

Estudio de la existencia de núcleos activos y de la desaparición del toro a través de rayos X

Natalia Osorio Clavijo

Estudiante de Doctorado en Ciencias (Astrofísica)

Supervisora: Dra. Omaira González Martín

INSTITUTO DE RADIOASTRONOMÍA Y ASTROFÍSICA

1. Introducción

Es ampliamente aceptado que en el centro de las galaxias yace un agujero negro súper-masivo (SMBH¹), que en ocasiones está siendo alimentado por un disco de acreción, lo que provoca liberación de energía en órdenes de magnitud de hasta $L \sim 10^{44}$ erg s⁻¹. Objetos de este tipo son conocidos como núcleos activos de galaxias (AGN) y emiten en todo el rango del espectro electromagnético. Típicamente, los AGNs están conformados por otras regiones externas al disco de acreción, conformadas por nubes de gas y polvo y cuya formación es materia de debate actualmente. Las componentes del AGN se describen brevemente a continuación: **(1) Agujero negro super-masivo (SMBH)**: Es un objeto compacto y masivo en el centro de las galaxias cuya masa, M_{BH} , es del orden de $\sim 10^6 - 10^{10} M_{\odot}$. **(2) Disco de acreción**: Estructura de gas que alimenta al SMBH y es responsable de la mayor parte de la liberación de energía en AGNs. Tiene tamaños de $\sim 10^{13}$ cm y su temperatura equivalente hace que su pico de emisión esté en el óptico/UV. **(3) Región de líneas anchas (BLR)/ Región de líneas estrechas (NLR)**: La BLR se encuentra a una distancia menor a 1 pc y sus nubes se mueven a altas velocidades (3000 km s⁻¹, Davidson and Netzer, 1979). Esta región es la que produce el ensanchamiento de líneas en el espectro óptico. La NLR se extiende incluso a escalas de kpc y las nubes se mueven a velocidades más bajas (~ 300 km s⁻¹, Bennert, 2005). **(4) Toro de polvo**: Es una estructura de polvo que se encuentra en el rango de 1 – 5 pc. Además tiene densidades de alrededor de $n_e \sim 10^4 - 10^6$ cm⁻³. Su pico de emisión se encuentra en el infrarrojo medio. A esta estructura se le asocia la componente de reflexión producida por gas neutro que se estudia a través de los rayos X. **(5) Jet relativista**: Este flujo de plasma puede verse en alrededor del 10 % de los AGN, perpendicular al disco del AGN. El mecanismo de lanzamiento es materia de debate, siendo el escenario más aceptado el de emisión debida a la aceleración de electrones alrededor de un campo magnético.

El simple hecho de determinar la naturaleza AGN de un núcleo ha sido materia de debate debido a las dificultades técnicas en muchas longitudes de onda. Por ejemplo en el óptico, la dilución del AGN debido a la emisión de la galaxia puede enmascarar AGNs (Davies et al., 2016). **Nuestro trabajo estudiará como esta clasificación óptica se compara con la clasificación en rayos X.**

Además desde su descubrimiento se han sub-clasificados los AGNs en diversos tipos (e.g Seyfert/LLAGN; Tipo-1/Tipo-2; FRI/FRII, etc.) debido a que cada longitud de onda es sensible a un fenómeno diferente. Hacia la década de los 90, dos grupos (Antonucci, 1993; Urry and Padovani, 1995), de manera independiente, formularon que en esencia todos los AGNs comparten las mismas componentes y que la clasificación del núcleo depende en gran parte del ángulo de visión del observador (aunque también de la potencia del disco y de la existencia de chorros relativistas). Bajo este esquema de unificación (Modelo Unificado, ver Fig. 1 (izquierda)) el toro de polvo es una estructura homogénea, y además es el responsable de la distinción entre los AGNs de Tipo 1 (que presentan líneas anchas y delgadas en su espectro óptico) y AGNs de Tipo 2 (que solo presentan líneas delgadas). Este modelo es incapaz de explicar algunos tipos de AGN, como los AGNs de baja luminosidad (LLAGN) y los AGN de Tipo 2 verdaderos (True Type 2). Además, carece de conexión entre el AGN y su galaxia huésped. Sin embargo, hay estudios que proponen que algunos de estos tipos son realmente una fase evolutiva de la actividad nuclear. En particular, Krongold et al. (2002) encontraron que los AGNs más oscurecidos **se encontraban en galaxias con alta formación estelar**, que a su vez parecían haber estado en procesos de **merger**, por lo que podría establecerse que para galaxias más jóvenes, la actividad nuclear es mayor.

De entre ellos, los AGN de baja luminosidad (LLAGN, Heckman, 1980) residen en la parte inferior de la función de luminosidad de los AGN, con luminosidades $L_{\text{bol}} < 10^{42}$ erg s⁻¹. Se cree que estos objetos pueden ser el enlace entre las galaxias normales y las activas (Márquez et al., 2017). La distribución espectral de energía de esta clase de objetos difiere de sus pares más luminosos (Nemmen, 2013). La importancia de esta clase de objetos reside en que, si efectivamente son núcleos activos, podrían explicar la demografía y evolución de AGNs, pues dominan la población en el Universo local (Ho, 2008). Su baja capacidad de emitir radiación puede ser explicada con un modelo en el que el disco de acreción es ineficiente alimentando al hoyo negro. Una teoría alternativa o complementaria es que estos objetos se encuentran altamente oscurecidos por lo que la densidad de estos objetos en el Universo podría estar subestimada (González-Martín et al., 2009). **Este trabajo también pretende profundizar en el entendimiento del material oscurecedor que rodea a los LLAGN.**

¹Todos los acrónimos están basados en las siglas en inglés.

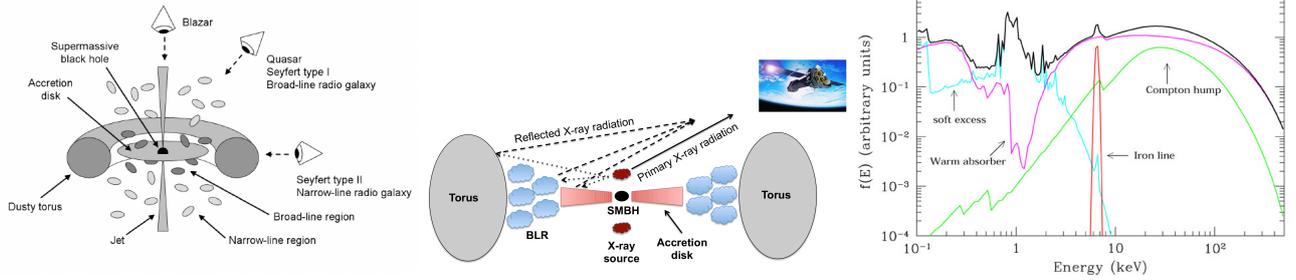


Figura 1: Izquierda: Modelo Unificado de AGN (ver texto). Imagen tomada de Zackrisson (2005). Centro: Ilustración de las componentes que pueden estudiarse a través de los rayos X. Derecha: Espectro en rayos X de un AGN. En colores se muestra cada una de las componentes que pueden ser trazadas mediante esta región del espectro. El color magenta representa el continuo oscurecido por absorbentes que pueden ser uniformes o grumosos, en verde la joroba de Compton, trazador de reflexión, al igual que la línea de hierro marcada en rojo. En azul el exceso suave que puede ser debido a la galaxia huésped e incluso a emisión que se escapa del absorbente grumoso. Tomadas de Ricci 2011. PhD thesis.

2. Estado del arte y objetivos

Esta tesis se dividirá en dos bloques: (1) encontrar las condiciones de desaparición del toro, y (2) encontrar candidatos a AGNs en la muestra de CALIFA.

2.1. Desaparición del toro en LLAGN

Ha sido planteado de manera teórica que el toro de los AGNs puede desaparecer a bajas luminosidades. En particular, Elitzur and Shlosman (2006) plantean que tanto la BLR como el toro pueden explicarse mediante un viento que sale del disco de acreción e ioniza todo el material a su paso, y mediante acción de la gravedad es capaz de sostener una estructura grumosa (BLR). Además, propone la existencia de un radio máximo donde el material es sublimado a estado gaseoso, y después del cual puede existir el polvo que oscurece las regiones más internas, que también puede encontrarse en forma de nubes. Así pues, para una luminosidad dada, existe una densidad de columna por debajo de la cual la BLR y el toro dejan de ser visibles porque no son sostenidos por el campo de radiación del AGN ($N_{\text{H}} < 10^{21} \text{ cm}^{-2}$, Elitzur and Ho, 2009). Esta luminosidad límite depende de las características mismas de la fuente, como la masa del agujero negro, y propiedades del viento (como la eficiencia, el cociente entre la tasa de acreción del agujero negro y del viento, y la densidad radial del viento, entre otros) aunque puede parametrizarse con la masa del agujero negro súper masivo ($L_{\text{lim}} = 4.7 \times 10^{39} M_{\text{BH}}^{2/3} \text{ erg s}^{-1}$, Elitzur and Ho, 2009). Incluso para AGNs muy masivos y eficientes es posible que no exista la BLR dependiente de estas propiedades. Pretendemos entender cuál es la condición de transición, y es por eso que en nuestra muestra usaremos distintos tipos de AGN con un rango de luminosidades amplio ($\log(L_{\text{bol}}) = [42 - 45]$) y que están clasificados como tipo 1 y 2.

Existen evidencias claras de que el material oscurecedor en AGNs cambia para los distintos objetos. **Además, algunos trabajos sugieren que el material oscurecedor y la componente de reflexión (que se estudia a través de rayos X, ver Sec. 4) están ligados.** Ricci et al. (2011) mostraron que la reflexión en rayos X es intrínsecamente mayor en AGN tipo 2 que en tipo 1, lo que apoya el resultado de un mayor recubrimiento de estas fuentes (Ramos Almeida et al., 2011). De manera similar, González-Martín et al. (2015) hicieron un trabajo enfocado en AGNs de baja luminosidad (LLAGN) con observaciones en el mediano infrarrojo. Encontraron evidencias de la desaparición del toro a bajas luminosidades que luego fueron confirmadas en más detalle por González-Martín et al. (2017).

Los estudios en rayos X podrían apoyar o desmentir resultados propuestos del polvo en infrarrojo. Además, estudios en rayos X podrían ayudar a esclarecer si en realidad esta componente de reflexión se genera en la misma región donde se encuentra el polvo. En particular, Esparza-Arredondo et al. (2019) encontraron, al hacer un ajuste simultáneo entre infrarrojo y rayos X, que ambas componentes provienen de la misma región para IC5063, un objeto tipo II. Sin embargo, aún no está claro si este es un comportamiento general de los AGNs tipo II, o en que fracción de los mismos se verifica (Esparza-Arredondo et. al (en prep.).

OBJETIVO 1: Estudiar la componente de reflexión en rayos X para estudiar la evolución del toro con la luminosidad. Hasta la fecha no hay un estudio de una muestra de LLAGN con observaciones por encima de 10 keV y buena sensibilidad para restringir la componente de reflexión. Sin embargo, el archivo de *NuSTAR* tiene suficientes datos para llevar a cabo este análisis (ver Sección 3). Nuestro trabajo se enfoca en restringir los parámetros de la componente de reflexión con ayuda de *NuSTAR* y restringir mejor los parámetros del absorbente en la línea de visión, para poder estimar la

fracción de reflexión y su relación con la cantidad de oscurecimiento y si esto depende de la luminosidad, tasa de acrecimiento o tipo de AGN. **Estudiaremos también la relación que esta componente pueda tener con la galaxia huésped, y qué tipos de toros se encuentran en diferentes tipos de galaxias.**

2.2. Candidatos de AGNs de la muestra de CALIFA

Existen diferentes mecanismos de ionización en las galaxias, de entre los cuales se encuentran la fotoionización por estrellas jóvenes y la ionización del gas debido a un AGN en las regiones centrales (Osterbrock, 1989). Sin embargo, pueden coexistir diferentes tipos de ionización en una galaxia, y determinar la naturaleza de esta puede hacerse solamente de manera local, al conocerse las poblaciones estelares y la distribución espacial del gas ionizado. A partir de estas clasificaciones locales, pueden establecerse tendencias entre las propiedades de la galaxia y la fuente de ionización, así como estimar el estado evolutivo de las galaxias y su relación con estas propiedades. Uno de los métodos más conocidos para medir la formación estelar en las galaxias es el diagrama Color-Magnitud (e.g., Strateva et al., 2001) o el diagrama de formación estelar frente a la masa estelar (SFR- M_* e.g., Renzini and Peng, 2015). En este último es posible distinguir claramente entre galaxias con formación estelar activa (SFGs) y galaxias rojas o retiradas (RGs) en los que la formación estelar cesó en algún momento del pasado. Sin embargo, entre estas dos regiones existe lo que se conoce como Valle Verde (Green Valey, GV) que son consideradas galaxias en transición. En esta región se ha demostrado que residen las galaxias que albergan un AGN (**ver panel superior de la Fig. 2, Sanchez, 2019**). La bimodalidad de este diagrama sugiere que existe un mecanismo que frena en algún momento la formación estelar, y la existencia de galaxias AGN en medio de estas dos fases da indicios de que el AGN puede ser una pieza clave en este escenario (Lacerda et al., 2020). Se ha establecido que el AGN puede frenar/iniciar la formación estelar en lo que se conoce como feedback negativo/positivo y que la evolución del AGN está íntimamente relacionada con la evolución de la galaxia huésped, ya que se ha encontrado que los AGNs residen en las galaxias más masivas, ya sea de tipo temprano o espirales tempranas (Sánchez et al., 2018). A partir de esta correlación es posible estudiar otras propiedades de las galaxias activas en comparación con galaxias normales.

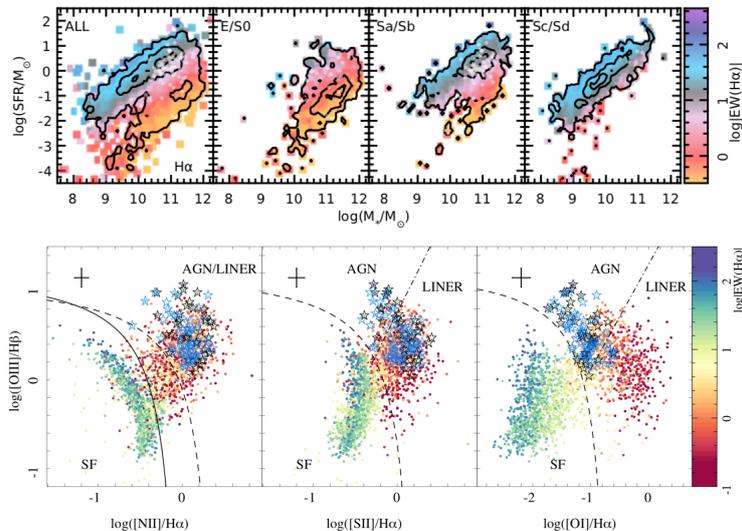


Figura 2: (arriba): Diagrama Color-Magnitud (CMD) de galaxias. En este diagrama se puede ver la distribución bimodal de galaxias, con galaxias más jóvenes en azul y galaxias más viejas en rojo. En esta figura, los círculos blancos muestran a las galaxias que albergan AGN y se encuentran en la zona del GV. (abajo): Diagramas de diagnóstico BPT. Las líneas a trazos muestran la división de las regiones (Kewley et al., 2001, 2006), mientras que la línea sólida representa la distinción entre una galaxia con formación estelar y una galaxia normal, establecida por Kauffmann et al. (2003). Créditos Sánchez et al. (2018).

Otro método para la clasificación y el estudio del estado de formación estelar en galaxias son los diagramas de diagnóstico, un ejemplo son los diagramas BPT (Baldwin et al., 1981). Estos diagramas grafican diferentes cocientes de línea para comparar los mecanismos de ionización dominantes. Estos cocientes de línea son: $[NII]/H\alpha$ vs $[OIII]/H\beta$, $[SII]/H\alpha$ vs $[OIII]/H\beta$ y $[OI]/H\alpha$ vs $[OIII]/H\beta$. Kewley et al. (2001, 2006) determinaron límites para distinguir entre galaxias starburst, regiones LINER y AGN, mientras que Kauffmann et al. (2003) establecieron límites para distinguir entre una galaxia activa y una galaxia con alta formación estelar. A partir de estos límites es posible determinar la naturaleza dominante de la galaxia, aunque esto no impide que otro mecanismo de ionización esté presente. La Fig. 2 (abajo) muestra la ubicación de galaxias cuyos mecanismos de ionización dominante son un AGN, estrellas jóvenes o regiones de baja ionización (LINER) de la muestra

de MaNGA (Sánchez et al., 2018). Estos diagramas parecen ser útiles para AGNs luminosos, aunque presentan fallas para AGNs de baja luminosidad (p.e. AGNs con emisión de líneas tipo LINER). De hecho se ha propuesto que en ocasiones esta emisión puede ser debida a procesos diferentes al de los AGN (e.g. Binette et al., 1994; Dopita and Sutherland, 1996; Sarzi et al., 2010; Singh et al., 2013; Papaderos et al., 2013; Belfiore et al., 2017).

Siguiendo los procedimientos más actuales de estas clasificaciones ópticas, Lacerda et al. (2020) buscaron AGNs en la muestra de *Calar-Alto Legacy Interl Field spectroscopy Area survey* (CALIFA). Esta muestra contiene 867 fuentes y las galaxias fueron seleccionadas de manera que cada galaxia ocupara la mayor parte del campo de visión del instrumento. Estas galaxias se encuentran en un rango de masas $\log [M/M_{\odot}] [7.6 - 11.9]$ y con redshifts en un rango $z [0.001 - 0.08]$, siendo en general una muestra representativa del Universo cercano. De acuerdo con Lacerda et al. (2020) sólo el 4% de estas presentan núcleos activos. De las 34 galaxias activas que encuentran, clasifican 10 como tipo I y 24 como tipo II. Además, encontraron que es más probable que los AGNs se encuentren en la transición entre galaxias con formación estelar y galaxias sin esta, de acuerdo con el diagrama SFR- M_{\star} . Esto se interpreta como un indicio de que los AGNs frenan la formación estelar, y que además se hospedan en galaxias cuya morfología es preferentemente Sb, Sc, que podría estar de acuerdo con el modelo evolutivo. Sin embargo, los AGNs de baja luminosidad están mayoritariamente en galaxias elípticas. Es posible que, debido a diferentes contribuciones a la ionización, las señales de estos AGNs hayan sido diluidas. Así esta clasificación óptica podría estar limitada hacia actividad nuclear prominente. Otra fuente de pérdida de las señales de actividad nuclear es si ésta se encuentra dentro de un material muy oscurecedor. Según el cociente de gas a polvo de la Vía Láctea, columnas de densidad del gas neutro de $\sim 10^{22} \text{cm}^{-2}$ producen enrojecimientos E(B-V) de más de 10 magnitudes en el óptico (Kahre et al., 2018), implicando la atenuación de las señales del AGN en el óptico. Una manera alternativa de encontrar AGNs es a través de los rayos X. Se trata de un procedimiento altamente utilizado en cartografiados del cielo profundo (p.e. COSMOS, Hasinger et al., 2007) En particular, mediante los rayos X se puede identificar a AGNs si en la observación se encuentra una fuente puntual y tiene una forma espectral que se identifica como una AGN (ver introducción y Figura 2). Por supuesto, esta técnica tiene limitaciones, si por ejemplo, el AGN se encuentra dentro de un cúmulo, lo que conlleva a que el gas caliente domine la emisión en rayos X.

OBJETIVO 2: Haremos una clasificación complementaria a través de los datos disponibles de rayos X para la muestra de CALIFA. La comparación entre la clasificación óptica y de rayos X ayudará a entender cuánto afecta la dilución de la galaxia en la clasificación nuclear a través del óptico. Esperamos que los rayos X sean especialmente buenos en complementar LLAGN (donde la galaxia pueda dominar en longitudes de onda ópticas) y AGNs muy oscurecidos. Dependiendo de los datos utilizados en rayos X podremos medir oscurecimientos de hasta $N_{\text{H}} 10^{23} - 10^{25} \text{cm}^{-2}$. La muestra de AGNs servirá como semilla para estudiar la relación entre la actividad nuclear y la galaxia que alberga dicha actividad, utilizando la información de la base de datos de CALIFA, para estudiar la co-evolución entre la galaxia y el AGN. Debido a la complejidad de este objetivo, se ha subdividido en dos partes (ver Sección de metodología para más detalles):

OBJETIVO 2.1: Caracterización de la emisión nuclear y circumnuclear de observaciones de *Chandra* de la muestra de CALIFA.

OBJETIVO 2.2: Catálogo de AGNs en CALIFA atendiendo a las observaciones disponibles en rayos X de *Chandra*, *XMM-Newton*, y *NuSTAR*. Determinación de la correlación entre el AGN y la galaxia huésped.

3. Muestra de objetos a estudiar

3.1. Desaparición del toro

La muestra inicial de LLAGNs fue tomada del catálogo de LLAGNs observados en rayos X por González-Martín et al. (2009). De las 82 fuentes en este catálogo, encontramos observaciones en la base de datos de *NuSTAR* para 24 de ellos. En comparación, tomamos la muestra de Seyferts de Panessa et al. (2006) y la muestra de Seyferts y LLAGNs de González-Martín et al. (2017). De las 60 fuentes en Panessa et al. (2006) y las 42 fuentes de González-Martín et al. (2017), encontramos un total de 42 fuentes con observaciones disponibles. Eliminamos objetos con baja S/N, de manera que **la muestra final comprende 15 LLAGNs y 40 Seyferts**. La tabla 2 (Apéndice) indica los parámetros observacionales de los objetos.

3.2. Candidatos a AGNs

La muestra inicial es el catálogo de 867 fuentes de CALIFA (Sánchez et al., 2012), con $z \sim 0.02$. De allí, buscamos observaciones disponibles en los satélites de rayos X contemporáneos: *Chandra*, *XMM-Newton*, *RXTE*, *Suzaku* y *NuSTAR*, encontrando 86, 92, 18, 48 y 92 observaciones disponibles para 144 fuentes. Además

restringimos la muestra a observaciones con buena S/N. En principio no utilizaremos los satélites *RXTE* y *Suzaku* en este análisis porque ofrecen espectros de peor calidad. *Chandra* ofrece espectros de peor calidad comparado con *XMM-Newton* pero permiten obtener imágenes de la mejor resolución espacial posible en rayos X (~ 0.5 arcsec) que nos servirán para estudiar si la fuente central es puntual. **La muestra consta de un total de 105 fuentes.** La tabla 3 (Apéndice) muestra las propiedades observacionales de dicha muestra.

4. Metodología

Los rayos X son importantes tanto para determinar si una galaxia hospeda un AGN, como para entender el mecanismo de acreción de los AGNs, porque parte de la emisión es debida un reprocesamiento de la emisión del disco de acreción en lo que se conoce como la corona de rayos X. A esta componente espectral se le conoce como componente intrínseca. Modelando esta emisión podremos estudiar el oscurecimiento en la línea de visión a través del ajuste espectral a modelos que incluyen la atenuación de la componente intrínseca por este oscurecimiento. Además, la emisión del AGN a altas energías permite estudiar la componente de reflexión, que se cree que se origina en las partes internas del toro (ver Fig. 1 (centro)). Esta tesis también estudiará la componente de reflexión, cuyas características más importante son (1) la línea de hierro XXV $\text{FeK}\alpha$ (a 6.4 keV) y (2) la joroba Compton que tiene su máximo de emisión entorno a 30 keV (ver Fig. 1 (derecha)). A medida que la cantidad de material en la línea de visión es mayor la componente de reflexión es más evidente en el espectro porque la componente intrínseca se ve afectada por este oscurecimiento. En el caso de objetos Compton-thick ($N_{\text{H}} > 3 \times 10^{24} \text{ cm}^{-2}$) la componente de reflexión domina en el rango de 2 a 10 keV.

4.1. Desaparición del toro

Para este proyecto, usaremos el satélite *NuSTAR* y para la reducción de los datos usaremos el *pipeline NuSTAR DAS²* v.1.4.4. En todos los casos, extraeremos una región de 1 minuto de arco, que se considera como región óptima para contener más del 90 % del flujo de la fuente. Además extraeremos una región de fondo para descontaminar nuestras medidas de la emisión que no venga de la fuente a analizar. Este procedimiento de extracción de espectros toma unos 15 min por fuente así que esperamos que se concluya en el plazo de unas semanas. Ya hemos hecho este procedimiento en la maestría (Osorio-Clavijo et al., 2020).

Una vez, extraído el espectro a estudiar, usaremos el software *xspec* para hacer el ajuste espectral de los datos. El modelo de ajuste espectral que pretendemos aplicar es el establecido para AGNs que incluye un continuo parcialmente cubierto por nubes, más una componente de reflexión, además de tener en cuenta la absorción Galáctica y algunas líneas de hierro (concretamente la línea de hierro neutra a 6.4 keV y las dos líneas de hierro ionizadas a 6.7 y 6.96 keV) que pueden estar o no presentes en las fuentes. Además vamos a implementar dos modelos de línea de base con dos modelos de reflexión ligeramente distintos, pero equivalentes. El primero proviene de un código de transferencia radiativa que incluye diferentes geometrías para la fuente reflectora, así como su estado de ionización, tomando en cuenta líneas fluorescentes, en particular la línea de hierro a 6.4 keV (PEXMON, Nandra et al., 2007). El segundo no toma en cuenta los mecanismos de emisión de esta línea de hierro a 6.4 keV por lo que se incluye aparte en el modelo de línea de base (PEXRAV, Magdziarz and Zdziarski 1995). La ventaja del primer modelo es que ofrece un escenario auto-consistente para producir la joroba Compton y la línea de hierro. La ventaja del segundo modelo es que nos va a permitir medir la línea de hierro de manera independiente para estudiar la consistencia con la componente de reflexión. Los modelos tienen el siguiente formalismo en nomenclatura del software:

$$F(E)[M1] = \text{phabs}_{\text{Gal}} * (\text{pcfabs}_{\text{intr}} * \text{zcutoffpl} + \text{pexmon} + \text{zgauss}_{6.7 \text{ keV}} + \text{zgauss}_{6.97 \text{ keV}}) \quad (1)$$

$$F(E)[M2] = \text{phabs}_{\text{Gal}} * (\text{pcfabs}_{\text{intr}} * \text{zcutoffpl} + \text{pexrav} + \text{zgauss}_{6.4 \text{ keV}} + \text{zgauss}_{6.7 \text{ keV}} + \text{zgauss}_{6.97 \text{ keV}}) \quad (2).$$

Las ec. (1) y (2) muestran estos dos modelos más la componente intrínseca parcialmente cubierta, y en cada caso, las líneas correspondientes. En la práctica ambos modelos son equivalentes pero para determinar el ancho de la línea de hierro es necesario usar la ec. (2) mientras que la ec. (1) es un escenario más físico. De este ajuste espectral determinaremos los siguientes parámetros: el índice de fotones (Γ), el oscurecimiento a lo largo de la línea de visión (N_{H}), el factor de recubrimiento de la fuente (f_{cov}), el ancho equivalente de la línea de hierro ($\text{EW}(\text{FeK}\alpha)$), la luminosidad de cada una de las componentes (incluida la línea de hierro) y la luminosidad total. También estimaremos como parámetro derivado la fracción de reflexión (C_{ref}) como el cociente de la luminosidad de la componente de reflexión sobre la luminosidad total de la fuente ($C_{\text{ref}} = L_{\text{ref}}/L_{\text{tot}}$). Una vez caracterizada la reflexión para cada fuente, estudiaremos si depende de otros parámetros. En concreto estos son las tendencias que planteamos estudiar:

1. Estudiaremos si el oscurecimiento en la línea de visión tiene impacto en la reflexión.
2. Estudiaremos si $\text{EW}(\text{FeK}\alpha)$ puede tener relación con la preponderancia de la componente de reflexión, con EW mayores a 500 eV sólo observados en objetos dominados por reflexión (Guainazzi et al., 2001).
3. Abordaremos si el cociente de luminosidad bolométrica sobre la luminosidad de Eddington (conocido como tasa de Eddington), que indica el estado de acreción del AGN, puede tener un impacto en la detección de la componente de reflexión.

²<https://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/nustar/analysis/>

4. Determinaremos la relación que la existencia y preponderancia de esta componente de reflexión tiene con la galaxia huésped.

4.2. Candidatos a AGN

Para la parte de reducción de datos de *NuSTAR* seguiremos el mismo procedimiento que en la sección anterior, mientras que para *Chandra* usaremos el software CIAO³, con una apertura de 3 y 25 segundos de arco, y para las observaciones de *XMM-Newton* usaremos el software SAS⁴, con sus archivos de calibración más actuales, con una apertura de 25 segundos de arco. De nuevo, ya tenemos la experiencia previa de procesar y analizar este tipo de datos y, basados en esta experiencia, estimamos que el tiempo de procesamiento de datos será de entorno a un mes. Seguiremos la siguiente metodología:

1. Análisis morfológico de las fuentes con datos de *Chandra* (OBJETIVO 2.1). Pretendemos caracterizar si son fuentes puntuales (lo que se espera de un AGN), cuánta emisión extra-nuclear se observa y en qué escalas espaciales. Para ello, usaremos las observaciones de *Chandra* puesto que disponen de la mejor resolución espacial. Realizaremos simulaciones de la PSF de este satélite y por medio de perfiles radiales podremos comparar estas simulaciones con las observaciones, para aislar la fuente puntual de la extendida. Utilizaremos imágenes ópticas disponibles para la muestra de CALIFA para comparar la morfología en rayos X con la morfología óptica para estudiar el origen de la emisión extendida en rayos X.
2. Caracterización espectroscópica de la emisión puntual y extendida de las fuentes con datos de *Chandra* (OBJETIVO 2.1). El estudio de la emisión nuclear nos permitirá comenzar a estudiar qué fuentes tienen las características espectrales de un AGN en rayos X (dureza del espectro a través del índice de fotones, la existencia de la línea FeK α , y oscurecimiento de la fuente). El estudio del espectro de la emisión circumnuclear permitirá aislar esta contribución cuando usemos espectros de peor resolución espacial.
3. Caracterización espectroscópica de la muestra completa (OBJETIVO 2.2). Fijaremos la contribución circumnuclear extraída del análisis de los espectros de *Chandra* y modelaremos el espectro resultante con el modelo de línea de base que se discute abajo.

El ajuste espectral se hará con `xspec`. En cuanto al modelo de línea de base, para las observaciones de *NuSTAR* usaremos la ec. (1) descrita en la sección anterior que tiene en cuenta la componente de reflexión y no contiene componentes de rayos X suaves, puesto que este satélite no contiene información por debajo de 3 keV. En el caso de *Chandra* y *XMM-Newton* el modelo de línea de base debe incluir la componente de rayos X suaves. Además, en este caso no podemos restringir la componente de reflexión puesto que estos satélites no contienen información por encima de 10 keV. Así, en este caso usaremos un modelo línea de base ligeramente distinto que toma en cuenta estas peculiaridades. Este modelo contiene una componente térmica (usaremos MEKAL, Mewe et al. 1985, 1986; Liedahl et al. 1995), más la componente intrínseca (como una ley de potencias) que también pasará a través de un absorbente parcial, y la línea FeK α . En terminología del software `xspec`:

$$F(E) = \text{phabs}_{\text{Gal}} * (\text{mekal} + \text{pcfabs}_{\text{intr}} * \text{zcutoffpl} + \text{zgauss}_{6.4 \text{ keV}}) \quad (3)$$

Además también probaremos modelos de línea de base que no contengan al AGN. Entre ellos usaremos la combinación de una o más componentes térmicas que describen de forma realista la emisión de brotes de formación estelar. También utilizaremos la combinación de uno o varios cuerpos negros que pueden explicar la emisión difusa que produce el medio intracúmulo en galaxias.

El resultado esperado es un listado de objetos que albergan actividad nuclear utilizando los rayos X. Compararemos con resultados previos (e.g. Lacerda et al., 2020) para determinar qué tipo de AGNs pierde cada longitud de onda o cómo cambian los porcentajes reportados previamente con los nuestros. Re-estudiaremos los diagramas BPT para saber en que región caen los AGN que se clasifiquen en rayos X pero no en el óptico y biceversa. Con ello pretendemos establecer cuáles son las dificultades de clasificar objetos como AGN a través del óptico y rayos X.

5. Cronograma de actividades

- S1 Definiremos la línea de trabajo y los proyectos a desarrollar. Posteriormente definiremos las muestras que utilizaremos y haremos la reducción de datos correspondiente al objetivo 1 del proyecto (desaparición del toro). Además, estudiaré literatura relacionada con el tema de la desaparición del toro y la clasificación de AGNs desde las diferentes longitudes de onda. Prepararemos el proyecto doctoral.
- S2 Realizaremos los ajustes espectrales necesarios para la muestra de la desaparición del toro. Trabajaremos en un draft del artículo incluyendo estos resultados. Así mismo, se espera hacer el procesado de los datos de *Chandra* de la muestra de CALIFA y el análisis morfológico de los mismos. Realizaremos una estancia corta en el IA-UNAM para trabajar con el Dr. Sebastián Sánchez en la muestra de CALIFA.

³<http://asc.harvard.edu/ciao>

⁴https://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/xmm/xmmhp_analysis.html

- S3 Enviaremos el artículo relacionado con la desaparición del toro y se planea asistir a un congreso internacional para enseñar los resultados de este trabajo. Además, haremos los ajustes espectrales de la contribución nuclear y circumnuclear de los datos de *Chandra* de la muestra de CALIFA. Se planea hacer una estancia en el IA con el Dr. Sebastián Sánchez para discutir los primeros resultados del análisis del objetivo 2 del proyecto. Este semestre se presentará el examen de candidatura.
- S4 Haremos las correcciones del arbitraje del primer artículo. Redactaremos el segundo artículo recogiendo el análisis morfológico de la muestra de CALIFA. Reduciremos y analizaremos los espectros de *XMM-Newton* y *NuSTAR* de CALIFA, incluyendo descontaminación circumnuclear. Se espera que durante este semestre haga una estancia en una institución de prestigio, impartiendo un seminario en esta institución.
- S5 Enviaremos el segundo artículo de la tesis que incluirá el análisis morfológico y espectral de las observaciones de *Chandra* de la muestra de CALIFA. Haremos un catálogo de AGNs de acuerdo a las observaciones disponibles de rayos X de la muestra y compararemos con los resultados ópticos.
- S6 Vamos a responder las indicaciones del árbitro en cuanto al segundo artículo enviado el semestre anterior. Comenzaremos con la redacción de un tercer artículo sobre el catálogo de AGNs de la muestra completa con observaciones de rayos X de CALIFA (incluyendo *Chandra*, *XMM-Newton*, *NuSTAR*). Al mismo tiempo iniciaremos la redacción de la tesis. Este semestre planeamos asistir a un congreso internacional a exponer los resultados obtenidos con la muestra de rayos X de CALIFA.
- S7 Terminaremos de escribir el tercer artículo y lo enviaremos. El resto del semestre está dedicado a escribir la tesis doctoral, que esperamos que sea por medio de recopilación de artículos.
- S8 Contestaremos a los comentarios del arbitraje del tercer artículo. Realizaremos los trámites burocráticos de grado y contestaremos a los comentarios del sinodo para la titulación.

El objetivo es publicar al menos los dos primeros artículos dentro del tiempo establecido para la tesis. El tercer artículo puede estar enviado o aceptado después de los trámites de presentación de tesis.

| | S1 | S2 | S3 | S4 | S5 | S6 | S7 | S8 |
|--------------|----|----|----|----|----|----|-----|-----|
| Objetivo 1 | ★ | ★★ | ★ | ★ | | | | |
| Objetivo 2.1 | ★ | ★ | ★ | ★ | ★★ | ★ | | |
| Objetivo 2.2 | ★ | | | ★ | ★★ | ★ | ★ | ★ |
| Otros | ★ | ★ | ★★ | ★ | | ★★ | ★★★ | ★★★ |

Tabla 1: Guía de tiempos. Cada estrella representa un mes de trabajo: azul para desarrollo de los objetivos y redacción/envío de artículos; rojo para trámites burocráticos y redacción de tesis; y café para estancias académicas y congresos. Nótese que en los semestres en los que no haya asistencia a congresos internacionales, se espera presentar seminarios en instituciones a nivel nacional.

6. Índice tentativo de la tesis

- Capítulo 1: **Introducción**
- Capítulo 2: **Desaparición del toro**
- Capítulo 3: **Candidatos a AGN de CALIFA**
- Capítulo 4: **Conclusiones generales**
- Capítulo 5: **Trabajo a futuro**

Bibliografía

- Antonucci+93 ARA&A 31, 473
- Baldwin+81 PASP 93, 5
- Begelman+12 MNRAS 420, 2912
- Belfiore+17 MNRAS 466, 2517
- Bennert+05 PhD Thesis
- Binette+94 A&A 292 13
- Davidson+79 RMP 51, 715
- Davies+16 MNRAS 462, 1616
- Dopita+96 ApJS 102, 161
- Elitzur+06 APJL 648, L101
- +09 APJL 701, L91
- Esparza+19 APJ 886, 125
- González-Martin+06 APJ 460, 45
- +09 A&A 506, 1107
- +15 A&A 578, A74
- +17 APJ 841, 37
- Guainazzi+01 MNRAS 323, 75
- Hasinger+07 AJSS 172, 29
- Heckman80 A&A 87, 142
- Ho08 ARA&A 46, 475
- Kauffmann+03 MNRAS 346, 1055
- Kahre+18 APJ 855, 133
- Kewley+01 APJ 556, 121
- +06 MNRAS 372, 961
- Krongold+02 APJ 572, 169
- Lacerda+20 MNRAS 492, 3073
- Liedahl+95 APJL 438, L115
- Magdziarz+95 MNRAS 273, 837
- Márquez+17 FASS 4, 34
- Mewe+85 A&AS 62, 197
- +86 A&AS 65, 511
- Nandra+07 MNRAS 382, 194
- Nemmen+07 MNRAS 377, 1652
- +13 arXiv:1301.7719
- Osorio+20 MNRAS 491, 29
- Osterbrock89 Book
- Panessa+06 A&A 455, 173
- Papaderos+13 A&A 555, L1
- Ramos-Almeida+11 APJ 731, 92
- Ricci+11 A&A 532, A102
- Sánchez+12 A&A 538, A8
- +18 RMxAA 54, 217
- +19 arXiv:1911.06925
- Sarzi+10 MNRAS 402, 2187
- Singh+13 A&A 558, A43
- Strateva+01 AJ 122, 1861
- Urry+95 PASP 107, 803
- Zackrisson05 PhD Thesis

Apéndice

A1. Muestra de desaparición del toro

| Nombre | Redshift | Tipo AGN | Nombre | Redshift | Tipo AGN | Nombre | Redshift | Tipo AGN | Nombre | Redshift | Tipo AGN |
|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|----------|----------|
| (1) | (2) | (3) | (1) | (2) | (3) | (3) | (1) | (2) | (3) | (3) | (3) |
| NGC833 | 0.0128 | L2 | NGC4941 | 0.0033 | S2 | NGC3079 | 0.0038 | L2 | NGC5643 | 0.0026 | S2 |
| NGC835 | 0.0079 | L2 | NGC4939 | 0.0085 | S2 | NGC3147 | 0.0092 | S2 | NGC5728 | 0.0070 | S2 |
| NGC1052 | 0.0048 | L1.9 | NGC4945 | 0.0009 | S2 | NGC3281 | 0.0106 | S2 | E138-G001 | 0.0091 | S2 |
| MRK1066 | 0.0120 | S2 | NGC5005 | 0.0046 | L1 | NGC3393 | 0.0125 | S2 | NGC6240 | 0.0244 | L2 |
| 3C84 | 0.0161 | S1.5 | NGC5135 | 0.0014 | S2 | NGC3621 | 0.0015 | S2 | H1846-786 | 0.0741 | S1 |
| NGC1358 | 0.0134 | S2 | M51 | 0.0016 | S2 | NGC3628 | 0.0022 | L2 | MRK509 | 0.0561 | S1 |
| NGC1386 | 0.0037 | S2 | NGC5256 | 0.0280 | L2/S2 | NGC3690B | 0.0104 | L2 | NGC7130 | 0.0161 | L2 |
| NGC2110 | 0.0083 | S2 | UGC08696 | 0.0377 | L2 | NGC3783 | 0.0111 | S1 | NGC7172 | 0.0079 | S2 |
| E005-G004 | 0.0060 | S2 | IC4329A | 0.0160 | S1 | NGC3998 | 0.0046 | L2 | NGC7213 | 0.0051 | S1 |
| MRK3 | 0.0143 | S2 | NGC5347 | 0.0050 | S2 | NGC4258 | 0.0016 | S1.9 | NGC7314 | 0.0039 | S2 |
| NGC2273 | 0.0067 | S2 | Circinus | 0.0009 | S2 | NGC4395 | 0.0009 | S1 | NGC7331 | 0.0031 | L2 |
| NGC2655 | 0.0057 | L2 | NGC5506 | 0.0056 | S2 | NGC4388 | 0.0045 | S2 | NGC7479 | 0.0066 | S1.9 |
| M81 | 0.0009 | S1.5 | NGC5548 | 0.0251 | S1 | NGC4507 | 0.0118 | S2 | | | |
| NGC4579 | 0.0043 | L1 | MRK231 | 0.0421 | S2 | NGC7582 | 0.0049 | S2 | | | |

Tabla 2: Parámetros observacionales de la muestra seleccionada para el OBJETIVO 1.

A2. Muestra de CALIFA

| Nombre | Redshift | Tipo Morf. | Nombre | Redshift | Tipo Morf. | Nombre | Redshift | Tipo Morf. |
|----------------|-----------|------------|--------------|-----------|------------|------------------------|----------|------------|
| (1) | (2) | (3) | (1) | (2) | (3) | (1) | (2) | (3) |
| NGC0495 | 0.013723 | Sab | NGC4291 | 0.005861 | E4 | NGC0529 | 0.016084 | E4 |
| 2MASXJ12095669 | 0.03146* | E4 | NGC0548 | 0.018026 | E4 | NGC4470 | 0.007809 | Sc |
| ARP118 | 0.02882* | E5 | NGC0647 | 0.042499 | E7 | NGC4479 | 0.002922 | E6 |
| ARP143 | 0.013393 | Irr | NGC0675 | 0.017796 | Sa | NGC4676A | 0.022059 | Sdm |
| ARP148 | 0.034524 | Sdm | NGC0716 | 0.015204 | Sb | UGC12127 | 0.027589 | E1 |
| ARP220 | 0.018126 | Sd | NGC0741 | 0.018549 | E1 | NGC4874 | 0.023937 | E0 |
| ASAS15cd | 0.034272 | Scd | NGC0768 | 0.023419 | Sc | NGC4956 | 0.015844 | E1 |
| BKD2008WR209 | 0.18760* | Sd | NGC0833 | 0.012889 | Sa | NGC5358 | 0.008046 | S0 |
| NGC0924 | 0.014880 | E8 | NGC5532 | 0.024704 | E4 | UGC11680NED01 | 0.025988 | Sb |
| ESO540-G003 | 0.010984 | Sb | NGC1056 | 0.005154 | Sa | NGC5546 | 0.024430 | E3 |
| PGC093282 | 0.076247 | E6 | NGC1060 | 0.017312 | E3 | NGC5559 | 0.017232 | Sb |
| NGC1132 | 0.023133 | E6 | NGC5576 | 0.005023 | E3 | NGC7684 | 0.017114 | S0 |
| IC0485 | 0.027813 | Sab | NGC1259 | 0.019400 | E3 | NGC5610 | 0.016888 | SBb |
| NGC1270 | 0.016561 | E2 | NGC5623 | 0.011194 | E7 | NGC7591 | 0.016531 | Sbc |
| IC1683 | 0.016241 | Sb | NGC1271 | 0.019183 | S0 | NGC5656 | 0.010551 | Sb |
| IC1689 | 0.015231 | Sab | NGC5845 | 0.004910 | E7 | NGC7469 | 0.016317 | Sc |
| IC2341 | 0.017155 | E6 | NGC5908 | 0.011028 | Sa | NGC6394 | 0.028306 | Sbc |
| NGC2484 | 0.042836 | E4 | NGC5929 | 0.008312 | Sb | NGC6285 | 0.018983 | Sb |
| NGC0890 | 0.01327* | E6 | NGC2553 | 0.015748 | Sb | NGC6027 | 0.014834 | Sa |
| NGC2558 | 0.016672 | Sb | NGC6166NED01 | 0.031035 | E4 | UGC9562 | 0.004310 | Sc |
| NGC2577 | 0.006878 | E7 | NGC6173 | 0.029300 | E6 | UGC00005 | 0.024253 | Sbc |
| NGC2623 | 0.018509 | Scd | NGC6251 | 0.024710 | E5 | UGC06583 | 0.02065* | Sd |
| MCG-02-02-086 | 0.055672 | E7 | NGC2639 | 0.011128 | Sa | UGC06312 | 0.021098 | Sab |
| MCG+05-30-111 | 0.018406 | Sd | NGC6338 | 0.027303* | E5 | NGC4861 | 0.00279* | BCD |
| MCG+08-19-17 | 0.029963* | Sdm | NGC2780 | 0.006601 | Sbc | NGC1129 | 0.01733* | E1 |
| MCG+09-22-53 | 0.011758 | Scd | NGC2787 | 0.002322 | S0 | UGC08250 | 0.017646 | Sc |
| NGC2805 | 0.005779 | Sc | NGC7052 | 0.015584 | E5 | 2MASXJ01144386+0017100 | 0.04519* | Sab |
| NGC2906 | 0.007138 | Sbc | NGC7236 | 0.026282 | S0 | UGC05187 | 0.004887 | Sdm |
| NGC0192 | 0.013787 | Sab | NGC3605 | 0.002205 | E6 | NGC693 | 0.00523* | S0a |
| NGC0384 | 0.014120 | E4 | NGC3842 | 0.021068 | E3 | UGC08250 | 0.017646 | Sc |
| NGC0447 | 0.018670 | Sa | NGC3990 | 0.002322 | S0 | PGC32873 | 0.024921 | S0 |
| NGC7768 | 0.027322 | E5 | UGC00987 | 0.015537 | Sa | UGC04132 | 0.017409 | Sbc |
| NGC7803 | 0.017899 | Sb | UGC02690 | 0.020965 | Scd | PGC11179 | 0.022886 | S0 |
| PGC0014370 | 0.014473 | Sc | UGC03789 | 0.010864 | Sb | UGC03995 | 0.015844 | Sb |
| UGC12348 | 0.025454 | Sb | UGC03973 | 0.022189 | Sbc | PGC10254 | 0.031715 | E7 |

Tabla 3: Parámetros observacionales de las fuentes: (1) Nombre de la fuente. (2) corrimiento al rojo o redshift. (3) Tipo de galaxia.