



Facultad
de
Ciencias

Análisis de la emisión de Núcleos Galácticos Activos con CIGALE

Analysis of Active Galactic Nuclei emission with CIGALE

Trabajo Fin de Grado para acceder al

Grado en Física

Autor: Daniel Marqués Natal

Directora: Silvia Mateos Ibañez

Co-Directora: Rosa María Domínguez Quintero

Junio 2023

Agradecimientos

Me gustaría comenzar este trabajo agradeciendo a las personas que me han ayudado a realizarlo. En particular quiero dar las gracias tanto a mi directora, Silvia Mateos, como a mi codirectora, Rosa María Domínguez, por todo lo que he aprendido con ellas. También me gustaría agradecer a Giorgos Mountrichas por toda la ayuda que me ha prestado, resolviendome infinidad de dudas sobre el funcionamiento de CIGALE.

Quiero dar las gracias también a mis padres, ya que, sin su confianza y apoyo, nunca habría podido estudiar esta carrera.

Por último, me gustaría agradecer especialmente a Ana, la persona con la que he compartido tantos buenos momentos durante estos cuatro años. Gracias por ser como eres, sin tu ayuda esto hubiese sido mucho más difícil.

Resumen

El objetivo principal de este TFG es el estudio de las propiedades de los Núcleos Galácticos Activos (AGNs) y sus galaxias anfitrionas a través del análisis de sus distribuciones espectrales de energía (SED). Para ello, se ha utilizado una muestra de 89 candidatos a AGNs seleccionados a partir de colores en el infrarrojo medio.

Se ha comenzado llevando a cabo un aprendizaje del funcionamiento de CIGALE (Code Investigating GALaxy Emission), un código diseñado en python para estimar distintas propiedades físicas de los AGN y de las galaxias que los albergan a través del ajuste de sus SEDs. A continuación, se ha construido la SED de cada objeto según el formato requerido por CIGALE para, posteriormente, proceder a correr el programa.

Realizando el análisis de los resultados obtenidos se ha encontrado que: (1) añadir los flujos en rayos X a la SED introduce varias ventajas, destacando la considerable mejora en la fiabilidad de la clasificación de los AGNs según el ángulo de inclinación del toro respecto a nuestra línea de visión; (2) se ha podido confirmar con CIGALE la naturaleza AGN en la mayoría de objetos de la muestra que no presentan propiedades de AGN en otras bandas (rayos X y UV/óptico); (3) la luminosidad a $6 \mu\text{m}$ de los AGNs puede ser utilizada como trazador de su poder; (4) no se ha observado ninguna diferencia destacable en la masa y ritmo de formación estelar de las galaxias anfitrionas según la clasificación espectroscópica del AGN que albergan en su interior.

Palabras clave: núcleo galáctico activo, ajuste de SED, galaxias, infrarrojo, rayos X

Abstract

The main objective of this TFG is to study the properties of Active Galactic Nuclei (AGNs) and their host galaxies through the analysis of their spectral energy distributions (SED). For this purpose, a sample of 89 AGN candidates selected from mid-infrared colors has been used.

First, a learning of the performance of CIGALE (Code Investigating GALaxy Emission), a code designed in Python to estimate different physical properties of AGNs and their host galaxies by fitting the SED, has been carried out. Then, the SED of each object has been constructed according to the format required by CIGALE to, subsequently, start running the program.

The analysis of the results obtained showed that: (1) adding X-ray fluxes to SED introduces several advantages, highlighting the considerable improvement in the classification of AGNs according to the torus inclination angle with respect to our line of sight; (2) it has been possible to confirm with CIGALE the AGN nature of most of the objects in our sample that do not show AGN properties in other bands (X-ray and UV/optical); (3) the luminosity at $6\ \mu\text{m}$ of AGNs can be used as a tracer of their power; (4) no remarkable difference has been observed in the mass and star formation rate of galaxies according to the spectroscopic classification of the AGN inside them.

Key words: active galactic nuclei, SED fitting, galaxies, infrared, X-rays

Índice general

1. Introducción	7
1.1. Propiedades de los AGNs	7
1.2. El modelo estándar	9
1.3. El modelo unificado	10
1.4. Clasificación espectroscópica	11
1.5. Selección de AGNs	13
1.5.1. MIR	13
1.5.2. UV/óptico	13
1.5.3. Rayos X	14
1.6. Objetivos	14
2. Observaciones multifrecuencia y muestra de AGNs	15
2.1. Observaciones multifrecuencia	15
2.1.1. Sloan Digital Sky Survey	15
2.1.2. Two Micron All-Sky Survey	16
2.1.3. United Kingdom Infra-Red Telescope	17
2.1.4. Wide-field Infrared Survey Explorer	18
2.1.5. X-ray Multi-mirror Mission - Newton	19
2.2. Definición de la muestra	20
3. CIGALE	23
3.1. Arquitectura	24
3.1.1. Input	24
3.1.2. Módulos	26

3.1.3. Salida	28
4. Análisis y Resultados	31
4.1. Construcción de la SED	31
4.2. Ajustes con CIGALE	34
4.3. Comparaciones entre ajustes con/sin los rayos X	35
4.3.1. Fracción de AGN	35
4.3.2. Clasificación de los AGNs	37
4.3.3. Propiedades de las galaxias	38
4.4. Identificación de AGNs con CIGALE	39
4.5. Luminosidad a $6 \mu\text{m}$ como trazador del poder del AGN	40
4.6. Comparación de las propiedades de las galaxias anfitrionas de AGNs tipo 1 y 2 .	41
5. Discusión	43
5.1. Impacto de añadir los rayos X a los ajustes con CIGALE	43
5.2. Identificación de AGNs con CIGALE	43
5.3. Importancia de la luminosidad IR	44
5.4. Propiedades de las galaxias	44
5.5. Conclusiones finales	44

Capítulo 1

Introducción

Una galaxia se dice que es activa, cuando cuenta con una luminosidad excepcionalmente alta y variable que muestra signos de la existencia de procesos muy energéticos relacionados con su zona central o núcleo. En el centro de estas galaxias se puede encontrar un núcleo galáctico activo, AGN por sus siglas en inglés (Active Galactic Nuclei), que es una región extremadamente luminosa y que emite una gran cantidad de radiación en diversas longitudes de onda, incluyendo rayos X, ultravioleta, óptico, infrarrojo y ondas de radio. Estos objetos desempeñan un papel crucial en la evolución y formación de las galaxias, ya que la energía liberada por ellos influye considerablemente en su entorno.

En esta introducción, se abordarán: sus principales características observacionales, su estructura común según el modelo estándar para la unificación de los AGNs, cómo se clasifican y finalmente, las técnicas que se utilizan para la selección de AGN, en particular las utilizadas en este trabajo.

1.1. Propiedades de los AGNs

Los AGNs son los objetos más persistentes de todo el universo observable, con luminosidades que pueden llegar a alcanzar los 10^{48} erg/s [1]. Estas luminosidades, se considera que provienen de una región muy compacta en el centro de las galaxias, en cuyo núcleo se encuentra un agujero negro supermasivo, SMBH por sus siglas en inglés (SuperMassive Black Hole), el cual acreta toda la materia a su alrededor, produciéndose así una enorme liberación de energía.

La variabilidad, referida a los cambios en el brillo o la intensidad de la luz emitida por un

objeto celeste a lo largo del tiempo, es otra de las características a resaltar de los AGN. Estos objetos tienen la capacidad de cambiar su brillo o emisión en diferentes longitudes de onda en un período de tiempo relativamente corto, desde horas hasta años, lo que implica que la emisión procede de regiones muy pequeñas.

Por último, una de las propiedades más interesantes de los AGNs y, que los hace únicos, es que su emisión es detectable en todo el espectro electromagnético. Esto es importante, ya que, además de que se pueden encontrar AGNs en todas las bandas espectrales, cada uno de los distintos rangos de longitudes de onda proporciona información distinta sobre las propiedades físicas de estos objetos. Esto puede observarse gráficamente en una distribución espectral de energías, SED por sus siglas en inglés (Spectral Energy Distribution).

Una SED es una representación de la cantidad de energía que emite un objeto astronómico en función de la longitud de onda o frecuencia de la radiación. Las SEDs son utilizadas para identificar los diferentes procesos físicos que tienen lugar en los AGNs, además de para conocer diferentes propiedades físicas del objeto estudiado como su luminosidad bolométrica¹, entre otras.

Su construcción se realiza a partir de mediciones en diferentes longitudes de onda, ajustándolas a modelos teóricos, como se ha hecho en este trabajo, para poder entender así la naturaleza del objeto. Se muestra un ejemplo de SED, con información acerca de las principales componentes de un AGN, en la Figura 1.1

¹Luminosidad total producida por el AGN.

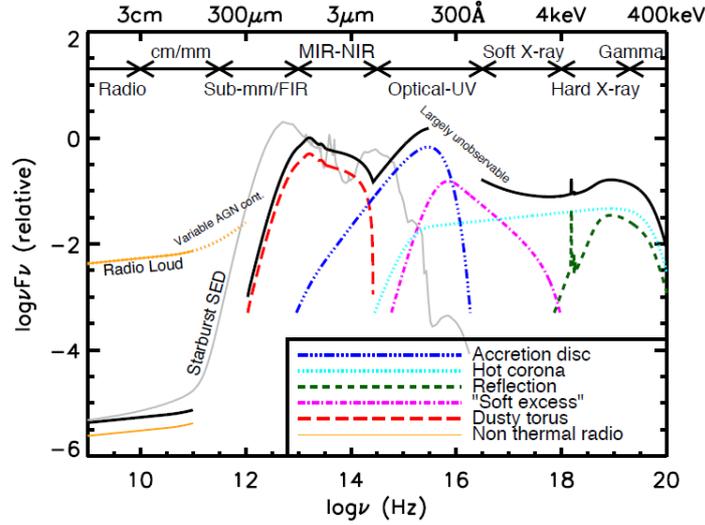


Figura 1.1: Representación esquemática de la SED de un AGN con información de sus principales componentes (curvas de colores). Fuente: Harrison (2014) [2]

1.2. El modelo estándar

Actualmente, está aceptado que todos los AGNs comparten una estructura común, compuesta por:

- **Agujero Negro Supermasivo (SMBH):** Configura el núcleo del AGN, con masas entre $10^6 - 10^9 M_{\odot}$ ². Debido a esto, su gravedad es tan intensa que pueden atraer y capturar materia circundante, como gas, polvo y estrellas, a través de un proceso llamado acreción.
- **Disco de acreción:** El material que cae hacia el SMBH forma un disco plano y giratorio con un radio exterior de $10^{-2} pc$ ³ y un radio interior de $10^{-5} pc$ [3].
- **Corona:** Es una región de plasma caliente compuesta por electrones y positrones acelerados por campos magnéticos intensos. Algunos de los fotones en el rango UV/óptico que recibe del disco de acreción son reemitidos por *scattering Compton inverso*, produciendo así la emisión en rayos X.
- **Región de líneas anchas, Broad Line Region (BLR):** Situada a una distancia de

² M_{\odot} : símbolo utilizado para representar la masa del sol $\sim 2 \cdot 10^{30} Kg$

³pc : unidad de longitud equivalente a $3.0857 \cdot 10^{16} m$

0.01-1 pc del agujero negro central [4], esta región está formada por nubes de polvo libres de gas ionizado. Tiene una densidad de electrones de entorno 10^8 cm^{-3} y una velocidad del gas de 3.000-10.000 Km/s [5]. Los fotones UV/ópticos del disco de acreción ionizan el gas en el BLR produciendo líneas de emisión anchas permitidas.

- **Toro de gas y polvo:** Más allá de la BLR, se encuentra un toro de gas y polvo que produce una extinción importante de la radiación proveniente de su interior. Observacionalmente se ve que una gran mayoría de AGNs, presentan una emisión en el infrarrojo medio (MIR) e infrarrojo lejano (FIR) muy significativa, que es el resultado del reprocesado de la radiación X y UV reemitida en estos rangos de longitud de onda infrarroja.
- **Región de líneas estrechas, Narrow Line Region (NLR):** Situada a una distancia de 100-1000 pc del agujero negro central. Tiene una densidad de electrones menor que la BLR, del orden de 10^3 cm^{-3} . Las líneas estrechas se producen por la emisión de nubes de gas más alejadas del SMBH y, por tanto, con menor ionización que en la BLR.
- **Jet relativista:** Observado en algunos AGNs, los jets relativistas se forman en las proximidades del disco de acreción, de forma que, expulsan un chorro de partículas de alta energía a lo largo de los polos del agujero negro hasta distancias de kpc o Mpc.

1.3. El modelo unificado

El modelo unificado de AGNs es una teoría en la que se postula que las diferentes apariencias observadas en los AGNs son debidas a su orientación relativa con respecto a nuestra línea de visión[4]. Así, los AGNs de diferentes tipos pueden ser variantes del mismo objeto, pero observados desde ángulos diferentes. Se muestra una representación esquemática de las principales estructuras de un AGN y diferencias observacionales según el ángulo de visión en la Figura 1.2. Según este modelo, existen dos tipos de AGNs: en el caso de los AGN tipo 1, se cree que el toro está orientado de tal manera que la línea de visión del observador permite ver con claridad la región central del AGN: disco de acreción, corona y BLR. Como resultado, en los AGN tipo 1 se observan líneas de emisión amplias y estrechas en sus espectros ópticos y ultravioleta, además de la región nuclear del AGN.

En el caso de los tipo 2, se cree que el toro del AGN está orientado de tal manera que intercepta

la línea de visión del observador, no atisbando así ni el disco de acreción, ni la corona, ni la BLR, por lo que se dice que la región central está oscurecida. En su lugar, solo se distingue la NLR que se encuentra más alejada del agujero negro central. Por todo esto, en los tipo 2 no se detectan las líneas anchas ni el continuo azul, ambos procedentes de la BLR, además de que la emisión en rayos X está absorbida[4].

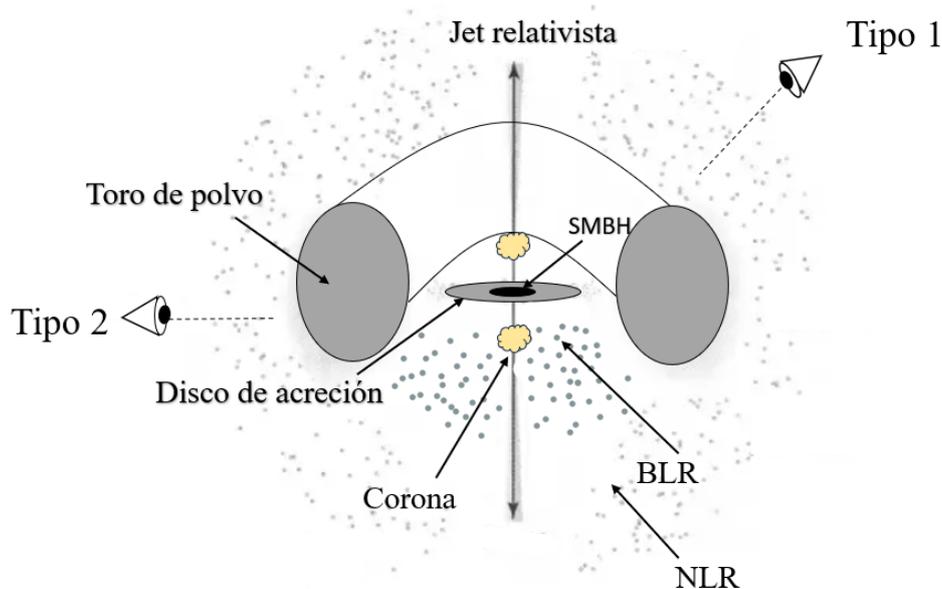


Figura 1.2: Representación simplificada de la estructura interna de un AGN, así como las diferencias observacionales según la línea de visión del observador, según el modelo estándar de unificación. Adaptado de: An introduction to Modern Astrophysics (2007) pp.1117 [6]

1.4. Clasificación espectroscópica

En los últimos años ha habido una proliferación de clases de AGN que conforman una amplia variedad de estos objetos. Existen distintos criterios a la hora de clasificar los AGNs: basados en su orientación, el ritmo de acreción del SMBH, la detección de fuertes *jets* relativistas o la detección (o no) de líneas de emisión anchas, entre otros[7].

La clasificación utilizada en el presente trabajo distingue a los AGNs en **Tipo 1** y **Tipo 2**, según las características de sus líneas de emisión observadas en el rango UV/óptico, principalmente sus anchuras:

- Tipos 1:** Son aquellas fuentes para las que detectamos líneas de emisión, tanto permitidas como semiprohibidas, anchas ($\text{FWHM} \approx 1000 - 20.000 \text{ Km/s}$) y estrechas ($\text{FWHM} \approx 300-1.000 \text{ Km/s}$). La detección de líneas anchas presagia una alta ionización, indicativo de la presencia de gas ionizado en la región próxima al agujero negro supermasivo. Además, en estas fuentes, se puede observar una región central brillante, de origen no estelar y visible a todas las longitudes de onda [7], destacando, por otro lado, la presencia de una fuente puntual de rayos-X.

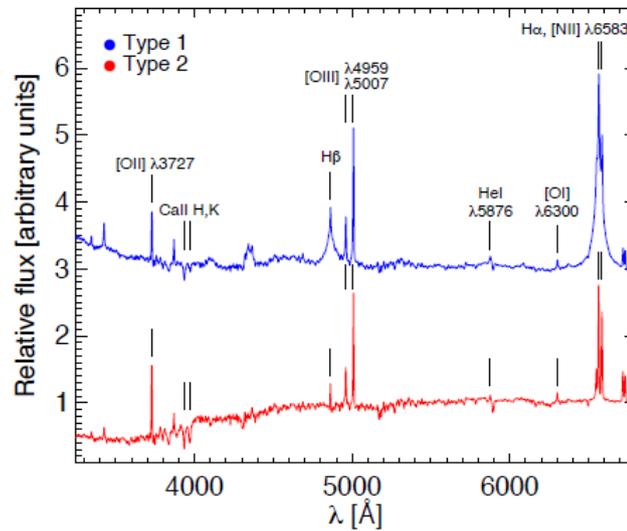


Figura 1.3: Comparación de los espectros de emisión de AGNs tipo 1 (en azul) y tipo 2 (en rojo). Como se puede observar, las líneas espectrales anchas se observan en los AGNs de tipo 1, mientras que en los AGNs de tipo 2 solo se encuentran líneas estrechas. Fuente: Hickox y Alexander (2018)[8]

- Tipos 2:** Fuentes en las que solo se detectan líneas de emisión estrechas, de baja ionización, ya que, como se ha mencionado anteriormente, la orientación del toro impide observar la región nuclear de estos AGNs. Las líneas estrechas surgen en la NLR, con densidades y velocidades del gas ionizado mucho menores a las de la BLR.

Como se puede ver en la Figura 1.3 la principal diferencia entre ambos tipos de AGNs, aparte de la anchura de sus líneas espectrales, es la presencia de un continuo de emisión azul en los AGNs de Tipo 1.

1.5. Selección de AGNs

Sabiendo que los AGNs emiten radiación en todo el espectro electromagnético (Sección 1.1) y para poder analizar muestras representativas y poco contaminadas, es necesario encontrar técnicas de detección a lo largo de todo el espectro. Los rangos de longitudes de onda que se han utilizado en este trabajo son: infrarrojo medio (**MIR**), **UV/óptico** y **rayos X**

1.5.1. MIR

En este rango de longitud de onda (3.4–22 μm) la mayoría de AGNs son detectados en base a diagramas color-color, que consisten en medir el brillo en dos o más bandas de longitud de onda y comparar la relación entre sus cocientes de flujo o diferencia de magnitudes para distinguir los AGNs de otras fuentes astrofísicas.

Para este trabajo la selección se ha realizado mediante la técnica descrita en Mateos et al. (2012)[9]. La técnica se basa en el análisis de los colores infrarrojos obtenidos por WISE para seleccionar objetos que son candidatos a ser AGNs. En particular, se centra en los objetos luminosos seleccionados a partir del muestreo XMM-Newton Bright Ultra-hard Survey (BUXS) en el rango ultrahard (energías de rayos X muy altas) y utiliza la información de los colores infrarrojos para filtrar los objetos estelares contaminantes y seleccionar aquellos que son más propensos a ser AGNs.

1.5.2. UV/óptico

Una técnica comúnmente utilizada para identificar AGNs en el rango UV/óptico es el diagrama BPT (Baldwin-Phillips-Terlevich), que utiliza la relación entre las líneas de emisión de H_α , H_β , [NII], [OIII] y [SII] para distinguir entre la emisión estelar y la emisión de AGN [10]. Este método tiene un principal inconveniente; la emisión en longitudes de onda comprendidas en el rango óptico sufre mayor dispersión y absorción debido al gas y polvo que se encuentra entre el objeto y el observador. Otro método utilizado es la identificación de líneas anchas, que es confiable pero requiere mucho tiempo en el telescopio.

1.5.3. Rayos X

La detección en el rango de los rayos X constituye uno de los métodos más fiables y eficientes para la identificación de AGNs.

Existen varias razones por las que la identificación de AGNs en este rango es muy confiable, destacando principalmente: (1) todos los AGNs emiten en rayos X debido, al efecto de *scattering Compton inverso* producido en la corona y (2) los rayos X, debido a su corta longitud de onda, son poco propensos a sufrir extinción.

1.6. Objetivos

El objetivo principal de este trabajo es el estudio de las propiedades de emisión de los AGNs y sus galaxias anfitrionas a través del estudio de las distribuciones espectrales de energía de los AGN. Así, las principales cuestiones que se quieren resolver con este trabajo son:

- ¿Cómo se relacionan las clasificaciones espectroscópicas de los AGN con las derivadas del análisis de las SEDs?
- ¿Cómo afecta introducir en el análisis de la SED los flujos en rayos X de los AGNs?
- ¿Cómo influye la clasificación espectroscópica de los AGNs en sus propiedades físicas y en las de la galaxia huésped?

Para responder a estas preguntas se ha realizado un estudio de las SEDs de una muestra de 89 candidatos a AGN seleccionados a partir de colores en el infrarrojo medio y se han llevado a cabo las siguientes actividades:

- Construcción de la SED de los AGNs, a través del desarrollo de código en lenguaje python, en el formato requerido por CIGALE.
- Aprender el funcionamiento del código de ajuste de SED, CIGALE .
- Interpretación de los valores obtenidos con los ajustes de CIGALE. De este modo, se realizaron varios códigos en python para poder analizar y representar los resultados finales.
- Aprendizaje del programa informático *TopCat* para poder representar algunas distribuciones a partir de los resultados obtenidos con CIGALE.

Capítulo 2

Observaciones multifrecuencia y muestra de AGNs

Para el estudio realizado en el presente trabajo se ha hecho uso de una muestra de 89 candidatos a AGNs seleccionados en el MIR. En esta sección se explicarán los muestreos de cielo utilizados para la construcción de las SEDs, así como una presentación de la muestra, indicando el rango de luminosidades en los que los AGNs han sido detectados, además de su rango de redshift.

2.1. Observaciones multifrecuencia

2.1.1. Sloan Digital Sky Survey

El *Sloan Digital Sky Survey* (SDSS) es un proyecto de investigación astronómica que utiliza un telescopio de 2.5 metros de diámetro, ubicado en el Observatorio Apache Point en Nuevo México, diseñado para recopilar imágenes y espectros de manera automatizada en el rango UV/Óptico. Para realizar el cartografiado fotométrico, que cubre 14055 deg^2 [11] y que se ha utilizado en este TFG, SDSS hace uso de cinco filtros, ubicados en la cámara del telescopio. Sus valores de longitud de onda efectiva ¹ y las profundidades que alcanzan se muestran en la Tabla 2.1. Las curvas de respuesta de cada uno de los filtros se muestran en la Figura 2.1 [12].

¹Aquella para la que se define el flujo monocromático.

Filtros	$\lambda_{efectiva}/\mu\text{m}$	Profundidad/mag
u	0.355	22.0
g	0.469	22.2
r	0.616	22.2
i	0.748	21.3
z	0.893	20.5

Tabla 2.1: Valores de longitud de onda efectiva y magnitudes límites en el sistema AB[13] para los cinco filtros del SDSS. La profundidad se mide a detecciones a 5σ .

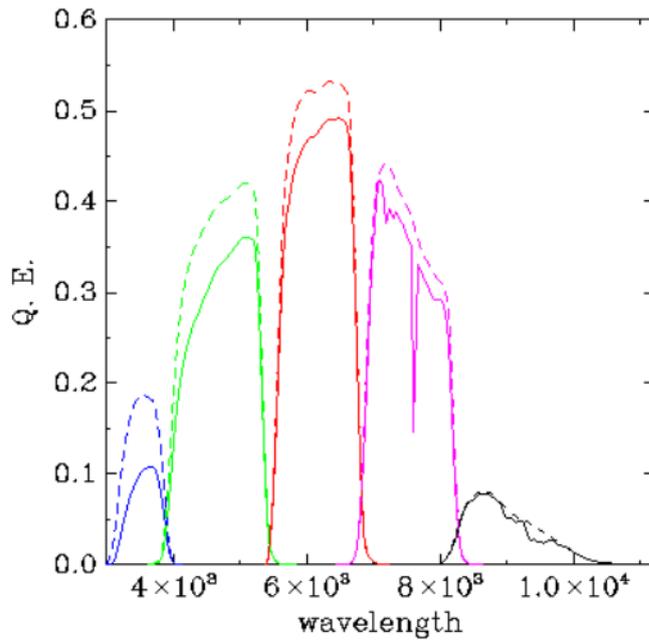


Figura 2.1: Curvas de respuesta de los filtros u (línea azul), g (línea verde), r (línea roja), i (línea rosa), z (línea negra) utilizados por SDSS. Fuente: SDSS [14].

2.1.2. Two Micron All-Sky Survey

El *Two Micron All-Sky Survey* (2MASS) es un proyecto de investigación astronómica que tuvo como objetivo la realización de un mapa detallado de todo el cielo en el infrarrojo cercano, en el rango de longitudes de onda 1.24-2.16 μm [15].

Para llevar a cabo el 2MASS se utilizaron dos telescopios de 1.3 metros de diámetro, ubicados

en Arizona y Chile, que escanearon el cielo con tres filtros (J, H, K_S). Sus valores de longitud de onda efectiva y las profundidades que alcanzan se muestran en la Tabla 2.2.

Filtros	$\lambda_{efectiva}/\mu\text{m}$	Profundidad/mag
J	1.24	15.8
H	1.66	15.1
K_S	2.16	14.3

Tabla 2.2: Valores de longitud de onda efectiva y magnitudes límite en el sistema Vega para los tres filtros de los telescopios usados por 2MASS [16]. La profundidad se mide a detecciones a 5σ .

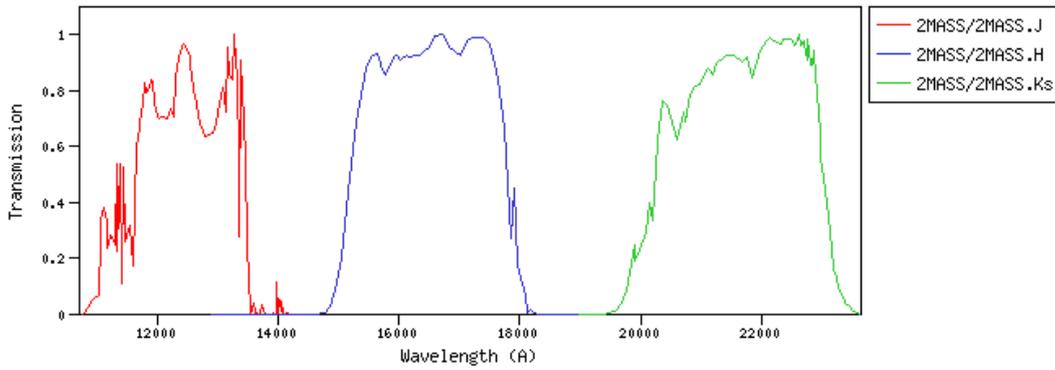


Figura 2.2: Curvas de respuesta de los filtros J, H y K_S utilizados por 2MASS. Fuente: CSIC/SVO filter profile service [17].

2.1.3. United Kingdom Infra-Red Telescope

El *United Kingdom InfraRed Telescope* (UKIRT) es un telescopio de infrarrojos ubicado en el Observatorio de Mauna Kea en Hawái. El instrumento tiene un diámetro de 3.8 metros y fue construido por el Reino Unido, comenzando a operar en 1979.

En este trabajo se ha utilizado el *United Kingdom Infrared Deep Sky Survey* (UKIDSS), un proyecto astronómico que consistió en realizar un muestreo del cielo en el infrarrojo cercano, en el rango de longitudes de onda $0.88\text{-}2.19 \mu\text{m}$, utilizando el UKIRT. Para realizar el UKIDSS se utilizaron cinco filtros, que se encuentran en el sistema de instrumentación conocido como WFCAM (Wide Field Camera), cámara principal del telescopio UKIRT [18]. Los datos de estos

filtros se muestran en la Tabla 2.3 y sus curvas de transmisión en la Figura 2.3 .

Filtros	$\lambda_{efectiva}/\mu\text{m}$	Profundidad/mag
Z	0.880	–
Y	1.03	20.5
J	1.24	20.0
H	1.62	18.8
K_S	2.19	18.0

Tabla 2.3: Valores de longitud de onda efectiva y magnitudes límite en el sistema Vega en las cinco bandas utilizadas por UKIDSS. La profundidad se mide a detecciones a 5σ .

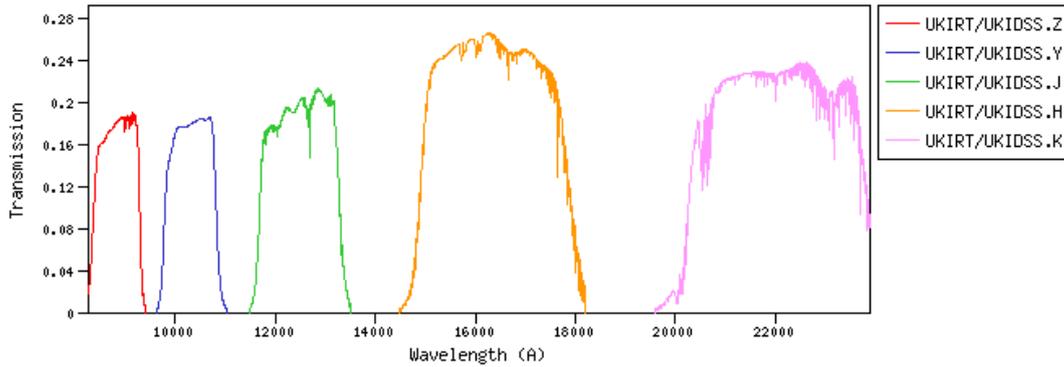


Figura 2.3: Curvas de respuesta de los filtros Z, Y, J, H y K_S utilizados por UKIDSS. Fuente: CSIC/SVO filter profile service [19].

2.1.4. Wide-field Infrared Survey Explorer

El *Wide-field Infrared Survey Explorer* (WISE) es un telescopio espacial de la NASA de 40 cm de diámetro que fue lanzado en diciembre de 2009 y se encargó de realizar un mapeo del cielo en el rango 3-22 μm . Para ello, WISE hace uso de cuatro filtros cuyos valores de longitud de onda efectiva y curvas de respuesta se presentan en la Tabla 2.4 y Figura 2.4 respectivamente:

Filtros	$\lambda_{efectiva}/\mu\text{m}$	Profundidad/mag
W1	3.4	16.6
W2	4.6	15.6
W3	12.0	11.3
W4	22.0	8.0

Tabla 2.4: Valores de longitud de onda efectiva y magnitudes límite en el sistema Vega para los cuatro filtros del telescopio WISE [20]. La profundidad se mide a detecciones a 5σ .

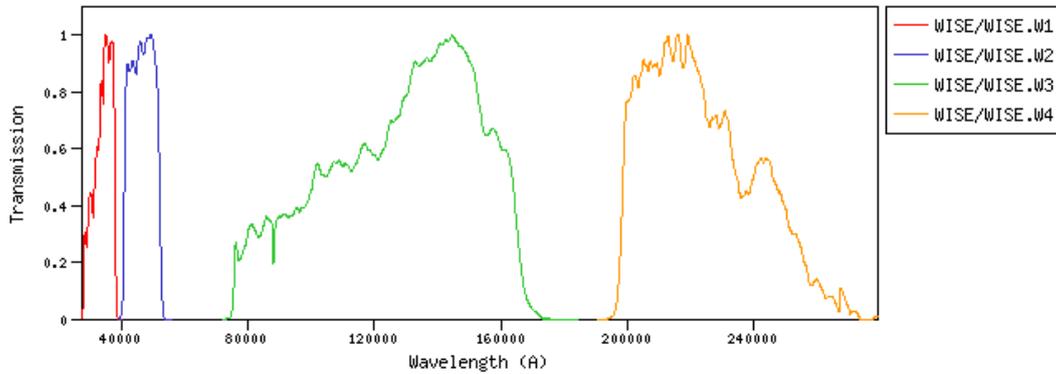


Figura 2.4: Curvas de respuesta de los filtros W1, W2, W3 y W4 utilizados por WISE. Fuente: CSIC/SVO filter profile service [21].

2.1.5. X-ray Multi-mirror Mission - Newton

El *X-ray Multi-Mirror Mission - Newton* (XMM-Newton) es un telescopio espacial de rayos X. Fue lanzado por la Agencia Espacial Europea (ESA) en diciembre de 1999 [22].

XMM-Newton cuenta con tres telescopios de rayos X, cada uno de los cuales consta de 58 espejos Wolter I (siendo los más grandes de 70 cm de diámetro) de incidencia rasante que están anidados en una configuración coaxial y cofocal. Además, cuenta con un conjunto de tres cámaras CCD de rayos X que forman la *European Photon Imaging Camera* (EPIC), dos de ellas con tecnología MOS (Semiconductores de Oxido Metálico) y otra con tecnología p-n. Estas cámaras están instaladas detrás de los telescopios y, además, los dos equipados con tecnología MOS cuentan con espectrógrafos de dispersión de rayos X conocidos como *Reflection Grating Spectrometer* (RGS). [23]

En la Figura 2.5 se muestra un esquema de las principales partes del satélite.

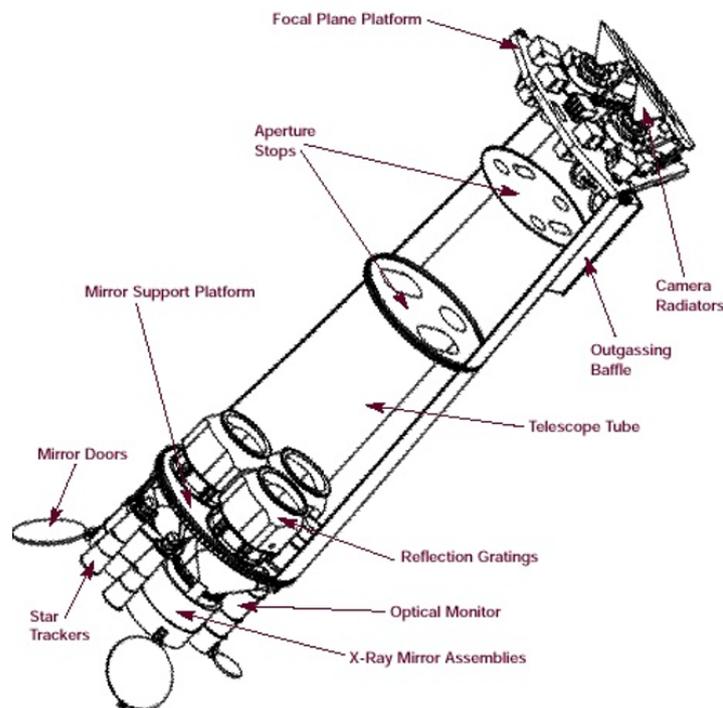


Figura 2.5: Diagrama del XMM-Newton. Fuente: ESA

XMM-Newton detecta una gran cantidad de objetos (en torno a 100) en cada observación. Por este motivo la ESA organizó la asociación *Survey Science Center* (SSC), encargada de interpretar los datos medidos y construir catálogos de fuentes con detección en rayos X, siendo la mayoría de ellas AGNs.

2.2. Definición de la muestra

Los candidatos a AGN de la muestra han sido seleccionados en el MIR a partir de cocientes de flujos monocromáticos (colores) con los criterios descritos en Mateos et al.(2012) [9]. En la Figura 2.6 se representa el diagrama color-color, donde los AGNs se encuentran dentro de la caja de selección definida en dicho artículo. Esta muestra está limitada en flujo a $12 \mu\text{m}$, de forma que $f_{12\mu\text{m}} > 1 \text{mJy}$. Además, han sido detectados en un área de cielo de 5deg^2 , donde se tienen observaciones profundas con XMM-Newton, con un tiempo de exposición mayor a 45ksec , lo que permite llegar a un límite en flujo en rayos X de $f_x \sim 10^{-15} \text{erg cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ (en la banda 2-10 keV).

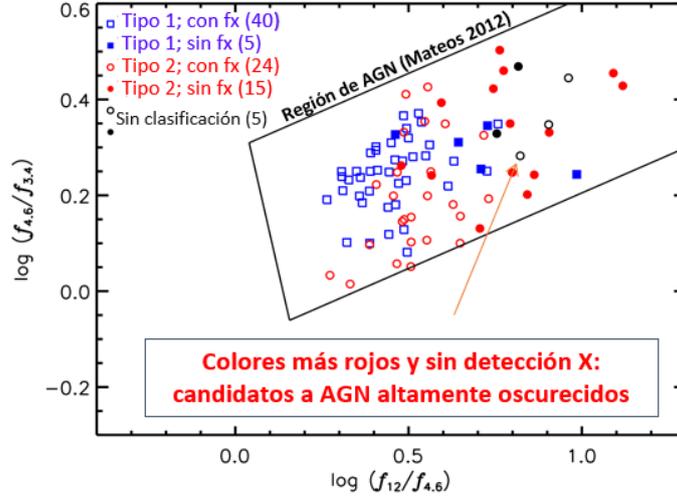


Figura 2.6: Distribución de colores de los AGNs de la muestra.

De esta manera, la muestra inicial consta de 89 candidatos a AGN, de los cuales se han descartado 5, por no tener detección de su *redshift* (z), parámetro necesario para realizar los ajustes con CIGALE. Dentro de los 84 AGNs restantes se tienen 45 de Tipo 1 y 39 Tipo 2. De los 45 AGNs tipo 1, 40 tienen detección en rayos X y de los 39 tipo 2 se cuenta con 24 con detección en rayos X. Esta información, además del número de detecciones en cada muestreo, se indica en la Tabla 2.5.

Muestreo	Tipo 1	Tipo 2	Total
SDSS	45 (100%)	36 (92.30%)	81 (96.42%)
2MASS	12 (26.60%)	7 (17.90%)	19 (22.61%)
UKIDSS	38 (84.40%)	31 (79.49%)	69 (82.14%)
WISE	45 (100%)	39 (100%)	84 (100%)
XMM-Newton	40 (88.88%)	24 (61.54%)	64 (76.19%)

Tabla 2.5: Número de objetos detectados y su clasificación con cada uno de los instrumentos utilizados.

La muestra cubre un rango de z comprendido entre $0.081 \leq z \leq 2.309$ y su distribución se representa en la Figura 2.7. Como se puede ver, los AGNs tipo 1 de la muestra presentan una mayor dominancia a redshifts altos, mientras que los tipo 2 son más abundantes a redshifts bajos.

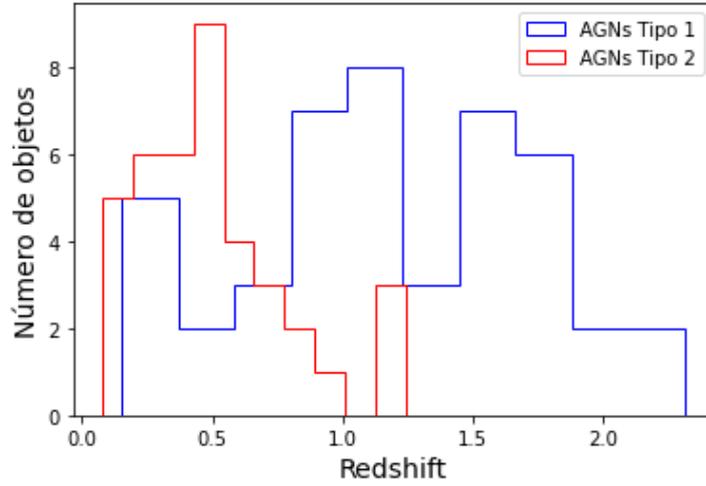


Figura 2.7: Distribución de *redshift* para los AGNs de la muestra.

Analizando la Tabla 2.5 se dispone de un total de 64 AGNs con detección en rayos X. La luminosidad en rayos X se define en la banda 2-10 keV (en el sistema de referencia de cada objeto) y, además, está corregida por la absorción. Esta corrección se realiza ajustando con modelos los espectros en rayos X de cada fuente. El rango de dichas luminosidades cubre desde los 10^{40}erg/s a los 10^{46}erg/s y su distribución frente al redshift se representa en la Figura 2.8. Para los dos objetos con $L_X < 10^{42} \text{erg/s}$ su espectro X es de muy bajo ratio señal-ruido, así que es muy posible que se esté subestimando la corrección por absorción, siendo probablemente mucho más luminosos

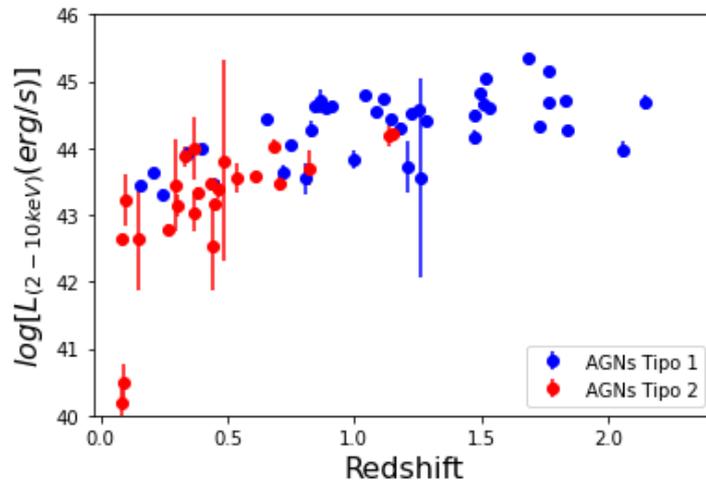


Figura 2.8: Luminosidad en el rango 2-10 keV (10^{40}erg/s - 10^{46}erg/s) para los 64 AGNs con detección en rayos X, frente al redshift.

Capítulo 3

CIGALE

Code Investigating GALaxy Emission (CIGALE) es un código desarrollado en python diseñado para el estudio de las propiedades físicas de los AGN y de las galaxias, a través del ajuste de su SED. Abarca longitudes de onda que van desde los rayos X y el ultravioleta lejano hasta el infrarrojo lejano y radio. CIGALE se escribió originalmente en FORTRAN, con el objetivo de derivar las propiedades de galaxias y AGNs a través de un análisis bayesiano realizado con una serie de módulos [24]. En el año 2018, CIGALE se reescribió completamente en un lenguaje más claro (sintácticamente hablando) y accesible como es python, pero manteniendo las mismas bases utilizadas en el código original, como son: el principio de balance de energía y la estrategia bayesiana [25].

El enfoque bayesiano es un aspecto clave en el análisis de CIGALE. Así, las propiedades físicas no son evaluadas a partir del mejor ajuste, sino ponderando todos los modelos en función de lo bueno que sea su ajuste, siendo los mejores los que tienen un mayor peso. De esta manera, se pueden reproducir las observaciones y estimar propiedades físicas junto con sus incertidumbres de una manera fiable [25].

Para la realización de este trabajo se ha utilizado la última versión de CIGALE, disponible en <https://cigale.lam.fr/download/>. Esta versión, además de contar con numerosas correcciones, actualizaciones y, en general, mejoras con respecto a las versiones previas, cuenta con un módulo que permite incluir flujos en rayos X corregidos por absorción [26].

3.1. Arquitectura

Para poder realizar un uso correcto de CIGALE es importante entender como genera los modelos teóricos, utilizados para estimar las propiedades físicas de los AGN y de las galaxias que los albergan.

El paquete CIGALE contiene tres archivos ejecutables, cada uno de cuales realiza una función específica [25]:

- **pcigale**: Computa todos los modelos y realiza las estimaciones de las propiedades físicas. Su uso se realiza a través de una serie de pasos: en primer lugar **pcigale init**, genera una plantilla que el usuario debe rellenar con los datos y módulos deseados para realizar el ajuste. A continuación, **pcigale genconf** guarda la plantilla de valores rellenada anteriormente y prepara a CIGALE para el compilado. Finalmente **pcigale run** computa el código. Este ejecutable es el más importante y el único obligatorio de usar.
- **pcigale-plots**: Permite realizar ciertas gráficas a partir de la salida generada por CIGALE: la mejor SED, funciones de distribución de los parámetros ajustados, etc.
- **pcigale-filters**: Permite añadir, eliminar y, en general, listar filtros astronómicos en la base de datos.

El proceso de compilación para dar los resultados finales se divide en varias etapas.

3.1.1. Input

Primero, el archivo inicial (`pcigale init`) debe ser correctamente interpretado y rellenado. En esta plantilla se deben introducir cinco parámetros, los cuales son:

- **data_file**: Es el nombre del fichero que contiene los datos a analizar.
- **parameters_file**: Se utiliza para simular datos. En este trabajo no se le dará uso, por lo que permanecerá vacío.
- **sed_modules**: Indica la lista de módulos de ajuste para la SED que se usarán en el análisis (explicado en detalle en la Sección 3.1.2).
- **analysis_method**: Indica el método de análisis que utilizará CIGALE en la compilación. En este trabajo se ha utilizado la función de distribución de probabilidad (`pdf_analysis`),

que resulta la más adecuada para el ajuste de datos, ya que cada modelo en el conjunto de modelos tiene una probabilidad asociada como $\exp(-\chi^2/2)$ ¹, por lo que, aquellos con mejor ajuste tendrán un mayor peso.

- **cores:** Se utiliza para definir el número de núcleos de la CPU que se desea utilizar. Esto afecta a la velocidad de compilado.

Una vez hecho esto, CIGALE lee la información del archivo en el cual se encuentran las SEDs, esto es: identificador de cada objeto, redshift y flujos medidos de los distintos muestreos para realizar el procesado y normalización, es decir, eliminar no detecciones y descartar aquellos que no estén acompañados de una incertidumbre válida, como se representa en la Figura 3.1.

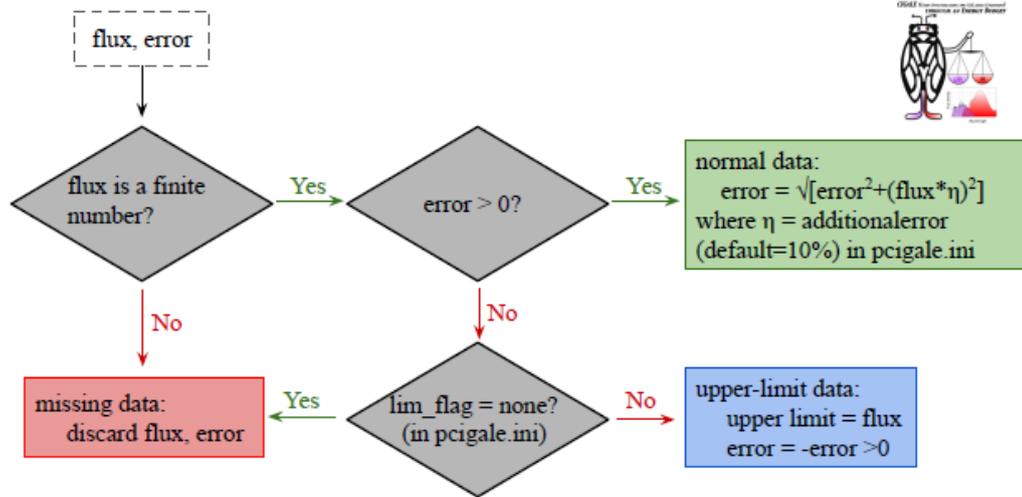


Figura 3.1: Esquema que muestra como CIGALE maneja los datos (valores de flujo e incertidumbre) para cada filtro. Extraído del manual de CIGALE [27]

El archivo que contiene los datos para realizar el ajuste debe ser una tabla ASCII con un formato similar al mostrado en la Figura 3.2. En la columna de cada filtro y su error, se escriben los flujos y sus incertidumbres respectivamente, en unidades de mJy².

¹Bibliográficamente χ^2 representa una medida directa de la suma de todas las desviaciones al cuadrado.

²Unidad de flujo equivalente a $10^{-29} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{Hz}^{-1}$

#id	redshift	nombre_filtro1	nombre_filtro1_err	nombre_filtro2	nombre_filtro2_err	...
1	0.24	1.093e-3	1.450e-4	1.532e-2	1.564e-3	...
2	0.54	9.734e-3	1.450e-3	4.875e-2	4.134e-3	...

Figura 3.2: Ejemplo de presentación de datos en un formato adecuado para el análisis con CIGALE. El nombre de cada filtro debe ser exactamente aquel que se encuentre guardado en la base de datos de CIGALE para que pueda ser reconocido.

3.1.2. Módulos

CIGALE utiliza módulos, cada uno de los cuales está asociado a diferentes procesos físicos que tienen lugar en las galaxias y AGNs, para generar modelos o simulaciones con los que determinar distintas propiedades de interés. Existen una gran variedad de módulos disponibles para realizar los ajustes [25], los que se han utilizado en el presente trabajo son:

1. **sfhdelayed**: Se utiliza para modelar la historia de la formación estelar de las galaxias, SFH (del inglés Star Formation History), es decir, como se han formado las estrellas en función del tiempo, t . En este módulo, el ritmo al que se están formando las estrellas, SFR (del inglés Star Formation Rate) sigue una parametrización de tipo exponencial decreciente:

$$SFR(t) \propto \frac{1}{\tau^2} \times \exp(-t/\tau), \quad (3.1)$$

para $0 \leq t \leq t_0$, siendo t_0 la edad de inicio de la formación estelar y τ el tiempo en que la SFR alcanza su máximo. Así, se sigue un aumento lineal del SFR desde el principio de la formación estelar hasta alcanzar el máximo, para después, disminuir lentamente.

2. **bc03**: Este módulo es una librería de modelos teóricos llamados SSPs (del inglés Single Stellar Population synthesis models) que describen cómo emite luz una población estelar de diferentes edades y metalicidades. Estos modelos tienen en cuenta la metalicidad, una función de masa inicial (FMI; Salpeter o Chabrier) y la SFH calculada con el anterior módulo. La FMI describe la distribución de las masas estelares en el momento de su formación. En resumen, es una descripción de la fracción de estrellas que se forman con masas específicas. Cotejando los flujos observados con las predicciones de los SSPs, se pueden estimar diversas propiedades, siendo una de ellas la masa estelar de las galaxias.

3. **nebular**: Las estrellas más masivas emiten una gran parte de su luz en el continuo Lyman, lo cual es importante, ya que tiene un impacto directo en el modelaje de las SED. Los fotones de este continuo se emiten por la transición de electrones desde niveles de energía excitados hasta el estado fundamental del hidrógeno neutro. Para calcular esta emisión, en primer lugar, se deben de seleccionar valores para el parámetro de ionización (Z) y de metalicidad (U), lo que permite tener líneas de luminosidad normalizadas a la luminosidad de los fotones ionizantes.
4. **dustatt_modified_CF00**: Este modelo es utilizado para construir las curvas de la emisión estelar debidas principalmente al polvo en el medio interestelar. Se tiene además en cuenta, la atenuación adicional que sufren las estrellas más jóvenes asociadas al material que todavía las rodea. Para ello se sigue la plantilla dada por Charlott & Fall (2000) [28].
5. **dale2014**: Se utiliza para modelar la emisión de polvo, es decir, la energía reemitida por las partículas tras absorber fotones de alta energía, desde el UV hasta el NIR.
6. **skirtor2016**: Este módulo está diseñado para tener en cuenta la presencia de AGNs en el modelado de la SED. Así, el AGN es parametrizado con la fracción de AGN, definida como el cociente entre la luminosidad IR del AGN y luminosidad IR total de la galaxia, en el rango 8-1000 μm . En concreto, skirtor2016 es un modelo de toro grumoso en dos fases (la mayor parte del polvo en nubes, y el resto distribuido de manera uniforme). Se tiene en cuenta también que, la emisión nuclear del AGN procedente principalmente del disco de acreción, es anisótropa y constante. Esta emisión se modela con una ley de potencias con diferentes pendientes (para diferentes regiones espectrales). Finalmente, tiene en cuenta la extinción para AGNs tipo 1, debido al polvo polar (polar dust), a través de curvas de extinción[29].
7. **X Ray**: Este es el módulo más recientemente implementado. Permite añadir flujos en rayos X corregidos por absorción en diferentes rangos de energías, al ajuste de la SED. Así, su objetivo principal es conectar los rayos X con el resto de longitudes de onda, además de obtener distintas propiedades concretas, como puede ser una estimación de la luminosidad en rayos X del AGN [26]. Para ello se utiliza la relación $\alpha_{ox} - L_{2500 \text{ \AA}}$ donde α_{ox} es la pendiente de la SED entre UV (2500 \AA) y rayos X (2 keV) y $L_{2500 \text{ \AA}}$ es la luminosidad

intrínseca del AGN por frecuencia a 2500 \AA [29].

8. **redshifting**: Es el último módulo utilizado, computa el redshift de la SED, redondeandolo a dos decimales.

3.1.3. Salida

Una vez se construyen todos los modelos, CIGALE guarda los resultados de las propiedades físicas estimadas en el directorio de trabajo. Todas las estimaciones tienen dos valores distintos: el primero de ellos es *bayes*, en el que se tiene en cuenta el peso de todos los modelos a través de la ponderación con χ_{red}^2 ³ para dar el resultado final, mientras que el segundo de ellos, *best*, simplemente está evaluado a partir del mejor ajuste, es decir, aquel que tenga el valor de χ_{red}^2 más pequeño. Para cuantificar la calidad de las SEDs ajustadas se ha usado el valor de χ_{red}^2 del mejor modelo obtenido.

Además, es posible visualizar y guardar la SED resultante del mejor ajuste para cada fuente. En las Figuras 3.3 y 3.4 se muestran unos ejemplos de ajustes de SEDs de AGNs tipo 1 sin detección y con detección en X, respectivamente.

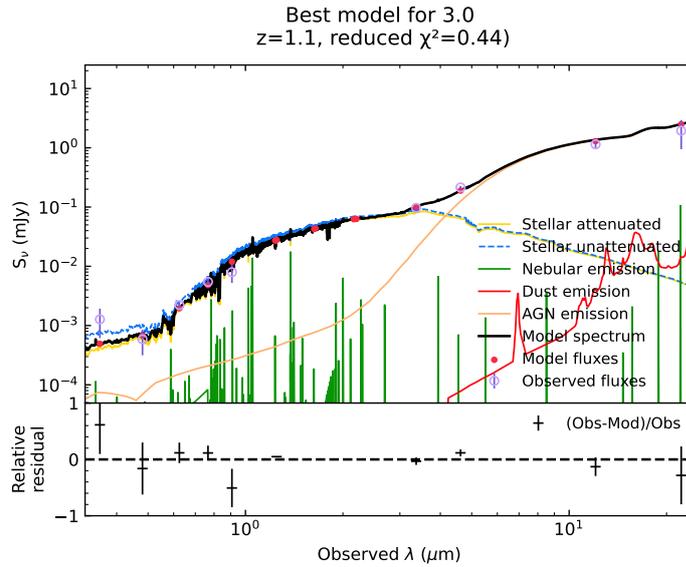


Figura 3.3: SED modelada con CIGALE para el AGN con identificación 3 observado a un redshift de 1.100. Este objeto tiene clasificación espectroscópica tipo 1 y no está detectado en rayos X.

³Medida directa de lo bueno que es el ajuste.

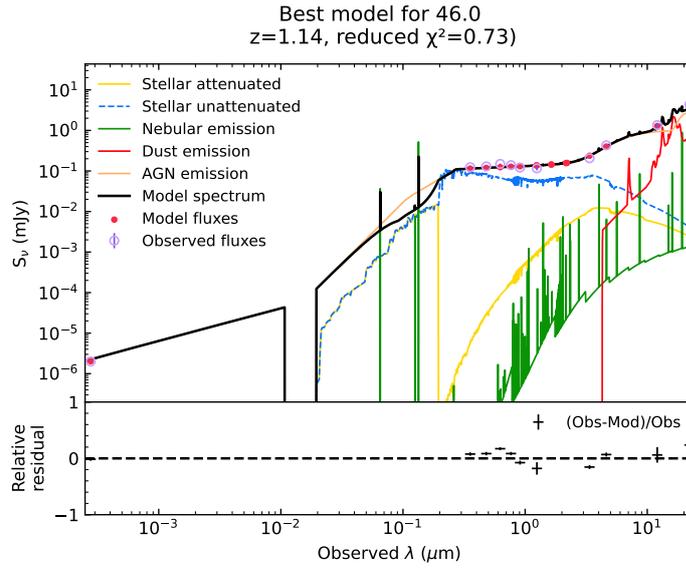


Figura 3.4: SED modelada con CIGALE para el AGN con identificación 46 observado a un redshift de 1.140. Este objeto tiene clasificación espectroscópica tipo 1 y está detectado en rayos X.

Del mismo modo, en las Figuras 3.5 y 3.6 se muestran unos ejemplos de SEDs de AGNs tipo 2 sin detección y con detección en X.

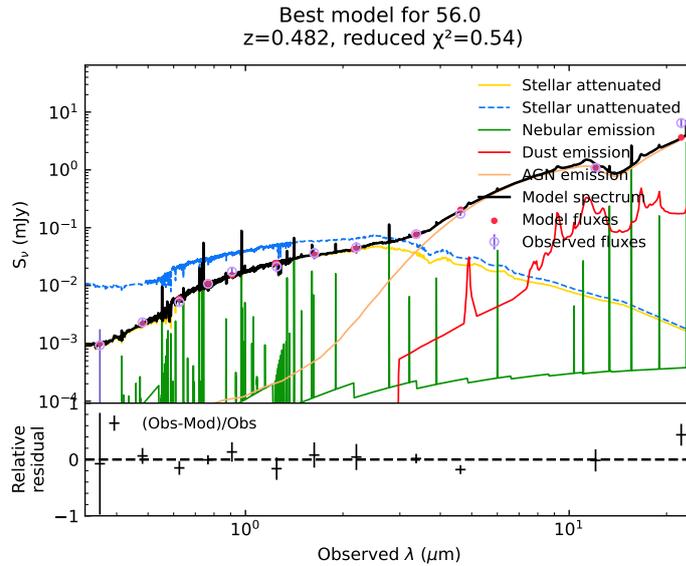


Figura 3.5: SED modelada con CIGALE para el AGN con identificación 56 observado a un redshift de 0.482. Este objeto tiene clasificación espectroscópica tipo 2 y no está detectado en rayos X.

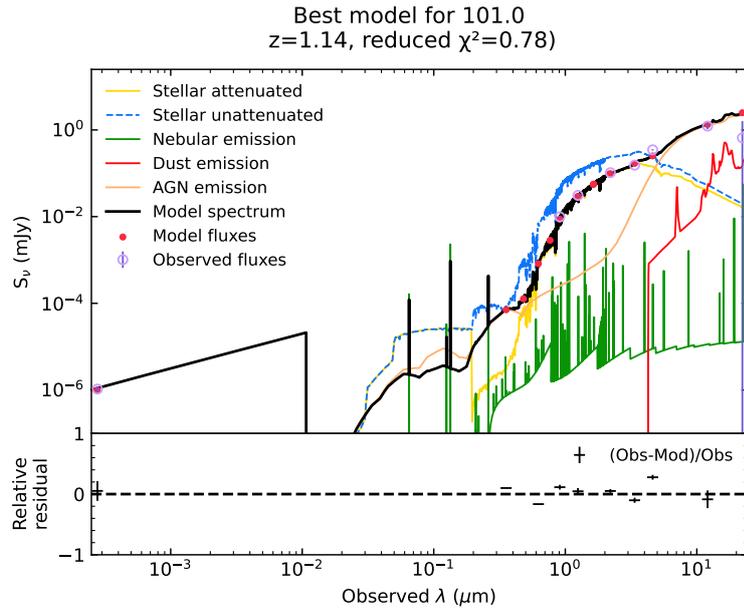


Figura 3.6: SED modelada con CIGALE para el AGN con identificación 101 observado a un redshift de 1.14. Este objeto tiene clasificación espectroscópica tipo 2 y está detectado en rayos X.

Capítulo 4

Análisis y Resultados

En esta sección se explicará como se ha realizado la preparación de la SED para poder estimar las propiedades físicas a estudiar y los requisitos que se han elegido para cada una de las fuentes, con el fin de seleccionar solamente aquellas con los datos más fiables. Seguidamente se hará una comparación entre los resultados¹ obtenidos añadiendo y quitando los flujos en rayos X en al ajuste de la SED. Se utilizarán los resultados de los ajustes para confirmar la presencia de un AGN en los objetos de la muestra clasificados como tipo 2 y sin detección en rayos X. Por último, se presentarán algunas de las propiedades de los AGN y de las galaxias que los albergan.

4.1. Construcción de la SED

Como se ha mencionado en la sección 3.1.1, CIGALE requiere de una serie de condiciones en las medidas fotométricas para poder realizar el ajuste de la SED. Por ello se han realizado las siguientes modificaciones en los datos iniciales:

1. Realizar la conversión adecuada para pasar los flujos a mJy. Los datos iniciales en la mayoría de las bandas estaban en Jy, por lo que para pasarlos a mJy se ha realizado una simple multiplicación. En el caso de los rayos X este cálculo no ha resultado tan trivial, ya que, originalmente, se disponía de las medidas de luminosidad intrínseca en lugar de flujo. En primer lugar, para realizar la conversión de luminosidades a flujos, se ha utilizado la Ec.(1) de Alexander et. al (2003) [30]:

$$Flujo(erg \cdot s^{-1} cm^{-2}) = \frac{Luminosidad(erg/s)}{4\pi \cdot DL^2(cm) \cdot (1+z)^{\gamma-2}}, \quad (4.1)$$

¹Los errores de los resultados de este capítulo son 1σ .

donde DL es la distancia-luminosidad, que toma como parámetros cosmológicos $H_o = 70 km \cdot Mpc^{-1} \cdot s^{-1}$, $\Omega_M = 0.3$ y $\Omega_\Lambda = 0.7$ además del redshift de cada objeto, z es el redshift y γ es la pendiente del continuo de emisión en rayos X y que se ha asumido que tiene un valor de 1.9. A continuación, para pasar de unidades cgs a mJy se ha seguido la Ec.(1) de Yang et al. (2020)[29]:

$$Flujo(mJy) = \frac{Flujo(erg \cdot s^{-1} cm^{-2}) \times 4,136 \cdot 10^8}{E_{up} - E_{low}}, \quad (4.2)$$

donde E_{up} y E_{low} son los límites superior e inferior de la banda de energía en unidades de keV, en este caso 10 keV y 2 keV, respectivamente.

2. Cambiar el nombre de las listas donde se almacenan los datos medidos de cada uno de los muestreos utilizados. Los nuevos nombres son aquellos guardados en la base de datos de CIGALE: WISE1, WISE2, WISE3, WISE4, u_prime, g_prime, r_prime, i_prime, z_prime, J_2mass, H_2mass, Ks_2mass, ukidss_y, ukidss_j, ukidss_h, ukidss_k, xray_boxcar_2to10keV.
3. Cuando para un mismo objeto se tienen detecciones en dos muestreos que operan en un mismo rango de frecuencias, se ha priorizado el uso de solamente uno de ellos, ya que, en caso de usar ambos, CIGALE da más importancia a esa longitud de onda (tratando de igualar los datos). Por este motivo, entre UKIDSS y 2MASS, se han seleccionado solamente los datos de UKIDSS a menos que no se disponga de su detección o de la incertidumbre en la medida, en cuyo caso se usa 2MASS.

Una vez realizados todos los cambios en los datos iniciales para adaptarlos al formato requerido por CIGALE, se ha rellenado la plantilla generada por **pcigale init** con los módulos y los valores de los parámetros a utilizar. La idea es crear un conjunto de parámetros adecuados para que el programa pueda realizar una gran cantidad de simulaciones y encontrar el modelo que más se ajuste a las observaciones. Cabría esperar que cuanto mayor sea el rango de parámetros mejor, ya que la probabilidad de encontrar el mejor modelo aumenta, sin embargo, esto no es del todo así, ya que CIGALE es un programa que requiere una alta demanda computacional, por lo que lo más óptimo es buscar un punto común entre número de simulaciones y rendimiento del sistema. Tras muchas pruebas y un amplio análisis bibliográfico, los valores finales que se han escogido para completar la plantilla requerida para correr CIGALE son los presentados en la Tabla 4.1.

Parámetros	Modelos/Valores
Star formation history: delayed model and recent burst	
Age of the main population	1000, 2000, 3000, 4000, 7000, 10000, 12000 Myr
e-folding time	500, 700, 1000, 3000, 7000, 10000 Myr
Burst stellar mass fraction	0.0, 0.01, 0.015, 0.02, 0.05, 0.10, 0.15, 0.20
Simple Stellar population: Bruzual & Charlot (2003)	
Initial Mass Function	Salpeter
Metallicity	0.02 (Solar)
Separation age	10 Myr
Nebular emission	
Ionisation parameter	-2.0
Gas metallicity	0.014
Galactic dust extinction	
Dust attenuation law	Charlot and Fall (2000)
Attenuation in the interstellar medium	0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.8, 0.9, 1, 1.5, 2, 2.5, 3
Galactic dust emission: Dale et al. (2014)	
α_{slope} in dMdust	2.0
AGN module: SKIRTOR	
Torus optical depth at 9.7 microns	3.0, 7.0
Torus density radial parameter	1.0
Torus density angular parameter	1.0
Angle between the equatorial plane and edge of the torus	40
Ratio of the maximum to minimum radio of the torus	20
Viewing angle	30° (type 1); 70° (type 2)
AGN fraction	0.0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9
Extinction law of polar dust	Small Magellanic Cloud (SMC)
E(B - V) of polar dust	0.0, 0.2, 0.4
Temperature of polar dust (K)	100
Emissivity of polar dust	1.6

Tabla 4.1: Módulos y valores de los parámetros usados por CIGALE para el ajuste de la SED.

Además, se ha realizado un segundo análisis añadiendo el módulo de rayos X con los parámetros mostrados en la Tabla 4.2 a los ya mencionados anteriormente.

Parámetros	Modelos/Valores
X Ray	
AGN photon index	1.9
Maximum deviation from the $\alpha_{ox} - L_{2500 \text{ \AA}}$ $ \Delta\alpha_{ox} _{max}$	0.2
X-ray angle coefficients	(0, 0) / (0.5, 0) / (1, 0) / (0.33, 0.67)

Tabla 4.2: Valores de los parámetros utilizados en el módulo de rayos X.

A partir de este conjunto de parámetros CIGALE genera una gran cantidad de modelos siguiendo la estadística bayesiana y, a partir de ellos, realiza un compilado de las propiedades físicas, dando dos resultados, el *bayes* y el *best*.

4.2. Ajustes con CIGALE

Una vez CIGALE computa todos los modelos de cada uno de los objetos es posible acceder a los resultados para poder estudiar las propiedades de la muestra. Una gran diferencia entre el valor *bayes* y el *best* de una misma propiedad indica que CIGALE no logró concretar un buen resultado, por lo que, existen algunos criterios a la hora de seleccionar aquellos ajustes que sean confiables. En este trabajo se han usado los propuestos por Koutoulidis et al. (2021) [31] para un análisis similar al que se va a realizar en este trabajo:

$$A : \chi_{red}^2 \leq 5$$

$$B : \frac{1}{5} \leq \frac{M_{\star best}}{M_{\star bayes}} \leq 5$$

$$C : \frac{1}{5} \leq \frac{SFR_{best}}{SFR_{bayes}} \leq 5$$

donde M_{\star} y SFR indican la masa estelar y el ritmo de formación estelar de la galaxia, respectivamente.

En la Figura 4.1 se puede observar el diagrama de flujo seguido para definir la muestra final de AGNs.

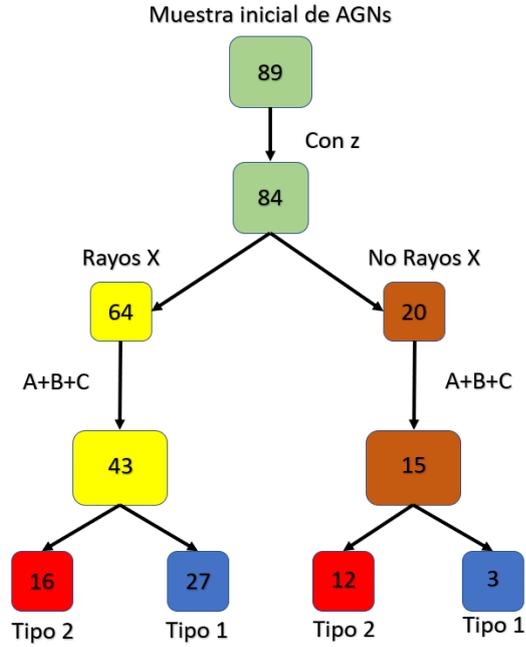


Figura 4.1: Diagrama de flujo que muestra la selección final de AGNs utilizados exclusivamente con los ajustes de CIGALE que pasan los cortes de calidad.

4.3. Comparaciones entre ajustes con/sin los rayos X

Con el fin de investigar si añadir los flujos en rayos X en la SED aporta alguna ventaja, se ha realizado una comparación entre los resultados obtenidos con y sin el módulo de análisis de rayos X. Esta comparación se ha realizado con los 43 AGNs que han cumplido los criterios de calidad y que tienen detección en dicha banda.

4.3.1. Fracción de AGN

La fracción de AGN (frac_{AGN}) se define como la relación entre la emisión IR del AGN, respecto a la luminosidad IR total en el rango 8-1000 μm , por lo que, un valor elevado de este parámetro, es un claro indicativo de la presencia de un AGN en la galaxia. De este modo, se ha realizado la comparación entre los resultados de los ajustes con y sin rayos X, representados en la Figura 4.2.

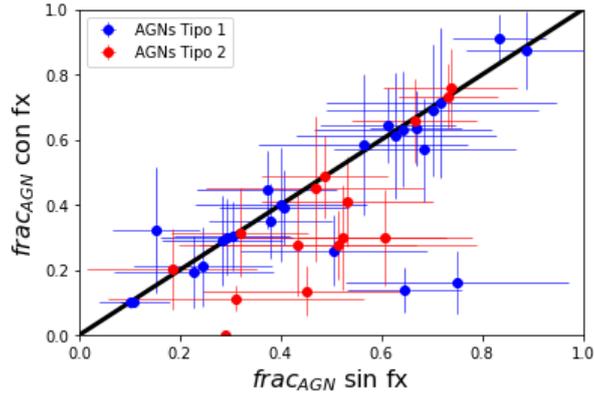


Figura 4.2: Comparación gráfica de la fracción de emisión IR del AGN con respecto al total de la galaxia. La línea negra representa la relación 1:1. La fuente que al añadir los rayos X obtiene una estimación de $frac_{AGN} = 0$ es uno de los objetos con $L_X < 42erg/s$ y que tiene la corrección por absorción subestimada, siendo probablemente mucho más luminoso.

En esta gráfica se puede observar dos hechos interesantes. El primero es que la mayoría de errores en las medidas disminuyen levemente al introducir el módulo de análisis de rayos X. El segundo y más llamativo es que se puede apreciar un número pequeño de puntos por debajo de la relación 1:1, lo cual sugiere que, al realizar el análisis introduciendo los rayos X, CIGALE disminuye la contribución del AGN al total de la galaxia en una fracción pequeña de objetos. Así, sin añadir los rayos X a la SED se obtiene un valor medio de $frac_{AGN} = 0.48 \pm 0.16$, mientras que, introduciendolos, el valor medio disminuye a $frac_{AGN} = 0.40 \pm 0.12$.

Para examinar con más detalle el efecto del flujo de rayos X en las estimaciones de la fracción de AGN, se ha representado la diferencia entre este valor con y sin flujo de rayos X para distintos intervalos de luminosidad (Figura 4.3). Se puede observar una clara tendencia en la que, las fuentes menos luminosas ($L_X < 10^{43}erg/s$), tienen un valor menor de $frac_{AGN}$ al añadir los rayos X. Por otro lado, no se observa el caso contrario, que haya un gran aumento de la fracción de AGN al añadir los rayos X.

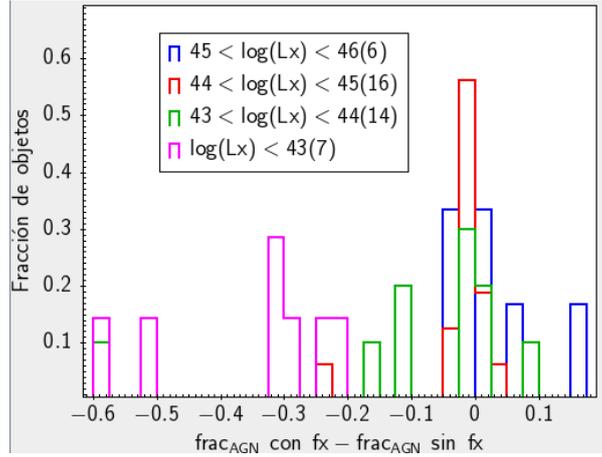


Figura 4.3: Distribución de la diferencia de frac_{AGN} , con y sin flujo de rayos X en los ajustes de las SEDs, para distintos intervalos de luminosidad. Los números entre paréntesis indican la cantidad de objetos en cada rango de luminosidad.

4.3.2. Clasificación de los AGNs

Seguidamente, se ha querido comparar si al añadir los rayos X, CIGALE es capaz de dar una clasificación basada en el ángulo de inclinación del toro del AGN más acorde con las clasificaciones derivadas de la espectroscopía óptica. Teniendo en cuenta que ya se dispone de información espectroscópica acerca del tipo de cada uno de los AGNs, se espera, según el modelo de unificación (Sección 1.3), que los AGNs tipo 1 fuesen observados con ángulos de inclinación (del toro con respecto a nuestra línea de visión) bajos y los tipo 2 con ángulos de inclinación altos.

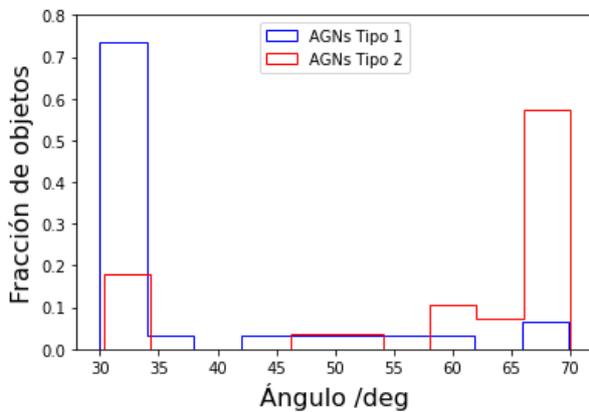


Figura 4.4: Distribución de ángulos de inclinación de las fuentes sin incluir en la SED los flujos en rayos X.

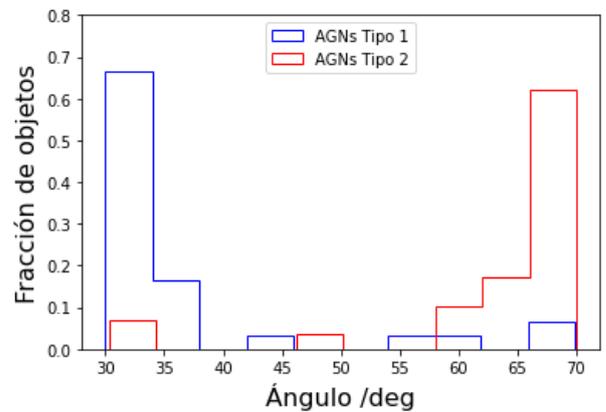


Figura 4.5: Distribución de ángulos de inclinación de las fuentes incluyendo en la SED los flujos en rayos X.

Efectivamente, observando las Figuras 4.4 y 4.5 se comprueba que hay una predominancia de AGNs tipo 1 con ángulos de inclinación en promedio bajos, pudiendo así observarse su región nuclear. En el otro extremo están los tipo 2, con ángulos de inclinación en promedio altos, y oscurecidos debido a que nuestra línea de visión intercepta el material del toro, lo cual impide tener una visión limpia de la región central de los AGN. Además, se puede apreciar una clara mejoría en CIGALE a la hora de clasificar los AGNs añadiendo los rayos X, con una mayor fracción de tipos 2 con ángulos de inclinación altos.

4.3.3. Propiedades de las galaxias

Se ha realizado una comparación gráfica de la masa estelar de las galaxias anfitrionas de la muestra de los AGNs añadiendo el módulo de análisis de rayos X y sin él. Como se puede apreciar en la Figura 4.6 no existe una gran diferencia entre los resultados de los dos ajustes, dando un resultado medio de $M_{\star} = (7.61 \pm 3.70) \cdot 10^{11} M_{\odot}$ sin introducir los rayos X a la SED y $M_{\star} = (8.00 \pm 3.62) \cdot 10^{11} M_{\odot}$ añadiéndolos.

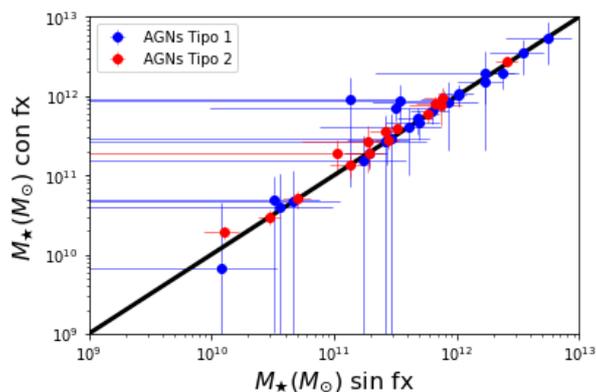


Figura 4.6: Comparación de la masa estelar de las galaxias anfitrionas a las que pertenecen cada uno de los AGNs. La línea negra representa la relación 1:1.

Se ha realizado la misma comparación con la cantidad de masa estelar formada por año en la Figura 4.7. De nuevo, no se observa ninguna diferencia destacable, dando un resultado medio de $SFR = (7.97 \pm 3.23) \cdot 10^2 M_{\odot} yr^{-1}$ sin introducir los rayos X a la SED y $SFR = (8.56 \pm 3.10) \cdot 10^2 M_{\odot} yr^{-1}$ añadiéndolos.

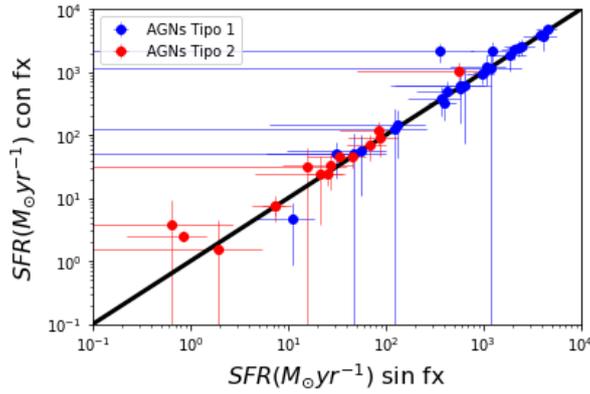


Figura 4.7: Comparación del ritmo de formación estelar de las galaxias anfitrionas a las que pertenecen cada uno de los AGNs. La línea negra representa la relación 1:1.

4.4. Identificación de AGNs con CIGALE

Siguiendo el diagrama de flujo de la Figura 4.1 se tienen 12 objetos candidatos a AGNs clasificados como tipo 2 que no tienen detección en rayos X. En estas fuentes, debido precisamente a no detectar líneas de emisión anchas procedentes de la región central del AGN, ni disponer de detección en rayos X (propiedad universal de los AGN), es importante conocer si son realmente un AGN.

De nuevo, el mayor indicativo de la presencia de un AGN, a partir de los ajustes de las SEDs, es $frac_{AGN}$. En la representación de la izquierda de la Figura 4.8 se puede observar la distribución de los valores de $frac_{AGN}$ que tienen estas fuentes. Todas ellas tienen componente AGN, aunque sea débil. Para identificar los casos en donde la detección del AGN es significativa, se ha utilizado el criterio $(frac_{AGN} - \Delta frac_{AGN} \geq 0.3)$ [32], donde $\Delta frac_{AGN}$ es el error de $frac_{AGN}$. Con este criterio de detección se puede confirmar la naturaleza AGN a partir del análisis de las SEDs en al menos 7 de los 12 objetos.

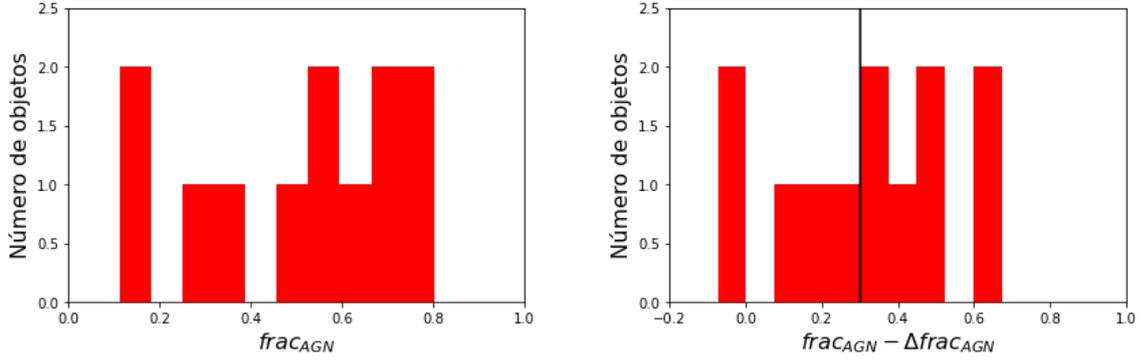


Figura 4.8: Izquierda: distribución de los valores de $frac_{AGN}$ para los 12 objetos tipo 2 sin detección en rayos X. Derecha: distribución de los valores de $frac_{AGN} - \Delta frac_{AGN}$ para los 12 objetos tipo 2 sin detección en rayos X. La línea negra representa el corte realizado en $frac_{AGN} - \Delta frac_{AGN} = 0.3$.

4.5. Luminosidad a $6 \mu\text{m}$ como trazador del poder del AGN

Una de las cuestiones que se había planteado cuando comenzó el TFG era si la luminosidad IR puede ser utilizada como trazador de la luminosidad intrínseca de los AGNs. Teóricamente, esta luminosidad es producida del reprocesado de la emisión nuclear del AGN por parte de las partículas de polvo que rodean la región central de los AGN, localizadas principalmente en el toro. En estas longitudes de onda los efectos de extinción son ~ 100 veces menores que en el óptico y, por tanto, todos los AGN deberían ser brillantes en el MIR independiente de su clasificación espectroscópica. Para comprobar este hecho, en la Figura 4.9, se ha representado la luminosidad a $6 \mu\text{m}$ frente al redshift de cada objeto (izquierda) y la distribución del logaritmo de sus valores para todos los objetos con $z \leq 1$ (derecha). El corte en $z = 1$ está realizado para tener una comparación no sesgada en el histograma, ya que a redshift altos no se encuentra ningún AGN tipo 2. Se puede confirmar que, efectivamente, estos valores solapan para ambos tipos de AGNs, con un resultado de $\log[L_{6\mu\text{m}}(\text{erg/s})] = 44.5 \pm 0.7$ para los tipo 1 y $\log[L_{6\mu\text{m}}(\text{erg/s})] = 44.2 \pm 0.5$ para los tipo 2, por lo que dicha luminosidad, puede utilizarse como trazador del poder del AGN.

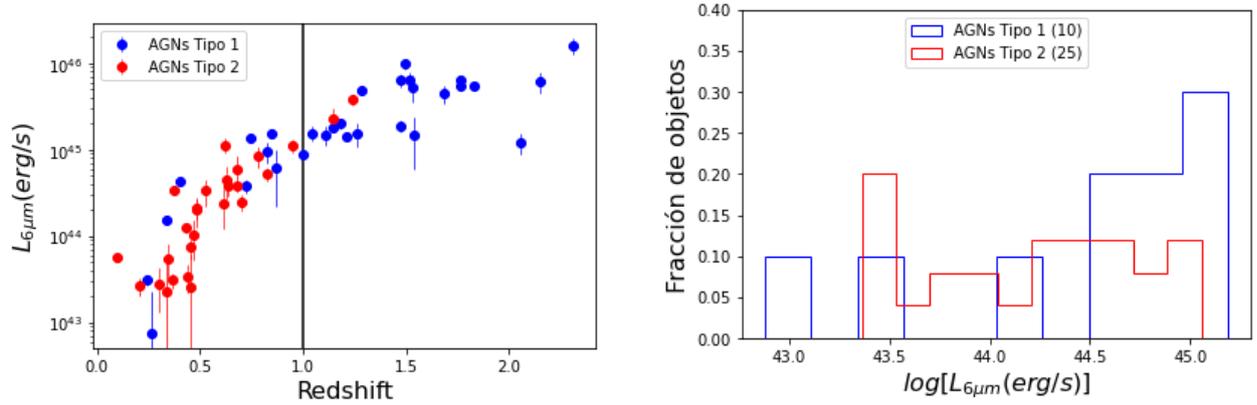


Figura 4.9: Izquierda: representación de la luminosidad a $6 \mu\text{m}$ de cada AGN frente a su redshift. La línea negra representa el corte realizado en $z = 1$. Derecha: distribución del logaritmo de los valores de la luminosidad a $6 \mu\text{m}$ para los AGNs con $z \leq 1$. El número entre paréntesis indica la cantidad de objetos de cada tipo.

4.6. Comparación de las propiedades de las galaxias anfitrionas de AGNs tipo 1 y 2

Uno de los objetivos del trabajo es buscar si existe alguna diferencia entre las galaxias anfitrionas según el tipo de AGN que se encuentre en su interior.

En primer lugar, a través de los ajustes realizados con CIGALE se ha representado, en la Figura 4.10, los valores de la masa de las galaxias frente al redshift (izquierda) y la distribución del logaritmo de sus valores para $z \leq 1$ (derecha). Analizando estas gráficas y los valores medios obtenidos según el tipo de AGN: $\log[M_*(M_\odot)] = 11.2 \pm 0.8$ para los tipo 1 y $\log[M_*(M_\odot)] = 11.4 \pm 0.6$ para los tipo 2, no se observa ninguna diferencia considerable.

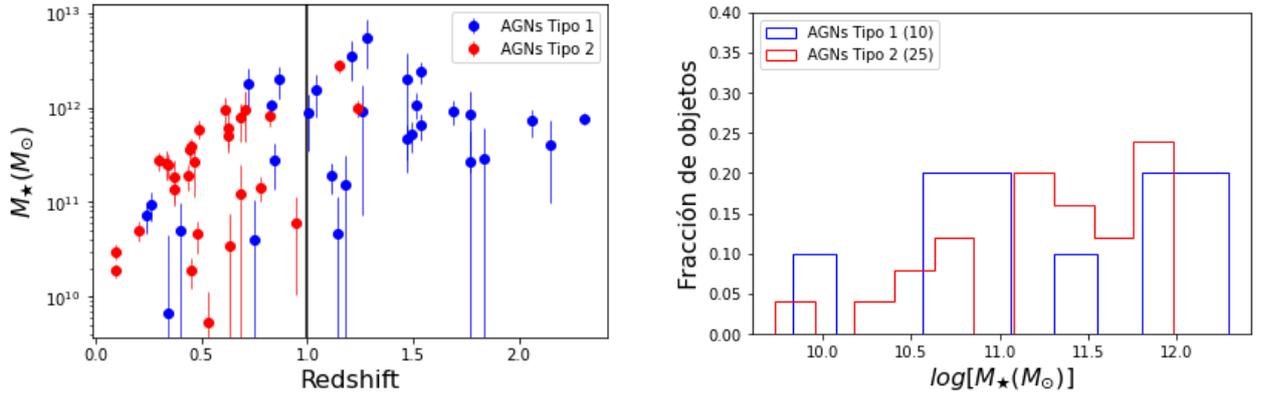


Figura 4.10: Izquierda: representación de la masa de las galaxias frente al redshift. La línea negra representa el corte realizado en $z = 1$. Derecha: distribución del logaritmo de las masas de las galaxias según el tipo de AGN que alberguen en su interior.

Finalmente, otra de las propiedades que se ha estudiado ha sido el SFR. En la Figura 4.11 se ha representado los valores del SFR de las galaxias según la clasificación espectral de cada AGN, frente a su redshift (izquierda) y la distribución del logaritmo de sus valores para $z \leq 1$ (derecha). De nuevo, no parece observarse ninguna diferencia considerable, resultando, para las galaxias con AGNs tipo 1 un valor medio de $\log[SFR(M_{\odot}yr^{-1})] = 1.74 \pm 0.62$ y $\log[SFR(M_{\odot}yr^{-1})] = 1.66 \pm 0.52$ para las galaxias con AGNs tipo 2.

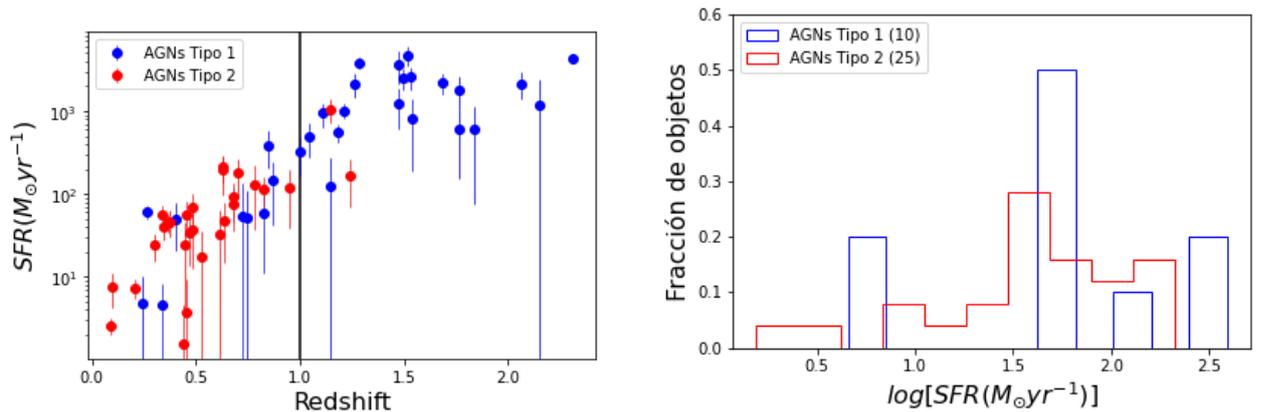


Figura 4.11: Izquierda: representación del SFR de las galaxias hospedadoras frente al redshift. La línea negra representa, de nuevo, el corte realizado en $z = 1$. Derecha: distribución del logaritmo de los valores del SFR de las galaxias según el tipo de AGN que alberguen en su interior.

Capítulo 5

Discusión

5.1. Impacto de añadir los rayos X a los ajustes con CIGALE

Se ha llevado a cabo una comparación de los resultados de los ajustes de las SEDs de nuestros AGN con y sin los flujos en rayos X. Se ha comprobado que su añadido no modifica en gran medida los valores de las propiedades a estudiar. Se ha encontrado también una disminución del parámetro $frac_{AGN}$ para una minoría de objetos, caracterizados por su baja luminosidad, al añadir los rayos X a la SED, además de una disminución general en la incertidumbre. Esto es debido a que, incorporando los rayos X, CIGALE permite limitar mejor la contribución de la emisión AGN en el óptico y como resultado también en la parte IR de la SED[32]. Finalmente, también se ha comprobado que incorporar los rayos X a los análisis con CIGALE permite obtener una clasificación basada en el ángulo de inclinación (tipo 1 vs tipo 2) mucho más precisa, lo cual puede resultar extremadamente útil en caso de no disponer de clasificaciones espectroscópicas.

Se concluye que, introducir los rayos X en la SED de los objetos, permite aumentar el valor científico de los resultados obtenidos con CIGALE, destacando la mejoría a la hora de clasificar los AGNs según su ángulo de inclinación.

5.2. Identificación de AGNs con CIGALE

Las fuentes con detección en rayos X y/o detección de la emisión de líneas anchas en el rango UV/óptico (tipo 1) está claro que son AGNs, sin embargo, esto no es tan claro en los tipo 2 que

no tengan detección en rayos X, ya que la observación de líneas estrechas no es una confirmación de la presencia de un AGN¹. Por esto, una de las funciones más interesantes de CIGALE es que permite confirmar o desmentir posibles candidatos a AGNs a través del parámetro $frac_{AGN}$, que refleja la contribución del objeto a la luminosidad total.

Se ha podido confirmar que 7 de los 12 objetos sin detección en rayos X y con clasificación espectroscópica tipo 2 son AGNs.

5.3. Importancia de la luminosidad IR

Comparando las distribuciones de la luminosidad a $6 \mu\text{m}$ para AGNs tipo 1 y 2 se ha confirmado que son similares, lo que sugiere que es posible utilizar dichas luminosidades para trazar la presencia y poder de los AGNs, incluso en los sistemas más absorbidos, algo que es de vital importancia en ausencia de detección en rayos X.

5.4. Propiedades de las galaxias

Analizando las masas y ritmos de formación estelar de las galaxias en función de la clasificación espectroscópica del AGN que albergan en su interior, no se ha encontrado ninguna diferencia clara. A pesar de esto, artículos recientemente publicados parecen indicar que los AGNs tipo 2 tienden a residir en galaxias más masivas, de modo que, tanto la galaxia anfitriona como el toro pueden contribuir al oscurecimiento óptico de los AGNs [33].

5.5. Conclusiones finales

En este trabajo se han analizado distintas propiedades de los AGN y sus galaxias anfitrionas en función de la clasificación espectroscópica de los AGNs. En cuanto a los AGNs se ha confirmado que:

- Efectivamente, según predice el modelo de unificación, los AGNs tipo 1 tienen un ángulo de inclinación del toro menor que los tipo 2, razón por la cual, estos últimos están oscurecidos.

¹En este caso podría usarse los diagramas BPT pero está restringido a z bajos porque se necesitan observaciones de las regiones de H_α y H_β (Sección 1.5.2).

- Al menos 7 de los objetos con clasificación espectroscópica tipo 2 y sin detección en rayos X son AGNs.
- Es posible utilizar la luminosidad a $6 \mu\text{m}$ como trazador de la actividad de los AGN.

En cuanto a las propiedades de las galaxias se ha llegado a las siguientes conclusiones:

- No se ha encontrado ninguna tendencia clara que parezca indicar que las galaxias anfitrionas sean más o menos masivas dependiendo del tipo de AGN que alberguen.
- Del mismo modo, tampoco se ha observado ninguna diferencia destacable en el ritmo de formación estelar de las galaxias según el tipo de AGN que se encuentre en su interior.

Bibliografía

- [1] P. Padovani, “Active galactic nuclei: what’s in a name?,” *The Astronomy and Astrophysics Review*, vol. 25, p. 91, 2017.
- [2] C. Harrison, *Observational constraints on the influence of active galactic nuclei on the evolution of galaxies*. Ph.D thesis, Durham University, 2014.
- [3] I. Ordovás, *Una visión multifrecuencia de Núcleos de Galaxias Activas*. Ph.D thesis, Universidad de Cantabria, 2019.
- [4] R. Antonucci, “Unified models for active galactic nuclei and quasars,” *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, vol. 31, pp. 473–521, 1993.
- [5] “IPAC/AGN emission lines.” Disponible en: <https://ned.ipac.caltech.edu/level5/March02/Netzer/Netzer1.html#3.1>. Acceso: 19 de junio de 2023.
- [6] W. Carrol and A. Ostlie, *An Introduction to Modern Astrophysics*. Cambridge University Press, 2017.
- [7] H. Netzer, “Revisiting the unified model of active galactic nuclei,” *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, vol. 53, pp. 365–408, 2015.
- [8] C. Hickox and M. Alexander, “Obscured active galactic nuclei,” *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, vol. 56, pp. 625–671, 2018.
- [9] Mateos S., et. al., “Using the Bright Ultrahard XMM–Newton survey to define an IR selection of luminous AGN based on WISE colours,” *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 426, pp. 3271–3281, 2012.

- [10] J. Baldwin and M. Phillips, “Classification parameters for the emission-line spectra of extragalactic objects,” *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, vol. 93, pp. 5–19, 1981.
- [11] “SDSS DR14-Scope.” Disponible en: <https://www.sdss4.org/dr14/scope/>. Acceso: 19 de junio de 2023.
- [12] “CSIC/SVO Filter Profile Service.” Disponible en: <http://svo2.cab.inta-csic.es/theory/fps3/index.php?mode=browse&gname=SLOAN&asttype=>. Acceso: 19 de junio de 2023.
- [13] “SDSS DR6-Photometric Flux Calibration.” Disponible en: <https://classic.sdss.org/dr6/algorithms/fluxcal.html#sdss2ab>. Acceso: 19 de junio de 2023.
- [14] “SDSS.” Disponible en: <https://classic.sdss.org/dr6/instruments/imager/index.html#filtersC2A0>. Acceso: 19 de junio de 2023.
- [15] Skrutskie M. F., et. al., “The Two Micron All Sky Survey (2MASS),” *The Astronomical Journal*, vol. 131, pp. 1163–1183, 2006.
- [16] “NASA/CALTECH 2006 A brief explanation of 2MASS.” Disponible en: <https://www.ipac.caltech.edu/2mass/overview/about2mass.html>. Acceso: 19 de junio de 2023.
- [17] “CSIC/SVO Filter Profile Service.” Disponible en: <http://svo2.cab.inta-csic.es/theory/fps3/index.php?mode=browse&gname=2MASS&asttype=>. Acceso: 19 de junio de 2023.
- [18] Lawrence A., et. al., “The UKIRT Infrared Deep Sky Survey (UKIDSS),” *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 379, pp. 1599–1617, 2007.
- [19] “CSIC/SVO Filter Profile Service.” Disponible en: <http://svo2.cab.inta-csic.es/theory/fps3/index.php?mode=browse&gname=UKIRT&gname2=UKIDSS&asttype=>. Acceso: 19 de junio de 2023.
- [20] “The Wide-field Infrared Survey Explorer at IPAC.” Disponible en: <https://wise2.ipac.caltech.edu/docs/release/allsky/>. Acceso: 19 de junio de 2023.
- [21] “CSIC/SVO Filter Profile Service.” Disponible en: <http://svo2.cab.inta-csic.es/theory/fps3/index.php?mode=browse&gname=WISE&asttype=>. Acceso: 19 de junio de 2023.

- [22] “ESA XMM-Newton.” Disponible en: <https://www.cosmos.esa.int/web/xmm-newton>. Acceso: 19 de junio de 2023.
- [23] “ESA XMM-Newton.” Disponible en: <https://www.cosmos.esa.int/web/xmm-newton/technical-details-mirrors>. Acceso: 19 de junio de 2023.
- [24] Noll S., et. al., “Analysis of galaxy SEDs from far-UV to far-IR with CIGALE: Studying a SINGS test sample,” *Astronomy & Astrophysics*, vol. 507, pp. 1793–1813, 2009.
- [25] Boquien M., et. al., “CIGALE: a python Code Investigating GALaxy Emission,” *Astronomy & Astrophysics*, vol. 622, p. 33, 2019.
- [26] Yang G., et. al., “Fitting AGN/Galaxy X-Ray-to-radio SEDs with CIGALE and improvement of the code,” *The Astrophysical Journal*, vol. 927, p. 20, 2022.
- [27] “CIGALE Code Investigating GALaxy Emission.” Disponible en: <https://cigale.lam.fr/documentation/>. Acceso: 19 de junio de 2023.
- [28] Charlot S., & Fall S.M., “A simple model for the absorption of starlight by dust in galaxies,” *The Astrophysical Journal*, vol. 539, pp. 718–731, 2000.
- [29] Yang G., et. al., “X-CIGALE: Fitting AGN/galaxy SEDs from x-ray to infrared,” *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 491, pp. 740–757, 2020.
- [30] Alexander D.M., et. al., “The Chandra Deep Field North Survey. XIV. X-Ray-Detected Obscured AGNs and Starburst Galaxies in the Bright Submillimeter Source Population ,” *The Astronomical Journal*, vol. 125, pp. 383–397, 2003.
- [31] Koutoulidis L., et. al., “Host galaxy properties of X-ray AGN in the Local Universe,” *Astronomy & Astrophysics*, vol. 658, p. 7, 2022.
- [32] Mountrichas G., et. al., “X-ray flux in SED modelling: An application of X-CIGALE in the XMM-XXL field,” *Astronomy & Astrophysics*, vol. 646, p. 17, 2021.
- [33] Zou F., et. al., “The Host-galaxy Properties of Type 1 versus Type 2 Active Galactic Nuclei,” *The Astrophysical Journal*, vol. 878, p. 13, 2019.