Alonso-Herrero, A., Levenson, N. A., et al. 2014, *MNRAS*, 439, 3847
- Ruschel-Dutra, D., Rodríguez Espinosa, J. M., González Martín, O., Pastoriza, M., & Riffel, R. 2017, *MNRAS*, 466, 3353
- Sanders, D. B., & Mirabel, I. F. 1996, *ARA&A*, 34, 749
- Shiple, H. V., Papovich, C., Rieke, G. H., Brown, M. J. I., & Moustakas, J. 2016, *ApJ*, 818, 60
- Silk, J., & Rees, M. J. 1998, *A&A*, 331, L1
- Urry, C. M., & Padovani, P. 1995, *PASP*, 107, 803
- Wu, Y., Charmandaris, V., Huang, J., et al. 2009, *ApJ*, 701, 658