



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MEXICO
PROGRAMA DE POSGRADO EN ASTROFÍSICA

INSTITUTO DE ASTRONOMÍA

ESTUDIO DE LA EMISIÓN CIRCUMNUCLEAR DE AGNs
CERCANOS EN EL INFRARROJO MEDIO

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRA EN CIENCIAS (ASTROFÍSICA)

PRESENTA:
DONAJI CATALINA ALEJANDRA ESPARZA ARREDONDO

TUTORAS
DRA. DEBORAH DULTZIN, INSTITUTO DE ASTRONOMÍA
DRA. OMAIRA GONZÁLEZ, INSTITUTO DE RADIOASTRONOMÍA Y
ASTROFÍSICA

MÉXICO, DF, ENERO 2016



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

**Estudio de la emisión circumnuclear de AGNs cercanos en el
infrarrojo medio**

por

Donaji Catalina Alejandra Esparza Arredondo

Lic. Física, Universidad Autónoma de Coahuila (2013)

Tesis presentada para obtener el grado de

Maestro en Ciencias

en el

INSTITUTO DE ASTRONOMÍA

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

Distrito Federal, México. Enero, 2016

*”Sabemos lo que somos,
pero aún no sabemos lo que podemos llegar a ser”.*
William Shakespeare.

Dedicatoria

A todas esas personas que estuvieron conmigo al pie del cañon a pesar de estar lejos:

Mamá, Papá, Hermana.

A todas aquellas que fueron parte de mi vida y me dieron lo mejor de ustedes:

Mamá Candita, Bisabuelo Panchito y tío Homero.

A la persona que me ha hecho compañía durante este camino:

Gustavo Daniel Montiel Hernandez.

Agradecimientos

Quiero agradecer a:

- A mis asesoras, la Dra. Deborah Dultzin y la Dra. Omaira Gonzalez, por compartir sus conocimientos y experiencia conmigo. Su apoyo e ideas para llevarlo a cabo han sido un aporte invaluable, no solo en mi trabajo si no también en mi formación académica. También les agradezco a ambas facilitarme los medios para llevar a cabo este trabajo.
- A la UNAM en especial al personal del Instituto de Astronomía en el D.F. y al Instituto de Radioastronomía y Astrofísica en Morelia por recibirme y brindarme los medios para realizar este trabajo.
- Al CONACyT por el apoyo económico brindado durante mi posgrado.
- Mis padres por impulsarme a cumplir mis sueños. Por enseñarme que un "no puedo" no es válido si no se ha hecho el intento. Por darme todo su amor y cuidarme.
- A mi novio Gustavo por estar a mi lado, desde el primer día. Gracias por todas las noches que me has hecho compañía mientras estudiaba. Gracias por escuchar mis largas conversaciones sobre astronomía. Gracias por creer en mí.
- A todos mis amigos que estuvieron apoyándome desde mi rancho. Gracias por su paciencia y sus palabras de aliento.
- A mis compañeros del posgrado y generación, con quien compartí dos años de buenos y malos momentos: Miriam, Vero, Felipe, Miguel, Jeffrey, Oriana, Gaby y Alejandra.

Gracias a todos.

Índice general

1. Introducción	1
1.1. Taxonomía de AGNs	2
1.2. Estructura y modelo para los AGNs	4
1.3. El espectro electromagnético de los AGNs.	7
1.4. Los AGNs en el IR	8
1.5. Mecanismos de alimentación y formación estelar	9
1.6. La línea de PAH a $11.3\mu\text{m}$	12
1.7. La línea de [SIV]	15
1.8. Justificación del trabajo	16
2. Muestra	18
2.1. Datos sobre instrumentos.	18
2.2. Selección de los datos.	19
3. Análisis	23
3.1. Reducción de datos y extracción de espectros	23
3.2. Calibración cruzada en flujo entre los espectros de T-ReCS y de <i>Spitzer</i> /IRS	27
3.3. Medidas realizadas sobre los espectros	29
3.3.1. Medidas del EW y el flujo	29
3.3.2. Perfiles radiales de PAH y [SIV]	32
3.3.3. Ajustes para perfiles radiales	34

4. Resultados	36
4.1. Comportamiento de los rasgos de PAHs	37
4.1.1. Descripción individual.	37
4.1.2. Descripción General	39
4.2. Comportamiento de la línea de [SIV]	41
4.2.1. Descripción individual	41
4.2.2. Descripción General de la línea de [SIV]	44
4.3. Comportamiento de la línea de [SIV] frente al rasgo de PAH	48
5. Discusión	56
5.1. Comportamiento del PAH en el entorno de AGNs	56
5.2. Origen de la línea de [SIV] a $10.5\mu\text{m}$	58
6. Conclusiones y trabajo futuro	61
A. Descripción de objetos	65
Bibliografía	90

Estudio de la emisión circumnuclear de AGNs cercanos en el infrarrojo medio

por

Donaji Catalina Alejandra Esparza Arredondo

Resumen

El mecanismo de alimentación que permite la acreción de un núcleo activo de galaxia (AGN, por sus siglas en inglés) es complejo, pues requiere de material viajando desde la galaxia anfitriona hasta escalas de pc cercanas al centro. En diversos trabajos, principalmente teóricos, se ha sugerido una relación entre la formación estelar y el agujero negro super-masivo (SMBH, por sus siglas en inglés). Sin embargo, estudiar observacionalmente el medio y los procesos circumnucleares de un AGN es complicado pues los indicadores clásicos de la presencia de brotes estelares pueden ser contaminados fácilmente por la emisión del propio AGN. Pero, en el infrarrojo medio (MIR, por sus siglas en inglés) existe una poderosa herramienta para trazar SF conocida como Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (PAHs, por sus siglas en inglés). No obstante, existen algunos trabajos que sugieren que estos PAHs pueden ser destruidos por el propio AGN [Diamond-Stanic et al., 2010]. Otros estudios apuntan a que existen trazadores de fotoionización nuclear, como es el caso de la línea de [SIV]. El origen de la emisión de [SIV] es aún controvertido, pues apunta a que puede producirse en regiones de SF [Pereira-Santaella et al., 2010] o por fotoionización del AGN [Dasyra et al., 2011].

Los objetivos de este trabajo son estudiar la posible destrucción o dilución de los PAHs a distintas escalas circumnucleares y el origen de la línea de [SIV]. La meta a largo plazo es estudiar la conexión entre la formación estelar circumnuclear y el AGN. Para cumplir con nuestros objetivos hicimos un análisis de emisión extendida para 20 fuentes de las 22 que contiene la muestra presentada por González-Martín et al. [2013]. Todos los objetos fueron observados en la banda N con el Espectrógrafo Cámara de Región Térmica (T-ReCS, por sus siglas en inglés) ubicado en el telescopio de 8.1 m en el observatorio Gemini (primeramente en Gemini South y luego en Gemini North). Esta muestra contiene todos los archivos públicos de datos de T-ReCS hasta Junio del 2012 para AGNs locales con espectroscopia de alta resolución en MIR. Para poder trazar las partes más externas de cada galaxia hemos incluido los espectros de *Spitzer*, obtenidos a través del catálogo CASSIS.

Para el procesamiento de los datos y el análisis se usó la pipeline RedCan. Al utilizar conjuntamente los espectros de T-ReCS y *Spitzer*/IRS se enfrentó al problema de la calibración cruzada en flujo de ambos instrumentos. A dicho problema se propuso como solución un escalado del flujo de los datos de *Spitzer* de acuerdo al flujo de IRAS a $12\mu\text{m}$. Una vez aplicada dicha solución, se midió tanto flujos como anchos equivalentes (EWs) del rasgo de PAH y la línea de [SIV], usando el método de Hernan-Caballero et al. [2011]. Las incertidumbres se obtuvieron mediante simulaciones de Monte Carlo para cada una de las medidas realizadas. El EW no es afectado por la calidad de la calibración en flujo ni de las diferencias entre las calibraciones entre los datos. Para obtener un perfil radial del flujo y EW del rasgo de PAH y la línea de [SIV] se hizo una sustracción de la medida nuclear al primer radio de apertura y a los siguientes radios de apertura se les sustrajo la medida del radio anterior. Finalmente, a la medida de

Spitzer se le sustrajo la medida del último anillo medido con T-ReCS. A este perfil radial se le aplicó un ajuste tipo ley de potencias con la finalidad de entender los resultados de una forma cuantitativa.

Nuestros resultados para la muestra en general fueron que el 65 % de los objetos carecen de emisión de PAHs en el núcleo. Mientras que el 84 % de las fuentes presentan emisión de [SIV] en la parte nuclear. La emisión del PAH en $11.3\mu\text{m}$ es extendida en 14 fuentes. En el caso del [SIV] hemos encontrado extensión en 17 fuentes. Para ambas líneas la escala de emisión puede llegar hasta 1kpc.

Logramos hacer una comparación entre la emisión de la línea de [SIV] y el PAH en $11.3\mu\text{m}$ para cuatro fuentes (NGC 5135, NGC 5643, NGC 7130 y NGC 7582) donde se registró suficiente emisión de las dos líneas a diferentes escalas del núcleo. De este análisis se encontró que el flujo de la emisión de PAH en el núcleo es baja, pero sufre incrementos a diferentes escalas de cientos de parsec los cuales coinciden con regiones de SF. En el caso del flujo de [SIV] encontramos que el máximo se registra en la apertura nuclear para dos fuentes. Notamos también que en dos objetos el flujo de [SIV] sigue el mismo comportamiento que la característica de PAH.

Debido a que nuestra muestra no incluye AGNs de muy baja luminosidad (i.e. $L_{bol} < 10^{42} \text{erg/s}$), no podemos discernir con seguridad si el motivo del decremento de PAHs en $11.3\mu\text{m}$ nucleares es debido a atenuación por la absorción de silicatos o por la destrucción debida al campo de radiación del AGN. Sí descartamos la dilución por el continuo del AGN propuesta para otros objetos [Alonso-Herrero et al., 2014]. Proponemos que un estudio con alta resolución espacial, que resuelva la posibles regiones de formación estelar en escalas de pocas decenas de parsec, podría ayudar a comprender el motivo.

Del análisis aplicado a nuestra muestra concluimos que la mayor contribución a la emisión de la línea de [SIV] nuclear proviene del AGN. Sin embargo, para escalas circumnucleares el [SIV] tiene contribuciones que provienen de regiones de formación estelar. La relación entre la emisión de [SIV] y las regiones de formación estelar puede implicar la existencia de un mecanismo de producción para esta línea ligado a la producción de PAHs. Así, aunque es posible que el AGN sí produzca una parte de la emisión de [SIV] nucleares, no creemos que éste pueda usarse como trazador de fotoionización nuclear, debido a contribuciones claras de procesos de formación estelar en escalas muy próximas al núcleo.

Estudio de la emisión circumnuclear de AGNs cercanos en el infrarrojo medio

by

Donaji Catalina Alejandra Esparza Arredondo

Abstract

The feeding mechanism that allows the accretion of an active galactic nucleus (AGN) is complex, because it requires material traveling from the host galaxy to pc-scale distances from the center. In several works, mainly theoretical, a relationship between star formation (SF) and the super-massive black hole (SMBH) has been suggested. However, observationally studying the environment and the circumnuclear processes of an AGN is complicated because the classical indicators of the presence of starbursts can be easily contaminated by the emission of AGN. Yet in the mid-infrared (MIR) wavelength there is a powerful tool to trace SF called polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs). Still, there are some studies that suggest that these PAHs can be destroyed by the AGN Diamond-Stanic et al. [2010]. Other studies indicate that there exist also a tracer of nuclear photoionization at these wavelengths, such as the [SIV] line. The origin of the [SIV] emission is still controversial because it states that it can appear in SF regions Pereira-Santaella et al. [2010] or by AGN photoionization Dasyra et al. [2011].

The objectives of this work are to study the possible destruction or dilution of PAHs at different circumnuclear scales and the origin of the [SIV] line. The long-term goal is to study the connection between the circumnuclear SF and the AGN. To meet our goals we did an analysis of extended emission for 20 sources of the 22 that the sample presented by [González-Martín et al., 2013] contains. All the objects were observed in the N-band with the Thermal-Region Camera Spectrograph (T-ReCS) located on the 8.1m Gemini observatory telescope (first in Gemini South and then in Gemini North). This sample contains all public files of T-ReCS data on local AGNs until June 2012 with high-resolution spectroscopy at MIR. To trace the outer parts of each galaxy we have included *Spitzer* spectra, obtained through the CASSIS catalog. For the data processing and analysis we have used the RedCan pipeline. When jointly using *Spitzer*/IRS and T-ReCS spectra we faced the problem of flow cross-calibration on both instruments. We proposed as a solution a scaling factor applied to the *Spitzer* data flux according to the IRAS flux at $12\mu\text{m}$. After applying this factor, both fluxes were measured as equivalent widths of the PAH feature and the [SIV] line, using the [Hernan-Caballero et al., 2011] method. The uncertainties were obtained by Monte Carlo simulations on each one of the measures performed. To obtain a characteristic radial profile of the flux and EW of the PAH band and the [SIV] emission line, the nuclear measurement was subtracted from the first aperture radius, while the measurements of each previous radius was subtracted to the following aperture radii. The flux of the last ring measured with T-ReCS was subtracted to the *Spitzer* flux. A power law fit was applied to the radial profile in order to understand the results in a quantitative way. Our results for overall sample show that 65 % of the objects do not have PAHs emission in the nucleus. While 84 % of sources show [SIV] emission in the nuclear part. The PAH emission at $11.3\mu\text{m}$ is extended in 14 sources. In the case of the [SIV] line we have found extension in 17 sources. For the both lines the emission scale can get up to $\sim 1\text{kpc}$.

We were able to make a comparison between the [SIV] line emission and PAH $11.3\mu\text{m}$ in four sources (NGC 5135, NGC 5643, NGC 7130, and NGC 7582) where sufficient emission of the two lines were registered at different scales from the core. From this analysis we found that the flux of the PAH emission in the core is low, but it suffers increments at different scales of hundreds of pc, which coincide with regions of SF. In the case of the [SIV] emission flux we found that the maximum is registered in the nuclear aperture for the two sources. We also noticed that in two objects the [SIV] flux follows the same behaviour as that of PAH flux. Because our sample does not include very low luminosity AGNs (i.e. $L_{bol} < 10^{42}$ erg/s), we can not discern for sure if the reason for the decrease of PAHs at $11.3\mu\text{m}$ is due to attenuation by the absorption of silicates or due to the destruction caused to the radiation field of the AGN. We discard for these sources the dilution due to the AGN continuum proposed for other objects [Alonso-Herrero et al., 2014]. We propose that a study with high spatial resolution, that solves the possible regions of SF on scales of a few tens of pc, could help to understand which is the main responsible for the nuclear decrement on the PAH fluxes.

From the analysis applied to our sample we conclude that the largest contribution to the emission of the nuclear [SIV] line comes from the AGN. However, at circumnuclear scales, [SIV] has contributions that come from SF regions. The relationship between the emission of [SIV] and the SF regions may imply the existence of a mechanism of production for this line linked to the production of PAHs. Thus, although it is possible that the AGN contributes with part of the emission of [SIV] at the inner parts of the systems, we do not believe that this line can be used as a trace of nuclear photoionization due to clear contributions of SF processes at scales very close to the nucleus.

Capítulo 1

Introducción

Uno de los desafíos más importantes en el campo de la astronomía moderna es descubrir la física detrás de los procesos subyacentes de la formación y evolución de las galaxias. Los agujeros negros (*Black Hole*, BH) son uno de los fenómenos más extraños y fascinantes que se han encontrado en el espacio. Los BHs son objetos de densidad extrema, con una atracción gravitacional tan grande que ni siquiera la luz puede escapar de ellos. En 1796 Laplace propuso por primera vez una idea cercana al concepto de agujero negro (lo llamo “Cuerpo invisible”), basandose en la teoría corpuscular de la luz. Sin embargo, fue hasta 1916 cuando Albert Einstein sentó la idea de BH como tal con base en la teoría general de la relatividad. El título de “Agujero Negro” fue acuñado por John Wheeler en 1967 y el primer descubrimiento de éstos se dio en 1971. Desde entonces se han encontrado BHs de diferentes tamaños en el Universo. En nuestra vecindad galáctica y galaxias cercanas existen los conocidos como BHs estelares con masas de 3-30 M_{\odot} y son el remanente del colapso de un núcleo en supernovas tipo II (*Supernovae type II*, SNeII) cuyas estrellas progenitoras tienen masas de hasta 20-30 M_{\odot} . Hace pocas décadas se descubrió la existencia de agujeros negros supermasivos (*Supermassive Black Holes*, SMBHs) que residen en el centro de las galaxias con bulbo. Algunos SMBH se consideraron activos y se les dio el nombre de “Núcleos Activos de Galaxias” (*Active Galactic Nucleus*, AGNs). Se considera que estos AGNs contienen un SMBH con masa de entre $10^6 - 10^9 M_{\odot}$ y éste es alimentado por un disco de acreción que los rodea [Lynden-Bell, 1969], el cual se encarga de convertir la energía gravitacional de la masa que cae en energía radiativa [Zel’dovich, 1964; Salpeter, 1964; Shakura & Sunyaev, 1973], dicha energía es liberada a través de radiación electromagnética.

La energía liberada por un AGN está en el rango de entre $10^{38} - 10^{48} \text{erg s}^{-1}$ [Peterson, 1997] y emite en todas las longitudes de onda (e.g. radio, microondas, infrarrojo, óptico, ultravioleta, rayos X, rayos γ , etc.).

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

1.1. Taxonomía de AGNs

Actualmente existen varias clasificaciones para los AGNs dependiendo de la luminosidad observada a diferentes longitudes de onda (Objetos BL Lac, Blazares, Radio galaxias, QSOs, Seyferts o LINERs). Esta clasificación es importante porque puede darnos información sobre los procesos, la evolución y las propiedades de cada galaxia. Aquí mencionaremos algunas clases por su importancia o relevancia para el estudio que hemos realizado.

En un principio los AGNs se dividieron de acuerdo al espectro óptico en tipo 1 y tipo 2. Los tipo 1 muestran líneas anchas permitidas que provienen de la BLR, pero también muestran líneas delgadas de emisión. Mientras que los tipo 2 muestran sólo líneas delgadas que provienen de la NLR. Además existen AGNs de tipo 0 conocidos como Blazares. Estos objetos carecen de rasgos de emisión o absorción fuertes ($EW < 5\text{\AA}$) y muestran una intensa polarización e intensa emisión del continuo en todas las longitudes de onda [Blandford & Rees, 1978]. Además de la clasificación anterior surgieron varias clasificaciones como son:

1 **Radio Galaxias:** Son galaxias que emiten fuertemente en longitudes de onda de radio a una luminosidad $\geq 10^8 L_{\odot}$. En 1974 Fanaroff & Riley [1974] sugirieron una clasificación para estas fuentes de acuerdo a la posición relativa de la región de mayor brillo. Las fuentes que presentan un brillo decreciente hacia las partes más externas se conocen como (Fanaroff-Riley) FRI. Por el contrario las fuentes que presentan mayor brillo en las partes externas son clasificadas como (Fanaroff-Riley) FR II.

2 **Cuasares y QSO:** Los cuasares (*Quasi-stellar radio sources*) fueron descubiertos en longitudes de onda en radio por Schmidt en 1963. Se caracterizan por tener líneas anchas

de emisión y observarse hasta distancias muy grandes ($z \sim 6$). Los cuasares pueden producir hasta 10^{13} veces la luminosidad del sol. A partir de la emisión en rayos X de estos objetos se hizo una clasificación en dos grupos: radio calladas (*radio-quiet*) y radio fuertes (*radio-loud*). En el caso de los radio callados la emisión observada en rayos X es más débil. Aproximadamente el 90% de los cuasares están dentro del primer grupo y el 10% restante dentro del segundo. En el espectro óptico los espectros de ambos grupos son similares. El término cuasi estelar (*Quasi-Stellar Objects*, QSOs) es utilizado para referirse a las fuentes radio calladas, debido a la confusión de estas fuentes con objetos estelares en un principio [Sandage, 1964]. El espectro en óptico/UV de los cuasares se caracteriza por tener además de líneas de emisión también líneas de absorción. Los diferentes tipos de líneas de absorción se distinguen por clases de acuerdo con la longitud de onda y el ancho en: 1) Sistemas metálicos, 2) Asociadas a sistemas metálicos, 3) Bosque de $\text{Ly}\alpha$ y 4) Líneas de absorción anchas (*Broad Absorption lines*, BAL). Alrededor del 15% de los cuasares cercanos son BALs.

- 3 **Galaxias Seyfert:** Imágenes en óptico las distinguen como galaxias espirales con un núcleo muy brillante. Su espectro óptico está caracterizado por líneas altamente ionizadas. Se dividen en dos grupos: I) las galaxias Seyfert 1 (Sy1) que muestran tanto líneas de emisión anchas como delgadas y las II) Seyfert 2 (Sy2) que sólo muestran líneas angostas.
- 4 **Blazares:** Son AGNs radio fuertes también conocidos como fuentes variables ópticamente violentas (*Optically Violently Variable*, OVV). Se consideran una clase de QSOs que se caracterizan por tener chorros relativistas que se orientan casi de frente al observador ($\theta \lesssim 15^\circ$), lo cual produce también una alta polarización de la luz.
- 5 **LINERs:** Son los AGNs más comunes pero los menos luminosos dominados en el óptico por líneas de emisión de baja ionización. Se caracterizan por tener líneas de emisión de átomos neutros o iones con energías de baja ionización [Heckman, 1980].
- 6 **Galaxias IRAS brillantes:** Otra clasificación importante surgió con ayuda del satélite *IRAS* que logró detectar en el infrarrojo (IR) una gran cantidad de galaxias brillantes en el Universo local, que habían comenzado a identificarse cuatro décadas antes [Rieke, 1972]. Estas galaxias fueron clasificadas en: Galaxias infrarrojas luminosas (*Luminous Infrared*

Galaxies, LIRGs) cuya luminosidad está entre ($L_{\odot} \sim 10^{11-12}$) y las galaxias ultraluminosas en el infrarrojo (*Ultra-Luminous Infrared Galaxies*, ULIRGs) cuya luminosidad es $L_{IR} > 10^{12}L_{\odot}$.

1.2. Estructura y modelo para los AGNs

Debido a que los AGNs son fuentes compactas ($\sim 1kpc$) y en muchos casos variables, su estudio es complejo. Se sabe que uno de los principales protagonistas en los AGNs es el gas, cuyas propiedades físicas dependen de la localización, la composición, la densidad de columna o su densidad superficial. Por tanto, es importante tener una idea clara de la estructura del AGN y ésto implica tener un conocimiento de las componentes principales:

- **SMBH:**

Un SMBH es un objeto muy compacto ($R \sim 10^{-6} - 10^{-5}$ pc). De acuerdo con la teoría, los parámetros básicos estructurales de los SMBH son: masa M_{BH} , carga Q y momento angular L . Coloquialmente se dice que los BH “no tienen pelos (BH have no hair)” se refiere a que no tienen ninguna otra propiedad más que las ya mencionadas.

- **Disco de Acreción** Algunos de los procesos de acreción más eficientes en la astrofísica están asociados con la presencia de un disco de acreción [e.g. Reynolds & Nowak, 2003]. Se piensa que los discos de acreción en centros galácticos están formados naturalmente por la caída de gas en el plano central de la galaxia mientras se conserva el momento angular. Los modelos propuestos se basan en la hipótesis de que la viscosidad del disco es suficientemente alta para proveer el mecanismo necesario para transferir hacia el exterior el momento angular del gas y por tanto éste vaya cayendo en forma de espiral, perdiendo una fracción de la energía gravitacional en el camino. El radio de un disco de acreción es del orden de $10^{-3} - 10^{-2}$ pc.

Existen tres cantidades fundamentales relacionadas con procesos de acreción:

- Luminosidad de Eddington (L_{Edd}): Es la máxima luminosidad que un cuerpo puede alcanzar cuando se tiene un balance entre la fuerza de radiación y la fuerza gravita-

cional (Equilibrio Hidrostatico).

$$L_{Edd} = \frac{4\pi cGM\mu m_p}{\sigma_T} \quad 1.5 \times 10^{38} (M/M_\odot) \text{ergs}^{-1} \quad (1.1)$$

- La tasa de acreción de Eddigton (\dot{M}_{Edd}): Es la eficiencia (η) necesaria para convertir materia en energía y por tanto, producir la luminosidad de Eddigton (L_{Edd}).

$$\dot{M}_{Edd} = L_{Edd}/\eta c^2 \quad 3M_8 \left[\frac{\eta}{0.1} \right]^{-1} M_\odot \text{yr}^{-1} \quad (1.2)$$

- Tiempo de Eddington t_{Edd} : Se refiere al tiempo característico para el crecimiento del BH [Salpeter, 1964].

$$t_{Edd} = \frac{M}{\dot{M}} \quad 4x10^8 \eta \text{yr} \quad (1.3)$$

- **Chorros relativistas** La mayor parte de la energía gravitacional perdida en un disco se convierte en radiación electromagnética y la energía sobrante puede transformarse en cinética, quizás lanzando el gas del disco o calentando el gas a altas temperaturas. Esto último provocaría que la energía sea eyectada del disco en dirección perpendicular formando estructuras confinadas y aceleradas de material en forma de plasma conocidas como chorros relativistas (*jets*) [Netzer, 2013].
- **Región de líneas anchas (BLR)** La región de líneas anchas (*Broad Line Region*, BLR) está ubicada alrededor del disco de acreción y su radio es del orden de 0.1 – 1 pc. Está compuesta de gas con una alta densidad de columna ($\sim 10^{23} \text{ cm}^{-2}$) y nubes con alta densidad ($\sim 10^{10} \text{ cm}^{-3}$) con $L/L_{Edd} \sim 0.1$. Estas nubes pueden sobrevivir a tiempos dinámicos del orden de Gyr y están dominadas por la gravedad. Las velocidades típicas de estas nubes son del orden de $\sim 2500 \text{ km s}^{-1}$ y por tanto las líneas emitidas observadas están ensanchadas por efecto Doppler. Las líneas típicas de esta región son: H_α , $\text{MgII } \lambda 2800$, $\text{CIV } \lambda 1549$, Ly_α y $\text{OIV } \lambda 1035$ y algunas semi-prohibidas como $\text{CIII] } \lambda 1909$ y $\text{OIII] } \lambda 1663$.
- **Región de líneas Delgadas (NLR)** La región de líneas delgadas (*Narrow Line Region*, NLR) consiste en nubes cuya densidad de columna es mucho menor a la de la BLR ($\sim 10^{20-21} \text{ cm}^{-2}$) y la densidad del gas es baja ($\sim 10^4 \text{ cm}^{-3}$). Se considera que abarca un radio de $\sim 10 - 10^2 \text{ pc}$. Las velocidades de dispersión típicas de las nubes son $\sim 500 \text{ km}$

s^{-1} . Las líneas prohibidas son buenos trazadores de esta región puesto que son comunes, debido a la baja densidad de la zona.

- **Toro de Polvo** Localizado por lo general entre la región que divide la BLR y la NLR, se sitúa una estructura conocida como toro de polvo. Se considera en promedio un radio de entre $\sim 10^2 - 10^3 pc$ y tiene una densidad entre $10^4 - 10^7 cm^{-3}$. En promedio la velocidad de rotación es del orden $\sim 1000 km s^{-1}$ (dependiendo de la M_{BH}). El contenido principal de esta región es polvo y moléculas de gas.

La localización de cada parte de la estructura mencionada arriba ha dado lugar a una serie de modelos para explicar los diferentes tipos de AGNs (Véase sección 1.1). El modelo más aceptado es conocido como Modelo Unificado (*Unified Model*, UM). Dicho modelo propone que los AGNs tipo 1 y 2 son el mismo objeto pero visto por el observador desde diferente ángulo de visión [Antonucci, 1993; Urry & Padovani, 1995]. En la Fig.1.1 se muestra un esquema del modelo unificado donde se aventura la clasificación de algunas clases de AGNs atendiendo al ángulo de visión.

A pesar de que el UM explica distintas clases de núcleos activos, no puede explicar muchas observaciones. Existen observaciones en distintas longitudes de onda que apuntan al hecho de que éste es un modelo demasiado simplificado. Algunas veces la combinación de orientación y oscurecimiento es dominante, pero otras es importante tomar en cuenta el ambiente, la masa del BH, la tasa de acreción y el tipo morfológico de la galaxia anfitriona [e.g. Hernández-Ibarra et al., 2015; Mendoza-Castrejón et al., 2015; Villarroel & Korn, 2014]. También se ha propuesto un modelo evolutivo que incluye a la orientación y el oscurecimiento en alguna fase para ciertos objetos. Dicho modelo predice una evolución inducida por perturbaciones del entorno más próximo, por la caída de gas al núcleo. Parte de un brote estelar (*Starburst*, SB), que evoluciona a Seyfert2 (o LINER 2) y finalmente a Seyfert 1 (ó LINER 1) [e.g. Krongold et al., 2003; Koulouridis, 2014]. Además hay otras líneas de trabajo en las que se cree que hay objetos que intrínsecamente carecen de BLR [Tran, 2001; Bianchi, 2009] o que la estructura de acrecimiento no es tan simple como un disco para todas las clases de objetos [e.g. Hernández-García et al., 2014].

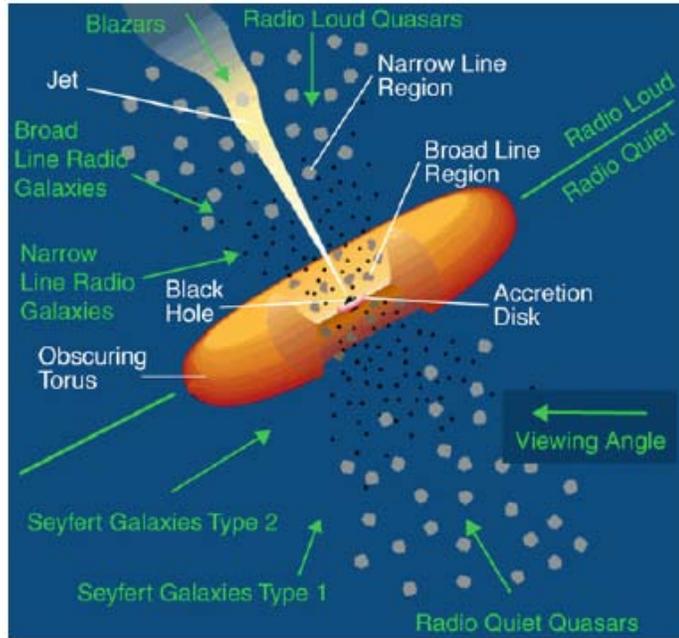


Figura 1.1: Esquema del modelo Unificado presentado por Urry & Padovani [1995]. La clave de esta unificación de AGNs tipo 1 y de tipo 2 reside en la existencia del toro de polvo ópticamente grueso alrededor de la fuente combinado con la orientación. Para ciertos ángulos de visión se bloquea la visión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

1.3. El espectro electromagnético de los AGNs.

En astronomía para distinguir las características de algunos objetos se usa la distribución espectral de energía (*Spectral Energy Distribution*, SED). La SED se representa como una gráfica comparativa entre el brillo o densidad de flujo y la longitud de onda. Está también se puede describir en términos de luminosidad monocromática por unidad de frecuencia (L_ν , en unidades de $\text{erg s}^{-1} \text{Hz}^{-1}$), por unidad de energía (L_E , en unidades de erg s^{-1}) o por unidad de longitud de onda (L_λ , en unidades de $\text{erg s}^{-1} \text{\AA}^{-1}$).

La forma de la SED de un AGN es una característica importante para diferenciar de una estrella. La SED en los AGNs provee información sobre los procesos físicos que están ocurriendo en su interior. En los AGNs más luminosos, Cuasares o galaxias Seyfert, la SED está dominada por emisiones térmicas y no térmicas. En las fuentes donde el espectro no es dominado por un *beaming* relativista o absorciones, la SED puede separarse en diferentes componentes [Elvis et al., 1994]. La existencia de un jet se muestra como emisión sincrotrón; un exceso en IR, puede

provenir de la re-radiación térmica producida por granos de polvo calentados (posiblemente por la componente toroidal); en el rango del óptico hasta rayos UV puede observarse una gran protuberancia (conocida como “*big blue blump*”), interpretada como una emisión de un pseudo cuerpo negro originada a partir de un disco de acreción ópticamente grueso y geoméricamente delgado [Shields, 1978; Malkan & Sargent, 1982]. En rayos X suaves puede apreciarse un exceso cuyo origen es desconocido [Miniutti et al., 2009] y una ley de potencias subyacente, más visible en energías de rayos X duros, pero se puede extender hasta el IR, se atribuye a Comptonización de fotones suaves. En los Blazares hay también una componente que se extiende hasta rayos γ , producida por Efecto Compton y Compton Inverso.

Como se ha mencionado la SED no es completamente genérica para todos los AGNs. Puede tomarse como un parámetro para distinguir entre cada tipo (véase la figura 1.2 donde se aprecian diferencias claras para distintos tipos de fuentes). La división de la SED en rangos limitados de energía es necesaria, para ser descrita como:

$$L_\nu \propto \nu^{-\alpha} \quad (1.4)$$

ó

$$L_\lambda \propto \lambda^{-\beta} \quad (1.5)$$

donde α es el índice de frecuencia espectral, β es el índice espectral de longitud de onda y $\beta = 2 - \alpha$.

1.4. Los AGNs en el IR

La clasificación de los AGNs históricamente se ha hecho en base a las propiedades del continuo en longitudes de onda ópticas (más recientemente también en rayos X). Sin embargo, existe una fracción importante de AGNs altamente oscurecidos, especialmente los que se encuentran a corrimientos al rojo muy grandes, que no muestran emisión en rayos X o su galaxia anfitriona domina completamente el espectro. Estos AGNs oscurecidos muestran propiedades especiales en el mediano infrarrojo (*Mid-infrared*, MIR, $5\mu m < \lambda < 25\mu m$) que sirven para ser clasificados. Se sabe que en estos objetos el espectro en el MIR está dominado por la emisión de polvo caliente donde la radiación absorbida por el polvo es re-irradiada en el MIR.

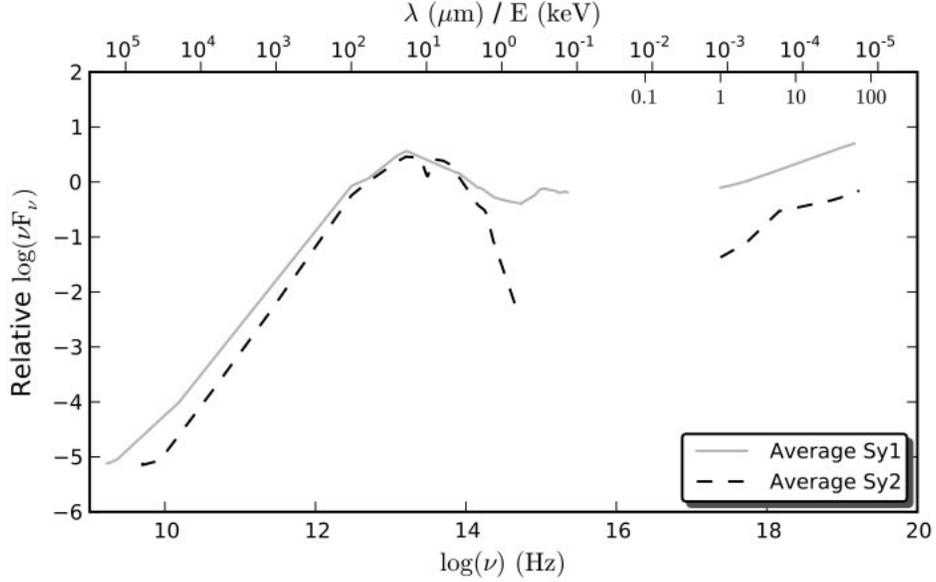


Figura 1.2: Promedio de SEDs para núcleos Seyfert tipo 1 y 2. Figura tomada de Prieto et al. [2010].

En la figura 1.3 se muestra la SED de varios AGNs con diferentes luminosidades. Fijando nuestra atención en el rango del IR ($0.65\mu m < \lambda < 450\mu m$), se observa una joroba cuyo máximo se presenta en el cercano infrarrojo (*Near-infrared*, NIR) exactamente a $\lambda \approx 1\mu m$. Dicho pico corresponde a polvo calentado a 10^3K , temperatura de sublimación para muchos sólidos. La interpretación física de este comportamiento es que el polvo está presente en un rango de distancias del núcleo y posee un correspondiente rango de temperaturas, hasta el punto donde las partículas de polvo son destruidas por sublimación [Osterbrock & Ferland, 2006]. Por otro lado, el polvo con temperaturas entre 100 y 2000 K emite en el MIR. Las dimensiones de la estructura de polvo emitiendo esta radiación, en AGNs de luminosidad intermedia, son del orden de 1pc [Netzer, 2013].

1.5. Mecanismos de alimentación y formación estelar

Actualmente sabemos que existe una correlación entre el BH y la galaxia anfitriona [Magorian et al., 1998; Ferrarese & Merritt, 2000; Kormendy & Ho, 2013]. A escalas galácticas, las grandes fusiones entre galaxias producen fuertes perturbaciones no asimétricas entre las galaxias constituyentes; estas perturbaciones pueden también producir en algunos casos fusiones

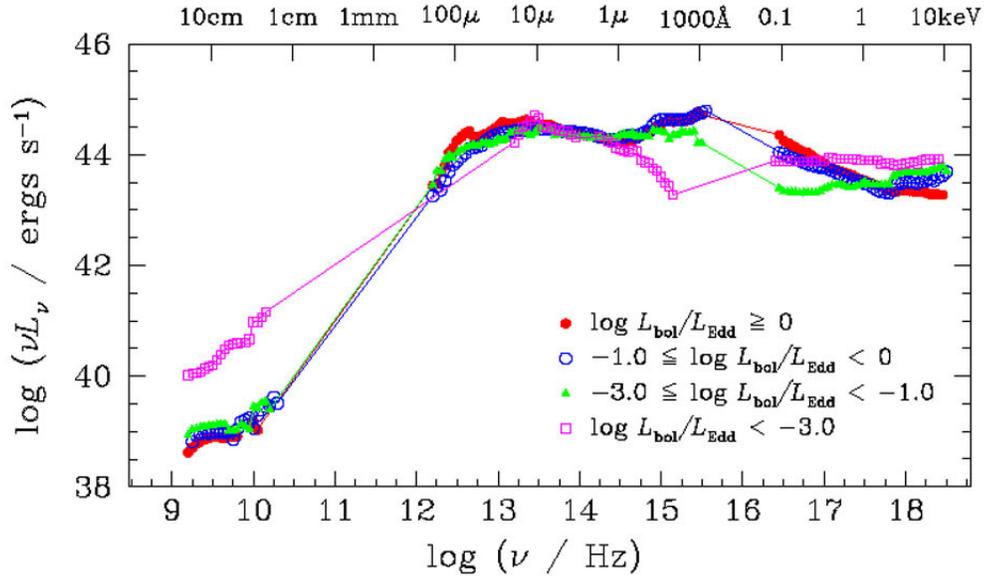


Figura 1.3: Distribuciones espectrales de energía para AGNs radio callados agrupados por razón de Eddington. La SEDs fueron normalizadas a $1 \mu\text{m}$. Imagen tomada de [Ho, 2008]

menores. Algunos autores [Lipari, 1994; Sanders & Mirabel, 1996] han observado que la mayoría de las fusiones están asociadas con enriquecimiento de la SF (*Star Formation*, SF), principalmente en ULIRGs. Las simulaciones numéricas predicen una relación entre la formación estelar¹ nuclear y la acreción del AGN [véase Hopkins and Quataert, 2010]. Se ha encontrado que un brote de formación estelar puede tener una gran liberación de material y al finalizar la vida de las estrellas dicho material puede activar (al caer) el SMBH. Una forma eficiente para inducir este proceso es la colisión de galaxias ricas en gas. Por otro lado, se ha estudiado el escenario donde la SF es detenida por el campo de radiación del BH [Wu et al., 2009].

Aunque parece todo claro, aun es necesario entender la coevolución entre galaxia y SMBH a escalas de 1pc. Como solución ha esto se ha encontrado un mecanismo conocido como retroalimentación (*feedback*). Dicho mecanismo regula tanto la acreción y la eyección del gas residente a escalas de sub-pc en el núcleo galáctico con el resto de la galaxia [véase Silk & Rees, 1998]. Por otra parte, para las galaxias del Universo local aún no se tiene claro si la SF circumnuclear/nuclear es función de la clasificación de la actividad [Shi et al., 2007] y/o de la luminosidad

¹Para este trabajo brote estelar (SB) y formación estelar (SF) se definen igual

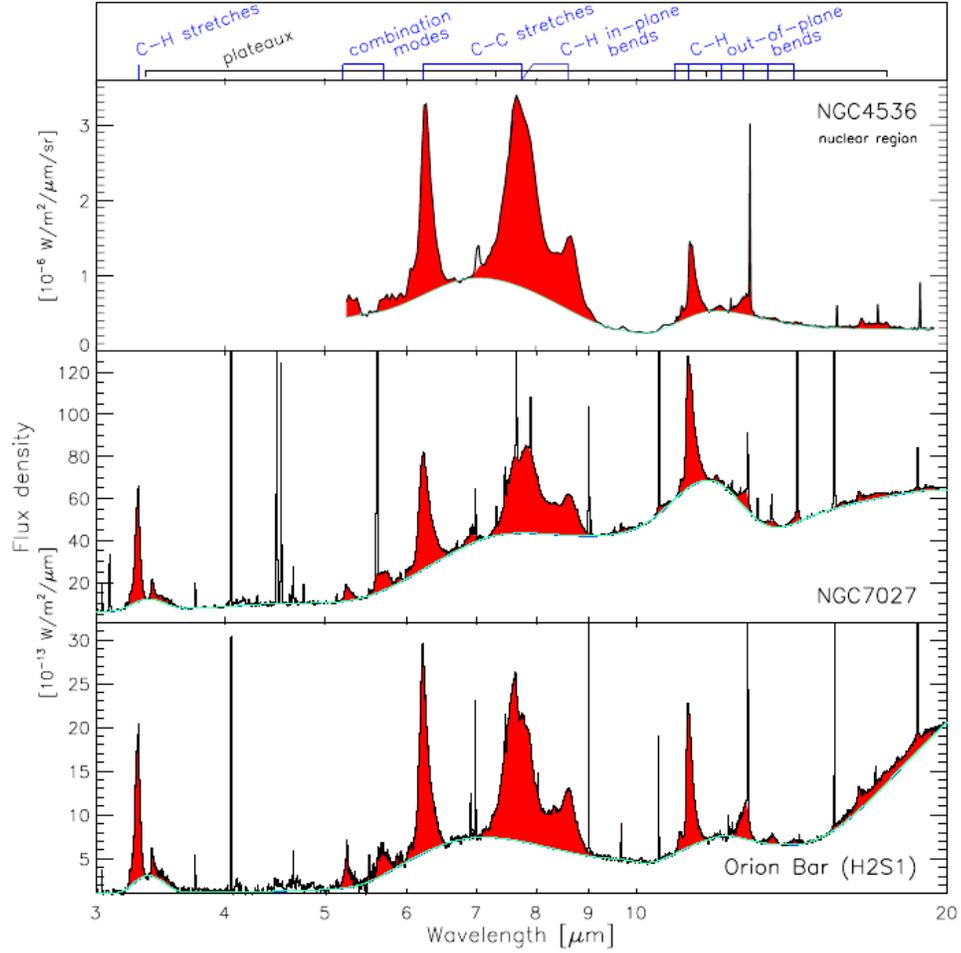


Figura 1.4: Los espectros corresponden a la nebulosa planetaria NGC 7027, la región de fotodisociación de la barra de Orion tomados con el espectrógrafo de corta longitud de onda del observatorio espacial infrarrojo (ISO-SWS, por su siglas en inglés) y la región nuclear de NGC 4536 usando *Spitzer-IRS*. Estos espectros ilustran la gran variedad de PAHs que se pueden observar en el MIR. Figura presentada por Peeters [2011]

del AGN [Diamond-Stanic & Rieke, 2012; Esquej et al., 2014]. De hecho, existen algunos argumentos teóricos y observacionales que sugieren retrasos dinámicos entre el inicio de la SF y la alimentación del AGN [Davies et al., 2007; Hopkins, 2012], que pueden ocasionar una desconexión entre ambos procesos, al menos observacionalmente. Es por todo ello que un estudio de indicadores de SF y su relación con la actividad nuclear es de enorme interés para la comunidad científica.

El estudio de SF en la vecindad del núcleo es complicado debido a que los indicadores clásicos de la presencia de está (por ejemplo, $H\alpha$, $P\alpha\alpha$, emisión UV) pueden ser fácilmente contaminados

por la emisión del AGN. Sin embargo, en el MIR tenemos una poderosa herramienta trazadora de SF. Esta herramienta son los llamados hidrocarburos aromáticos policíclicos [*Polycyclic Aromatic Hydrocarbons*, PAHs e.g. Genzel et al., 1998; Dultzin-Hacyan et al., 1990; Peeters et al., 2004; Smith et al., 2007; Diaz-Santos et al., 2010]. Además también existen estudios que apuntan a varios trazadores de fotoionización nuclear [e.g. Pereira-Santaella et al., 2014]. Uno de ellos que aún está en discusión es el [SIV] a $10.5\mu m$. En este trabajo se estudiarán principalmente los rasgos en emisión de las moléculas de PAH en $11.3\mu m$ y la línea de [SIV] ($\lambda \sim 10.5\mu m$) con el objetivo de estudiar la posible relación entre ionización nuclear y SF mediante trazadores en el MIR. En lo que sigue ahondaremos en lo que se conoce de cada una de estas dos emisiones presentes en el espectro MIR.

1.6. La línea de PAH a $11.3\mu m$.

Se ha observado que en las galaxias con intensa formación estelar más del 20 % de la luminosidad total en el infrarrojo es debida a los PAHs [Smith et al., 2007]. Los PAHs son moléculas que contienen típicamente de 20-100 átomos de carbono, a pesar de ser pequeñas son estables y resisten temperaturas mayores a 1000K gracias a su estructura reticular. Se cree que la emisión se origina en las regiones de fotodisociación, donde las moléculas se escudan en contra del campo de radiación producido por estrellas calientes o el mismo AGN.

Estas moléculas de PAHs emiten mayoritariamente en 6.2 , 7.7 , 8.6 , 11.3 y $18\mu m$ aunque hay una enorme variedad de ellas en el MIR (véase fig.1.4). Los modelos predicen que la intensidad de la banda de los PAHs depende del estado de ionización [Draine & Li, 2001]. Por ejemplo, los PAHs en las bandas de $6.2\mu m$ y $7.7\mu m$ dominan la emisión de PAH ionizado, mientras que el PAH en $11.3\mu m$ es más intenso para PAHs neutros. Los modelos más completos para PAHs como el de Galliano et al. [2008] exploran tanto los efectos del campo de radiación intenso así como también el tamaño de la distribución de los portadores de PAHs. Esta emisión es causada por el calentamiento de las moléculas debido a los fotones incidentes de estrellas jóvenes. Peeters et al. [2004] notó que la emisión de los PAHs podría ser más adecuada para rastrear estrellas B que estrellas O. Así la emisión de PAH traza SF sobre escalas de tiempo de unas pocas decenas de millones de años en lugar de SF instantánea.

La emisión de PAHs es observada en la región nuclear y circumnuclear del AGN [Hönig &

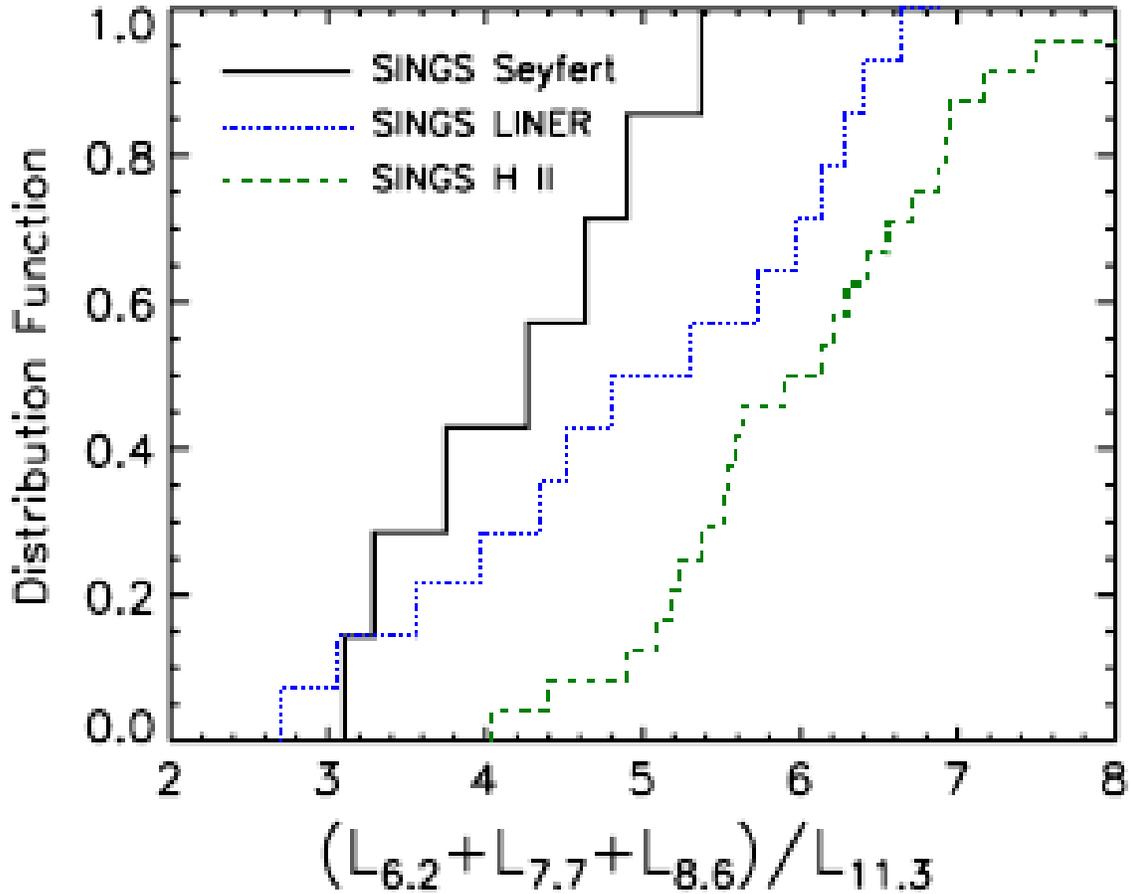


Figura 1.5: Distribución acumulativa de la relación de PAHs 6.2, 7.7 y 8.6 μm con 11.3 μm para galaxias del SINGS con clasificación de Seyfert, LINER y galaxias HII o galaxias con SF. Esto ilustra el resultado encontrado por Smith et al. [2007] en el que las galaxias Seyfert y LINERs tienen valores menos significativos que las de las galaxias HII. La aparente diferencia entre SINGS Seyferts y LINERs no es estadísticamente significativa. Presentado en el trabajo de Diamond-Stanic et al. [2010]

Kishimoto, 2010; González-Martín et al., 2013]. Es importante notar que una región ópticamente delgada de las moléculas de PAH también se pueden excitar por calentamiento del AGN a distancias aproximadas de 100 pc, pero para una región ópticamente gruesa, el PAH calentado por SF es más fuerte que el radiado por al AGN [Siebenmorgen et al., 2004].

Diamond-Stanic et al. [2010] encontraron una fuerte correlación entre la formación estelar nuclear en escala de kpc usando el PAH de 11.3 μm y el continuo a 24 μm para galaxias Seyfert. Esta correlación es importante pues la luminosidad en el continuo a 24 μm es un trazador térmico de la SF. La emisión de PAHs es débil o ausente en galaxias tipo Seyfert 1 [Sy1, e.g.

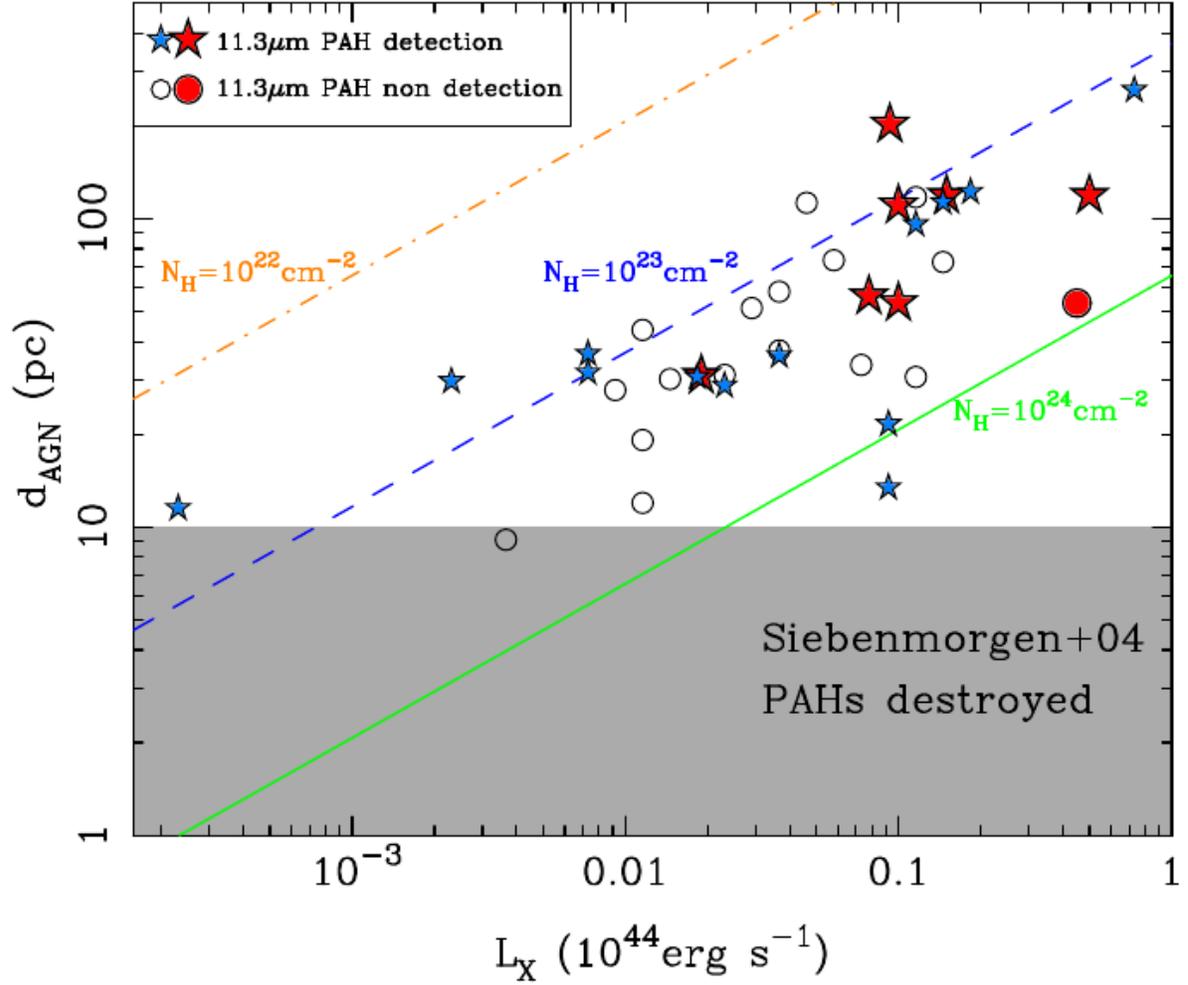


Figura 1.6: El diagrama muestra las regiones donde los PAH sobreviven como una función de la distancia del AGN y de la luminosidad del AGN en rayos X de acuerdo con el modelo de Voit [1992] y Miles [1994]. Las líneas de densidad de columna constante total (líneas de arriba a abajo $N_H(tot) = 10^{22}, 10^{23}, 10^{24} \text{ cm}^{-2}$) del material que intervine definen las regiones por encima de las cuales los PAH son protegidos y no son destruidos por el campo de radiación del AGN. El área sombreada muestra la región donde los PAHs no sobreviven ($d_{AGN} \leq 10 \text{ pc}$) de acuerdo con el modelo de Siebenmorgen et al. [2004]. Las galaxias con una detección nuclear del PAH en $11.3 \mu\text{m}$ son mostradas con símbolos de estrellas grandes y pequeños para las galaxias RSA de Esquej et al. [2014] y el trabajo de Alonso-Herrero et al. [2014], respectivamente. Los círculos son galaxias sin detecciones del PAH nuclear. Para las galaxias, el trazado de la luminosidad en rayos X es intrínseco (es decir, corregido por absorción) a luminosidades en el rango de 2-10 KeV y el eje vertical (d_{AGN}) se refiere a las distancias proyectadas. Imagen tomada del trabajo de Alonso-Herrero et al. [2014]

Mason et al., 2007]. Estos autores han relacionado la ausencia de PAHs con la destrucción o ionización de las moléculas responsables de esta emisión por el campo de radiación del AGN. El trabajo de Diamond-Stanic et al. [2010] muestra que para galaxias Seyfert locales sólo los PAHs en 6.2, 7.7 y 8.6 μm se suprimen en escalas de kpc con respecto al PAH de 11.3 μm [véase

Fig.1.5, ver también Smith et al., 2007]. Por otra parte, otros autores tampoco encontraron evidencia de la supresión nuclear del PAH en $11.3\mu\text{m}$, al menos para las galaxias tipo Seyfert [e.g. Esquej et al., 2014]. Recientemente, Alonso-Herrero et al. [2014] encontraron que muchas de las moléculas responsables de la emisión en $11.3\mu\text{m}$ sobreviven al entorno nuclear cercano a 10pc del AGN, al menos para los pocos objetos que analizan (véase Fig.1.6). Observaron que el flujo del PAH crece hacia el núcleo pero el ancho equivalente (Equivalent width, EW) disminuye por el aumento del continuo nuclear. Este fenómeno es conocido como dilución de PAHs debido al fuerte continuo del AGN. Estos últimos autores también proponen que el material del toro de polvo provee una densidad de columna necesaria para proteger las moléculas de PAH del campo de radiación del AGN. Pereira-Santaella et al. [2010] encontraron que la emisión ionizada de PAHs es concentrada en la región nuclear, pero hay una cantidad sustancial de emisión de PAH en $11.3\mu\text{m}$ proveniente de regiones difusas a través de la galaxia.

La mayor parte de estos trabajos se basan en la comparación de SF nuclear y circumnuclear, utilizando el espectro nuclear con telescopios terrestres (es decir con alta resolución espacial) y el circumnuclear con espectros de satélites [es decir con menor resolución espacial, e.g. Esquej et al., 2014]. Solamente algunos estudios hacen un análisis detallado de la emisión circumnuclear utilizando distintas aperturas radiales centradas en el núcleo activo para muestras de unos pocos objetos [Alonso-Herrero et al., 2014] o estudios individuales [Ramos Almeida et al., 2014]. Con este análisis pretendemos estudiar el comportamiento del PAH a diferentes distancias galactocéntricas del AGN en una muestra significativa de núcleos activos locales.

1.7. La línea de [SIV]

Otra línea de diagnóstico usada en el MIR es el [SIV] a $10.5\mu\text{m}$. Surge de iones con un potencial de ionización de ~ 35 eV. Está ha sido observada en un gran número de objetos como son las nebulosas planetarias, regiones HII galácticas y ULIRGs [Rank et al., 1970; Holtz et al., 1971; Gillett et al., 1972].

Se ha encontrado que las líneas en el MIR están menos afectadas por oscurecimiento que las ópticas. Algunos autores piensan que [SIV] se origina en la NLR [e.g. Dasyra et al., 2011]. También se ha sugerido que la distribución geométrica de los silicatos es probablemente más compacta que el tamaño de la NLR [Soifer et al., 2002; Tristram et al., 2007]. Sin embargo,

espectroscopía de alta resolución espacial en el MIR indica que la emisión de [SIV] no está resuelta a escalas de 100pc, apuntando hacia el origen nuclear de esta línea [Hönig et al., 2008]. En algunos trabajos la línea de [SIV] suele relacionarse con otras líneas como son [S III], [NeII] y [NeIII] para estimar la fuerza de campo de radiación [Verma et al., 2003; Dale, 2006; Gordon et al., 2008], o bien, con [NeV], [OIV] y [NeIII] para trazar gas fotoionizado por el AGN [Dasyra et al., 2011]. Por tanto, podría considerarse como un buen trazador de la actividad nuclear. El origen de la línea de [SIV] es aún controvertido, apuntando a que puede producirse en regiones SF y en el AGN [Pereira-Santaella et al., 2010]. La manera de discernir entre estas dos hipótesis es estudiar su comportamiento en relación al comportamiento del continuo y de los PAHs. Si la emisión de la línea de [SIV] presentara un comportamiento similar al de los PAHs, podría ser producida por el mismo proceso que origina a éstos. Es por ello también un objetivo de este trabajo; estudiar el comportamiento de la línea de [SIV] en una muestra significativa de núcleos activos locales.

1.8. Justificación del trabajo

González-Martín et al. [2013] analizó la muestra más grande, hasta la fecha, de espectros nucleares de AGNs tomados desde tierra. La alta resolución angular de estos espectros nos permite sondear regiones físicas de 57 pc. González-Martín et al. [2013] analizó la componente nuclear de estos espectros encontrando que los PAHs eran más frecuentes en datos de satélites comparados con los espectros donde se aislaba la componente nuclear. Nosotros hemos utilizado estos mismos datos para estudiar el comportamiento radial de los PAHs y la línea de [SIV]. Nuestros objetivos son: (1) estudiar la posible destrucción/dilución de los PAHs a distintas escalas circumnucleares; (2) el origen de la línea de emisión [SIV]; y (3) a largo plazo estudiar la conexión entre la formación estelar circumnuclear y el AGN. Estudiaremos el espectro en el MIR en el rango de 8 a $13\mu\text{m}$, centrados en el comportamiento del PAH a $11.3\mu\text{m}$ y la línea de [SIV] a $10.5\mu\text{m}$.

Este trabajo se organiza de la siguiente manera. El Capítulo 2 describe las características de la muestra. El Capítulo 3 explica el análisis espectral hecho a cada objeto (Sección 3.1), para lo cual fue necesario solucionar el problema de calibración cruzada (Sección 3.2) y después se describe la metodología usada para hacer las medidas necesarias para el estudio (Sección 3.3). El

capítulo 4 presenta los resultados obtenidos con el método redactado anteriormente y el capítulo 5 presenta la discusión de los resultados obtenidos y las conclusiones del estudio. Nótese que a lo largo de este trabajo hemos asumido una cosmología con $H_0 = 73 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$, $\Omega_\Lambda = 0.73$ y $\Omega_M = 0.27$.

Capítulo 2

Muestra

2.1. Datos sobre instrumentos.

El Espectrógrafo de Cámara de Región Térmica (*Thermal-Region Camera and Spectrograph*, T-ReCS) fue construido por la Universidad de Florida para el telescopio Gemini-South de 8.1m ubicado en el Cerro Pachón en Chile. Dicho telescopio es gemelo del Gemini-North ubicado en el volcán de Mauna Kea en Hilo, Hawaii. El observatorio Gemini comenzó a funcionar en 1983 y es administrado por la Asociación de Universidades para Investigación en la Astronomía (*Association of Universities for Research in Astronomy*, AURA). Ambos telescopios pueden trabajar en el óptico e infrarrojo cercano y medio. T-ReCS cuenta con una rendija de anchos en el rango 0.26–1.3 μm y una longitud = 21.6". T-ReCS cuenta con un campo de visión de 28.8x21.6" y un tamaño de pixel de = 0.09". Es capaz de hacer espectroscopía de baja y mediana resolución (R) en el rango 8.0 – 12.8 μm . Todos los detalles del instrumento se presentan en la tabla (2.1).

Baja resolución espectroscópica	Mediana resolución espectroscópica
R \sim 100 cerca 10 y 20 μm	R \sim 1000 cerca 10 μm
Dispersión a 10 μm = 0.019 $\mu\text{m}/\text{pix}$, $\Delta\lambda = 6\mu\text{m}$	Dispersión a 10 μm = 0.0019 $\mu\text{m}/\text{pix}$, $\Delta\lambda = 0.6\mu\text{m}$
Dispersión a 20 μm = 0.029 $\mu\text{m}/\text{pix}$, $\Delta\lambda = 9\mu\text{m}$	

Tabla 2.1: Detalles espectroscópicos de TReCS

T-ReCS sobresale por ser un instrumento de MIR extremadamente sensible, capaz de entregar imágenes y observaciones de espectros de alta resolución espacial. Este instrumento puede lograr rutinariamente 6 veces mejor resolución espacial a 8 μm que *Spitzer*. Pues el ancho de ranura de T-ReCS es hasta 18 veces más estrecho que en *Spitzer*, la espectroscopía con T-ReCS

puede realizar fuentes individuales sin contaminación, incluso en áreas muy concurridas. Por tanto, las fuentes extendidas pueden ser mapeadas espectralmente con mayor detalle espacial. T-ReCS puede lograr mucha mayor resolución espacial en la ventana espectral de $8 - 13\mu\text{m}$ que *Spitzer*.

En la banda N, donde están tomados los datos de nuestra muestra, la sensibilidad de T-ReCS es alrededor de 15 mJy a $8.8\mu\text{m}$ y alrededor de 25mJy a $11.7\mu\text{m}$ (en términos de magnitud esto se traduce en 8.8 y 7.6). Por otro lado, la sensibilidad de *Spitzer* a $8\mu\text{m}$ es $9.8\mu\text{Jy}$.

2.2. Selección de los datos.

La muestra original contiene espectros en el MIR para 22 fuentes tipo AGN observadas en la banda N con el T-ReCS. Esta muestra se seleccionó por constituir la totalidad de datos disponibles de AGNs locales en el archivo público de Gemini¹ hasta Junio de 2012 y fue motivo de la publicación científica González-Martín et al. [2013]. En su momento ésta fue la muestra más grande de AGNs locales con alta resolución espacial y con espectroscopía en el MIR. Actualmente está siendo analizada una muestra de 40 objetos observadas con el instrumento CanariCam, la cual acaba de publicarse [Alonso-Herrero et al., 2015]. Queremos hacer notar que, aunque utilicemos las mismas observaciones que en la publicación de González-Martín et al. [2013], dicho trabajo únicamente está centrado en el análisis de la región nuclear mientras que nuestro análisis se centra en la emisión extendida. Además mencionamos que la publicación de [Alonso-Herrero et al., 2015] no incluye análisis de la emisión extendida. De este modo este análisis es el estudio de la emisión circumnuclear con espectros en el MIR con la muestra más grande hasta la fecha. Además la idea es extender este análisis en el futuro a la muestra de Alonso-Herrero con datos del instrumento CanariCam.

La muestra original incluye nueve fuentes *Compton-thick* (es decir, fuentes altamente oscurecidas en rayos X con densidades de columna del hidrógeno neutro superiores a $N_{\text{H}} \sim 1.5 \times 10^{24}\text{cm}^{-2}$). El ancho de rendija utilizado para la espectroscopía resulta en una resolución espacial entre $\sim 7 - 236\text{ pc}$ para todos los objetos excepto 3C 445 ($\sim 406\text{pc}$), que es el objeto más distante en la muestra.

De acuerdo con González-Martín et al. [2013] una fuente se considera como extendida si la ima-

¹http://www.cadc-ccda.hia-ihp.nrc.ca/cadbin/gsa/wdbi.cgi/gsa/gsa_science/form

gen después de substraer la PSF (*Point spread function*) muestra un flujo integrado mayor que tres veces la desviación estandar del fondo, es decir, la fuente es extendida si es detectada como tal a una significancia de 3σ . Bajo este criterio la mayoría de las fuentes presentan una morfología extendida (exceptuando Centaurus A, ESO 103-G35, IC 4518W, NGC 1365, NGC 5728, y NGC 7479). En el caso donde la fuente no es extendida la emisión nuclear proviene de menos de $7 - 236$ pc, dependiendo de la distancia de cada galaxia. Sin embargo, como se mencionará en la sección 4 a detalle, no estamos completamente de acuerdo con su clasificación en algunas fuentes como objetos puntuales o de emisión extendida.

Las fuentes observadas usando varios filtros muestran morfologías similares en todos. En el caso de NGC 4945 no se logró resolver la fuente puntual y fue excluida en [González-Martín et al., 2013], debido a la falta de componente nuclear, pero nosotros lo hemos tenido en cuenta pues estamos interesados en la emisión extendida. Nuestra muestra contiene tres objetos (NGC 5643, IC 5063 y NGC 7582) en común con la reportada por Hönig & Kishimoto [2010], que utilizó datos del VISIR/VLT. La forma y características de los espectros tomados con ambos instrumentos son similares.

Para nuestro trabajo hemos descartado dos objetos de los 22 de la muestra original presentada por González-Martín et al. [2013]: NGC 3094 y NGC 5728 debido a la baja calidad de los datos espectrales de T-ReCS en ambas. Nuestra muestra final contiene 20 fuentes, de las cuales 15 son tipo 1 y cinco son tipo 2. Los detalles de las observaciones se presentan en la Tabla (2.2): nombre del objeto (col. 1), tipo de AGN (col. 2), redshift (col. 3), características en óptico (col. 4), ángulo de posición (P.A. de sus siglas en inglés) de la rendija (col. 5), ancho de la rendija (col. 6), la apertura en segundos de arco para el núcleo (col. 7) y la apertura en segundos de arco para los datos de *Spitzer* (col. 8). La luminosidad corregida por absorción para cada fuente también se encuentra en la tabla (col. 9) y abarca un rango entre $\log L_X = 40.4 - 43.9$. Finalmente la última columna muestra el valor de escalamiento aplicado a los datos de *Spitzer* (véase sección 3.2).

Para poder trazar las partes más externas de cada galaxia hemos incluido los espectros de *Spitzer*, obtenidos a través del catálogo CASSIS (The Cornell Atlas of *Spitzer*/IRS Sources, Lebouteiller et al. [2011])², que provee espectros calibrados en flujo de la fuente puntual asociada

²<http://cassis.astro.cornell.edu/atlas/>

a cada observación.

Estos espectros se extraen utilizando la región óptima de extracción para asegurar la mejor señal a ruido (S/N). En la Tabla 2.2 (Col. 8) se muestran la apertura en segundos de arco aplicada para cada objeto, según las cabeceras de las imágenes. Nótese que a pesar de que todos los objetos tienen datos del satélite *Spitzer*, no en todos los casos aporta más información que el extraído de las observaciones de T-ReCS. Esto es porque la extracción realizada por *Spitzer* está contenida en las extracciones realizadas en este trabajo (ver Sección 3.1). En estos casos los espectros de *Spitzer* han sido ignorados en el análisis por contener información redundante y por tanto, no se menciona este dato en la tabla 2.2³.

³Los objetos para los que no hemos hecho uso de los datos de *Spitzer* son 3C 445, ESO 103-G35, IC 4518W, IC 5063, NGC 4418, NGC 4945, NGC 5135, NGC 5506 y NGC 7479.

Object	Tipo	z	CO	P.A. (grados)	Ancho de Rendija (arcsec)	Apertura nuclear (arcsec/pc)	Apertura <i>Spitzer</i> (arcsec/pc)	L_X log(L(2-10KeV))	e-spitzer
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
3C445	S1.5	0.0559		300	0.35	0.58/672		43.9	1.0
CIRCINUS	S2	0.0010	M	100	0.35	1.48/30	0.19/4	42.6	0.6
CentaurusA	S2	0.0008	D,E	0	0.65	0.85/15	1.42/25	41.9	1.0
ESO103-G35	S2	0.0133	E	30	0.35	0.94/259		43.4	1.0
IC4518W	S2	0.0163	E,M	5	0.70	0.67/226		42.6	1.2
IC5063	S2	0.0113	D	303	0.65	0.49/115		43.3	1.0
NGC1365	S1.5	0.0042		15	0.35	0.22/19	12.71/1102	42.5	0.6
NGC1386	S2	0.0038	E	0	0.31	0.49/38	0.20/16	42.6	1.0
NGC1808	S2	0.0027		45	0.35	0.58/32	6.09/340	40.4	0.6
NGC3081	S2	0.0076		0	0.65	0.58/91	0.19/30	42.5	1.0
NGC3081	S2	0.0076		350	0.65	0.58/91	0.19/30	42.5	1.0
NGC3281	S2	0.0107	D,E	351	0.35	0.58/128	0.11/24	43.4	0.6
NGC4418	S2	0.0073	E	30	0.35	0.49/74		41.2	1.0
NGC4418	S2	0.0073	E	40	0.35	0.49/74		41.2	0.6
NGC4945	S2	0.0009	D,E,M	45	0.65	0.67/13		42.3	1.0
NGC5135	S2	0.0137		30	0.70	0.40/114		43.1	1.0
NGC5506	S1.9	0.0067	D,E	0	0.35	0.13/18		43.0	1.0
NGC5643	S2	0.0039		80	0.35	1.032/84	0.77/63	42.6	0.6
NGC7130	L2	0.0161	M	348	0.70	0.49/164	0.70/234	43.1	1.2
NGC7172	S2	0.0079	D	60	0.35	0.49/80.5	0.97/159	42.8	0.6
NGC7172	S2	0.0079	D	90	0.35	0.13/21	0.97/159	42.8	0.6
NGC7479	S2	0.0079	D,M	10	0.35	0.40/65.5		42.0	1.0
NGC7582	S2	0.0079	D,E	0	0.70	0.58/58	1.75/174	42.6	0.3

Tabla 2.2: Propiedades generales de la muestra y datos observacionales de los espectros de T-ReCS. Características ópticas (CO): Evidencias de polvo en la región nuclear (D), Galaxias de canto (E), Fusiones de galaxias (M).

Capítulo 3

Análisis

3.1. Reducción de datos y extracción de espectros

Para el procesamiento de los datos y el análisis se usó la *pipeline* RedCan¹. RedCan está totalmente automatizada y fue concebida para explotar eficientemente los datos del instrumento CanariCam² como parte del proyecto Consolider/GTC (I.P. J.M. Rodríguez Espinosa) y bajo el grupo Piratas (I.Ps. C. Packham y A. Alonso-Herrero). RedCan realiza un proceso de reducción y calibración bien probado en más de 20 publicaciones científicas que garantiza como producto imágenes y espectros fiables. En la parte técnica, RedCan está escrita utilizando el paquete Gemini IRAF³ dentro de PyRAF, junto con rutinas de IDL y Python desarrolladas para este propósito. El lenguaje CSHELL se usa para conectar las rutinas de Gemini, IDL y Python en un programa principal⁴.

En el MIR el fondo de cielo cambia muy rápido para observaciones desde tierra. Además el cielo brilla miles de veces más que la fuente. Incluso las estrellas más brillantes son un orden de magnitud más débiles que el fondo de cielo en el MIR y una observación normal contiene un fotón de la fuente por cada 100,000 fotones del cielo. De este modo una observación en el MIR en el que no se sustraiga el cielo no permite ver la fuente. Por tanto, es vital hacer observaciones

¹Pipeline de reducción de datos de CanariCan,
<https://www.dropbox.com/sh/w4z8buo2ewrhhvj/Kk1f2RYVe8/RedCan.tar.gz>.

²CanariCam es un instrumento que opera en el MIR (7.5-25 μm) en modo imagen, espectroscopía, coronografía, y con capacidad de polarimetría. Está montado en uno de los focos Nasmyth del telescopio GTC en el observatorio del Roque (La Palma).

³La versión del paquete de Gemini es un paquete externo que cuelga de IRAF y está disponible para cualquier usuario (<http://www.gemini.edu/sciops/data-and-results/processing-software>).

⁴The RedCan package can be retrieved here:
<https://www.dropbox.com/sh/w4z8buo2ewrhhvj/Kk1f2RYVe8/RedCan.tar.gz>.

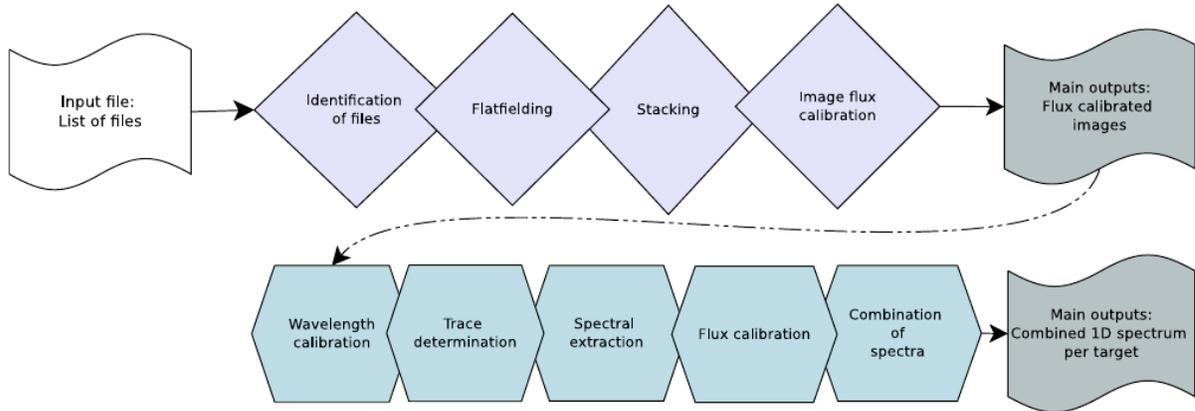


Figura 3.1: Diagrama de flujo del procesamiento que realiza la pipeline RedCan. Los diamantes son pasos en el procesamiento de imágenes, mientras que los polígonos indican los pasos en el procesamiento de los espectros. La bandera transparente es el nivel de entrada y la bandera oscura indica el nivel de salida. La flecha discontinua señala que RedCan continúa a partir de las imágenes construídas sólo cuando existen observaciones en modo espectroscopía en el conjunto inicial de datos. Nótese que RedCan averigua este dato automáticamente de las cabeceras de las observaciones.

del cielo de manera continuada a lo largo de la observación que permitan sustraerlo. Además exige que el detector se lea muy rápido porque el cielo satura rápidamente. En esencia, este proceso consiste en mover de forma muy rápida el telescopio de manera que observa cielo y fuente de manera continua y con un cierto patrón en el cielo. Esta técnica es conocida como *nod and shuffle* y aunque no es la única, la hemos utilizado para todos nuestros datos por ser una buena opción considerando el tipo de fuentes y el campo de visión.

RedCan es capaz de producir imágenes calibradas en flujo y espectros 1D para los instrumentos T-ReCS y CanariCam. La figura 3.1 muestra un diagrama de flujo con las etapas de reducción realizadas por la RedCan para producir los datos reducidos.

RedCan comienza con un archivo de entrada principal tipo ASCII, el cual contiene una lista de observaciones, y sigue el procedimiento descrito por Diaz-Santos et al. [2010] que consiste en los siguientes pasos:

- 1.- Identificación de los archivos: Identificar el tipo de bloque en cada observación. Principalmente hace dos distinciones: (1) observaciones de calibración de aquellas del sujeto de estudio y (2) modo imagen de forma espectroscópica. Esto lo hace utilizando la información en las cabeceras. Además asocia la mejor observación de calibración para cada sujeto de estudio, teniendo en cuenta la configuración de filtros y priorizando la observación más próxima (en tiempo). Esto último se hace para que la observación del calibrador comparta

en lo posible las mismas condiciones de observación con el objeto de análisis para que las calibraciones sean lo más precisas que se puedan.

- 2.- **Sustracción de flat:** Crea un master-flat (observación del cielo) mediante el apilamiento (y promediado) de todas las observaciones del cielo que se realizan para cada observación. Este master-flat se sustrae a la observación de la fuente para mejorar la cosmética del fondo de las imágenes y espectros bidimensionales. Este paso es opcional. Nosotros no hemos incluido este paso puesto que el proceso de apilado general de los datos en el MIR (ver siguiente punto) ya produce imágenes de alta calidad cosmética.
- 3.- **Apilamiento:** Consiste en producir un cubo de datos simples por observación con tres planos: promedios de imágenes en la fuente, promedio de imágenes fuera de la fuente (en el cielo) y una imagen donde el fondo ha sido sustraído (background). De este modo la imagen sustraída está libre de la contribución del cielo.
- 4.- **Calibración del flujo de imágenes:** La calibración de flujo se realiza para la adquisición de imágenes y la calibración de las imágenes finales de la fuente utilizando estrellas estándares telúricas. RedCan contiene un catálogo de espectros sintéticos calibrados en flujo de estrellas estándar publicado por Cohen et al. [1999].
- 5.- **Calibración en longitud de onda:** La calibración en longitud de onda se hace utilizando el espectro del cielo, donde las longitudes de onda de los rasgos del cielo son bien conocidos. RedCan detecta automáticamente estas estructuras y calcula un ajuste entre los valores esperados y el pixel en el que se encuentran las líneas. El ajuste es lineal en la dirección espacial y un polinomio de orden dos para la dirección espacial.
- 6.- **Determinación de la traza:** Para detectar donde está la fuente en el espectro bidimensional de la fuente calculamos el centroide del pico del espectro para cada posición espacial del espectro. A cada posición espacial del espectro RedCan realiza un ajuste a una Lorentziana del perfil espacial de la fuente. Este ajuste nos permite encontrar los centros a cada posición espacial. El conjunto de puntos se ajusta a un polinomio de orden dos que permite saber donde está el centro del espectro a cada punto espacial. Este proceso se aplica también a la estrella estándar de calibración. La traza de la estrella estándar se

utiliza para saber cual es el ancho de una fuente puntual a cada punto en la dirección espacial. Este ancho es usado para extraer la componente puntual de nuestra observación científica.

7.- Extracción espectral: RedCan extrae el espectro 1-D utilizando el espectro 2-D del objeto científico y de la estrella estándar. Esta extracción se hace en dos modos: (1) como fuente puntual y (2) como fuente extendida. En el caso de la fuente puntual se utiliza el ancho que proporciona la traza de la estrella estándar (y el centroide de la traza de nuestro objeto científico) y aplicando una serie de correcciones de pérdida de la rendija para recuperar todo el flujo de la fuente. Para el caso de fuente extendida es necesario que el usuario seleccione los radios a los que quiere hacer la apertura y el código simplemente integra toda la emisión para esa apertura en cada pixel en la dirección espectral.

8.- Calibración en flujo espectral y combinación de espectros: Cada espectro es calibrado en flujo usando la relación entre la observación de la estrella estándar asociada y su correspondiente espectro teórico de flujo calibrado de Cohen et al. [1999].

Hemos tomado los espectros presentados en González-Martín et al. [2013] como espectros nucleares observados por T-ReCS. Estos espectros han sido extraídos como fuente puntual. La Tabla 2.2 (Col. 5) muestra la extracción a la que corresponde la fuente puntual en segundos de arco para cada observación. Los espectros muestran errores sistemáticos⁵ menores al 10 % del flujo en todos los objetos excepto NGC 5728 (error $\sim 40\%$).

Para poder analizar el cambio del espectro a diferentes distancias del núcleo y por tanto el comportamiento circumnuclear de cada fuente, hemos extraído distintas aperturas a lo largo de la rendija. La extracción ha sido hecha con RedCan usando el modo de fuente extendida y aperturas a distintos radios centradas en la fuente nuclear. Medimos el flujo en $12\mu\text{m}$ y tomamos como primera apertura aquella con flujo mayor al medido en el espectro nuclear.

La figura 3.2 muestra un ejemplo del espectro nuclear (línea verde), las aperturas (líneas negras), y el espectro de *Spitzer* (línea roja). Además identificamos la línea de [SIV] a $10.5\mu\text{m}$ y el rasgo PAH en $11.3\mu\text{m}$ con líneas punteadas. Una figura similar para cada uno de los objetos se presenta en el Apéndice 6.

⁵Los errores sistemáticos se deben a la calibración en flujo y a la variación del *Seeing* durante las observaciones.

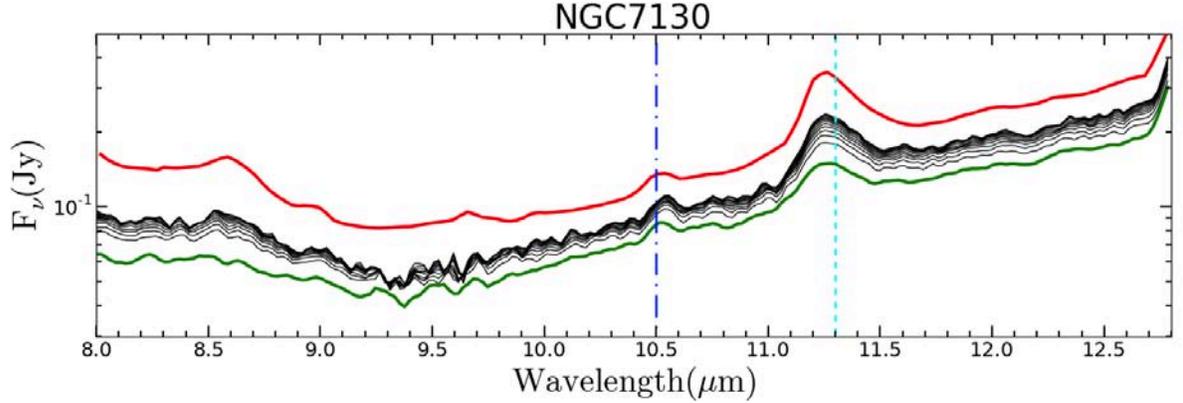


Figura 3.2: Conjunto de espectros para la galaxia NGC7130. El espectro superior en rojo corresponde al espectro de *Spitzer*/IRS. El espectro en verde es el nuclear [extraído como fuente puntual, González-Martín et al., 2013] y los espectros en negro son las distintas aperturas. La línea azul punteada señala la localización de la línea de [SIV] a $10.5 \mu\text{m}$ y la línea azul turquesa muestra la longitud de onda en la que se encuentra la característica de PAHs a $11.3 \mu\text{m}$ (las dos rasgos de interés para nuestro estudio).

3.2. Calibración cruzada en flujo entre los espectros de T-ReCS y de *Spitzer*/IRS

Al utilizar conjuntamente los espectros de T-ReCS y *Spitzer*/IRS, nos hemos visto en la necesidad de estudiar los problemas de calibración cruzada en flujo de ambos instrumentos. Para estudiar la relación en la calibración en flujo entre los datos de T-ReCS y de *Spitzer* hemos medido el flujo del continuo a $12\mu\text{m}$ ⁶. Esta medida nos permite hacer un perfil radial del continuo a $12\mu\text{m}$ y así estudiar si el flujo de *Spitzer* medido pueda ser una continuación natural del comportamiento medido por el núcleo y las aperturas de T-ReCS.

El resultado es que los espectros de *Spitzer* para ocho objetos (CIRCINUS, NGC 1365, NGC 1808, NGC 3281, NGC 5643, NGC 7130, NGC 7172 y NGC 7582) no encajaban de manera natural con la distribución radial observada con los espectros de T-ReCS. En dos casos el flujo del continuo a $12\mu\text{m}$ para los datos de *Spitzer*/IRS es anormalmente alto y en otros seis casos está sospechosamente por debajo. La Fig.3.3 muestra un ejemplo de este defecto en calibración en flujo por exceso (imagen superior) y por defecto (imagen inferior) para los objetos NGC 1808 y NGC 3281, respectivamente. Para solventar este problema hemos probado diferentes escalados:

- Considerando el objeto como fuente puntual y usando la relación $FWHM_{fuente}$ y $FWHM_{PSF}$ dada en el catalogo de CASSIS como escalar. Detrás de este escalado está la idea de que

⁶Nótese que el espectro de *Spitzer* estaba incluido en las aperturas utilizadas en T-ReCS para 9 objetos. En estos casos hemos prescindido de la medida de *Spitzer* por resultar redundante.

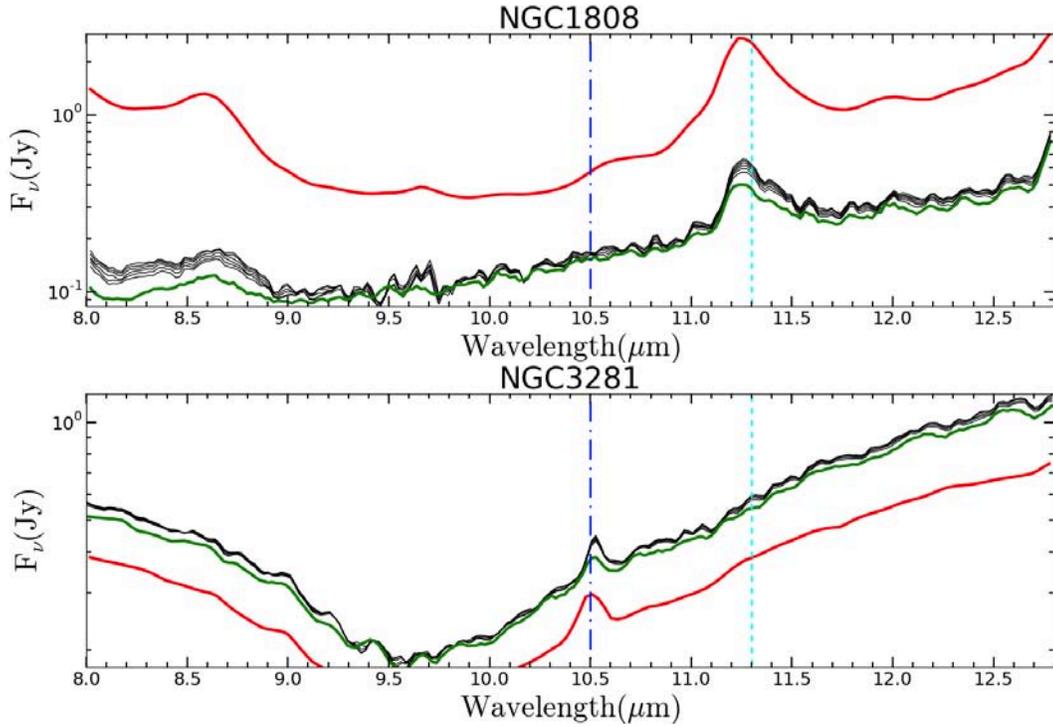


Figura 3.3: Ejemplo de defectos en la calibración del flujo para NGC 1808 (imagen superior) y NGC 3281 (imagen inferior). Para NGC 1808 el espectro de *Spitzer* (espectro en rojo) aparece muy por encima de los espectros tomados con T-ReCS (espectro nuclear en verde y espectros de aperturas en negro), por el contrario, para NGC 3281 el espectro de *Spitzer* (rojo) se presenta por abajo del resto de los espectros (espectro nuclear en verde y espectros de aperturas en negro). La posición del PAH en $11.3\mu\text{m}$ está señalada por la línea punteada azul turquesa y la posición de [SIV] está indicada con la línea azul.

la extracción de CASSIS ha podido no ser como fuente puntual.

- Escalando el flujo a $12\mu\text{m}$ del núcleo a la fotometría de apertura reportada en Asmus et al. [2014]. Esto sugeriría que la calibración en flujo de los espectros de T-ReCS no es lo suficientemente precisa. Aunque sí se aprecian ligeros cambios, no hemos encontrado que en ningún caso esto pueda explicar el desacuerdo entre los espectros de T-ReCS y de *Spitzer* medidos.
- Anclar la fotometría de *Spitzer* a IRAS. Escalando el flujo de nuestros datos de *Spitzer* a $12\mu\text{m}$ de acuerdo al flujo de IRAS a $12\mu\text{m}$ dado por NED⁷. Esto asume que la calibración en flujo de IRAS pueda ser más precisa que la *Spitzer*. Esta recalibración resultó en un buen acuerdo con los datos de T-ReCS en 17 casos. La fig.3.4 muestra como ejemplo el

⁷NASA/IPAC EXTRAGALACTIC DATABASE. <http://ned.ipac.caltech.edu/>

perfil radial del flujo a $12\mu\text{m}$ en el caso de NGC7582, antes (imagen superior) y después de esta calibración (imagen inferior).

Aún así seguimos teniendo un desacuerdo aparente en 3 casos (NGC 1365, NGC 1808 y NGC 5643). Creemos que es debido a cambios en el cielo dentro de la observación realizada por T-ReCS. En estos casos hemos aplicado una recalibración para que la apertura de *Spitzer* continúe naturalmente el patrón seguido por las aperturas de T-ReCS. Dicha recalibración se hizo aplicando un factor de escalamiento ~ 0.6 . Este valor es el factor de escalamiento más común obtenido con el método del último inciso y dicho valor parece escalar de forma correcta los datos. Este escalado (junto con el escalado medido por el método anterior) está incluido en la Tabla 2.2 (Col.10). Cabe mencionar que el valor de escalamiento no está dentro de los rangos de errores reportados para datos de *Spitzer*. La decisión de anclar la fotometría de *Spitzer a IRAS* se debe a que nosotros hicimos la reducción de los datos de T-ReCS y confiamos en que hemos tomado las precauciones necesarias para reducir los errores.

3.3. Medidas realizadas sobre los espectros

3.3.1. Medidas del EW y el flujo

De acuerdo con varios autores la presencia de PAHs está asociada con regiones de formación estelar [e.g. Roche et al., 1991; Smith et al., 2007; Wu et al., 2009; Diamond-Stanic et al., 2010]. Esta emisión se piensa que está originada en las regiones de fotodisociación (*Photodissociation regions*, PDRs) donde las moléculas aromáticas están protegidas del campo de radiación producido por las estrellas calientes. Se ha propuesto que el campo de radiación producido por el AGN puede destruir los PAHs [Genzel et al., 1998; Siebenmorgen et al., 2004], como se indica por la disminución del EW(PAH $11.3\mu\text{m}$) con los colores en el infrarrojo [Wu et al., 2009]. Para la actividad nuclear una línea de diagnóstico también observable con nuestros espectros es la [SIV] a $10.5\mu\text{m}$. Esta línea se piensa que está producida en la NLR [Dasyra et al., 2011]. Sin embargo, el [SIV] a $10.5\mu\text{m}$ surge de iones con un potencial de ionización de 35 eV, similar a la línea óptica de [OIII] a 5007 Å [Trouille et al., 2011]. Es por ello que esta línea se puede producir tanto en regiones de formación estelar como en la NLR del AGN [Pereira-Santaella et al., 2010]. El rango espectral de nuestra muestra abarca bien el PAH en $11.3\mu\text{m}$ y [SIV] en $10.5\mu\text{m}$ por tanto, centraremos nuestro análisis en estas dos líneas.

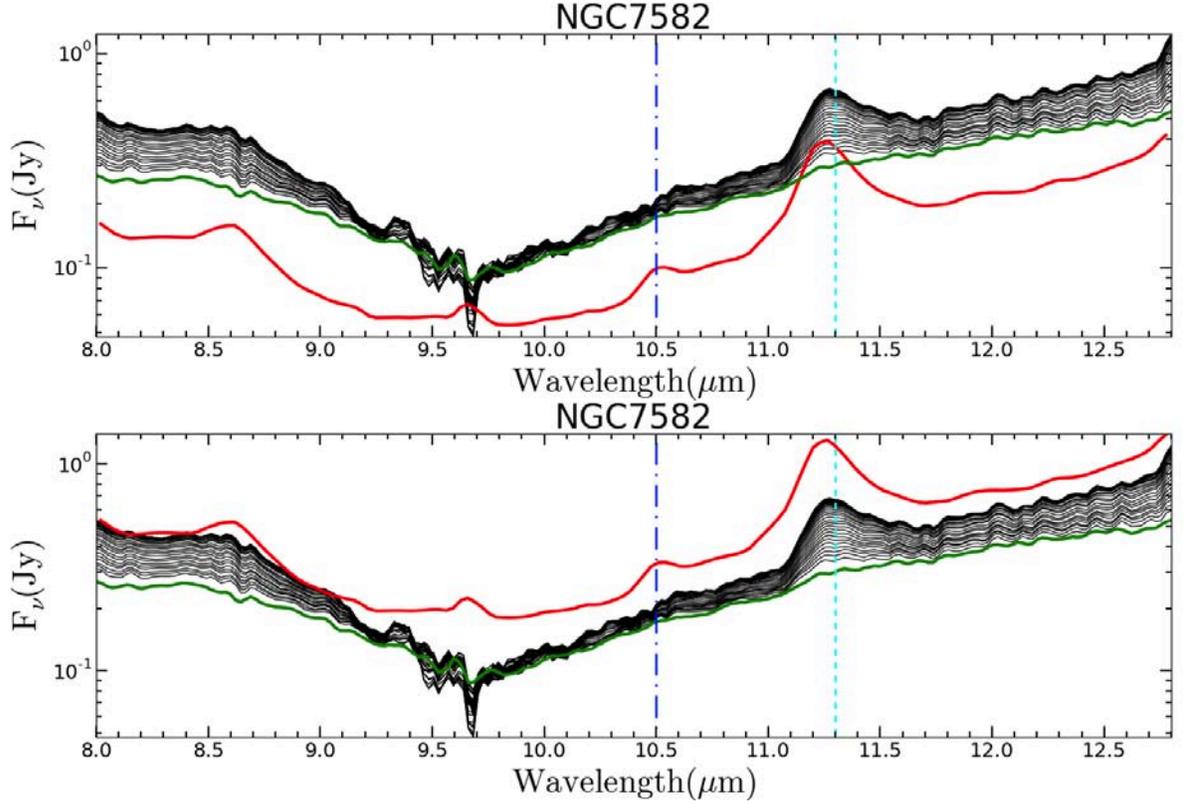


Figura 3.4: Ejemplo de escalamiento aplicado a NGC 7582 para ajustar espectro de *Spitzer* (línea en rojo) con espectros de T-ReCS (línea en verde para espectro nuclear y negra para aperturas). En la imagen superior el espectro de *Spitzer* se muestra sin escalamiento, mientras que en la imagen inferior hemos aplicado el escalamiento calculado usando el método propuesto en este trabajo.

Existen varios métodos en la literatura que se usan para medir flujos de PAHs. El método más apropiado en cada caso depende de las características del espectro. Algunos métodos han sido implementados para esto, entre ellos PAHFIT [Smith et al., 2007] y DecompIR [Mullaney et al., 2011]. Estos métodos son muy usados cuando los espectros están altamente contaminados por emisión de galaxia huésped. Funcionan muy bien cuando se dispone del rango espectral de *Spitzer*/IRS (es decir de 5-30 μm). Sin embargo, pueden producir una estimación equivocada del flujo del PAH cuando la cobertura espectral es limitada, como es el caso de los espectros de T-ReCS de los que disponemos [véase Esquej et al., 2014].

Nosotros seguimos el procedimiento descrito por Alonso-Herrero et al. [2014] y Esquej et al. [2014] para medir el flujo y el ancho equivalente (EW) de nuestras líneas. Ambos usaron el método de Hernan-Caballero et al. [2011], especialmente ideado para espectros con un rango en longitudes de onda limitado a $\sim 8\text{-}13\mu\text{m}$ o PAHs débiles. Su método consiste en ajustar un

continuo local por interpolación de un flujo promedio en dos bandas estrechas antes y después de la línea (por ejemplo en los rangos $10.7 - 10.9$ y $11.7 - 11.9 \mu\text{m}$ en el caso del PAH). En nuestro caso el rango ajustado varía de acuerdo con cada objeto y la línea que se desea medir. Esto lo hemos hecho para optimizar la medición de las líneas de acuerdo a su ancho natural y es especialmente relevante para la medida del PAH a $11.3\mu\text{m}$ puesto que su forma puede variar de objeto a objeto. Después de calculado el flujo, el EW es medido como la división entre flujo integrado en la línea en cuestión y el flujo en el continuo interpolado centrado en la línea. Las incertidumbres son obtenidas mediante simulaciones de Monte Carlo (con 1000 iteraciones) usando la desviación estándar alrededor del flujo como estimación del error en la medida. Nótese que para todo este proceso hemos aplicado un suavizado a los espectros de T-ReCS para mejorar la S/N de las líneas. Dicho suavizado se aplicó a los espectros en 1D de CanariCam usando un promedio de tres puntos espectrales próximos. El suavizado provoca una dilución en los picos, lo cual podría diluir las líneas de emisión si son menores a tres puntos del espectro. Sin embargo, las líneas que estudiamos son mucho más anchas por tanto, no esperamos tener algún efecto considerable en los resultados [ver Alonso-Herrero et al., 2014, para más detalles sobre el método]. Para ser auto-consistentes con nuestras medidas, del mismo modo hemos medido la línea de [SIV] a $10.5\mu\text{m}$ para todos los objetos y todas las aperturas. Los valores obtenidos de flujo y EW integrados para los datos de T-ReCS del rasgo de PAH en $11.3\mu\text{m}$ y la línea de [SIV] se presentan en la tabla 3.1.

Object	PAH _{11.3μm}		[SIV] _{10.5μm}	
	Flux 10 ⁻¹³ erg s ⁻¹ cm ⁻²	EW 10 ⁻³ μm	Flux 10 ⁻¹³ erg s ⁻¹ cm ⁻²	EW 10 ⁻³ μm
3C445	–	–	–	–
CIRCINUS	–	–	68.8±9.75	2±0.2
CentaurusA	–	–	22.4±1.56	5±0.4
ESO103-G35	–	–	18.9±0.95	13±1
IC4518W	0.70±0.05	13±1	11.7±0.50	31±1.4
IC5063	–	–	23.1±1.30	7±0.4
NGC1365	9.04±0.14	250±4	–	–
NGC1386	–	–	43.8±1.38	40±1
NGC1808	37.22±0.3	320±2	63.3±0.71	7±1
NGC3081	0.47±0.08	5±1	53.3±1.24	50±1
NGC3081	–	–	45.7±0.75	50±1
NGC3281	–	–	51.7±1.30	30±1
NGC4418	–	–	0.20±0.55	2±5
NGC4418	–	–	11.9±0.94	240±34
NGC4945	5.44±0.35	210±30	–	–
NGC5135	16.3±0.13	240±2	39.9±0.74	80±1
NGC5506	–	–	109.3±3.07	30±1
NGC5643	3.36±0.10	40±1	46.04±0.89	60±1
NGC7130	11.43±0.07	170±1	7.13±0.27	13±1
NGC7172	2.72±0.15	60±3	12.4±1.58	50±6
NGC7172	0.78±0.07	20±2	8.27±0.29	50±2
NGC7479	–	–	10.6±0.44	20±1
NGC7582	37.8±0.27	210±2	1.02±0.45	1±0.4

Tabla 3.1: Flujo y EW integrados para aperturas de T-ReCS

3.3.2. Perfiles radiales de PAH y [SIV]

El proceso para hacer el perfil radial del flujo y el EW del rasgo de PAH y la línea de [SIV] es el siguiente. Al primer radio de apertura se le sustrajo la medida nuclear. A los subsecuentes radios de aperturas se les sustrajo la medida del radio interior. De igual manera a la medida de *Spitzer* se le sustrajo la medida del último de los anillos medidos con los espectros de T-ReCS⁸. De este modo cada medida da cuenta del flujo y EW de la línea analizada dentro de un anillo centrado en la fuente. Nótese que el tamaño de la apertura nuclear, las aperturas radiales, y la medida de *Spitzer* son distintas. Es por ello que para compararlas entre sí, hemos dividido cada medida por el área estudiada de acuerdo a su radio. Todo esto nos permite obtener un perfil radial de la evolución del flujo y EW del PAH y [SIV] para cada objeto. Como ejemplo de ello mostramos la Fig. 3.5 para el caso de NGC 7130. El flujo máximo del PAH en 11.3μm se

⁸Nótese que esto se hizo sólo en los casos en los que la apertura de *Spitzer* fuese mayor a la última de las aperturas obtenidas con T-ReCS.

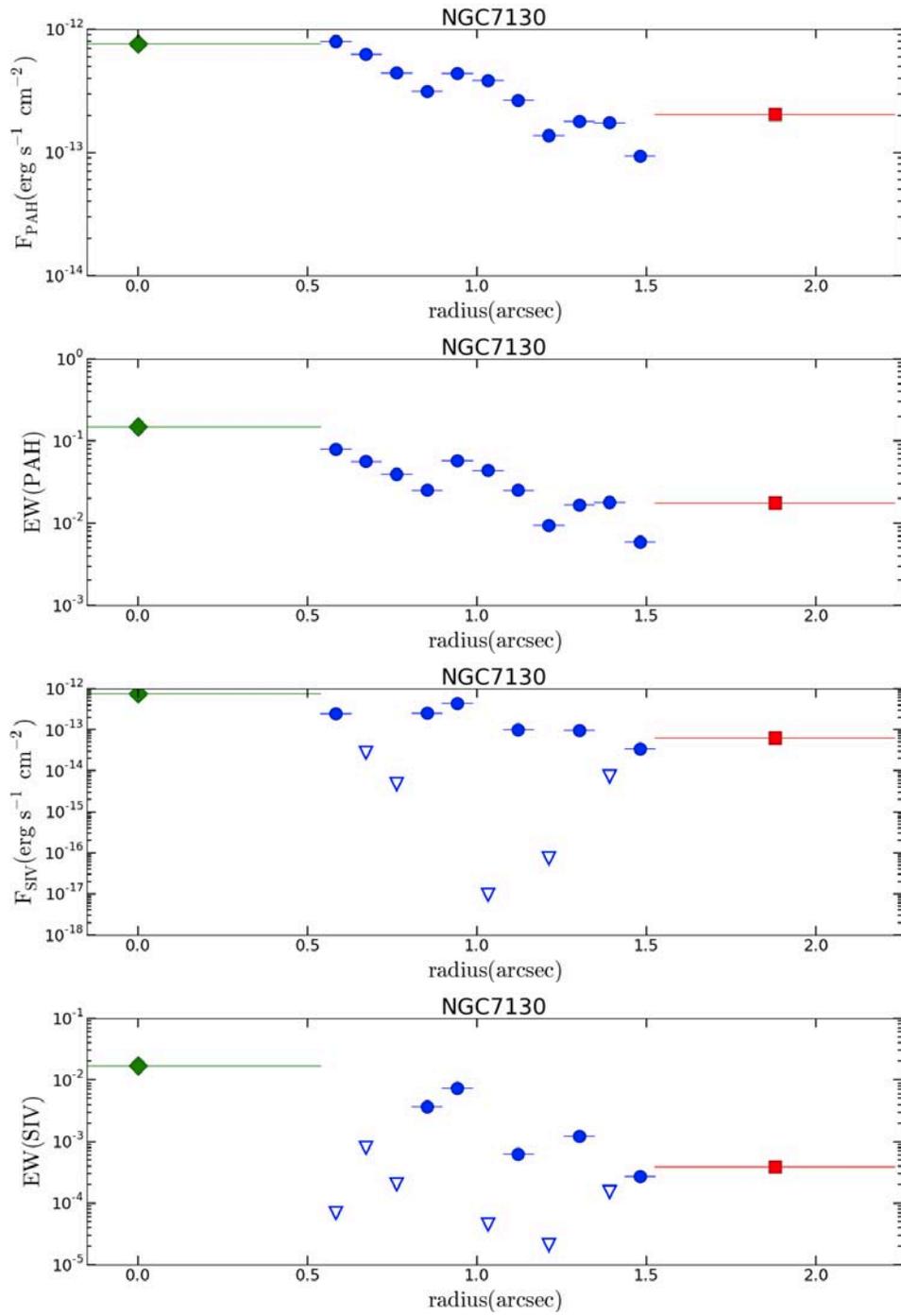


Figura 3.5: Mediciones de flujos (primera y tercera figura) y EW (segunda y cuarta figura) del PAH en $11.3\mu\text{m}$ (imágenes superiores) y la línea de [SIV] (imágenes inferiores) conforme la distancia al núcleo se incrementa, para NGC 7130. En cada gráfica el valor nuclear se representa como un romboide en verde, los valores circumnucleares obtenidos con T-ReCS se muestran con círculos en azul y en el caso de ser límites se identifican con triángulos vacíos. El valor calculado para la apertura de *Spitzer* es indicado con un cuadrado en rojo.

presenta en el núcleo y éste decae conforme se aleja del centro y el comportamiento es similar para el EW. En el caso del flujo y EW de [SIV] se presenta un decaimiento en general aunque en muchas aperturas solamente se ha medido un límite. Para las galaxias de canto o con una alta inclinación esperamos un efecto de aplanamiento en los perfiles. Este efecto será más notorio en los perfiles de [SIV], si se considera que la mayor contribución a la emisión de esta línea proviene del núcleo. En el apéndice A se presentan las figuras de los perfiles radiales para el flujo y el EW del PAH en $11.3\mu\text{m}$ y la línea de [SIV] en todos los objetos.

3.3.3. Ajustes para perfiles radiales

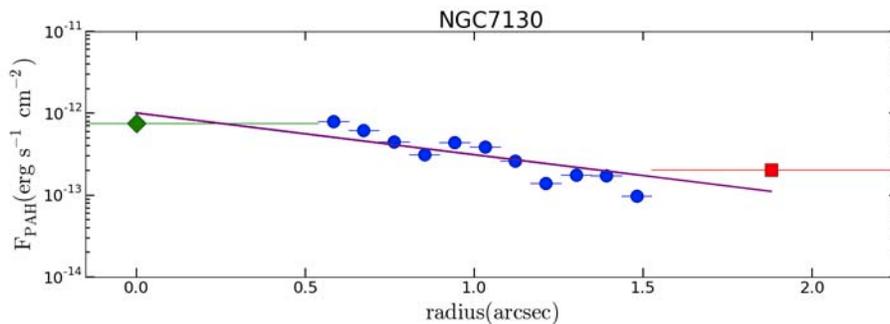


Figura 3.6: Distancia vs flujo para el PAH en $11.3\mu\text{m}$ de NGC 7130. En la figura se muestran los valores obtenidos para cada espectro en su respectiva apertura: nuclear (romboide en verde), circunucleares con T-ReCS (círculos en azules) y circunuclear más externa tomada con *Spitzer*/IRS (cuadrado en rojo). Finalmente, la línea morada muestra el ajuste lineal calculado.

Hemos realizado un ajuste tipo ley de potencias a nuestros perfiles radiales de flujo y EW tanto para [SIV] como para el PAH, lo cual nos permite entender los resultados de una manera cuantitativa. Este análisis solo toma en cuenta los valores de las aperturas de T-ReCs. Proponemos un ajuste de este tipo como primera aproximación al comportamiento del flujo y EW del PAH en $11.3\mu\text{m}$ y la línea de [SIV]. Sí la mayor contribución a la emisión de [SIV] proviene del núcleo esperamos que, en general, el comportamiento radial pueda ser predicho por un ajuste similar al propuesto. Para el caso del PAH en $11.3\mu\text{m}$ un ajuste de potencias, como primera aproximación, nos permite entender si las moléculas emisoras son destruidas por la radiación o diluidas por el continuo del AGN en las partes más internas de la fuente. También esperamos que el comportamiento del flujo y EW de los PAHs se pueda predecir con un ajuste de potencias, si no existen brotes SF circunucleares.

De manera práctica y para simplificar los cálculos hemos aplicado logaritmos a ambos ejes para reducir el cálculo a un ajuste lineal. Dicho ajuste se ha calculado usando método de mínimos cuadrados por medio de la función “lineregress” dentro del paquete SCIPY de Python. El grado de fiabilidad de un ajuste depende, en cierta medida, del número de puntos que se consideren para calcularlo. Por tanto, restringimos el cálculo del ajuste a los objetos donde se obtuvieron más de cinco valores no límite. Esto garantiza que el ajuste lineal (con dos parámetros libres) se hace con al menos tres grados de libertad. Por otro lado, debido a que los errores en las medidas son muy pequeños no los hemos considerado para hacer el ajuste.

En la figura 3.6 se gráfica la distancia contra el flujo para el PAH en $11.3\mu\text{m}$ de NGC7130 y se identifican los valores obtenidos en cada apertura: nuclear (romboide en verde), circumnucleares con T-ReCS (círculos azules) y circumnuclear con *Spitzer* (cuadrado en rojo). El ajuste aplicado se representa con una línea en morada. Las graficas de los ajustes para la muestra total se presentan en el Apéndice A.

Capítulo 4

Resultados

El estudio detallado de las partes mas internas de cada fuente nos permite analizar la conexión entre SF circumnuclear y el AGN. Usamos como trazador de SF el rasgo del PAH a $11.3\mu\text{m}$. Además el rango espectral que cubren nuestros datos nos permite investigar el origen y evolución de la línea [SIV]. Este capítulo menciona los resultados obtenidos para ambas líneas del espectro en el MIR.

Los valores y sus respectivos errores para el ajuste del flujo y EW de cada objeto se muestran en las tablas 4.1 y 4.2: 1) pendiente (m), 2) ordenada en el origen (b), 3) error estándar de estimación (S_{yx}), 4) coeficiente de correlación de Pearson (R^2) y 5) p-valor ($p\text{-value}$). Los criterios usados para evaluar el ajuste se mencionan a continuación. La calidad del ajuste propuesto se evaluó con base en el valor de R^2 obtenido para cada fuente, considerando que para un buen ajuste el $R^2 \sim 1$. Además se consideró que tan pequeño era el valor del S_{yx} . Después se tomó en cuenta el $p\text{-valor}$; éste se ha obtenido bajo la hipótesis nula de no tener pendiente, para lo cual se ha establecido un nivel de significación (α) de 0.05. Si el p-valor obtenido es menor o igual a α , la pendiente no es nula. El último parámetro a revisar fue la m mayores (menores) a cero indican que el perfil aumenta (disminuye) con la distancia a la fuente central. De este modo, la pendiente representa un decaimiento radial para el caso donde es negativa y un crecimiento radial para valores positivos.

4.1. Comportamiento de los rasgos de PAHs

4.1.1. Descripción individual.

De los 20 objetos de nuestra muestra, en 11¹ no se logro realizar un ajuste de los valores para el PAH en $11.3\mu\text{m}$, pues no se detectó emisión en más de cinco aperturas (ver Sección 3 de análisis de datos). Existen seis objetos con un valor de $R^2 < 0.65$, esto indica que el ajuste lineal propuesto no es apropiado para explicar el comportamiento del perfil radial. Sin embargo, a continuación analizaremos cada uno de los 9 objetos donde se hizo un ajuste. Como se podrá observar en todos estos casos se encontro un déficit de PAHs hacia el núcleo respecto a la predicción del ajuste.

IC 4518W: No hay emisión de PAHs nucleares. Esta fuente presenta emisión de PAHs a $11.3\mu\text{m}$ sólo a partir de $1.1''$. El comportamiento del perfil radial (Fig.A.5) oscila para cada apertura. Entre $1.1''$ y $1.4''$ el flujo muestra un exceso de PAHs, pero a partir de $1.4''$ el flujo de PAH decae y vuelve a crecer después de $1.6''$. Por tanto, el comportamiento del perfil radial del flujo del PAHs no presenta un decaimiento tipo ley de potencias. El ajuste lineal propuesto, aunque no representa bien los datos (ver Tabla 4.1), sí indica claramente un déficit de PAHs hacia el núcleo respecto a lo esperado según los PAHs detectados en aperturas por encima de $\sim 1''$.

NGC 1365: En principio pareciera que los valores del flujo coinciden con el ajuste, excepto por dos valores en diferentes aperturas. Sin embargo, de acuerdo con el R^2 obtenido el ajuste no representa bien a los datos. Además es claro que el flujo calculado para el espectro de *Spitzer* cae muy lejos de lo predicho por el ajuste (véase fig. A.7). No se encontró emisión de PAHs en el núcleo.

NGC 1808: El ajuste lineal parece describir el comportamiento en general de los valores de flujo de PAHs de todas las aperturas de T-ReCS (véase fig. A.9), lo cual concuerda con el valor de R^2 calculado. Además se cálculo un $S_{yx} \sim 0.07$ para este caso, lo cual indica poca dispersión alrededor del ajuste. Sin embargo, nótese que el flujo calculado para el espectro de *Spitzer* no parece estar de acuerdo con el ajuste. El valor del flujo nuclear esta ligeramente por debajo de lo predicho por el ajuste ($\delta y \sim 9.8e^{-14}$).

NGC 3081: Para este objeto se obtuvieron datos en dos ángulos: 0° y 350° . Pero sólo se lograron detectar suficientes valores de flujo del PAH en $11.3\mu\text{m}$ para hacer un ajuste en el ángulo de 0° .

¹Seis de esas 11 son puntuales.

Sin embargo, los valores detectados de flujo en dicho ángulo no presentan un comportamiento simple ($R^2 \sim 0.06$, véase fig.A.10). Por ejemplo, el flujo de PAH nuclear es mayor que en las primeras dos aperturas, mientras que la segunda apertura muestra un valor por superior a los anteriores. Este comportamiento se reproduce en otras aperturas mayores a $1''$. Aunque el ajuste lineal no representa bien los datos (ver tabla 4.1), la predicción hacia el núcleo está levemente por encima del flujo nuclear calculado ($\delta y \sim 7.1e^{-15}$). Nótese que para ambos ángulos no es clara la existencia de emisión para el PAH en $11.3\mu\text{m}$ (flujo integrado con T-ReCS ~ 5.8 veces sobre el límite de detección).

NGC 4945: En general el flujo del PAH muestra un decaimiento conforme aumentamos el radio aunque presenta variaciones a diferentes distancias del núcleo (véase fig.A.17). De hecho el ajuste lineal no representa correctamente el comportamiento del perfil (ver tabla 4.1). El flujo del PAH muestra su mayor decremento para las aperturas entre $\sim 5'' - 6''$. Nótese que el flujo en el núcleo muestra un leve decremento respecto al valor extrapolado del ajuste lineal del perfil ($\delta y \sim 6.11e^{-14}$).

NGC 5135: El espectro de esta fuente muestra una emisión de PAH para casi todas las aperturas realizadas (~ 125 veces por encima de su límite de detección en el caso del flujo integrado, véase fig. A.16). El flujo de PAHs en las aperturas más cercanas al núcleo ($< 1''$) es constante. A partir de $\sim 1''$ el flujo de PAHs tiene un incremento que permanece constante entre $\sim 1.4'' - 3''$ y decae posteriormente. Por tanto, el flujo de este objeto no presenta un comportamiento que puede ser modelado por un ajuste lineal. En cualquier caso, el ajuste lineal predice un flujo nuclear ligeramente superior al que se observa en el núcleo ($\delta y \sim 3.3e^{-13}$).

NGC 7130: A pesar de las ligeras variaciones en el flujo del PAH a $\sim 1.25''$, $\sim 1.5''$ y $\sim 1.7''$ el flujo parece presentar un caída generalizada que puede ser predicha por un ajuste lineal (véase fig. A.19). Sin embargo, los valores de flujo extremos difieren de los valores predichos por el ajuste. En el caso del flujo tomado con *Spitzer*, éste se ubica por encima de la predicción, por el contrario el flujo nuclear muestra un decremento respecto al predicho por el ajuste.

NGC 7172: Para esta fuente se tienen datos en dos ángulos (60° y 90°). Sólo para los datos de 60° se lograron tener suficientes detecciones del PAH para poder hacer un ajuste. Sin embargo, el comportamiento del flujo de PAHs en este objeto no se logró modelar con un ajuste lineal porque las aperturas con T-ReCS muestran un exceso en flujo a distancias intermedias ($\sim 1 - 1.5''$).

Además, nótese que la que emisión del PAH en las aperturas de T-ReCS es débil (~ 11.14 veces sobre su límite de detección para el flujo integrado, véase fig.A.20). El flujo calculado para el espectro de *Spitzer* esta por debajo de la predicción. Para el espectro del núcleo no se ha detectado flujo en $11.3\mu\text{m}$.

NGC 7582: El flujo de PAH se comporta de una manera relativamente simple, mostrando un decaimiento conforme la distancia aumenta en general. El valor de flujo para el PAH en el núcleo está por debajo del encontrado en las aperturas menores a $\sim 2''$ y de lo predicho por el ajuste. Nótese que alrededor de $\sim 3''$ se presentan oscilaciones y el flujo de la apertura de *Spitzer* es similar al nuclear.

4.1.2. Descripción General

De los 20 objetos, en seis casos no se detectó PAHs en ninguna apertura, incluyendo el espectro nuclear y el de *Spitzer* (3C 445, ESO 103-G35, IC 5063, NGC 4418, NGC 5506, y NGC 7479). Consideramos que una fuente presenta emisión extendida en PAHs, si medimos el flujo del rasgo de $11.3\mu\text{m}$ en más de una apertura. Con este criterio, en los 14 objetos donde hay algo de emisión de PAHs ésta se encuentra extendida. Para las fuentes con emisión extendida el rango máximo para las escalas de emisión está entre $1.3'' - 14''$ (i.e. $\sim 0.28 - 1.0$ kpc).

Para hacer un análisis del comportamiento del PAH en $11.3\mu\text{m}$ a diferentes distancias del núcleo no tomamos en cuenta 4 objetos de los 14 restantes (CIRCINUS, Centaurus A, NGC 1386, NGC 3281) porque no se detectó flujo en más de dos aperturas. Los perfiles radiales del flujo de PAH para las diez fuentes que quedan, muestran comportamientos dispares (véase apéndice A y sección 4.1.1). En dos objetos (NGC 1808 y NGC 7582) hemos encontrado que la variación es relativamente simple, presentando un decaimiento en el flujo del PAH conforme la distancia crece. Sin embargo, en ocho casos (IC 4518W, NGC 1365, NGC 3081, NGC 4945, NGC 5135, NGC 5643, NGC 7130 y NGC 7172) el flujo presenta picos a diferentes distancias del núcleo.

Por otra parte, de los 14 objetos de nuestra muestra encontramos que la emisión de PAHs a $11.3\mu\text{m}$ en el núcleo está ausente para la mayoría de las fuentes excepto en siete objetos (NGC 1808, NGC 3081, NGC 4945, NGC 5135, NGC 5643, NGC 7130 y NGC 7582). Ésto implica que un 65% de la muestra carece de emisión de PAHs en la componente nuclear. No encontramos ninguna relación entre la detección (o no) del PAH y la distancia a la fuente.

Además, encontramos que los siete objetos con medidas nucleares del flujo del PAH muestran

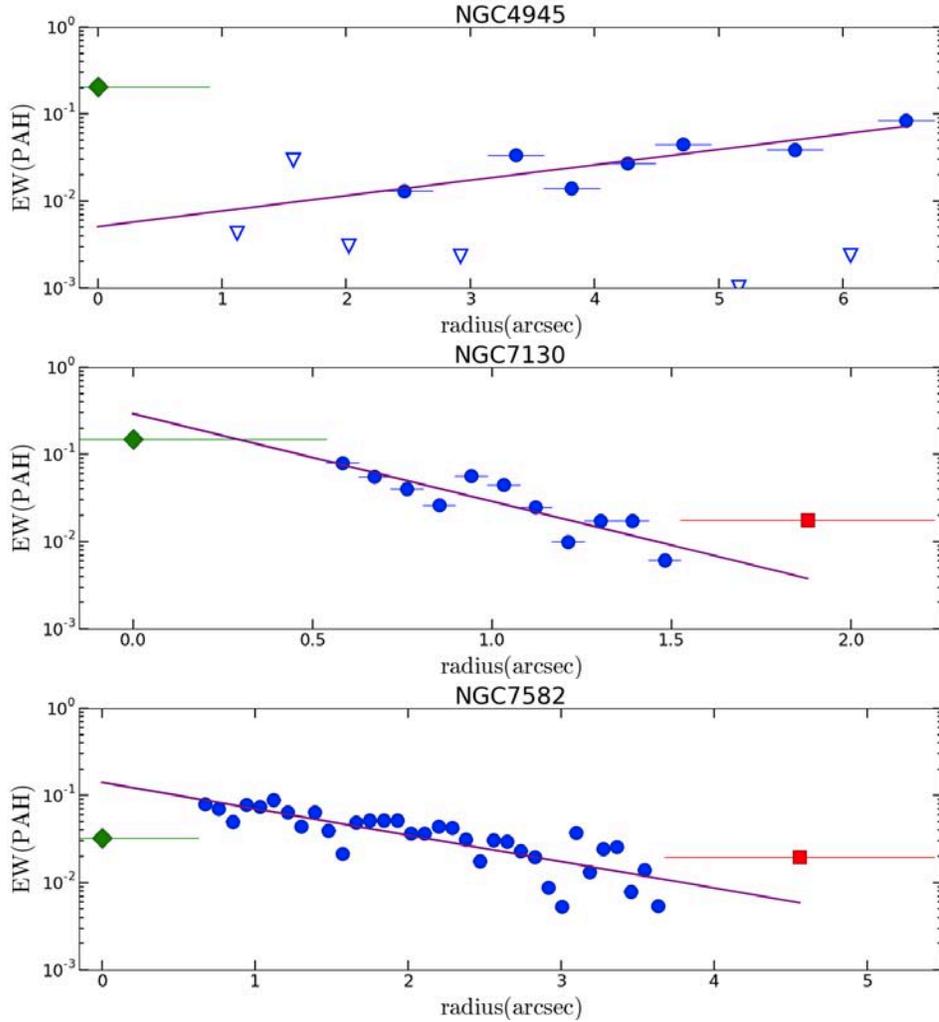


Figura 4.1: Ajuste para EW de NGC 1808, NGC 7130 y NGC 7582. Descripción similar a fig.3.6.

un déficit frente a la tendencia general. Esto se hizo por medio de una comparación entre el flujo nuclear calculado y un ajuste lineal aplicado a nueve fuentes (véase sección 3.3.3 y tablas 4.1 - 4.2)². Significa que en los 14 objetos donde se logró estudiar la emisión extendida del flujo para el PAH en $11.3 \mu\text{m}$ se observa un decremento de éste hacia las partes internas.

En el caso del EW para el PAH el ajuste sólo se aplicó a ocho fuentes de las 20, con base en las restricciones mencionadas en la sección 3.3.3. En cinco de estas ocho fuentes el valor del

²En la fuente NGC 5643 no se logró determinar el ajuste y por tanto la posición del núcleo respecto a éste, pues se tiene menos de cinco aperturas donde el valor del flujo no es límite

$R^2 < 0.65$, significa que un ajuste lineal no representa de manera adecuada los datos obtenidos. Sólo en tres casos (NGC 4945, NGC 7130 y NGC 7582) el $R^2 \geq 0.65$ y por tanto, pensamos que el ajuste podría predecir el comportamiento de estos datos (Véase tabla 4.2). En el caso de NGC 4945 la pendiente es positiva, mientras que en las otras dos fuentes las pendientes son negativas (y se ha encontrado SF muy cerca del núcleo). La fig. 4.1 muestra las gráficas con el ajuste del EW para estas tres fuentes.

De las ocho fuentes donde se aplicó un ajuste en seis fuentes (IC 4518W, NGC 1365, NGC 3081, NGC 5135, NGC 7130 y NGC 7582) el EW nuclear está por debajo del ajuste y en dos (NGC 1808, NGC 3081 y NGC 4945) el valor nuclear de EW está por encima. Nótese que los valores nucleares de flujo y EW coinciden en posición con respecto al ajuste en cuatro casos (NGC 3081, NGC 5135, NGC 7130 y NGC 7582).

4.2. Comportamiento de la línea de [SIV]

4.2.1. Descripción individual

Para el análisis de [SIV] no se usó NGC 4945, porque los espectros de T-ReCS no tienen buena calidad en el rango donde se localiza esta línea. De los 19 objetos en ocho³ no se logró establecer un ajuste lineal, pues no se detectó emisión en más de cinco aperturas para la línea de [SIV] (Ver sección 3 de análisis de datos). De los 11 objetos restantes se considera que en nueve casos un ajuste lineal no es apropiado para explicar el comportamiento del perfil, pues se calculó un $R^2 \leq 0.64$. Sin embargo, a continuación analizaremos cada uno de estos 11 objetos.

IC 4518W: El flujo de [SIV] en esta fuente está presente en el núcleo y se extiende hasta un radio $< 1.2''$. Las primeras cinco aperturas muestran flujos por encima del nuclear los cuales decaen radialmente. Los valores no límites de T-ReCS parecen ser predichos de forma adecuada por el ajuste lineal ($R \sim 0.87$ y $S_{yx} \sim 0.06$). Sin embargo, el flujo nuclear se ubica por debajo del ajuste. Considerando que los mayores flujos de esta línea se registran a distancias cercanas al núcleo, podemos considerar que el [SIV] proviene principalmente del AGN (Véase fig.A.5).

IC 5063: En promedio el flujo de [SIV] presenta un decaimiento radial, pero existen algunas variaciones a diferentes distancias del núcleo (véase fig. A.6). Como se muestra en la tabla 4.1 el comportamiento de nuestros datos no se puede modelar con un ajuste lineal. Las principales

³Uno de los ocho es puntual: 3C 445

variaciones del flujo se observan a distancias de $\sim 0.75''$ y $\sim 1''$. Nótese que el flujo nuclear cae cerca del ajuste ($\delta y \sim 2.5e^{-13}$). Para esta fuente pensamos que el [SIV] puede tener una contribución importante de fotoionización nuclear, pero también puede provenir de regiones de SF ubicadas a distancias similares a donde encontramos nuestras variaciones.

NGC 1386: En general el flujo de [SIV] presenta un decaimiento radial, lo cual puede indicar que [SIV] proviene del núcleo. Sin embargo, encontramos que el flujo de [SIV] es nulo a $\sim 0.85''$ y $1.05''$. Después de estos decaimientos el flujo vuelve a aparecer, lo cual indica que regiones de SF podrían estar relacionadas con la línea. Posiblemente estos cambios en el flujo influyen para tener un valor de R^2 por debajo del aceptado (véase fig.A.8).

NGC 3081: Para esta fuente se tienen mediciones en dos ángulos (0° y 350°), para ambos se ha logrado hacer un ajuste. En el primer caso es claro que los datos no pueden ser modelados por un ajuste lineal ($R^2 \sim 0.11$, ver fig. A.10). El flujo nuclear es menor al predicho por el ajuste lineal, además de ser menor al encontrado en la mayoría de las aperturas. En cuanto al flujo de [SIV] encontrado en otras aperturas éste muestra variaciones que parecen no relacionarlo con el núcleo. En los datos para el segundo ángulo el comportamiento del flujo de [SIV] pareciera más ordenado, excepto por la conducta de las aperturas menores a $\sim 0.9''$ (véase fig. A.11). Las primeras aperturas muestran un decaimiento en el flujo de [SIV], el cual a partir de la segunda apertura crece. Este comportamiento provoca que el valor de R^2 sea demasiado bajo. Nótese que también el flujo nuclear para este ángulo está por debajo del predicho por el ajuste. El decaimiento en flujo (más notorio en datos del segundo ángulo) indica una gran contribución por parte del AGN, mientras que las variaciones a diferentes aperturas (datos en ambos ángulos) muestran una contribución de las regiones de SF.

NGC 3281: El valor del flujo nuclear de [SIV] es alto comparado con el resto de las aperturas, lo que indica que [SIV] tiene una fuerte contribución de fotoionización nuclear. A pesar de que el valor nuclear está por debajo de la predicción del ajuste. La diferencia entre el flujo nuclear y la primera apertura es alta. Además, nótese que el flujo de [SIV] tiende a variar entre $\sim 0.8''$ y $\sim 1.3''$. Estas variaciones podrían deberse a ligeras contribuciones de [SIV] por parte de regiones de SF. Nótese que las barras de error para el flujo calculado a partir del espectro de *Spitzer* son grandes y no están de acuerdo con el ajuste (ver fig.A.12).

NGC 4418: Para esta fuente obtuvimos datos en un ángulo de 30° y 40° , sólo para el segundo

ángulo se lograron obtener suficientes valores para hacer un ajuste. El grado de confiabilidad obtenido, para dicho ajuste es $R^2 \sim 0.33$, significa que nuestro ajuste no puede modelar el comportamiento radial del flujo. Recordemos que el ajuste no toma en cuenta los valores considerados límites que aparecen entre $0.7''$ y $0.9''$. Además el flujo nuclear es menor al encontrado en el resto de las aperturas (véase fig. A.14). Para esta fuente no parece ser claro que el [SIV] provenga de fotoionización nuclear, pero cabe la posibilidad de estar relacionado con regiones de SF.

NGC 5135: A excepción del incremento en flujo de la primer apertura comparado con el nuclear, éste decae hasta un radio $\sim 1''$. Después el flujo de [SIV] vuelve a tener un incremento en $\sim 1.25''$, superior al registrado en otras aperturas donde luego decae hasta un radio $< 3''$ (véase fig.A.16). Nótese que el flujo nuclear cae por debajo de lo predicho por el ajuste ($\delta y \sim 6.6e^{-13}$). Pensamos que hasta un radio de $1''$ el [SIV] puede tener una contribución de fotoionización nuclear y después la contribución puede provenir de una región de SF.

NGC 5506: El flujo de [SIV] tiene un comportamiento bastante simple y por tanto el ajuste parece embonar bien, se calculó un $R^2 \sim 0.64$ para esta fuente. Excepto por el flujo de [SIV] nuclear, el cual está por encima de lo predicho por el ajuste lineal. Además de existir algunos ligeros incrementos en $\sim 0.8''$ y $\sim 1''$ (véase fig.A.17). Es claro que la mayor contribución en el núcleo proviene del AGN. Sin embargo, pensamos que los incrementos repentinos de flujo de [SIV] en distintas aperturas están relacionado con regiones de SF.

NGC 7130: Esta fuente muestra variaciones radiales en el flujo de [SIV]. El valor nuclear está por debajo de la predicción del ajuste, pero es mucho mayor al encontrado en otras aperturas. Aunque en promedio se muestra un decaimiento, existen algunas variaciones en $\sim 0.7''$, $\sim 1''$, $\sim 1.25''$ y $\sim 1.45''$ (véase fig.A.19). Nuevamente, pensamos que los incrementos de flujo de [SIV] en las aperturas estan relacionados con anillos de SF, pero no descartamos que exista una contribución de fotoionización nuclear al [SIV].

NGC 7479: El flujo de [SIV] parece comportarse de una manera poco sencilla. Nótese que el flujo nuclear esta ligeramente por debajo del ajuste ($\delta y \sim 4e^{-13}$) y entre $\sim 0.6''$ y $\sim 0.8''$ no se midió flujo (véase fig.A.22). Pensamos que la falta de flujo en aperturas intermedias puede indicar que la emisión de flujo proviene de lugares diferentes. El flujo medido hasta $0.6''$ proviene seguramente del núcleo, mientras que el flujo medido en las aperturas a radios $> 0.8''$ puede

provenir de una región de SF.

NGC 7582: Nótese que el flujo de [SIV] no se ha detectado en la mayoría de las aperturas. Por tanto, no podemos proponer un ajuste lineal para tratar de modelar el comportamiento radial del flujo (véase fig.A.23). Para esta fuente no es claro que la contribución a la línea de [SIV] provenga del núcleo, lo que indica que talvez la emisión esté relacionada con regiones de SF a diferentes distancia del núcleo o ruido en la medición.

4.2.2. Descripción General de la línea de [SIV]

Comenzamos por descartar a 3C 445 y NGC 1365 de los 19 objetos que consideramos para estudiar [SIV], pues no se detectó emisión de la línea en ninguna apertura de ambas fuentes. Para las 17 fuentes restantes se considero que tienen una emisión extendida de [SIV] a $10.5 \mu\text{m}$, pues se midió flujo en mas de una apertura (i.e. $\sim 85\%$ de la muestra). Para estas fuentes el rango máximo para las escalas de emisión está entre $\sim 0.6'' - 14''$ ($\sim 0.90 - 1.0\text{kpc}$).

Los perfiles radiales del flujo de [SIV] para las 17 fuentes no presenta un comportamiento simple (i.e. lineal). En once objetos (Centaurus A, IC 4518W, IC 5063, NGC 1386, NGC 3081, NGC 3281, NGC 5135, NGC 5506, NGC 5643, NGC 7130 y NGC 7172) se puede ver que el perfil decrece pero con fluctuaciones (55% de la muestra total). En los otros seis objetos (CIRCINUS, ESO 103-G35, NGC 1808, NGC 4418, NGC 7479 y NGC 7582) el perfil sólo presenta fluctuaciones y no es clara la disminución de [SIV] hacia las partes externas (véase apéndice A y sección 4.2.1) .

Por otra parte, en 16 de las 17 fuentes (i.e. $\sim 80\%$) se detectó la emisión de [SIV] en el espectro nuclear (exceptuando CIRCINUS). No se encontró ninguna relación entre el tipo de fuente y la detección (o no) de emisión de [SIV].

Además encontramos que en ocho de los 16 objetos el mayor flujo de [SIV] se presenta en el núcleo, mientras que en cinco (IC 4518W, NGC 1386, NGC 3081, NGC 5135, NGC 7172) el máximo está entre las primeras tres aperturas y para las tres fuentes restantes el flujo registrado es menor (NGC 1808 y NGC 4418) o similar (NGC 7582) al encontrado en otras aperturas. Significa que para el 65% de la muestra el flujo de [SIV] probablemente es producido por fotoionización nuclear. Para poder modelar el comportamiento del [SIV] se propuso un ajuste lineal (véase sección 3.3.3 y tablas 4.1 - 4.2), el cual fue aplicado a 11 de las 17 fuentes. Sólo para dos fuentes (IC 4518W, NGC 5506) el ajuste parece estar de acuerdo con los datos. De cualquier

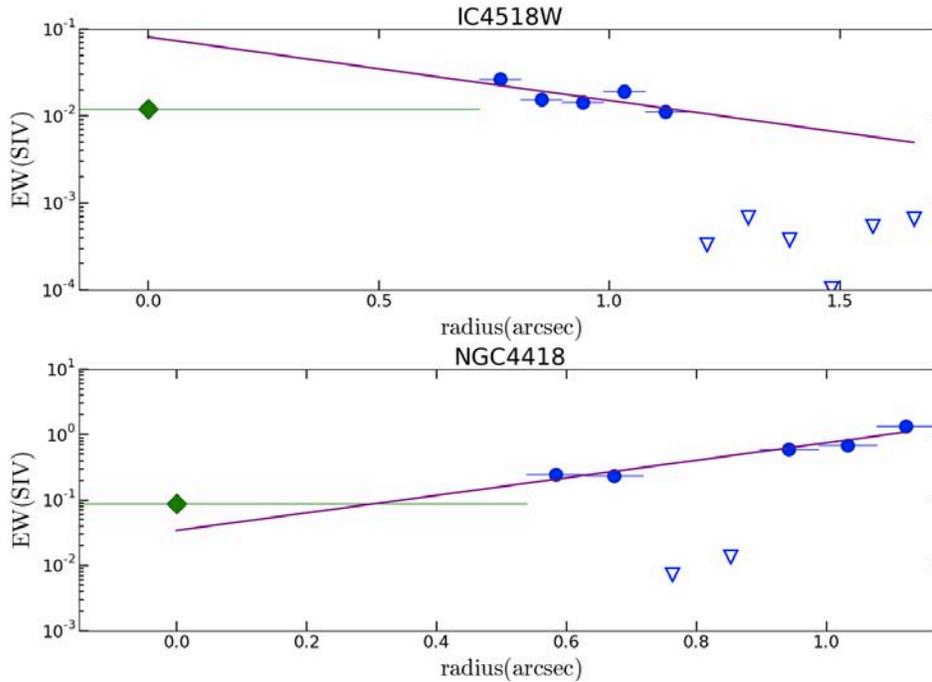


Figura 4.2: Ajuste para EW de IC 4518W y NGC 4418. Descripción similar a fig.3.6.

manera, mencionamos que las pendientes estimadas son negativas (excepto por NGC 7582 y NGC 4418). Lo cual implica una disminución radial hacia el exterior del flujo de [SIV].

En 10 objetos se logró estudiar la emisión extendida del EW de [SIV] por medio de un ajuste (véase sección 3.3.3). En dos casos (IC 4518W y NGC 4418) se considero que dicho ajuste podría representar a los datos, $R^2 \geq 0.55$. Para IC 4518W la pendiente calculada es negativa y para NGC 4418 la pendiente es positiva. Cabe mencionar que para ambas fuentes existen trabajos donde se menciona la posibilidad de SF nuclear. La fig. 4.2 muestra las gráficas con el ajuste del EW para ambas fuentes.

De las 10 fuentes mencionadas al principio del párrafo, seis tienen un EW nuclear mayor al encontrado en otras aperturas y las otras cuatro tienen un EW nuclear por debajo de la tendencia general (aquí se incluyen IC 4518W y NGC 4418).

Object (1)	P.A. (2)	PAH _{11.3μm}					[SIV] _{10.5μm}				
		m (3)	b (4)	S _{yx} (5)	R ² (6)	p-value (7)	m (8)	b (9)	S _{yx} (10)	R ² (11)	p-value (12)
3C445	300	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
CIRCINUS	100	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
CentaurusA	0	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
ESO103-G35	30	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
IC4518W	5	-0.38±0.62	-12.60±0.87	0.2	0.09	0.57	-1.01±0.22	-11.2±0.21	0.06	0.87	0.02
IC5063	303	–	–	–	–	–	-0.37±0.28	-11.85±0.27	0.20	0.20	0.22
NGC1365	15	0.02±0.18	-11.95±0.13	0.17	0.002	0.89	–	–	–	–	–
NGC1386	0	–	–	–	–	–	-1.25±1.35	-10.53±1.10	0.50	0.22	0.42
NGC1808	45	-0.51±0.19	-11.19±0.17	0.07	0.65	0.05	–	–	–	–	–
NGC3081	0	-0.46±0.9	-12.84±0.9	0.42	0.06	0.63	-0.26±0.28	-11.20±0.3	0.17	0.11	0.40
NGC3081	350	–	–	–	–	–	-0.40±0.39	-11.34±0.4	0.23	0.14	0.35
NGC3281	351	–	–	–	–	–	-0.88±0.78	-10.9±0.74	0.22	0.30	0.34
NGC4418	30	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
NGC4418	40	–	–	–	–	–	0.43±0.36	-12.0±0.32	0.17	0.33	0.31
NGC4945	45	-0.10±0.06	-12.8±0.25	0.31	0.20	0.19	–	–	–	–	–
NGC5135	30	0.04±0.14	-12.24±0.25	0.47	5.8e ⁻⁵	0.98	-0.12±0.12	-11.57±0.17	0.28	0.11	0.35
NGC5506	0	–	–	–	–	–	-0.72±0.15	-10.44±0.13	0.20	0.64	5.0e ⁻⁴
NGC5643	80	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
NGC7130	348	-0.91±0.1	-11.6±0.11	0.09	0.90	1.03e ⁻⁵	-1.29±0.79	-11.75±0.86	0.60	0.31	0.15
NGC7172	60	-1.9±0.8	-14.32±0.9	0.27	0.65	0.10	–	–	–	–	–
NGC7172	90	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
NGC7479	10	–	–	–	–	–	-0.16±0.3	-11.6±0.22	0.13	0.10	0.59
NGC7582	0	-0.38±0.06	-11.42±0.14	0.30	0.58	1.6e ⁻⁷	0.12±0.15	-12.71±0.24	0.26	0.15	0.43

Tabla 4.1: Valores del ajuste lineal para el flujo del PAH en 11.3μm y la línea de [SIV]. La primera y segunda columna muestran el nombre y ángulo de posición de la rendija usada en cada objeto, respectivamente. Las columnas 3-10 muestran los valores logarítmicos calculados para el ajuste lineal de ambas líneas como son: pendiente (m), ordenada en el origen (b), coeficiente de correlación de Pearson (R²) y el p-value para identificar si existe pendiente.

Object (1)	P.A. (2)	PAH _{11.3μm}					[SIV] _{10.5μm}				
		m (3)	b (4)	S _{yx} (5)	R ² (6)	p-value (7)	m (8)	b (9)	S _{yx} (10)	R ² (11)	p-value (12)
3C445	300	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
CIRCINUS	100	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
CentaurusA	0	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
ESO103-G35	30	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
IC4518W	5	-0.43±0.65	-1.23±0.92	0.31	0.10	0.54	-0.73±0.38	-1.09±0.36	0.11	0.55	0.14
IC5063	303	–	–	–	–	–	0.44±1.07	-3.62±1.07	0.71	0.03	0.69
NGC1365	15	0.25±0.21	-0.72±0.16	0.19	0.14	0.28	–	–	–	–	–
NGC1386	0	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
NGC1808	45	-0.43±0.33	-0.56±0.3	0.12	0.30	0.26	–	–	–	–	–
NGC3081	0	-0.56±0.93	-1.74±0.96	0.43	0.08	0.57	-0.22±0.36	-1.3±0.37	0.21	0.06	0.56
NGC3081	350	–	–	–	–	–	-0.61±0.33	-1.14±0.34	0.18	0.40	0.12
NGC3281	351	–	–	–	–	–	-0.76±1.62	-1.49±1.54	0.46	0.07	0.66
NGC4418	30	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
NGC4418	40	–	–	–	–	–	1.34±0.20	-1.46±0.17	0.09	0.93	6e ⁻³
NGC4945	45	0.17±0.05	-2.3±0.23	0.16	0.72	0.01	–	–	–	–	–
NGC5135	30	-8e ⁻³ ±0.14	-1.0±0.24	0.46	3e ⁻⁴	0.95	-0.34±0.18	-1.2±0.3	0.42	0.32	0.09
NGC5506	0	–	–	–	–	–	-0.65±0.4	-1.4±0.35	0.53	0.18	0.12
NGC5643	80	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
NGC7130	348	-1.0±0.19	-0.53±0.2	0.18	0.75	5.2e ⁻⁴	-1.77±1.1	-0.91±1.3	0.57	0.46	0.21
NGC7172	60	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
NGC7172	90	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
NGC7479	10	–	–	–	–	–	0.40±0.39	-1.83±0.32	0.18	0.25	0.38
NGC7582	0	-0.30±0.04	-0.85±0.09	0.19	0.67	2.64e ⁻⁹	0.13±0.17	-2.8±0.27	0.31	0.14	0.47

Tabla 4.2: Valores del ajuste para la ancho equivalente de PAH en 11.3 μ m y la línea de [SIV]. La primera y segunda columna muestran el nombre y ángulo de observación del objeto, respectivamente. Las columnas 3-10 muestran los valores logarítmicos calculados para el ajuste lineal de ambas líneas como son: pendiente (m), ordenada en el origen (b), coeficiente de correlación de Pearson (R²) y el p-value para la prueba-p.

4.3. Comportamiento de la línea de [SIV] frente al rasgo de PAH

En esta subsección presentamos un análisis detallado sobre la relación entre el PAH en $11.3\mu\text{m}$ y la línea de [SIV] para cuatro objetos de nuestra muestra. Sólo en estas cuatro fuentes logramos encontrar suficientes emisiones de [SIV] y PAHs en las mismas aperturas, por tanto, podemos hacer una comparación entre ambas líneas y observar si existe alguna relación entre ellas.

NGC 5135: Esta galaxia alberga un brote de SF circumnuclear que se extiende hasta ~ 3 kpc [e.g. González Delgado et al., 1998; Bedregal et al., 2009]. Al igual que en otros trabajos [e.g. Alonso-Herrero et al., 2006; Horst et al., 2008, 2009; Diaz-Santos et al., 2010], hemos encontrado un núcleo compacto en el infrarrojo medio parcialmente rodeado por emisión extendida (ver fig. 4.3, izquierda). Esta emisión extendida está especialmente concentrada en los ángulos de posición 90° - 180° , es decir, en ángulos respecto al núcleo que abarcan desde el este hasta el sur. Además esta emisión extendida se agrupa en nódulos dentro de un arco concéntrico en la fuente. Asmus et al. [2014] comentó que la estructura tenía forma de banana. El radio interno de esta emisión está localizado a $\sim 1''$ ($\sim 267\text{pc}$) del núcleo y el radio externo se encuentra $\sim 2.5''$ ($\sim 750\text{pc}$). La figura 4.3 muestra la fuente y la posición de la rendija que se usó para obtener las mediciones. Nuestra rendija pasa sobre la orilla inferior derecha de la emisión extendida, conectando el núcleo y después con el nódulo ubicado al SW del núcleo.

La fig. 4.3 (panel de la derecha) muestra el flujo a $11.3\mu\text{m}$ respecto el flujo de la línea de [SIV] para esta fuente. Cada punto corresponde a una apertura distinta donde el radio al que corresponde está escrito en escalas de pc junto al punto. El resultado para el núcleo está resaltado en color verde mientras que las aperturas obtenidas de T-ReCS se muestran en azul. Las aperturas más cercanas al núcleo (dentro de los primeros ~ 300 pc) muestran como el flujo de [SIV] aumenta en las primeras dos aperturas (~ 165 pc) para luego decaer. El PAH dentro de estos primeros ~ 300 pc se mantiene relativamente constante. Dentro de estos valores relativamente bajos, muestra un ligero aumento en la primera apertura (~ 140 pc) respecto al valor nuclear. Nótese que a estos radios la distribución morfológica de la fuente es bastante axisimétrica (fig. 4.3, izquierda). A partir de $\sim 1''$ (~ 267 pc) el PAH se incrementa al igual que el flujo de [SIV]

dando lugar a un pico entre $\sim 1.4'' - 1.8''$ ($\sim 400 - 520$ pc) para ambas emisiones. Después de $\sim 1.8''$ (~ 650 pc) los valores de PAH y [SIV] decaen, primero [SIV] y después el PAH. La fig. 4.3 (derecha) muestra cómo este repunte de emisión a $\sim 1.4'' - 1.8''$ ($\sim 400 - 520$ pc) coincide con un nódulo de emisión. Los valores de las últimas aperturas ($\sim 650 - 780$ pc) que muestran altos valores de PAH pero relativamente bajos de [SIV] coinciden con el nódulo más brillante que encaja con el ángulo de posición de la rendija.

En conclusión, parece que el [SIV] pudiera tener una contribución de fotoionización nuclear en los primeros ~ 300 pc centrales, con altos valores de [SIV] y bajos de PAH. Sin embargo, el [SIV] a radios mayores parece volver a producirse a la vez que el PAH y coincidiendo con un nódulo débil que se encuentra en la región de radios $\sim 400 - 520$ pc. En esta región el [SIV] está claramente asociado con la región de SF trazada por el PAH. Finalmente el nódulo más externo alineado con la rendija y situado a ~ 700 pc tiene asociado también altos valores de PAHs pero relativamente bajos de [SIV]. Por tanto, parece que la región de SF más externa no tiene asociada emisión de [SIV].

NGC 5643: Es una galaxia espiral barrada con un núcleo tipo Sy2 en su centro. En el óptico, además de la fuente puntual asociada al núcleo, la morfología se extiende en una barra con un P.A. $\sim 50^\circ$ que parece estar incrustada dentro de la emisión de los brazos espirales. En el infrarrojo medio Hönig & Kishimoto [2010] detecta SF prominente entre $0.3'' - 3''$. Nosotros encontramos un núcleo compacto rodeado por emisión extendida axisimétrica en los primeros ~ 100 pc. Por encima de este radio la fuente se extiende predominantemente en dirección norte y sur hasta al menos ~ 300 pc⁴ y dentro de los ~ 200 pc en dirección oeste (ver fig. 4.4, izquierda). En la fig 4.4 (panel de la izquierda) se muestra la fuente y la posición de la rendija que se utilizó para obtener las mediciones. Nótese que la rendija pasa por la parte superior izquierda, conecta con el núcleo y con la región de emisión extendida del lado este.

La fig. 4.4 (panel de la derecha) muestra el flujo a $11.3\mu\text{m}$ respecto el flujo de la línea de [SIV] para este objeto. Cada punto corresponde a una apertura distinta donde el radio en escalas de pc esta indicado junto a cada punto. La descripción de la figura es similar a la de NGC 5135. El núcleo muestra un flujo alto para la línea de [SIV] y un flujo relativamente bajo para el PAH en $11.3\mu\text{m}$. Del núcleo a la primer apertura localizada a ~ 91 pc se presenta un decaimiento

⁴Nótese que la imagen de T-ReCS posee mucha estructura en el fondo que nos impide comentar su morfología más allá de los ~ 300 pc.

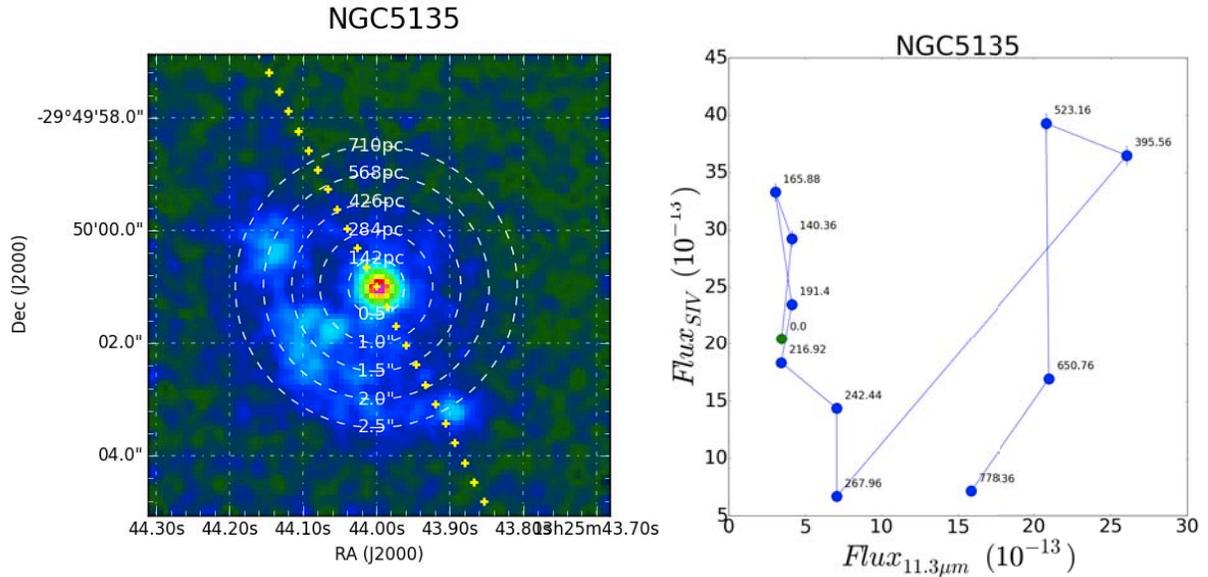


Figura 4.3: Izquierda: Imagen de NGC 5135 en la banda N. En el eje horizontal representa las coordenadas en ascensión recta y el eje vertical muestra las coordenadas en declinación. La emisión del núcleo es mostrada en rojo y los lugares donde la emisión es nula se representan en negro. Alrededor del núcleo se muestran circunferencias con líneas punteadas en blanco que marcan las distancias al núcleo en arco segundos y en escala de pc. La posición de la rendija sobre la fuente es representada con un línea de cruces en amarillo. Derecha: Comparación entre el flujo del PAH en $11.3\mu\text{m}$ y la línea de [SIV] para NGC 5135. El valor nuclear es identificado en color verde y las aperturas hechas con T-ReCS se muestran en color azul. Cada punto es etiquetado con respecto a la distancia donde fue calculado.

en el [SIV] y un incremento en el PAH. Ésto indica de nuevo el comportamiento esperado para fotoionización en el caso del [SIV]. Además también indica destrucción de PAHs en el núcleo. Sin embargo, ~ 10 pc después el PAH decrece ligeramente y el [SIV] se incrementa y poca distancia después los flujos de ambas líneas decrecen. Este comportamiento de subidas y bajadas del [SIV] ya no se puede explicar como fotoionización nuclear por lo que a distancias mayores que ~ 100 pc debe haber fuentes externas de producción de la línea de [SIV]. Esta distancia coincide con la ruptura de la simetría esférica donde la morfología en banda N, se puede ver en la Fig.4.4 (izquierda). Finalmente entre una distancia de ~ 106 pc – 142 pc se presenta un ligero incremento en el PAH aunque el [SIV] siga disminuyendo hasta llegar casi a ser inexistente. La figura 4.4 (izquierda) muestra cómo la rendija pasa cerca de dos nódulos con ligeras emisiones del lado derecho y esto coincide con las distancias a las que se dan las oscilaciones descritas ($\sim 1'' - 1.7''$ ($\sim 90 - 142$ pc)). No vemos una asociación clara entre el comportamiento de PAHs y el [SIV] por lo que tampoco podemos asociar al [SIV] el mismo origen que la región

de producción del PAH.

Para este objeto podemos concluir, que el [SIV] nuclear es consistente con provenir de contribución de fotoionización del AGN. Sin embargo, a un radio de $\sim 100\text{pc}$ (donde se rompe la simetría esférica morfológica) el [SIV] vuelve a aparecer poco después de registrarse un incremento para el flujo del PAH. Este comportamiento coincide con región donde aparecen nódulos débiles en la imagen (ver fig.4.4 derecha), aunque el comportamiento de [SIV] no está correlacionado con el del PAH.

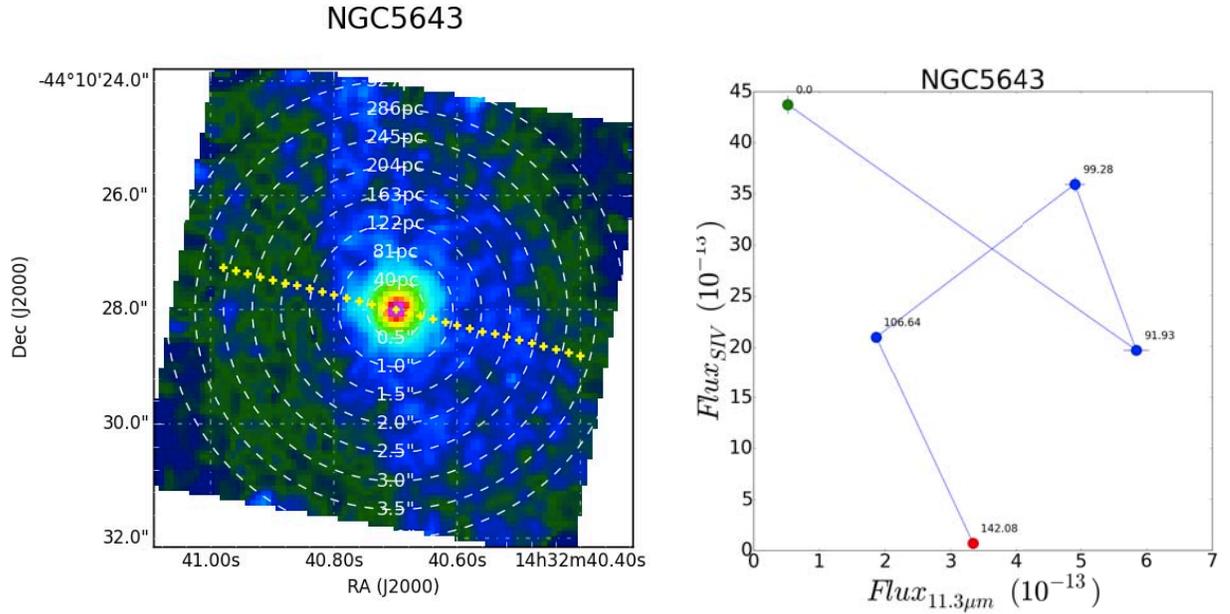


Figura 4.4: La descripción de esta es similar a la fig.4.3, pero para el caso de NGC 5643.

NGC 7130: Esta galaxia se considera un objeto que alberga tanto un AGN como un brote compacto de SF muy próximo al núcleo [véase Thuan, 1984; González Delgado et al., 1998; Levenson et al., 2005]. El núcleo parece marginalmente resuelto en el MIR por lo que se considera extendido [ver también Diaz-Santos et al., 2010]. Además existe una región extendida que lo rodea a partir de $\sim 0.5''$ ($\sim 167\text{ pc}$). En esta región se localiza el brote de SF circumnuclear en forma de anillo hasta $\sim 1''$ ($\sim 300\text{ pc}$). La fig.4.5 muestra la emisión en banda N de NGC 7130 y la posición de la rendija usada para obtener las mediciones. Nuestra rendija conecta prácticamente en dirección N-S pasando por el núcleo y este anillo de SF. Nótese que

otros autores [e.g. Alonso-Herrero et al., 2006] han encontrado emisión extendida hasta radios muy superiores a los mostrados en la imagen de banda N presentada aquí. De hecho nuestras medidas del espectro muestran emisión prácticamente al doble de distancia respecto al núcleo mostrado en nuestra imagen. Creemos que esto es debido a la baja sensibilidad de la imagen, puesto que se trata de una imagen de adquisición corta tomada antes de la toma del espectro. Al igual que para los dos objetos anteriores la fig. 4.5 muestra una comparación entre el flujo del PAH a $11.3\mu\text{m}$ y el flujo de la línea de [SIV] para este objeto donde cada punto corresponde a una apertura distinta donde el radio correspondiente es mostrado en pc. El núcleo, las aperturas y el punto de *Spitzer* se dibujan con círculos verde, azules y rojo, respectivamente. El flujo de [SIV] nuclear es el más alto de todas las aperturas realizadas. Esto es lo esperado si [SIV] proviene de fotoionización nuclear. Conforme la distancia al núcleo crece hasta ~ 200 pc el flujo de [SIV] decae (también lo esperado en fotoionización). Sin embargo, aunque el flujo de PAH es relativamente alto para el núcleo, observamos un ligero incremento hacia la primera de las aperturas (~ 200 pc). Esto es lo esperado si los PAHs sufren una ligera destrucción hacia las zonas más cercanas al núcleo. Sin embargo, a esta distancia se encuentra el anillo de SF así que es posible que el incremento de flujo se deba a esta región y no a la destrucción de PAHs. En general a partir de los ~ 280 pc el flujo de los PAHs parece ligado al flujo del [SIV] (casi todos los puntos se encuentran en la diagonal de la fig. 4.5 (izquierda)). La excepción es un punto que se encuentra a unos ~ 350 pc que presenta mayor flujo de PAHs que de [SIV] (además de la medida a ~ 200 pc ya mencionada arriba). Esta correlación entre las dos cantidades puede indicar que el mecanismo de producción del [SIV] está ligado a la creación de los PAHs. Nótese que a una distancia de ~ 316 pc se presenta un incremento en el PAH y [SIV] que coincide con el anillo extendido fuera del núcleo (fig. 4.5, derecha).

Podemos concluir diciendo que el exceso de [SIV] nuclear puede provenir principalmente del AGN y el exceso de PAH en la apertura nuclear se justifica con la existencia del brote estelar o por destrucción de PAHs hacia el núcleo (aunque lo consideramos menos probable). Pero el segundo (a ~ 316 pc) y el tercero (a ~ 630 pc) exceso de [SIV] parece producirse al mismo tiempo que comienzan a crecer los PAHs y coinciden con los nódulos existente a esas regiones. Por tanto, el [SIV] esta relacionado con la SF a escalas mayores que unos cientos de pc.

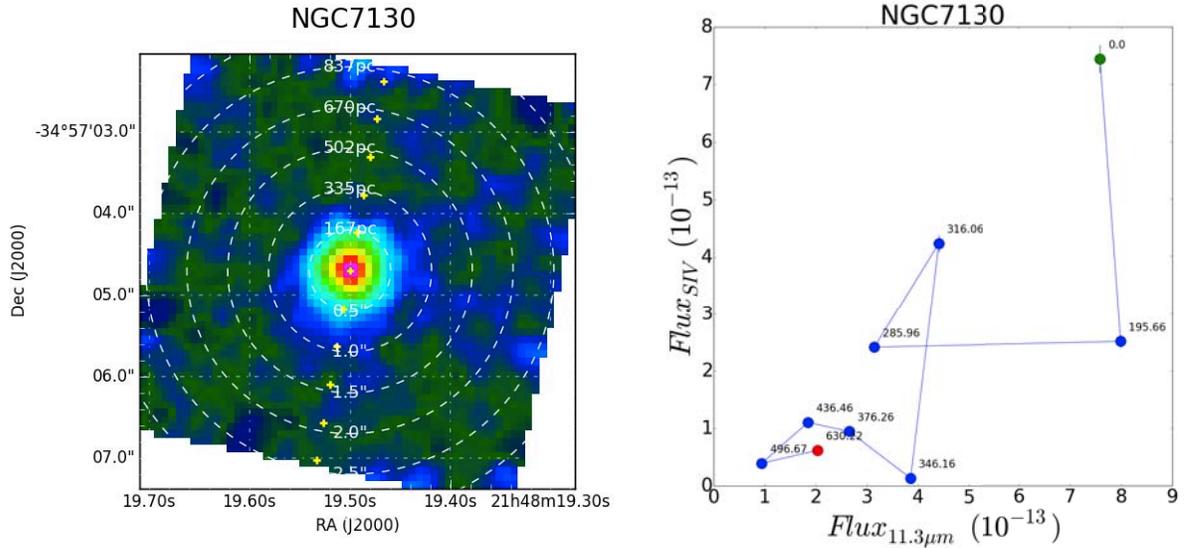


Figura 4.5: La descripción de esta es similar a la fig.4.3, pero para el caso de NGC 7130.

NGC 7582: Es una galaxia espiral barrada con un AGN oscurecido y un poderoso disco de SF (diámetro del eje mayor $\sim 4'' \sim 0.4$ kpc) y una estructura de polvo que cruza el núcleo [Morris et al., 1985; Riffel et al., 2009]. El espectro nuclear óptico muestra una superposición de una Sy2 y un brote de SF [Veron et al., 1997]. El núcleo aparece como una fuente débil compacta incrustada dentro de una emisión relacionada con el brote de SF en longitudes de onda de radio con resolución de arco segundos. En la fig. 4.6 se muestra la emisión en la banda N de NGC 7582 y la posición de la rendija usada para obtener los espectros. La rendija va en dirección N-S pasando por el núcleo y principalmente por un nodo inferior donde se muestran dos cavidades. Nótese que en nuestra imagen la emisión fuera del núcleo no es clara y pensamos que se debe a la baja sensibilidad de la imagen, pues la imagen es de corto tiempo de exposición. Una comparación entre el flujo del PAH a $11.3\mu m$ y el flujo de la línea de [SIV] para este objeto se muestra en la fig. 4.6 (derecha), cada punto muestra la distancia correspondiente a la que fue calculada en escala de pc. Nótese además que para distancias mayores a ~ 181 pc las barras de error son muy grandes. La descripción de esta figura es similar a la anterior.

La apertura nuclear casi no muestra emisión de PAH pero sí un alto flujo de [SIV]. Esto se espera si el [SIV] proviene de fotoionización nuclear. Entre el núcleo y la primera apertura el valor del PAH se incrementa al igual que el flujo de [SIV]. Si la emisión a $10.5\mu m$ sólo proviniera

de fotoionización nuclear se esperaría que ésta disminuyera. Sin embargo, esto no pasa y éste se comporta igual que el PAH en $11.3\mu\text{m}$, lo cual nos hace pensar que ambas líneas tienen un origen similar, que es el brote de SF. Este aumento en ambas líneas coincide con la emisión central mostrada en la fig.4.6 (izquierda). Entre ~ 73 pc y ~ 83 pc el flujo de [SIV] decae al igual que el PAH. Esto se espera si los PAHs sufren una ligera destrucción, lo cual debería incrementar el [SIV] si proviniera del núcleo, pero no sucede. A ~ 10 pc el PAH decae con mayor fuerza, pero el [SIV] se mantiene semi-constante. Entre ~ 93.02 pc y ~ 181 pc se muestra un incremento en el flujo de ambas líneas, lo cual encaja con las cavidades al sur de la imagen. A partir de ~ 181 pc los PAHs decaen y el [SIV] se incrementa después de un ligero decaimiento antes de ~ 220 pc. Esto implica que el origen de ambas líneas no es el mismo (véase figura 4.6). Concluimos que para esta fuente el [SIV] en la apertura nuclear proviene principalmente del AGN. El exceso en la primer apertura y el decaimiento hasta la tercer apertura del flujo de [SIV] tiene un comportamiento similar al PAH en $11.3\mu\text{m}$. Para el resto de las aperturas las barras de error para [SIV] son muy grandes, por tanto no nos es claro el comportamiento de una línea respecto a la otra.

De los cuatro objetos que analizamos, encontramos que para las dos fuentes (NGC 7130 y NGC 7582) donde se ha encontrado un AGN y SF en el núcleo, el flujo del PAH en $11.3\mu\text{m}$ es similar al flujo de [SIV]. Mientras que en las otras dos fuentes, que sólo muestran AGN en el centro, el flujo de [SIV] es mucho mayor que el del PAH. También observamos que el máximo valor registrado de flujo de [SIV] en dos fuentes (NGC 5643 y NGC 7130) se presenta en el núcleo. Sólo en el caso de NGC 7130 el máximo valor de flujo PAH también está presente en el núcleo. Por el contrario, el mínimo valor de flujo en PAH para las tres fuentes (NGC 5135, NGC 5643, NGC 7582) restantes se encuentra en el núcleo o muy cerca de él.

Considerando que existen brotes de SF a diferentes distancias del núcleo en las cuatro fuentes, hicimos un análisis del comportamiento entre el PAH y el [SIV] en estos nodos y encontramos diferentes comportamientos. En general, observamos que los flujos de ambas líneas se incrementaban cuando coinciden con alguno de los brotes de SF en tres objetos (NGC 5135, NGC 7130 y NGC 7582). Sin embargo, también se observó un decremento en el [SIV] a pesar del incremento del flujo de PAH en $11.3\mu\text{m}$ cerca de los brotes de SF para tres objetos (NGC 5135, NGC 5643 y NGC 7130). Debemos mencionar que el último comportamiento se dio en brotes

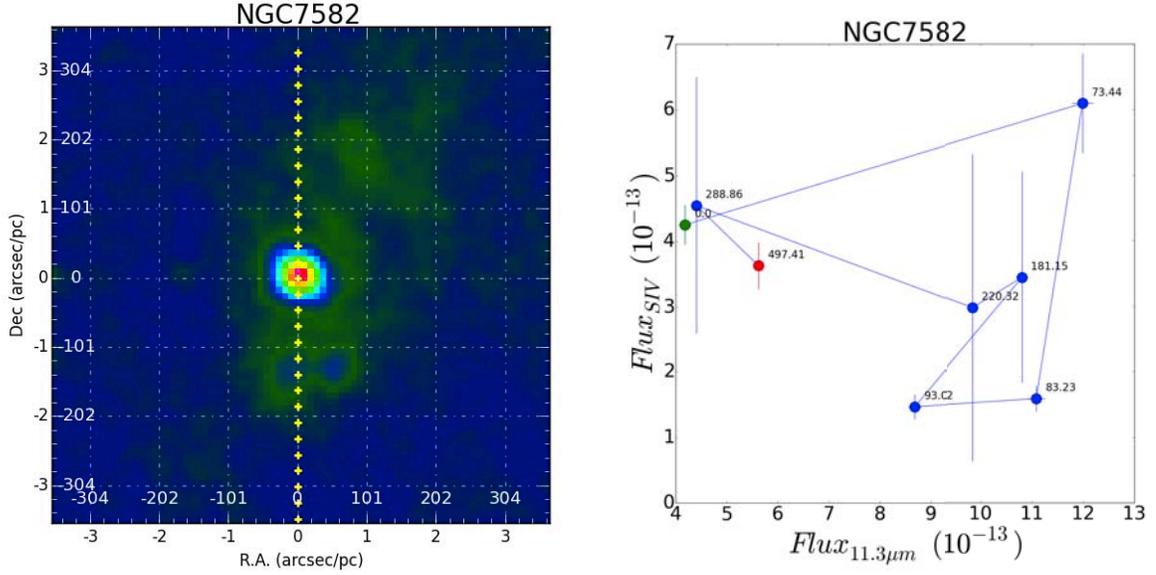


Figura 4.6: Izquierda: Imagen de NGC 7582 en la banda N. En el eje horizontal representa las coordenadas en ascensión recta y el eje vertical muestra las coordenadas en declinación. La emisión del núcleo es mostrada en rojo y los lugares donde la emisión es nula se representan en negro. Alrededor del núcleo se muestran circunferencias con líneas punteadas en blanco que marcan las distancias al núcleo en arco-segundos y en escala de pc. La posición de la rendija sobre la fuente es representada con un línea de cruces en amarillo. Derecha: Comparación entre el flujo del PAH en $11.3 \mu m$ y la línea de [SIV] para NGC 7582. El valor nuclear es identificado en color verde y las aperturas hechas con T-ReCS se muestran en color azul. Cada punto es etiquetado con respecto a la distancia donde fue calculado.

de SF muy fuertes (como en el caso de NGC 5135) y más alejados del centro.

Obsérvese que en las aperturas más externas de las cuatro fuentes el flujo del PAH es mayor al del [SIV], incluso en dos casos (NGC 5135 y NGC 5643) los valores de flujo en [SIV] son mínimos. Por otra parte nótese que el máximo valor de flujo de PAH está relacionado con brotes de SF en todos los casos.

Capítulo 5

Discusión

5.1. Comportamiento del PAH en el entorno de AGNs

En los 70, instrumentos terrestres descubrieron que el espectro en MIR de objetos galácticos y extragalácticos estaba dominado por rasgos en emisión a 3.3, 6.2, 7.7, 8.6, y 11.3 μm [e.g. Gillett et al., 1972; Geballe et al., 1985]. Estas líneas se atribuyen a la fluorescencia de los PAHs. En ambientes extragalácticos se han encontrado hasta grandes distancias en galaxias normales, galaxias con estallidos de SF (conocidas como galaxias starbursts), galaxias ultraluminosas (ULIRGs) y AGNs. Los PAHs son moléculas aromáticas típicamente de unos pocos Å de diámetro y que albergan hasta unos cientos de átomos de carbono. Las moléculas de PAH absorben eficientemente fotones en el óptico y ultravioleta [Weingartner & Draine, 2001] y además su emisión puede ser prominente comparada con el continuo de los granos de polvo. En galaxias con SF intensa, pueden llegar a suponer el 20% de la luminosidad en el MIR. Es por ello que son vitales en el modelado espectral del MIR.

Como ya decíamos, los PAHs son prominentes en galaxias con brotes de SF, mostrando una buena correlación entre la fuerza de los PAHs y la luminosidad infrarroja del estallido de SF [Brandl et al., 2006]. Esta correlación, sin embargo, aparece muy débil o ausente en AGNs [Weedman et al., 2005; Siebenmorgen et al., 2004]. Se ha discutido mucho en la literatura que los AGNs podrían modificar la distribución de granos de polvo emisores y ser la fuente de excitación directa de PAHs inusuales [Genzel et al., 1998; Laurent et al., 2000; Smith et al., 2007]. Esto tiene una primera gran implicación; aunque estos PAHs se han usado como trazadores de la tasa de SF, puede que no deban usarse en el caso de sistemas que contengan un AGN porque pueden

ser destruídos por el mismo. Por el contrario, otros estudios han encontrado que estos PAHs realmente sí sobreviven, quizás porque estén protegidos de la radiación del AGN [e.g. Goulding et al., 2012]. De hecho, Diamond-Stanic & Rieke [2012] encontraron una relación entre la tasa de acrecimiento del AGN y la SF derivada de los PAHs. Ellos lo interpretan como una conexión entre la alimentación del SMBH y la SF en la galaxia. Por nuestra parte encontramos que los excesos de PAH en $11.3\mu\text{m}$ observados en espectros circumnucleares estaban relacionados en la mayoría de los casos con regiones de SF, incluso en las dos fuentes donde el núcleo era compuesto (AGN + brote de SF) se observa un exceso de flujo para este rasgo en el núcleo.

Según el análisis de González-Martín et al. [2013], los espectros nucleares presentan el rasgo de PAHs a $11.3\mu\text{m}$ de manera prominente sólo en dos objetos (NGC 1808 y NGC 7130) y reportan ciertos indicios de su presencia en otros cuatro objetos (NGC 1386, NGC 5643, NGC 7172 y NGC 7582). El re-análisis hecho aquí muestra la existencia de PAHs en siete objetos. Debe considerarse que nuestro análisis ha sido cuantitativo (midiendo cada una de las líneas de PAHs en la muestra), mientras que el estudio de PAHs realizado por González-Martín et al. [2013] es cualitativo. Debido a la diferencia entre los análisis de ambos trabajos, existen ciertas discrepancias entre la existencia o no de la emisión en los espectros de algunos objetos. En concreto nosotros no encontramos PAH en NGC 1386 y NGC 7172 mientras que sí detectamos el PAH en los núcleos de NGC 3081, NGC 4945, y NGC 5135. Note además que el caso de NGC 3081 es dudoso, porque el espectro tiene muchas ondulaciones que pueden coincidir con la longitud de onda a la que se encuentra el PAH. Entonces al menos 13 de las 20 fuentes están carentes de PAHs nucleares, es decir, un $\sim 65\%$ de la muestra. En la muestra de 19 espectros en el MIR de AGNs observados desde tierra con VISIR [VLT, Hönig & Kishimoto, 2010], también se reportó la carencia de rasgos de PAH en sus espectros de alta resolución espacial, detectando sólo algunas evidencias de PAHs en cinco objetos. Además de los siete objetos con emisión nuclear, el análisis de la emisión extendida indica que hay un déficit de emisión hacia las partes internas en todos los casos. Tacconi-Garman et al. [2005] estudiaron el PAH a $3.3\mu\text{m}$ para el caso de NGC 1808, encontrando PAHs coincidentes con el núcleo lo cual podría estar en desacuerdo con el resultado obtenido. Todas las fuentes de nuestra muestra presentan un decremento o carencia en el flujo del PAH en $11.3\mu\text{m}$ hacia las partes cercanas al núcleo.

Recientemente Alonso-Herrero et al. [2014] analizó media docena de AGNs locales en el MIR, sugiriendo que el decremento aparente en el EW de la línea era simplemente un efecto de

la dilución de la línea por el fuerte continuo del AGN en el núcleo. En su caso, este decremento se recupera cuando se estudia el flujo de la línea. En nuestra muestra este comportamiento no se manifiesta, puesto que encontramos decrementos hacia las partes nucleares tanto en el EW como en el flujo medido del PAH. En cualquier caso, es de mencionar que ninguno de los objetos analizados por Alonso-Herrero et al. [2014] está incluido en nuestra muestra.

Hay varias posibles explicaciones acerca del decremento del flujo de PAHs hacia el núcleo. La primera de éstas es que los PAHs se ven atenuados por la absorción de silicatos donde están inmersos. Sin embargo, ya mencionaba González-Martín et al. [2013] que la absorción de silicatos en el núcleo es menor que en las partes externas y cuantitativamente no es capaz de producir la atenuación necesaria para no ver el rasgo en emisión. Alternativamente, este decremento e incluso carencia de PAHs en las proximidades del AGN pueden ser debido a la destrucción de PAHs por el fuerte campo de radiación del núcleo [Siebenmorgen et al., 2004]. En este caso esperamos que estos PAHs puedan sobrevivir sólo en AGNs de más baja luminosidad. No encontramos ninguna tendencia en este sentido aunque es cierto que el rango de luminosidades de la muestra no incluye AGNs de muy baja luminosidad (i.e. $L_X(2 - 10 \text{ keV}) < 10^{42} \text{ erg/s}$). Alternativamente, la carencia de PAHs puede implicar simplemente la carencia de SF a escalas muy próximas al AGN. De hecho, teóricamente el crecimiento del SMBH (y por tanto la actividad nuclear) puede continuar incluso cuando ya no hay material suficiente para la SF [e.g. Hopkins, 2012]. No es fácil distinguir entre estas dos posibilidades con los datos disponibles. Quizás un estudio con alta resolución espacial que resuelva las posibles regiones de SF en escalas de pocas decenas de pc (para estas fuentes donde se encuentra un decremento de los PAHs) podría ayudar a discernir el motivo de este decremento de PAHs nuclear, que definitivamente hemos constatado en nuestra muestra.

5.2. Origen de la línea de [SIV] a $10.5\mu\text{m}$

El origen de la línea de [SIV] a $10.5\mu\text{m}$ es un punto muy controvertido, actualmente. Algunos autores [e.g. Dasyra et al., 2011] proponen que ésta se origina en la NLR, mientras que otros [e.g. Pereira-Santaella et al., 2010; Diaz-Santos et al., 2010] sugieren que ésta puede ser producida en regiones de SF. Es importante conocer su origen puesto que, en el caso de ser producida por fotoionización del AGN, puede considerarse como un buen trazador isotrópico de la potencia

del AGN, como lo son otras líneas, por ejemplo el [O III] a 5007 \AA en el óptico. La ventaja de tener un trazador de la potencia del AGN en el MIR es que podríamos trazar varios aspectos claves de la naturaleza AGN usando una misma observación con muy buen poder de aislamiento debido a su alta resolución espacial: SF (usando PAHs, ver sección anterior), oscurecimiento (usando la absorción por Silicatos¹), y fotoionización nuclear (usando el [SIV] a $10.5 \mu\text{m}$).

En el 80 % de los objetos de nuestra muestra se detectó emisión de [SIV] a $10.5 \mu\text{m}$ en el espectro nuclear. Uno podría pensar que se trata de fotoionización por el AGN en aquellos casos en los que no haya indicios de SF. Ésto también fue argumentado por Pereira-Santaella et al. [2010]. Además las galaxias tipo LIRGs tienen más emisión de [SIV] nuclear, sin detectarse regiones de SF [Pereira-Santaella et al., 2010]. Ésto encaja con la idea de que estas fuentes realmente contengan un AGN en alguna fase de merger [e.g. Hernández-Ibarra et al., 2015; Mendoza-Castrejón et al., 2015; Villarroel & Korn, 2014]. Nosotros encontramos nueve casos donde sólo se detecta [SIV] nuclear y no PAHs (Centaurus A, ESO 103-G35, IC 4518W, IC 5063, NGC 1386, NGC 3281, NGC 4418, NGC 5506 y NGC 7479), indicando que en éstos es posible que el mecanismo de producción de la línea de [SIV] a $10.5 \mu\text{m}$ pueda ser fotoionización por el AGN al menos en el núcleo. Sin embargo, para 4 de los 20 objetos (20%) de nuestra muestra el núcleo es compuesto, es decir, coexisten el AGN y un brote de SF. Un ejemplo claro de esta situación es NGC 7582, donde sabemos que un anillo de formación estelar persiste a escalas muy internas [Díaz-Santos et al., 2010]. Díaz-Santos et al. [2010] encontró que al menos la mitad de la emisión de [SIV] surge del centro ($\sim 150 \text{ pc}$) en aquellos LIRGs que contienen un AGN. Sin embargo, para los objetos de nuestra muestra clasificados como LIRGs sólo en el caso de NGC 7130 coincidimos con este argumento.

Por otra parte, nosotros encontramos no sólo emisión de [SIV] en el núcleo sino también a diversas distancias radiales (hasta $\sim 90.46 \text{ pc}$ y $\sim 549 \text{ pc}$) y en algunos casos ésta coincide con regiones de SF reciente, al contrario de lo encontrado por Díaz-Santos et al. [2010] quien menciona que la emisión usualmente provenía de regiones nucleares ($< 100 \text{ pc}$). En todas las fuentes de la muestra, donde se detectó [SIV] nuclear, éste también fue encontrado en otras aperturas. Para 11 objetos el perfil radial decae pero presenta fluctuaciones, mientras que en seis casos el flujo sólo muestra fluctuaciones. Todo ésto indica la naturaleza no AGN de esta

¹Este rasgo no ha sido estudiado en este trabajo pero fue ampliamente discutido en González-Martín et al. [2013] para estos mismos datos.

línea, mostrando que se genera in situ en regiones alejadas del núcleo. Encontramos en nuestra muestra siete objetos (IC 4518W, NGC 3081, NGC 5135, NGC 5643, NGC 7130, NGC 7172 y NGC 7582) para los cuales la emisión de [SIV] a $10.5\mu\text{m}$ y la emisión de PAH a $11.3\mu\text{m}$ en las partes circumnucleares está presente. Suponiendo que el PAH sea un trazador de SF, esto podría de nuevo implicar que la línea de [SIV] a $10.5\mu\text{m}$ está relacionada con regiones de SF. De este modo es indudable que en algunos casos el [SIV] extendido se relacione con SF y no con la actividad nuclear. Es más, para los cuatro objetos donde pudimos hacer una comparación exhaustiva de los flujos de PAH y [SIV] (ver sección 4.3) encontramos en ciertas zonas una relación clara entre aumentos y decrementos del flujo de PAH con el mismo comportamiento para el [SIV] en regiones de unos cientos de pc del núcleo. Ésto es consistente con el trabajo de Pereira-Santaella et al. [2010] donde encontraron al menos tres objetos donde la emisión de [SIV] a $10.5\mu\text{m}$ es extendida y se puede atribuir a regiones HII.

Comparando el comportamiento extendido con el flujo nuclear, detectamos una disminución del flujo de [SIV] a $10.5\mu\text{m}$ hacia la componente nuclear en cuatro (IC 4518W, NGC 3081, NGC 4418 y NGC 5135) de los 17 objetos con emisión extendida.

Si el [SIV] a $10.5\mu\text{m}$ surge de regiones incrustadas en el polvo de silicato, esta línea se puede ver afectada por extinción ya que se encuentra dentro de la traza de absorción de $9.7\mu\text{m}$. En concreto sabemos que en las partes más internas puede deberse al propio toro de polvo del AGN que oscurece la emisión nuclear.

De este modo, podemos concluir que la emisión de [SIV] nuclear en muchos objetos de nuestra muestra parece producida por fotoionización nuclear. Sin embargo, el hecho de que se produzca in situ [SIV] a escalas de cientos de pc del núcleo (a veces ligado con producción de PAHs), hace dudar de que sea un buen trazador isotrópico de la emisión del AGN puesto que puede haber contribuciones de regiones de SF.

Capítulo 6

Conclusiones y trabajo futuro

A lo largo de este trabajo se analizó una muestra de 20 fuentes tipo AGN, por medio de espectros en el MIR. Nuestro análisis se centró en la emisión extendida, y hasta la fecha es el estudio de emisión circumnuclear con espectros en el MIR más extenso. Nuestra muestra procede de la publicada por González-Martín et al. [2013], que contiene todos los datos disponibles de AGNs en el archivo público del Gemini hasta junio del 2012 observados con el instrumento T-ReCS. Dicha publicación se centró únicamente en el análisis de la región nuclear mientras que nuestro trabajo explota la información extendida de estos espectros. Para poder trazar las partes más externas de cada galaxia incluimos los espectros del satélite *Spitzer*. Para utilizar conjuntamente los espectros de ambos instrumentos propusimos una re-calibración por medio de un escalado del flujo de los datos de *Spitzer* de acuerdo al flujo de IRAS, asumiendo que la calibración del flujo de IRAS puede ser más precisa que la de *Spitzer*. Esto solucionó el problema de calibración cruzada entre ambos instrumentos para la mayoría de las fuentes.

Encontramos que el 65 % de nuestra muestra carece del rasgo de PAH a $11.3\mu\text{m}$ en el núcleo, y que los 14 objetos (70 % de la muestra) donde se estudio la emisión extendida presentan un decremento o carencia en el flujo del PAH hacia las partes internas. Nosotros concluimos que este decremento se debe posiblemente a dos causas: (1) la destrucción de PAHs o (2) la ausencia de formación estelar para las fuentes donde no hubo detección nuclear en $11.3\mu\text{m}$. Encontramos siete casos (NGC 1808, NGC 3081, NGC 4945, NGC 5135, NGC 5643, NGC 7130 y NGC 7582) donde la emisión de PAHs en el núcleo está presente. En trabajos previos sobre estos objetos se localizaron regiones de formación estelar (SF) en el núcleo o muy cercana a éste. En las siete

fuentes que acabamos de mencionar aunque existe emisión nuclear ésta es menor a la esperada. Sin embargo, no es claro si la causa sea la destrucción de PAHs como lo propone Siebenmorgen et al. [2004]. Esto nos lleva a pensar que la densidad de moléculas productoras de los PAHs es alta y/o están protegidas de la radiación del AGN, en estos casos. Para el resto de la fuentes el flujo nuclear esta ausente y no existen registros de SF circumnuclear cercana al núcleo para éstas. Lo cual justifica la ausencia de PAHs cuando no existe SF.

También concluimos que el decremento aparente en el EW del rasgo de PAH en $11.3\mu\text{m}$ no es un efecto de la dilución de la línea por el continuo del AGN, como se propone para otros objetos por Alonso-Herrero et al. [2014]. En cuanto a los excesos de emisión en PAHs a $11.3\mu\text{m}$ encontrados a diferentes distancias circumnucleares, concluimos que están ligados con regiones de SF para todas las fuentes.

Para la línea de [SIV] encontramos que el 80 % de los objetos presentó emisión nuclear y en el 65 % de los casos la mayoría del flujo se da en el núcleo o en las tres aperturas más próximas a éste. No obstante, existen fuentes que presentan la emisión de [SIV] en aperturas alejadas del núcleo, lo cual se muestra que dicha emisión no es completamente resultado de fotoionización nuclear. De estos resultados, si bien parece que parte de la contribución a la emisión de [SIV] proviene del núcleo en las partes más centrales, no consideramos que su naturaleza se pueda atribuir completamente al AGN. Por tanto, no consideramos la línea de [SIV] como un buen trazador isotrópico de la emisión del AGN, puesto que las fluctuaciones en algunos de los objetos coinciden con regiones de SF como lo proponen Pereira-Santaella et al. [2010]; Diaz-Santos et al. [2010].

Finalmente, concluimos que a pesar de haber encontrado coincidencias entre el incremento de ambas líneas en el caso de NGC5643 y en algunas aperturas de los otros tres objetos analizados, no tenemos pruebas suficientes para decir que existe un mecanismo en común entre el rasgo de PAH a $11.3\mu\text{m}$ y la línea de [SIV] a $10.5\mu\text{m}$.

Como trabajo futuro, proponemos hacer una comparación entre la tasa de acreción y/o la luminosidad de las fuentes en rayos X (como trazador de la potencia del AGN) y los flujos de los rasgos de PAH encontradas en este trabajo. Esto permitiría entender con mejor detalle la co-evolución entre SF y AGN a partir del comportamiento del rasgo de PAH en $11.3\mu\text{m}$. También proponemos extender nuestra muestra con los datos de el grupo Piratas (al que O. González

Martín pertenece). Esto permitiría incrementar nuestra muestra con 40 objetos más para hacer el mismo análisis de emisión extendida hecho en este trabajo, lo cual podría ayudarnos a clarificar nuestras conclusiones respecto al origen de [SIV] y el comportamiento del rasgo de PAH en $11.3\mu\text{m}$ cerca de un AGN.

Apéndices

Apéndice A

Descripción de objetos

A continuación se muestra una breve descripción del tipo morfológico, características de cada galaxia y de los trabajos donde se ha encontrado formación estelar reciente. Cada descripción esta acompañada de los espectros y gráficas de flujos vs distancia para todas las fuentes estudiadas en este trabajo.

Como se podrá observar, la gráfica superior muestra el espectro para la parte nuclear (línea verde), los espectros a varias distancias del núcleo (líneas en negro) y el espectro de *Spitzer* (línea en rojo). En este mismo gráfico se indica la posición del PAH en $11.3\mu\text{m}$ y la línea de [SIV] con líneas punteadas en color azul turquesa y azul, respectivamente. En algunas fuentes los espectros presentan errores y no se tomaron en cuenta para las mediciones, ésto se ha identificado con una zona sombreada. El ajuste lineal para las fuentes donde este fue posible se representa con una línea sólida en morado.

Las gráficas intermedia e inferior corresponden al flujo vs distancia para el caso del PAH en $11.3\mu\text{m}$ y la línea de [SIV], respectivamente. Para los casos donde la medición se ha identificado como un límite, ésta aparece como un triángulo. La medición realizada en el espectro nuclear muestra en color verde, la medición para los espectros a diferentes distancias del núcleo se muestr en azul y la medición realizada en el espectro tomado con *Spitzer* está en rojo. Recordemos que a cada medición se le resta la contribución de las anteriores, por tanto no en todos los casos el número de espectros de apertura sera el mismo que las mediciones.

Los errores tanto en distancia como en flujo, también han sido graficados. Nótese que en la mayoría son pequeños y no se alcanzan a observar, pues caen dentro del punto que representa el

valor obtenido. Los ángulos de inclinación mencionados en algunas fuentes se refieren al ángulo entre la línea de visión y el eje polar.

3C 445 Es una fuente de radio tipo FR II identificada como una galaxia elíptica que contiene un núcleo tipo Sy1.5 [Véron-Cetty & Véron, 2010]. No se ha encontrado evidencia de formación estelar reciente en trabajos previos (e.g. Dicken et al. [2012]). Nosotros no hemos encontrado emisión en el PAH a $11.3\mu\text{m}$ ni en [SIV].

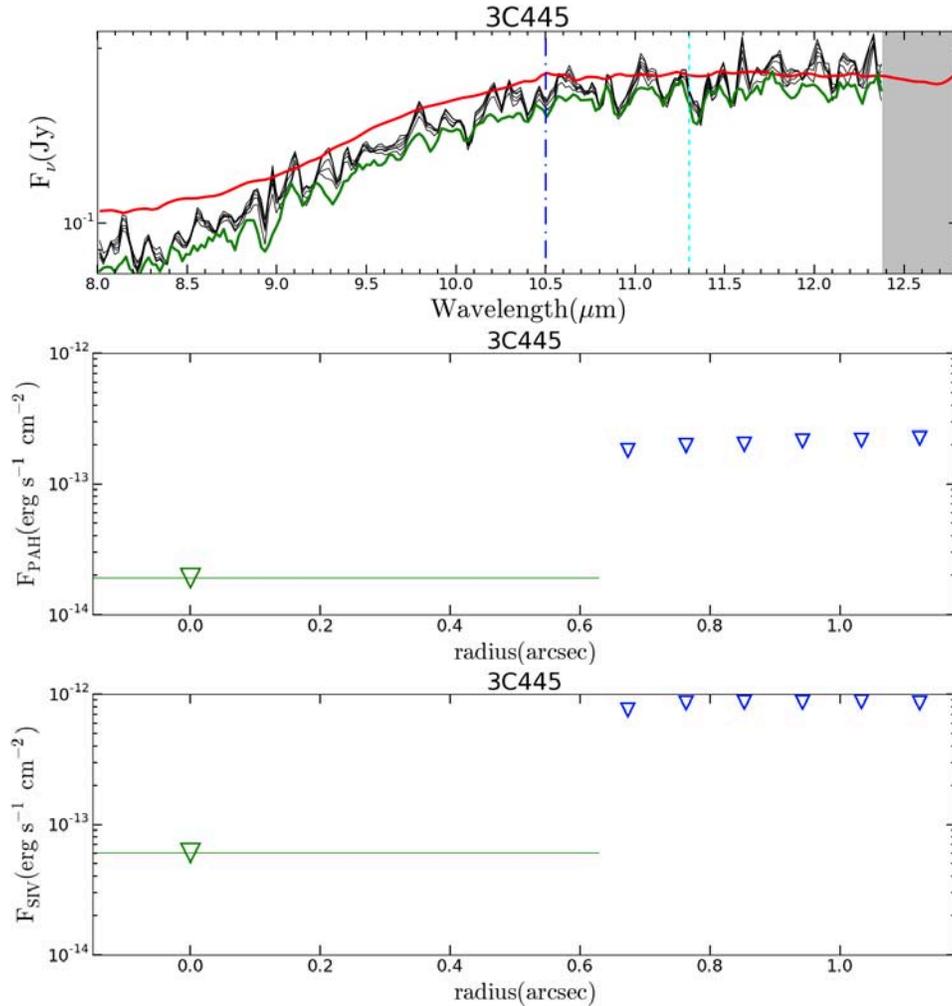


Figura A.1: Espectros y gráficas para la galaxia elíptica 3C 445. La gráfica superior muestra los espectros de la fuente: En verde el nuclear, los espectros circumnucleares tomados con T-ReCS en negro y el espectro de *Spitzer* en rojo. El PAH en $11.3\mu\text{m}$ y la línea de [SIV] están señaladas con líneas punteadas en colores azules. La parte sombreada identifica errores en el espectro. Las gráficas intermedia e inferior muestran los valores medidos de flujo para el PAH en $11.3\mu\text{m}$ y la línea de [SIV], respectivamente. Los valores nucleares se muestran en verde, los de aperturas con T-ReCS en azul y en caso de existir valor de *Spitzer* estaría en rojo. El valor será representado con su respectivo color pero con un triángulo en caso de ser un límite.

CIRCINUS Es una galaxia espiral altamente inclinada ($\sim 64.3^\circ$) [Tully et al., 2009] , se ha clasificado como una Sy2 con líneas anchas polarizadas [Oliva et al., 1998]. En trabajos previos [Maiolino et al., 1998, e.g.] y Müller Sánchez et al. [2006]) se ha identificado un brote de formación estelar en escalas de parsec.

Nuestro espectro de *Spitzer* muestra ligeras emisión en el PAH de $11.3\mu\text{m}$ y en [SIV]. Los espectros de T-ReCS sólo han logrado detectar la emisión de [SIV], aunque estas mediciones pueden deberse posiblemente a ruido en el espectro.

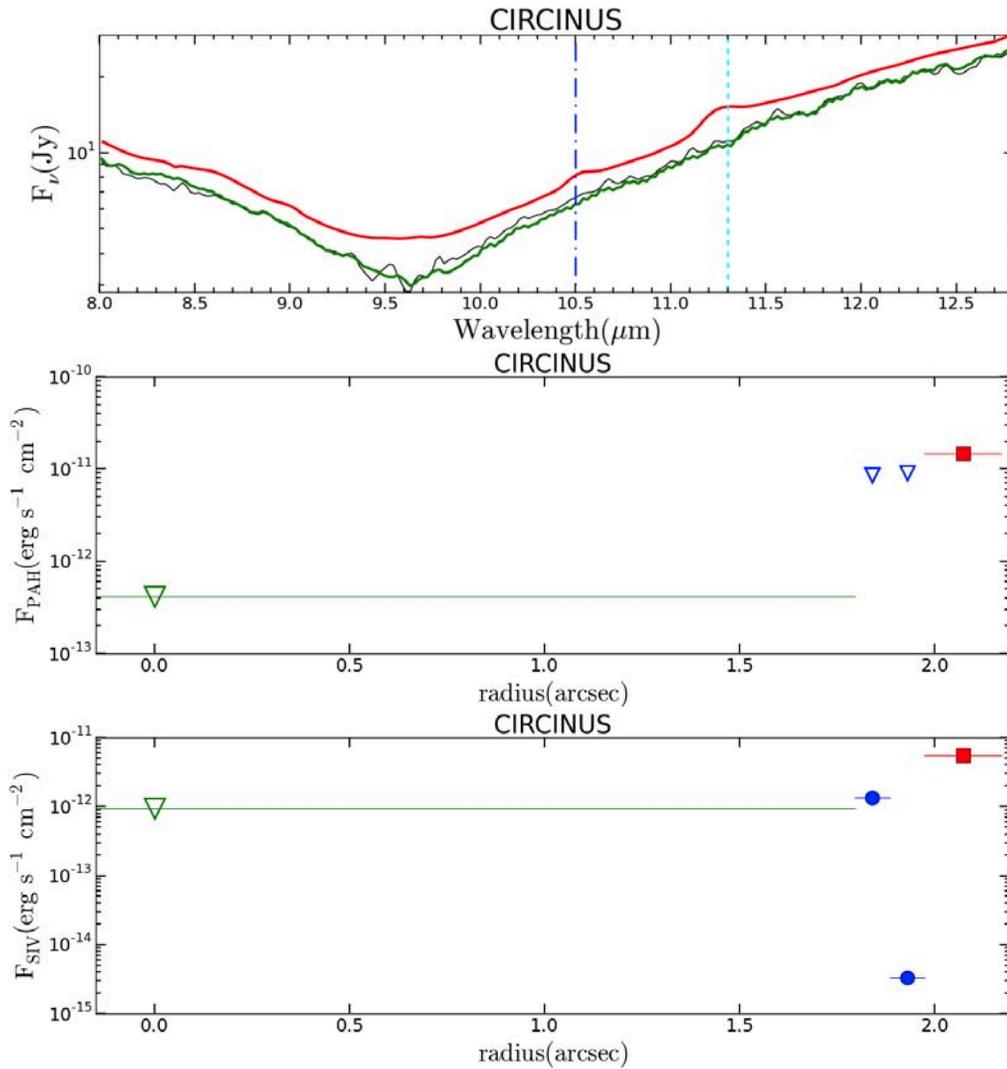


Figura A.2: Espectros y gráficas para la galaxia espiral CIRCINUS. Descripción similar a fig.A.1

Centaurus A Es un AGN cercano muy bien conocido donde la galaxia huésped es de tipo SO [Asmus et al., 2014]. El núcleo está fuertemente oscurecido y es tratado como una Sy2 radio fuerte [Muñoz Marín et al., 2007]. Se ha encontrado formación estelar significativamente reciente de estrellas tan jóvenes como 10 Myr^{-1} a 14 kpc del centro de la galaxia (Rejkuba et al. [2001]). La SFR a una distancia de 1kpc del núcleo que se calcula es de $7.1 \times 10^{-1} M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ (Diamond-Stanic & Rieke [2012]).

Nuestros espectros de T-ReCS no llegan hasta la distancia donde se ha detectado SF por tanto no hemos detectado la emisión en $11.3 \mu\text{m}$, pero el espectro de *Spitzer* sí muestra la emisiones en $11.3 \mu\text{m}$. Posiblemente el PAH que hemos encontrado esté relacionado con la SF reciente mencionada en trabajos anteriores. Por otro lado la emisión de [SIV] se ha detectado en el núcleo y en las aperturas alrededor de $1''$.

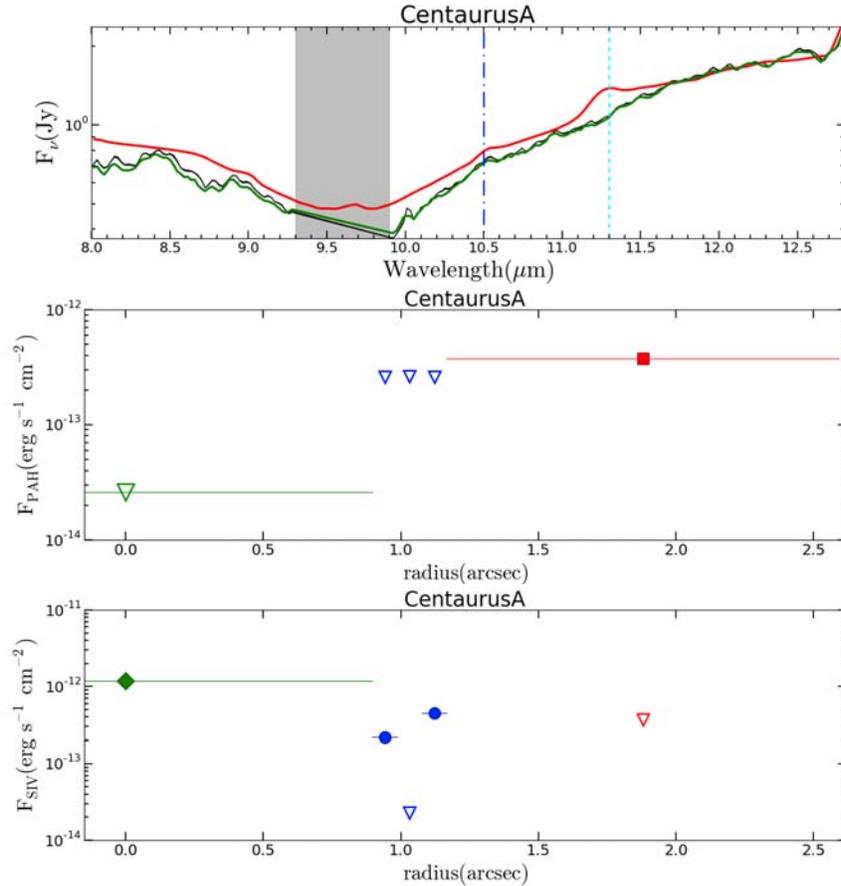


Figura A.3: Espectros y gráficas para la galaxia espiral Centaurus A. Descripción similar a fig.A.1

ESO 103-G35 Es una galaxia de tipo temprano inclinada ($\sim 83.7^\circ$) anfitriona de un núcleo radio callado tipo Sy2 [Véron-Cetty & Véron, 2010].

En nuestros espectros se detecta la emisión de [SIV]. El flujo para $10.5\mu\text{m}$ es detectado en el núcleo y en dos aperturas ubicadas a una distancia mayor a $1.2''$. No hemos encontrado trabajos que registren brotes de formación estelar circumnuclear para esta fuente.

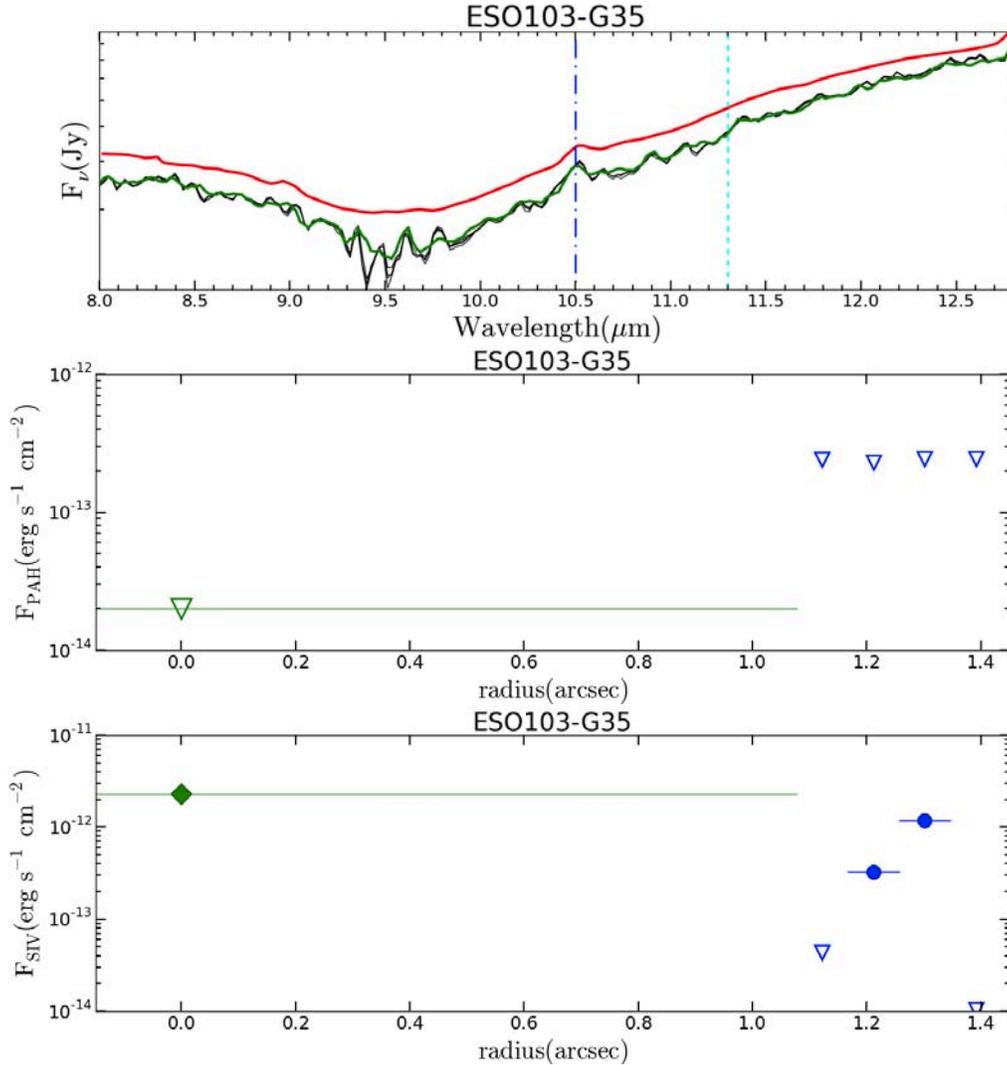


Figura A.4: Espectros y gráficas para la galaxia temprana ESO103-G35. Descripción similar a fig.A.1

IC 4518W Es una galaxia anfitriona de un núcleo tipo Sy2 [Véron-Cetty & Véron, 2010]. Estudios anteriores no han encontrado indicios de formación estelar en regiones internas de la galaxia (e.g. Diaz-Santos et al. [2010]).

En nuestros espectros tenemos emisión de PAH en $11.3\mu\text{m}$ y en [SIV]. Para el PAH hemos logrado detectar flujo en un rango de $[1.0'' : 1.8'']$. Para el [SIV] hemos detectado flujo en el núcleo y las aperturas cercanas y menores a una distancia de $1.2''$. El espectro de Spitzer no se ha tomado en cuenta, pues está a una distancia menor a las últimas aperturas de T-ReCS.

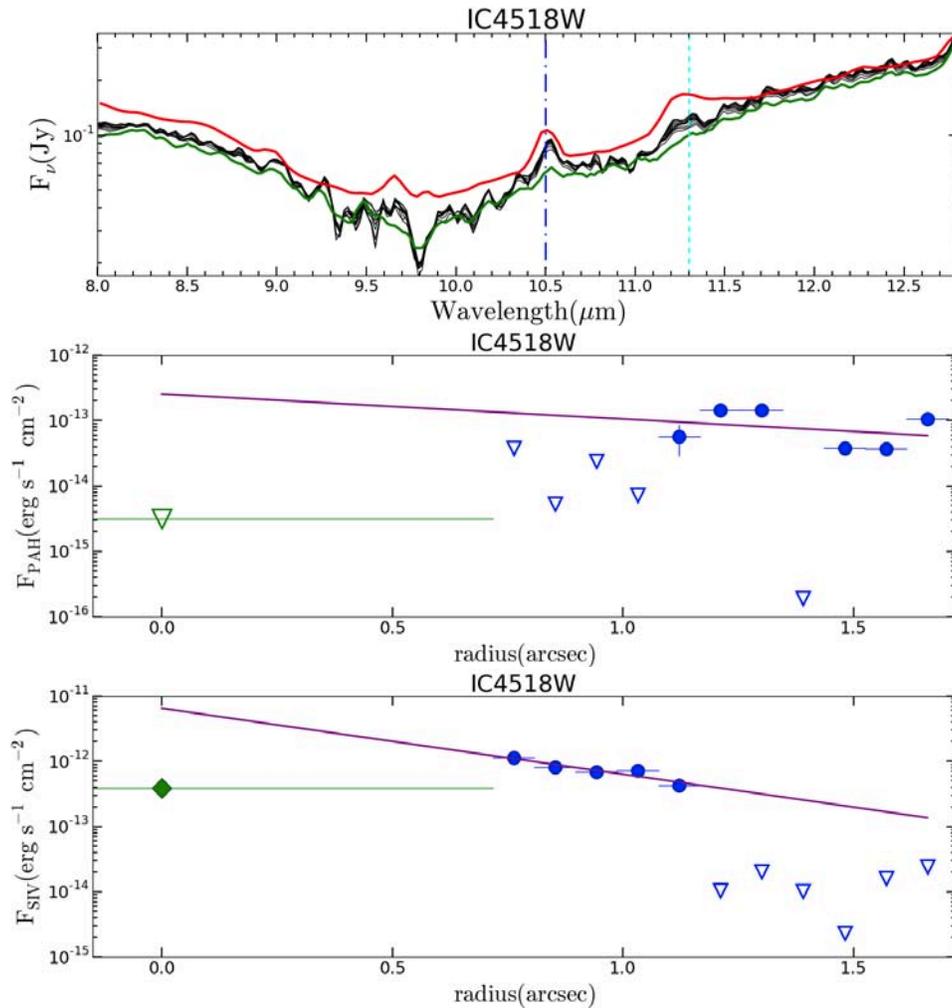


Figura A.5: Espectros y gráficas para la galaxia IC 4518W. Descripción similar a fig.A.1, pero se agregó el ajuste lineal en ambas gráficas (línea solida morada.)

IC 5063 Es una galaxia peculiar con propiedades elípticas y espirales que alberga un núcleo Sy2 [Kewley et al., 2001]. Colina et al. [1991] han propuesto IC 5063 como un remanente de una reciente fusión de galaxias, además en el trabajo de Martini et al. [2003] especulan que el oscurecimiento nuclear podría ser causado por carriles de polvo.

El PAH de $11.3\mu\text{m}$ es muy débil en los tres espectros que presentamos. Esto era de esperarse pues no se ha registrado formación estelar reciente de acuerdo con trabajos previos. Por otro lado, se ha detectado emisión en $10.5\mu\text{m}$. Esta emisión correspondiente a [SIV] muestra un flujo máximo en el núcleo, después el flujo medido presenta algunas oscilaciones que tienen sus mínimos en $0.8z 1.0''$.

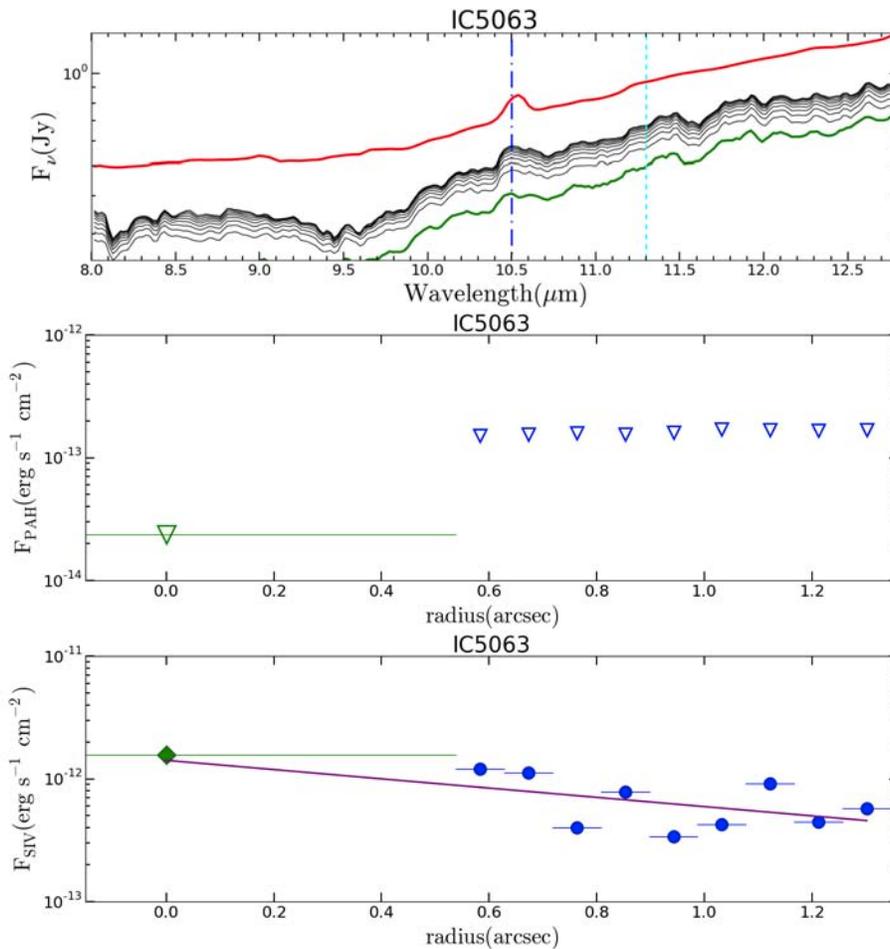


Figura A.6: Espectros y gráficas para la galaxia peculiar IC5063. Descripción similar a fig.A.5.

NGC 1365 Es una galaxia espiral barrada luminosa en el infrarrojo inclinada ($\sim 62.7^\circ$). Posee un AGN clasificado como Sy 1.9 [Trippe et al., 2010] y formación estelar circumnuclear intensa (Lindblad [1999] y Alonso-Herrero et al. [2012]). Se han detectado en el MIR tres fuentes compactas dentro un anillo de brote estelar $\sim 9'' \sim 780\text{pc}$ al noreste del núcleo. El núcleo parece estar alargado en dirección este-oeste [Asmus et al., 2014]. Nuestros espectros, excepto el nuclear, detectan la emisión en $11.3\mu\text{m}$. El flujo medido se mantiene alrededor de $10^{-12} \text{ ergs}^{-1}\text{cm}^{-2}$. Pero el flujo medido para *Spitzer* es del orden de $10^{-13} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$. No hemos detectado emisión de [SIV] en ningún espectro de T-ReCS, pero sí hemos medido un flujo bajo para *Spitzer*.

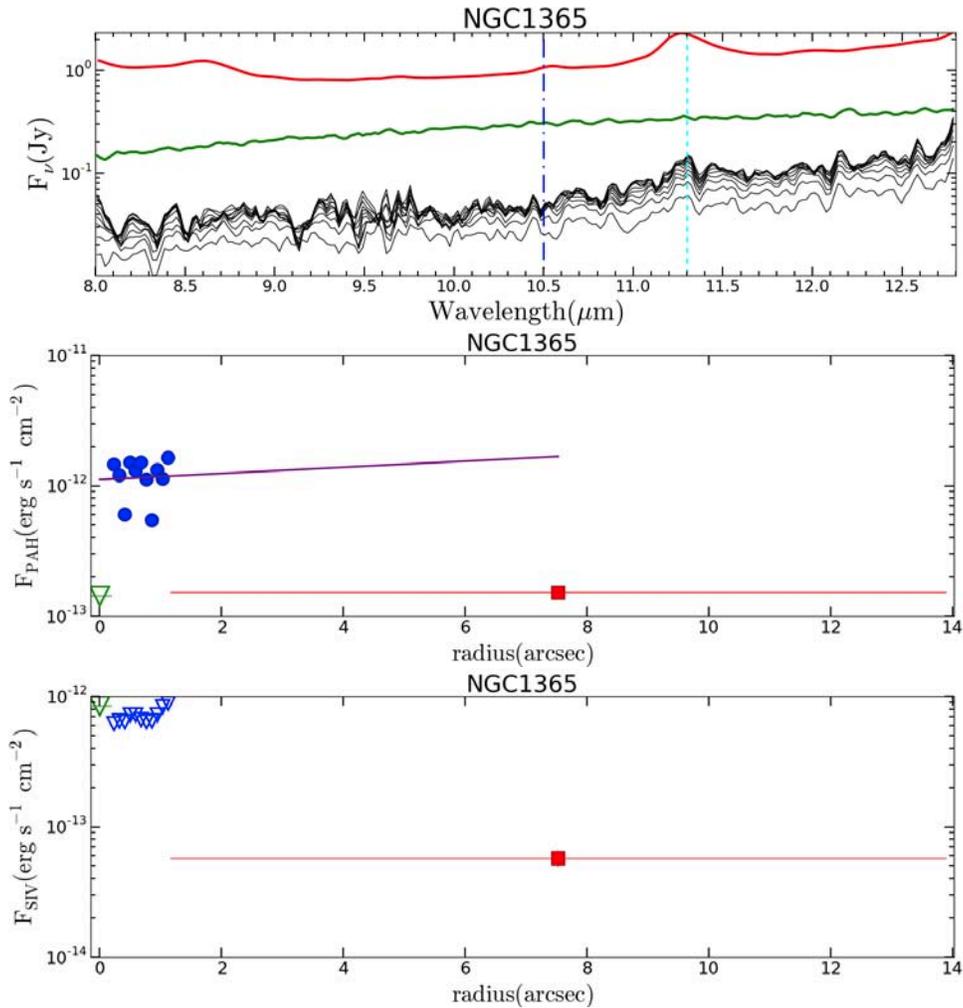


Figura A.7: Espectros y gráficas para la espiral NGC 1365. Descripción similar a fig.A.5.

NGC 1386 Es una galaxia espiral de canto del cúmulo de Fornax con un núcleo Sy2 con líneas anchas en el cercano infrarrojo (Reunanen et al. [2002]). En el trabajo de Asmus et al. [2014] se ha concluido que la emisión en el MIR es causada por el polvo de la NLR y la formación estelar, aunque también contribuye un poco el oscurecimiento nuclear.

En nuestros datos el PAH en $11.3\mu\text{m}$ sólo parece estar bien definido para el espectro de Spitzer, que corresponde a la emisión integrada dentro de 100pc.

Por el contrario, la emisión de [SIV] si es clara en los tres espectros. El flujo para $10.5\mu\text{m}$ se mantiene semi-constante hasta una distancia de $1.0''$, excepto por una apertura. Después de éste se presenta una caída en los valores del flujo.

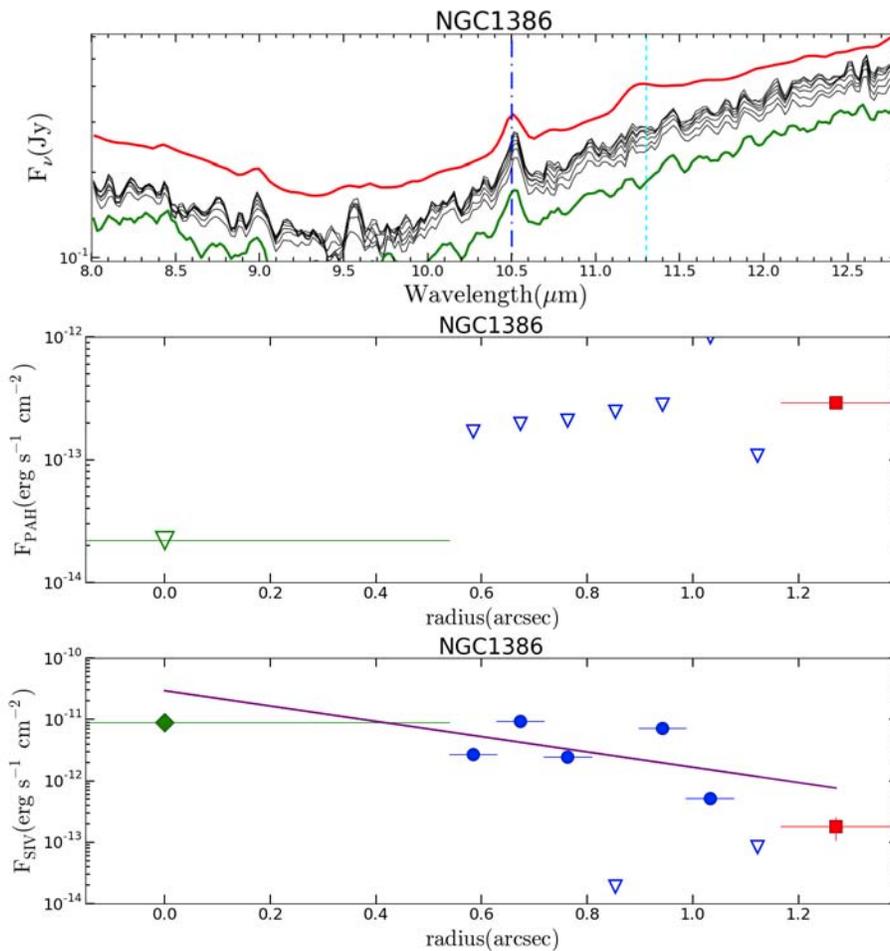


Figura A.8: Espectros y gráficas para la galaxia espiral NGC 1365. Descripción similar a fig.A.5.

NGC 1808 Es una galaxia espiral peculiar (Tully et al. [2009]), donde se ha encontrado evidencia de formación estelar circumnuclear y de un AGN central (e.g. Collison et al. [1994], Veron-Cetty & Veron [1985], Sales et al. [2013]).

Nuestros tres espectros muestran la emisión del PAH en $11.3\mu\text{m}$. El flujo medido en cada apertura decrece conforme la distancia al centro se incrementa. Por tanto, el mayor flujo de este lo encontramos en el núcleo. No se ha medido flujo para la línea de [SIV] y suponemos que los valores mostrados en su correspondiente gráfica se deben al ruido. Podemos concluir que para esta fuente sólo se presenta el flujo en el PAH de $11.3\mu\text{m}$.

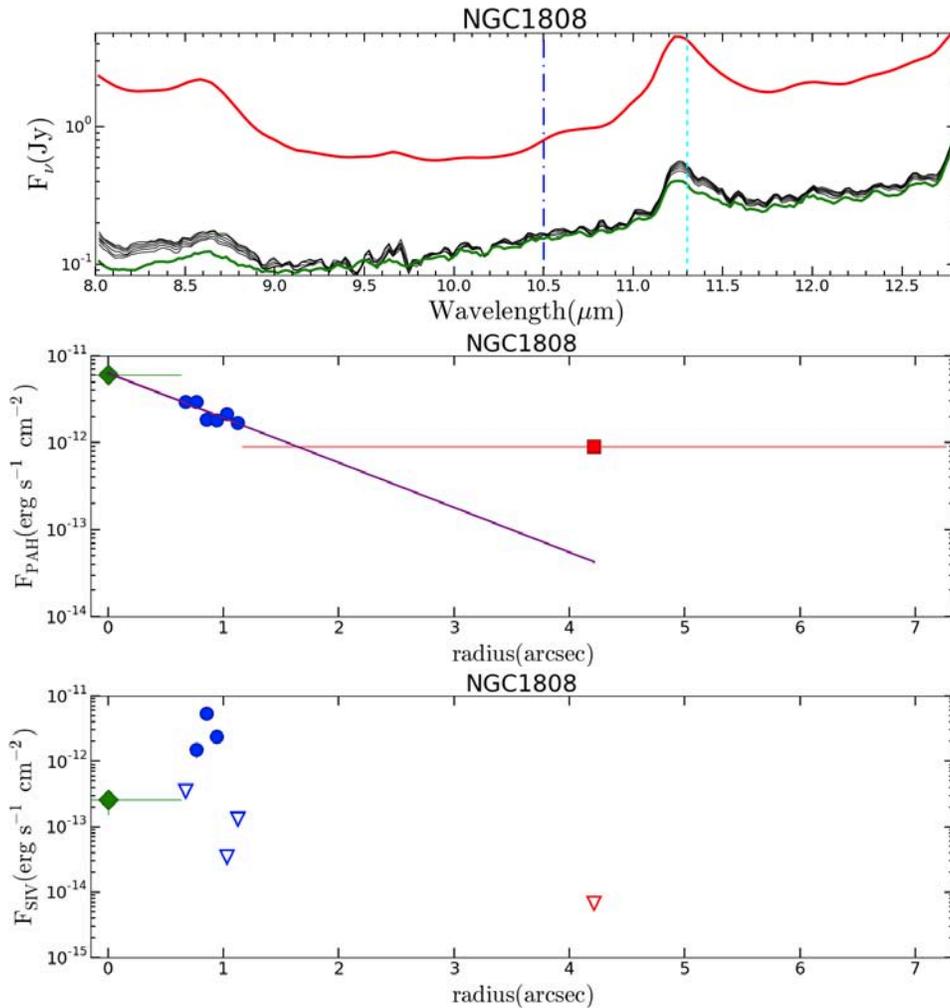


Figura A.9: Espectros y gráficas para la galaxia espiral NGC 1808. Descripción similar a fig.A.5.

NGC 3081 Es una galaxia temprana espiral barrada con anillos anidados, identificados como: 1) un anillo nuclear con diámetro(d)= 2.3 kpc, 2) un anillo interno de $d = 11$ kpc, 3) un anillo externo $d = 26.9$ kpc y 4) un pseudoanillo $d = 33.1$ kpc (Buta [1990], Buta et al. [2004], Byrd et al. [2006]). Además se han encontrado menos regiones de SF cerca del eje menor del anillo interno y más cerca del eje mayor. (Byrd et al. [2006]). El núcleo se clasifica como un Sy2 [Phillipps& Disney, 1983].

Nosotros tenemos datos de las aperturas en dos ángulos diferentes, para esta galaxia. Primero presentamos las mediciones con ángulo de 0° , donde hemos logrado medir el flujo del PAH en $11.3\mu\text{m}$ para el núcleo, *Spitzer* y algunas aperturas. El flujo nuclear de [SIV] es menor al medido en las aperturas localizadas a una distancia menor a $1.2''$. Las aperturas mayores a $1.2''$ registran flujos menores a las anteriores. Los flujos de [SIV] son mayores que los medidos para el PAH en $11.3\mu\text{m}$.

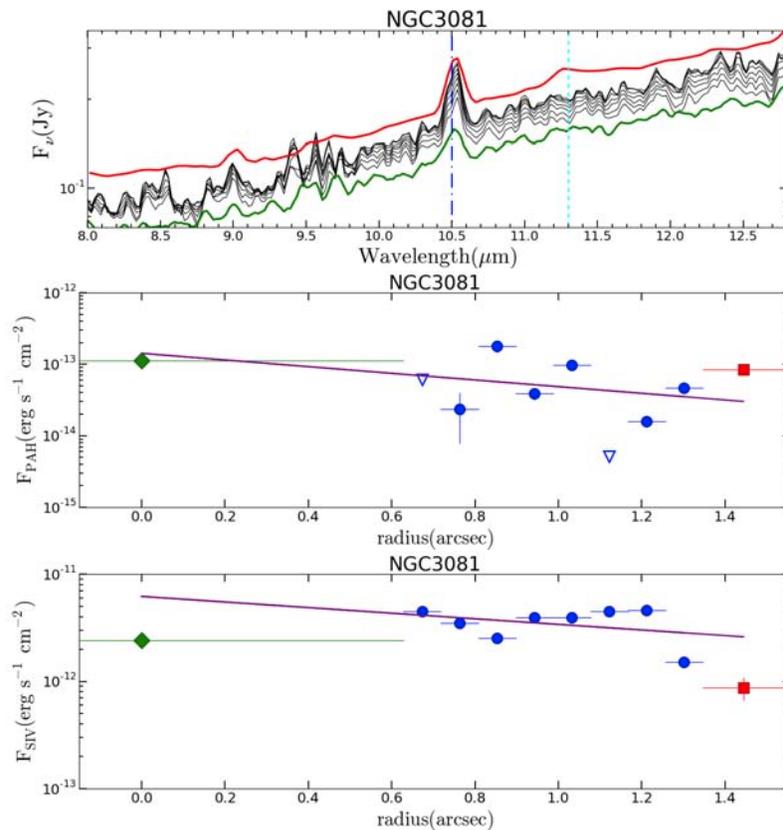


Figura A.10: Espectros y gráficas para la galaxia espiral NGC 3081 con la posición de la rendija en un ángulo de 0 grados. Descripción similar a fig.A.5.

NGC 3081 Para el ángulo de 350° la emisión del PAH en $11.3\mu\text{m}$ es nula, excepto en el espectro nuclear y *Spitzer*, donde el flujo es mayor en el segundo. Los flujos medidos en $10.5\mu\text{m}$ presentan un decaimiento general conforme la distancia al núcleo crece. Notemos que el flujo medido para *Spitzer* coincide con este decaimiento. El flujo en [SIV] es mayor al detectado en el PAH. No existen trabajos previos en los que se hable sobre la emisión de [SIV] específicamente en esta fuente.

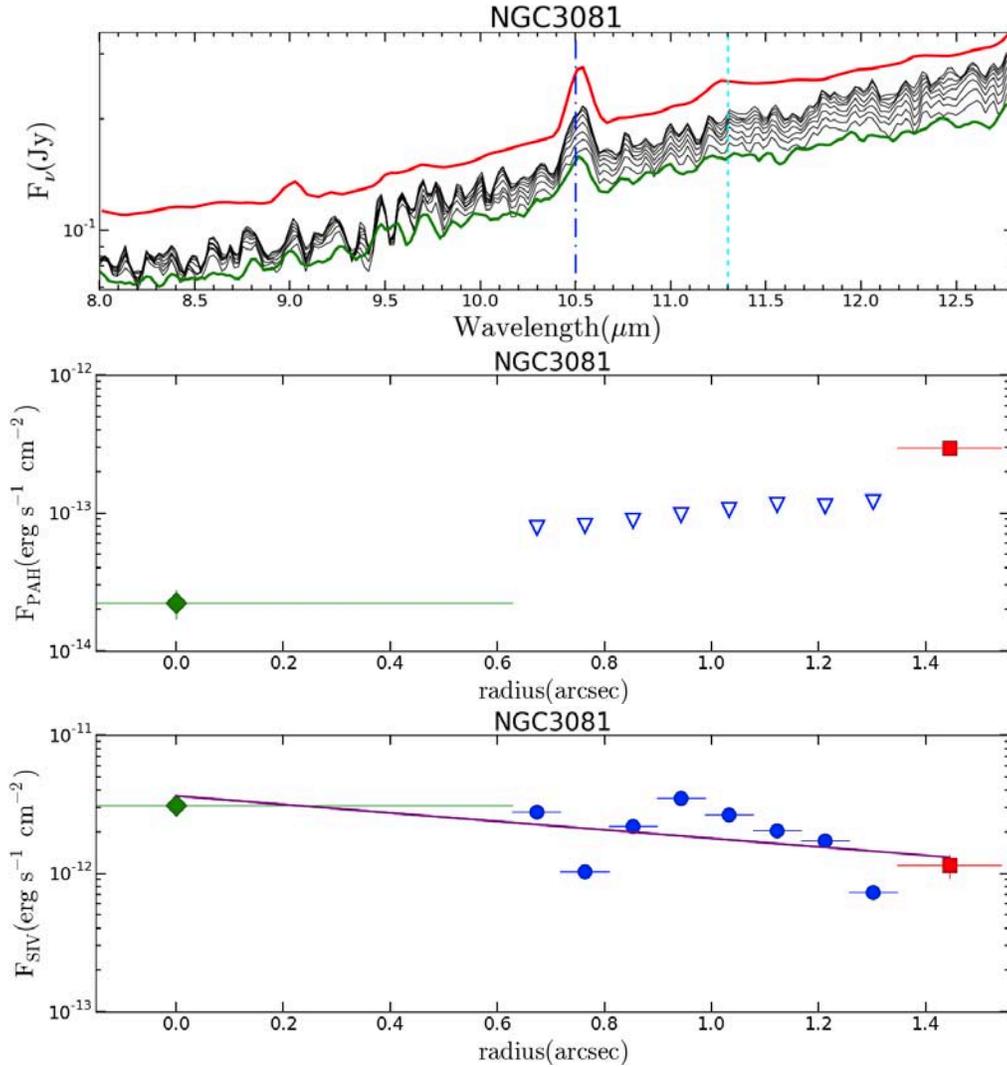


Figura A.11: Espectros y gráficas para la galaxia espiral NGC 3081 tomada con un ángulo de 350 grados. Descripción similar a fig.A.5.

NGC 3281 Es una galaxia espiral con una gran inclinación ($\sim 71.7^\circ$ respecto a la línea de visión) que alberga un núcleo Sy2. Al igual que en trabajos previos (e.g. Sales et al. [2011]) no hemos observado la emisión en $11.3\mu\text{m}$, excepto por la apertura hecha con *Spitzer*, pero sí la emisión en la línea de [SIV]. En dicha emisión, el flujo de las aperturas es menor al detectado en los espectros nuclear y de *Spitzer*.

Los primeros en estudiar esta fuente fueron Storchi-Bergmann et al. [1996] quienes sugirieron una distribución del polvo asimétrica con respecto al gas ionizado. Hemos notado que el flujo es mayor en [SIV] que en $11.3\mu\text{m}$.

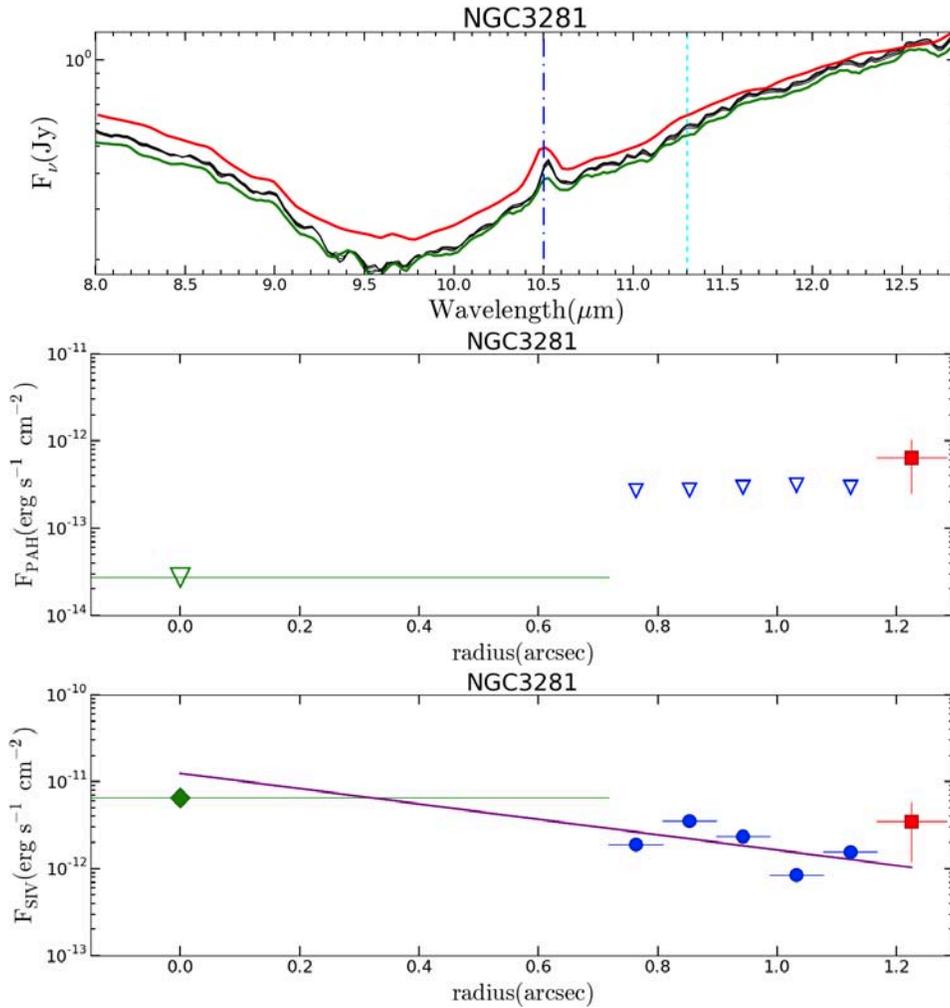


Figura A.12: Espectros y gráficas para la galaxia espiral NGC 3281. Descripción similar a fig.A.5.

NGC 4418 Es una galaxia infrarroja ultraluminosa (ULIRG) cuyo oscurecido núcleo compacto ha sido clasificado como Sy 2 [Véron-Cetty & Véron, 2010]. Algunos autores [e.g. Imanishi et al., 2004; Aalto et al., 2007; Sakamoto et al., 2013] sugieren que el núcleo puede contener un compacto brote estelar.

Nosotros hemos obtenido datos de T-ReCS en dos ángulos diferentes, 30° y 40° respectivamente. En ambos casos sólo hemos logrado detectar la emisión del PAH en $11.3\mu\text{m}$ en el espectro de *Spitzer*, sin embargo lo hemos descartado porque la medición del flujo cae dentro de la distancia que cubren las aperturas. Posiblemente la alta sensibilidad de *Spitzer* explica por qué únicamente la emisión del PAH se presenta para estos datos. Hemos detectado flujo para [SIV] en el núcleo y en la apertura más cercana a éste, en el caso del ángulo de 30° . Para el otro ángulo se obtuvieron mediciones del flujo en $10.5\mu\text{m}$ mayores al nuclear en casi todas las aperturas.

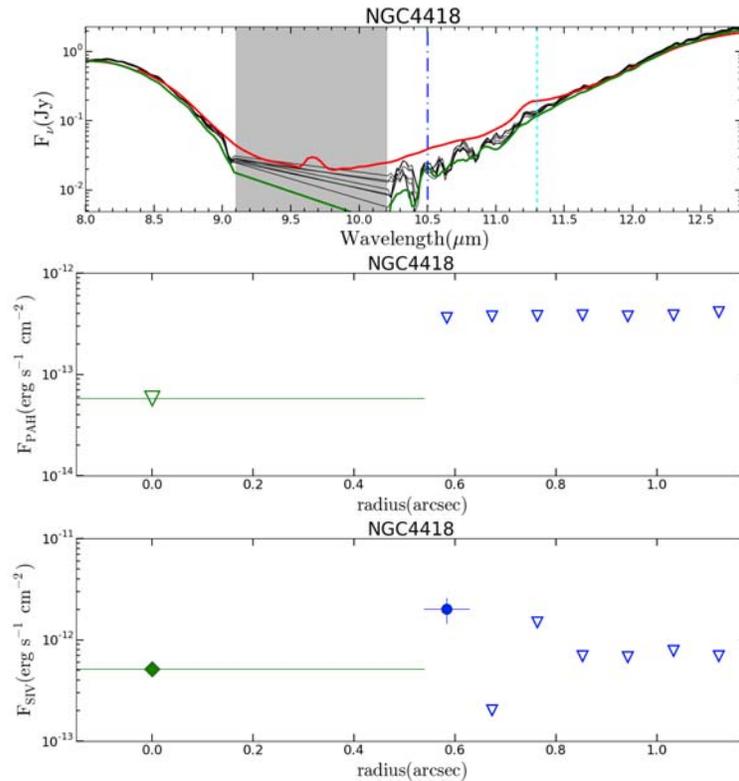


Figura A.13: Espectros y gráficas para la galaxia espiral NGC 4418 tomada con un ángulo de 30 grados. Descripción similar a fig.A.1.

NGC 4418 Graficas de la fuente observada con la rendija en un ángulo de 40°. La descripción se presenta en la página anterior.

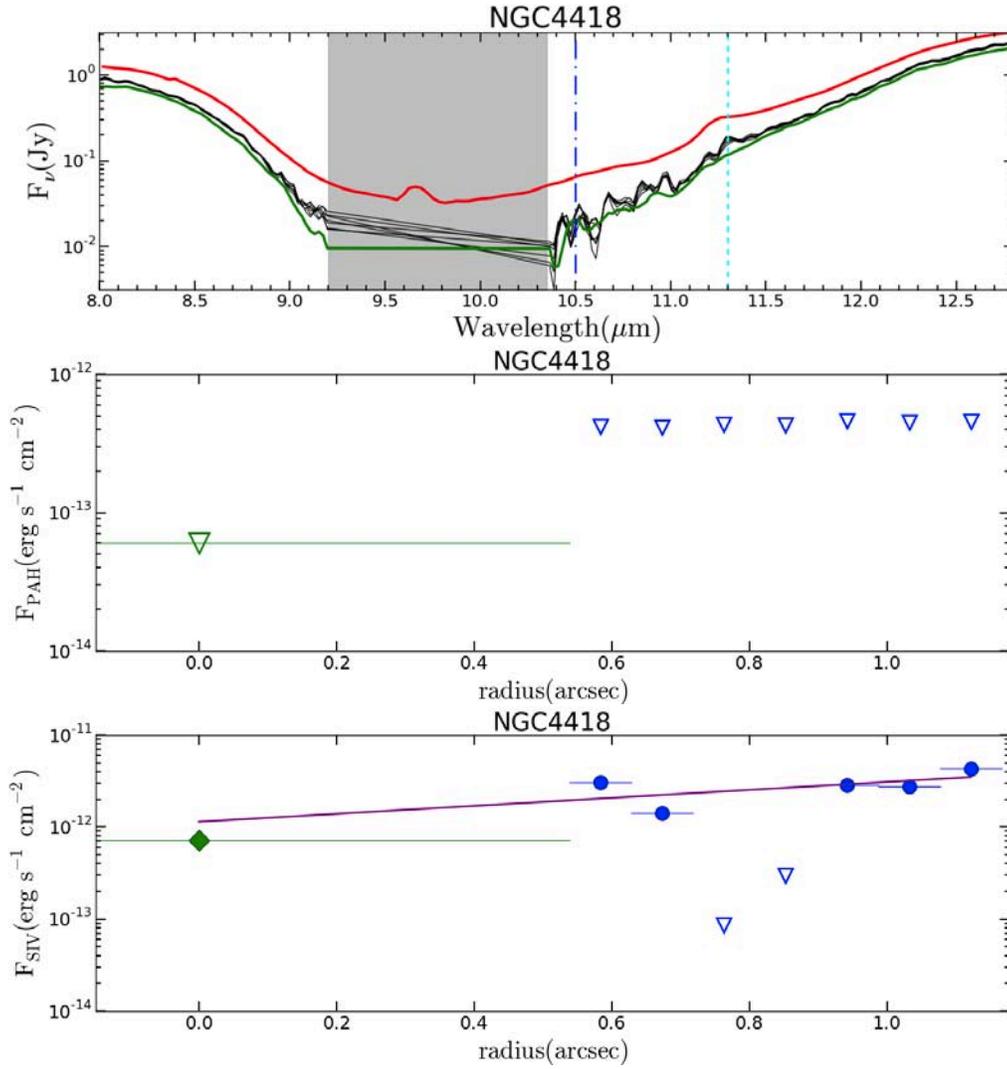


Figura A.14: Espectros y gráficas para la galaxia espiral NGC 4418 tomada con un ángulo de 40 grados. Descripción similar a fig.A.5.

NGC 4945 En trabajos previos se ha identificado este objeto como una galaxia cercana espiral casi de canto con un núcleo altamente oscurecido que contiene tanto un AGN como un brote de formación estelar [e.g. Moorwood et al., 1996]. En el óptico se observa un núcleo completamente oscurecido y aparece como un núcleo HII [Véase Moorwood et al., 1996] . Nuestros espectros tomados con T-ReCS no son óptimos para hacer mediciones en el rango de $9\mu\text{m}$ a $11\mu\text{m}$, debido a la transmitancia de la atmósfera. Por tanto, sólo hemos medido el PAH en $11.3\mu\text{m}$, para este caso. El flujo medido se mantiene alrededor de 10^{-13} $\text{erg s}^{-1} \text{cm}^{-2}$ para casi todas las aperturas, excepto las localizadas a una distancia de entre [$1''$: $2''$] y [$5''$: $6''$] que registran un flujo menor. La medición de *Spitzer* se ha descartado porque cae dentro de las aperturas.

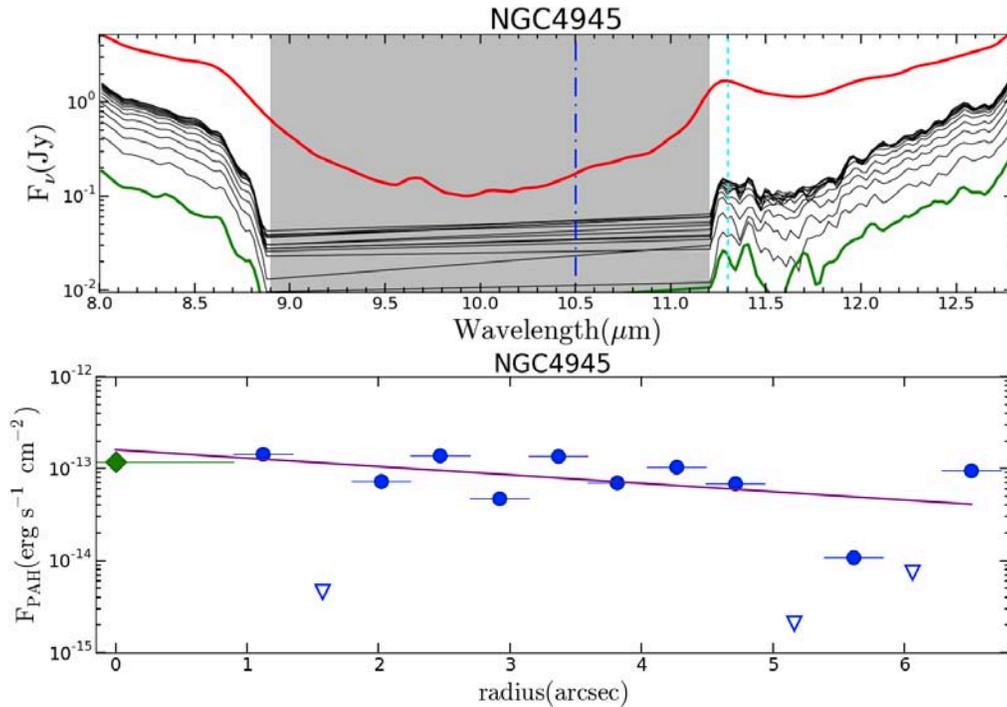


Figura A.15: Espectros y gráficas para la galaxia espiral NGC 4945. Descripción similar a fig.A.5.

NGC 5135 Es una galaxia espiral barrada que alberga un núcleo Sy2 y un brote de formación estelar circumnuclear [González Delgado et al., 1998; Bedregal et al., 2009]. Este último tiene una morfología con nudos y se extiende sobre $\sim 3 \sim 0.9$ kpc. La formación estelar domina la emisión en el MIR del centro ~ 1 kpc de NGC5135.

En nuestras mediciones sólo hemos tomado en cuenta los datos de T-ReCS, los cuales presentan emisión en $11.3\mu\text{m}$ y en [SIV]. Las aperturas más internas y el núcleo tienen flujos similares en $11.3\mu\text{m}$. Aunque, las aperturas a distancias de $[1.25'' : 2.75'']$, tienen un ligero incremento que se mantiene constante hasta las aperturas más externas $[3.0'' : 4.0'']$ donde el valor del flujo es menor. El flujo de [SIV] tiene un comportamiento diferente. Las aperturas en el rango de $[0.5'' : 1.0'']$ registran flujos menores a medida que se alejan del núcleo. Hasta llegar a las aperturas mayores a $1.0''$ donde el valor del flujo se incrementa ligeramente para después disminuir hasta valores límites. Hemos notado que este objeto presenta ambas emisiones y los flujos medidos son de rangos similares.

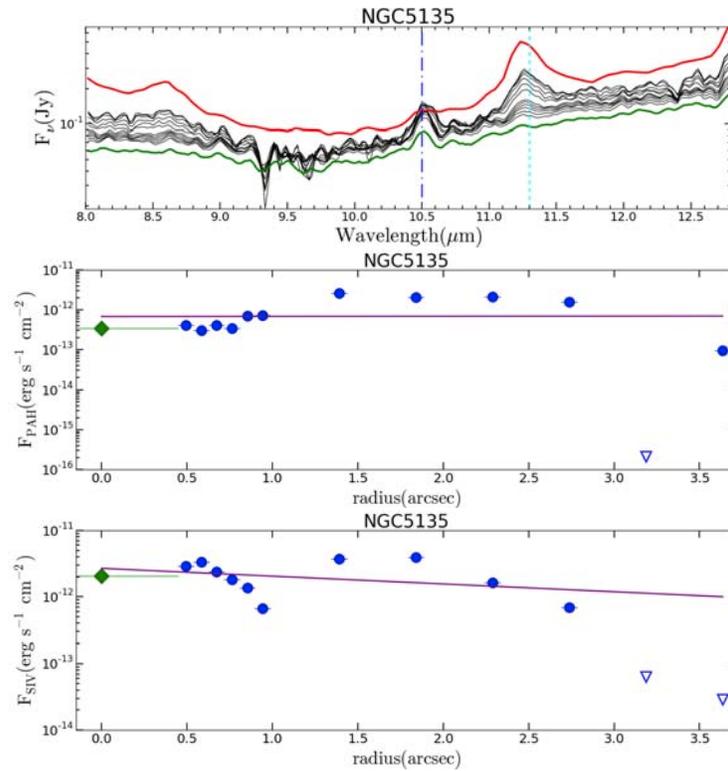


Figura A.16: Espectros y gráficas para la galaxia espiral NGC 5135. Descripción similar a fig.A.5.

NGC 5506 Es una galaxia espiral de canto muy brillante en rayos X. En longitudes de onda del radio se caracteriza por tener un núcleo compacto hospedado en un halo con forma elíptica con una extensión de $\sim 3'' \sim 450\text{pc}$ [Wehrle & Morris, 1987]. En escalas de milliarcos segundos, el núcleo se resuelve como una fuente doble (Kinney et al. [2000]). De trabajos previos se ha encontrado que la SF no tienen una contribución significativa al SED en el MIR [e.g. Shi et al., 2006; Wu et al., 2009; Tommasin et al., 2010; Gallimore et al., 2010; Mullaney et al., 2011]. En nuestros datos sólo logramos medir el flujo para [SIV], como se puede observar en la gráfica, el flujo medido en las aperturas oscila alrededor de $10^{-11} \text{ ergs}^{-1}\text{cm}^{-2}$ para las aperturas localizadas a una distancia menor a $1.4''$ del núcleo. La última apertura mide un valor límite para el flujo. En cuanto al flujo nuclear de [SIV] éste es mayor que el registrado en las aperturas.

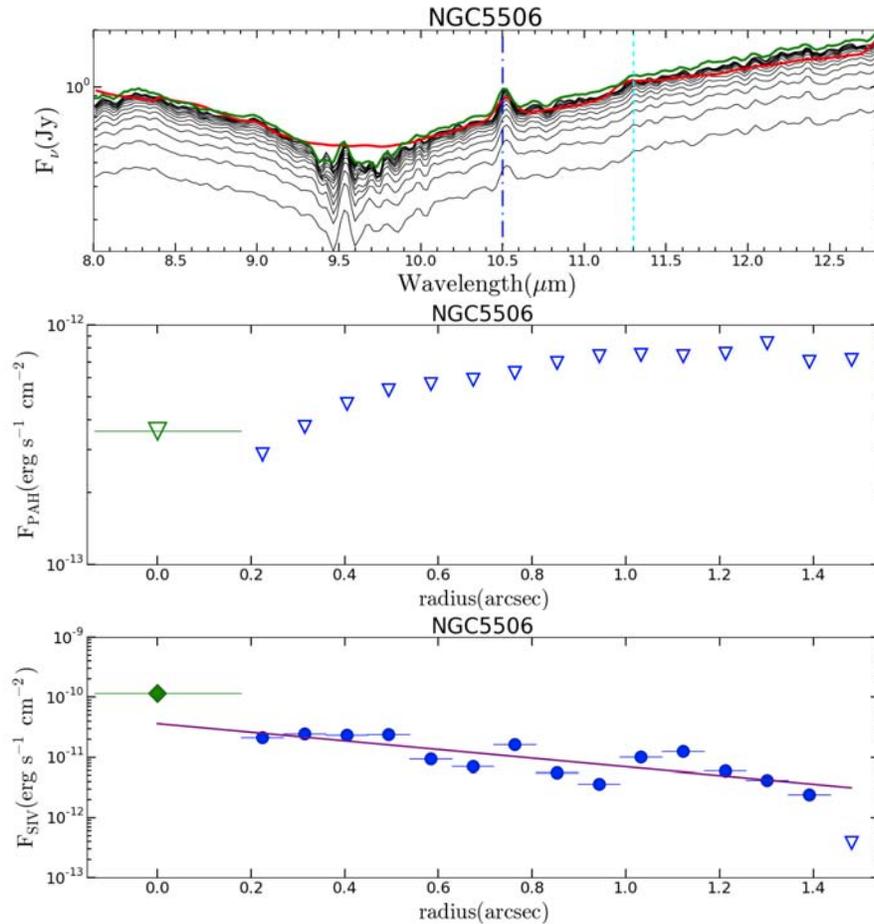


Figura A.17: Espectros y gráficas para la galaxia espiral NGC 5506. Descripción similar a fig.A.5.

NGC 5643 Es una galaxia espiral barrada de canto. En trabajos previos se ha encontrado que la SED en MIR es afectada por la formación estelar (e.g. Asmus et al. [2014]). Nuestros espectros muestran emisión en $11.3\mu\text{m}$ y en $10.5\mu\text{m}$. En el caso del PAH en $11.3\mu\text{m}$ el flujo registrado en la parte nuclear es menor que el medido en las aperturas y la fuente total. Los valores del flujo de las aperturas presentan un decaimiento conforme se alejan del centro. Por otro lado, las mediciones del flujo de [SIV] disminuyen conforme la distancia al centro crece. Hemos notado que el flujo nuclear y el medido en las aperturas de TReCS es mayor para [SIV], pero para la apertura con *Spitzer* el flujo es mayor en $11.3\mu\text{m}$.

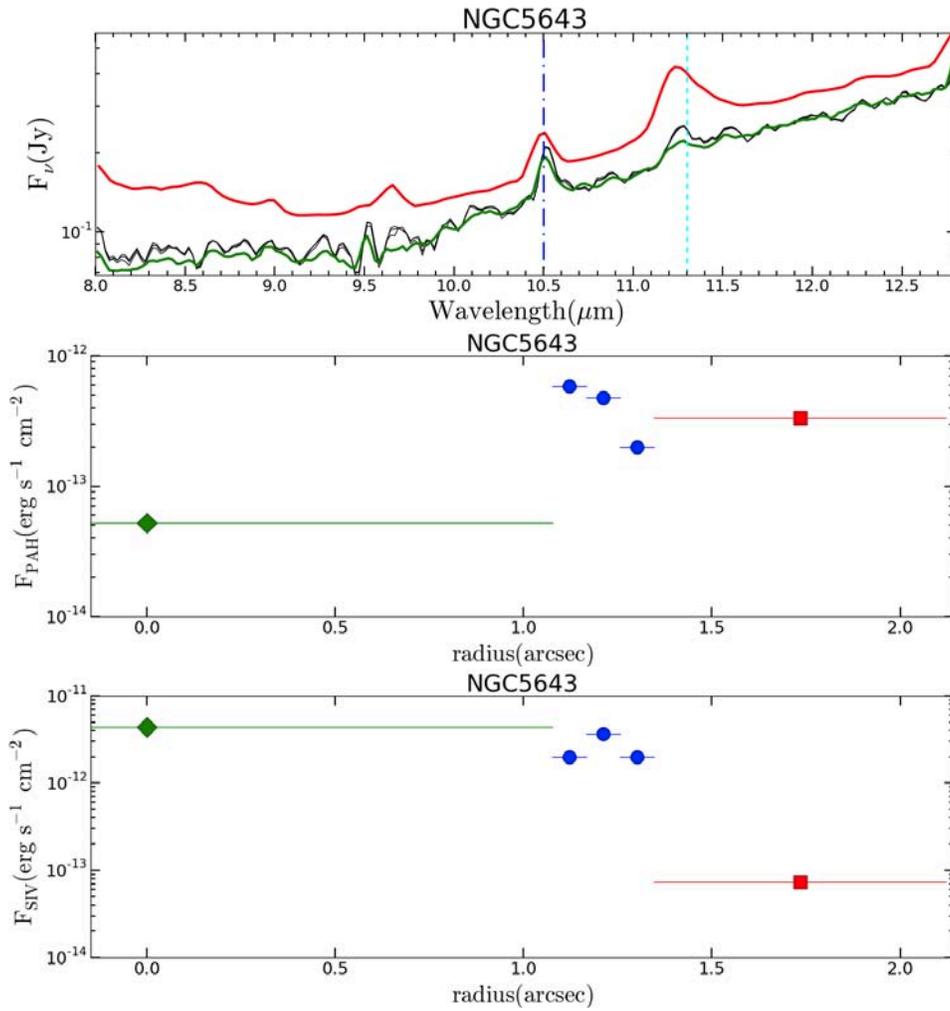


Figura A.18: Espectros y gráficas para la galaxia espiral NGC 5643. Descripción similar a fig.A.1.

NGC 7130 Es una galaxia espiral de baja inclinación ($\sim 33.7^\circ$ de la línea de visión) en cuyo núcleo esta contenido un AGN y un gran brote estelar compacto (Thuan [1984], González Delgado et al. [1998], Levenson et al. [2005]). En escalas de arco segundos la SED en el MIR indica emisiones de un AGN oscurecido con una gran aportación de formación estelar (Alonso-Herrero et al. [2012a]).

Nuestros espectros muestran emisión en $11.3\mu\text{m}$ y en la línea de [SIV]. A simple vista ambas emisiones tienen comportamientos similares, es decir, una disminución en el flujo conforme la distancia al centro crece con ligeras oscilaciones. Una comparación entre ambas emisiones nos lleva a los siguiente:

- El flujo nuclear de [SIV] es ligeramente mayor al medido en $11.3\mu\text{m}$.
- Casi todas las aperturas miden un flujo mayor para el PAH, excepto en las dos aperturas $< 1''$ donde el flujo de [SIV] es superior.
- El espectro de *Spitzer* registra un flujo mayor en $11.3\mu\text{m}$.

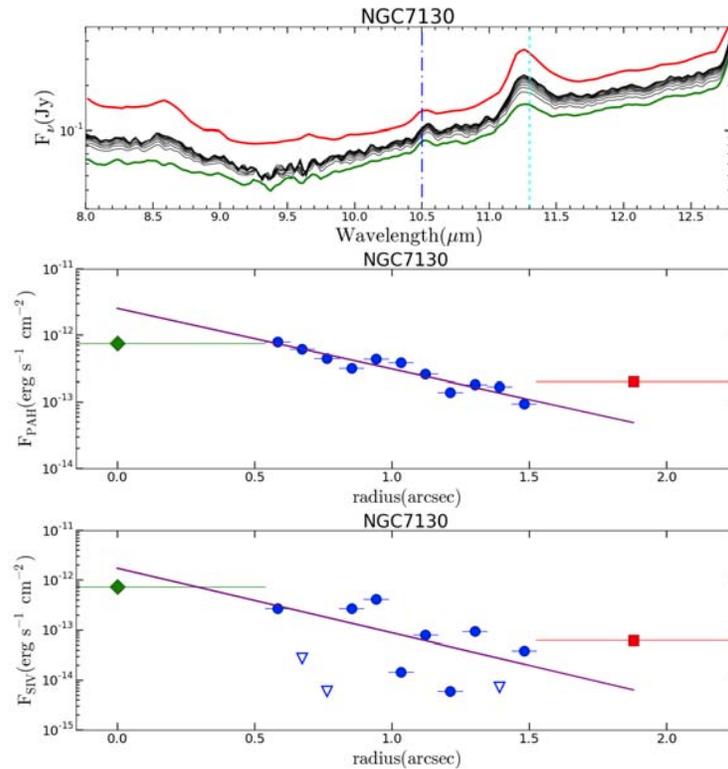


Figura A.19: Espectros y gráficas para la galaxia espiral NGC 7130. Descripción similar a fig.A.5.

NGC 7172 Es una galaxia tipo lenticular de canto con un prominente camino de polvo proyectado sobre el núcleo. En trabajos recientes se asume que la SED en MIR está libre de contaminación por formación estelar (Asmus et al. [2014]).

Hemos analizado los datos de las aperturas con dos ángulos: 60° y 90° . El espectro de *Spitzer* muestra ambas emisiones, pero el espectro nuclear sólo muestra la emisión para [SIV].

La emisión en $11.3\mu\text{m}$ se ha detectado en casi todas las aperturas del primer ángulo y tiene un ligero incremento en el flujo que se mantendrá constante a partir de $1''$. En el segundo ángulo el flujo tiene un decaimiento para las dos aperturas $> 1.25''$. En ambos ángulos el flujo en $11.3\mu\text{m}$ de la apertura de *Spitzer* es similar.

Para [SIV] a 60° se tiene un decaimiento generalizado con algunas oscilaciones entre valores límite. Para el otro ángulo se ha medido un incremento en el flujo a $1''$ y poco antes de $1.5''$, la apertura de *Spitzer* por el contrario presenta un flujo menor a los anteriores.

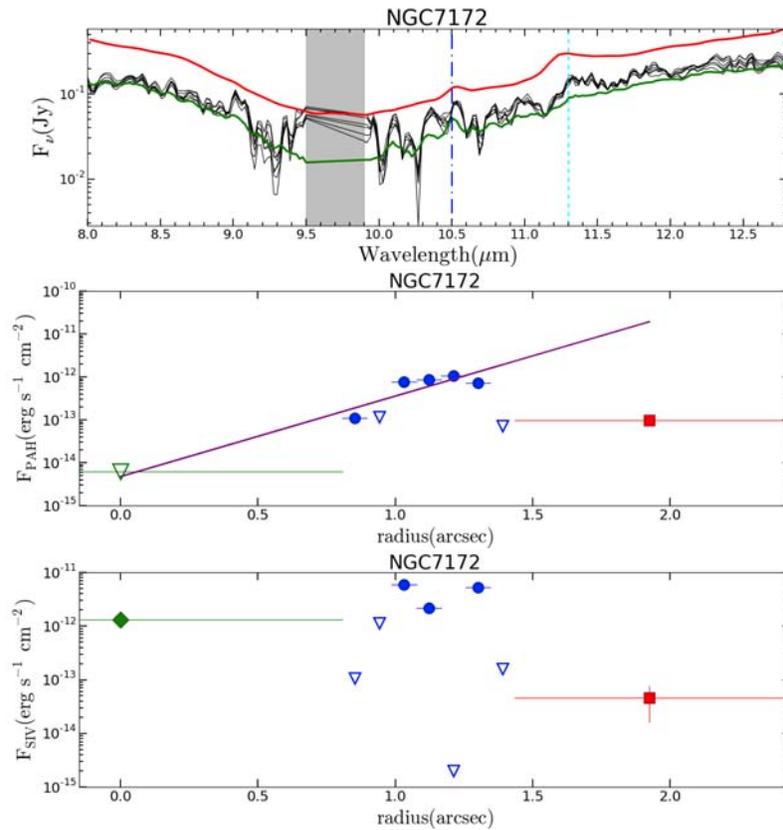


Figura A.20: Espectros y gráficas para la galaxia espiral NGC 7172 observada con la rendija en un ángulo de 60 grados. Descripción similar a fig.A.5.

NGC 7172 Graficas de la fuente observada con la rendija en un ángulo de 90 grados. La descripción se muestra en la página anterior.

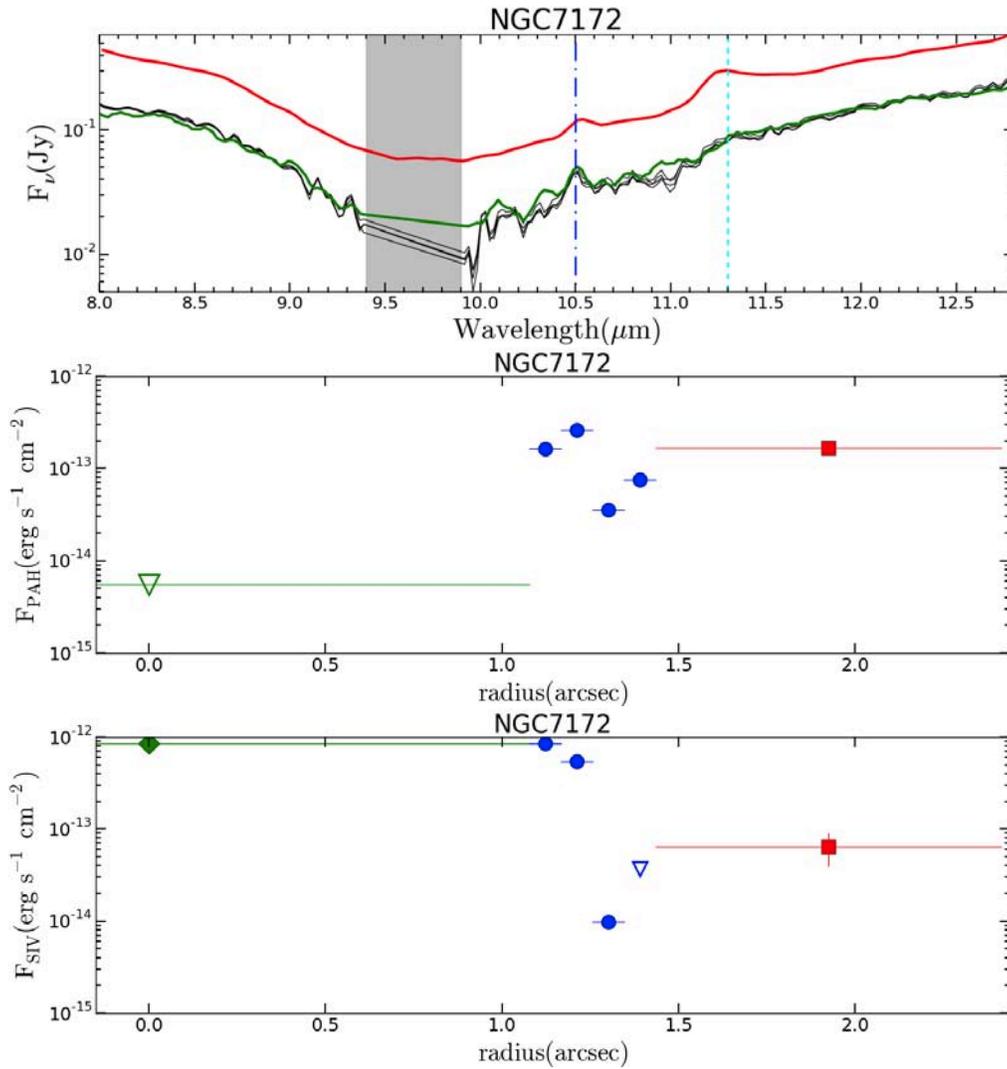


Figura A.21: Espectros y gráficas para la galaxia espiral NGC 7172 observada con la rendija en un ángulo de posición de 90 grados. Descripción similar a fig.A.1.

NGC 7479 Es una galaxia espiral barrada con baja inclinación ($\sim 43^\circ$). Esta galaxia forma parte de una fusión menor (Quillen et al. [1995], Laine & Heller [1999]). Su núcleo ha sido clasificado como activo e inicialmente se clasificó como LINER después como Sy1.9 y más recientemente como Sy2.0 [Trippe et al., 2010]. Se ha reportado formación de estrellas en el núcleo [Martin, 1997]. Las imágenes de Spitzer/IRAC están dominadas por una emisión nuclear compacta incrustada dentro de emisión anfitriona de la barra (Zhou et al. [2011]). Partiendo del análisis de *Spitzer* se piensa que el AGN en el MIR está altamente oscurecido.

Nuestros espectros no muestran ninguna emisión a simple vista, pero se ha logrado medir flujo en la emisión de [SIV] de algunas aperturas. Este flujo medido se encuentra alrededor del valor medido en el núcleo.

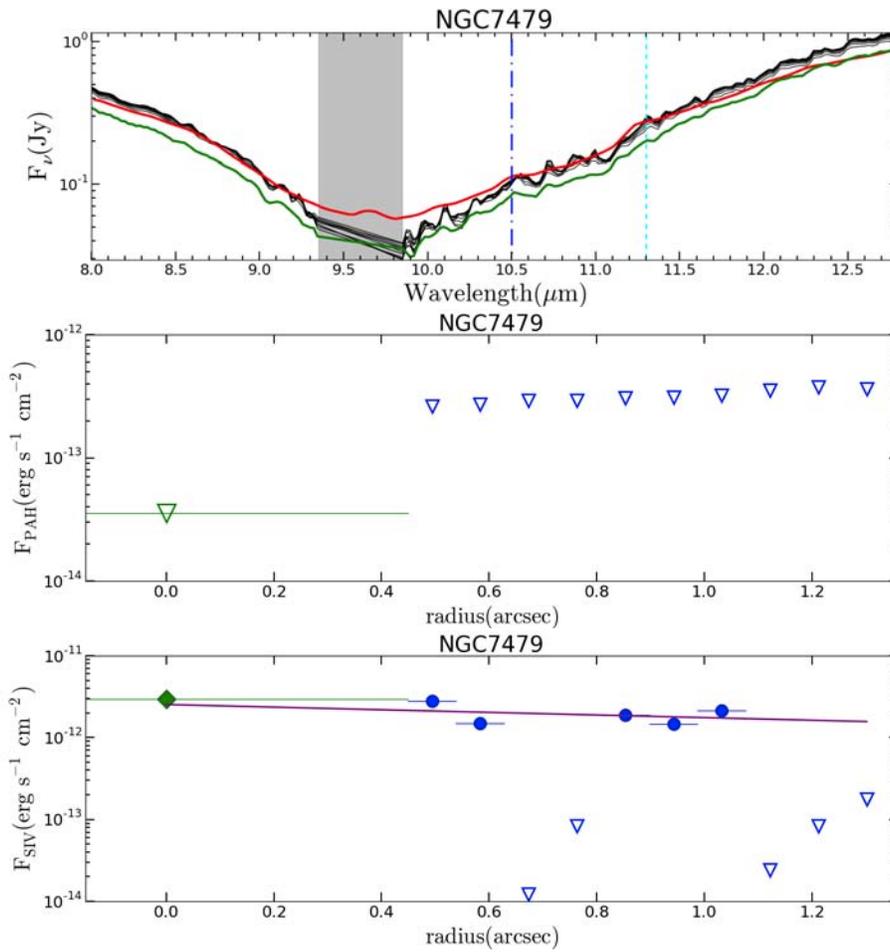


Figura A.22: Espectros y gráficas para la galaxia espiral NGC 7479. Descripción similar a fig.A.5.

NGC 7582 Es una galaxia espiral barrada inclinada ($\sim 68.2^\circ$) con un AGN oscurecido rodeado por un poderoso disco de formación estelar y polvo (Morris et al. [1985], Regan & Mulchaey [1999], Riffel et al. [2009]).

El espectro de *Spitzer* muestra las dos emisiones que hemos estado estudiando. El flujo nuclear para el PAH en $11.3\mu\text{m}$ es menor al medido en las aperturas localizadas a una distancia $< 2.5''$. Los flujos de las aperturas a una distancia mayor a la mencionada son decrecen conforme se alejan del núcleo.

Para [SIV] se logró medir flujo nuclear y en algunas aperturas incluida la de *Spitzer*, se mantiene semi-constante en el rango $[10^{-13} : 10^{-12}]$. Podemos decir que la emisión en $11.3\mu\text{m}$ es predominante en todos los espectros.

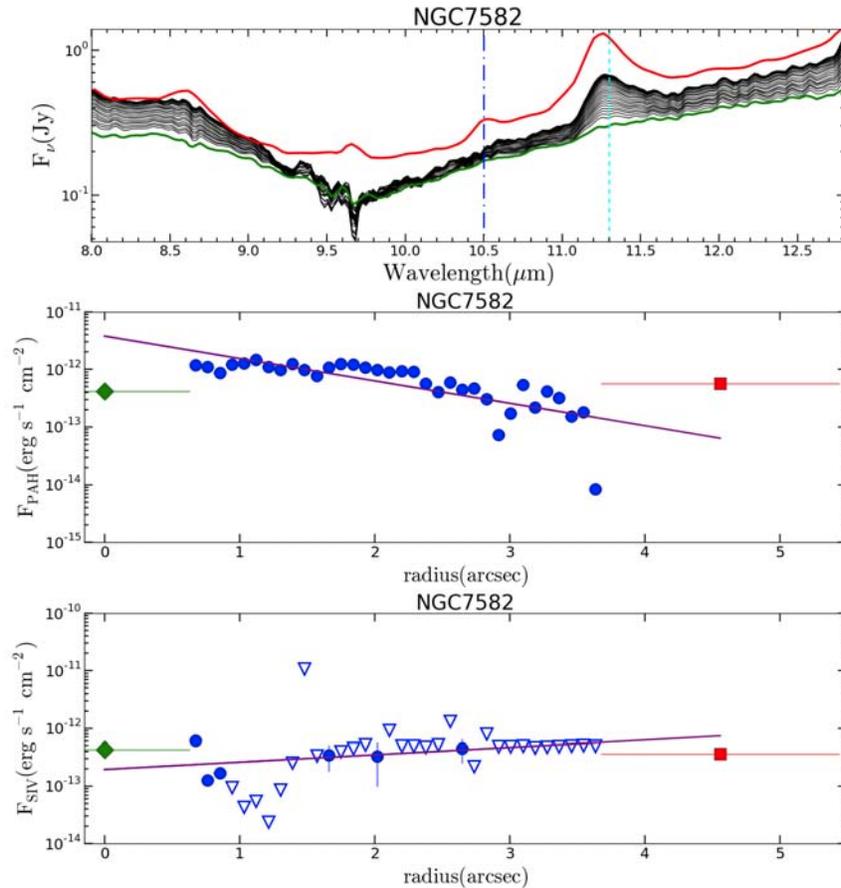


Figura A.23: Espectros y gráficas para la galaxia espiral NGC 7582. Descripción similar a fig.A.5.

Bibliografía

Aalto, S., Monje, R., & Martín, S. 2007, *A&A*, 475, 479

Alexander, D. M., & Hickox, R. C. 2012, *New A Rev.*, 56, 93

Alonso-Herrero, A., Colina, L., Packham, C., et al. 2006, *ApJ*, 652, L83

Alonso-Herrero, A., Sánchez-Portal, M., Ramos Almeida, C., et al. 2012, *MNRAS*, 425, 311

Alonso-Herrero, A., Pereira-Santaella, M., Rieke, G. H., & Rigopoulou, D. 2012, *ApJ*, 744, 2

Alonso-Herrero, A., Ramos Almeida, C., Esquej, P., et al. 2014, *MNRAS*, 443, 2766

Alonso-Herrero, A., Esquej, P., Roche, P. F., et al. 2015, arXiv:1510.02631

D'Ammando, F., Orienti, M., Finke, J., et al. 2015, *MNRAS*, 446, 2456

Antonucci, R. 1993, *ARA&A*, 31, 473

Asmus, D., Hönig, S. F., Gandhi, P., Smette, A., & Duschl, W. J. 2014, *MNRAS*, 439, 1648

Bedregal, A. G., Colina, L., Alonso-Herrero, A., & Arribas, S. 2009, *ApJ*, 698, 1852

Bianchi, S. 2009, XMM-Newton Proposal, 42

Blandford, R. D., & Rees, M. J. 1978, *Phys. Scr*, 17, 265

Blandford, R. D., & McKee, C. F. 1982, *ApJ*, 255, 419

Blandford, R. D., & Rees, M. J. 1992, *American Institute of Physics Conference Series*, 254, 3

Brandl, B. R., Bernard-Salas, J., Spoon, H. W. W., et al. 2006, *ApJ*, 653, 1129

Byrd, G. G., Freeman, T., & Buta, R. J. 2006, *AJ*, 131, 1377

Buta, R. 1990, *ApJ*, 351, 62

Buta, R. J., Byrd, G. G., & Freeman, T. 2004, *AJ*, 127, 1982

Cohen, M., Walker, R. G., Carter, B., et al. 1999, *AJ*, 117, 1864

Colina, L., Sparks, W. B., & Macchetto, F. 1991, *ApJ*, 370, 102

Collison, P. M., Saikia, D. J., Pedlar, A., Axon, D. J., & Unger, S. W. 1994, *MNRAS*, 268, 203

Dale, D. A. 2006, *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, 357, 184

Dasyra, K. M., Ho, L. C., Netzer, H., et al. 2011, *ApJ*, 740, 94

Davies, R. I., Müller Sánchez, F., Genzel, R., et al. 2007, *ApJ*, 671, 1388

Diamond-Stanic, A.M., Rieke, G.H. 2010, *ApJ*, 724, 140

Diamond-Stanic, A. M., & Rieke, G. H. 2012, *ApJ*, 746, 168

Diaz-Santos, T., Alonso-Herrero, A., Colina, L., et al. 2010, *ApJ*, 711, 328

Dicken, D., Tadhunter, C., Axon, D., et al. 2012, *ApJ*, 745, 172

Dultzin-Hacyan, D., Masegosa, J., & Moles, M. 1990, *A&A*, 238, 28

Draine, B. T., & Li, A. 2001, *ApJ*, 551, 807

Elvis, M., Wilkes, B. J., McDowell, J. C., et al. 1994, *ApJS*, 95, 1

Esquej, P., Alonso-Herrero, A., González-Martín, O., et al. 2014, *ApJ*, 780, 86

Fanaroff, B. L., & Riley, J. M. 1974, *MNRAS*, 167, 31P

Ferrarese, L., & Merritt, D. 2000, *ApJ*, 539, L9

For, B.-Q., Koribalski, B. S., & Jarrett, T. H. 2012, *MNRAS*, 425, 1934

Galliano, F., Dwek, E., & Chianial, P. 2008, *ApJ*, 672, 214

Gallimore, J. F., Yzaguirre, A., Jakoboski, J., et al. 2010, ApJS, 187, 172

Geballe, T. R., Lacy, J. H., Persson, S. E., McGregor, P. J., & Soifer, B. T. 1985, ApJ, 292, 500

Genzel, R., Lutz, D., Sturm, E., et al. 1998, ApJ, 498, 579

Gillett, F. C., Merrill, K. M., & Stein, W. A. 1972, ApJ, 172, 367

González Delgado, R. M., Heckman, T., Leitherer, C., et al. 1998, ApJ, 505, 174

González-Martín, O., Rodríguez-Espinosa, J. M., Díaz-Santos, T., et al. 2013, A&A, 553, A35

Gordon, K. D., Engelbracht, C. W., Rieke, G. H., et al. 2008, ApJ, 682, 336

Goulding, A. D., Alexander, D. M., Bauer, F. E., et al. 2012, ApJ, 755, 5

Heckman, T. M. 1980, A&A, 87, 152

Hernán-Caballero, A., Hatziminaoglou, E., 2011, MNRAS, 414, 500

Hernández-García, L., González-Martín, O., Masegosa, J., & Márquez, I. 2014, A&A, 569, A26

Hernández-Ibarra, F. J., Krongold, Y., Dultzin, D., et al. 2015, arXiv:1509.02186

Ho, L. C. 2008, ARA&A, 46, 475

Holtz, J. Z., Geballe, T. R., & Rank, D. M. 1971, ApJ, 164, L29

Hönig, S. F., Smette, A., Beckert, T., et al. 2008, A&A, 485, L21

Hönig, S. F., & Kishimoto, M. 2010, A&A, 523, A27

Hopkins, P. F. and Quataert, E., 2010, MNRAS, 407, 1529

Hopkins, P. F. 2012, MNRAS, 420, L8

Horst, H., Gandhi, P., Smette, A., & Duschl, W. J. 2008, A&A, 479, 389

Horst, H., Duschl, W. J., Gandhi, P., & Smette, A. 2009, A&A, 495, 137

Imanishi, M., Nakanishi, K., Kuno, N., & Kohno, K. 2004, AJ, 128, 2037

- Kewley, L. J., Heisler, C. A., Dopita, M. A., & Lumsden, S. 2001, *VizieR Online Data Catalog*, 213, 20037
- Kaspi, S., Smith, P. S., Netzer, H., et al. 2000, *ApJ*, 533, 631
- Kaspi, S., Maoz, D., Netzer, H., et al. 2005, *ApJ*, 629, 61
- Kinney, A. L., Schmitt, H. R., Clarke, C. J., et al. 2000, *ApJ*, 537, 152
- Komossa, S. 2008, *Revista Mexicana de Astronomia y Astrofisica Conference Series*, 32, 86
- Kormendy, J., & Ho, L. C. 2013, *ARA&A*, 51, 511
- Krongold, Y., Dultzin-Hacyan, D., & Marziani, P. 2003, *Active Galactic Nuclei: From Central Engine to Host Galaxy*, 290, 523
- Koulouridis, E. 2014, *A&A*, 570, A72
- Lacy, M., Storrie-Lombardi, L. J., Sajina, A., et al. 2004, *ApJS*, 154, 166
- Laine, S., & Heller, C. H. 1999, *MNRAS*, 308, 557
- Laurent, O., Mirabel, I. F., Charmandaris, V., et al. 2000, *A&A*, 359, 887
- Lebouteiller, V., Barry, D. J., Spoon, H. W. W., et al. 2011, *ApJS*, 196, 8
- Levenson, N. A., Weaver, K. A., Heckman, T. M., Awaki, H., & Terashima, Y. 2005, *ApJ*, 618, 167
- Lindblad, P. O. 1999, *A&A Rev.*, 9, 221
- Lipari, S. 1994, *ApJ*, 436, 102
- Lynden-Bell, D. 1969, *Astrophysics and General Relativity*, Vol. 1, p. 1 - 57, 1, 1
- Magorrian, J., Tremaine, S., Richstone, D., et al. 1998, *AJ*, 115, 2285
- Maiolino, R., Krabbe, A., Thatte, N., & Genzel, R. 1998, *ApJ*, 493, 650
- Malkan, M. A., & Sargent, W. L. W. 1982, *ApJ*, 254, 22

- Martin, C. L. 1997, *ApJ*, 491, 561
- Martini, P., Regan, M. W., Mulchaey, J. S., & Pogge, R. W. 2003, *ApJS*, 146, 353
- Mason, R. E., Levenson, N. A., Packham, C., et al. 2007, *The Central Engine of Active Galactic Nuclei*, 373, 493
- Mendoza-Castrejón, S., Dultzin, D., Krongold, Y., González, J. J., & Elitzur, M. 2015, *MNRAS*, 447, 2437
- Miles, H. 1994, *Journal of the British Astronomical Association*, 104, 308
- Miniutti, G., Ponti, G., Greene, J. E., et al. 2009, *MNRAS*, 394, 443
- Moorwood, A. F. M., & Oliva, E. 1994, *ApJ*, 429, 602
- Moorwood, A. F. M., van der Werf, P. P., Kotilainen, J. K., Marconi, A., & Oliva, E. 1996, *A&A*, 308, L1
- Morris, S., Ward, M., Whittle, M., Wilson, A. S., & Taylor, K. 1985, *MNRAS*, 216, 193
- Müller Sánchez, F., Davies, R. I., Eisenhauer, F., et al. 2006, *A&A*, 454, 481
- Mullaney, J. R., Alexander, D. M., Goulding, A. D., & Hickox, R. C. 2011, *MNRAS*, 414, 1082
- Muñoz Marín, V. M., González Delgado, R. M., Schmitt, H. R., et al. 2007, *AJ*, 134, 648
- Nenkova, M., Sirocky, M. M., Ivezić, Ž., & Elitzur, M. 2008, *ApJ*, 685, 147
- Netzer, H., Lira, P., Trakhtenbrot, B., Shemmer, O., & Cury, I. 2007, *ApJ*, 671, 1256
- Netzer, H. 2013, *The Physics and Evolution of Active Galactic Nuclei*, by Hagai Netzer, Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2013,
- Oliva, E., Marconi, A., Cimatti, A., & di Serego Alighieri, S. 1998, *A&A*, 329, L21
- Osterbrock, D. E., & Pogge, R. W. 1985, *ApJ*, 297, 166
- Osterbrock, D. E., & Ferland, G. J. 2006, *Astrophysics of gaseous nebulae and active galactic nuclei*, 2nd. ed. by D.E. Osterbrock and G.J. Ferland. Sausalito, CA: University Science Books, 2006,

- Peeters, E., Spoon, H. W. W., & Tielens, A. G. G. M. 2004, *ApJ*, 613, 986
- Peeters, E. 2011, *EAS Publications Series*, 46, 13
- Peterson, B. M. 1997, *An introduction to active galactic nuclei*, Publisher: Cambridge, New York Cambridge University Press, 1997 Physical description xvi, 238 p. ISBN 0521473489,
- Pereira-Santaella, M., Alonso-Herrero, A., Rieke, G. H., et al. 2010, *ApJS*, 188, 447
- Pereira-Santaella, M., Spinoglio, L., van der Werf, P. P., & Piqueras López, J. 2014, *A&A*, 566, A49
- Phillipps, S., & Disney, M. 1983, *MNRAS*, 205, 563
- Prieto, M. A., Reunanen, J., Tristram, K. R. W., et al. 2010, *MNRAS*, 402, 724
- Quillen, A. C., Frogel, J. A., Kenney, J. D. P., Pogge, R. W., & Depoy, D. L. 1995, *ApJ*, 441, 549
- Rank, D. M., Holtz, J. Z., Geballe, T. R., & Townes, C. H. 1970, *ApJ*, 161, L185
- Ramos Almeida, C., Alonso-Herrero, A., Esquej, P., et al. 2014, *MNRAS*, 445, 1130
- Reynolds, C. S., & Nowak, M. A. 2003, *Phys. Rep.*, 377, 389
- Regan, M. W., & Mulchaey, J. S. 1999, *AJ*, 117, 2676
- Rejkuba, M., Minniti, D., Silva, D. R., & Bedding, T. R. 2001, *A&A*, 379, 781
- Reunanen, J., Kotilainen, J. K., & Prieto, M. A. 2002, *MNRAS*, 331, 154
- Rieke, G. H. 1972, *ApJ*, 176, L61
- Riffel, R. A., Storchi-Bergmann, T., Dors, O. L., & Winge, C. 2009, *MNRAS*, 393, 783
- Roche, P. F., Aitken, D. K., Smith, C. H., & Ward, M. J. 1991, *MNRAS*, 248, 606
- Sakamoto, K., Aalto, S., Costagliola, F., et al. 2013, *ApJ*, 764, 42
- Sales, D. A., Pastoriza, M. G., Riffel, R., et al. 2011, *ApJ*, 738, 109

Sales, D. A., Pastoriza, M. G., Riffel, R., & Winge, C. 2013, MNRAS, 429, 2634

Salpeter, E. E. 1964, ApJ, 140, 796

Sandage, A. 1964, ApJ, 139, 416

Sanders, D. B., & Mirabel, I. F. 1996, ARA&A, 34, 749

Sargent, W. L. W., Young, P. J., Lynds, C. R., et al. 1978, ApJ, 221, 731

Shakura, N. I., & Sunyaev, R. A. 1973, A&A, 24, 337

Shi, Y., Rieke, G. H., Hines, D. C., et al. 2006, ApJ, 653, 127

Shi, Y., Ogle, P., Rieke, G. H., et al. 2007, ApJ, 669, 841

Shields, G. A. 1978, Nature, 272, 706

Siebenmorgen, R., Krügel, E., & Spoon, H. W. W. 2004, A&A, 414, 123

Silk, J., & Rees, M. J. 1998, A&A, 331, L1

Smith, J., Draine, B., Dale, D., Moustakas, J., Kennicutt, R., et al. 2007, ApJ, 656, 770

Soifer, B. T., Neugebauer, G., Matthews, K., Egami, E., & Weinberger, A. J. 2002, AJ, 124, 2980

Storchi-Bergmann, T., Rodriguez-Ardila, A., Schmitt, H. R., Wilson, A. S., & Baldwin, J. A. 1996, ApJ, 472, 83

Sulentic, J. W., Bachev, R., Marziani, P., Negrete, C. A., & Dultzin, D. 2007, ApJ, 666, 757

Tacconi-Garman, L. E., Sturm, E., Lehnert, M., et al. 2005, A&A, 432, 91

Tran, H. D. 2001, ApJ, 554, L19

Thuan, T. X. 1984, ApJ, 281, 126

Trippe, M. L., Crenshaw, D. M., Deo, R. P., et al. 2010, ApJ, 725, 1749

Tristram, K. R. W., Meisenheimer, K., Jaffe, W., & Raban, D. 2007, Astronomische Nachrichten, 328, 673

- Tommasin, S., Spinoglio, L., Malkan, M. A., & Fazio, G. 2010, *ApJ*, 709, 1257
- Trouille, L., Barger, A. J., & Tremonti, C. 2011, *ApJ*, 742, 46
- Tully, R. B., Rizzi, L., Shaya, E. J., et al. 2009, *AJ*, 138, 323
- Varenius, E., Conway, J. E., Martí-Vidal, I., et al. 2014, *A&A*, 566, A15
- Verma, A., Lutz, D., Sturm, E., et al. 2003, *A&A*, 403, 829
- Veron-Cetty, M.-P., & Veron, P. 1985, *A&A*, 145, 425
- Veron, P., Goncalves, A. C., & Veron-Cetty, M.-P. 1997, *A&A*, 319, 52
- Véron-Cetty, M.-P., Véron, P., & Gonçalves, A. C. 2001, *A&A*, 372, 730
- Véron-Cetty, M.-P., & Véron, P. 2010, *A&A*, 518, A10
- Villarroel, B., & Korn, A. J. 2014, *Nature Physics*, 10, 417
- Voit, G. M. 1992, *MNRAS*, 258, 841
- Urry, C. M., & Padovani, P. 1995, *PASP*, 107, 803
- Wang, J.-M., & Netzer, H. 2003, *A&A*, 398, 927
- Weedman, D. W., Hao, L., Higdon, S. J. U., et al. 2005, *ApJ*, 633, 706
- Wehrle, A. E., & Morris, M. 1987, *ApJ*, 313, L43
- Weingartner, J. C., & Draine, B. T. 2001, *ApJ*, 563, 842
- Wu, Y., Charmandaris, V., Huang, J., et al. 2009, *ApJ*, 701, 658
- Young, P., Lynds, C. R., Sargent, W. L. W., Boksenberg, A., & Hartwick, F. D. A. 1978, *ApJ*, 222, 450
- Zel'dovich, Y. B. 1964, *Soviet Physics Doklady*, 9, 195
- Zhou, Z.-M., Cao, C., Meng, X.-M., & Wu, H. 2011, *AJ*, 142, 38