



Lic. Gaia Gaspar

Caracterización del Entorno de Agujeros Negros Supermasivos en el Infrarrojo Cercano

Tesis Doctoral

Para obtener el título de

Doctora en Astronomía

Universidad Nacional de Córdoba

Facultad de Matemática, Astronomía y Física

Director

Dr. Rubén Díaz

Co-director

Dr. Damián Mast

Córdoba, Marzo 2020



This work is licensed under a [Attribution-ShareAlike 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/).

This document is set in Palatino, compiled with [pdfL^AT_EX2e](#) and [Biber](#).

The L^AT_EX template from Karl Voit is based on [KOMA script](#) and can be found online:
<https://github.com/novoid/LaTeX-KOMA-template>

Abstract

En el paradigma actual de formación y evolución de galaxias, los agujeros negros supermasivos (ANSM) están presentes en los núcleos de la mayoría de las galaxias, en particular en aquellas que tienen un bulbo estelar suficientemente masivo. La mayor parte del tiempo, el ANSM se encuentra dormido, pero cuando existe masa lo suficientemente cerca para ser capturada, se desencadena la actividad nuclear. El descubrimiento de diversas correlaciones entre las masas de los ANSM y las propiedades de sus galaxias huésped, como la dispersión de velocidades del bulbo, la masa y la luminosidad, así como la evolución cósmica similar de la tasa de Formación Estelar y la tasa de crecimiento de estos ANSM, ha llevado a la conclusión de que los ANSM y su galaxia huésped co-evolucionan. Entender cómo ocurre esta co-evolución es hoy en día uno de los mayores desafíos de la astronomía extragaláctica.

Existen diferentes tipos de AGNs que presentan distintas características espectrales, en particular, se los puede dividir en dos grandes tipos: 1 y 2. Según el modelo unificado, el más aceptado a la fecha, el tipo de un AGN dependerá de si su espectro presenta líneas de emisión anchas, provenientes de regiones muy cercanas al ANSM (< 1 pc) o no. Esto se debe a que el modelo es altamente anisótropo, presentando una región de polvo y gas molecular que rodea el motor central y oscurece la línea de visión en ciertas direcciones. Originalmente el modelo unificado presentaba esta región ópticamente gruesa como un toroide, pero en la última década han aparecido modelos más complejos donde el polvo está distribuido en forma de nubes que orbitan el ANSM y reproducen la variabilidad observada en gran cantidad de AGNs. Las distintas variantes del modelo unificado reposan sus resultados en la existencia de esta estructura de polvo, pero a pesar de los grandes esfuerzos observacionales y numéricos, no ha sido posible encontrar un modelo que reproduzca todas las propiedades observadas. Hemos estudiado una muestra de galaxias a partir de observaciones llevadas a cabo con el espectrógrafo Flamingos-2 de Gemini Sur con el objetivo de caracterizar las estructuras de polvo en los núcleos galácticos y hemos propuesto una variante a los modelos actuales. Además hemos podido, a partir de dichas observaciones, estudiar otras características de estos núcleos galácticos, como

el estado del gas en sus distintas fases y las masas encerradas en unos pocos pc de radio.

Por otro lado, para que los ANSM en los núcleos galácticos hayan alcanzado las masas observadas en el presente ($10^5 - 10^9 M_{\odot}$) necesitan haber acretrado grandes cantidades de material a lo largo de sus vidas. Necesitamos entender cómo se transporta dicho material desde escalas galácticas (varios kpc) hasta las escalas de los discos de acreción (< 0.1 pc). A escalas galácticas, barras, brazos en espiral y perturbaciones inducidas por las interacciones transportan el gas hasta el kpc interior, donde se acumula el gas. A estas escalas, una vez que la fracción gaseosa es lo suficientemente grande, el disco de gas se vuelve autogravitante y vulnerable a inestabilidades gravitatorias, desencadenando la formación de estrellas e inflows.

Estas inestabilidades exhiben diversas morfologías tales como espirales nucleares, barras, anillos y discos que transportan el gas de manera eficiente a los 10 pc interiores, donde otro conjunto de inestabilidades, como espirales adicionales, transporta el gas aún más adentro. Aún nos queda comprender la forma en que el material recorre los últimos pársecs hasta el disco de acreción. Diversos trabajos han propuesto que un descentrado del ANSM, respecto del centro de masa galáctico, causaría la pérdida de la axi-simetría en el material circumnuclear. Esto podría actuar como mecanismo de remoción del momento angular del material circundante con su consecuente acreción en el ANSM. En este sentido, hemos utilizado una muestra observada con el espectrógrafo GNIRS de Gemini Norte para estudiar que tan comunes son los descentrados en los núcleos de las galaxias del universo local.

Si bien con el JWST, ALMA o el ELT (30 m) podremos resolver las escalas del orden de los últimos pc en torno al ANSM durante la próxima década, los telescopios Gemini Norte y Sur poseen hoy en día la capacidad, a través de la espectroscopía con óptica adaptiva en el IR cercano, de estudiar el medioambiente nuclear a escalas de las decenas de pársecs. El Infrarrojo Cercano posee dos principales ventajas: por un lado, presenta un décimo de la extinción interestelar presente en el rango óptico, facilitando así estudios estructurales, cinemáticos y dinámicos en regiones polvorientas como se supone que son los núcleos en crecimiento. Por otro lado, las estrellas más luminosas y por lo tanto jóvenes ven reducida su emisión significativamente respecto de la población estelar más envejecida, lo que permite modelar las componentes más estables de las estructuras galácticas, dejando fuera regiones fortuitas como regiones de formación estelar jóvenes. Finalmente, el polvo calentado por los AGNs emite fuertemente en la banda K , lo que permite trazar las estructuras de polvo que rodean al ANSM nuclear.

Índice general

Abstract	III
1 Núcleos Galácticos Activos	1
1.1 El Modelo Unificado	3
1.2 Observaciones de la estructura de polvo	7
1.3 Geometría y temperatura del polvo	9
1.4 AGNs oscurecidos	16
1.5 La conexión <i>starburst</i> -AGN	18
2 Alimentación del Agujero Negro Super Masivo	21
2.1 Naturaleza transitoria del fenómeno AGN	21
2.2 Alimentación del ANSM	22
2.3 Potenciales no-axisimétricos y núcleos descentrados	23
3 Técnica Observacional	27
3.1 El Infrarrojo Cercano	27
3.2 Gemini: dos gigantes optimizados para el infrarrojo	29
3.3 Reducción de espectros en el NIR	31
4 Búsqueda de descentrados en el NIR	34
4.1 Descripción de la muestra y las observaciones	35
4.2 Técnica de Descomposición de Perfiles Espaciales	37
4.3 Resultados	43
4.3.1 Objetos Individuales	43
4.3.2 Núcleos Descentrados	54
4.3.3 Exceso infrarrojo	57
4.4 Resumen	62
5 El caso de NGC 6300	65
5.1 La galaxia	66
5.2 Las Observaciones	67

Índice general

5.3	Resultados	69
5.3.1	El descentrado del núcleo	74
5.3.2	Polvo caliente en la región circumnuclear	77
5.3.3	Estado del gas molecular	79
5.3.4	Masa del Agujero Negro Supermasivo	80
5.3.5	Perfiles de líneas	82
5.4	Resumen	83
6	Caracterización de núcleos oscurecidos	87
6.1	Selección de la Muestra	87
6.2	Las Observaciones	91
6.3	Resultados y discusión	93
6.3.1	Espectros nucleares en banda K_{long}	93
6.3.2	Polvo caliente en la región nuclear	95
6.3.3	Estado del Hidrógeno en la región nuclear de NGC 4945	100
6.3.4	Masa del agujero negro central de NGC 4945	105
6.3.5	Perfiles Espaciales	109
6.3.6	Imágenes en banda K	109
6.4	Resumen	112
7	Conclusiones	115
	Bibliografía	122

1 Núcleos Galácticos Activos

Los núcleos galácticos son lugares extremos. Los grandes potenciales gravitacionales que dominan las regiones centrales de las galaxias generan en las mismas una amplia variedad de fenómenos violentos, desde grandes flujos de material hacia adentro o hacia afuera, formación estelar en cantidades gigantescas, hasta la existencia de los objetos más enigmáticos y extremos del universo: los agujeros negros super masivos (ANSM).

Los ANSM son objetos oscuros cuyas masas van desde los $10^6 M_{\odot}$ hasta las monstruosas $10^{9.6} M_{\odot}$ en las galaxias más masivas (Cristina Ramos Almeida y Claudio Ricci, 2017). Cada galaxia contiene un sólo ANSM en su centro, salvo raras excepciones donde dos galaxias se han fusionado y aún sobreviven dos ANSM en el centro del remanente (Das et al., 2017). La masa del ANSM de una galaxia correlaciona con la masa de la componente esferoidal de la galaxia (Tremaine et al., 2002, Gebhardt et al., 2000), por lo que se espera que exista algún mecanismo de crecimiento común entre ambas componentes galácticas. Además, los ANSM están presentes a lo largo de toda la historia del universo; el ANSM más lejano que se conoce está a $z = 7.54$ (Bañados et al., 2018), por lo que indudablemente deben haber tenido un rol fundamental en la evolución de las galaxias.

La presencia de un ANSM en una galaxia puede generar grandes cantidades de energía en forma de *jets*, *outflows*, altas luminosidades ($10^{39} < L < 10^{48} \text{ erg s}^{-1}$, y emisión a lo largo de todas las longitudes de onda (Volker Beckmann y Shrader, 2012) con líneas que evidencian la magnitud del pozo de potencial donde el mismo reside/genera.

En la actualidad se acepta que estas manifestaciones energéticas provienen de la presencia de un ANSM en el centro de las galaxias y que toda galaxia suficientemente grande alberga uno. A los núcleos donde el ANSM está acretando material y por lo tanto emitiendo grandes cantidades de energía se los conoce como "Núcleos Activos de Galaxias"(AGNs por sus siglas en inglés). Llegar al entendimiento de que las

1 Núcleos Galácticos Activos

manifestaciones energéticas de los AGNs no eran de origen estelar sino de algún fenómeno nuevo no fue rápido ni directo.

Las líneas de emisión en los núcleos galácticos fueron observadas por primera vez por Fath (1909) en NGC 1068 y M81, cuando aún no se conocía la naturaleza extragaláctica de las galaxias y se las llamaba "nebulosas". El debate estaba en todo lo que pudiera estar: sus tamaños, sus fuentes de energía, sus distancias, sus formas, etc. Por lo tanto no fueron atribuidas a actividad nuclear sino que fueron asociadas con envoltorios de gas que rodeaban las misteriosas nebulosas.

Seyfert (1943) estudió y caracterizó espectros de una muestra de 7 galaxias que poseían un espectro similar al de una estrella tipo G, donde se superponían líneas de emisión similares a los espectros de nebulosas planetarias pero con algunas de ellas presentando bases sorprendentemente anchas. Esto llevó, más tarde, a crear la categoría "*Seyfert*" dentro de los núcleos activos como reconocimiento a éste trabajo pionero. Actualmente, la categoría *Seyfert* contiene a los núcleos que presentan líneas de emisión de alta y baja ionización con una magnitud bolométrica $M_B > -23$ (M. Schmidt y Green, 1983); es decir, que se trata de la cola de baja luminosidad del fenómeno AGN (a menor magnitud, el núcleo se denominará *quasar*). Los núcleos *Seyfert* conocidos se encuentran relativamente cercanos y residen mayormente en galaxias espirales (Elmegreen, 1998).

Desde el descubrimiento de los AGN se les ha dado diversas interpretaciones fenomenológicas. Durante la década de los 90 hubo un amplio debate sobre la posibilidad de que un cúmulo de estrellas lo suficientemente masivo pudiera generar las características observadas en los AGNs (R. Terlevich et al., 1995). Finalmente las observaciones mostraron que las características inusuales presentadas por los AGNs, como el duro continuo que se extiende ampliamente en el UV, las altas emisiones en rayos X y las componentes extremadamente anchas en las líneas permitidas no pueden proceder de configuraciones estelares sino que se necesita un ambiente extremadamente violento como el pozo de potencial de un ANSM y su disco de acreción para producirlas (ver por ejemplo, Terlevich y Cid Fernandes, 2003).

Además del problema de la naturaleza del motor que genera las grandes cantidades de energía observadas, los AGNs presentan distintas características que los dividen en subclases: Radio Galaxias, Quasares, Blazares, núcleos *Seyfert* y LINERS (el último tipo se encuentra actualmente en debate; ver por ejemplo, Singh et al., 2013). Estas subclases pueden ser agrupadas según dos criterios. (1) La luminosidad, que separa a los núcleos en dos clases: alta y baja luminosidad, y la presencia o ausencia de líneas anchas de emisión: tipos 1 y 2 respectivamente. Así, por ejemplo, un núcleo

1 Núcleos Galácticos Activos

Seyfert de tipo 1 es un núcleo activo de baja luminosidad con líneas anchas y un núcleo *Seyfert* 2 es un núcleo activo de baja luminosidad sin líneas anchas. Los anchos de las líneas angostas son típicamente de 500 km s^{-1} , más anchas que las líneas de emisión producidas por formación estelar u otros fenómenos, con anchos típicos de 200 km s^{-1} . Las líneas anchas, observadas en los AGN de tipo 1 pueden presentar anchos de hasta 10000 km s^{-1} . Por otro lado, algunos núcleos activos presentan *radio-jets* que emiten en varias longitudes de onda, no entraremos en detalle sobre éste tipo de núcleos ya que escapan al objetivo de éste trabajo. Para más detalle sobre las características de los distintos tipos de núcleos activos, consultar (Osterbrock y Ferland, 2006).

En la década del 80, observaciones de líneas anchas en el espectro en luz polarizada de un núcleo tipo *Seyfert* 2 (NGC 1068, R. R. J. Antonucci y J. S. Miller, 1985) llevó a al modelo de unificación que es a la fecha aceptado y que se describe en la siguiente subsección.

En el universo local, los quasars son raros y solo se detectan en un 0.2% de las galaxias. Los núcleos activos de luminosidad moderada (e.g. *Seyferts*) son también raros y se encuentran entre el 1% y 10% de las galaxias, según el tipo de AGN. Sin embargo, existe un rango de redshifts ($2 \leq z \leq 3$) en el cual los quasars eran hasta 10000 veces mas frecuentes que en el universo local. Puesto que los ANSM se suponen estables (no se destruyen o evaporan en tiempos comparables a la edad del universo), entonces muchos ANSM deben estar inactivos en los núcleos de muchas galaxias, probablemente las mas masivas (esto se conoce como el argumento de Soltan (Soltan, 1982)).

En la actualidad se sabe que muchos AGNs están fuertemente oscurecidos y por lo tanto no son detectados en los grandes relevamientos ópticos, habiendo estimaciones de que éstos pierden la mitad de los AGNs (Goulding y Alexander, 2009). Esto afecta la fracción AGNs/galaxias normales y requiere observaciones multibanda para realizar censos completos de núcleos activos en el universo local y a alto *redshift* (Nagar et al., 2002; Riffel, Rodríguez-Ardila y Pastoriza, 2006; C. Ramos Almeida, Pérez García y Acosta-Pulido, 2009).

1.1. El Modelo Unificado

Los modelos actuales proponen como fuente central un ANSM que está siendo alimentado por gas circumnuclear. El disco de acreción es la fuente del continuo duro

1 Núcleos Galácticos Activos

que se observa en los AGN de tipo 1 y que no puede ser explicado por conglomerados de estrellas masivas. El gas se encuentra en forma de nubes que orbitan el núcleo y poseen distintas densidades y velocidades dependiendo de la región que ocupen. La región de donde provienen las líneas anchas se denomina BLR por sus siglas en inglés (*Broad Line Region*) y la región de donde provienen las líneas angostas se denomina NLR (*Narrow Line Region*). Espacialmente, el agujero negro y su disco de acreción estarían rodeados por la BLR que a su vez estaría embebida en la NLR, con una transición continua en densidad que las une. La BLR es pequeña (diámetro $d \sim 0.1$ pc) y densa (en promedio $n_e \sim 10^{10} \text{ cm}^{-3}$). Su campo de velocidades parece tener una componente rotacional dominante, probablemente se acerca más a una forma de disco que a un esferoide pero la evidencia no es concluyente, esta región de gas y polvo ópticamente gruesa se iría transformando gradualmente en un toroide molecular denso y frío a la altura del ecuador del ANSM mientras que permanecería ópticamente delgada hacia la dirección del eje de rotación. La NLR es mucho mayor ($d \sim 10^2$ pc) y mucho menos densa ($n_e \sim 10^4 \text{ cm}^{-3}$), su campo de velocidades presenta una contundente velocidad radial aunque no es claro si su forma es tipo disco o esferoide. Las paredes internas del toroide coliman la radiación del disco de acreción y los vientos del ANSM dándole forma cónica a la NLR (Cristina Ramos Almeida y Claudio Ricci, 2017), formando los llamados "conos de ionización" que pueden verse a ambos lados del plano de simetría del ANSM si una baja extinción lo permite.

El Modelo Unificado (MU) propone que todos los AGNs son en realidad de la misma naturaleza, como se describió más arriba, y que la mayoría de las diferencias entre ellos pueden ser explicadas sobre bases geométricas (Fig. 1.1). Esto es, dado un AGN, al ser observado de frente ($i \sim 0^\circ$), si hubiera presente un *jet* se detectará un núcleo de tipo *Blazar*, cuyo espectro no tiene características debido a que la intensidad del *jet* diluye las líneas tanto de emisión como de absorción. Al aumentar la inclinación, se detectará un núcleo con líneas de emisión anchas, un *Quasar* o *Seyfert* de tipo 1. Al aumentar más la inclinación se corta la línea de visión a la BLR y sólo se observan líneas angostas, teniendo así un núcleo *Quasar* o *Seyfert* de tipo 2.

El elemento encargado de generar estas diferencias en las características de los AGNs es un toroide de gas molecular frío, ópticamente grueso con un radio de $r \leq 10$ pc (Cristina Ramos Almeida y Claudio Ricci, 2017). Esta es una de las hipótesis fundamentales del Modelo Unificado ya que es el encargado de generar la anisotropía en la emisión de estos núcleos y por lo tanto hace posible el esquema de unificación.

El modelo base de unificación ganó amplia aceptación cuando en R. R. J. Antonucci

1 Núcleos Galácticos Activos

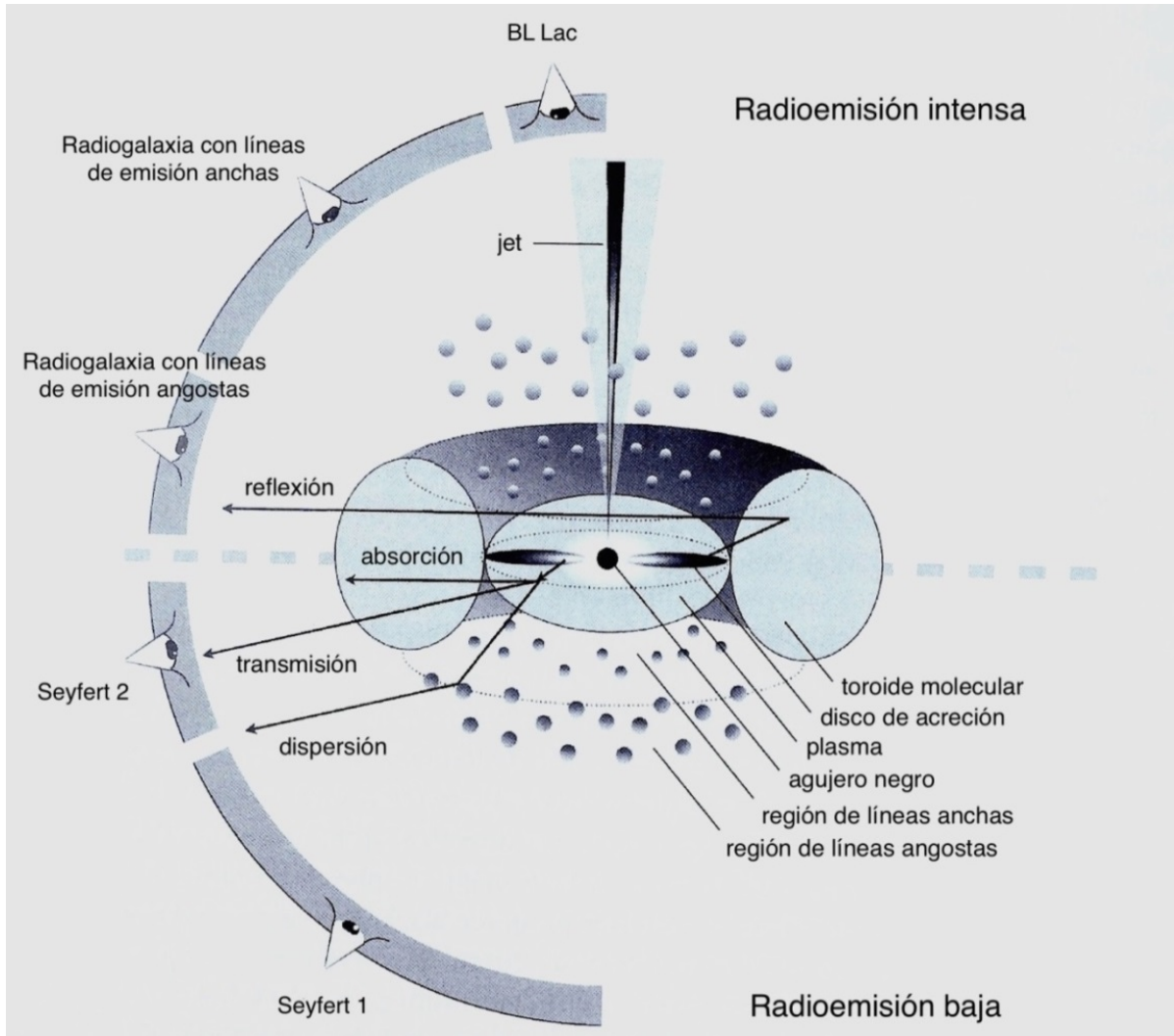


Figura 1.1: Representación del Modelo Unificado: un núcleo activo consiste en un ANSM acretando material, la radiación producida en el disco de acreción es bloqueada en mayor o menor proporción según la dirección desde la cual se lo observa por un toroide de gas molecular y polvo. Esta es la principal causa de las diferencias entre los distintos tipos de AGN, además del hecho de que algunos presentan jets en radio y otros no. La representación no está a escala debido a la enorme diferencia de tamaño entre el disco de acreción, la BLR y la NLR (varios órdenes de magnitud de diferencia). (Figura adaptada de Volker Beckmann y Shrader (2012))

1 Núcleos Galácticos Activos

y J. S. Miller (1985) midieron en un espectro de la galaxia NGC 1068 (*Seyfert 2*) líneas de Balmer (H α) con componente ancha en luz polarizada, evidenciando que en el núcleo de esta galaxia se oculta una genuina BLR. En éste caso, la luz de la BLR no es detectable en luz directa sino que llega a nosotros por dispersión producida en electrones en la NLR que desvía la luz en la dirección de la visual, produciendo además su polarización en el proceso de dispersión. Las líneas angostas no presentan emisión en luz polarizada y por lo tanto se sabe que la NLR está siendo observada directamente. Alrededor de un 40 % de las galaxias *Seyfert 2* presentan emisión ancha en luz polarizada, y éstas coinciden justamente con los AGN cuya fuente central es más poderosa, evidenciando una correlación entre detectabilidad de la BLR y tasa de acreción del agujero negro.

Además, los modelos para los núcleos activos deben reproducir la "distribución espectral de energía" (SED, por sus siglas en inglés). La SED de un objeto se construye a partir de puntos fotométricos a lo largo del mayor rango espectral posible y permite identificar qué componente de un AGN contribuye a cada región de la SED. En la Fig. 1.2 se presenta la SED para SDSS J1148 + 5251 extraída de Dwek, Galliano y Jones (2007). Al ser un AGN muy luminoso, este objeto representa un buen caso para estudiar la SED. En dicha Figura se detallan las distintas componentes que contribuyen en distintas longitudes de onda entre 0.1 y 1000 μm . En la región infrarroja la SED está compuesta por "bultos", uno con pico en 3 – 5 μm (longitudes de onda de reposo) cuyo origen es el polvo calentado por el AGN. El segundo bulto es emitido por polvo calentado por el *starburst* y debido a que el mismo se encuentra a menor temperatura, el pico de emisión se corre hacia longitudes de onda más largas, ya adentrándose en el infrarrojo lejano (FIR por sus siglas en inglés). En el trabajo de Dwek, Galliano y Jones (2007) y por lo tanto en la Fig. 1.2, no se hace referencia al polvo encontrado en la región polar de los AGNs y que aporta su emisión mayormente en el MIR. Esto se debe a que para el año de publicación de este trabajo (2007), esta componente de polvo nuclear aún no había sido detectada. Sin embargo es una componente importante a tener en cuenta a la hora de modelar la distribución de polvo, como se verá más adelante. En longitudes de onda corta, en las bandas del óptico y el UV, este núcleo presenta emisión no-térmica proveniente del disco de acreción. En los núcleos de tipo 2 como los *Seyfert 2*, esa componente no es detectable (debido al oscurecimiento que le produce el toroide, según el MU) y estas bandas espectrales estarán dominadas por emisión estelar como en las galaxias inactivas. En la Sec. 1.3 se da un detalle de como estas características de la SED restringen los modelos para la geometría y temperatura del polvo.

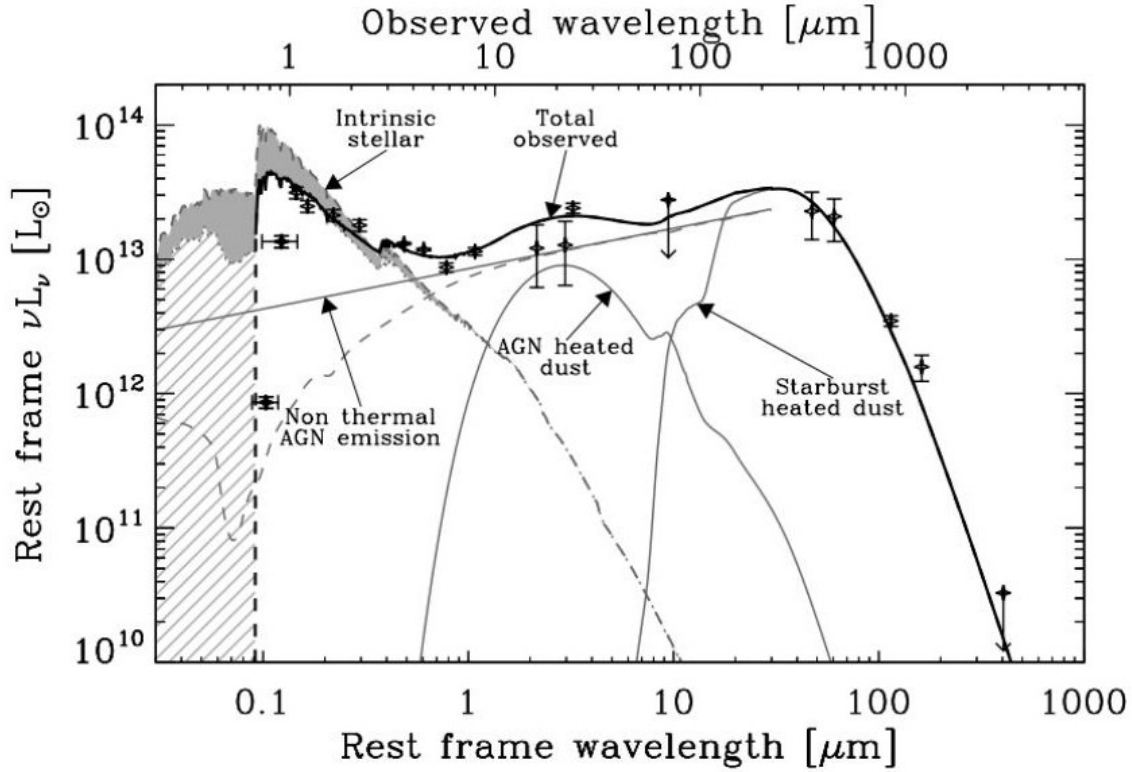


Figura 1.2: Distribución espectral de energía para el objeto SDSS *J1148 + 5251* extraída de Dwek, Galliano y Jones (2007). Se muestra la contribución a la SED de cada componente del AGN. De particular interés para este trabajo es el exceso con pico en $3 - 5\mu\text{m}$ (longitudes de onda de reposo) que se origina en el polvo calentado por el AGN.

1.2. Observaciones de la estructura de polvo

El toroide de gas molecular y polvo propuesto por el Modelo Unificado es la pieza fundamental de la idea de unificación para los distintos tipos de AGN. Se estima que su radio es ≤ 10 pc (Cristina Ramos Almeida y Claudio Ricci, 2017). Debido a su reducido tamaño, hay pocas evidencias observacionales directas. En las últimas décadas ha habido muchas detecciones de emisión MIR resuelta en las centenas de pc centrales utilizando interferometría infrarroja; sin embargo, estas observaciones no alcanzan a resolver las escalas del esperado toroide (aunque muchos de sus autores proclaman haberlo detectado). Por lo tanto, este tipo de observaciones no serán consideradas en esta sección pero el lector puede dirigirse a Leonard Burtscher et al. (2016) o Spinoglio y Fernández-Ontiveros (2019) para un buen resumen sobre este tema; además, en la Sec. 1.3 se hará una descripción de cómo estas detecciones impactaron en el MU. A continuación se intenta dar una descripción de las detecciones que han sido atribuidas a un toroide de polvo y gas molecular en las últimas décadas,

1 Núcleos Galácticos Activos

realizadas a partir de datos con mayor resolución angular alcanzada con instrumental en el régimen del sub-mm y radio.

- Utilizando interferometría en el NIR con el telescopio *Keck*, M. Kishimoto, S. F. Hönig, R. Antonucci, Kotani et al. (2009) encuentran anillos alrededor de los ANSM para cuatro galaxias NGC 4151, NGC 4051, Mrk231 y IRAS 13349. Los radios de las estructuras encontradas varían entre 0.032 y 0.92 pc.
- En 2016, dos grupos presentaron observaciones de ALMA de una estructura que asociaron al toroide de NGC 1068, la galaxia prototipo de la clasificación *Seyfert 2*. Por un lado, S. García-Burillo, F. Combes, C. Ramos Almeida et al. (2016) presentan imágenes en la línea de emisión CO ($J = 6 - 5$) y en el continuo subyacente en $432 \mu\text{m}$ con una resolución de 4 pc. A partir de las imágenes encuentran una estructura de polvo de 7 ± 1 pc de diámetro que al ser mapeada en CO ($6 - 5$) resulta un poco más grande (~ 10 pc). Los autores asocian esta estructura al toroide del MU. Por otro lado, en el mismo año Gallimore et al. (2016) encuentran, para la misma galaxia, una estructura de 7×12 pc utilizando también imágenes de la línea CO ($J = 6 - 5$) con ALMA, confirmando así el anterior hallazgo.
- F. Combes, S. García-Burillo, Audibert et al. (2019) presentan observaciones CO ($3 - 2$) de $0.''14$ de resolución con ALMA para una muestra de núcleos cercanos de tipo 2 de baja luminosidad para los cuales alcanzan resoluciones de $4 - 9$ pc. Para 6 de las galaxias estudiadas (NGC 613, NGC 1326, NGC 1365, NGC 1566, NGC 1672 y NGC 1808) encuentran un disco de gas molecular desacoplado en morfología y dinámica del disco principal de la galaxia. Los autores asocian estos discos al toroide de gas molecular predicho por el MU a pesar de que describen un amplio rango en radios ($6 - 27$ pc) y sus inclinaciones no coinciden con las esperadas para núcleos de tipo 2.
- Carilli et al. (2019) reportan la detección de una estructura nuclear elongada, perpendicular al *jet* y de 528 pc de tamaño total en la galaxia Cygnus-A utilizando datos en $18 - 48$ GHz tomados con el *Jansky Very Large Array*. A pesar de su gran tamaño, los autores proclaman que esta estructura es el toroide del AGN y presentan un estudio de su espectro.
- Usando la técnica de Mapeo de Reverberación (que utiliza la variabilidad de una fuente para estimar su tamaño) y a partir de espectroscopía en el infrarrojo cercano (bandas *J*, *H* y *K*) tomada con el espectrógrafo *SpeX* en el *NASA Infrared Telescope Facility (IRTF)* Landt et al. (2019) encontraron una estructura que parece ser un toroide de polvo en el núcleo de NGC 5548 con una temperatura de ~ 1450 K y una extensión de ~ 70 días luz (0.06 pc).

1 Núcleos Galácticos Activos

- Alonso-Herrero, C. Ramos Almeida et al. (2011) reportan una estructura oscurecedora nuclear a partir de la intensidad del CO (2 – 1), medida en datos de ALMA, para la galaxia NGC 5643, una de las galaxias que hemos observado con Flamingos-2 en éste trabajo (ver Capítulo 4). La estructura reportada tiene $26 \text{ pc} \times 20 \text{ pc}$ y los autores la asocian a un disco nuclear de polvo, ya que una estructura de éste tipo había sido sugerida previamente por otros autores. Sin embargo, Alonso-Herrero, C. Ramos Almeida et al. (2011) hacen una nota de precaución de que la estructura que detectan en CO (2 – 1) también podría ser interpretada como una barra nuclear.
- En el trabajo de Gravity Collaboration et al. (2020)¹ se logró construir una imagen de la estructura de polvo caliente en NGC 1068 con una resolución de 0.2 pc. Para esto utilizaron interferometría en la banda *K* realizada con cuatro telescopios de 8 m y cuatro telescopios auxiliares de 1.8 m del VLT. La Fig. 1.3 muestra la imagen que este equipo logró obtener, la cual cubre $\sim 5 \text{ pc} \times 5 \text{ pc}$ y muestra solamente los grumos de polvo que emiten en banda *K*, es decir, que de haber polvo más frío no sería visible en esta imagen. Como se puede ver, la distribución del polvo caliente es grumosa y su factor de llenado es muy chico.

Estas detecciones son muy prometedoras y apuntan a que en la próxima década el antiguamente llamado "toroide" de los AGN debería ser finalmente observado directamente y la estructura de polvo nuclear develada.

1.3. Geometría y temperatura del polvo

El Modelo Unificado ha enfrentado varios desafíos desde su postulación; sin embargo, indudablemente la geometría del material absorbedor ha sido uno de los más importantes.

La idea original de un toroide homogéneo con forma de dona ha quedado obsoleta. Ya en 1988, Krolik y Begelman (1988) descarta la distribución homogénea en base a la temperatura que tendría el polvo. Proponen que el material tendría velocidades aleatorias mayores a 100 km s^{-1} , la velocidad termal que corresponde a estas velocidades es de 10^6 K , mucho mayor que la temperatura de sublimación del polvo ($\leq 2000 \text{ K}$). En base a esto, proponen que el toroide debe estar formado por nubes discretas ópticamente gruesas.

¹<https://www.eso.org/sci/facilities/paranal/instruments/gravity/overview.html>

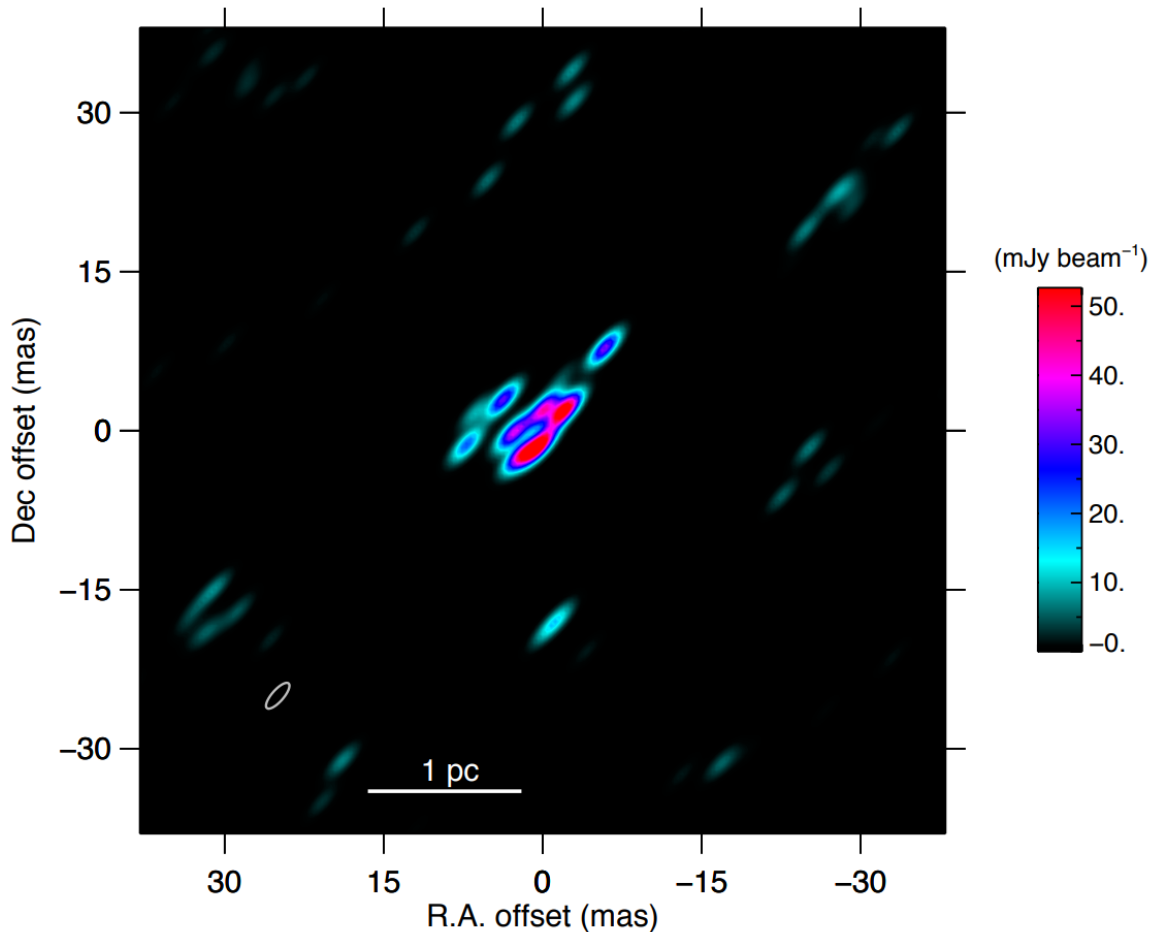


Figura 1.3: Imagen interferométrica en banda K extraída de Gravity Collaboration et al. (2020). Se muestra la región nuclear de NGC 1068, la galaxia prototipo del tipo *Seyfert 2*. Se puede ver como la estructura de polvo caliente es de tipo grumosa. Los ejes están en milisegundos de arco.

Este escenario es reforzado por observaciones en rayos X, donde se han observado galaxias que han cambiado drásticamente su columna absorbadora de Hidrógeno (N_H) para pasar de núcleos no-oscurcidos en X ("*Compton-thin*") a oscurecidos ("*Compton-thick*") y viceversa (por ejemplo, Elvis et al. (2004), Puccetti, Fiore et al. (2007), Grupe et al. (2019)). Estos AGNs son llamados *Changing look* y hasta la fecha hay 70 conocidos (Wang et al., 2019), uno de ellos es el núcleo de NGC 6300, la galaxia que estudiamos en el capítulo 3 de esta tesis (M. Guainazzi (2002)). Una explicación para este cambio en el oscurecimiento del núcleo es que un toroide compuesto por nubes - en órbita en torno al ANSM - cambia su columna absorbadora dependiendo de el paso fortuito de distintas nubes por la línea de la visual (Giorgio Matt, Matteo Guainazzi y Maiolino, 2003, Marinucci et al., 2016, C. Ricci, Bauer et al., 2016 entre otros.)

1 Núcleos Galácticos Activos

En la última década se han propuesto distintos modelos de toroide que vienen a reemplazar el modelo original, sin eliminar su esencia: la de un material que debido a la anisotropía de su distribución, oscurece el motor nuclear para ciertas líneas de visión.

Spinoglio y Fernández-Ontiveros (2019), enuncian tres características que debe tener un toroide para satisfacer las necesidades del MU:

- Debe ser capaz de bloquear la radiación de la BLR. Esto pone restricciones tanto en la composición del polvo como en el ángulo de apertura del toro. El ángulo de apertura dará, por consideraciones geométricas, la fracción relativa entre AGNs de tipo 1 y 2.
- Debe colimar la radiación ionizante del AGN para producir los conos de gas ionizado que conforman la NLR.
- Debe permitir la alimentación del ANSM a través de procesos de acreción y servir como reservorio de material.

La fracción entre tipos 1 y 2 es dependiente de la luminosidad de los AGNs (la fracción de AGNs de tipo 2 disminuye con la luminosidad, Tueller et al., 2008) y está fuertemente afectada por la fracción de AGNs oscurecidos, que no estamos viendo, que se estima que podría ser tan alta como 40% de la población total de AGNs (C. Ricci, Ueda et al., 2015). Por lo que en la actualidad sigue estando en debate.

Además, el modelo que describa la distribución de polvo nuclear debe reproducir la SED presentada en la Subsección 1.1 (Fig. 1.2). Esto es, debe modelar los excesos infrarrojos y bloquear el continuo producido por el disco de acreción para los AGNs de tipo 2.

Según González-Martín et al. (2019), los distintos modelos de toroides propuestos para esta estructura varían en:

- La distribución del polvo: homogéneo (por ejemplo el presentado por Fritz, Franceschini y Hatziminaoglou, 2006), formado por nubes o grumoso por ejemplo, el modelo presentado por Maia Nenkova et al. (2008) (Fig. 1.4), o una composición entre los dos anteriores, por ejemplo, el "Modelo de disco grumoso y flujo saliente" de S. F. Hönig y M. Kishimoto, 2010.
- La forma de la estructura polvorienta: toroidal o en forma de vientos ("outflows").
- la composición química y el tamaño de los granos de polvo: granos de grafito, composición estándar del medio interestelar, granos grandes con composición del medio interestelar o silicatos amorfos de carbono.

1 Núcleos Galácticos Activos

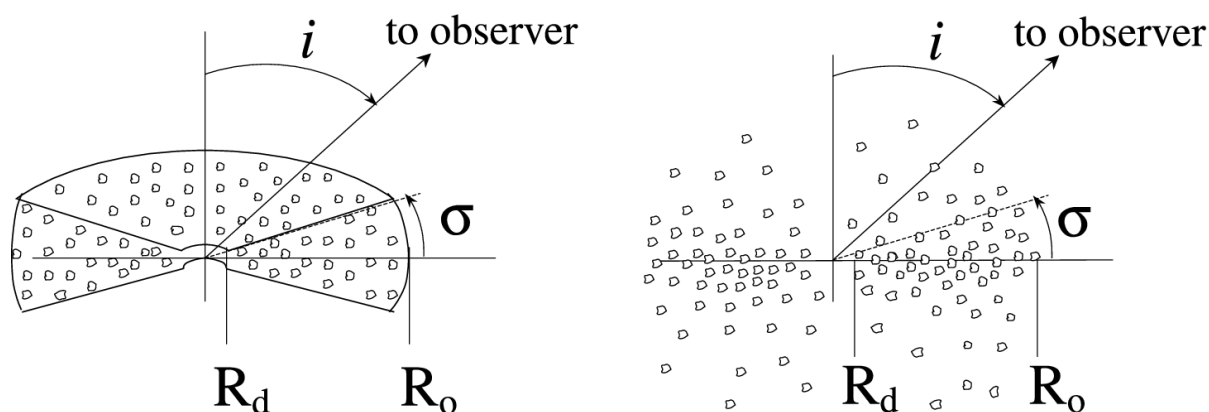


Figura 1.4: Figura extraída de Maia Nenkova et al. (2008). Ambos esquemas representan modelos de toroides grumosos. El factor de llenado del toroide definirá el oscurecimiento que el mismo le producirá a la fuente central. El esquema de la izquierda representa un modelo donde la estructura termina de forma abrupta en un radio determinado mientras que el esquema de la derecha representa una distribución de nubes cuyo borde tiene forma *gaussiana*. En ambos casos, el ángulo i indica la inclinación con la que el observador está viendo al AGN.

Analizar en detalle estos modelos escapa del objetivo de éste trabajo, para ver citas y detalles sobre los mismos remitirse al trabajo de González-Martín et al. (2019).

En los últimos años ha aparecido fuerte evidencia de polvo en la región polar de los AGNs, es decir, sobre el eje de simetría del toroide, por encima del ANSM (Raban et al., 2009, Reunanen, Prieto y Siebenmorgen, 2010, S. F. Hönig, M. Kishimoto et al., 2012, Tristram et al., 2014). Todos estos trabajos encuentran la componente polar utilizando interferometría en el infrarrojo medio (MIR por sus siglas en inglés), el único método que se tiene hasta la actualidad para lograr resoluciones por debajo de los 10 pc. Estos trabajos interpretan esta componente de polvo como un viento en la NLR que debe ser ópticamente delgado pero sin embargo contribuye hasta un 60% del flujo en el MIR (S. F. Hönig, M. Kishimoto et al., 2012). López-Gonzaga et al. (2014) describen el polvo polar en una escala de 5 – 10 pc desde el núcleo en NGC 1068 y proponen que esta componente podría residir en las paredes del cono de ionización y contribuye entre un 46% (en $8 \mu\text{m}$) y un 73% (en $10 \mu\text{m}$) de la emisión en el MIR. De hecho, al contrario de lo esperado, la componente polar del polvo domina la emisión en longitudes de onda del MIR, mientras que la emisión NIR es radiada principalmente por la componente solidaria al plano de simetría del ANSM, es decir, en la región del clásico toroide (ver por ejemplo, Asmus, 2019).

Asmus, S. F. Hönig y Gandhi (2016) hicieron el estudio con una muestra estadísticamente significativa en el MIR de 149 núcleos *Seyfert*, con el objetivo de determinar la fracción de AGNs que presentan emisión extendida en la región polar. Encontraron

1 Núcleos Galácticos Activos

que, de las 149 galaxias, 18 presentan clara emisión proveniente de la región polar en escalas desde los 10 pc hasta algunos cientos de pc, mucho más extendida que el tamaño del toroide propuesto por el Modelo Unificado. Proponen también que el mejor candidato para esta emisión es el polvo que reside en las paredes del cono de ionización o nubes de la NLR.

Sebastian F. Hönig y Makoto Kishimoto (2017) presentan un modelo motivado por las observaciones de polvo en la región polar de los AGNs, llamado CAT3D-WIND. Este modelo contiene dos estructuras diferenciadas: (1) Un disco de polvo perpendicular al eje del ANSM, el cual contribuye predominantemente a la emisión NIR y es similar a un toroide de tipo grumoso. (2) Un viento polvoriento en la dirección polar modelada como un cono hueco y que contribuye predominantemente a la emisión MIR. La componente toroidal distribuye nubes de polvo con una ley de potencia $\propto r^a$ donde r es la distancia desde el ANSM. La distribución vertical es una *gaussiana* de la forma $\propto \exp(-z^2/(2(hr)^2))$, donde h es la altura y z es la distancia vertical al plano medio. r y z están en unidades del radio de sublimación del polvo r_{sub} . El oscurecimiento que produce esta estructura estará dada por la cantidad promedio de nubes a lo largo de la visual. Hasta acá el modelo no difiere demasiado de un modelo de toroide clásico, la novedad está en la incorporación de la componente de polvo polar. Esta estructura está caracterizada por tres parámetros: la distribución radial de nubes de polvo en el viento a_w , el semi-ángulo de apertura del viento θ_w , y el ancho angular σ_θ . Además, el modelo toma en cuenta las temperaturas de sublimación de los distintos tipos de grano y, por lo tanto, una de sus predicciones es que las nubes de la región polar no contienen silicatos ni granos pequeños pues son completamente sublimados a las temperaturas alcanzadas.

Finalmente, otra componente que puede estar causando extinción de la fuente nuclear de los AGNs, y por lo tanto aportando a la dicotomía *Seyfert 1 / Seyfert 2* es el polvo del medio interestelar (MI). Como se verá en la Sec. 1.4, esta extinción afecta mayormente a las galaxias con grandes inclinaciones y puede producir clasificaciones erróneas de los AGNs (Nagar et al., 2002, C. Ramos Almeida, Pérez Garcéa et al., 2008, Goulding y Alexander, 2009, Timothy M. Heckman y Best, 2014).

El polvo del medio interestelar contiene típicamente una composición de granos de grafito, silicatos y carbono amorfo (Dwek, Galliano y Jones, 2007). La proporción en la que se encuentren dependerá de la región estudiada y de la temperatura a las que está sujeta el polvo, por ejemplo cuando la temperatura alcanza los 1200 K los silicatos son destruidos, mientras que los granos de grafito sobreviven hasta 1900 K (Sebastian F. Hönig y Makoto Kishimoto, 2017).

1 Núcleos Galácticos Activos

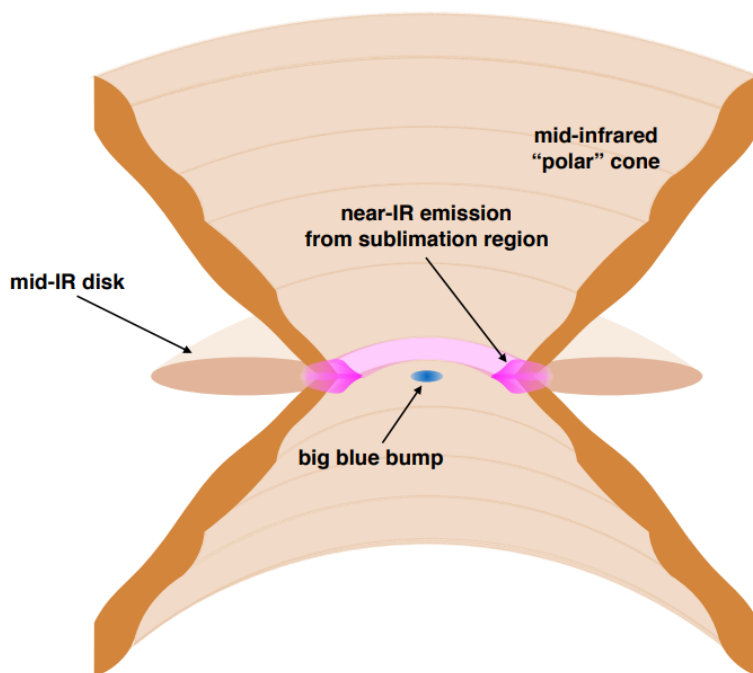


Figura 1.5: Modelo de distribución del polvo en un AGN presentado por Sebastian F. Hönic y Makoto Kishimoto (2017). El esquema muestra el cono de ionización del AGN donde los autores proponen que se encuentra el polvo que contribuye a la componente polar ampliamente observada en el MIR. La emisión NIR proviene de la región interna de un toroide tipo grumoso similar al presentado en la Fig. 1.4. La diferencia aquí es que los autores proponen un toro con dos regiones diferenciadas según su temperatura y, por lo tanto, con sus respectivos picos de emisión. El punto central nombrado "big blue bump" se refiere a la prominencia en el rango azul-UV que presentan los espectros de AGNs; la cual es demasiado empinada como para ser producida por atmósferas estelares y se asume que es emisión proveniente de la superficie del disco de acreción del ANSM. La figura fue extraída de Sebastian F. Hönic (2019)

El polvo puede ser calentado por tres fenómenos distintos: radiación de estrellas O-B recién formadas embebidas en el polvo, radiación de campo de la galaxia o fotones UV provenientes del disco de acreción de un ANSM. En el último caso, la temperatura del polvo dependerá de la disponibilidad de fotones UV (Lehnert y Timothy M. Heckman, 1996). El polvo calentado por actividad *starburst* tiene su pico de emisión en el MIR, como se puede ver en la Fig. 1.2 y sus temperaturas son ≤ 600 K (Marshall et al., 2018). El polvo calentado por la radiación de campo de la galaxia emite en el infrarrojo lejano (FIR por sus siglas en inglés) y su máximo de emisión se puede encontrar entre $10 - 120 \mu\text{m}$ (Judith S. Young et al., 1989), que corresponde a temperaturas $10 - 15$ K (de Jong y Brink, 1987).

1 Núcleos Galácticos Activos

El polvo calentado por emisión AGN o detectado en los núcleos galácticos varía entre $\sim 800 - 1500$ K y tiene su pico de emisión en el límite entre el infrarrojo cercano y medio, en $3 - 5 \mu\text{m}$. En la Fig. 1.6 se muestra un ajuste de SED para la región NIR+MIR de la galaxia NGC 1068 (*Seyfert 2*). Allí se puede ver que la emisión del polvo en banda K es bien ajustada por una temperatura de 1500 K y se distingue claramente el pico de emisión en esta región espectral. A continuación se dan algunos ejemplos de determinación de temperatura del polvo en núcleos galácticos:

- Glass y Moorwood (1985), utilizando colores JHK, encuentran para NGC 7582 una temperatura de entre 800 y 1300 K dependiendo de la composición química del polvo en emisión.
- Alonso-Herrero, Simpson et al. (1998) estudiaron una muestra de galaxias *Seyfert* a partir de imágenes NIR (JHK) tomadas con la cámara IRCAM3 en el *United Kingdom Infrared Telescope* de 3.9 m. Para NGC 1068, Mrk 573, NGC 2992 y NGC 3081, encuentran que, la emisión en estas bandas dentro de los 0.5 kpc centrales puede ser explicada por una mezcla de población estelar vieja y de polvo con una temperatura de ~ 1200 K.
- Para NGC 1068, Raban et al. (2009), a partir de interferometría infrarroja con *MIDI*, midieron dos temperaturas para la estructura de polvo nuclear: en la estructura interna de 1.35×0.45 pc midieron ~ 800 K y en la región más externa, de 3×4 pc, una temperatura de ~ 300 K.
- Durré y J. Mould (2018) utilizaron un espectro en banda K tomado con *SINFONI* en el *VLT* de la galaxia NGC 5728 para derivar una temperatura de 870 K en el pixel central, correspondiente al pico de intensidad de la banda.
- M. Kishimoto, S. F. Hönig, R. Antonucci, Barvainis et al. (2011) utilizaron interferometría en banda K con el interferómetro Keck de 5 núcleos de tipo *Seyfert 1*. A partir de modelar las SED encuentran que la temperatura de polvo que mejor ajusta la emisión medida para núcleos *Seyfert 1* es de $1200 - 1500$ K.
- L. Burtscher et al. (2015) utilizaron datos de archivo de 51 AGNs locales (≤ 60) Mpc con resolución media de 30 pc y encuentran una temperatura media de 1292 ± 46 K para núcleos de tipo *Seyfert 1* y de 887 ± 68 K para núcleos de tipo 2.

A partir de estos antecedentes se puede decir, en resumen, que para núcleos de tipo *Seyfert 2* las temperaturas del polvo esperadas varían entre 800 y 1300 K, mientras que para núcleos de tipo *Seyfert 1* la temperatura del polvo puede llegar a los 1500 K. Sin embargo, es necesario tener en cuenta que todas estas temperaturas estarán afectadas por el tamaño de la apertura con la cual se extraen los datos (ya sea fotométricos o espectroscópicos) y que mientras menor sea la apertura más precisa

1 Núcleos Galácticos Activos

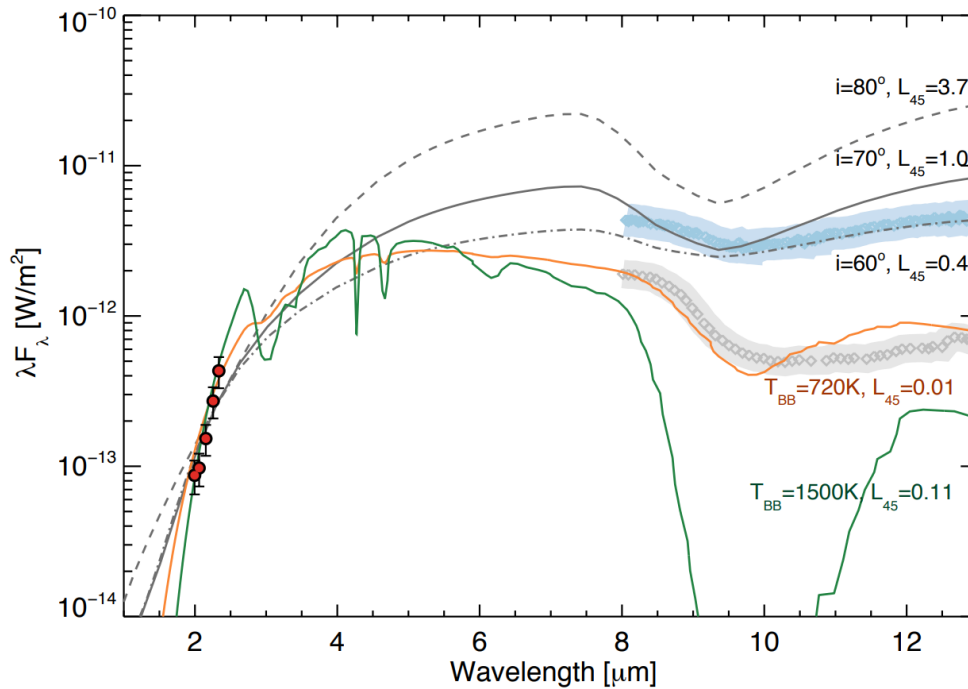


Figura 1.6: Figura extraída de Gravity Collaboration et al. (2020). Se presenta un ajuste para la SED de NGC 1068. Los puntos rojos corresponden a las mediciones interferométricas en la banda K. El mejor ajuste corresponde a una temperatura de 1500 K para el polvo calentado por el AGN. Se aprecia claramente el pico de emisión en 3 – 5 μm característico de polvo calentado por fotones UV duros provenientes de un disco de acreción en torno a un ANSM.

será la temperatura medida ya que incorporará menos emisión proveniente de las regiones circunucleares.

1.4. AGNs oscurecidos

El término AGN oscurecido refiere a distintos conceptos dependiendo de la longitud de onda con la que se esté tratando. Esta sección no tiene intención de ser un resumen del conocimiento y debate actual sobre el oscurecimiento en AGNs, sino describir el trabajo de Goulding y Alexander (2009) que sirvió como motivación para la selección de la muestra estudiada en los capítulos 3 y 4. Por lo tanto, la definición para el término "AGNs oscurecidos" que adoptaremos es la usada en dicho trabajo: los AGNs oscurecidos son núcleos que aparentan ser inactivos en el óptico pero presentan signos de actividad nuclear en otras bandas (en particular en el MIR para el trabajo de Goulding y Alexander).

1 Núcleos Galácticos Activos

Estos autores utilizaron una muestra de galaxias observadas con Spitzer en el MIR con el objetivo de realizar un censo completo de AGNs en el universo local en una banda menos extinguida que el óptico y encontraron que en esta banda espectral se identifican el doble de AGNs que en la banda óptica. Los antecedentes que los llevaron a plantear este censo fueron:

- Todas las galaxias masivas poseen ANSM en sus núcleos y deben haber experimentado un estado de actividad nuclear (AGN) en algún momento en los últimos ~ 13 Gyr (J. Kormendy y Richstone, 1995, Gebhardt et al., 2000, entre otros)
- Luis C. Ho, Alexei V. Filippenko y W. L. W. Sargent (1997) realizaron un relevamiento de todas las galaxias del hemisferio norte con $B_T \leq 12.5$ mag y las clasificaron de acuerdo a la intensidad relativa de sus líneas prohibidas y permitidas en el rango óptico, el resultado, fue que el $\sim 10\%$ de las galaxias albergan un AGN.
- Entre otros ejemplos, la galaxia Scd NGC 4945 es clasificada como una galaxia Starburst en el óptico y sin embargo claramente alberga un AGN al estudiarla mediante espectroscopia infrarroja (Spoon et al., 2000) y observaciones de rayos X (Iwasawa et al., 1993).
- Utilizando como indicador de actividad AGN la línea de $[NeV] \lambda 14.32 \mu m$, Satyapal et al. (2008) sugirieron que un gran número de galaxias Sc-Sm albergan núcleos activos que están ópticamente no-identificados.
- Debido a su alto potencial de ionización (97.1 eV), la línea de emisión de $[NeV] \lambda 14.32 \mu m$, $24.32 \mu m$ sólo puede producirse bajo condiciones extremas y es por esto que es un claro indicador de la presencia de un AGN. Además, debido a su longitud de onda es altamente insensible a la extinción interestelar, haciéndola ideal para identificar AGNs en galaxias fuertemente oscurecidas.

Estos antecedentes llevan a los autores a realizar dicho censo para estudiar qué factores hacen que un AGN no tenga evidencia de actividad nuclear en el óptico y sí en otras longitudes de onda.

La muestra con la que trabajaron fue seleccionada de manera de incluir todas las galaxias con $L_{IR} > 3 \times 10^9 L_{\odot}$ y distancias menores a 15 Mpc. El límite en luminosidad fue adoptado para excluir galaxias enanas o poco luminosas y el límite en distancias fue adoptado para excluir al cúmulo de Virgo y así asegurar representatividad de

1 Núcleos Galácticos Activos

galaxias de campo. La muestra incluye 64 galaxias; el diagrama de diagnóstico de cocientes de líneas óptico arroja que solo 7 de las 64 galaxias presentan inequívoca actividad nuclear de tipo Seyfert ($\sim 11\%$).

Sin embargo, de las 64 galaxias, 17 tienen detecciones de la línea $[NeV] \lambda 14.32\mu\text{m}$ y por lo tanto albergan un núcleo activo. Esto eleva la fracción de AGNs en el universo local al 27% de las galaxias más luminosas. Por lo tanto, la clasificación óptica pierde aproximadamente la mitad de los AGNs.

Los autores exploran varias posibilidades para explicar estos resultados, eligiendo como la más probable el oscurecimiento en el medio interestelar de la galaxia huésped. Llegan a esta conclusión a partir de observar que los AGN oscurecidos presentan altas absorciones (determinadas a partir de las líneas del oxígeno) y residen en galaxias más polvorientas y/o inclinadas por lo que es probable que la absorción no sea producida solo en el toroide nuclear sino también en el medio interestelar de las galaxias.

Estos resultados nos llevaron a plantear observaciones en el NIR de la muestra de AGNs encontrados por Goulding y Alexander (2009) (tanto los identificados en el óptico como los oscurecidos) para buscar pistas sobre qué otras diferencias podrían estar teniendo los AGNs oscurecidos con los identificados en el óptico, caracterizar los entornos circunucleares y explorar la posibilidad de que estos AGN oscurecidos se encuentren en una fase de acreción rápida embebida en polvo. En este trabajo presentamos resultados para tres de los AGN de la muestra, uno oscurecido (NGC 4945) y dos identificados en el óptico, (NGC 6300 y NGC 5643).

1.5. La conexión starburst -AGN

No existe una definición cerrada del fenómeno *starburst* pero para el interés de este trabajo será suficiente con definirlo como un brote de formación estelar donde su tasa es del orden de $10 - 100 M_{\odot} \text{año}^{-1}$ (Muxlow et al., 2006), aunque en galaxias ultraluminosas en el IR ésta puede llegar a las $1000 M_{\odot} \text{año}^{-1}$ (Bertoldi et al., 2003). El fenómeno *starburst* puede existir en distintas regiones de una galaxia e incluso puede abarcarla completamente. En esta sección describiremos la estrecha relación que existe entre los AGNs y *starburst* nucleares.

Se cree que el polvo del MI es creado en el ciclo de nacimiento-vida-muerte de las estrellas, principalmente por supernovas (que a su vez son muy eficientes en integrarlo rápidamente al MI debido a sus fuertes vientos), y en menor medida por estrellas

1 Núcleos Galácticos Activos

post-AGB (*Asymptotic Giant Branch*) (Dwek, Galliano y Jones, 2007). Por lo tanto los *starburst* necesariamente van acompañados de la creación de grandes cantidades de polvo en tiempos menores a 100 Mega años (Rafanelli et al., 2011). Esto hace de estas regiones de formación estelar violentas una de las regiones más polvorrientas que puede haber en una galaxia. En muchos casos el polvo que generan estos *starburst* que, además, cae al centro más rápido que el gas, enmascara completamente la presencia de un núcleo activo haciendo muy difícil su detección T. M. Heckman et al. (1997) y proporcionando el polvo ampliamente detectado en los AGNs en el MIR-FIR. Como se mencionó en la Sec. 1.3, el polvo calentado por un *starburst* puede llegar a temperaturas de 600 K.

Por otro lado, dadas las grandes cantidades de material necesarias para alimentar un AGN en cada episodio ($\geq 1M_{\odot}$ por cada 10^5 años), ver Sec. 2.1, y el hecho de que éste material debe viajar desde regiones más externas hasta los centros galácticos, es de esperar que se produzcan eventos de formación estelar masivos en las regiones próximas a los ANSM. La alta tasa de formación estelar requerida en un *starburst* necesita grandes reservorios de gas para que el fenómeno pueda ser disparado. Como se detalla en la Sec. 2.2, se han encontrado reservorios de 10^6M_{\odot} a 10^8M_{\odot} en los kpc centrales de galaxias que albergan un núcleo activo.

Otros autores han reportado un exceso de estrellas jóvenes (edades ≤ 100 Myr) y de edad intermedia en los cientos de pc centrales en galaxias activas comparadas con inactivas (Schmitt y Kinney, 2000, Storch-Bergmann, González Delgado et al., 2001, Kauffmann et al., 2003). Trabajos de éste tipo han arrojado que 30 – 50 % de los AGNs están asociados a conglomerados de estrellas jóvenes (Davies et al., 2007).

Esto ha motivado una gran cantidad de trabajos que tienen como objetivo estudiar en distintas escalas cómo la formación estelar podría disparar la actividad nuclear o viceversa. Uno de los inconvenientes que se presenta es la diferencia de escala en la que suceden los dos fenómenos (Knapen, 2004), mientras que la acreción en un ANSM está confinada dentro del pc central, el fenómeno *starburst* ocurre en escalas de varios kpc, dificultando el estudio de la causalidad entre ambos. Sin embargo, en la actualidad está ampliamente aceptado que existe algún mecanismo que vincula la acreción de masa e el ANSM y el crecimiento de la componente esferoidal en escalas de varios Kpc, ésto es evidenciado en la relación $M_{ANSM} - \sigma$ y constituye una de las mayores pruebas de la conexión AGN-*starburst* (Tremaine et al., 2002, Gebhardt et al., 2000)

La causalidad entre AGN y *starburst* puede ser separada en dos escenarios (que podrían ser parte de un sólo ciclo, ocurrir individualmente o coexistir):

1 Núcleos Galácticos Activos

- 1) El AGN es alimentado por los vientos provenientes de estrellas evolucionadas, supernovas y estrellas post-AGB Norman y Nick Scoville (1988)
- 2) Los vientos eyectados por el AGN disparan brotes de formación estelar.

Por otro lado, los fenómenos de *feedback* como los vientos producidos por el AGN pueden apagar la formación estelar en la región circumnuclear debido a que expulsan el gas frío (por ejemplo, Shabala, Kaviraj y Silk, 2011, Bell, 2008). Siguiendo a V. Beckmann et al. (2009) se tiene que la masa involucrada en la formación estelar es mucho mayor que la requerida para alimentar el ANSM. Por lo tanto al apagarse al formación estelar, la actividad nuclear puede mantenerse por otros ~ 0.1 Giga años (Hopkins et al., 2012). Las simulaciones también sugieren que tanto la expulsión de gas por los vientos del AGN como el calentamiento del gas resultante a temperaturas de 10^6 K dejan la región nuclear vacía de gas susceptible de ser consumido por la formación estelar, apagando así el *starburst* (Springel, Di Matteo y Hernquist, 2005). Simulaciones hidrodinámicas a gran escala, como la Illustris² muestran que la formación estelar es regulada debido a episodios de intensos vientos provenientes del AGN y de supernovas, limitando así el crecimiento de la componente esferoidal de la galaxia huésped.

²<https://www.illustris-project.org/>

2 Alimentación del Agujero Negro Super Masivo

2.1. Naturaleza transitoria del fenómeno AGN

El fenómeno AGN es actualmente entendido como una fase transitoria que atraviesan las galaxias a lo largo de su evolución durante el cual el agujero negro que yace en el centro empieza a acretar materia circundante y el núcleo comienza a emitir los espectros anómalos descriptos. Se piensa que una galaxia típica atraviesa 10 – 100 eventos de acreción a lo largo de su vida con una duración de $\sim 10^5$ años (Schawinski et al., 2015). Estos eventos están íntimamente relacionados con la evolución química, dinámica y morfológica de la galaxia ya que se encuentran correlaciones entre propiedades del agujero negro y propiedades del bulbo galáctico (por ejemplo, Gebhardt et al., 2000 y Ferrarese y Merritt, 2000). Para que un ANSM mantenga su emisión es necesario que sea constantemente alimentado con material proveniente de regiones más externas. No está claro aún el mecanismo mediante el cual el material galáctico puede pasar de escalas de distancia de los kiloparsec a escalas sub-parsec en el tiempo necesario para mantener en actividad el AGN y con prácticamente momento angular nulo. En la siguiente subsección se enumeran los resultados observacionales sobre los mecanismos de alimentación en las distintas escalas galácticas.

Relevamientos de alta calidad han revelado que una alta fracción de galaxias contienen AGNs de baja luminosidad; como las líneas de emisión de un AGN débil son fácilmente confundidas con el continuo estelar y sus absorciones en espectros de baja calidad, han sido sistemáticamente no-identificados. Por el mismo efecto, muchas galaxias previamente clasificadas como *Seyfert 2*, LINER o HII muestran en espectros de mayor resolución componentes anchas en sus líneas permitidas revelando un núcleo *Seyfert 1* débil. Tal vez, aunque sea a niveles muy bajos de luminosidad, toda galaxia contenga un núcleo activo o pasando por un período de inactividad. Greene y Luis C. Ho (2007) estimaron que un AGN pasa el 99% de su vida en períodos de inactividad donde no hay acreción o la acreción no es radiativamente eficiente.

2.2. Alimentación del ANSM

El crecimiento de los ANSM que residen en los núcleos galácticos de toda galaxia suficientemente grande es un asunto clave para entender la co-evolución entre el ANSM y las estructuras de la galaxia huésped (John Kormendy y Luis C. Ho, 2013, Storchi-Bergmann y Schnorr-Müller, 2019). Se sospecha que los mecanismos de transporte del gas, ya sea hacia adentro (*inflow*) o hacia afuera (*outflow*) del ANSM, regulan la formación estelar de las galaxias, limitando su crecimiento y estableciendo una estrecha relación entre la masa del agujero negro y la masa, la luminosidad y la dispersión de velocidades de las componentes esferoidales de las galaxias, siendo la última la conocida relación Masa- σ (Ferrarese y Merritt, 2000, Gebhardt et al., 2000).

Para que un ANSM pueda crecer hasta las masas observadas (10^5 a $10^9 M_{\odot}$) es necesario que exista un flujo de material desde las regiones más externas de las galaxias (del orden de varios kpc) hacia la región nuclear (0 a 1 pc). Dicho movimiento a lo largo de la galaxia, en rangos de distancias radiales tan grandes, requieren mecanismos que remuevan el momento angular del gas a distintas escalas.

A escalas galácticas, los mecanismos seculares requieren la presencia de perturbaciones gravitacionales que afecten el disco de gas galáctico, como barras, brazos espirales, distorsiones ovoides o caída de pequeñas galaxias satélites. Estos mecanismos actúan en escalas similares a la de varias rotaciones galácticas ($2 - 20 \times 10^8$ años en la Vía Láctea) Las fusiones de galaxias actúan más rápido ($\sim 1 \times 10^8$ años) pero implican una destrucción de la galaxia como tal y una evolución hacia estructuras más esferoidales.

La presencia de estructuras nucleares (filamentos, espirales, discos y barras) del orden de los 300 pc pueden generar torques sobre el gas provocando la caída al centro (Santiago García-Burillo y Francoise Combes, 2012). Este tipo de estructuras han sido observadas con ALMA o HST (Pogge y Paul Martini, 2002; F. Combes, S. García-Burillo, V. Casasola, L. Hunt et al., 2013; F. Combes, S. García-Burillo, V. Casasola, L. K. Hunt et al., 2014; S. García-Burillo, F. Combes, Usero et al., 2014). De hecho, Simoes Lopes et al., 2007 encuentran una fuerte correlación entre la presencia de estructuras nucleares de polvo y la actividad nuclear en una muestra de galaxias de tipo temprano y, por lo tanto, sugieren que éstas tienen que ser parte del mecanismo de alimentación del ANSM.

Simulaciones numéricas y trabajos teóricos (Shlosman, Begelman y Frank, 1990, Maciejewski, 2002, Emsellem, 2003, 2015, Li et al., 2016, Capelo y Dotti, 2017) han estudiado los mecanismos de transporte de gas en las regiones internas a 1 kpc y

encontrado que los potenciales no axi-simétricos remueven eficientemente el momento angular del gas haciéndolo caer hacia el núcleo, donde éste forma grandes reservorios que pueden disparar y mantener tanto la actividad AGN como la formación estelar nuclear (Brum et al., 2017). En los 10 pc centrales, simulaciones numéricas llevadas a cabo por R. H. Miller y B. F. Smith (1992), Taga e Iye (1998), Emsellem et al. (2015), entre otras, sugieren que un ANSM que oscile en torno al centro del potencial galáctico podría actuar como un mecanismo que genere pérdida de momento angular en el material circumnuclear con su consecuente acreción en el ANSM. Esta oscilación sería detectada, observacionalmente, como un descentrado entre el núcleo y las estructuras de mayor escala. En la Subsec. 2.3 se dan antecedentes de éste tipo de descentrados.

Respecto de los reservorios de gas, distintos autores utilizando diferentes técnicas han encontrado grandes cantidades de gas en los kpc centrales de las galaxias disco. A partir de líneas de CO y con distintos interferómetros y antenas (ALMA, SMA, JCMT, APEX, etc) se han calculado masas de gas de 10^6 a $10^8 M_{\odot}$ (F. Combes, S. García-Burillo, V. Casasola, L. K. Hunt et al., 2014 ALMA, Schinnerer et al., 2000 IRAM, Viviana Casasola et al., 2015 IRAM-HST, entre otros). Resultados similares han sido encontrados por Rosario et al., 2018 utilizando datos infrarrojos (2MASS, IRAS, WISE y Herschel para la muestra LLAMA (Luminous Local AGNs with Matched Analogs). Spitzer por otro lado, arroja masas un poco superiores de entre 10^7 y $10^8 M_{\odot}$ para galaxias de tipo temprano (Paul Martini, Dicken y Storchi-Bergmann, 2013, Simoes Lopes et al., 2007). En todos los casos, las muestras de control de galaxias no-activas muestran muy poco contenido de gas, por lo que estos grandes reservorios de gas deberían consumirse en un sólo ciclo de actividad, de 10^7 a 10^8 años, dando da una tasa de consumo del combustible de $0.01 - 10 M_{\odot}$ por año (Storchi-Bergmann y Schnorr-Müller, 2019).

2.3. Potenciales no-axisimétricos y núcleos descentrados

Experimentos numéricos que simulan un disco embebido en una galaxia no-axisimétrica (R. H. Miller y B. F. Smith, 1992) muestran una oscilación de las partículas nucleares en torno al centro de masa del sistema. Es más, el conjunto de partículas crece, es decir, que el objeto central modelado es cada vez más masivo. Los autores establecen que esta oscilación está presente desde el comienzo del sistema y que no podría darse una situación en la que el núcleo esté fijo en el centro del potencial galáctico ya

2 Alimentación del Agujero Negro Super Masivo

que no es una solución estable. Así proponen que todo núcleo galáctico debe estar descentrado en alguna medida.

Taga e Iye (1998) obtuvieron resultados similares simulando una esfera rotante de estrellas con un objeto masivo en el núcleo. Encuentran que el objeto central oscila en torno al centro con una amplitud inversamente proporcional a su masa, es decir, que objetos mas masivos oscilan con una amplitud menor. Proponen que el movimiento del objeto central podría generar caída de material hacia el centro y, por lo tanto, esta oscilación podría ser un mecanismo de alimentación nuclear eficiente dentro de los 10 pc centrales.

Más recientemente, Emsellem et al., 2015 utilizaron una simulación de una galaxia tipo Vía Láctea, con un halo de materia oscura y un disco de estrellas con 60 millones de partículas; además colocaron inicialmente en el centro de la galaxia un ANSM de $4 \times 10^6 M_{\odot}$. Con ello encontraron que el centro de masa de la región dentro del kpc central oscila con una amplitud máxima de 50 pc, lo que tiende a desacoplar la estructura formada por el ANSM central, el disco circumnuclear y los cúmulos estelares que se han formado en torno al ANSM de la población estelar subyacente. Además, luego de alrededor de 767 Mega años observan la fragmentación de un anillo circumnuclear que termina con una distribución de gas dentro del Kpc central extremadamente asimétrica. Esta distribución de gas se vuelve cada vez menos simétrica a medida que el descentrado del ANSM aumenta. Finalmente resaltan que la formación estelar nuclear es consecuencia de el descentrado del ANSM y no solamente de una sobredensidad local de gas autogravitante.

Una oscilación del ANSM en torno al centro de masa de la galaxia puede ser detectado observacionalmente como un descentrado instantáneo entre el núcleo y la estructura global de la galaxia, y puede ser encontrado mediante distintas técnicas: modelado de isofotas, mapas de velocidades, y descomposición en componentes estructurales. A continuación se comentan algunos antecedentes relevantes para éste trabajo:

- R. Díaz et al., 1999a presentan un mapa de velocidad para NGC 1672 obtenido a partir de espectros tomados con el Espectrógrafo Multifuncional de Campo Integrado de la Estación Astrofísica de Bosque Alegre en la banda R (6200 – 700Å). Encuentran un descentrado de ~ 60 pc entre el baricentro del continuo nuclear (asociado al núcleo) y el centro cinemático de la galaxia.
- A partir del análisis de isofotas en imágenes *HST/NICMOS2* en el NIR para 134 galaxias con variados tipos morfológicos, Carollo et al. (2002) encuentran 3 galaxias cuyos núcleos se encuentran descentrados: NGC 406, NGC 2758 (mencionan débiles bandas de polvo en el núcleo, por lo que el descentrado

2 Alimentación del Agujero Negro Super Masivo

probablemente no sea real), y NGC 4980. No reportan la amplitud de los descentrados.

- Côté et al. (2006) estudiaron una muestra de 100 galaxias elípticas enanas a partir del ajuste de isofotas en imágenes tomadas con el *HST* en las bandas F475W ($\sim g$) y F850LP ($\sim z$). Encuentran descentrados en 5 de las galaxias: VCC9 ($1''.9 \pm 0''.07$), IC 3025 ($0''.76 \pm 0''.07$), IC 3612 ($\sim 0''.4$), IC 3647 ($\sim 7''$) y VCC 1948 ($\sim 1''.4$). Los autores, sin embargo, piden tomar con precaución estos resultados ya que podría tratarse de galaxias que no presenten un núcleo prominente y que las fuentes descentradas detectadas sean solamente cúmulos estelares. Además encuentran otros 8 descentrados menores a $0''.5$ pero los desestiman por estar al límite de la resolución. En un trabajo previo, que estudia descentrados en elípticas enanas, presentado por Binggeli, Barazza y Jerjen (2000) se encuentra que un 20% de este tipo de galaxias presentan núcleos descentrados, con un valor típico de 100 pc. Sin embargo, a pesar de que la muestra utilizada en éste trabajo es similar a la utilizada por Côté et al. (2006), se utilizan datos del Observatorio de las Campanas, con una resolución espacial y sensibilidad mucho menores que las imágenes *HST*.
- F. Combes, S. García-Burillo, Audibert et al. (2019) estudiaron 7 galaxias de tipos *Seyfert* / LINERS con mapas de emisión CO (3 – 2) tomados con ALMA. Encontraron que 6 de las 7 galaxias presenta un descentrado entre la posición del ANSM y el centro del disco. Los valores que encontraron para los descentrados son: 42 pc para NGC 613, 21 pc para NGC 1326, 86 pc para NGC 1365, 7 pc para NGC 1566, 27 pc para NGC 1672 y 58 pc para NGC 1808. Al analizar los mismos, estos autores vuelven a proponer lo que ya está empezando a ser una idea ampliamente aceptada: que los descentrados se originan en movimientos oscilatorios de los ANSM en torno al centro de potencial global de la galaxia y que éstos podrían estar aportando a la alimentación del ANSM. Proponen que un desacoplamiento de esta naturaleza es esperable dada la diferencia de escalas de tamaños entre los discos nucleares (3 – 30 pc) y los discos globales (1 – 10 Kpc). Esta diferencia de escalas espaciales genera una diferencia significativa entre los tiempos dinámicos de cada estructura (~ 1 a 300 mega años) y por lo tanto incluso un solo evento de acreción en el ANSM que provenga de una dirección distinta al plano de la galaxia puede causar un cambio en su momento angular e imprimirle un movimiento.

Estos trabajos evidencian la presencia de descentrados en los núcleos de galaxias de diversos tipos y, claramente, el tamaño de los descentrados reportados ha ido decreciendo conforme mejora la resolución espacial de los instrumentos. Para llegar

2 Alimentación del Agujero Negro Super Masivo

a tener un censo completo de los AGNs descentrados, y lograr identificar si esta configuración corresponde a una fase evolutiva de los ANSM, es necesario contar con observaciones sistemáticas con resoluciones por debajo del segundo de arco y en el NIR. Las bandas del infrarrojo cercano, y en particular la banda K , cumplen simultáneamente dos condiciones necesarias: por un lado, la extinción en el MI decrece a un décimo del que afecta a las bandas ópticas, minimizando los falsos descentrados debidos a la presencia de polvo. Por otro lado, en la banda K , domina la emisión de la población estelar vieja la cual traza las estructuras galácticas de manera más homogénea que la población estelar joven. En el siguiente capítulo se exploraran con más detalles las ventajas de la utilización de bandas infrarrojas para este tipo de estudios.

3 Técnica Observacional

3.1. El Infrarrojo Cercano

Los AGNs pueden estar fuertemente extinguidos por el MI de la galaxia huésped y por otras componentes de polvo, como se detalló en el Capítulo 1. Esto presenta complicaciones a la hora de identificar y caracterizar la emisión AGN en la banda óptica, por lo que es de suma importancia realizar observaciones de estos objetos en bandas espectrales menos extinguidas, como por ejemplo el infrarrojo (IR). En las primeras dos sub-secciones de este capítulo se caracterizará y definirá la banda infrarroja y se resumirá brevemente la historia de su descubrimiento y las aplicaciones que actualmente se encuentran tanto en el área astronómica como en la civil y militar. En la Sec. 3.2 se describen los telescopios Gemini y los dos espectrógrafos utilizados en este trabajo: Flamingos-2 y GNIRS. En la última sección se describe brevemente el procedimiento de reducción de datos utilizado.

Definición y Características del NIR

El IR es la banda espectral que se encuentra contigua al óptico y hacia longitudes de onda más grandes, cubriendo el rango espectral entre 1 y 350 μm aproximadamente, aunque su definición exacta varía con cada autor. Junto con el óptico y las ondas de radio es una de las bandas que pueden ser detectadas desde tierra ya que la atmósfera presenta ventanas de transmisión. El IR puede definirse a partir de la técnica que se ha utilizado para observarlo. La eficiencia cuántica de las foto-emulsiones típicas es similar al ojo humano; sin embargo, las placas fotográficas sensibles al infrarrojo eran sensibles hasta $\sim 1 \mu\text{m}$. No se puede usar ninguna de las tecnologías de la banda visible como CCDs, fotografía y fotocátodos más allá de $\lambda 1.1 \mu\text{m}$; esta longitud de onda puede ser considerada un borde inferior para la banda infrarroja. El fin de la banda IR está de nuevo tecnológicamente definido: es la longitud de onda donde las técnicas de radio empiezan a ser utilizadas abandonando el “estilo óptico” (que predomina en la banda IR) y la luz tiende a considerarse como ondas en vez de fotones

3 Técnica Observacional

incidentes. La región de 0.35 mm a 1 mm se conoce como la región sub-milimétrica y se suele considerar una subdivisión de la radio-astronomía.

Generalmente, el rango infrarrojo se divide en tres regiones: infrarrojo cercano (NIR, por Near InfraRed), infrarrojo medio (MIR, por Mid InfraRed) e infrarrojo lejano (FIR, por Far InfraRed). Notar que en esta región espectral no se utiliza la unidad generalmente usada en el óptico (el angstrom, Å), sino que se recurre al micrómetro (μm) ya que es más adecuada para describir las longitudes de onda involucradas. Un micrómetro equivale a 10000 angstroms. Como ya se mencionó al principio de este capítulo, la ventaja que posee el IR respecto del óptico en el estudio de los núcleos activos es la baja extinción relativa que presenta para profundidades ópticas bajas. La extinción decrece con la longitud de onda, por lo que para la banda K por ejemplo, la extinción es diez veces menor a la que se tiene para la banda V del óptico.

Sin embargo, para profundidades ópticas grandes en el MI, el IR proporciona mapas detallados de la estructura del polvo ya que este componente del MI suele encontrarse a temperaturas cuyo máximo de emisión ocurre en las bandas del MIR y FIR. En particular, en las bandas del NIR, se detecta la emisión del polvo más caliente, proveniente de zonas cercanas a un ANSM o de un *starburst* como ya se detalló en el Capítulo 1. Respecto de la componente estelar en el NIR, en la banda K domina la población estelar envejecida. Las contribución de las estrellas jóvenes es despreciable y, por lo tanto, es la banda ideal para mapear la masa estelar (Mulchaey, Regan y Kundu, 1997). En la Fig. 3.1 (Lin et al., 2013) se presenta una secuencia de cómo cambia una galaxia cuando se la observa en distintas longitudes de onda. Se puede ver como en las bandas UV dominan los grupos de estrellas jóvenes haciendo que la superficie de la galaxia sea extremadamente inhomogénea; a medida que nos acercamos al óptico, la estructura estelar se suaviza pero aún conserva grupos discretos y aparecen las fuertes bandas de polvo. En las bandas del NIR (J, H y K, ésta última resaltada en un recuadro de color) se puede observar una población estelar relajada que mapea principalmente el disco de la galaxia, con los brazos espirales relativamente difusos, y el núcleo galáctico. La población estelar vieja tiene la cualidad de ser una población dinámicamente relajada cuya distribución responde al potencial gravitatorio galáctico y no a eventos fortuitos de formación estelar. Finalmente, al adentrarse en las longitudes de onda del MIR, vuelven a aparecer los grupos de formación estelar, esta vez mapeados por radiación reprocesada en el polvo producido por las supernovas presentes en las regiones de formación estelar. Aquí se ve claramente como la banda K presenta ventajas respecto del resto del espectro electromagnético a la hora de modelar las estructuras galácticas.

3 Técnica Observacional

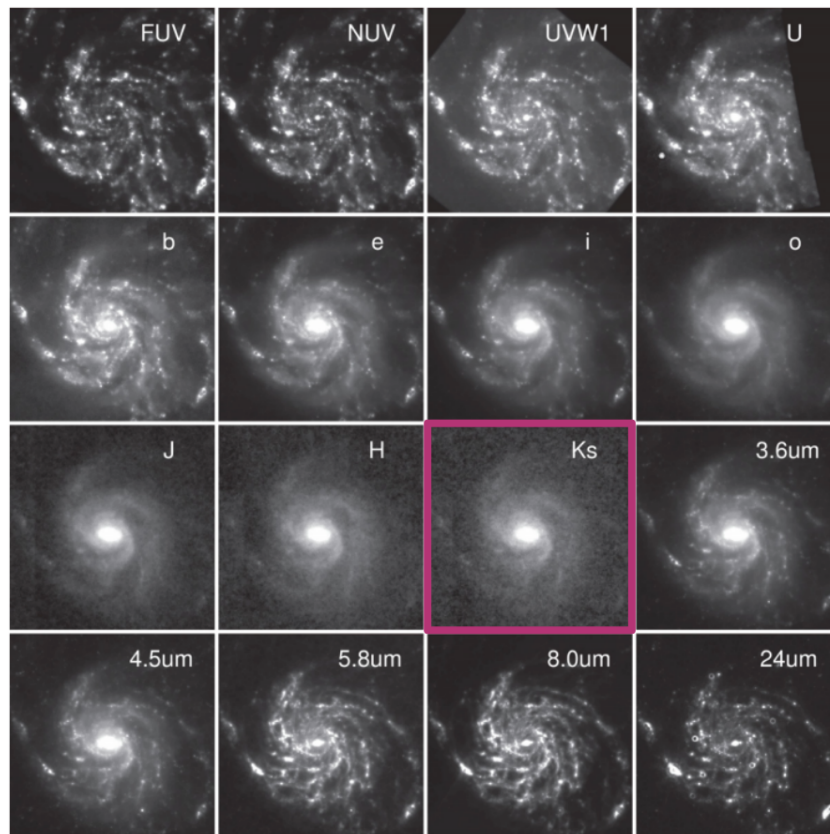


Figura 3.1: Figura adaptada del trabajo de Lin et al. (2013). Los distintos paneles, de arriba a la izquierda hacia la derecha y abajo indican orden creciente de longitudes de onda. Se puede ver como a medida que crece la longitud de onda cambian las componentes galácticas que se destacan en cada caso. De particular importancia para éste trabajo se marca con un recuadro magenta la banda K, donde disminuye la extinción por polvo y la mayor contribución a la emisión detectada proviene de la población estelar envejecida, la cual es una buena trazadora de las estructuras galácticas.

3.2. Gemini: dos gigantes optimizados para el infrarrojo

Las observaciones astronómicas actuales requieren gran resolución angular, sensibilidad y un muy bajo nivel de ruido. Esto genera restricciones sobre los sistemas ópticos, las técnicas de detección y la electrónica, motivando continuos avances en la tecnología infrarroja, los que son aprovechados en distintas disciplinas y aplicaciones civiles y militares, como por ejemplo, en las cámaras de visión nocturna, la determinación del balance energético de una construcción, comunicaciones encriptadas en la atmósfera (láseres infrarrojos), los análisis de materiales y controles de calidad en la industria, en los diagnósticos y tratamientos médicos, etc.

En astronomía, el uso de la región infrarroja está hoy en día extendido desde el estudio

3 Técnica Observacional

de las atmósferas planetarias (por sus temperaturas) hasta los estudios en gran escala, evolución galáctica, etc. También se utiliza para estudios *redshift* intermedio, ya que las conocidas bandas del óptico caen en la región infrarroja.

Los telescopios Gemini¹, además de proveer gran apertura y acceso a ambos hemisferios celestes, están optimizados para proveer imágenes de gran calidad y operar en forma eficiente en el rango infrarrojo cercano y medio. Sus espejos son mucho más angostos que los de telescopios de similar apertura (tan solo 20 cm el primario) y su forma se controla con un gran número de actuadores para compensar las deformaciones por gravedad y cambios en las condiciones ambientales. Por otro lado las observaciones se realizan midiendo una estrella de referencia con alguno de los sistemas de sensado de frente de onda, muestreando la forma del mismo unas 200 veces por segundo. Esto permite corregir no solo por cambios en la posición de guiado, sino también el primer orden del efecto de la turbulencia atmosférica, es decir, el cambio de la dirección del frente de onda provocado por el *seeing* atmosférico, en el orden de las decenas de correcciones por segundo. De esta manera, y dependiendo del instrumento, se alcanzan habitualmente una calidad de imagen de 0".5 a 0".7 en el rango óptico. También proveen sistemas de óptica adaptable que, muestreando aún mas seguido el frente de onda y realizando correcciones de mayor orden con espejos deformables, permiten alcanzar calidad de imagen que se acerca a los 0.06 segundos de arco en el infrarrojo cercano. Lamentablemente estos sistemas, asistidos por estrellas artificiales generadas con un láser, sólo pueden observar una fracción pequeña del cielo y la mayoría de los AGNs de nuestro interés (muy cercanos, y por lo tanto de gran campo) sólo serán asequibles con la óptica adaptable de Gemini dentro de unos tres años. En la actualidad, la resolución espacial en la banda *K*, para las mejores condiciones climáticas, ronda los 0".4 – 0".5.

Los espejos de los telescopios Gemini están recubiertos con plata, usando un método único en su tipo y desarrollado en el observatorio. El uso de plata en vez de aluminio provee una baja emisividad en el infrarrojo y, a su vez, una mayor reflectancia en este rango. Para los estudios de esta tesis, además de obtener observaciones con Flamingos-2 (F2, el multiinstrumento infrarrojo de Gemini Sur), usamos observaciones ya obtenidas con el *Gemini North InfraRed Spectrometer* (GNIRS), el multiinstrumento infrarrojo de Gemini Norte.

Ambos espectrógrafos trabajan en longitudes de onda mayores a los 9000Å y pueden producir imágenes (F2 de gran campo); tienen distintas opciones de anchos de ranura para priorizar la colección de fotones en función del *seeing* o maximizar la resolución

¹<https://www.gemini.edu/>

3 Técnica Observacional

espectral, y permiten observar distintos rangos espectrales. GNIRS tiene una ranura mucho mas corta pero puede observar en dispersión cruzada. Además, tiene menos sensibilidad que F2 pero puede alcanzar los 5 micrones, mientras que F2 solo observa hasta los 2.5 micrones.

Para las observaciones realizadas con F2 utilizamos la ranura de 3 px ($0''.54$) combinada con el grisma R3K. La ranura de F2 tiene $4'.4$ y la escala de placa del instrumento es de $0''.18$. Para tres de las galaxias tomamos las observaciones en el filtro K_{long} (espectros) y J, H y K_s (imágenes), mientras que para NGC 6300 todos los datos fueron tomados en las bandas J, H y K_s .

Los datos de GNIRS fueron tomados en el modo de dispersión cruzada, con la ranura de $7''$. La escala de placa de GNIRS es de $0''.15$, lo que da un muestreo óptimo para el mejor seeing ($\sim 0''.3$). Todos los espectros corresponden a la banda K_{long} .

Los telescopios Gemini operan en modo "fila" (*queue* en inglés), es decir, que durante una noche de observación se pueden observar distintos programas dependiendo de cómo cambian las condiciones climáticas a lo largo de la misma. Las bandas de observación (1,2,3 y 4) corresponden a niveles de prioridad en la fila. Las observaciones de Banda 1 siempre se completan mientras que las de Banda 4 son de última prioridad (llegando a completarse casi siempre en el NIR ya que las condiciones climáticas, pobres en el óptico, son aprovechables en el NIR).

3.3. Reducción de espectros en el NIR

Para realizar la reducción de los datos espectroscópicos de Flamingos-2 se procedió en dos etapas: en la primera, análoga a la reducción de imágenes, se realizó mediante la línea de comandos del instrumento² y en la segunda etapa, se procede a extraer manualmente los espectros unidimensionales mediante tareas estándares de Pyraf, ya que la línea de comandos presenta problema en esos pasos. En mi trabajo final de Licenciatura se puede encontrar un detalle de todo el procedimiento.

A continuación se detallan los pasos manuales que se realizaron por fuera de la línea de comandos.

- Extracción de los espectros unidimensionales:

²<https://www.gemini.edu/sciops/instruments/flamingos2/data-format-amp-reduction>

3 Técnica Observacional

Con la tarea APALL se determina el centro a partir del pico de emisión, y luego se realizan las extracciones en todos los radios de interés, en nuestro caso hemos hecho extracciones tan lejos del núcleo como la relación S/N lo permitió. Los anchos de las aperturas de extracción fueron elegidos a partir del *seeing* de manera de sobre-muestrear levemente las extracciones. Es decir, dado el *seeing* en pixeles, la apertura correspondera al número entero de ese valor redondeado por defecto. Por ejemplo, si el *seeing* equivale a 3.6 px se procederá a realizar extracciones en aperturas de 3 px.

- Calibración en longitud de onda:

Este paso se realizó de la manera usual, utilizando las tareas IDENTIFY, REFSPEC y DISPCOR. Hemos comprobado que la calibración manual resulta en una calibración mucho mas precisa que la realizada por la línea de comandos. Hemos alcanzado una precisión de 2.8 km s^{-1} para las velocidades radiales relativas y una precisión de 6.5 km s^{-1} para las velocidades absolutas.

Para lograr una buena calibración es importante tener en cuenta a la hora de la observación, que cada objeto (galaxia, estrella telúrica) debe tener asociado un espectro de lámpara de comparación tomado exactamente en la misma posición que el objeto; de otra forma, las deformaciones en los espectros afectan severamente la calibración en longitud de onda.

- Compensación por la transmisión atmosférica:

Las absorciones causadas por la atmósfera son muy prominentes en las bandas del NIR; sin embargo, al encontrarse presentes tanto en los espectros de la galaxia como en los de la estrella telúrica, este último puede ser usado para corregir el primero. Un detalle importante es que las estrellas también pueden presentar absorciones intrínsecas que se producen en sus propias atmósferas. En el caso de estrellas de tipo A o F, serán muy prominentes las absorciones en las líneas de recombinación del Hidrógeno $Br\gamma$ (K) y $Pa\beta$ (J) lo cual deberá ser tenido en cuenta a la hora de hacer la corrección por absorción telúrica.

Para aplicar la corrección manualmente hay que utilizar un espectro estelar sintético para eliminar las absorciones intrínsecas de la estrella telúrica. En nuestro caso, generamos un espectro con la tarea MK1DSPEC de PyRAF utilizando el mismo tipo espectral de la estrella y respetando el rango espectral, intensidad y el binnedo del espectro observado. Luego ambos son normalizados por su valor medio y se divide el espectro observado por el sintético. Esto da un espectro normalizado de transmisión atmosférica donde ya no queda nada de la información espectral de la estrella sino solamente información de la absorción

3 Técnica Observacional

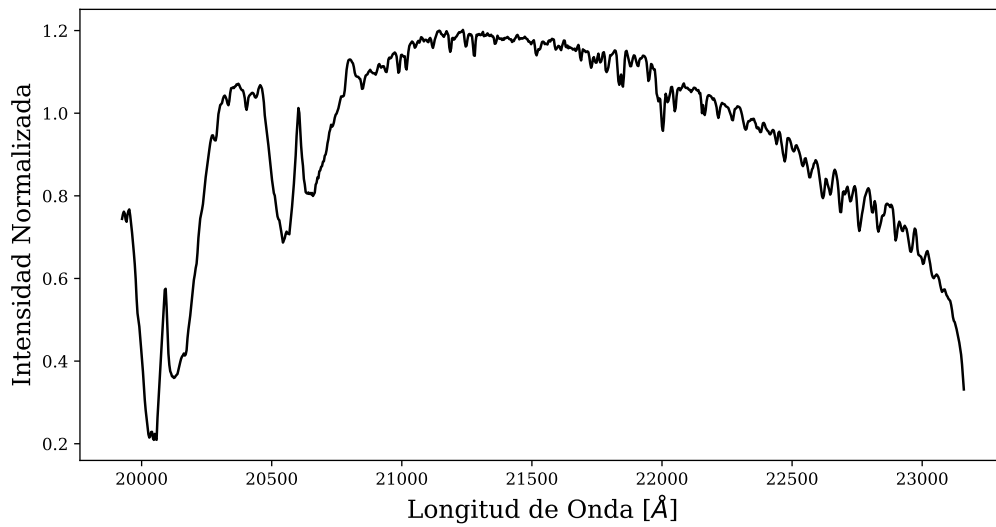


Figura 3.2: Espectro de transmisión atmosférica para la banda K obtenido a partir de un espectro de estrella telúrica.

atmosférica. En la Figura 3.2 se muestra un ejemplo de este tipo de espectro.

- Finalmente, se divide cada espectro unidimensional de la galaxia por el espectro de transmisión atmosférica normalizado.

4 Búsqueda de descentrados en el NIR

En este capítulo presentamos un estudio realizado a partir de espectros tomados con el espectrógrafo GNIRS (*Gemini Near-InfraRed Spectrograph*) de Gemini Norte en banda K_{long} . A partir de los mismos, hemos modelado los perfiles de intensidad radial para 16 galaxias con el objetivo de detectar descentrados entre el núcleo de la galaxia y una estructura de mayor escala. Los resultados encontrados por Emsellem et al. (2015) sugieren que podría existir una fase de crecimiento de los ANSM en donde los mismos aún no estarían fijos en el pozo de potencial global de la galaxia, sino que se encontrarían oscilando en la región circumnuclear. Esto generaría pérdida de la axi-simetría en las estructuras circumnucleares y, por lo tanto, pérdida de momento angular del material circundante con su consecuente acreción en el ANSM. Esto plantea la pregunta de si estos descentrados de los núcleos podrían ser al menos parte del mecanismo de alimentación nuclear en los últimos pc.

Para contribuir a la respuesta de esta pregunta, es interesante estudiar observacionalmente qué tan comunes son los descentrados cuando se logra separar la estructura estelar subyacente de las otras componentes nucleares discretizadas (gas ionizado, neutro, molecular, estrellas jóvenes y cúmulos masivos). Y si estos descentrados están relacionados con algún otro parámetro nuclear, en particular con la masa del ANSM ya que esto indicaría en qué fase del crecimiento del ANSM se produce el acoplamiento entre el potencial del ANSM y el potencial global de la galaxia.

Utilizar datos en la banda infrarroja, con un telescopio de gran área colectora y óptica activa, fue clave para minimizar la extinción por el medio interestelar de la galaxia y lograr gran resolución espacial y así modelar los perfiles a escalas muy cercanas al núcleo.

Además, dado que la banda K_{long} permite detectar el polvo caliente (ver sec. 1.3), hemos explorado los excesos en el extremo rojo de la banda con el objetivo de encontrar estructuras espacialmente resueltas. Las mismas nos permitieron caracterizar la distribución del polvo en estos núcleos y su dependencia con otros parámetros

nucleares utilizando datos con resoluciones mayores a los relevamientos infrarrojos existentes (WISE, IRS, 2MASS, etc).

4.1. Descripción de la muestra y las observaciones

Contamos con datos del espectrógrafo GNIRS de Gemini Norte observados y reducidos por Mason et al. (2015). Los autores seleccionaron una muestra de 50 galaxias a partir del relevamiento de Palomar (L. C. Ho, A. V. Filippenko y W. L. Sargent (1995), Luis C. Ho, Alexei V. Filippenko y W. L. W. Sargent (1997)) buscando incluir las galaxias con mayor luminosidad en rayos-X de dicho relevamiento. Ellos argumentan que las galaxias más luminosas, en general, están más estudiadas y tienen mayor cantidad de observaciones realizadas con otros instrumentos, de las cuales se puede obtener nueva información complementaria. La sub-muestra presentada en esta tesis fue seleccionada de la muestra de Mason et al. con el criterio de mantener, combinando distancia y *seeing*, una resolución espacial menor a 100 pc y un muestreo del tipo de emisión que incluya todos los tipos, priorizando en ellos a las *Seyfert 1* y *Seyfert 2*, ya que al tener un ANSM confirmado son de mayor relevancia para nuestro estudio. Esta sub-muestra reproduce la distribución de parámetros de la muestra de Mason et al. (ver Fig. 4.1 pero no es única).

En la Tabla 4.1 se listan algunas características de las galaxias de la submuestra que utilizamos: distancia, tipo morfológico, inclinación, tipo de actividad, logaritmo de la luminosidad X en el rango 2 – 10 KeV, logaritmo de la masa del ANSM central. Todas las columnas fueron extraídas del trabajo de Mason et al., 2015. En la Fig. 4.1 se presenta la distribución de nuestra submuestra en los distintos parámetros presentados en la tabla mencionada. Se puede observar que mientras que las distribuciones de distancia y tipo de actividad son relativamente homogéneas, las distribuciones de emisión en X y de masa del ANSM tienen picos fuertemente marcados. Esto será importante a la hora de analizar los resultados estadísticos de los descentrados encontrados en los núcleos.

Las observaciones fueron realizadas con el espectrógrafo GNIRS de Gemini Norte en el modo fila, en distintos programas y variadas condiciones atmosféricas, durante el período mayo 2011- agosto 2013 . Los espectros fueron tomados en la banda K_{long} (1.9 – 2.5 μm), el modo de dispersión cruzada (XD) con la cámara *short-blue* usando la ranura de 0".3 y el grisma de 321 líneas mm^{-1} . Esta configuración brinda una resolución nominal de $R \sim 1300 - 1800$ con una escala de píxel de 0".15 (ver Tabla 2

4 Búsqueda de descentrados en el NIR

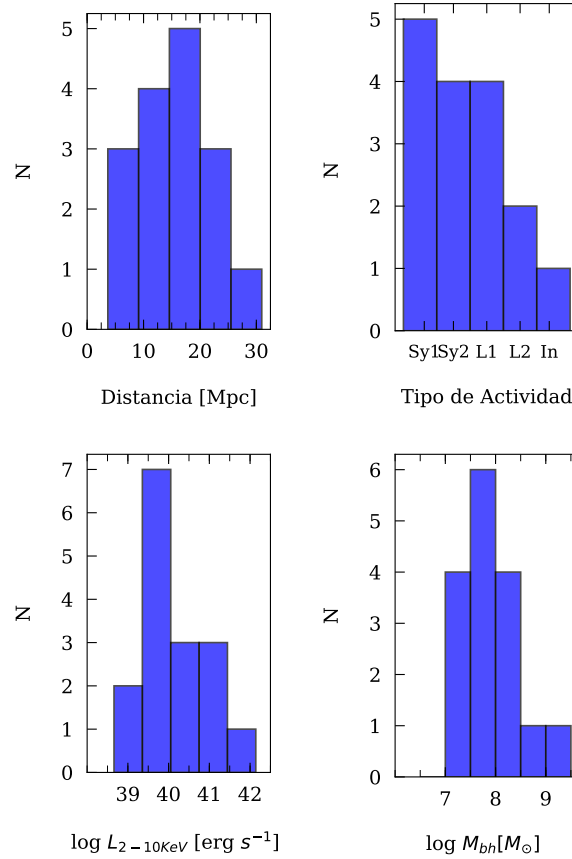


Figura 4.1: Distribuciones de parámetros de la sub-muestra utilizada en este trabajo.

del trabajo de Mason et al. para detalles de configuración y condiciones atmosféricas de cada observación).

La reducción fue realizada por los autores utilizando el paquete de Gemini *XDGNIRS* y realizando algunos pasos *ad-hoc*, principalmente para la corrección telúrica. Para más detalles ver el artículo original.

Para esta tesis se utilizaron los espectros 2-dimensionales previos a las extracciones individuales, por ello, no están calibrados en longitud de onda ni corregidos por absorción telúrica. Esto no significa una dificultad para el análisis de los perfiles espaciales ya que las absorciones telúricas afectan por igual a todos los píxeles en la dirección de la ranura. Para aumentar la relación S/N se tomaron tajadas de un mínimo de 10 píxeles en la dirección espectral.

Para modelar las estructuras a lo largo de la banda K_{long} se realizaron extracciones en el continuo en las regiones $\lambda 2.097 - 2.104 \mu\text{m}$ y $\lambda 2.247 - 2.254 \mu\text{m}$. Las regiones de extracción son similares para cada galaxia, pero se tuvo en cuenta en cada caso

4 Búsqueda de descentrados en el NIR

Cuadro 4.1: Características de la sub-muestra presentada en este trabajo, extraídas de Mason et al. (2015).

Galaxia	Distancia [Mpc]	Tipo Morfológico	Inclinación	Actividad Nuclear	$\log L_{2-10keV}$	$\log M_{ANSM}$
NGC 2273	28.4	SB(r)a:	41	Sy2	40.02	7.9
NGC 3031	1.4	SA(s)ab	60	Sy 1.5	39.38	8.1
NGC 3718	17.0	SB(s)a pec	62	L 1.9	40.44	8.1
NGC 3998	21.6	SA(r)o?	34	L 1.9	41.34	9.3
NGC 4258	6.8	SAB(s)bc	70	Sy 1.9	40.89	7.9
NGC 4388	16.8	SA(s)b:	83	Sy 1.9	42.14	7.0
NGC 4450	16.8	SA(s)ab	43	L 1.9	40.02	7.8
NGC 4548	16.8	SB(rs)b	38	L2	39.74	7.4
NGC 4565	9.7	SA(s)b?	L	Sy 1.9	39.56	7.8
NGC 4594	20.0	SA(s)a	68	L2	40.69	8.9
NGC 4725	12.4	SAB(r)ab pec	46	Sy 2	39.11	7.8
NGC 5005	21.3	SAB(rs)bc	63	L 1.9	39.94	8.2
NGC 5033	18.7	SA(s)c	64	Sy 1.5	40.70	8.0
NGC 5194	7.7	SA(s)bc pec	53	Sy2	41.03	7.1
NGC 7331	14.3	SA(s)b	72	T2	38.66	7.8
NGC 7743	24.4	(R)SB(s)o+	32	Sy2	39.71	7.0

el ruido de la región de extracción para elegir la ubicación exacta de la misma. Para realizar las extracciones se utilizó la tarea *PVECTOR* del software *Pyraf*¹ y para el ajuste de los perfiles se utilizó un código propio en *Python*² como se describe en la siguiente subsección (4.2).

4.2. Técnica de Descomposición de Perfiles Espaciales

Las diferentes componentes estructurales de una galaxia pueden trazarse a partir del perfil de intensidad (intensidad vs. radio o intensidad vs. diámetro). Gerard de Vaucouleurs (1959) ajustó perfiles espaciales de galaxias elípticas con una ley de potencias de exponente 1/4, la que más tarde fue conocida como la Ley de de Vaucouleurs. Años después, Sérsic (1968) presentó, en su *Atlas de Galaxias Australes*,

¹http://www.stsci.edu/institute/software.hardware/pyraf/pyraf_faq

²<https://www.python.org/>

4 Búsqueda de descentrados en el NIR

una generalización de esta ley que aplica a galaxias de cualquier tipo morfológico. Se trata de una ley exponencial con índice variable n como se muestra en la siguiente ecuación:

$$I(R) = I_c \exp \left\{ -b_n \left[\left(\frac{R}{R_e} \right)^{1/n} - 1 \right] \right\} \quad (4.1)$$

Esta ley describe una estructura esferoidal tipo bulbo para $n = 4$ (donde la Ley de Sérsic se reduce a la Ley de de Vacouleurs) y un disco cuando $n = 1$. Los casos con $0.5 \leq n \leq 1$ pueden describir discos ensanchados, barras u otras estructuras en proyección (Gadotti, 2008). Respecto de las componentes esferoidales, una componente con $n = 4$ reproduce el perfil de brillo de una estructura esferoidal como las galaxias de tipo temprano o los bulbos de las galaxias S0, mientras que los casos $2 \leq n \leq 4$ describen estructuras esferoidales del tipo de los bulbos de las galaxias espirales tardías (R. Smith et al., 2012).

Cuando se modelan datos de alta resolución espacial pueden aparecer múltiples componentes sumadas en un único perfil; por ejemplo, una galaxia disco podría presentar un perfil que sea suma de una componente bulbo $n = 4$ más una componente disco $n = 1$ (Broeils y Courteau, 1997). Para modelar la componente central no resuelta, que puede ser un AGN o un cúmulo estelar masivo, se puede utilizar una función *gaussiana* que tenga un *FWHM* igual al de la PSF de la observación (Savorgnan (2016) y referencias allí.)

Las diferentes componentes podrían no estar centradas; ha habido al respecto extensas discusiones (por ejemplo, John Kormendy, 1988, R. H. Miller y B. F. Smith, 1992), Côté et al., 2006, en relación a de las asimetrías en los perfiles espaciales. Algunas veces, las asimetrías pueden explicarse por la presencia de polvo que extingue uno de los lados del perfil, principalmente del lado cercano de la galaxia. Sin embargo, éstas extinciones pueden identificarse como depresiones en zonas localizadas del perfil y son claramente distinguibles. En otros casos, las asimetrías del perfil pueden modelarse descentrando las distintas componentes de Sérsic. En el NIR, donde la extinción es mucho menor que en la banda óptica, puede haber aún asimetrías causadas por polvo, pero se espera que sean significativamente menos frecuentes y eventualmente podrán ser identificadas en imágenes infrarrojas.

Se puede detectar un descentrado entre el núcleo de la galaxia y una componente estructural de mayor escala (como un disco o un bulbo) usando esta técnica aplicada tanto a datos de imagen como de espectroscopía 2D.

4 Búsqueda de descentrados en el NIR

La ventaja de utilizar espectros para aplicar esta técnica es que permite aislar distintos tipos de estructuras como, por ejemplo, discos circunnucleares de Hidrógeno molecular o el mismo AGN que podrían no aparecer en las extracciones de continuo. La desventaja es que es un dato más costoso de obtener, por esto, en muchos casos sólo se cuenta con una orientación de la ranura y por lo tanto el descentrado medido es una proyección del descentrado real en la dirección de la ranura (más una segunda proyección por la inclinación de la galaxia).

En el caso de utilizar imágenes, para obtener los perfiles espaciales se realiza una extracción de intensidad vs radio simulando una ranura, es decir, se elige una orientación (PA) y se extrae en esa dirección. La ventaja de esto es que las imágenes permiten extraer perfiles en todas las direcciones que se quiera, obteniendo así información estructural de muchas regiones diferentes. La desventaja es que el perfil obtenido integrará la luz de todas las componentes estructurales presentes en la banda utilizada (gas ionizado, neutro, molecular, continuo estelar y no-estelar), por lo que es menos directo disociar las distintas estructuras presentes en el perfil.

En caso de utilizar espectros, se debe extraer una tajada en la dirección de la ranura del espectro 2D y hacer un gráfico intensidad vs. radio (positivo y negativo) como se puede ver en las figuras 4.3 a 4.7. Se debe tener cuidado de extraer en una región del espectro donde haya la menor cantidad de absorción telúrica (en general estos espectros no están aún corregidos por absorción telúrica ya que la misma se realiza sobre los espectros unidimensionales ya extraídos y calibrados); además, el ancho de extracción debe ser de una cantidad suficiente de píxeles tal que se cancelen posibles ruidos como por ejemplo los producidos en la sustracción del cielo. Para los espectros de GNIRS presentados en éste capítulo los anchos de las extracciones fueron de entre 10 – 12 píxeles ($\sim 65 - 78 \text{ \AA}$ dada la dispersión media de los espectros de $6.5 \text{ \AA}/\text{px}$). La longitud de onda de la extracción dependerá de que componente astrofísica se busque modelar: extracciones en el continuo se pueden hacer en distintas regiones del rango espectral considerado para comparar regiones más rojas con regiones más azules; en este caso, se estará mapeando la componente estelar del espectro, sumada al continuo producido en el disco de acreción del ANSM (en AGNs de tipo 1) y a la emisión de polvo caliente (AGNs de tipo 1 y algunos casos de tipo 2).

También se pueden hacer extracciones en longitudes de onda correspondientes a líneas de emisión. En este caso, para el ancho de la extracción se buscará un compromiso entre la cantidad de emisión de la línea que se deja afuera y la cantidad de fondo que se está introduciendo. Una vez extraído el perfil en la línea de emisión, es necesario hacer una resta de un perfil de continuo extraído lo más cercanamente posible para

evitar cambios en el mismo debido a las diferencias en longitud de onda. Las líneas de emisión mapean otras regiones de la galaxia, como el AGN en el caso de líneas coronales (alto potencial de ionización) o componentes de gas molecular (como el caso del H_2) o ionizado (líneas de recombinación del Hidrógeno).

La Técnica Aplicada a los espectros GNIRS

Como se mencionó anteriormente, diferentes longitudes de onda (o caracteres espectrales) mapean las distintas componentes de la galaxia. Las líneas de emisión mapean las diversas fases del gas (molecular, neutro o ionizado) y el continuo, dependiendo de la longitud de onda, puede mapear cúmulos de estrellas jóvenes (longitudes de onda cortas) o la población estelar envejecida, más enrojecida, que ocupa más homogéneamente el espacio intergaláctico (longitudes de onda más largas). En la banda K_{long} se observa la suma de las poblaciones estelares más envejecidas, con edades $\geq 1Gy$ (Mulchaey, Regan y Kundu, 1997) y una componente de polvo caliente, que puede estar presente o no (ver Sec. 1.3 para más detalle y referencias). En éste trabajo seguiremos bajo la hipótesis de que esta población vieja responde, en la región nuclear, al potencial gravitacional producido por el ANSM central y por lo tanto, asociaremos el pico de emisión en la banda K_{long} a la posición del ANSM.

En particular, los espectros utilizados en éste trabajo presentan un número limitado de puntos espaciales resueltos dado el *seeing* de cada observación (ver Figs. 4.3 4.7); esto nos llevó a establecer ciertos criterios para evitar la degeneración de los ajustes y lograr una buena representación de las estructuras de interés para medir los descentrados:

En resumen, los criterios adoptados fueron:

- Utilizar un máximo de 2 componentes estructurales para modelar el perfil, para minimizar la cantidad de grados de libertad del problema.
- Modelar la región nuclear con una función *gaussiana* del ancho del *seeing*.
- Ajustar una componente de Sérsic con un radio de escala consistente con el tamaño y la forma de la galaxia observada en imágenes de archivo. Esta componente debe ajustar cada ala del perfil en al menos 7 puntos.
- El residuo resultante del ajuste debe ser simétrico en la región nuclear y en las alas.

4 Búsqueda de descentrados en el NIR

- Para que un descentrado entre componentes pueda ser reportado debe superar un décimo de la resolución espacial del perfil modelado. Aquellos descentrados que no cumplan ésto serán reportados como no detectados.

El hecho de que un descentrado no sea detectado no significa que sea nulo. Hay dos factores que influyen en la detectabilidad de un descentrado además de la resolución espacial de las observaciones: (1) la inclinación de la galaxia, ya que un descentrado en el plano de la galaxia será modificado por un factor $\cos(i)$. (2) la proyección del descentrado sobre la dirección de la ranura, que se manifiesta como un producto con el factor $\cos(\theta)$ donde θ es el ángulo entre la ranura y la dirección del descentrado, es decir que el descentrado observado en la dirección de la ranura siempre será menor que el real.

Convolución de los modelos con el *seeing*

A la hora de hacer comparaciones o ajustes de modelos teóricos con datos observados, es necesario afectar los modelos teóricos por el *seeing*. Usualmente esto se realiza aplicando una convolución con una función *gaussiana* que simula la *Point Spread Function (PSF)* del *seeing*, es decir que tiene el mismo *FWHM* que la misma. En éste caso se utilizó la función *Gaussian1DKernel* de la librería *astropy* (Price-Whelan et al., 2018) de *Python*.

Residuos

Para medir la precisión de los ajustes, y determinar así el descentrado entre las componentes estructurales, utilizamos **residuos ajustados**. Para obtener estos residuos es necesario calcular el residuo de *Pearson* y dividirlo por su desviación estándar $\sigma_{R_{pearson}}$ como se muestra en las siguientes expresiones:

$$R_{pearson} = \frac{I_{modelada} - I_{observada}}{\sqrt{(I_{modelada})}}$$

$$R_{ajustados} = \frac{R_{pearson}}{\sigma_{R_{pearson}}}$$

4 Búsqueda de descentrados en el NIR

Estos residuos cumplen la condición de que la media de la distribución es nula y los valores ± 1 corresponden a apartamientos de $\pm \sigma$ respecto de la media. Al realizar los ajustes se buscó, además de minimizar los residuos, simetrizarlos respecto del centro ya que esto indica que la asimetría incorporada por el descentrado de las estructuras es confiable. En la Fig.4.2 se muestra, para la galaxia NGC 3031, un ejemplo de como cambian los residuos del ajuste al desplazar las componentes en 0.1 px hacia ambos lados. Al observar la región nuclear (≤ 10 pc) se puede ver como el residuo pasa de tener una pendiente negativa, a estar plano, y luego una pendiente positiva (orden descendente en los paneles) al aplicar desplazamientos de -0.1 , 0 y 0.1 entre las dos componentes que forman el ajuste, en éste caso una *gaussiana* nuclear y un disco. Los pozos que aparecen entre $10 - 30$ pc se deben a que en la realidad el perfil es más complejo que la suma de dos componentes, la mayoría de los perfiles presentados en éste trabajo pueden ser completamente descriptos con tres componentes, sin embargo a la hora de determinar la posición del núcleo y de la componente más externa, no sólo no es necesario sino que introduce más parámetros que podrían degenerar el problema.

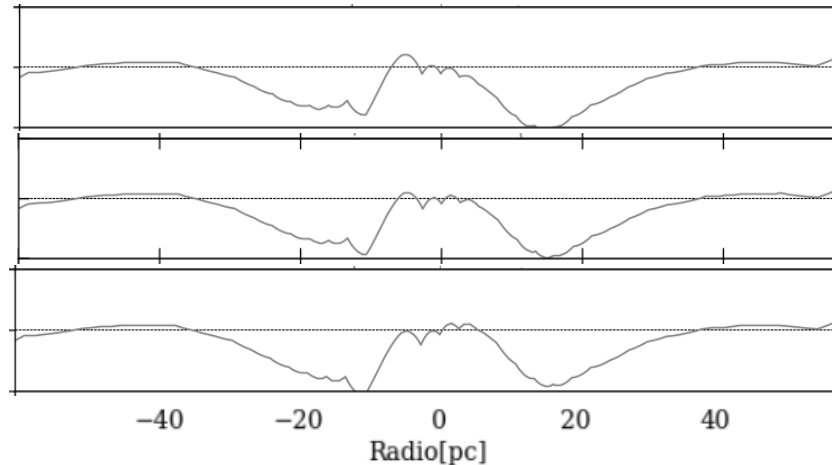


Figura 4.2: Ejemplo de residuo del ajuste al perfil extraído en $2.097 - 2.104 \mu\text{m}$ para la galaxia NGC 3031. los paneles muestran ajustes con distintos descentrados entre las componentes ajustadas (*gaussiana* nuclear y disco). El panel central presenta el residuo en el caso de las dos componentes centradas, el panel superior muestra el residuo cuando se aplica un desplazamiento de -0.1 px entre las dos componentes y el panel inferior muestra el resultado de aplicar un desplazamiento de 0.1 px.

4.3. Resultados

4.3.1. Objetos Individuales

En las figuras 4.3 a 4.7 se presentan los ajustes realizados mediante la Técnica de Descomposición de Perfiles Espaciales para las 16 galaxias de la submuestra con la que se trabajó. En los paneles superiores de cada figura, la intensidad observada en $2.097 - 2.104 \mu\text{m}$ se grafica con puntos rojos, el modelo total ajustado en negro y las diferentes componentes en gris. Los residuos de los ajustes se presentan en los paneles intermedios de cada figura. Para realizar los ajustes se eligieron las extracciones correspondientes a la longitud de onda más larga para minimizar la extinción por polvo y la contribución de la emisión proveniente de estrellas jóvenes, las cuales se encuentran distribuidas de manera menos homogénea que la población vieja subyacente (relativamente más roja). En la mayoría de los casos fue posible realizar los ajustes siguiendo los criterios establecidos en la Sec. 4.2, pero en algunos casos fue necesario realizar excepciones: para NGC 4594 no fue necesario ajustar una componente nuclear no-resuelta sino que el perfil pudo ser modelado utilizando solamente una componente de Sérsic ($n = 2.8$); para NGC 5194 no fue posible ajustar la región nuclear con una *gaussiana* del ancho del *seeing* sino con una de un ancho de aproximadamente el doble. Para las galaxias (NGC 2273, NGC 4258, NGC 5194, NGC 7331 y NGC 7743) se necesita una tercera componente para ajustar completamente sus perfiles, como se evidencia en los residuos obtenidos en los ajustes. Sin embargo, en todos los casos, la componente nuclear y la externa fueron satisfactoriamente modelados y su descentrado (o ausencia del mismo) determinado. Los parámetros de los distintos modelos se presentan en la tabla 4.2.

Notas sobre objetos Individuales

Los ángulos de posición (PA) en todos los casos son medidos desde el N y hacia el E. *FWHM* refiere al ancho a mitad de altura de la función *gaussiana*, y los valores de resolución espacial ("*seeing*") son los alcanzados en el plano focal del instrumento; este último no debe ser confundido con el *seeing* usualmente reportado en 5000\AA y corregido al cenit. El radio efectivo (R_e) es el radio a mitad de luz (Ec. 4.1). El radio efectivo medido por 2MASS se refiere también al radio a mitad de luz.

NGC 2273

4 Búsqueda de descentrados en el NIR

Cuadro 4.2: Se presentan los parámetros de los ajustes del perfil de intensidad para todas las galaxias de la muestra. De izquierda a derecha las columnas contienen: el nombre de la galaxia, el $FWHM$ de la función *gaussiana* que representa la componente nuclear no resuelta, el radio de escala de la componente de Sérsic, el índice de Sérsic de la misma, el descentrado en segundos de arco y el descentrado en pársecs. El guión presente en algunas galaxias en la columna de descentrado significa que no hemos encontrado descentrado entre las componentes del ajuste, es decir que si hubiera descentrado su valor esta por debajo de la resolución espacial del espectro.

Galaxia	$FWHM_g$ ["]	R_e ["]	n	Descentrado ["]	Descentrado [pc]
NGC 2273	0.67	2.25	1.5	-	-
NGC 3031	0.92	6.3	1.6	-	-
NGC 3718	1.13	3.45	1.6	0.06	4.95
NGC 3998	0.56	4.5	2.2	-	-
NGC 4258	0.77	6.9	1.6	-	-
NGC 4388	0.56	6.75	2.8	0.12	10.94
NGC 4450	0.78	4.35	2	-	-
NGC 4548	0.6	4.2	2.1	-	-
NGC 4565	0.92	3.45	1	-	-
NGC 4594	-	10.5	2.8	-	-
NGC 4725	1.23	4.2	1.2	-	-
NGC 5005	0.24	2.1	0.79	-	-
NGC 5033	0.7	7.8	2.2	0.21	19.62
NGC 5194	1.05	49.35	3.5	0.06	2.31
NGC 7331	0.63	21.45	2.9	0.11	7.26
NGC 7743	0.7	5.25	1.4	-	-

Programa:GN-2012B-Q-112. El *seeing* de la observación fue de $0''.66$ y el PA con el que se tomo el espectro fue 169° . El semieje mayor total medido a partir de imágenes en banda K_s fue de $78''.3$ (NED, 2MASS).

Esta galaxia presenta el perfil más complejo de la muestra, distinguiéndose claramente una tercer componente con una extensión aparente de ~ 200 pc (Fig. 4.3, panel superior izquierdo). Su morfología ha sido estudiada por varios autores, quienes han encontrado estructuras como: anillos (4), barras y una espiral nuclear. Mulchaey, Regan y Kundu (1997) la clasificaron como una galaxia con doble barra y midieron un tamaño de $8''$ y $24''$ para las longitudes de las mismas, a partir de imágenes NIR de 1 segundo de arco de resolución espacial y utilizando la técnica de ajuste de elipses. Sin embargo, usando imágenes en banda H tomadas con la cámara NICMOS

4 Búsqueda de descentrados en el NIR

del telescopio *Hubble* Erwin, 2004 encontró que la barra interna es en realidad un anillo interno con una espiral nuclear interna. Laurikainen, Salo y Ronald Buta (2005) confirmaron la presencia de ambas componentes: la barra externa y el anillo interno con la espiral nuclear usando imágenes en banda K_s del Telescopio Óptico Nórdico y, midiendo además, un diámetros de $2'' - 3''$ para el anillo.

Aquí se modeló el perfil de NGC 2273 usando una función *gaussiana* con $fwhm = 0''.67$ (o equivalentemente 100 pc) para modelar la fuente nuclear no resuelta, un disco nuclear ($n = 1.5$) con radio de escala de $2''.25$ ó 0.34 kpc. El radio de escala de la componente de Sérsic es comparable con el diámetro del anillo encontrado por Laurikainen, Salo y Ronald Buta (2005). No se encontraron descentrados entre las componentes.

NGC 3031

Programa:GN-2012A-Q-23. El *seeing* de la observación fue de $0''.92$ y el PA con el que se tomo el espectro de 194° . El radio efectivo medido a partir de imágenes en banda K_s es de $151''.8$ (Jarrett et al., 2003).

NGC 3031 es una espiral de gran diseño que ha sido modelada por diferentes autores con un disco de gran escala más una componente central. No hay consenso sobre la forma real de la componente central, Muñoz Marín et al. (2007) la describieron como un bulbo basándose en imágenes del ultravioleta cercano del *HST*. Además, ellos mencionan la presencia de bandas de polvo en la región nuclear. de Blok et al. (2008) estudiaron los perfiles de intensidad en las bandas J , H y K de 2MASS y encontraron que la componente central puede ser ajustada por un disco exponencial ($n = 1$). Laurikainen, Salo, Ronald Buta y Vasylyev (2004) encontraron un esferoide con índice de Sérsic $n = 2$ y radio de escala $57.1''$ usando imágenes en las bandas B y H . En nuestros espectros de banda K_s de GNIRS encontramos una componente de Sérsic con $n = 1.6$ y radio de escala de $6''.3$ ó 0.11 y una fuente nuclear no resuelta representada por una *gaussiana* de $fwhm = 0''.91$ (Ver Fig. 4.3 panel superior derecho).

NGC 3718

Programa:GN-2013A-Q-16. El *seeing* de la observación fue de $0''.83$ y el PA con el que se tomó el espectro de 241° . El semieje mayor total medido a partir de imágenes en banda K_s es de $162''.2$ (NED, 2MASS)

Esta galaxia presenta un disco de HI fuertemente deformado (e.g. Schwarz, 1985, Sparke et al., 2009). Como se presenta en la Fig. 4.3, panel inferior izquierdo), hemos modelado el perfil de ésta galaxia con un descentrado de $0''.06$ (4.95 pc) entre el disco

4 Búsqueda de descentrados en el NIR

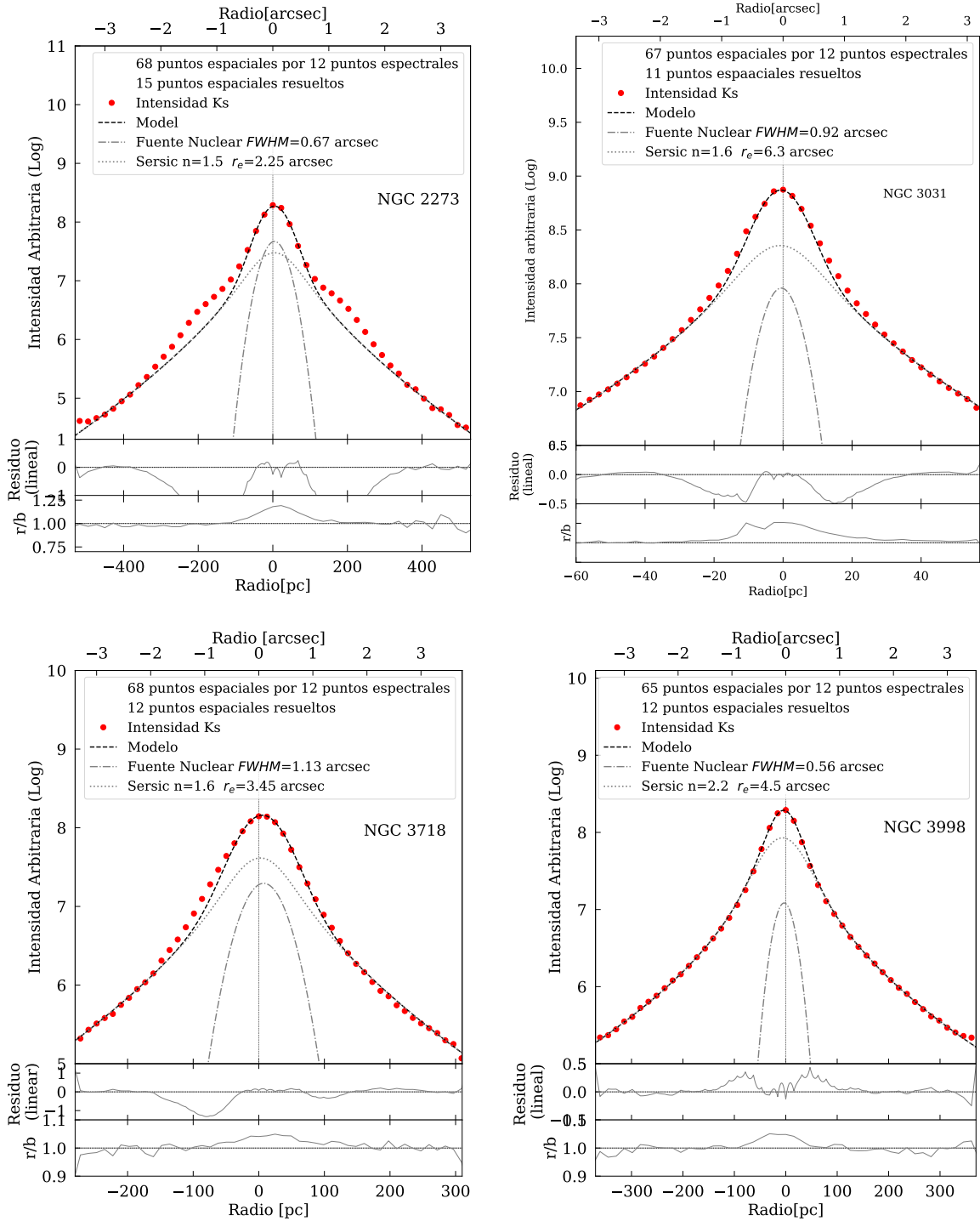


Figura 4.3: Modelado del perfil de intensidad radial en $2.097 - 2.104 \mu\text{m}$ para las galaxias NGC 2273, NGC 3031, NGC 3718 y NGC 3998. Para cada cuadrante, panel superior: La intensidad observada se grafica en rojo, el modelo total ajustado en negro y las diferentes componentes en gris. Panel intermedio: Se presentan los residuos ajustados tal como se describieron al comienzo de la sección. Panel inferior: cociente de intensidades de los perfiles extraídos en $\lambda 2.25 \mu\text{m}$ y $\lambda 2.1 \mu\text{m}$

4 Búsqueda de descentrados en el NIR

de $3''.45$ o 0.28 kpc de radio de escala y la fuente nuclear de $fwhm = 1''.13$ (Fig 4.3, panel inferior izquierdo). La deformación del disco de *HI* podría deberse a que el descentrado del ANSM presenta fuertes asimetrías en la región nuclear.

NGC 3998 Programa:GN-2012A-Q-23. El *seeing* de la observación fue de $0''.78$ y el PA con el que se tomó el espectro de 0° . El semieje mayor total medido a partir de imágenes en banda K_s es de $95''.3$ (NED, 2MASS)

Esta galaxia ha sido clasificada como una SO dominada por disco por Michard y Marchal (1994) basándose en el perfil de intensidad. En la Fig. 4.3 (panel inferior derecho) se presenta el mejor ajuste para ésta galaxia, consiste en una componente de Sérsic con $n = 2.2$ y un radio de escala de $4''.5$ (o 0.47 kpc) y una función *gaussiana* de $FWHM = 0''.56$ (Fig. 4.3, panel inferior derecho). No hemos encontrado descentrado entre componentes.

NGC 4258

Programa: GN-2012A-Q-23. El *seeing* de la observación fue de $0''.77$ y el PA con el que se tomó el espectro de 130° . NGC 4258 es una galaxia que alberga un núcleo tipo Seyfert 1.9 y se encuentra a 6.8 Mpc de distancia. Su diámetro es de $1320''$ o 46.53 kpc (Nilson, 1973). Hemos modelado su perfil de intensidad con una componente *gaussiana* de $FWHM = 0''.77$ y una componente de Sérsic con $n = 1.59$ y radio de escala $r_e = 6''.9$ (o 0.24 kpc). No hay descentrado entre las componentes. (Ver Fig. 4.4, panel superior izquierdo.)

NGC 4388

Programa:GN-2013A-Q-16. El *seeing* de la observación fue de $0''.58$ y el PA con el que se tomó el espectro de 64° . NGC 4388 es una galaxia espiral barrada cuyo núcleo está clasificado en el óptico como Seyfert 1.9. Su diámetro en la banda K_s es de $190''$ medido a partir de imágenes de 2MASS (NED). En éste trabajo hemos modelado el perfil de intensidad (Fig. 4.4) mediante la suma de una función *gaussiana* de $fwhm = 0''.56$ y una componente de Sérsic con $n = 2.8$ y un radio de escala $r_e = 6''.75$ (o 0.61 kpc). El modelo que cumple con los criterios establecidos en la Sec. 4.2 requiere de un descentrado entre las componentes de $0''.12$ (10.93 kpc) en la dirección de la ranura. (Fig. 4.4, panel superior derecho)

NGC 4450

Programa:GN-2012A-Q-23. El *seeing* de la observación fue de $0''.96$ y el PA con el que se tomó el espectro de 79° . NGC 4450 es una galaxia espiral barrada y anillada clasificada como LINER 1.9. Como se muestra en el panel inferior izquierdo de la

4 Búsqueda de descentrados en el NIR

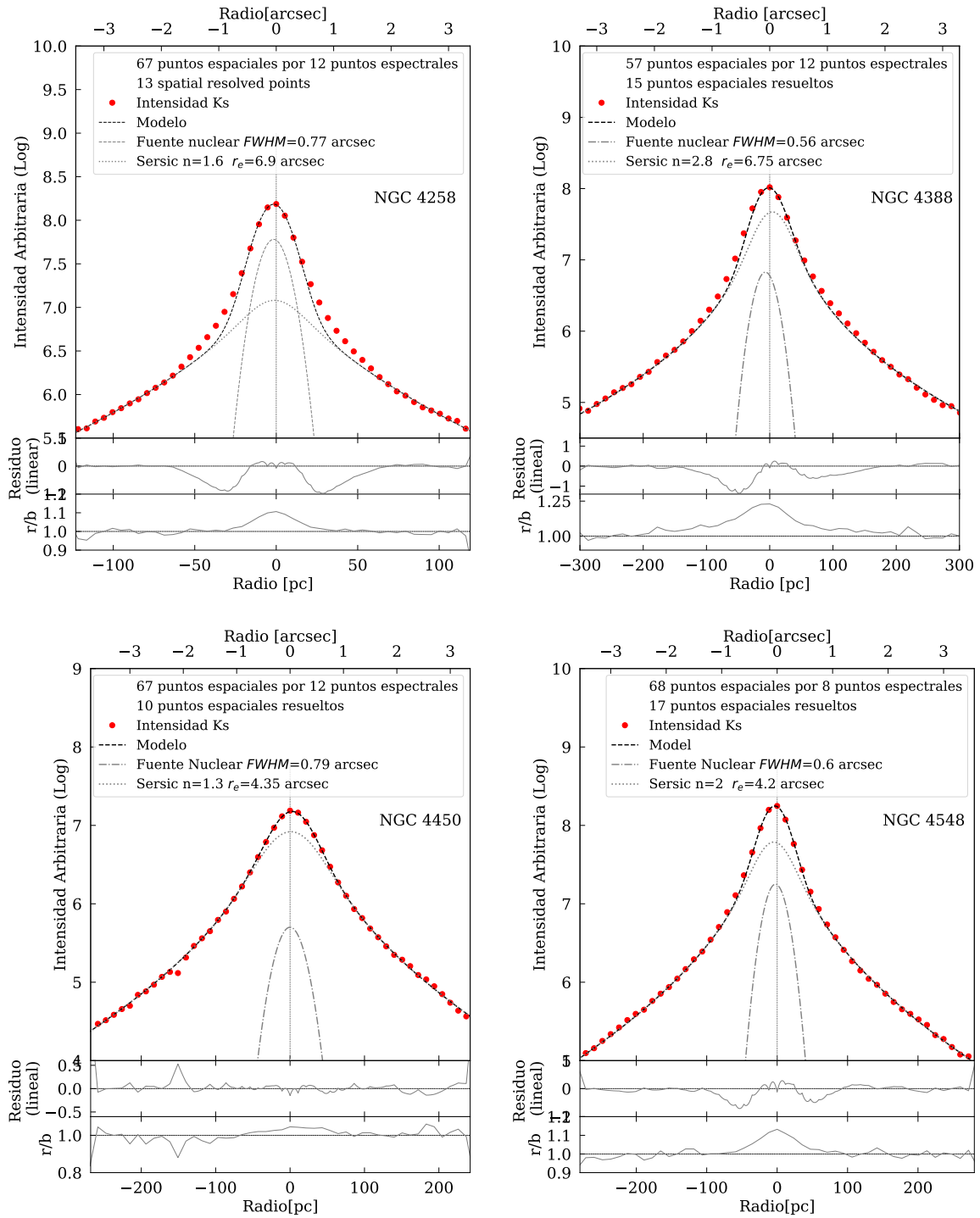


Figura 4.4: Idem Fig. 4.3 para las galaxias NGC 4258, NGC 4388, NGC 4450 y NGC 4548.

4 Búsqueda de descentrados en el NIR

Fig. 4.4, nuestro mejor ajuste para ésta galaxia consiste en una fuente nuclear de $fwhm = 0''.77$ más una componente de Sérsic $n = 2$ con un radio de escala de $r_e = 4''.35$ ó 0.31 kpc. No se observan descentrados en el perfil.

NGC 4548

Programa:GN-2013A-Q-16. El *seeing* de la observación fue de $0''.59$ y el PA con el que se tomó el espectro de 74° . NGC 4548 es una galaxia espiral barreada con un núcleo de tipo LINER 2. El mejor ajuste para su perfil de intensidad consiste en una función *gaussiana* de $fwhm = 0''.59$ y una componente de Sérsic con $n = 2.09$ y radio de escala $r_e = 4''.2$ ó 0.33 kpc. No se observan descentrados entre las componentes. (Ver panel inferior derecho de la Fig. 4.4)

NGC 4565 Programa:GN-2013A-Q-16. El *seeing* de la observación fue de $0''.71$ y el PA con el que se tomó el espectro de 277° . NGC 4565 es una galaxia espiral cuyo núcleo es de tipo Seyfert 1.9. De acuerdo a Jarrett et al., 2003 su radio efectivo en la banda K_s es de $15''.93$. En el panel superior derecho de la Fig. 4.5 se muestra como su perfil fue ajustado con una componente nuclear de $fwhm = 0''.91$ y un disco ($n = 1$) con radio de escala de $r_e = 3''.45$ (o 0.2 kpc). No se observa descentrado entre las componentes.

NGC 4594

Programa:GN-2013A-Q-16. El *seeing* de la observación fue de $0''.62$ y el PA con el que se tomó el espectro de 31° . NGC 4594 es una galaxia espiral cuyo núcleo está clasificado como LINER 2. Su radio efectivo en banda K_s es de $55''.3$ (Jarrett et al., 2003). Para modelar su perfil no fue necesario incorporar una componente no resuelta sino que el mismo puede ser bien descrito por una única componente de Sérsic con $n = 2.8$ y radio de escala de $r_e = 10''.5$ (0.55 kpc), ver panel superior derecho de la Fig. 4.5.

NGC 4725

Programa:GN-2012A-Q-120. El *seeing* de la observación fue de $1''.15$ y el PA con el que se tomó el espectro de 100° . NGC 4725 es una galaxia espiral barreada y anillada peculiar, su núcleo está clasificado como Seyfert 2. Su radio efectivo en la banda K_s es de $17''.56$ (Jarrett et al., 2003). En nuestro mejor ajuste del perfil de intensidad utilizamos una fuente nuclear de $fwhm = 1''.23$, acorde al alto *seeing* de la observación, y una componente de Sérsic con $n = 1.2$ y radio de escala de $r_e = 4.27$ (o 0.27 kpc) que puede ser asociada a un disco dado su índice de Sérsic muy cercano a la unidad. Ver panel inferior izquierdo de la Fig. 4.5

4 Búsqueda de descentrados en el NIR

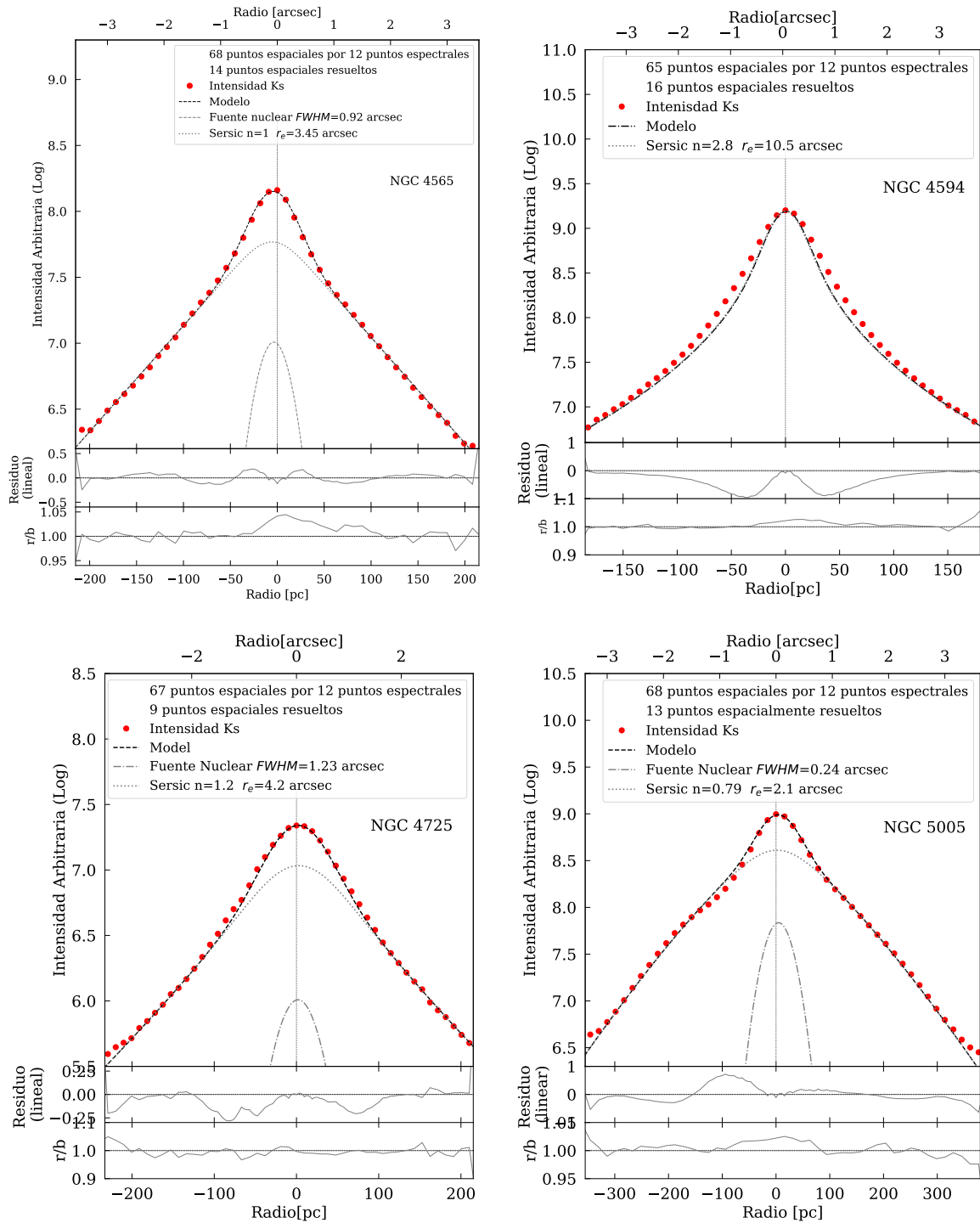


Figura 4.5: Mismas referencias que la Fig. 4.3 para las galaxias NGC 4565, NGC 4594, NGC 4725 y NGC 5005.

NGC 5005

Programa:GN-2013A-Q-16. El *seeing* de la observación fue de $0''.75$ y el PA con el que se tomó el espectro de 260° . NGC 5005 es una galaxia espiral barreada y anillada con un núcleo de tipo LINER 1.9 y un radio efectivo medido en la banda Ks de $36''.4$. Para modelar su perfil de intensidad se utilizó una fuente nuclear de $fwhm = 0''.25$, y una componente de Sérsic con $n = 0.79$ y un radio de escala de $r_e = 2''.1$ (o 0.22 kpc). Dado que al momento en que se realizó ésta observación el *seeing* estimado en el NIR fue mejor que $0''.4$, es probable que el *seeing* reportado por Mason et al. esté sobrevalorado y por lo tanto una *gaussiana* de $fwhm \sim 0''.25$ sea una buena aproximación para la componente no resuelta. Ver panel inferior derecho de la Fig. 4.5

NGC 5033

Programa:GN-2012A-Q-23. El *seeing* de la observación fue de $0''.62$ y el PA con el que se tomó el espectro de 130° . NGC 5033 es una galaxia espiral que alberga un núcleo de tipo Seyfert 1.5 y posee un radio total en la banda K_s de $197''.6$ de acuerdo con Jarrett et al. (2003). En nuestro mejor ajuste la galaxia posee una fuente nuclear no resuelta de $fwhm = 0''.7$ y una componente de Sérsic con $n = 2.2$ y radio de escala de $r_e = 7''.8$ ó 0.73 kpc. Entre éstas dos componentes se encontró un descentrado de $0''.21$ (19.61 kpc), ver panel superior izquierdo de la Fig. 4.7. Ya existe una mención a éste descentrado en la literatura, fue reportado por Mediavilla et al. (2005) en un trabajo donde se estudió la galaxia utilizando espectroscopía de campo integral. Ellos encuentran un descentrado de $2''.5$ en la dirección E entre el pico de emisión estelar (al que llaman núcleo óptico) y la isofota más externa, este valor es de $1''.9$ cuando se lo proyecta sobre la dirección de la ranura de nuestro espectro. El descentrado que nosotros hemos medido es significativamente mas chico, sin embargo, se trata de un descentrado que no es medido respecto de el disco global de la galaxia sino respecto de una estructura de menor tamaño, confinada en la región central de la galaxia, es de esperarse entonces que el desacople gravitacional sea mayor mientras mayor sea la escala de la estructura. En la Fig. 4.6 (panel inferior izquierdo) se presenta una imagen del *HST* de la región nuclear de NGC 5033 en la banda F160W ($1.4 - 1.8 \mu\text{m}$), donde también se representa la ranura utilizada para obtener el espectro con GNIRS. Se pueden observar importantes bandas de polvo oscuras "espiraleando" hacia el centro.

NGC 5194

4 Búsqueda de descentrados en el NIR

Programa:GN-2012A-Q-23. El *seeing* de la observación fue de $0''.55$ y el PA con el que se tomó el espectro de 190° . NGC 5194, también llamada M51, es una galaxia de tipo espiral peculiar con un núcleo de tipo Seyfert 2 y un radio efectivo en la banda K_s de $92''.2$ (Jarrett et al., 2003). Hemos modelado su perfil con una fuente nuclear de $fwhm = 1''.05$, y una componente de Sérsic con un radio de escala de $r_e = 49''.35$ (1.9 kpc) y un índice de Sérsic de $n = 3.5$, es decir una estructura de tipo *bulge*. Presenta un descentrado entre las dos estructuras de $0''.06$ ó 2.31 pc, ver panel superior derecho en la Fig. 4.7. NGC 5194 es la famosa galaxia *whirlpool* o "del remolino", una galaxia *grand design* que se encuentra en interacción con la galaxia irregular NGC 5195, lo que causa distorsiones tidales en ambas galaxias que se pueden ver claramente en el brazo espiral que sale de NGC 5294 y la une con su compañera (Keel et al., 1985). En cuanto a la región nuclear, a partir de espectroscopía de campo integral con SAURON/HST, Dumas et al., 2007 proponen que NGC 5194 tiene una espiral de polvo nuclear y un *outflow* asociado al AGN mapeado en emisión [O III].

NGC 7331

Programa:GN-2011B-Q-111. El *seeing* de la observación fue de $0''.46$ y el PA con el que se tomó el espectro de 137° . Esta galaxia está altamente inclinada ($i = 72^\circ$) y presenta un radio efectivo de $43''.4$ medido en la banda K_s (Jarrett et al., 2003). Presenta un anillo de gas mapeado en HI (Bosma 1978), en CO (J. S. Young y N. Scoville, 1982) y en colores NIR (Telesco 1982) el cual es considerado un anillo de gas prototipo, con un radio interno de $7''$ (Battaner et al., 2003). Su núcleo ha sido reportado como inactivo por Bower et al. (1993) y como LINER por Cowan, Romanishin y Branch (1994). NGC 7331 es el miembro más brillante de un grupo de galaxias que lleva su nombre (Makarov y Karachentsev, 2011); asimismo, brazos de marea producto de su interacción con galaxias satélites han sido reportados por Ludwig et al. (2012). Respecto de la región nuclear, Battaner et al. (2003) estudió la rotación del gas ionizado ($H\alpha$) en la región interna al anillo de gas y encontró un flujo axi-simétrico de gas que cae desde el anillo hacia la región central.

Para modelar el perfil de ésta galaxia hemos utilizado una fuente nuclear de $fwhm = 0''.63$ y una componente de Sérsic con $n = 2.9$ y radio de escala de $r_e = 21''.45$ (o 1.48 pc), ésta segunda estructura tiene un radio comparable con el anillo de gas cuyo radio externo es de 2 kpc de acuerdo con Battaner et al. (2003). Hemos encontrado un descentrado entre la fuente nuclear y la componente más extendida de $0''.09$ (6.23 pc).

NGC 7743

4 Búsqueda de descentrados en el NIR

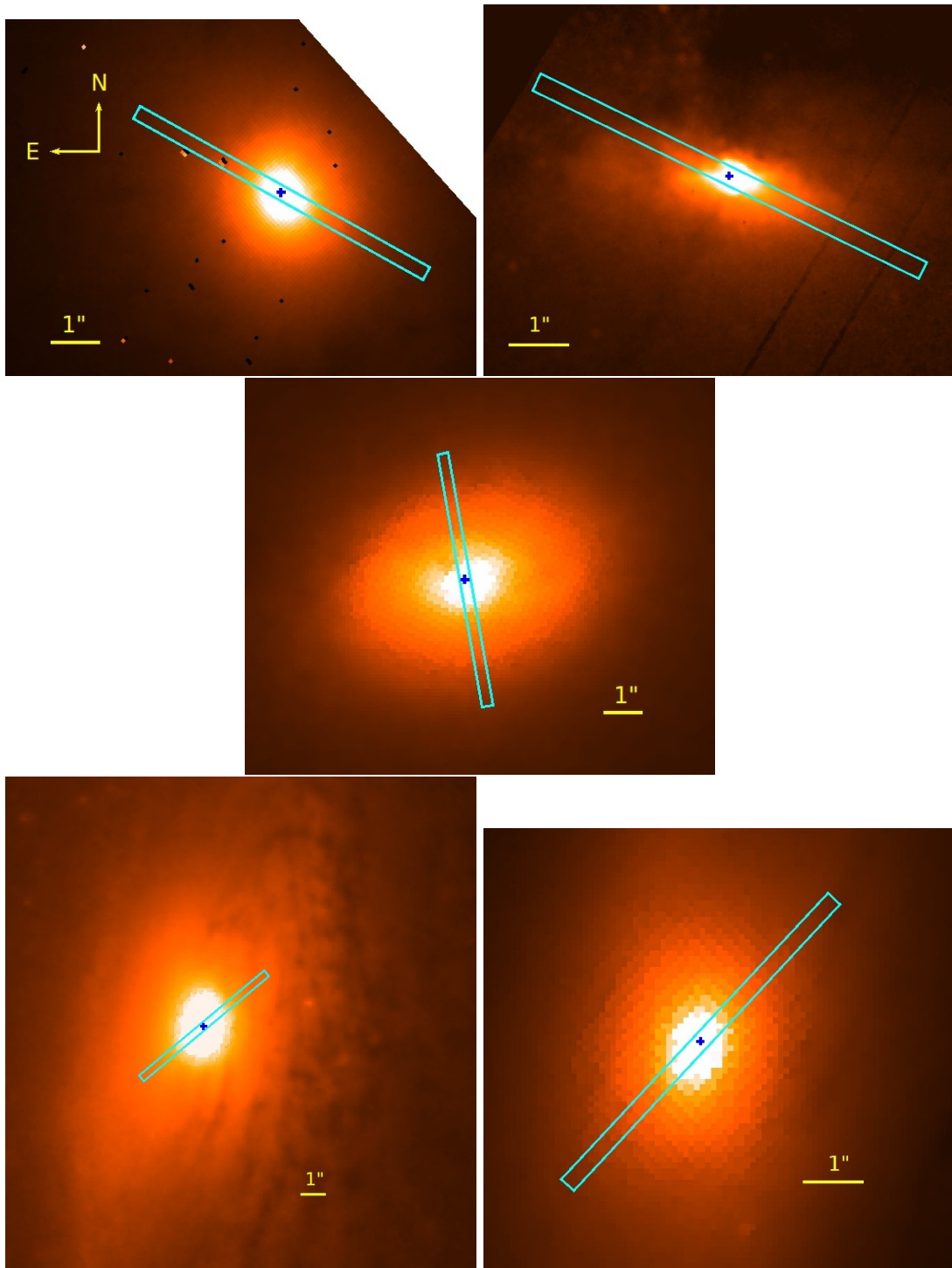


Figura 4.6: Imágenes tomadas con la cámara *NICMOS* del *HST* con el filtro F160W ($1.4 - 1.8 \mu\text{m}$ para las cinco galaxias de nuestra muestra que presentan descentrados. La cruz azul marca el punto donde fue tomado el espectro y el rectángulo azul representa la ranura. **Panel superior izquierdo:** NGC 3718, ID del programa: 11080, PI: Daniela Calzetti. **Panel superior derecho:** NGC 4388. ID del programa: 7867, PI: Richard W. Pogge. **Panel medio:**NGC 5194. ID del programa: 9360, PI:Robert C. Kennicutt. **Panel inferior izquierdo:** NGC 5033. ID del programa: 9360, PI:Robert C. Kennicutt. **Panel inferior derecho:**NGC 7331. ID del programa: 9360, PI: Robert C. Kennicutt.

4 Búsqueda de descentrados en el NIR

Programa:GN-2012A-Q-120. El *seeing* de la observación fue de $0''.82$ y el PA con el que se tomó el espectro de 290° . NGC 7743 es una espiral barreada con un núcleo de tipo Seyfert 2 y un semieje mayor total medido en la banda K_s de $93''.2$ (NED, medido por 2MASS). En nuestro modelo, la fuente nuclear no resuelta está representada por una *gaussiana* de $fwhm = 0''.7$ y una componente de Sérsic con $n = 1.4$ y un radio de escala de $r_e = 5''.25$ (0.54 kpc).

4.3.2. Núcleos Descentrados

De las 16 galaxias analizadas, hemos detectado descentrados entre la fuente nuclear y una componente de mayor escala en 5 de ellas: NGC 3718, NGC 4388, NGC 5033, NGC 5194 y NGC 7331. En la Fig. 4.6 se presentan imágenes *NICMOS* en $1.4 - 1.8 \mu\text{m}$ donde se representa la ranura con la que fueron tomados los espectros en cada caso. Para NGC 4388 y NGC 5194 se puede ver como en la dirección NE de la ranura la intensidad está disminuida, mientras que en el lado opuesto no. En NGC 4388 (panel superior derecho) se ve claramente como una banda de polvo ingresa al núcleo desde el norte. Para NGC 5194 no es tan clara la fuente de la extinción pero si se observa una pequeña región más oscura, al costado de la ranura en sentido antihorario, justo en el centro de lo que parece la zona extinguida. Debido a esto, no se puede distinguir si los descentrados son reales o son debidos a una asimetría en el perfil provocada por la diferencia de extinción a ambos lados de la ranura y no serán considerados como parte de la muestra de núcleos descentrados.

Teniendo esto en cuenta, 3 de los 16 núcleos estudiados presentan descentrados. Dicho de otro modo, la fracción de galaxias con descentrados representa un $\sim 20\%$ de la muestra total seleccionada.

A partir de los resultados obtenidos a partir del modelado de las componentes estructurales del perfil espacial para cada galaxia, se realizó un estudio estadístico para buscar alguna posible correlación entre la presencia de descentrados y otros parámetros de los núcleos. En este caso hemos analizado el tipo de actividad nuclear, la luminosidad en rayos-X suaves y la masa del ANSM. Los histogramas de estos parámetros se presentan en la figura 4.8. Dada la baja cantidad de puntos de la muestra y al hecho de que su distribución en el espacio de parámetros no es normal (como se puede ver en los histogramas de la Fig. 4.1) no ha sido posible aplicar un método estadístico para analizar si las muestras con y sin descentrados son iguales o no.

4 Búsqueda de descentrados en el NIR

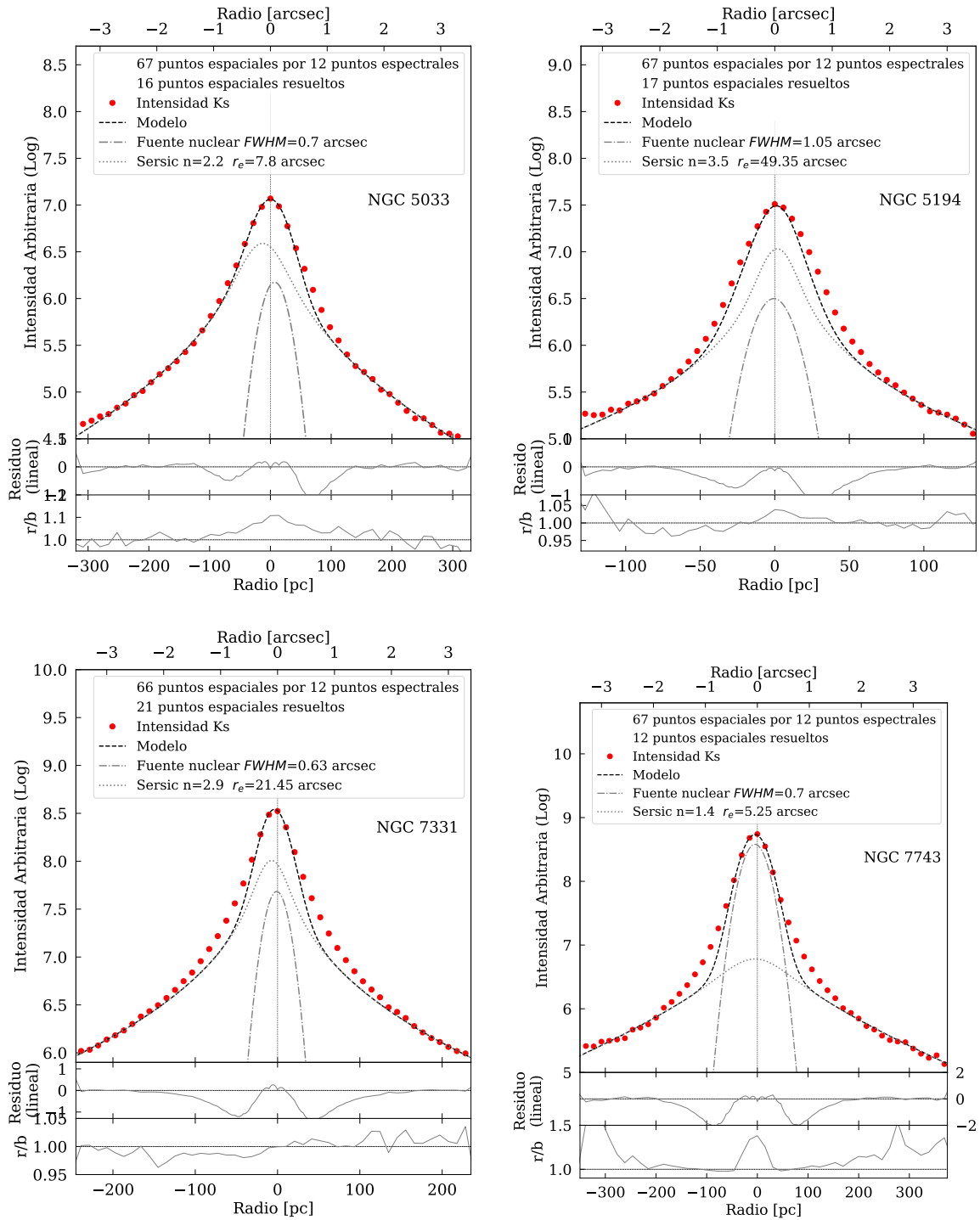


Figura 4.7: Mismas referencias que la 4.3.

4 Búsqueda de descentrados en el NIR

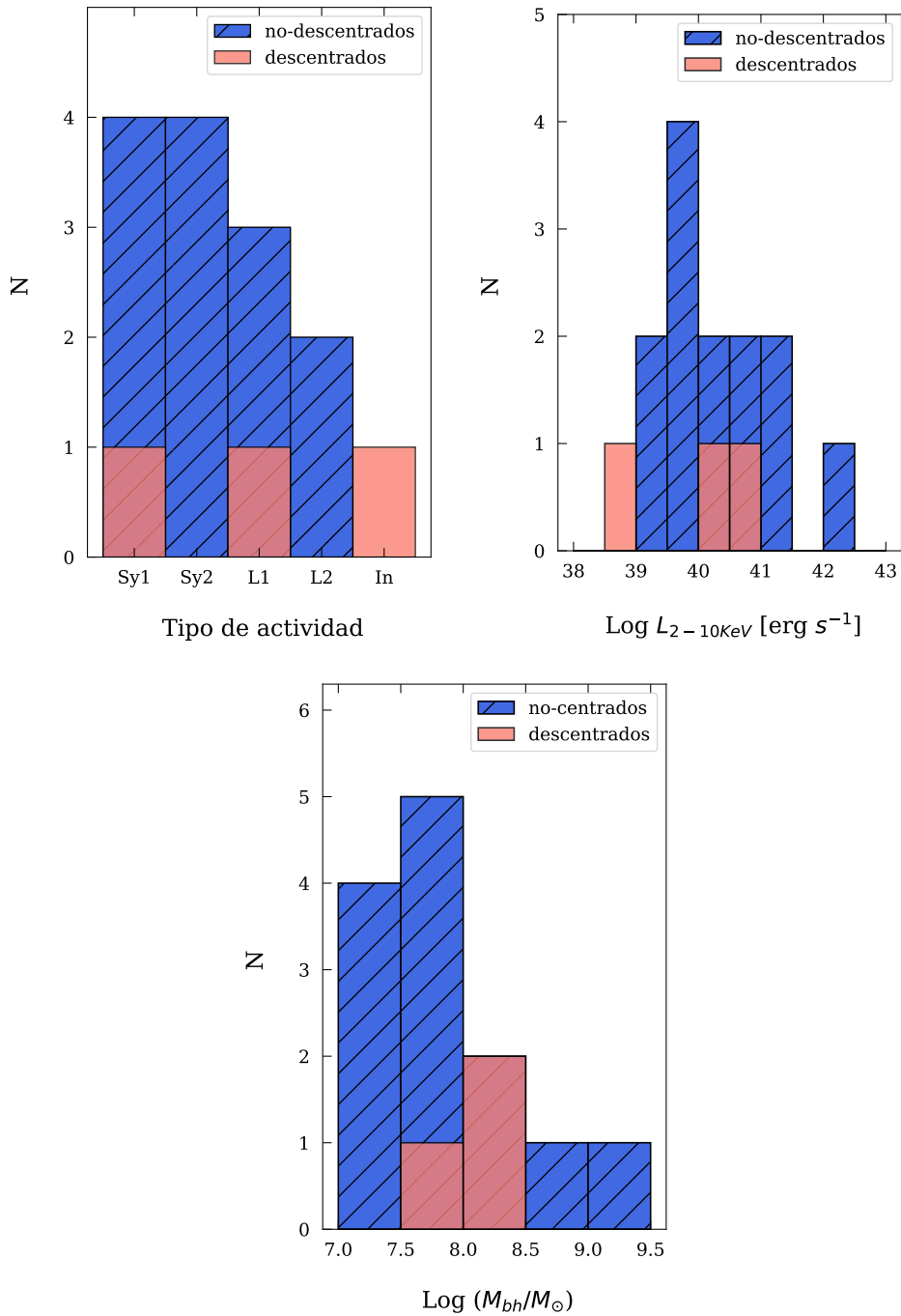


Figura 4.8: Distribuciones de las galaxias de la sub-muestra en los parámetros: tipo de actividad (panel superior izquierdo), Luminosidad X en 2 – 10KeV (panel superior derecho) y M_{SMBH} (panel inferior). En todos los casos se distingue entre las galaxias que presentan descentrados (rosa) y aquellas que no lo presentan (azul). Cabe resaltar que el hecho de que no se encuentre un descentrado no significa necesariamente que el mismo no exista, sino que su dimensión en la dirección de la ranura cae por debajo de la resolución espacial del espectro en cada caso.

4 Búsqueda de descentrados en el NIR

A pesar de que no se puede hacer un análisis estadísticamente significativo, a partir de los histogramas si se pueden destacar algunas tendencias:

- Los ANSM que residen en las galaxias cuyos núcleos se encuentran descentrados, poseen masas intermedias, siendo sus valores logarítmicos: 8.1 para NGC 3718, 8 para NGC 5033 y 7.8 para NGC 7331. Esto podría sugerir que para que un descentrado sea detectable mediante esta técnica, el ANSM debe ser lo suficientemente masivo para dominar gravitacionalmente la región circumnuclear y así acoplar a su potencial a la población estelar cercana pero no tanto para que la influencia de su potencial gravitacional haya acoplado las regiones externas de la galaxia.
- En el panel superior izquierdo de la Fig. 4.8 se puede ver que las galaxias que presentan descentrados albergan núcleos de tipo 1 o inactivo. Esto podría deberse a que los AGN de tipo 2 presentan en promedio más polvo en la región nuclear que los de tipo 1 y, por lo tanto, un posible descentrado quedaría invalidado por la presencia de polvo en el perfil, como es el caso de NGC 5194 y de NGC 4945 (ver Capítulo 5). La otra galaxia cuyo descentrado hemos descartado, NGC 4388, posee clasificación *Seyfert* 1 – 1.9 en este trabajo, heredada de Mason et al. (2015), sin embargo, otros autores la han catalogado como *Seyfert* 2 (Por ejemplo, C. Ramos Almeida, Pérez García y Acosta-Pulido (2009) o Schmitt, Donley et al. (2003)).

4.3.3. Exceso infrarrojo

Realizando el cociente entre los perfiles de intensidad en distintas longitudes de onda es posible caracterizar el enrojecimiento de la emisión que pudiera existir en distintos radios de las galaxias. El mismo puede deberse a la extinción (que ya no es significativa en la longitud de onda que observamos) o por un exceso de emisión en alguna longitud de onda con respecto al continuo emitido por las estrellas. En particular, el cociente de los perfiles utilizados en este trabajo extraídos en $2.247 - 2.254 \mu\text{m}$ y $2.097 - 2.104 \mu\text{m}$, evidencian un exceso en la región roja del espectro que puede interpretarse como la presencia de polvo calentado por el núcleo activo (800 – 1500 K). Esto se debe a que en el extremo azul de la banda K_{long} domina la contribución del continuo estelar mientras que en el extremo rojo empieza a tomar importancia la emisión del polvo caliente. Esto se explicará con más detalle en la subsección 5.3.2.

4 Búsqueda de descentrados en el NIR

En el panel inferior de las Figuras 4.3 a 4.7 se presenta el cociente del perfil en $\lambda 2.247 - 2.254 \mu\text{m}$ y $\lambda 2.097 - 2.104 \mu\text{m}$, denominado r/b por los colores rojo y azul en inglés, respectivamente. Se observa que en la mayoría de los casos el cociente presenta un exceso para longitudes de onda largas claramente confinado en la región nuclear. Para caracterizar esta estructura, a la que llamaremos "exceso" de ahora en adelante, utilizamos dos parámetros: el ancho a la mitad de altura del pico (a_{50} , que equivaldría al $FWHM$ si la distribución fuera *gaussiana*) y el ancho al 10% del pico de intensidad (a_{10}). En la Fig. 4.9 se presentan dos ejemplos gráficos de la definición de los anchos para las galaxias NGC 3998 y NGC 4388. El pico de emisión utilizado para medir los anchos fue el pixel más brillante del perfil, al que denominaremos "centro" de ahora en más. Notar que este criterio es totalmente independiente de la forma del perfil.

Para calcular las incertezas en los anchos y en el centro, se midió la variación de los mismos respecto de asumir un modelo *gaussiano* para el perfil del exceso. Esto permite estimar cuanto pueden variar los valores de los anchos al asumir distintas formas para la estructura.

Cuadro 4.3: Parámetros de los excesos infrarrojos para las 14 galaxias de la sub-muestra que presentan el exceso infrarrojo.

Galaxia	Centro [pc]	$FWHM$ [pc]	a_{10} [pc]
NGC 2273	21 ± 6	128 ± 2	278 ± 2
NGC 3031	-4 ± 2	25 ± 4	70 ± 9
NGC 3718	18.5 ± 11	94 ± 8	266 ± 6
NGC 3998	-15 ± 17	91 ± 7	146 ± 6
NGC 4258	-0.7 ± 2	30 ± 2	59 ± 2
NGC 4388	-6 ± 10	99 ± 3	385 ± 2
NGC 4450	22 ± 14	84 ± 11	146 ± 2
NGC 4548	-1 ± 2	60 ± 2	124 ± 2
NGC 4565	8 ± 9	61 ± 5	106 ± 66
NGC 4594	15 ± 2	61 ± 9	157 ± 70
NGC 5005	0 ± 14	141 ± 14	197 ± 4
NGC 5033	7 ± 5	102 ± 3	249 ± 2
NGC 5194	3 ± 5	22 ± 3	53 ± 18
NGC 7743	-5 ± 5	49 ± 2	73 ± 2

Para determinar si existe correlación entre los distintos parámetros de la muestra y

4 Búsqueda de descentrados en el NIR

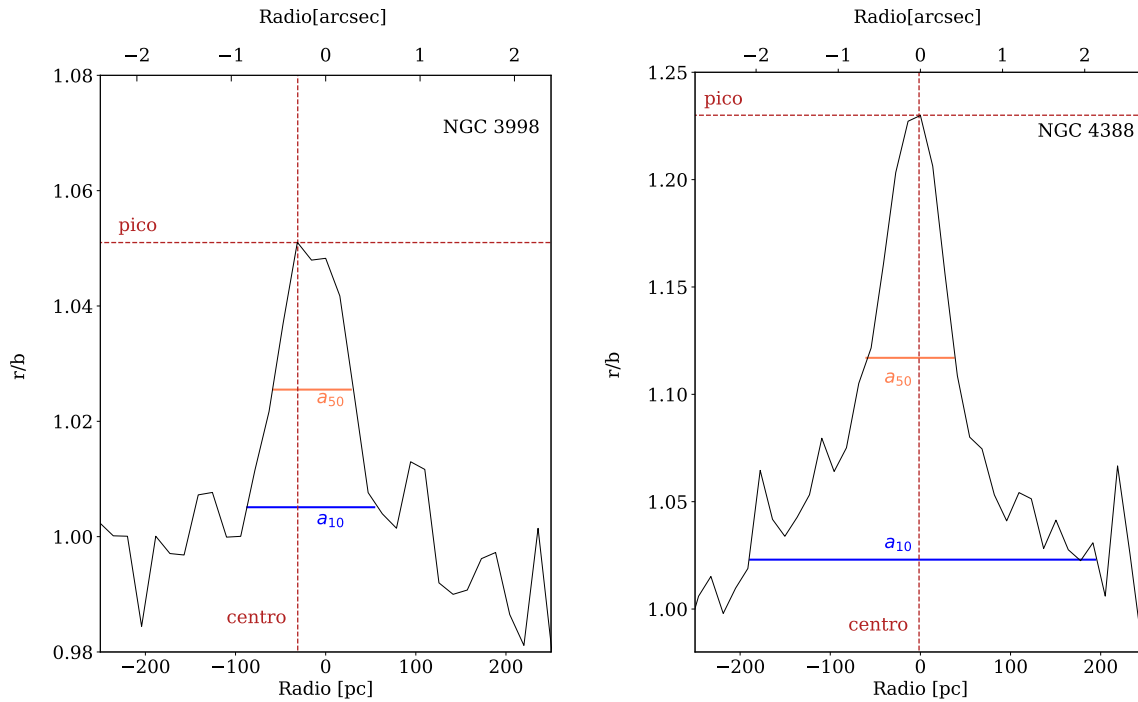


Figura 4.9: Se presentan dos ejemplos del procedimiento de medición del a_{50} y el a_{10} para las galaxias NGC 3998 (izquierda) y NGC 4388 (derecha). Las líneas horizontales marcan: el pico del perfil (rojo), la mitad de intensidad del pico y el 10 % de intensidad del pico (azul). Las líneas verticales marcan los anchos a las respectivas intensidades.

los parámetros con los que se han descrito los excesos infrarrojos hemos utilizado el coeficiente de correlación de Pearson (Benesty et al., 2009) que mide la correlación lineal entre dos variables con distribución normal. La confiabilidad en el valor de correlación calculado no es independiente del tamaño de la muestra utilizada sino que mientras mayor sea la muestra mas confiable será el valor de correlación obtenido. Bujang y Baharum, 2016 presentan tablas donde se puede encontrar el tamaño de muestra mínimo necesario para detectar distintos valores de correlación lineal. En particular, para una muestra de 14 elementos, es decir, la cantidad de galaxias para las que encontramos excesos infrarrojos en este trabajo, es posible detectar correlaciones con coeficiente de Pearson mayor a 0.7. Por lo tanto, cuando analicemos las correlaciones entre parámetros de esta muestra, consideraremos que cualquier par de parámetros con valor coeficiente de Pearson menor a 0.7 sera considerado como no-correlacionado.

En la Fig. 4.10 se muestran, para todas las galaxias de la muestra con un exceso apreciable, los dos anchos medidos en función del *seeing* correspondiente a la observación de cada espectro, en ambos casos se observa que no hay correlación (coeficientes

4 Búsqueda de descentrados en el NIR

de Pearson de 0.34 para a_{50} y de 0.003 para a_{10}), lo que nos asegura que no estamos simplemente viendo un efecto del *seeing* de los datos. En el panel izquierdo, se trazó, en azul, la línea correspondiente a la función identidad, es decir, que los puntos sobre la recta estarán al límite de la resolución. Los puntos por encima de la misma están espacialmente resueltos, es decir que el ancho de las estructuras es real y no está limitado por *seeing*. El punto que se encuentra por debajo de la recta corresponde a NGC 7743; el hecho de que el ancho sea menor que el limitado por *seeing* puede significar dos cosas: o bien el ancho está sobreestimado, o bien el *seeing* está subestimado. Probablemente se trate de la segunda opción, ya que la forma del exceso (panel inferior derecho de la Fig. 4.7) tiene una clara forma *gaussiana* y, por lo tanto, es probable que se trate de un perfil limitado por *seeing*. El punto ubicado levemente por encima de la recta, abajo a la izquierda, corresponde a NGC 5194 y está limitado por *seeing*, por lo que la leve asimetría que presenta el exceso hacia el rojo es, probablemente, causada por ruido. El resto de los excesos están espacialmente resueltos.

En el panel superior izquierdo de la Fig. 4.11 muestra los centros medidos para los excesos en función de la inclinación de la galaxia. La distribución presenta un coeficiente de Pearson de -0.22 y, por lo tanto, los centros de los excesos detectados no correlacionan con la inclinación de la galaxia como se esperaría en el caso de que se debieran a efectos de proyección. En algunos casos, los centros de los excesos se relacionan con las componentes estructurales ajustadas al perfil de intensidad (Sec. 4.3.1): para las tres galaxias donde detectamos descentrados nucleares, NGC 3718, NGC 5033 y NGC 7331, los centros de los excesos están corridos hacia el mismo lado que el núcleo de la galaxia, sugiriendo que el exceso corresponde a polvo nuclear calentado por un AGN o un *starburst* nuclear. Para algunas de las galaxias que no presentan descentrados se tiene que el centro del exceso cae también por debajo del límite de detección: NGC 3031 (el pico agudo en ~ -10 pc que muestra el panel inferior del cuadrante superior derecho de la Fig. 4.3 es un ruido observacional que está presente solamente en el perfil azul y por eso aparece en el cociente r/b) NGC 4258, NGC 4548, NGC 4565 (presenta una cola a la derecha pero el perfil del exceso está centrado) y NGC 5005.

Hay cuatro casos en los que el centro del exceso no es cero y la galaxia no presenta descentrado en las componentes estructurales: NGC 2273, NGC 3998, NGC 4450 y NGC 4594. En los dos últimos casos el exceso es tan plano que su centro queda virtualmente enmascarado dentro del ruido. En los casos de NGC 2273 y NGC 3998 sólo queda especular: una opción es que la estructura de polvo esté corrida respecto del núcleo debido a vientos provenientes de un AGN o a la actividad *starburst*.

4 Búsqueda de descentrados en el NIR

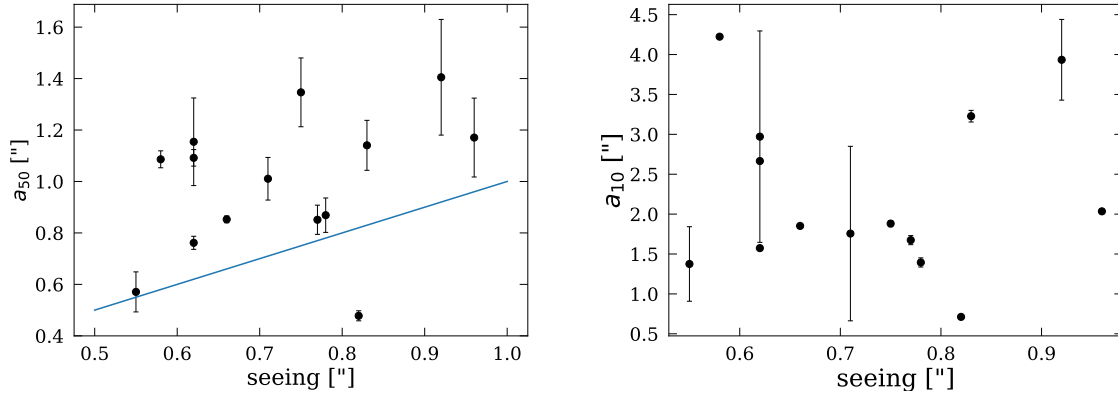


Figura 4.10: Anchos al 50 y 10 % de intensidad del pico en función del *seeing* del espectro para todas las galaxias de la muestra que presentan exceso al rojo.

Finalmente, la única galaxia de la muestra que es inactiva no presenta exceso al rojo, lo que refuerza la idea de que el exceso es producido por el polvo caliente en la región nuclear a temperaturas de 800 – 1500 K.

Para explorar el posible origen de estos excesos, estudiamos la dependencia del cociente de los anchos (a_{50}/a_{10}) con los parámetros de las galaxias presentados en la Tabla 4.1. Los resultados se presentan en la Fig. 4.11. El panel superior izquierdo de la figura fue analizado más arriba, en los tres paneles restantes se muestra: el tipo de actividad en función del cociente de los anchos (panel superior derecho), la luminosidad en rayos X suaves en función del cociente de los anchos (panel inferior izquierdo) y la masa del ANSM en función del cociente de los anchos (panel inferior derecho). Para el caso de la luminosidad X se encuentra un coeficiente de Pearson de 0.5 mientras que para la masa del ANSM el coeficiente es de -0.22. Ambos valores se encuentran por debajo del límite de 0.7 establecido por el tamaño de la muestra, lo cual no significa que no exista correlación sino que la misma, en caso de existir, no podría ser establecida con esta muestra. En el caso del tipo de actividad el coeficiente de Pearson no puede ser aplicado ya que se trata de una variable discreta, sin embargo haciendo una exploración visual puede verse que el cociente a_{50}/a_{10} parece tomar valores homogéneamente distribuidos a lo largo de la variable tipo de actividad.

Podría existir alguna ley que describa la estructura de estos excesos infrarrojos, de manera que vincule a_{50} y a_{10} . Para verificar esto ajustamos, mediante la técnica de cuadrados mínimos, distintas funciones a los puntos a_{50} vs. a_{10} . El mejor ajuste lo dio una función cuadrática de la forma $a_{10} = A * a_{50}^2 + B * a_{50}$ con parámetros $A = 1 \pm 0.5$ y $B = 0.015 \pm 0.006$.

4 Búsqueda de descentrados en el NIR

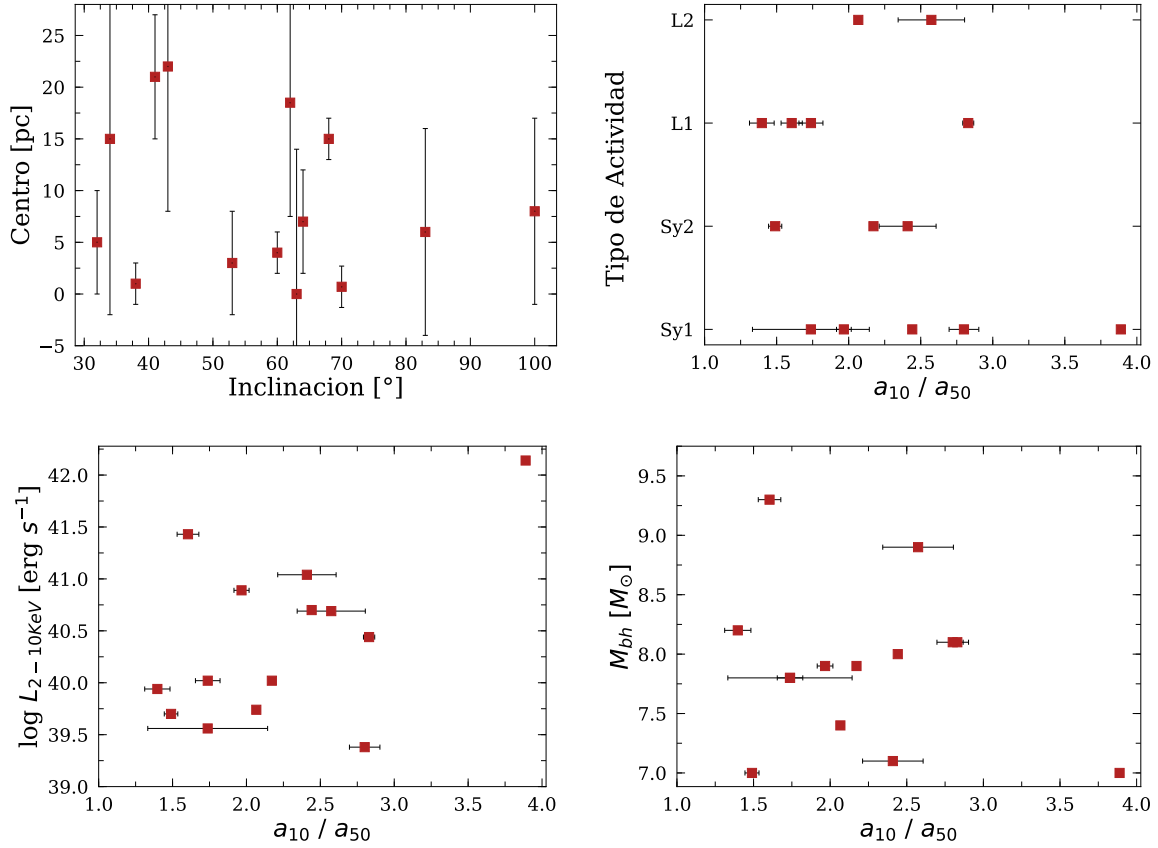


Figura 4.11: Comportamientos cruzados entre varios parámetros de la muestra y el cociente a_{10}/a_{50}

El resultado del ajuste se muestra en la Fig. 4.12, donde el tamaño de los puntos representa el *seeing* relativo de la muestra y la zona sombreada el intervalo de $1 - \sigma$ de confianza del ajuste.

Si consideramos el a_{50} como representativo de la potencia de una fuente no resuelta, la correlación que muestra la Fig. 4.12 indicaría que la fuente que calienta el polvo es central, ya que a mayor potencia de la fuente mayor tiende a ser el radio hasta donde el polvo será calentado.

4.4. Resumen

En éste capítulo presentamos perfiles espaciales obtenidos a partir de observaciones con GNIRS en la banda K_{long} para 16 galaxias. A continuación se resumen los resultados encontrados:

4 Búsqueda de descentrados en el NIR

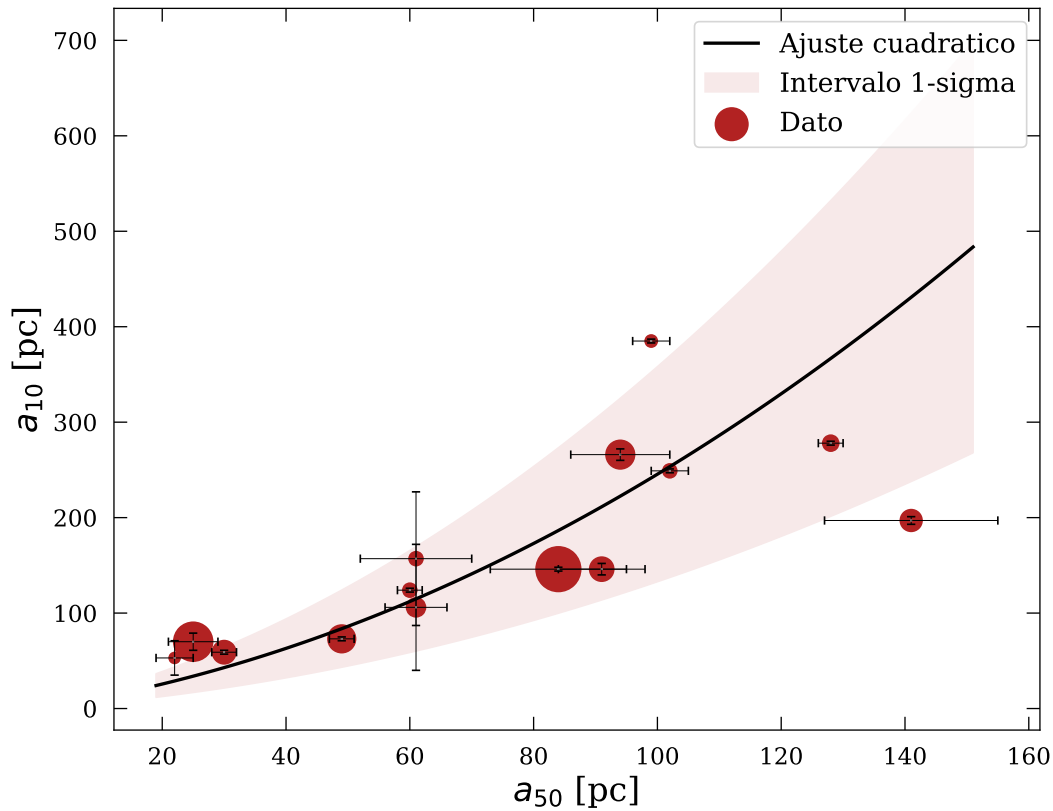


Figura 4.12: Ajuste cuadrático en el plano a_{50} vs. a_{10} .

- A partir del modelado de los perfiles espaciales hemos logrado estimar que un $\sim 20\%$ de los núcleos galácticos presentan descentrados cuando se estudia la componente estelar roja, desafiada de componentes discretizadas como cúmulos estelares jóvenes, y las distintas fases de gas (molecular, neutro y ionizado). Esta componente es buena trazadora de la masa de la galaxia ya que se encuentra distribuida más homogéneamente que las otras componentes (Mulchaey, Regan y Kundu, 1997).
- Las masas de los tres ANSM que presentan descentrados respecto de una estructura de mayor escala presentan masas intermedias de $\text{Log}(M/M_{\odot}) \sim 8$, lo que indicaría que para estos valores de masa los ANSM dominan la dinámica de las estrellas circunnucleares para que el descentrado pueda ser detectado con ésta técnica. Para masas superiores, el potencial del ANSM se encontraría ya dominando el potencial global de la galaxia, fijo en el centro.
- Hemos encontrado una estructura de polvo en 14 de las 16 galaxias de la

4 Búsqueda de descentrados en el NIR

muestra, 12 de los cuales se encuentran espacialmente resueltos. Los centros de estas estructuras coinciden con el núcleo de la galaxia para la mayoría de las galaxias sugiriendo que se trata de polvo circumnuclear calentado por el AGN o *starburst*. En el contexto de las SED de AGNs descrito en la sección 1.1, se tiene que la emisión detectada proviene del "bulto" cuyo pico de emisión está en $3 - 5 \mu\text{m}$ y que proviene de la región interna del toroide según el modelo de Sebastian F. Hönig y Makoto Kishimoto (2017). Sin embargo, nosotros hemos encontrado éste exceso de emisión hasta radios de 200 pc, sugiriendo que o bien la región de polvo que emite el exceso en el NIR es más extendida que el toroide del MU o este polvo está siendo calentado por actividad *starburst* circumnuclear.

Respecto de la aplicación de la técnica de descomposición de perfiles espaciales en la banda K_{long} , para detectar descentrados, en datos como los utilizados en éste trabajo se puede decir que:

- Desfavorece la detección de descentrados en ANSM de baja masa, ya que probablemente estos no se encuentren asociados a componentes estelares suficientemente masivas para causar asimetrías en el perfil de intensidad.
- Favorece la detección de descentrados en núcleos poco polvorientos (como los de tipo 1), ya que la presencia de polvo puede causar asimetrías que enmascaran los descentrados físicos de las componentes.
- Tanto la inclinación de la galaxia como el PA de la ranura con la que se tomó el espectro afectan el descentrado, reduciéndolo. Debido a esto, los valores encontrados corresponden a una cota mínima para el descentrado.

Además, el hecho de que la ranura con la que se tomaron los espectros utilizados en este trabajo sea relativamente corta ($7''$), genera un mapeado limitado en las alas del perfil, lo que dificulta la determinación del índice de Sérsic de la componente externa, esto no introduce incerteza en la determinación del descentrado pero si en la descomposición de componentes estructurales de las galaxias. Para solucionar esto es necesario utilizar datos tomados con una ranura de mayor longitud como la que dispone Flamingos-2 (en los capítulos 5 y 6 se presentan perfiles obtenidos con este espectrógrafo).

5 El caso de NGC 6300

En éste capítulo presentamos un trabajo piloto en el cual hemos observado, reducido y analizado datos observados con Flamingos-2 de Gemini Sur para la galaxia NGC 6300. Este trabajo dio lugar a una publicación en el *Astronomical Journal*, (Gaspar, R. J. Díaz, Mast et al., 2019).

A largo plazo, estamos llevando adelante un estudio de núcleos cercanos oscurecidos, motivado por los resultados de Goulding, Alexander et al. (2012). El objetivo es llevar a cabo una caracterización en el NIR de núcleos cercanos oscurecidos. Para empezar hemos elegido a NGC 6300 como prueba piloto antes de empezar a observar AGNs oscurecidos. La misma posee uno de los AGN identificados en el óptico de la muestra de Goulding, Alexander et al. y es el que presenta mayor excitación según el diagrama *BPT* y a su vez presenta intensas bandas de polvo que alcanzan el mismo, lo que la hace una buena candidata para estudiar las fuentes de polvo presentes en éste núcleo y que determinan su clasificación como núcleo de tipo 2. Para determinar esto es necesario contar con observaciones de alta resolución espacial en el infrarrojo cercano donde la extinción decrece hasta en un 10% respecto de la banda V.

Aquí presentamos un estudio morfológico de las distintas componentes de la galaxia, como así también de las líneas espectrales provenientes de su núcleo con las cuales hemos descripto el estado del gas en sus distintas fases. Además, a partir de las curvas de velocidad radial hemos medido una cota superior para la masa del ANSM que reside en el núcleo. Hemos inferido la temperatura del polvo caliente tanto en el núcleo como en la región circumnuclear a un radio de 27 pc y propuesto un modelo para explicarla. Finalmente, hemos aplicado la técnica de descomposición de perfiles espaciales al perfil de intensidad radial de NGC 6300 y encontrado un descentrado entre la fuente nuclear y un disco de mayor escala.

5.1. La galaxia

NGC 6300 se encuentra en la constelación de Ara a $17^h 15^m 59.47^s$ de ascensión recta (RA) y $-62^\circ 49^m 14.05^s$ de declinación (DEC) referidas al equinoccio J 2000.0. Su distancia física es de $d = 12.26$ Mpc (NED¹). La velocidad heliocéntrica es de (1109 ± 3) km/s, lo que corresponde a un redshift de 0.0037. Forma parte de un grupo de galaxias de las cuales es el miembro más brillante, mientras que los demás miembros confirmados son NGC 6221, NGC 6215, IC 4662A y NGC 215A. Debido a la baja latitud galáctica a la que se encuentran todo el grupo está fuertemente extinguido y contaminado por estrellas de campo de la Vía Láctea. Para NGC 6300 la extinción toma valores de 0.266 en el V y de 0.069 y 0.029 en las bandas del NIR J y K, respectivamente. Su magnitud es 10.18 mag en el V.

En cuanto a su estructura, posee un eje mayor de 27.84 kpc medido en el óptico (ESO-LV) y de 24.41 kpc medido en la banda K_s del NIR con 2MASS mientras que el eje menor es de 18.65 kpc en el óptico y de 14.89 en el NIR (los valores de los ejes son solamente ilustrativos debido a incertezas en la distancia y a la posible falta de corrección por extinción). Su clasificación morfológica es SB(rs)b ya que se trata de una galaxia espiral barrada de tipo b, es decir que es una espiral de tipo intermedio entre aquellas donde domina la componente bulbo y aquellas donde domina la estructura espiral. El subtipo “rs” indica que se trata de una espiral con forma de “s” y que posee uno o varios anillos, ya que NGC 6300 posee un anillo circumnuclear que alberga intensas regiones de formación estelar. Dentro de este anillo la cantidad de gas decrece significativamente y por lo tanto en esa región no se produce formación estelar salvo en el núcleo donde ésta es intensa nuevamente (Crocker, Baugus y R. Buta (1996)).

En la Fig. 5.1 se muestra una imagen composición *JHK* tomada con F2 (Gaspar et al. 2019), donde se ven claramente algunas de las estructuras de la galaxia: núcleo, barra y anillo externo; en la Sec. 5.3 se analizará esta imagen en mayor profundidad.

El núcleo *Seyfert 2* fue identificado en el óptico por Phillips, Charles y Baldwin, 1983, en la región espectral de los rayos-X por Awaki et al., 2005, en el infrarrojo medio (MIR) por Goulding y Alexander, 2009, y en en frecuencias de radio por (Morganti et al., 1999). Estudios pioneros de NGC 6300 fueron realizados en los 80 – 90’s. Phillips, Charles y Baldwin, 1983 estudiaron el espectro óptico y clasificaron su núcleo como *Seyfert 2* usando el diagrama BPT. R. Buta, 1987 presentó estudios fotométricos y cinemáticos usando fotometría superficial BV y velocidades radiales obtenidas a partir

¹<https://ned.ipac.caltech.edu/>

de líneas de emisión. Ryder et al., 1996 presentaron un estudio cinemático basado en observaciones de HI a partir de las cuales consiguieron relacionar el anillo de la galaxia con una resonancia de Lindblad y derivaron la velocidad del patrón de la barra.

En las últimas décadas, una serie de estudios en rayos-X se enfocaron en el núcleo de NGC 6300. La fuente central fue encontrada en un estado *Compton-thick* por *RXTE* en 1999 (Leighly et al., 1999) y luego en un estado *Compton-thin* por *BeppoSAX* (M. Guainazzi, 2002) y *XMM-Newton* (Matsumoto et al., 2004). Aún no hay consenso respecto de la ubiquidad de estas variaciones en los núcleos *Seyfert 2* (Risaliti, Elvis y Nicastro, 2002; Elvis et al., 2004; Puccetti, Risaliti et al., 2004; Bianchi et al., 2005). Más aún, el origen de dicha variabilidad no está completamente comprendido en el contexto del Modelo Unificado, pero podría estar relacionado con la geometría de la región circumnuclear, y en particular, del material absorbedor (G. Matt, 2000; Risaliti, Elvis, Fabbiano et al., 2005).

5.2. Las Observaciones

Espectros de ranura larga e imágenes de NGC 6300 fueron tomadas con Flamingos-2 (Eikenberry et al., 2012; R. J. Díaz et al., 2013) en el telescopio de 8.1 m Gemini Sur entre el 24 y el 29 de Junio de 2013. Se utilizaron los filtros de banda ancha *J*, *H* y *K_s* (ver Sec. 3.2 para más detalles) de Flamingos-2 en combinación con el grisma *R3K* y la ranura de 3 pixeles de ancho ($0''.54$), lo que resultó en un poder resolvente nominal de ~ 2000 en el centro de la banda *K_s* ($2.157 \mu\text{m}$) disminuyendo a ~ 1000 en los bordes, medido de las líneas de emisión telúricas del cielo.

Para esta tesis se utilizaron las observaciones en las bandas *J* y *K_s*, las que suman un total de 4.5 hs incluyendo los datos de calibración. Considerando los espectros de cielo y de estrellas telúricas estándares, proporciona un tiempo de exposición de la galaxia de 1800 s en banda *J* y 3600 s en banda *K_s*. Los espectros de banda *H* presentan numerosas absorciones telúricas como puede verse en los diagramas de absorción atmosférica de la Sección 3.2 para la región del infrarrojo cercano, dificultando su reducción. Hemos evaluado la posibilidad de abordar el problema de las absorciones telúricas utilizando dos estrellas estándares con tipos espectrales bien diferenciados en observaciones futuras, lo que permitiría mejorar el procedimiento de corrección por absorciones al poder evitar las absorciones intrínsecas de las estrellas a lo largo

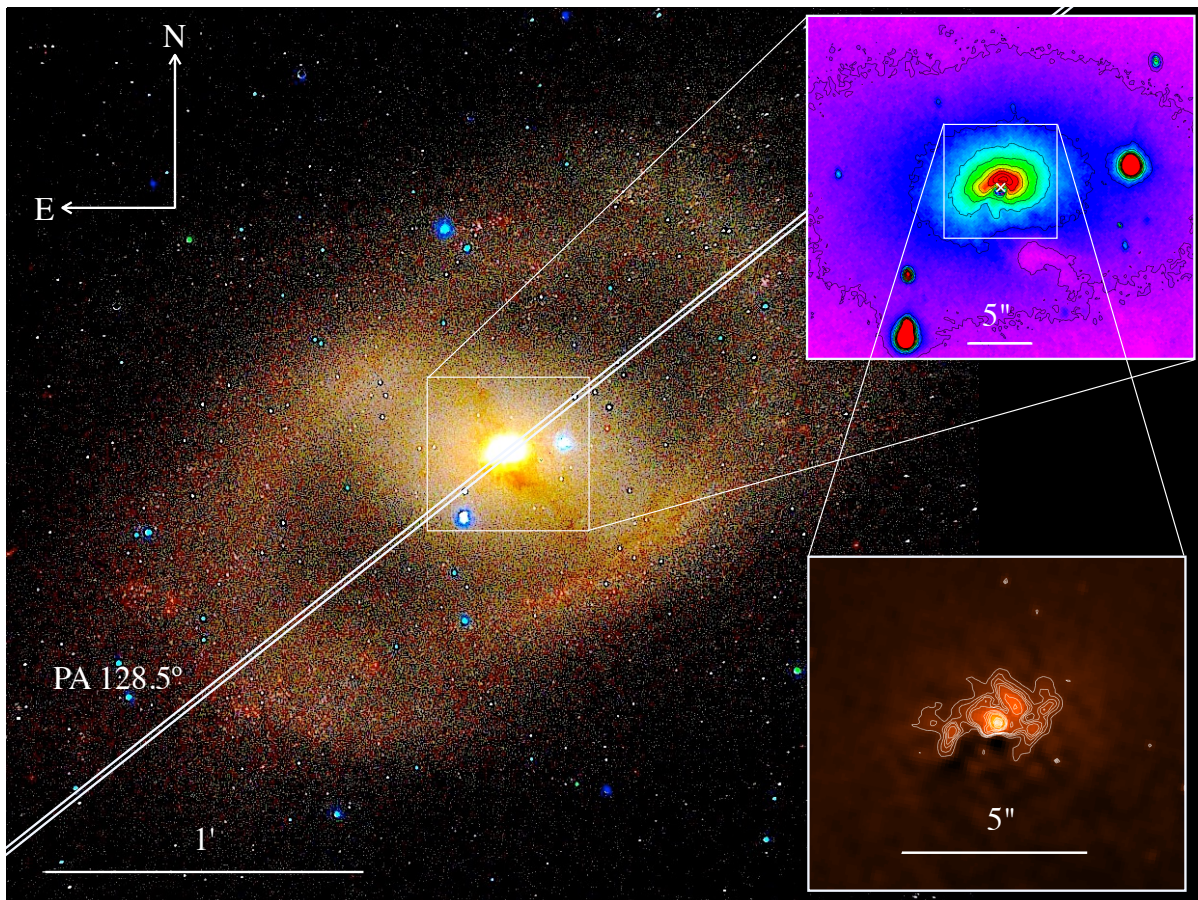


Figura 5.1: Panel principal: imagen composición JHK_s tomada con F2. Se distinguen claramente las estructuras galácticas: núcleo, barra y anillo. Se muestra la posición de la ranura utilizada para la espectroscopía a 128.5° . La longitud de la ranura es $4'.4$ por lo que los extremos de la misma quedan por fuera de los límites del plot. El ancho de la ranura, de $0''.54$, no está en escala. Panel superior derecho: mapa de color $J - K_s$ (F2). Panel inferior derecho: imagen con máscara de suavizado (unsharp mask) HST-F814W.

de las bandas espectrales consideradas y así contar con la información de absorción a lo largo de todo el rango espectral de la banda.

Las observaciones se realizaron siguiendo una secuencia ABBA con el objetivo de poder hacer una substracción de la emisión telúrica lo más precisa posible. Esta técnica permite evitar la utilización de espectros de cielo fuera de la fuente a la hora de hacer la substracción del espectro de emisión telúrica, esto repercute en un ahorro significativo de tiempo de telescopio y una mayor representación de las intensidades relativas de las líneas de emisión de los espectros comparado con otros exclusivamente de cielo.

La posición de la ranura fue de $PA = 128.5^\circ$, evitando en la mayor medida posible las dos estrellas que se encuentran en proyección a ambos lados del núcleo (ver

Figura 5.1). El uso del sensor de frente de onda (OIWFS) permitió una precisión de medio pixel ($0''.09$) en el posicionamiento de la ranura y el guiado del telescopio. Las mediciones de las estrellas guías utilizadas en el OIWFS fueron consistentes con condiciones de observación fotométricas.

5.3. Resultados

En el panel principal de la Figura 5.1 se muestra una composición RGB de las bandas J , H y K_s . Esta imagen (en falso color) permite apreciar la extensión total del anillo que rodea a NGC 6300.

La magnitud aparente total de la galaxia en la banda K hasta la isofota en 20 arcsec^2 es $m_{K_s} \sim 6.8 \pm 0.4$, mientras que el objeto central, dentro de $0''.45$, alcanza $m_{K_s} \sim 11.7 \pm 0.4$. Esto es consistente con las magnitudes reportadas por Z. Peng et al., 2006, quienes realizaron una descomposición de componentes estructurales con GALFIT en imágenes de 2MASS y encontraron una magnitud para el disco de $m_{K_s} \sim 6.15 \pm 0.5$ y una magnitud nuclear de $m_{K_s} \sim 11.22 \pm 0.2$. Las pequeñas diferencias entre ambos pares de magnitudes podría tener varios orígenes. Por un lado, la superior resolución de F2 permite determinar aperturas delimitadas por *seeing* más pequeñas, arrojando así mayores valores para las magnitudes nucleares. Por otro lado, diferencias en el punto cero determinado al realizar la fotometría podría causar una diferencia sistemática entre las mediciones obtenidas por Peng et al. y las nuestras.

La imagen composición JHK_s presentada en la Fig. 5.1 permite apreciar las subestructuras de la galaxia: la barra es claramente identificada y las bandas de polvo sobre la misma son prominentes, causando un gran oscurecimiento en la región circumnuclear y a lo largo de la barra. Cada banda de polvo presenta una intensidad diferente, la banda norte probablemente se encuentra por debajo de la barra o simplemente está más extinguida debido a la inclinación con la que la galaxia es observada. Es notable como ambas bandas de polvo cruzan la barra casi directamente desde el anillo hasta la región circumnuclear, como es usualmente observado en barras débiles, sin delinear los bordes de la barra (P. Martini, 2004). La longitud proyectada de la barra es $(1 \pm 0''.04)$, y el ángulo entre la barra y el eje mayor de la galaxia es de 82° . El eje mayor de una elipse que contiene el bulbo forma un ángulo de 27° con el eje mayor de la barra. Esta diferencia proyectada entre el bulbo y el disco podría indicar que el bulbo posee forma triaxial. También se detectan estructuras tipo *ansae* en los extremos de la barra como incrementos de brillo en la región interna del anillo.

5 El caso de NGC 6300

En el panel superior derecho de la Figura 5.1 se muestra el mapa de color $J - K_s$ construido también a partir de nuestras imágenes tomadas con Flamingos-2 que permite confirmar la gran extinción presente en la dirección sur del núcleo, el cual se asume que se encuentra en el pico de intensidad de la imagen en banda K_s . En la imagen RGB se observa como la banda de polvo proveniente de la dirección sur ingresa al núcleo pudiendo ser la responsable de su alta extinción y de la alta asimetría observada en el mapa de color. Esta alta extinción no se observa en la dirección de la ranura utilizada en la espectroscopia, en esa dirección (P.A. =128°) no se observan asimetrías en el mapa de color.

En el panel inferior derecho se presenta una imagen con máscara de suavizado producida a partir de una imagen F814W *HST*² representando los 5" centrales de la región nuclear. Los contornos blancos delinean las isofotas centrales. No se observa anillo circunnuclear en esta imagen, o bien éste no existe o bien se encuentra por debajo de la resolución del HST. Más aún, incluso aunque tres brazos pueden ser identificados, la estructura es probablemente mejor representada por un disco caóticamente extinguido por polvo que por una espiral nuclear, como se verá más abajo en el ajuste del perfil fotométrico.

A la distancia de NGC (12.26 Mpc), y considerando la escala de pixel de F2 (0".18 pixel⁻¹), un pixel corresponde a 11 pc y la resolución espacial de los datos resulta en 33 pc. Para cada banda espectral se realizaron siete extracciones: una centrada en el pico del continuo y tres a cada lado del mismo en $\pm 0".44$, $\pm 0".9$ y $\pm 1".44$, que corresponden a los radios físicos ± 27 pc, ± 55 pc, y ± 88 pc respectivamente; donde los radios positivos corresponden a la dirección Sur-Este. El ancho de cada extracción es variable, para determinarlo se tomaron en cuenta la resolución espacial limitada por el *seeing* que determina la información independiente que se puede obtener en cada punto y la relación S/N para cada radio.

Dado que en el pico del continuo la relación S/N es alta, la extracción allí centrada se realizó tomando sólo un pixel de ancho (0".18) con el objetivo de minimizar la información proveniente de regiones fuera del núcleo.

El espectro nuclear en banda J se presenta en la Figura 5.2. Se observan en ella tres líneas prominentes correspondientes a, de derecha a izquierda: [S ix] $\lambda 1.25 \mu\text{m}$, [Fe II] $\lambda 1.26 \mu\text{m}$, y la línea de recombinación del Hidrógeno Pa β $\lambda 1.28 \mu\text{m}$.

²Instrumento: WFC3/UVIS, Obs ID: ib6w62060, Exp. Time: 5922.003 sec., Proposal PI: O'Connell, Proposal ID:11360.

5 El caso de NGC 6300

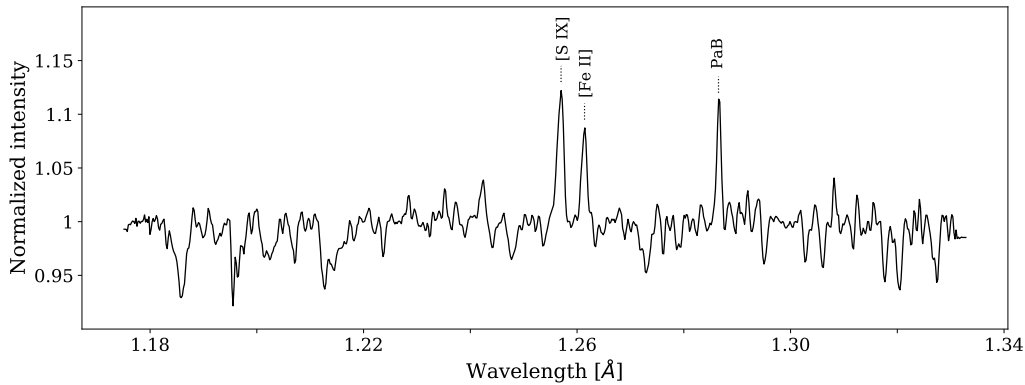


Figura 5.2: Espectro nuclear de la banda J de NGC 6300, la extracción es de 1 pixel de ancho o equivalentemente 11 pc dada la distancia de la galaxia. Se resaltan la línea coronal [S ix] $\lambda 1.25\mu\text{m}$, la línea de baja ionización [Fe II] $\lambda 1.26\mu\text{m}$, y la línea de recombinación del Hidrógeno Pa β $\lambda 1.28\mu\text{m}$.

La presencia de la línea coronal [S ix] $\lambda 1.25\mu\text{m}$ es indicadora de radiación UV extrema y fotones de rayos-X, ya que es necesario un espectro muy duro para alcanzar el alto potencial de ionización de 328.2 eV de esta línea (ver, por ejemplo, Reunanen, Kotilainen y Prieto, 2003, Rodríguez-Ardila et al., 2011, para un tratamiento detallado de las líneas coronales). Esta línea es un indicador inequívoco de actividad nuclear ya solamente materia cayendo en el disco de acreción de un ANSM es capaz de producir un continuo tan energético.

En la Figura 5.3 se presentan las restantes extracciones de la banda J , en la cual se detecta emisión de la línea [S ix] hasta 88 pc en la dirección SE, bien adentro de la NLR (Padovani et al., 2017). A primera vista, esta línea presenta, superpuesta a la componente angosta originada en la NLR, una componente ancha corrida al azul que probablemente tiene origen en vientos salientes del núcleo y que será analizada en detalle en la Sección 5.3.5. El espectro J también presenta la línea de baja ionización [Fe II] $\lambda 1.26\mu\text{m}$ (Potencial de Ionización, PI=7.9 eV) coexistiendo con el gas coronal para todo radio hasta 88 pc y en ambas direcciones a lo largo de la ranura. Pa β está presente en emisión dentro de los 110 pc centrales, y también en absorción debido a la población estelar subyacente, un tratamiento detallado de el perfil de esta línea se presenta en la Sección 5.3.5.

El espectro nuclear en banda K_s se presenta en la Figura 5.4. Las líneas de emisión más prominentes son las del Hidrógeno molecular H_2 $\lambda 2.03\mu\text{m}$, H_2 $\lambda 2.07\mu\text{m}$, H_2 $\lambda 2.12\mu\text{m}$, H_2 $\lambda 2.22\mu\text{m}$, H_2 $\lambda 2.25\mu\text{m}$. Además, se observa la línea coronal prohibida del aluminio [Al ix] entre $\lambda 2.04\mu\text{m}$, y la línea de recombinación del

5 El caso de NGC 6300

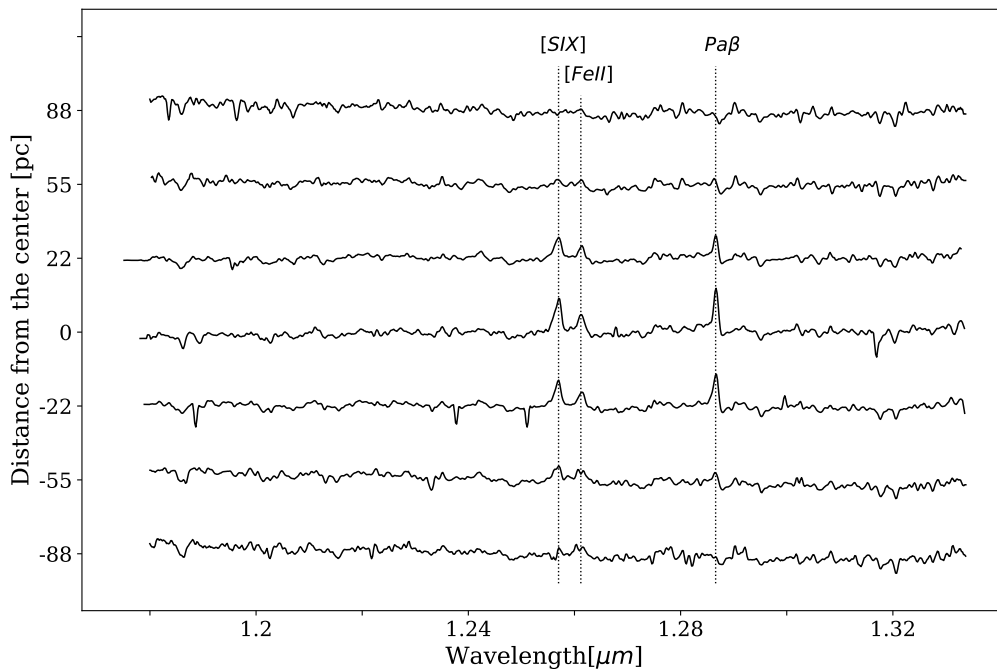


Figura 5.3: Espectros en banda J para diferentes radios. Se resaltan la línea coronal $[S\text{ IX}]$ $\lambda 1.25\mu\text{m}$, la línea de baja ionización $[Fe\text{ II}]$ $\lambda 1.26\mu\text{m}$, y la línea de recombinación del Hidrógeno $Pa\beta$ $\lambda 1.28\mu\text{m}$.

Hidrógeno ionizado $Br\gamma$ en $\lambda 2.16\mu\text{m}$. Varias líneas de absorción también son visibles, incluyendo los dobletes de $Na\text{ I}$ y $Ca\text{ I}$, y el principio de las bandas moleculares del CO_2 en el extremo rojo del rango espectral de la banda K_s .

La Figura 5.5 muestra todas las extracciones realizadas para la banda K_s a distintos radios. Al igual que la línea $Pa\beta$ en la banda J , la emisión $Br\gamma$ se detecta hasta un radio de 55 pc a ambos lados del pico del continuo, mientras que las líneas de H_2 están presentes en todas las extracciones permitiendo inferir propiedades del gas molecular para todos los radios hasta 88 pc, en la Sección 5.3.3 se estudia en detalle el estado del Hidrógeno molecular.

Se utilizó la tarea de *IRAF plot* para ajustar funciones gaussianas a todas las líneas de emisión de las bandas J y K_s para determinar propiedades del gas a partir de parámetros de las líneas, en particular se estudió la intensidad, el $FWHM$, y la velocidad radial. Varias componentes fueron utilizadas cuando fue necesario (Sec. 5.3.5).

5 El caso de NGC 6300

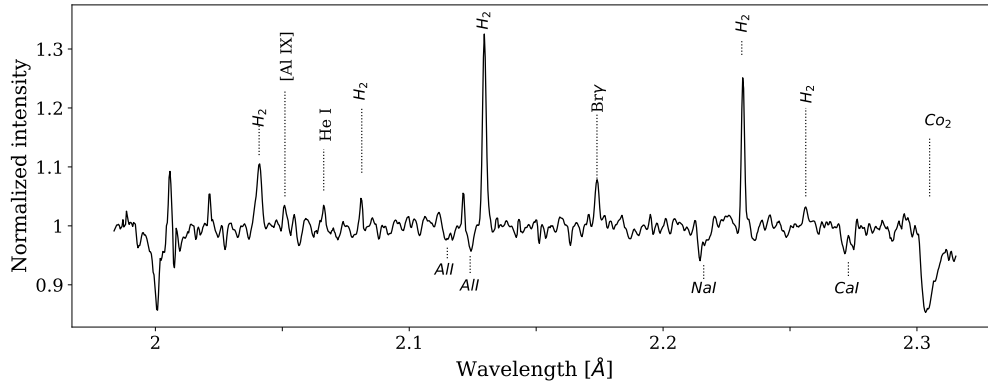


Figura 5.4: Espectro nuclear en banda K_s de NGC 6300, la extracción es de un pixel de ancho o equivalentemente 11 pc considerando la distancia a la galaxia. Se resaltan: la línea de alta ionización del aluminio [Al IX] $\lambda 2.04\mu m$, la línea del helio [He I] $\lambda 2.06\mu m$, la línea de recombinación del Hidrógeno ionizado $Br\gamma$ $\lambda 2.16\mu m$ y varias líneas rotacionales y vibracionales del H_2 molecular. También se marcan varias líneas de absorción producidas en la población estelar de la galaxia.

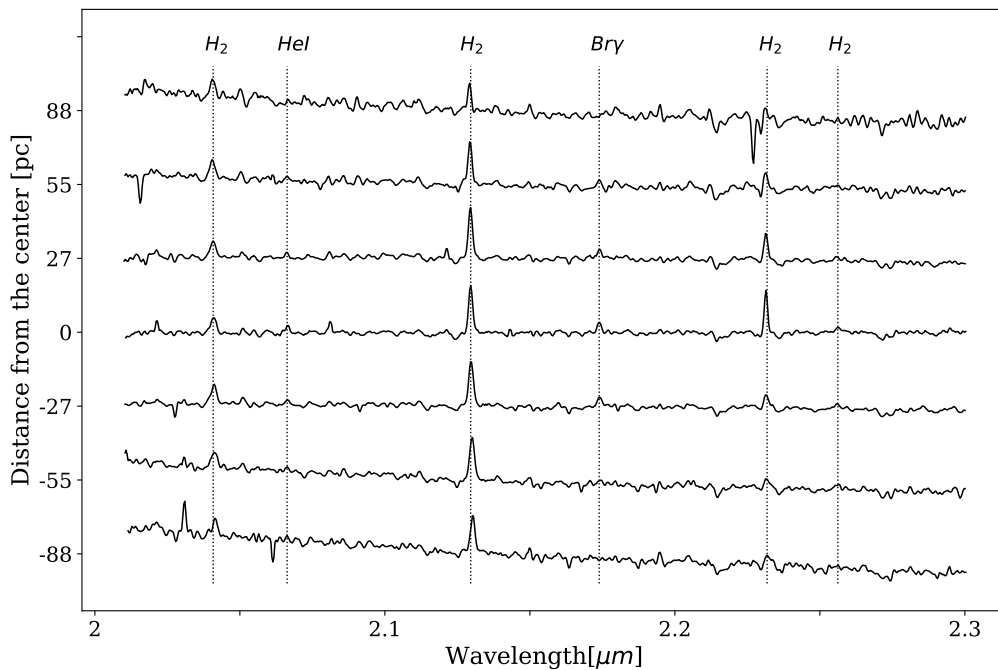


Figura 5.5: Espectro en banda K_s para diferentes radios. Todas las extracciones son de 3 pixeles de ancho en acuerdo con la resolución espacial limitada por *seeing* excepto la extracción nuclear en $r = 0$ que tiene 1 pixel de ancho. Los principales caracteres espectrales están resaltados.

5.3.1. El descentrado del núcleo

Se realizó una extracción de 5 pixel ($0''.9$) de ancho sobre la imagen K_s , lo que corresponde a 1.5 veces el disco de *seeing*. El perfil radial de emisión obtenido (Figura 5.6) fue ajustado con diferentes componentes para poder encontrar el mejor modelo de la estructura de la galaxia. En esta figura se muestra el mejor fit que consiste en una componente *gaussiana* brillante que representa la fuente central con $FWHM = 0.07 \pm 0.01$ kpc, un disco nuclear con un radio de escala de 0.073 ± 0.005 kpc, y finalmente, un disco circumnuclear de bajo brillo superficial con radio de escala de 0.60 ± 0.03 kpc. La estructura nuclear (*gaussiana* + disco nuclear) domina hasta 0.25 kpc y está desplazado en 25 pc en la dirección NW con respecto al disco circumnuclear. Este descentrado será relevante al ser analizado en conjunto con la curva de velocidad radial presentada en la Fig. 5.7.

El panel superior derecho de la Figura 5.6 es un zoom del perfil en la región nuclear con el perfil extraído en H_2 $2.12 \mu m$ superpuesto. El perfil en H_2 fue extraído de el espectro 2D en banda K_s y es bien ajustado por la misma componente nuclear utilizada en el perfil K_s total.

Posteriormente se construyó la curva de velocidades radiales del gas molecular midiendo el corrimiento en velocidad de la línea de Hidrógeno molecular más intensa $H_2 \lambda 2.12 \mu m$ para cada radio. Como método alternativo, para testear posibles errores en la calibración a longitud de onda de los espectros, se midieron también las velocidades relativas de la línea respecto de la velocidad sistémica (la velocidad del núcleo) directamente del espectro 2D, obteniendo resultados comparables. Aquí se presentan solamente los resultados obtenidos de los espectros calibrados. La curva de velocidades radiales obtenida se presenta en la Figura 5.7 (panel izquierdo), en la cual es claramente visible que el gas sigue un patrón de rotación en los 200 pc centrales. Las barras de error fueron determinadas realizando muchas mediciones en cada líneas y tomando la desviación estándar de los valores medidos.

En el panel derecho de la Figura 5.7 se presenta la curva de velocidades circulares, construida deproyectando las velocidades medidas por la inclinación de la galaxia $i = (52 \pm 1)^\circ$ y reflejando las velocidades negativas hacia radios positivos. Cuando se reflejan la velocidades negativas, se observa que la curva no es simétrica alrededor del pico de emisión de la banda K_s . Una curva simétrica puede obtenerse desplazando la curva en 55 pc en la dirección Sur-Oeste. En la figura, los puntos azules de la curva corresponden a radios negativos de la curva de velocidades radiales, una vez desplazados en 55 pc en radio y, por lo tanto, $\sim 50 \text{ km s}^{-1}$. Este nuevo origen del eje

5 El caso de NGC 6300

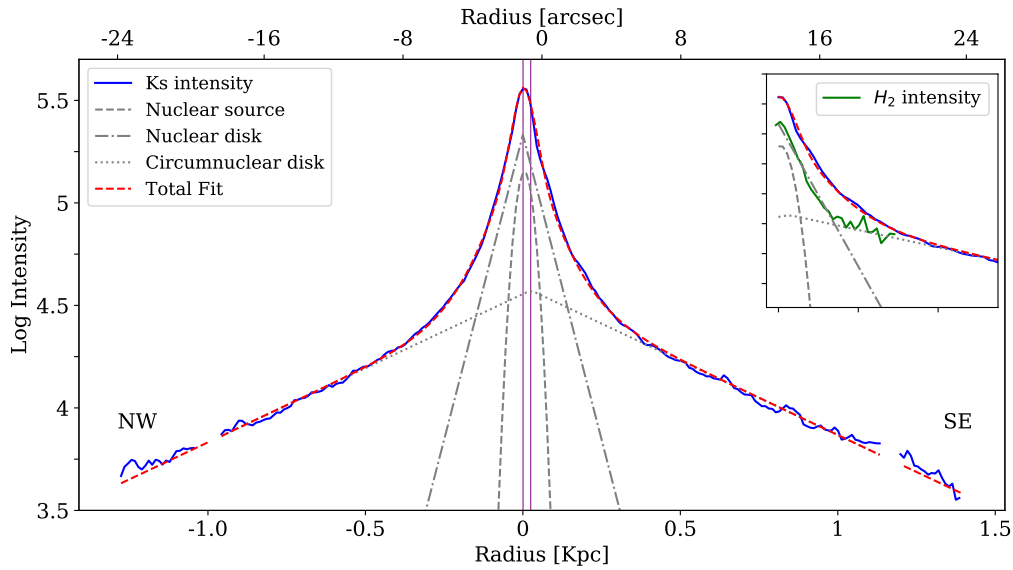


Figura 5.6: Panel principal: Perfil espacial extraído en $PA = 128.5^\circ$ de la imagen en banda K_s (azul). Las distintas componentes estructurales ajustadas están graficadas en gris. El ajuste total, en rojo, corresponde a la suma de las tres componentes. Dos de ellas son estructuras disco, uno nuclear con un radio de escala de 0.073 ± 0.005 kpc y otro circumnuclear con un radio de escala de 0.60 ± 0.03 kpc. Finalmente, la fuente nuclear es bien ajustada por una función *gaussiana* con $FWHM = 0.07 \pm 0.01$ kpc. El disco nuclear y la fuente central componen la estructura central que está desplazada en 25 pc con respecto al disco circumnuclear (líneas verticales). Panel superior derecho: Zoom-in de la región nuclear para radios positivos superpuesto con el perfil extraído en $H_2 2.12 \mu m$, el cual es bien ajustado utilizando solamente la componente discoidal nuclear del perfil total.

radial simetriza la curva de velocidad circular y sería el verdadero centro de rotación de la galaxia (de acuerdo con nuestro PA), y no es coincidente con el pico de emisión de continuo de la banda K_s . Este desplazamiento del pico de emisión respecto del centro de rotación ya fue reportado por R. Buta, 1987 a partir de espectros ópticos. Este autor propone dos posibles explicaciones para esta detección: una distribución asimétrica de masa y un oscurecimiento por polvo del verdadero núcleo de la galaxia. Si bien está más inclinado por la segunda opción, remarca la necesidad de obtener espectros de alta resolución en el NIR para confirmar cualquiera de las dos opciones.

Nuestras observaciones permitieron determinar el descentrado tanto desde la cinemática en la curva de velocidades circulares como en el perfil fotométrico (Fig. 5.6). El hecho de que se detecte el mismo descentrado en la banda K_s , donde la extinción es un 10% de la que afecta a la banda V, debilita la posibilidad de que sea un efecto causado por oscurecimiento por polvo y refuerza la idea de una asimetría real en la distribución de masa de la región nuclear. En la Figura 5.7 (panel derecho) también

5 El caso de NGC 6300

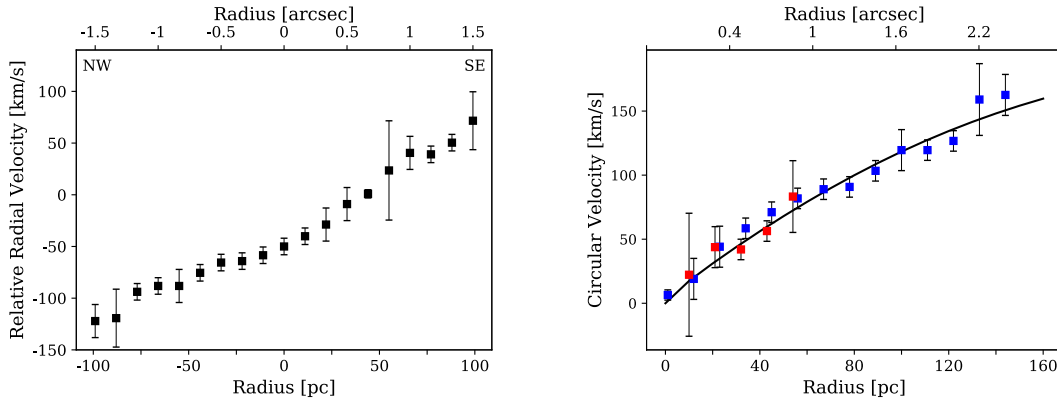


Figura 5.7: *Izquierda*: Curva de Velocidad Radial obtenida a partir de la línea de Hidrógeno molecular en $\lambda 2.12 \mu\text{m}$. Los puntos corresponden a la velocidad de la línea para cada radio relativo a la velocidad del núcleo. *Derecha*: Curva de Velocidad Circular para la misma línea, para derivarla se asumió una inclinación de $i = (52 \pm 1)^\circ$. Los puntos azules corresponden a radios negativos reflejados. El ajuste es una composición de dos modelos de masa: uno de Plummer más otro de Hernquist. El origen del gráfico está desplazado hacia el verdadero centro cinemático (ver el texto para más detalles).

se presenta un ajuste de dos componentes para la distribución de masa. El ajuste consiste en un modelo de Plummer de $4 \times 10^9 M_\odot$ y un radio de escala de 240 pc, y un modelo de Hernquist de $1.8 \times 10^{10} M_\odot$ y un radio de escala de 400 pc.

En resumen, el descentrado determinado a partir de la descomposición en componentes del perfil fotométrico, en conjunto con el desplazamiento del centro de rotación obtenido a partir de la curva de velocidades circulares, permite inferir que el centro de simetría global, considerado como el pico de continuo en la banda K_s y el centro dinámico de rotación de la galaxia, podrían no ser coincidentes. En este escenario, el ANSM estaría en el pico de emisión de la banda K_s pero en órbita alrededor del verdadero centro de rotación de la galaxia como fue derivado de la curva de

velocidades circulares.

Podría esta asimetría en la distribución de masa ser la responsable de la caoticidad de la distribución de polvo de los 300 pc centrales? Y más aún, podría éste movimiento del ANSM ser al menos una parte del elusivo mecanismo que produce la pérdida de momento angular en los pc centrales necesario para alimentar el AGN?

5.3.2. Polvo caliente en la región circumnuclear

El continuo espectral de la banda K_s presenta una forma interesante, que evidencia la variación radial de las propiedades de las distintas fuentes que contribuyen, en particular, la población estelar y el polvo circumnuclear. La figura 5.5 muestra los espectros K_s para distintos radios (con una separación de 27 pc); en la misma se puede ver que el espectro nuclear es prácticamente plano, mientras que al incrementarse el radio la pendiente aumenta hacia ambos lados. Este aplanamiento del espectro nuclear ha sido interpretado por otros autores como el efecto de la composición de la cola roja del continuo estelar y la cola azul de una planckiana producida por polvo caliente y que tiene su pico en el infrarrojo medio, como se muestra en la Fig. 1.6 (e.g. Edelson y Malkan (1986), Alonso-Herrero, Simpson et al. (1998), Ferruit et al. (2004), C. Ramos Almeida, Pérez García y Acosta-Pulido (2009), Prieto et al. (2010)). Este comportamiento de la pendiente del continuo en banda K_s es común en núcleos de tipo *Seyfert* 1 (e.g. Kobayashi et al. (1993)), y ha sido observado en unos pocos núcleos de tipo 2. Por ejemplo, Martins et al., 2010 encontraron una pendiente muy pronunciada en NGC 1068 y sugiere que es producida por radiación térmica producida por polvo caliente.

En otro trabajo, Ferruit et al., 2004 hallaron un comportamiento similar de la pendiente del continuo en banda K_s en NGC 2110 al presentado en la figura 5.5. Las extracciones de estos autores fueron realizadas cada 1", lo que representa 172 pc a la distancia de la galaxia. Debido probablemente a su menor resolución espacial, ellos encuentran éste exceso infrarrojo solamente en el espectro nuclear.

En general, los trabajos disponibles en la literatura presentan un muestreo espacial que no les permite resolver la región circumnuclear debajo de los 100 pc. Es éste sentido, el exceso infrarrojo es solo detectable en el espectro nuclear. Esto ha llevado a los distintos autores a asumir que el origen de éste exceso es el toroide de polvo que rodea al AGN, en acuerdo con el Modelo Unificado estándar.

Nuestros datos infrarrojos permiten un muestreo espacial de 33 pc, lo que permite resolver las variaciones de la pendiente del continuo espectral mucho más cerca del núcleo. El aplanamiento del espectro causado por la presencia de polvo caliente no es solamente observado en el espectro nuclear sino también en las extracciones circunnucleares al menos hasta 27 pc. Esto indica que la presencia de polvo caliente no es exclusiva del núcleo (toroide del Modelo Unificado), sino también de regiones más extendidas.

Con el objetivo de testear si la componente que produce el exceso al rojo es efectivamente causada por polvo caliente, se procedió de la siguiente manera. Primero, construimos un espectro representativo de población estelar promediando los dos espectros más externos correspondientes a los radios ± 88 pc. Asumiendo que la población estelar no varía significativamente dentro de esta pequeña región considerada, se sustrajo éste modelo al espectro nuclear y a los espectros en 27 pc. El resultado de estas restas (mostrado en la Figura 5.8) una vez convertido al espacio de frecuencia vs. energía normalizada, se asemeja a una componente de emisión térmica que crece para bajas frecuencias. Esta componente puede ser ajustada por una familia de curvas con el objetivo de comparar las pendientes y así estimar las temperaturas del polvo. Ambos continuos pueden ser ajustados con una combinación de dos o más cuerpos negros pero el ajuste más simple, en ambos casos, es un único cuerpo negro de 1255 K en el caso nuclear y 1225 K en el espectro en 27 pc. Ambas temperaturas son consistentes con emisión de granos de polvo caliente (ver Sec. 1.3)

Aunque el escenario real debe ser más complejo, con un continuo de temperaturas del polvo, este ajuste indica que la presencia de la componente caliente debe estar presente. Hemos testeado que ninguna combinación de cuerpos negros por debajo de los 1200 K puede reproducir la protuberancia que presenta el residuo alrededor de $2.15 \mu\text{m}$ o equivalentemente 1.4 GHz. Las curvas grises de la Figura 5.8 corresponden a cuerpos negros a diferentes temperaturas y se presentan solo con fines de comparación. Es importante remarcar que debido a que los espectros no están calibrados en flujo, solo las pendientes pueden ser analizadas mientras que las intensidades son arbitrarias.

Para alcanzar las altas temperaturas estimadas, las moléculas de polvo deben estar directamente irradiadas por fotones provenientes del disco de acreción del AGN. Por lo tanto, estos resultados indican que, o bien éste polvo se encuentra en el borde del cono de ionización (no adentro, pues sería expulsado por el viento saliente), o bien se encuentra en el plano de simetría del ANSM y el toroide es tan grumoso que los fotones UV encargados de calentar el polvo a estas temperaturas logran llegar hasta radios tan grandes como 27 pc.

5 El caso de NGC 6300

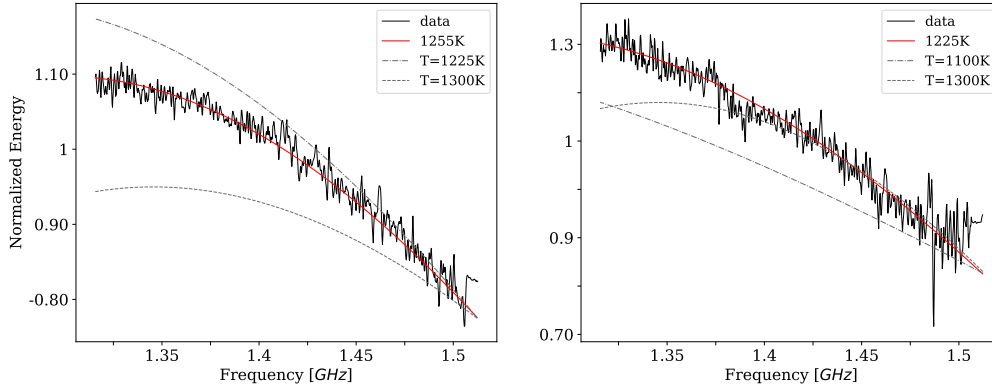


Figura 5.8: Exceso rojo obtenido al substrair un espectro externo promedio de los espectros centrales. Izquierda: el espectro nuclear. Derecha: espectro correspondiente a -27 pc. En ambos casos la curva roja representa el ajuste más simple de un cuerpo negro con una única temperatura, las curvas grises son ejemplos de cuerpos negros con temperaturas similares, con fines de comparación.

5.3.3. Estado del gas molecular

La banda K_s presenta una gran variedad de líneas de Hidrógeno molecular que pueden ser usadas para testear el mecanismo principal de excitación de éste elemento. Trabajos pioneros teóricos y experimentales fueron llevados a cabo por varios autores en las décadas de 1980 y 1990 (por ejemplo, Tanaka et al. (1989) y Mouri (1994) y referencias allí). En estos trabajos fue establecido que el H_2 tiene dos mecanismos de excitación que usualmente suceden simultáneamente: (1) Excitación térmica causada ya sea por shocks, radiación UV, o rayos-X; y (2) Excitación no-térmica asociada con fluorescencia UV. Es posible distinguir entre estos mecanismos ya que ocurren asociados a diferentes temperaturas vibracional y rotacional que producen diferentes cocientes de intensidades de líneas. En el primer caso, las temperaturas vibracional y rotacional son esencialmente iguales y por lo tanto este estado puede ser caracterizado por una sola temperatura de excitación que se encuentra típicamente en el rango 1000 – 2000 K. En el caso no-térmico, la temperatura vibracional es mucho mayor que la rotacional y, por lo tanto, ocurre en gas más frío.

Siguiendo a Reunanen, Kotilainen y Prieto, 2002, las temperaturas vibracional y rotacional pueden calcularse de los cocientes de intensidad de líneas H_2 $1 - 0S(2) \lambda 2.03 \mu m / 1 - 0S(0) \lambda 2.22 \mu m$ y $1 - 0S(1) \lambda 2.12 \mu m / 2 - 1S(1) \lambda 2.25 \mu m$ como sigue:

$$T_{vib} \simeq 5600 / \ln(1.355xI_{1-0S(1)} / I_{2-1S(1)}) \quad (5.1)$$

$$T_{rot} \simeq -1113 / \ln(0.323xI_{1-0S(2)} / I_{1-0S(0)}) \quad (5.2)$$

Debido a la proximidad entre las líneas, estos cocientes tienen la ventaja de estar poco afectados por extinción. Además, están poco afectados por el efecto del cociente ortho/para de las moléculas porque $2 - 1S(1)$ y $1 - 0S(1)$ ocurren en ortho-moléculas mientras que $1 - 0S(2)$ y $1 - 0S(0)$ en para-moléculas (Mouri, 1994).

El mecanismo de excitación dominante puede ser determinado a partir de estos cocientes de líneas como puede verse en la Figura 5.9 (C. Ramos Almeida, Pérez García y Acosta-Pulido (2009), Falcón-Barroso et al. (2014), Günthardt et al. (2015)). El valor de $T_{vib} \leq 6000$ separa el dominio térmico del dominio no-térmico mientras que la curva en la esquina superior derecha corresponde a $T_{rot} = T_{vib}$, arriba de la curva yace la región donde domina la excitación por fotones en rayos-X. La Figura 5.9 es un diagrama de diagnóstico para NGC 6300 donde los puntos representan los cocientes de líneas calculados para diferentes radios. Todos los puntos caen, para esta galaxia, en la región térmica donde dominan los procesos de calentamiento por choques o procesos colisionales.

Finalmente, el estado cinemático del gas puede ser estudiado a partir de la curva de velocidad radial. Se puede inferir que el gas molecular está confinado en un disco rotante, como se puede ver también en el perfil de intensidad (curva verde en sub-panel superior derecho de la Figura 5.6). La ausencia de movimientos turbulentos o caóticos sumado a la ausencia de una componente ancha en las líneas de emisión del Hidrógeno molecular, indica que este disco molecular debe estar escudado del continuo ionizante del AGN, probablemente por grandes cantidades de polvo. Este escenario es reforzado por el diagrama de diagnóstico presentado en la Figura 5.9, el cual muestra que el principal mecanismo de excitación de Hidrógeno molecular es por fotoionización o choques, probablemente producidos por estrellas jóvenes y supernovas pero no por rayos-X producidos en el disco de acreción del ANSM.

5.3.4. Masa del Agujero Negro Supermasivo

Con las mediciones de la velocidad del gas en los 5 puntos centrales (55 pc centrales) se puede estimar la masa encerrada en ese radio. Considerando una aproximación Kepleriana y tomando en cuenta la inclinación de la galaxia, la masa encerrada en un radio R [pc], que presenta una amplitud de velocidad V [km s^{-1}] es:

5 El caso de NGC 6300

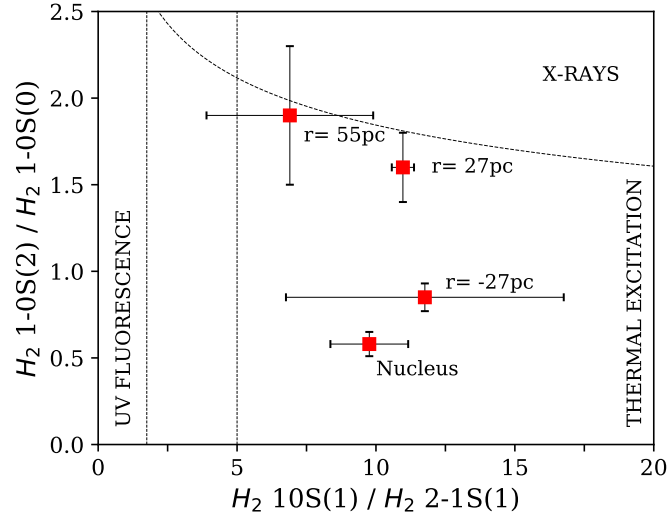


Figura 5.9: Puntos correspondientes a cocientes de intensidad de línea $H_2 1 - 0S(1)/2 - 1S(1)$ vs $1 - 0S(2)/1 - 0S(0)$. Se indica el radio de extracción. Las líneas de puntos separan regiones en el diagrama donde dominan diferentes mecanismos de excitación de las líneas. La curva superior corresponde a $T_{viv} = T_{rot}$ y las líneas verticales separan la región de excitación térmica de la de excitación por radiación UV. En la región intermedia ocurre una mezcla de los dos mecanismos de excitación.

$$M = 233 V^2 R / \text{sen}(i) \quad (5.3)$$

donde la masa resultante está en masas solares.

Se usó la tarea de IRAF *ellipse* para determinar la inclinación de la región central, la cual realiza un ajuste de elipses sobre la imagen, en este caso la imagen en banda K_s de F2. Nuestro ajuste respalda la utilización de una inclinación de $i = (52 \pm 1)^\circ$ para la determinación de masa en acuerdo con trabajos previos (por ejemplo, (G. de Vaucouleurs et al., 1991)) donde la inclinación fue medida a partir de datos de menor resolución. Bajo la hipótesis de conservación de momento angular entre el disco galáctico en la región nuclear y el plano de simetría del AGN, podemos estimar la masa para el objeto oscuro en el núcleo, derivando una cota superior para la masa encerrada para dos radios diferentes de:

$$(M_{ANSM} / M_\odot)^{sup} = (6.2 \pm 2.5) \times 10^7 \quad (5.4)$$

para el material dentro de los 55 pc, y de:

$$(M_{ANSM}/M_{\odot})^{sup} = (6.9 \pm 5.1) \times 10^6 \quad (5.5)$$

para la masa encerrada en el menor radio resuelto de 33 pc.

Estos valores están en concordancia con estimaciones previas obtenidas a partir de distintos métodos (Beifiori et al. (2009), Khorunzhev et al. (2012), Davis, Berrier et al. (2014)) y coloca al objeto central de NGC 6300 dentro del régimen de masa baja a intermedia dentro del rango de masas de los ANSM.

5.3.5. Perfiles de líneas

Analizando los perfiles de línea para la banda J , una componente corrida al azul se observa en todas las líneas y en todos los radios donde las líneas están presentes. La Figura 5.10 muestra un ajuste de componentes para la línea de recombinación del Hidrógeno $\text{Pa}\beta$ λ 1.28 μm y en la Figura 5.11 se muestra el ajuste para la línea coronal $[\text{S IX}]\lambda$ 1.25 μm . En ambos casos, una sola función *gaussiana* está lejos de ser un buen ajuste, así que ajustar más de una componente resultó necesario. En el caso de $\text{Pa}\beta$ la contribución de la población estelar subyacente debe ser tenida en cuenta. La línea $[\text{Fe II}]\lambda$ 1.26 μm no puede ser ajustada ya que se encuentra muy próxima a $[\text{S IX}]$ y debido a que presenta menor relación señal/ruido, su perfil se encuentra muy afectado por el ala roja de la línea del Azufre, la cual también está afectada por la línea del Hierro pero como no se espera una contraparte en absorción para la línea coronal, la única consecuencia del *blending* es un pequeño incremento en la cola roja que no afecta significativamente al ajuste.

La línea $[\text{S IX}]$ muestra una asimetría hacia el azul más pronunciada que $\text{Pa}\beta$. Si asumimos para el ajuste de $[\text{S IX}]$ los mismos anchos que para las componentes ancha y angosta de $\text{Pa}\beta$, la necesidad de una tercera componente se infiere del residuo del ajuste. La tercera componente no es visible en el perfil de $\text{Pa}\beta$, esto puede atribuirse al hecho de que el espectro en banda J es más ruidoso en esa región que alrededor de λ 1.25 μm y a que la parte del espectro al rojo de $\text{Pa}\beta$ está afectado por la corrección telúrica hasta $\sim \lambda$ 1.27 μm (Sección 3.3=

Para la línea $\text{Pa}\beta$, el ajuste consiste en una componente angosta (156 ± 10) km s^{-1} , de ancho típico de las componentes principales de los AGN tipo 2 según (Osterbrock y Ferland, 2006), una componente negativa que representa la absorción estelar con un ancho de (295 ± 50) km s^{-1} (consistente con los anchos de otras absorciones en el espectro), corrida al rojo en (191 ± 20) km s^{-1} , una componente más ancha

de (238 ± 20) km s⁻¹ corrida al azul en (223 ± 3) km s⁻¹, y una componente de ancho (189 ± 10) km s⁻¹ corrida al azul en (783 ± 10) km s⁻¹ que está fuertemente afectada por ruido.

Para la línea [S ix], el ajuste consiste en una componente de ancho (169 ± 20) km s⁻¹, típica de AGN de tipo 2 según (Osterbrock y Ferland, 2006), una componente más ancha de (214 ± 20) km s⁻¹ corrida al azul en (186 ± 5) km s⁻¹ y una componente ancha de (550 ± 40) km s⁻¹ corrida al azul en (371 ± 30) km s⁻¹.

Las componentes anchas corridas al azul presentes en estos ajustes están probablemente asociadas con vientos salientes (*outflows*). Más aún, mientras que la fuente ionizante que produce la línea Pa β puede ser una mezcla de formación estelar y radiación AGN, la línea [S ix] sólo puede ser producida por fotones duros de un disco de acreción en un ANSM, como fue mencionado anteriormente. Como las dos líneas presentan una componente principal con el mismo ancho cinemático, dentro de los errores, ambas líneas deben ser co-espaciales, es decir producirse en la misma región. Esto significa que la contribución de la formación estelar, si estuviera presente, no es observable con esta combinación de resolución espectral y relación señal/ruido. Ambas componentes, en emisión y en *outflows* para ambas líneas son observadas hasta una distancia de 55 pc desde el núcleo.

La co-existencia en el espectro de las líneas coronales (que indican que estamos viendo la NLR) y de líneas de menor potencial de ionización, indica que las nubes de la NLR deben ser lo suficientemente ópticamente gruesas para escudar la región geoméricamente opuesta al AGN de la radiación más dura y así permitir la existencia de especies de baja ionización.

5.4. Resumen

En éste capítulo se estudió la región nuclear de NGC 6300 analizando imágenes en las bandas J , K_s , y H y espectroscopía en bandas J y K_s obtenidos con el espectrógrafo Flamingos-2 de Gemini-Sur. Para realizar éste estudio, se analizó el perfil espacial extraído de la imagen en banda K_s a partir del cual pudimos diferenciar las componentes estructurales que conforman los kpc centrales. Además, se realizaron extracciones espectrales unidimensionales para estudiar las variaciones radiales de las propiedades espectrales del polvo y el gas en los 500 pc centrales. Nuestras principales conclusiones se pueden resumir como sigue:

5 El caso de NGC 6300

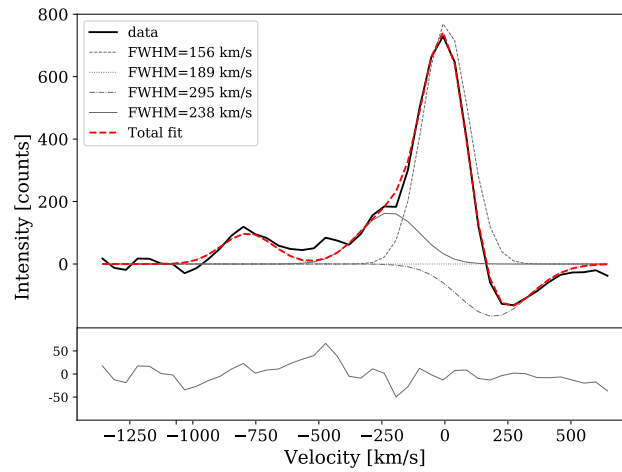


Figura 5.10: Ajuste del perfil de línea de $\text{Pa}\beta$ $\lambda 1.28\mu\text{m}$. En negro, el perfil extraído del espectro nuclear de 33pc de ancho, las componentes ajustadas se muestran en gris y el ajuste total en rojo. La componente negativa representa la absorción en la población estelar de NGC 6300.

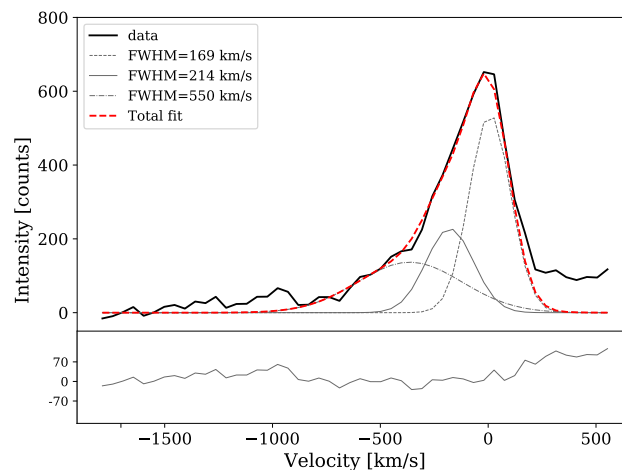


Figura 5.11: Ajuste del perfil de línea de $[\text{S II}]\lambda 1.25\mu\text{m}$. En negro, el perfil extraído del espectro nuclear de 33pc de ancho, las componentes ajustadas se muestran en gris y el ajuste total en rojo. El exceso al rojo en el residuo corresponde al ala azul de la línea $[\text{Fe II}]\lambda 1.26\mu\text{m}$.

- Hemos realizado un ajuste del perfil fotométrico en banda K_s y encontrado que la estructura que domina los 0.25 kpc centrales está compuesta por una *gaussiana* central con $\text{FWHM} = 0.07 \pm 0.01$ kpc y un disco nuclear con un radio de escala de 0.073 ± 0.005 kpc. Esta estructura presenta un descentrado de 25 pc con respecto a un disco circumnuclear que domina hasta la escala del kpc y que presenta un radio de escala de 0.60 ± 0.03 kpc .

5 El caso de NGC 6300

- De la curva de velocidad circular obtenida de las líneas del H_2 hemos medido un descentrado de 55 pc entre el centro cinemático y el pico de emisión asociado al ANSM.
- Hemos detectado en el espectro de banda J las líneas de $[S\text{ IX}] \lambda 1.25 \mu\text{m}$, $[Fe\text{ II}] \lambda 1.26 \mu\text{m}$, y $Pa\beta \lambda 1.28 \mu\text{m}$. La presencia de la línea coronal $[S\text{ IX}] \lambda 1.25 \mu\text{m}$ hasta el radio 88 pc es indicativa de la presencia de fotones en UV extremo y rayos-X.
- $[S\text{ IX}]$ y $Pa\beta$ presentan una componente ancha y corrida al azul que asociamos con *outflows* o vientos nucleares.
- En el espectro de banda K_s hemos identificado Hidrógeno molecular $H_2 \lambda 2.03 \mu\text{m}$, $H_2 \lambda 2.07 \mu\text{m}$, $H_2 \lambda 2.12 \mu\text{m}$, $H_2 \lambda 2.22 \mu\text{m}$, $H_2 \lambda 2.25 \mu\text{m}$. Además, detectamos la línea coronal prohibida del Aluminio $\lambda 2.04 \mu\text{m}$ y la línea de recombinación del Hidrógeno $Br\gamma \lambda 2.16 \mu\text{m}$. Además, muchas líneas de absorción están presentes en el espectro, incluyendo los dobletes de NaI y CaI, y el comienzo de la banda molecular de CO_2 . De acuerdo al diagrama de diagnóstico, construido a partir de cocientes de líneas, las líneas de Hidrógeno molecular H_2 están siendo excitadas mediante mecanismos térmicos.
- De la curva de velocidad radial, el mecanismo de emisión térmica y la ausencia de *outflows* en el gas molecular, se confirma que éste gas está confinado en un disco rotante, escudado del AGN.
- Usando una aproximación Kepleriana, hemos estimado la masa encerrada en los ~ 55 pc centrales que resulta de $M = (6.2 \pm 2.5) \times 10^7 M_\odot$ y puede ser considerada como un límite superior para la masa del SMBH que da origen al AGN.
- Un análisis de la pendiente del continuo muestra un exceso IR en el núcleo y en la región circumnuclear hasta ~ 27 pc probablemente asociado con polvo caliente extendido y no solamente con el toroide del MU. Proponemos que éste polvo caliente podría estar contribuyendo al oscurecimiento del AGN y ser responsable, al menos en parte, de la clasificación *Seyfert 2* de esta galaxia.

Gracias a la resolución alcanzada por Flamingos-2 hemos podido estudiar la región circumnuclear de NGC 6300, una galaxia *Seyfert 2*, altamente oscurecida, en escalas de las decenas de pc. Tanto las imágenes de Flamingos-2 como las del *HST* nos

permitieron verificar que el núcleo de esta galaxia, el cual asumimos que se encuentra en el pico de emisión de banda K_s donde reside el ANSM, está desplazado del centro geométrico del disco circumnuclear. El hecho de que la curva de velocidad radial no es empinada muestra que el potencial gravitacional central no está dominado por la fuente puntual que origina el AGN. Este ANSM probablemente está orbitando el centro cinemático de la galaxia mientras acreta masa y sigue creciendo. Este movimiento podría ser responsable de la distribución caótica de gas y polvo observada en imágenes de los cientos de pc centrales. Y tal vez, esta oscilación es el mecanismo que produce la disipación del momento angular del material en esa región, forzándolo a viajar los últimos pc antes de ser acretao por el ANSM. Más aún, la ausencia de un anillo circumnuclear y de circularización de las órbitas que impedirían la caída del material hacia el centro está de acuerdo con la falta de preponderancia gravitacional del ANSM propuesta. El futuro incremento de masa del objeto oscuro central aumentará las velocidades angulares centrales, llevando a la aparición de resonancias de Lindblad y la probable formación de un anillo. Además, el crecimiento del ANSM causará también la destrucción de la barra débil de NGC 6300, como predicen las simulaciones numéricas.

Los resultados presentados en éste capítulo proveen diferentes resultados para entender el modo en que un AGN oscurecido de masa intermedia a baja crece en la presencia de una barra débil y con grandes cantidades de polvo circumnuclear. Pero aún quedan muchas preguntas por responder: ¿cual es la relación entre el mecanismo de alimentación nuclear en galaxias *Seyfert* y la fuerza de la barra?, ¿Como están conectados la aparición de un anillo circumnuclear, el crecimiento del ANSM, el ciclo del AGN y el tiempo de vida de la barra? Y finalmente, ¿como influye la distribución de polvo interestelar a la clasificación *Seyfert 1* / *Seyfert 2*?

6 Caracterización de núcleos oscurecidos

Los núcleos galácticos fuertemente oscurecidos siguen siendo lugares misteriosos aún hoy, a pesar de la existencia de facilidades con resoluciones espaciales por debajo del segundo de arco como *HST* o *ALMA*. Esto se debe a que las grandes cantidades de polvo presentes en dichos núcleos bloquean parcial - o casi completamente - la radiación que emiten. El infrarrojo cercano, y en particular la banda *K*, se presenta entonces como una de las bandas donde pueden ser observados con mayor profundidad ya que la extinción se reduce hasta un 10% de la que afecta a la banda *V* del óptico. La importancia de conocer en detalle la morfología, cinemática y estado físico de las componentes de estos núcleos reside en la hipótesis de que las etapas de crecimiento de los ANSM de baja masa podrían atravesar una fase de crecimiento rápido completamente embebida en polvo, lo que dificulta tanto la caracterización de esta fase como los censos de AGNs realizados en otras bandas. En este capítulo presentamos observaciones espectroscópicas y en modo imagen de uno de los núcleos cercanos más oscurecidos que se conocen: NGC 4945 ($A_V = 6 - 20$ mag, Moorwood, van der Werf et al., 1996) y de otras dos galaxias cercanas que hemos utilizado como muestra de comparación. Entre los resultados presentados se encuentran la medición de la temperatura del polvo que rodea el núcleo, probablemente asociado a un *starburst* confinado dentro de los 200 pc centrales, la caracterización de un disco de gas molecular que también es co-espacial con el *starburst* y la medición de la masa asociada al material nuclear dentro de un radio de ~ 8 pc.

6.1. Selección de la Muestra

La muestra completa que pretendemos observar para el estudio a largo plazo que se deriva de esta tesis doctoral incluye los 9 AGN ópticamente no identificados de Goulding y Alexander (2009) (de ahora en más AGN oscurecidos, ver Sec. 1.4 en el

marco teórico.), más 9 galaxias inactivas como muestra de comparación. Sumado a 3 AGNs ópticamente identificados por Goulding & Alexander que servirán como comparación también. Las 9 galaxias inactivas de comparación fueron elegidas de manera de coincidir con los 9 AGNs oscurecidos en el espacio de inclinaciones, distancias y tipos morfológicos. Hasta la fecha hemos observado dos galaxias inactivas de la muestra de comparación: NGC 134 y NGC 1300, un AGN oscurecido: NGC 4945 y un AGN ópticamente identificado: NGC 5643. Finalmente, los espectros de NGC 1300 no alcanzaron relación señal/ruido suficiente y fueron omitidos de este trabajo. NGC 6300 también es parte de la submuestra de AGNs identificados en el óptico pero la hemos estudiado en una etapa anterior y como parte del proyecto piloto antes de que estuviera disponible la capacidad de observar en la banda K_{long} ($1.9 - 2.5\mu\text{m}$) de Flamingos-2 (los espectros de NGC 6300 solo cubren la región espectral de la banda K_s ($2 - 2.3\mu\text{m}$), por ello ha sido colocado en un capítulo apartado. A continuación se describen algunas características y antecedentes de las galaxias de la muestra presentadas en éste capítulo.

NGC 4945

NGC 4945 es una galaxia espiral de tipo SB(s)cd que se encuentra casi de canto ($i = 78 \pm 2^\circ$), Ables et al. (1987). Se encuentra a una distancia de 4.7 ± 0.3 Mpc ($1'' \sim 23$ pc) (J. R. Mould et al., 2000) y su radio efectivo en la banda K (2MASS) es de $172''.7$ (Jarrett et al. (2003)). Es una de las galaxias más brillantes del cielo en el infrarrojo, con una luminosidad de $L_{8-100\mu\text{m}} = 2.95 \times 10^{10} L_\odot$ (Spoon et al., 2000), la cual se debe probablemente a las grandes cantidades de polvo que se observan en imágenes ópticas y que han sido mencionadas ampliamente en la literatura a la hora de estudiar sus características nucleares (ver por ejemplo, Brock et al. (1988), Mouri (1994)).

Esta galaxia es uno de los AGNs no identificados en el óptico reportados por Goulding y Alexander (2009) ya que en diagramas de diagnóstico se ubica en la región de galaxias tipo HII, pero en el infrarrojo medio presenta la línea de alta ionización [Ne V] $\lambda 14.32 \mu\text{m}$ (97.1 eV). Esta línea es un indicador inequívoco de actividad nuclear ya que debido a su alto potencial de ionización solo puede ser producida en ambientes extremos como el disco de acreción en torno a un ANSM (ver por ejemplo Armus et al. (2006)). Esta galaxia no solo no aparece como activa en el diagrama BPT (Baldwin, Phillips y R. Terlevich (1981)), sino que desde que empezó a ser estudiada, ha eludido sistemáticamente la identificación de actividad nuclear en la banda óptica (ver por ejemplo, Spoon et al. (2000), Koornneef (1993)). Esto ha generado grandes incertidumbres y debates respecto de su tipo de actividad nuclear.

En 1979 Whiteoak y Gardner (1979) presentan un espectro en la región de $H\alpha$ donde se ve una componente ancha en dicha línea. Sin embargo, ellos mismos sitúan el punto donde se tomó el espectro como "cerca del núcleo". En las siguientes décadas, distintos autores postularon que probablemente NGC 4945 alberga un núcleo de tipo *Seyfert* (por ejemplo, Veron-Cetty y Veron (1989), Moorwood y Oliva (1990), Ghosh et al. (1992), donde el primero utilizó datos que no fueron publicados y los últimos dos datos en el infrarrojo lejano) pero sin evidencias concluyentes. Incluso en 1993, Koornneef (1993) expuso que al momento no había espectros ópticos publicados para esta galaxia centrados en el núcleo, probablemente debido a la alta extinción que presenta. Mencionan explícitamente que los espectros presentados por otros autores donde se pueden ver líneas de emisión no están centradas en el núcleo sino a varios segundos de arco de distancia (para más detalle y citas ver este trabajo donde se propone que NGC 4945 es una galaxia *post-starburst* y no una *Seyfert*).

Ya en el 2000, Madejski et al. (2000) hacen observaciones con Chandra y encuentran emisión en la línea K del Hierro; además estiman una luminosidad bolométrica de $\sim 2 \times 10^{43} \text{ erg s}^{-1}$ a partir de su luminosidad X en 1 – 500 keV. Ambas características apuntan a una clara actividad nuclear y la hacen una de las galaxias *Seyfert* más brillantes en 100 keV. Con el paso de las décadas, la presencia de actividad nuclear producida por acreción de NGC 4945 ha ido acumulando evidencias a su favor hasta ser firme en la actualidad (por ejemplo, Goulding y Alexander (2009), Ackermann et al. (2012), F.-K. Peng et al. (2019), Rosenthal et al. (2020)). Sin embargo, su identificación como *Seyfert 2* no se ha hecho en base a observaciones ópticas sino en otras bandas (NIR, MIR, FIR, Radio y X (Zaw, Farrar y Greene (2009))). En rayos X presenta variabilidad de flujo en 13 – 200 keV en escalas de tiempo de 10 hs (Iwasawa et al. (1993), M. Guainazzi et al. (2000)). En longitudes de onda mayores, Sadler (1965) reportó por primera vez una fuente compacta en radio en el presunto núcleo de la galaxia, además se observa emisión extendida a lo largo del disco de la galaxia (Forbes y Norris, 1998). También en el régimen de las ondas de radio, NGC 4945 presenta un megamaser de H_2O en la región nuclear (Dos Santos y Lepine (1979), Whiteoak (1986)) que ha sido utilizado por Greenhill, Moran y Herrnstein (1997) para medir con gran precisión una masa de $\sim 1.4 \times 10^6 M_{\odot}$ para su ANSM, ubicándolo así en el régimen de baja masa.

NGC 5643

NGC 5643 es una galaxia espiral de tipo morfológico SAB(rs)c y actividad nuclear

tipo *Seyfert 2* (Phillips, Charles y Baldwin, 1983). Se encuentra a una distancia de 15.51 ± 1.09 Mpc (J. R. Mould et al., 2000) y por lo tanto $1'' \sim 75$ pc. Posee una inclinación de 28.8° y un radio total medido en banda *K* (2MASS) de $177''.5$. NGC 5643 es uno de los AGN ópticamente identificados de la muestra de Goulding, Alexander et al. (2012) es decir que además de presentar la línea del [Ne V] $\lambda 14.32 \mu\text{m}$ que le da su clasificación en el MIR, se presenta también como una galaxia activa en el diagrama BPT. En el régimen de los rayos X, fue catalogada como *Compton thick* por Risaliti, Elvis, Fabbiano et al. (2005) a partir de medir una columna absorbedora de Hidrógeno de $N_H > 1024 \text{ cm}^{-2}$. La masa de su agujero negro fue medida en $\text{Log}(M/M_\odot) = 7$ por Asmus (2019). Eskridge et al. (2002) hicieron un análisis morfológico con imágenes ópticas y en el NIR del *Ohio State University Bright Spiral Galaxy Survey* y encontraron una fuente puntual brillante en el núcleo, embebida en un bulbo ligeramente elíptico que está atravesado por una barra angosta y prominente que forma un ángulo de 30° con respecto al semieje mayor del bulbo. La estructura espiral global es asimétrica y *floculenta* (del inglés *floculent*). Los brazos son ricos en nodos de formación estelar y estructura filamentaria. Por otro lado, P. Martini et al. (2003) también realizaron un estudio fotométrico utilizando imágenes del *HST* con las cámaras *WFPC2* y *NICMOS* y reportaron que el pico de brillo nuclear en las imágenes *V* y *H* está levemente desplazado y lo atribuyen a la extinción por el polvo que es mayor en la banda *V*.

NGC 134

Esta galaxia ha sido elegida como galaxia de comparación inactiva para la muestra de AGNs oscurecidos. Aparece clasificada en la NED como una galaxia de tipo HII y su tipo morfológico es SABb, ha sido poco estudiada individualmente y en los trabajos con catálogos las citas sobre su clasificación no son consistentes entre sí. Se encuentra a una distancia de 23.20 ± 1.62 Mpc de acuerdo con J. R. Mould et al. (2000) ($1'' \sim 112$ pc) y su radio efectivo en la banda K_s es de $55''.8$ (Jarrett et al., 2003). Posee una inclinación de 76° según a Alton et al. (1998).

A pesar de no poseer un núcleo activo, Davis, Berrier et al. (2014) han inferido, a partir de imágenes tomadas con el *UK Schmidt Telescope*, una masa de $6.44 \pm 0.51 M_\odot$ para el ANSM de NGC 134 utilizando combinadamente la relación $M_{ANSM} - \sigma$ (Tremaine et al., 2002) y la relación entre el *pitch angle* y la masa el bulbo de la galaxia (Seigar et al., 2008). Cabe destacar que estos métodos son indirectos y no están basados en

datos cinemáticos ni en una caracterización profunda más allá de las limitaciones de técnicas ópticas.

6.2. Las Observaciones

Cuadro 6.1: Se presenta el detalle de las observaciones tomadas con Flamingos-2 para la muestra de galaxias presentadas en este capítulo. Primera columna: la letra entre paréntesis indica si se trata de modo imagen (i) o modo espectroscópico (e). En la segunda columna se especifica el ID de programa de cada observación. En la columna 3, la fecha en que fue realizada la observación. En la columna 4 la banda, que especifica las condiciones climáticas con la que se tomaron los datos y no debe ser confundida con la banda espectral. En la columna 5 se especifica la cantidad de exposiciones por el tiempo de exposición de cada una. En la columna 6 se lista el *seeing* y en la columna 7 el PA de la ranura que se utilizó para los espectros.

Galaxia	ID programa	Fecha	Banda	$n^\circ \text{ exp} \times T \text{ exp}$	<i>seeing</i> ["]	PA [°]
NGC 4945 (i)	GS-2019A-Q-121	16/02/2019	1	$6 \times 2 \text{ s}$	0.47	0
NGC 4945 (e)	GS-2019A-Q-121	12/05/2019	1	$7 \times 300 \text{ s}$	0.5	43
NGC 5643 (i)	GS-2018A-Q-416	07/08/2018	4	$5 \times 10 \text{ s}$	0.56	88
NGC 5643 (e)	GS-2018A-Q-416	31/07/2018	4	$8 \times 300 \text{ s}$	0.56	88
NGC 134 (i)	GS-2018A-Q-416	26/07/2018	4	$12 \times 15 \text{ s}$	0.56	49
NGC 134 (e)	GS-2018A-Q-416	02/08/2018	4	$6 \times 300 \text{ s}$	0.56	49

NGC 134 y NGC 5643

La muestra seleccionada tiene una magnitud nuclear promedio de 13.7 mag en la banda K_s y, por lo tanto, pudo ser observada con un programa Banda 4. Las restricciones climáticas mínimas pedidas fueron IQ=any, CC= 70%, WV= any, sky SB=any, y air mass=1.5 . La configuración utilizada fue la misma que para la galaxia NGC 6300: el *grisma* R3K combinado con la ranura de 3 pixeles de ancho pero el filtro K_{long} ($1.9 - 2.5 \mu\text{m}$) fue utilizado para la espectroscopía. El modo imagen fue observado en los filtros J , H y K_s . Para estimar el tiempo de exposición necesario para cada galaxia, se utilizó como medida la relación S/N media a lo largo del rango espectral dada por el ITC (Integrator Time Calculator) y se buscó que la misma cumpliera con la condición $60 \leq S/N \leq 100$.

6 Caracterización de núcleos oscurecidos

Para realizar la simulación con el ITC se eligió la opción de fuente puntual de la magnitud correspondiente (asumiendo que el flujo está concentrado en el núcleo), un espectro modelo de una galaxia espiral y condiciones climáticas acordes a un programa de Banda 4.

Para el modo espectroscópico, se observó cada galaxia en exposiciones discretas de 300 segundos con el objetivo de evitar la saturación del fondo de cielo, mientras que la cantidad de exposiciones dependió de cada galaxia. El tiempo total de exposición sobre la fuente fue de entre 1 y 3 hs, en la tabla 6.1 se muestra el detalle de cada observación. El PA (ángulo de posición, por sus siglas en inglés) de la ranura fue elegido en cada caso de manera de coincidir con el semieje mayor de la galaxia, donde las velocidades radiales no están afectadas por la inclinación de la misma.

Se pidieron las calibraciones estándares (flats, lámparas de comparación y estrellas telúricas). Para las observaciones de las galaxias se solicitó una configuración de nodos ABCD donde A y B son nodos de objeto corridos en 10" y C y D son nodos de cielo corridos 10" entre sí y 5 minutos de arco respecto de los nodos objeto. Para la estrella telúrica se pidió una configuración de nodos ABBA donde los nodos A y B son objeto y están corridos 30", cada exposición fue de 120s.

Para el modo imagen, se tomaron imágenes en los tres filtros en bloques de 24 exposiciones de 10 segundos, la mitad en la galaxia y la mitad en el cielo. La configuración utilizada fue de 3 nodos objeto corridos en 10" entre si y 3 nodos de cielo también corridos en 10". De acuerdo al ITC, para una fuente puntual de magnitud K_s de 13.7 (la magnitud media de la muestra), tomando 10 segundos de exposición, la relación S/N final de las imágenes es de ~ 581 para la banda H , ~ 756 para la banda J y ~ 656 para la banda K_s .

Finalmente, para las imágenes de muestra presentadas en la Fig. 6.1 como para los espectros de las galaxias de comparación, se utilizaron menos cantidad de exposiciones, como se describe en la Tabla 6.1.

NGC 4945

Para esta galaxia obtuvimos tiempo de telescopio para observarla en Banda 1. Las configuraciones instrumentales y tiempos de cada exposición discreta fueron los mismos que para las tres galaxias anteriores observadas en modo Banda 4, pero la cantidad de exposiciones fue distinta; los detalles de la observación se muestran también en la tabla 6.1. Las condiciones climáticas mínimas requeridas fueron IQ=70 %, CC= 70 %, WV= any, SB=any, y air mass=1.5.

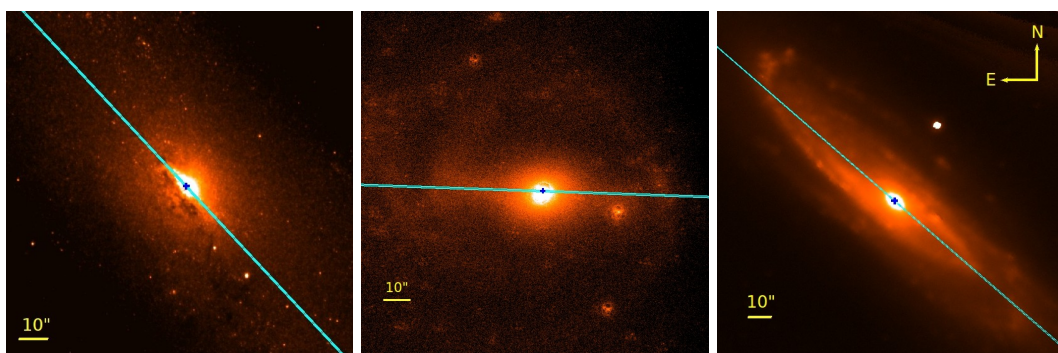


Figura 6.1: Imágenes tomadas con Flamingos-2 en banda K_s de las tres galaxias de la muestra, para detalles sobre las observaciones ver la Tabla 6.1. Panel izquierdo: región nuclear de NGC 4945. Panel medio: NGC 5643. Panel derecho: NGC 134. En turquesa se representa la ranura con la que se tomaron los espectros para cada galaxia. La cruz azul marca el pico de emisión en la banda K_s , donde se centró la ranura.

6.3. Resultados y discusión

6.3.1. Espectros nucleares en banda K_{long}

En esta subsección se presentan los espectros nucleares obtenidos para las tres galaxias de la muestra con las configuraciones y condiciones climáticas descritas en la Subsección 6.2. En los tres casos se extrajeron espectros de 1 px de ancho para minimizar la contaminación por regiones adyacentes y maximizar la contribución de la emisión nuclear. En la Tabla 6.2 se encuentran todas las líneas de emisión y absorción presentes en los espectros. Tanto en NGC 4945 (Fig. 6.2) como en NGC 5643 (Fig. 6.3) se observa todo el complejo de líneas moleculares del H_2 características de la banda K_{long} así como también la línea de recombinación del $HI Br\gamma$ en $\lambda 2.16 \mu m$. También están presentes las líneas de absorción del NaI, el CaI y el comienzo de la banda del CO. Hay una clara diferencia en la pendiente del continuo entre ambos espectros. Mientras en el continuo de NGC 5643 la pendiente cae hacia longitudes de onda más largas, el continuo de NGC 4945 crece hacia el rojo. Este comportamiento será analizado en detalle en la siguiente subsección.

A diferencia de las galaxias con actividad nuclear tipo *Seyfert*, para NGC 134 (Fig. 6.4) encontramos un espectro casi libre de caracteres. No hay presentes líneas de emisión y el continuo es típico de un espectro dominado por población estelar. Además, se encuentran las absorciones correspondientes a los dobletes del NaI y el CaI y el comienzo de la banda de absorción del CO. Estas características refuerzan la

6 Caracterización de núcleos oscurecidos

clasificación de NGC 134 como una galaxia inactiva, a pesar de la dificultad para rastrear la referencia de dicha clasificación.

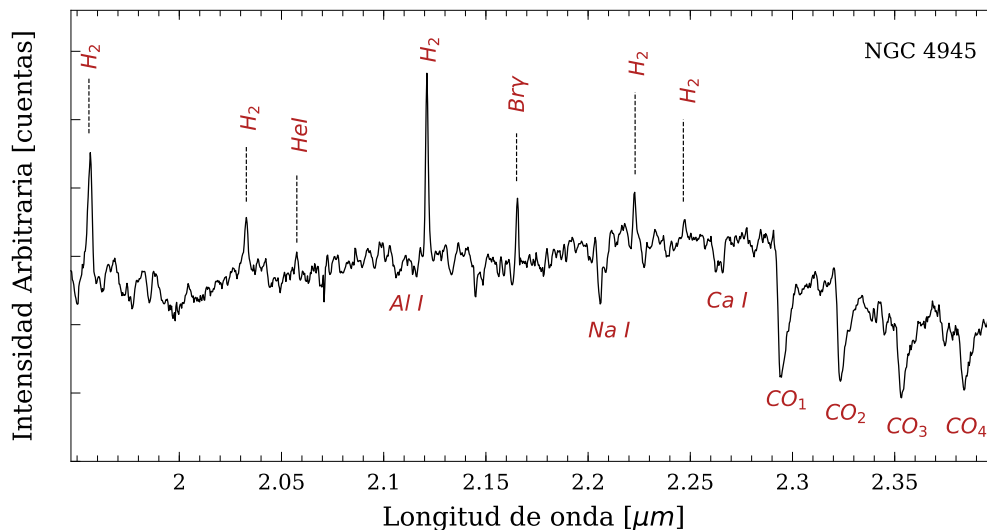


Figura 6.2: Espectro nuclear, de 4.1 pc de ancho, de NGC 4945 tomado en banda K_{long} con el espectrógrafo Flamings-2 de Gemini Sur (Ver Tabla 6.1 para detalles de la observación). Se resaltan en rojo las líneas de emisión y absorción presentes en el espectro.

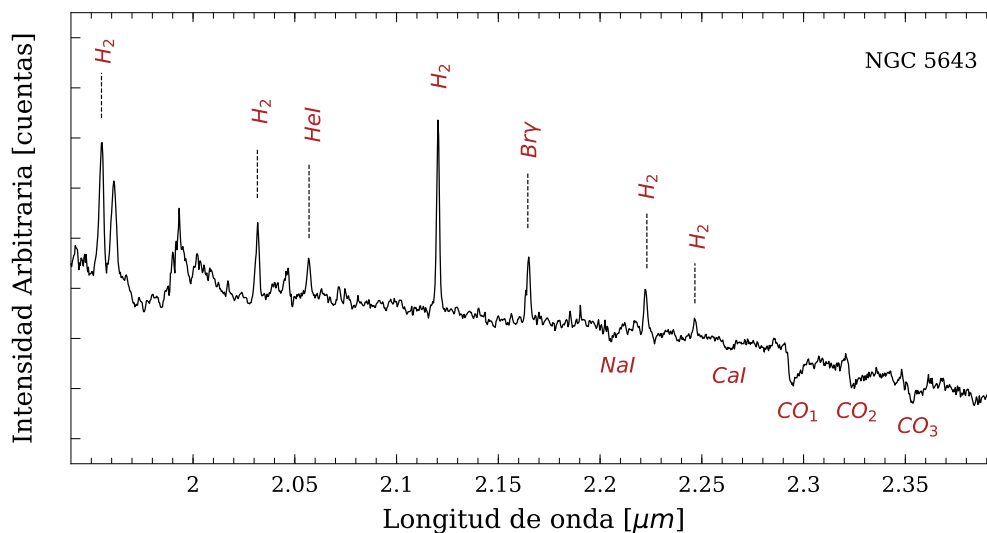


Figura 6.3: Espectro nuclear, de 13.52 pc de ancho, de NGC 5643 tomado en banda K_{long} con el espectrógrafo Flamings-2 de Gemini Sur (Ver Tabla 6.1 para detalles de la observación). Se resaltan en rojo las líneas de emisión y absorción presentes en el espectro.

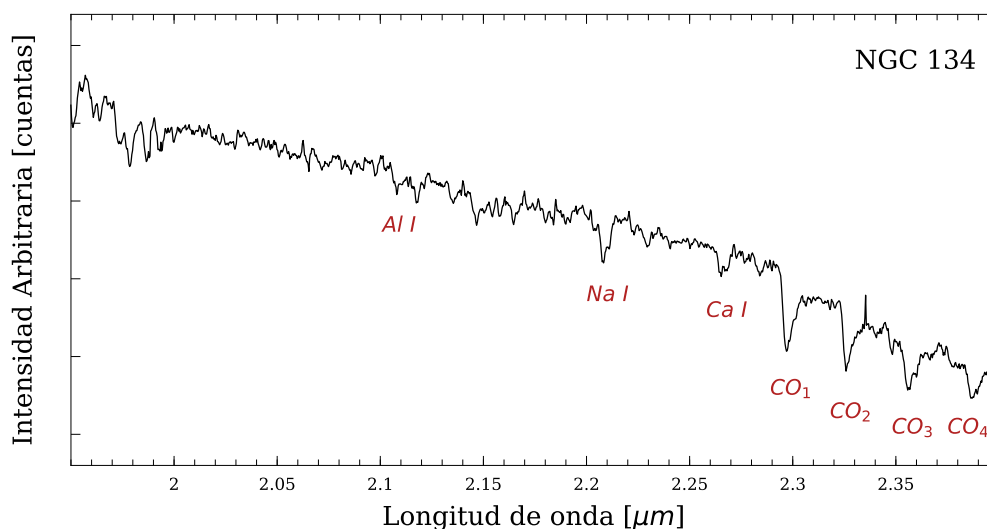


Figura 6.4: Espectro nuclear, de 20.25 pc de ancho, de NGC 134 tomado en banda K_{long} con el espectrógrafo Flamingos-2 de Gemini Sur (Ver Tabla 6.1 para detalles de la observación). Se resaltan en rojo las líneas de absorción presentes en el espectro. La ausencia de líneas de emisión es característica de un núcleo inactivo.

6.3.2. Polvo caliente en la región nuclear

En esta subsección se presenta un análisis de las pendientes del continuo en banda K_{long} para las tres galaxias de la muestra. Como se detalló en la Sec.5.3.2, el continuo en la banda K_{long} tiene dos contribuciones para los núcleos de tipo *Seyfert 2*: la cola roja de la emisión estelar y la cola azul de la emisión del polvo caliente, que puede estar presente o no. Por lo tanto, la pendiente del continuo en esta banda cambiará si está presente en el núcleo una componente de emisión del polvo, como es el caso de NGC 6300. El procedimiento seguido para analizar la pendiente es el mismo que el utilizado en la Sec.5.3.2, es decir, utilizar los espectros de los radios más externos donde claramente deja de contribuir la emisión del polvo para restar a los espectros más centrales la contribución de la componente estelar (para cada galaxia este radio será distinto y se determinará a partir de la comparación de la pendiente para distintos radios).

En las Figuras 6.5, 6.8 y 6.9 se presentan para NGC 4945, NGC 5643 y NGC 134 respectivamente los espectros extraídos para todo radio con buena relación S/N. Para NGC 4945 y NGC 134 se extrajo hasta lograr un compromiso entre la S/N y los residuos introducidos por la resta de la emisión telúrica (como se puede ver en los radios más externos de ambas galaxias). Para NGC 5643 no fue posible extraer más

6 Caracterización de núcleos oscurecidos

Cuadro 6.2: Líneas de emisión y absorción presentes en los espectros de banda *K* de la muestra. En la tercera columna se especifica en que galaxia fue encontrada la línea. En el caso de tratarse de una línea de absorción, se especifica junto al nombre del elemento. En el caso de las líneas de absorción del Aluminio (Al I) Sodio (Na I) y el Calcio (Ca I) se dan dos longitudes de onda ya que se trata de dobletes. Las bandas de absorción del CO están conformadas por muchas líneas discretas.

Elemento	Longitud de Onda [μm]	Galaxia [NGC n°]
H_2	-	4945, 5643
H_2 1-0S(2)	2.0332	4945, 5643
HeI	2.058	4945, 5643
H_2 1-0S(1)	2.1211	4945, 5643
HI ($Br\gamma$)	2.1654	4945, 5643
H_2 1-0S(0)	2.2230	4945, 5643
H_2 2-1S(1)	2.2470	4945, 5643
Al I (abs)	2.1098,2.1168	4945, 134
Na I (abs)	2.2062,2.2089	4945, 5643 , 134
Ca I (abs)	2.2626,2.2656	4945, 5643, 134
CO_1 (abs)	2.2935	4945, 5643, 134
CO_2 (abs)	2.3227	4945, 5643 , 134
CO_3 (abs)	2.3525	4945, 5643, 134
CO_4 (abs)	2.3829	4945, 134

espectros. En todos los casos el espectro nuclear se presenta en color rojo y el eje vertical indica el paso con el que se extrajeron los espectros.

Para NGC 4945 (Fig. 6.5) se realizaron extracciones cada 8.2 pc (el mínimo que la resolución de $0''.5$ permite), pero se presentan sólo uno de cada tres espectros para facilitar el análisis. Se puede ver como hasta los espectros en 98.4 pc (radios positivos) y -73.8 pc (radios negativos) el continuo se mantiene relativamente constante y luego, para radios mayores, la pendiente se vuelve notablemente negativa, por lo tanto este será el radio a partir del cual consideramos que deja de estar presente significativamente la componente proveniente de longitudes de onda más largas. Sin embargo, como criterio conservador tomamos un promedio de los espectros entre 147.6 y 196.8 pc para representar el espectro de la población estelar y tomarlo como un modelo de la misma. Luego de substraer el modelo de los espectros más internos realizamos un ajuste del exceso resultante para distintos radios. En la Fig. 6.6 se presenta el exceso encontrado a partir del espectro nuclear de 1 pixel (4.1 pc) de

6 Caracterización de núcleos oscurecidos

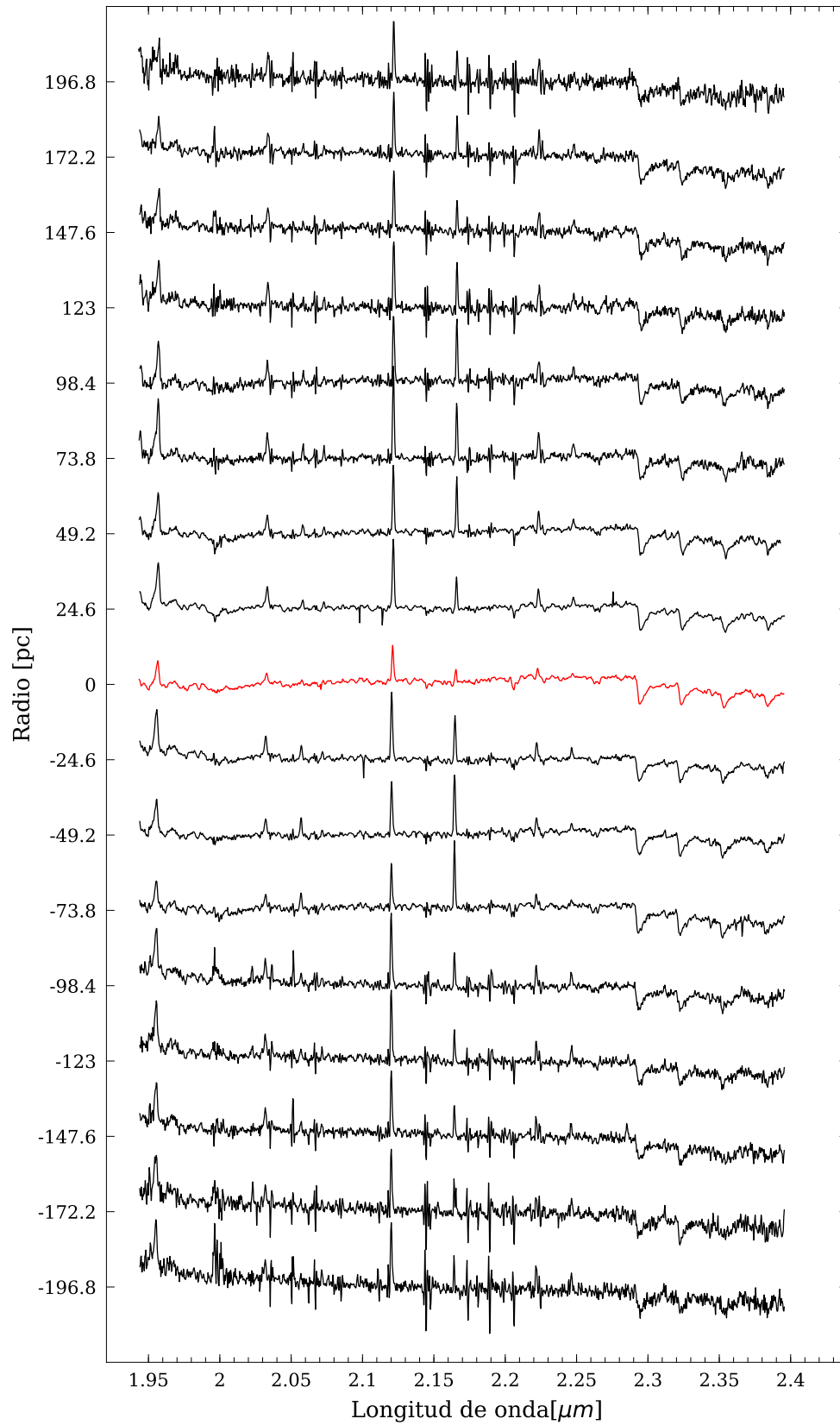


Figura 6.5: Espectros de NGC 4945 en banda K_{long} . En rojo se marca el espectro nuclear. Notar el cambio de pendiente a medida que crece el radio hacia ambos lados.

6 Caracterización de núcleos oscurecidos

ancho presentado en la Fig. 6.2. La pendiente del exceso corresponde a la emisión de un cuerpo negro con una temperatura de 1000 K. Por comparación se muestran en la figura también los espectros correspondientes a cuerpos negros con temperaturas de 900 y 1200 K. En el panel inferior se muestra el residuo resultante de la substracción entre el exceso y el modelo de cuerpo negro.

En la Fig. 6.7 se presentan los excesos ajustados para los radios positivos entre 0 y 65.6 pc. Las temperaturas de los cuerpos negros ajustados se presentan en las leyendas de cada cuadro de la figura. Todas las temperaturas se encuentran en el rango 1030 a 1100 K. El panel superior izquierdo corresponde a una apertura centrada en 0 pc pero con un ancho de 2 px (la apertura limitada por *seeing* para esta galaxia), debido a ésto presenta una temperatura distinta a la encontrada para el exceso de la Fig. 6.6 ya que tiene mayor contribución de una región más extensa.

Por el contrario, tanto para NGC 5643 (Fig. 6.8) y NGC 134 (Fig. 6.9) la pendiente del continuo permanece negativa para todos los radios, incluso en el espectro nuclear. Apuntando a que en estas dos galaxias no hay polvo caliente detectable mediante éste método en la región nuclear.

NGC 4945 ha sido ampliamente estudiada en todas las longitudes de onda, en particular en el infrarrojo cercano se han presentado varios espectros en la banda K. Moorwood y Oliva (1990) presentaron un espectro en banda K_s tomado con la cámara *IRSPEC* del telescopio ESO 3.6m. No mencionan la apertura con la que extrajeron el espectro pero si mencionan que la escala de pixel es $6'' \times 6''$ ($6'' \sim 110$ pc). Probablemente debido a la baja resolución espacial del espectro, ellos no detectan el cambio en pendiente debido al polvo caliente, pero si detectan las líneas de emisión que hemos encontrado en el espectro de Flamingos-2. Koornneef (1993) también presenta un espectro en banda K de NGC 4945 pero solo en las regiones de $Br\gamma$ y dos líneas de H_2 por separado. Debido a esto, no sirve como comparación con nuestro espectro a la hora de estudiar la pendiente del continuo, hacen un análisis de las líneas espectrales y sus cocientes y proponen que no se trata de una galaxia *Seyfert* sino de una *starburst*.

Sosa-Brito et al. (2001) presentan un espectro en banda K tomado en el telescopio *Siding Springs* de 3.9m. El espectro es similar al que nosotros hemos obtenido con Flamingos-2 pero limitado por un *seeing* de $2''.3$. Sin embargo, se puede ver el aplanamiento de la pendiente que observamos en el espectro nuclear y las mismas líneas de absorción y emisión. Para detectar la componente dominante del espectro (*starburst* o actividad tipo *Seyfert*) realizan un procedimiento opuesto al presentado en éste trabajo: substraen al espectro nuclear (apertura limitada por *seeing*) un espectro

extraído con una apertura de $4''$ y centrado en el pico de intensidad. El resultado es un espectro al que se le ha restado la contribución del núcleo. Para NGC 4945 el resultado es invariante respecto del espectro nuclear, lo que significa que el mecanismo que domina la emisión lo hace por igual tanto en una apertura de $2''.3$ (~ 46 pc) como en una de $4''$ (~ 70 pc). Este resultado está de acuerdo con el exceso infrarrojo que hemos encontrado, presente desde el espectro nuclear hasta un radio de ~ 100 pc y con temperaturas prácticamente constantes al lo largo de toda la región ($1000 - 1100$ K). Además, las estimaciones de la luminosidad infrarroja indican que alrededor del 75 % de la misma proviene de una región elongada de alrededor de 222 pc \times 167 pc (Brock et al., 1988) indicando una gran concentración de polvo confinada en una región de esa escala. Otros autores han encontrado emisión de naturaleza *starburst* confinada en un disco o anillo de ~ 200 pc de diámetro: Marconi et al. (2000) encontraron un anillo mapeado en $Pa\alpha$ ($1.87\mu\text{m}$) con una escala de 100 pc utilizando imágenes de *HST-NICMOS*. Además, en un mapa de color $H - K$ observan una estructura que parece un disco de frente con un radio de $4''.5$ (~ 80 pc). Pérez-Beaupuits et al. (2011) encuentran que el cociente de las líneas $[NeIII] \lambda 15.55 \mu\text{m} / [NeII] \lambda 12.81\mu\text{m}$, el cual es un trazador de formación estelar, coincide con el *starburst* encontrado por Marconi et al. Finalmente, Bendo et al. (2016) encuentran a partir de datos tomados con *ALMA*, que el continuo en 85.69 GHz y la línea $H42\alpha$ se originan en una estructura que puede ser modelada como un disco exponencial con un radio de escala (radio a mitad de luz) de $\sim 2''.1$ (~ 40 pc); además comentan que la extensión espacial y el hecho de que no hay mayor intensidad en el centro, sumado a la ausencia de componentes anchas en las líneas indicaría que esta emisión tiene como origen la formación estelar y no la actividad tipo *Seyfert*.

El polvo con temperaturas $1000 - 1100$ K que hemos detectado dentro de un radio de 65.5 ± 4.1 pc (Fig. 6.7) y que, teniendo en cuenta las pendientes del continuo (Fig. 6.5), se puede detectar hasta ~ 100 pc en la dirección NE y hasta 73.8 pc en la dirección SO); además puede ser espacialmente asociado al *starburst* descrito ampliamente en la literatura. Sin embargo, la radiación producida por las estrellas calientes en un *starburst* no es suficiente para calentar el polvo a las temperaturas encontradas, de hecho, en la SED característica de un AGN (Fig. 1.2) se ve como el polvo calentado por actividad de tipo *starburst* emite en el MIR y su cola de emisión no llega al NIR. En otras palabras, a pesar del hecho de que la distribución del polvo caliente coincide con el *starburst*, la fuente de fotones UV que calienta el polvo que observamos en el NIR debe provenir del ANSM nuclear.

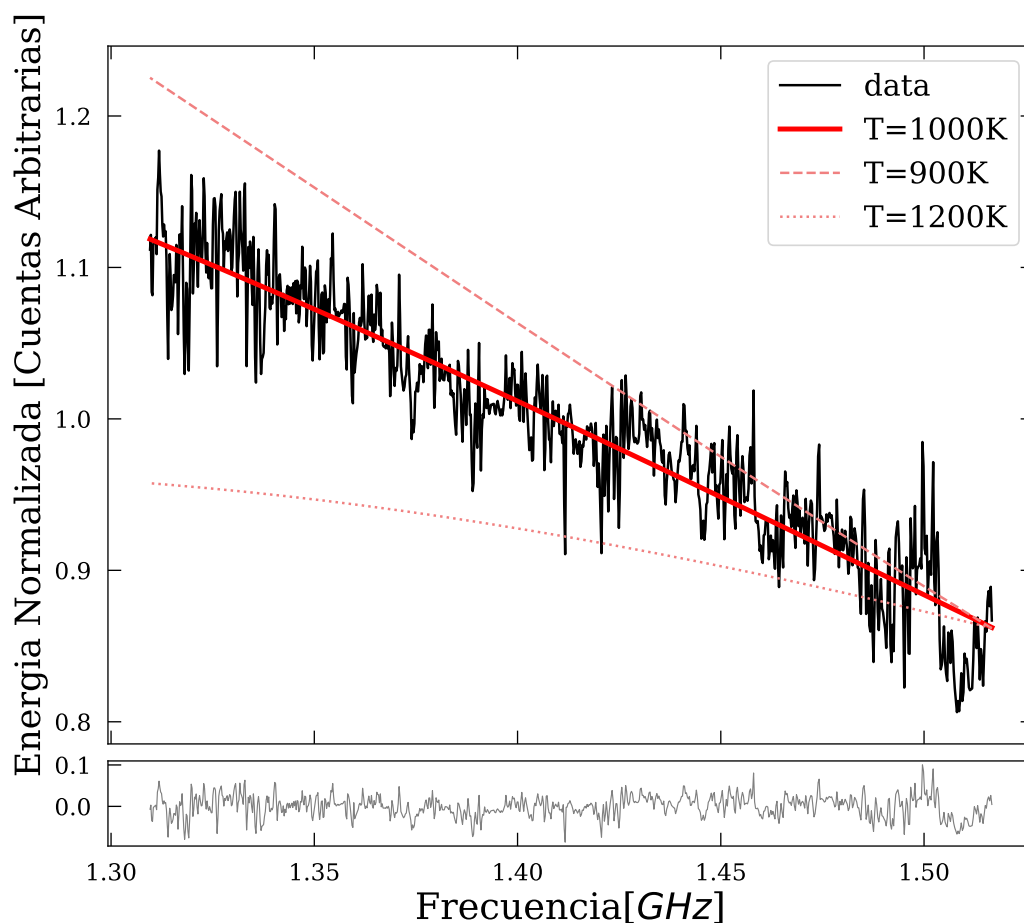


Figura 6.6: Exceso infrarrojo obtenido a partir de la substracción de la población estelar. Corresponde al pixel central del espectro, es decir que contiene la menor contaminación por regiones circunucleares posibles. La resolución espacial es de $0''.5$ ó equivalentemente 11.4 pc. La curva sólida corresponde a un modelo de cuerpo negro de 1000 K de temperatura. Las curvas punteada y rayada corresponden a 1200 y 900 K respectivamente y se presentan por motivos de comparación. En el panel inferior se presenta el residuo entre el exceso infrarrojo y el modelo de cuerpo negro.

6.3.3. Estado del Hidrógeno en la región nuclear de NGC 4945

En la Fig. 6.10 se presentan curvas de velocidades radiales y $FWHM$ de las líneas en función del radio para las líneas $H_2 \lambda 2.12 \mu\text{m}$ y $Br\gamma \lambda 2.16 \mu\text{m}$.

6 Caracterización de núcleos oscurecidos

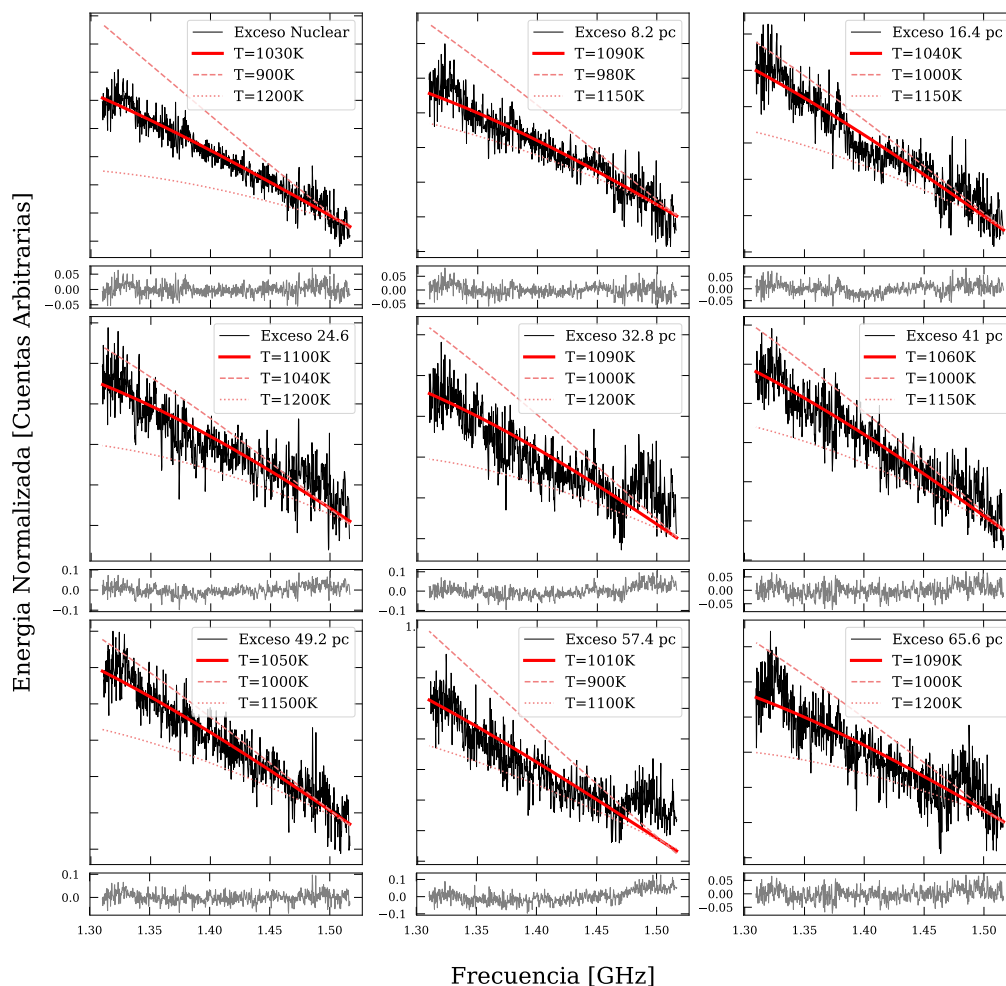


Figura 6.7: Excesos infrarrojos para distintos radios. El exceso nuclear presentado en el panel superior izquierdo corresponde a una extracción de 3 px y por eso la temperatura difiere de la encontrada en la Fig. 6.6. En cada panel la curva sólida corresponde al modelo de cuerpo negro que mejor ajusta la pendiente del exceso y las otras dos corresponden a cuerpos negros con otras temperaturas, con fines de comparación. Las temperaturas de los modelos se detallan en las respectivas leyendas y las que ajustan los excesos se encuentran dentro del rango 1000 – 1100 K.

En el panel superior izquierdo, la curva de velocidades radiales para la línea de Hidrógeno molecular $H_2 \lambda 2.12 \mu\text{m}$ muestra una fuerte pendiente en la región nuclear provocada por el movimiento rotacional en torno a un pozo de potencial producido por un objeto masivo. Debido a que el gas molecular se encuentra más

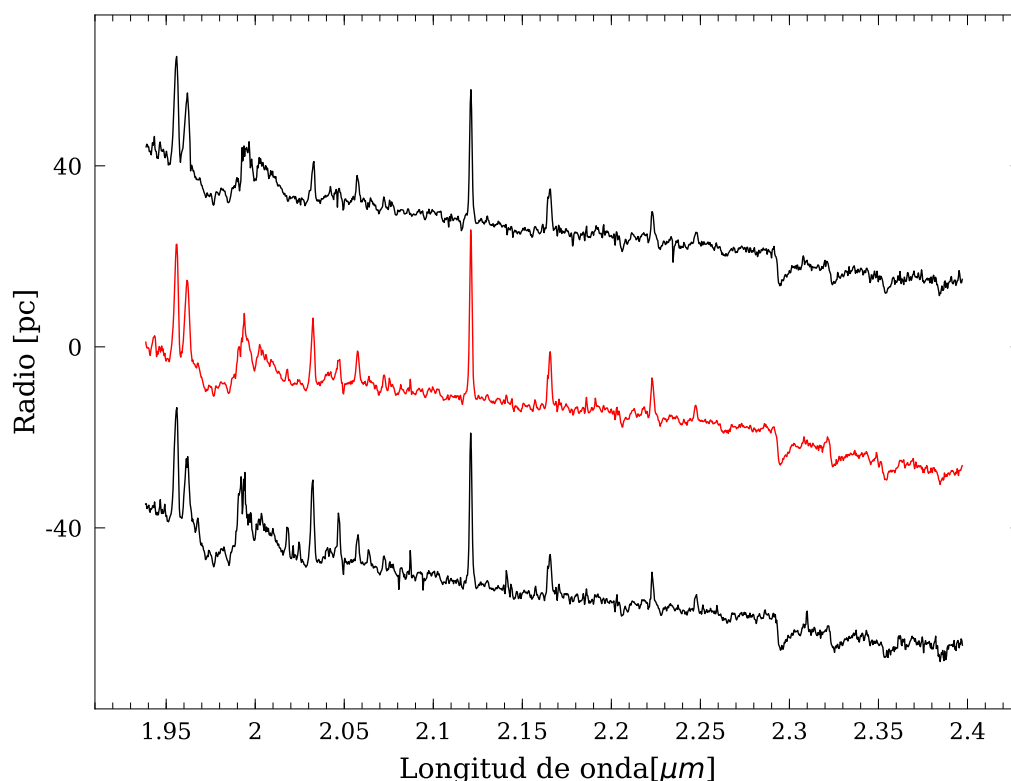


Figura 6.8: Espectros de NGC 5643 para todos los radios en los que hemos realizado extracciones. En rojo se marca el espectro nuclear

frío ($T \sim 10 - 40$ K) que el gas ionizado ($T \sim 10^4$), es de esperar que su turbulencia sea menor y se encuentre confinado en el plano de la galaxia. La clara firma de movimiento soportado por rotación que presenta el H_2 que estamos mapeando a lo largo de la ranura sugiere que éste se encuentra confinado a un disco compacto probablemente asociado al *starburst* que hospeda NGC 4945 en su núcleo. La curva de velocidades radiales obtenida a partir de $Br\gamma$ presenta una pendiente mucho menor en el centro, y dado que se trata de gas ionizado, mucho más caliente, sugiere que podría haber una contribución de gas turbulento a las velocidades mapeadas a partir de esta línea. El $FWHM$ de las líneas se presenta en los paneles inferiores de la Fig. 6.10 (izquierda: H_2 , derecha $Br\gamma$). Se puede ver que el $FWHM$ para $Br\gamma$ presenta una meseta en la región nuclear, esto se debe probablemente a que el perfil de la línea está siendo afectado por extinción por lo que no es posible medir correctamente su $FWHM$, sin embargo se puede ver, extrapolando el perfil, que su turbulencia aumentaría considerablemente más que en la línea de H_2 hacia las regiones nucleares.

6 Caracterización de núcleos oscurecidos

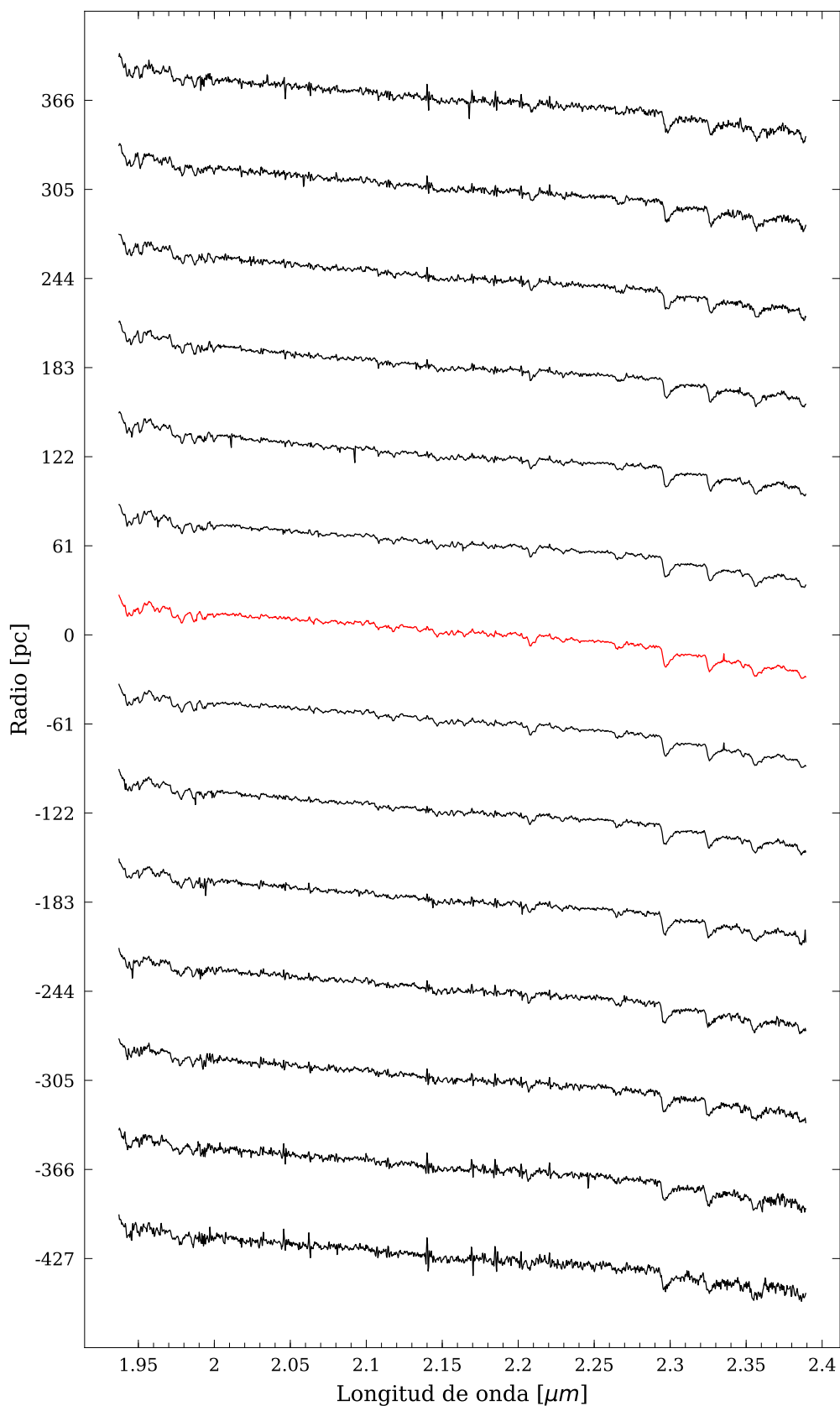


Figura 6.9: Espectros de NGC 134 para todos los radios donde hemos realizado extracciones. En rojo se marca el espectro nuclear. Notar que la pendiente del continuo permanece constante para todos los radios, descartando la posibilidad de detectar un exceso infrarrojo originado en polvo caliente.

6 Caracterización de núcleos oscurecidos

Para estimar la incerteza en las velocidades radiales se midieron las velocidades de líneas de cielo conocidas a lo largo de la ranura. La variación de las velocidades resultó inferior a 2.8 km s^{-1} ; aún así, para las barras de error de los paneles superiores de la Fig. 6.10 se adoptó un valor conservador de 3 km s^{-1} . Esto es comparable a los valores calculados en Gaspar, R. J. Díaz, Günthardt et al. (2012) para la incerteza en la medición de velocidad para una línea de alta S/N con espectros de Flamingos-2.

Las incertezas para los $FWHM$ de las líneas fueron calculadas en bins de radios de ~ 40 pc a partir de medir 10 veces cada $FWHM$ para ambas líneas y luego calcular la desviación estándar de las mismas. Esto cuantifica el error de medición que es el error dominante en éste parámetro.

Las barras de error en la dirección X corresponden al ancho de extracción para cada espectro (8.2 pc).

En la Fig. 6.11 se presenta un diagrama de diagnóstico para el mecanismo dominante en la excitación del Hidrógeno Molecular para NGC 4945. La construcción y los fundamentos del se detallan en la Sec. 5.3.3. Resumidamente, el diagrama utiliza cuatro líneas de Hidrógeno molecular ($1 - 0S(2) \lambda 2.03 \mu\text{m}$, $1 - 0S(0) \lambda 2.22 \mu\text{m}$, $1 - 0S(1) \lambda 2.12 \mu\text{m}$ y $2 - 1S(1) \lambda 2.25 \mu\text{m}$) cuyos cocientes son indicadores del mecanismo predominante de excitación de dichas líneas, el cual puede ser térmico (debido a choques o radiación UV o X) o no-térmico (debido a fluorescencia UV); ambos casos podrían también darse simultáneamente. Otros autores han presentado diagramas de diagnóstico similares para NGC 4945 en (por ejemplo, Moorwood y Oliva (1990)). La novedad del diagrama que presentamos en la Fig. 6.11 reside en que gracias a la alta resolución espacial de nuestros datos, hemos logrado colocar en el diagrama los cocientes de líneas para varios puntos en radios separados por 24.6 pc, desde 0 a ~ 200 pc en las dos direcciones respecto del centro de la ranura (barra lateral con código de color). Se observa que todos los puntos caen en el régimen de la excitación térmica con una suave pero notoria dependencia con el radio. Esto es, a medida que el radio crece, el cociente cae cada vez más cerca de la región de excitación por fluorescencia UV. Esto no significa necesariamente que en las regiones más externas haya más fotones UV causando fluorescencia, sino que, asumiendo un gradiente de densidad desde las regiones más externas a las más internas, estos fotones tendrán menor camino libre medio dentro del disco de polvo y H_2 debido a la alta profundidad óptica del medio, causando así menos excitación por fotones UV a medida que el radio decrece. Entonces, el H_2 en la región mapeada por el diagrama $r \sim 200$ pc estaría siendo excitado por una mezcla de choques entre partículas y fluorescencia UV. En este escenario, la fuente de fotones UV que causan

6 Caracterización de núcleos oscurecidos

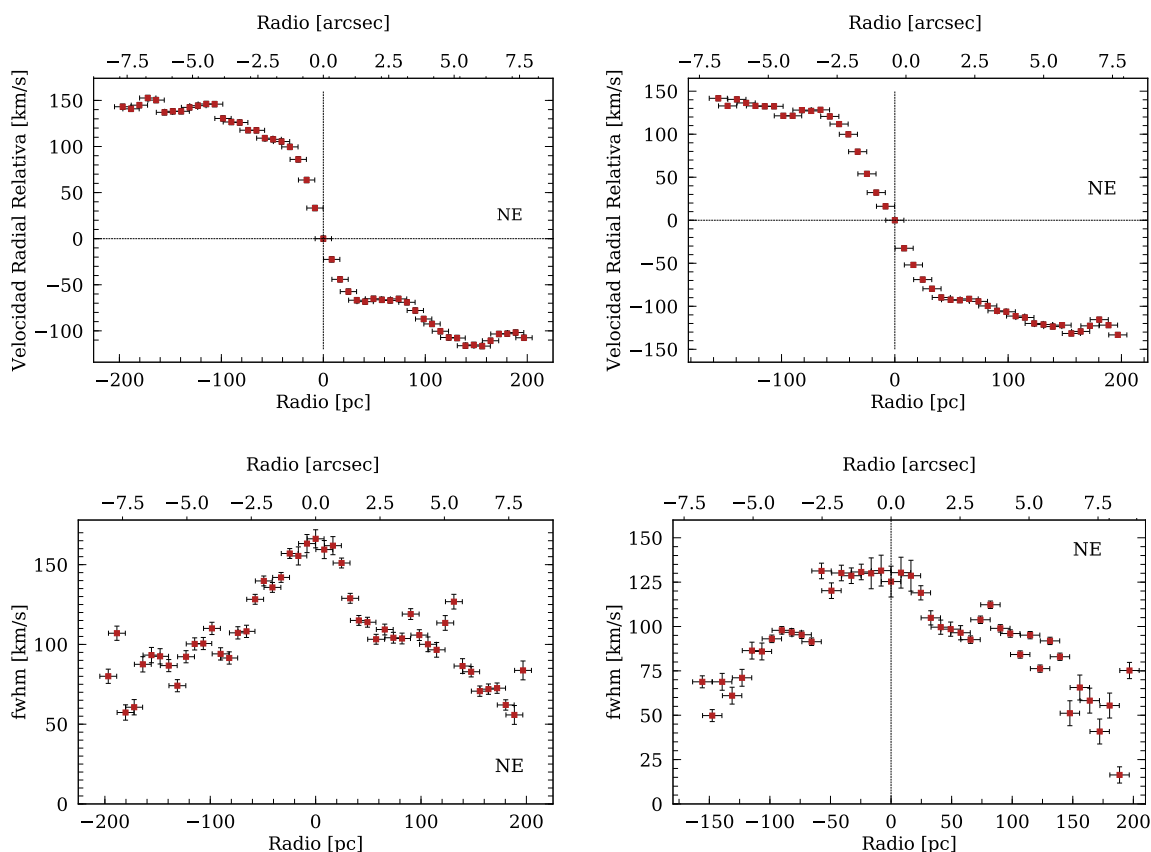


Figura 6.10: Curvas de velocidad radial y $FWHM$ obtenidas para NGC 4945. Panel superior izquierdo: curva de velocidad radial obtenida a partir de la línea $H_2 \lambda 2.1211$. La curva muestra un claro patrón de rotación en torno a un objeto masivo en el centro. Esta curva fue utilizada para estimar la masa encerrada en $r = 8.2 \pm 4.1$ pc. Panel superior derecho: curva de velocidad radial obtenida a partir de la línea $Br\gamma \lambda 2.1654$. La diferencia en pendiente respecto de la curva para el Hidrógeno molecular se debe a la mayor turbulencia que presenta el hidrógeno ionizado. En los paneles inferiores se presentan los $FWHM$ de ambas líneas (izquierdo, H_2 , derecho $Br\gamma$). La curva para el gas ionizado se corta para radios chicos debido a la disminución de la S/N de la línea en las regiones nucleares.

la fluorescencia serían jóvenes regiones de formación estelar (Falcón-Barroso et al., 2014).

6.3.4. Masa del agujero negro central de NGC 4945

Como se comentó en la sección anterior, el Hidrógeno molecular es una fase del Hidrógeno relativamente más fría respecto del Hidrógeno ionizado, por lo tanto presenta menor turbulencia y se encuentra confinado a bajas latitudes galácticas. Esto hace a las líneas de H_2 las trazadoras por excelencia del potencial gravitacional que

6 Caracterización de núcleos oscurecidos

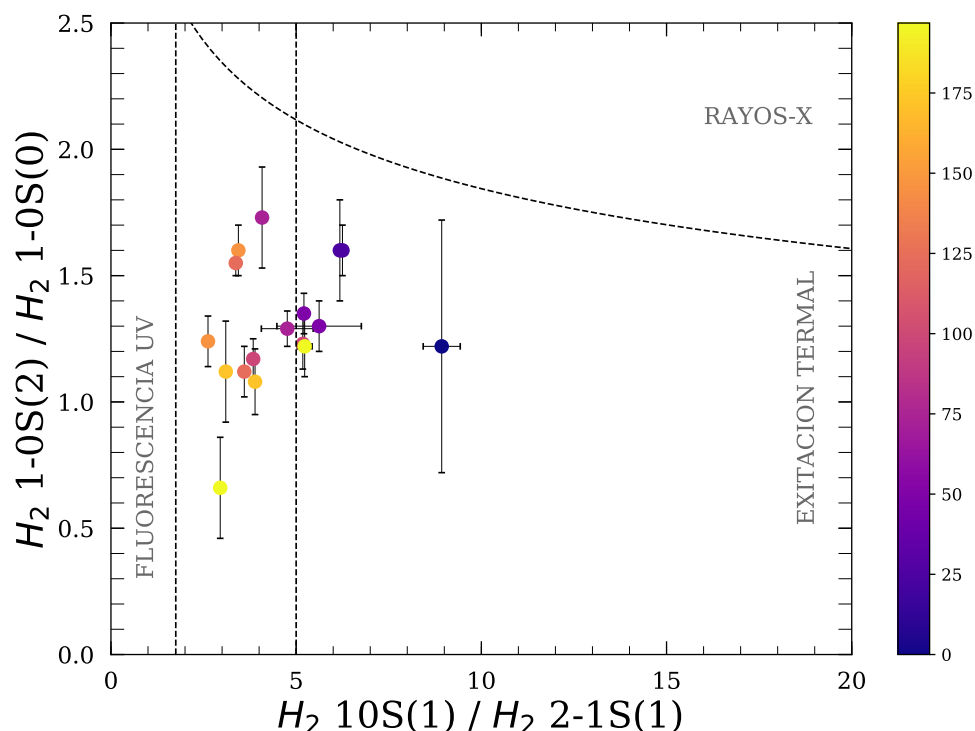


Figura 6.11: Diagrama de diagnóstico para NGC 4945 obtenido a partir de cocientes de líneas de Hidrógeno molecular, las líneas de trazo separan las regiones donde dominan distintos mecanismos de excitación. El mapa de color indica el radio. Se puede ver que para esta galaxia todos los puntos caen sobre la región de excitación térmal por colisiones, sin embargo para radios externos los puntos se acercan a la región de excitación por fluorescencia de fotones UV. Ver el texto para más detalle.

domina su rotación y por lo tanto pueden ser usadas para medir la masa del material que genera dicho potencial. Bajo esta hipótesis, utilizamos la curva de velocidad radial del H_2 presentada en la Fig. 6.10 para medir la masa del ANSM y el material circundante dentro de un radio determinado. En particular, para NGC 4945 hemos logrado mapear la curva de velocidad radial con una resolución de 8.2 pc. Es decir que esta curva nos permite estimar la masa encerrada dentro de un radio de 8.2 ± 4.1 pc. Utilizando la expresión presentada en la Sec. 5.3.4 se calculó una cota superior para la masa del ANSM de:

$$(M_{ANSM}/M_{\odot})^{sup} = (1.2 \pm_{0.6}^{0.3}) \times 10^7 \quad (6.1)$$

La incerteza fue calculada a partir de analizar la variación de la masa barriendo el rango de incertezas en los tres parámetros involucrados: el valor absoluto de la

6 Caracterización de núcleos oscurecidos

diferencia en velocidad radial, con una incerteza de 6 kms^{-1} , la incerteza de 2° para la inclinación y la incerteza de 8.2 pc en la determinación del diámetro dado el ancho de las extracciones. Teniendo en cuenta esto, se tiene que la incerteza generada por la velocidad es del 22 % tanto en el valor superior como en el inferior, la generada por la inclinación es de 1 % también en ambos extremos y la incorporada por la incerteza en el radio es del 5 % para el extremo superior y del 50 % para el extremo inferior. Por lo tanto se adoptó la incerteza incorporada por la determinación del radio para el extremo inferior y la generada por la incerteza en velocidad radial para el extremo superior, resultando en una incerteza total del 72 % para el valor de la masa.

En la literatura, la masa más citada para éste ANSM es de $\sim 1.4 \times 10^6 M_\odot$ dentro de un radio de 0.7 pc. Fue calculada por Greenhill, Moran y Herrnstein (1997) a partir del maser de H_2O que reside en el núcleo de NGC 4935, el cual midió a partir de observaciones con el *Very Long Baseline Array* de NRAO. Según esta medición el ANSM el radio de Eddington de ~ 0.1 pc. Y el radio de sublimación del polvo es también ~ 0.1 pc (Masini et al., 2016).

El valor presentado por Greenhill, Moran y Herrnstein es significativamente menor que el obtenido a partir de nuestra curva de rotación, y pone a éste ANSM en el régimen de baja masa, lo cual es totalmente esperable dada la baja relevancia de la actividad nuclear en los espectros e imágenes de esta galaxia, tal como se describió en las secciones anteriores. Por lo tanto, nuestra masa de $(1.2 \pm 0.6) \times 10^7 M_\odot$ corresponde a la suma de la masa del ANSM y la masa del material circundante dentro de un radio de 8.2 ± 4.1 pc.

Tomando la medición de Greenhill, Moran y Herrnstein dentro de los 0.7 pc centrales y restándola a nuestra medición resulta en una masa de $\sim 1.06 \times 10^7 M_\odot$ entre dicho radio y nuestros 8.2 pc de radio donde hemos realizado la medición.

Esta masa incluye todas las componentes que se pueden encontrar en una región circumnuclear, en particular en éste caso, una parte del *starburst* nuclear más el polvo generado por el mismo y las componentes gaseosas. Este material es susceptible de caer al ANSM en un tiempo menor a 10^8 años (Storchi-Bergmann y Schnorr-Müller, 2019), lo que lo convertirá en un ANSM de masa intermedia en el corto plazo. Reservorios de material de éste tamaño han sido encontrados en otros núcleos activos (Viviana Casasola et al. (2015), F. Combes, S. García-Burillo, V. Casasola, L. K. Hunt et al. (2014), Schinnerer et al. (2000)).

La Fig. 6.12 muestra un diagrama M_{ANSM} vs. σ (Masa del ANSM central vs. dispersión de velocidades de las estrellas del bulbo) extraído de Wandel (2001). Los dos ajustes

6 Caracterización de núcleos oscurecidos

corresponden a Gebhardt et al. (2000) (línea de trazos) y Ferrarese y Merritt (2000) (línea punteada). Hemos marcado la posición que NGC 4945 ocupa en el diagrama con un asterisco rojo, ya que la dispersión de velocidades de su bulbo es de $(118 \pm 18) \text{ km s}^{-1}$ (Referencia extraída de Davis, Graham y Françoise Combes (2019), extraída de *HyperLeda*¹). Este núcleo se encuentra actualmente fuera de la relación M_{ANSM} vs. σ pero con el crecimiento del orden de $10^7 M_{\odot}$ esperado a partir de la acreción de la masa que ya se encuentra circundando el ANSM, el punto que ocupa en el diagrama se movería hasta quedar en la región descrita por la relación.

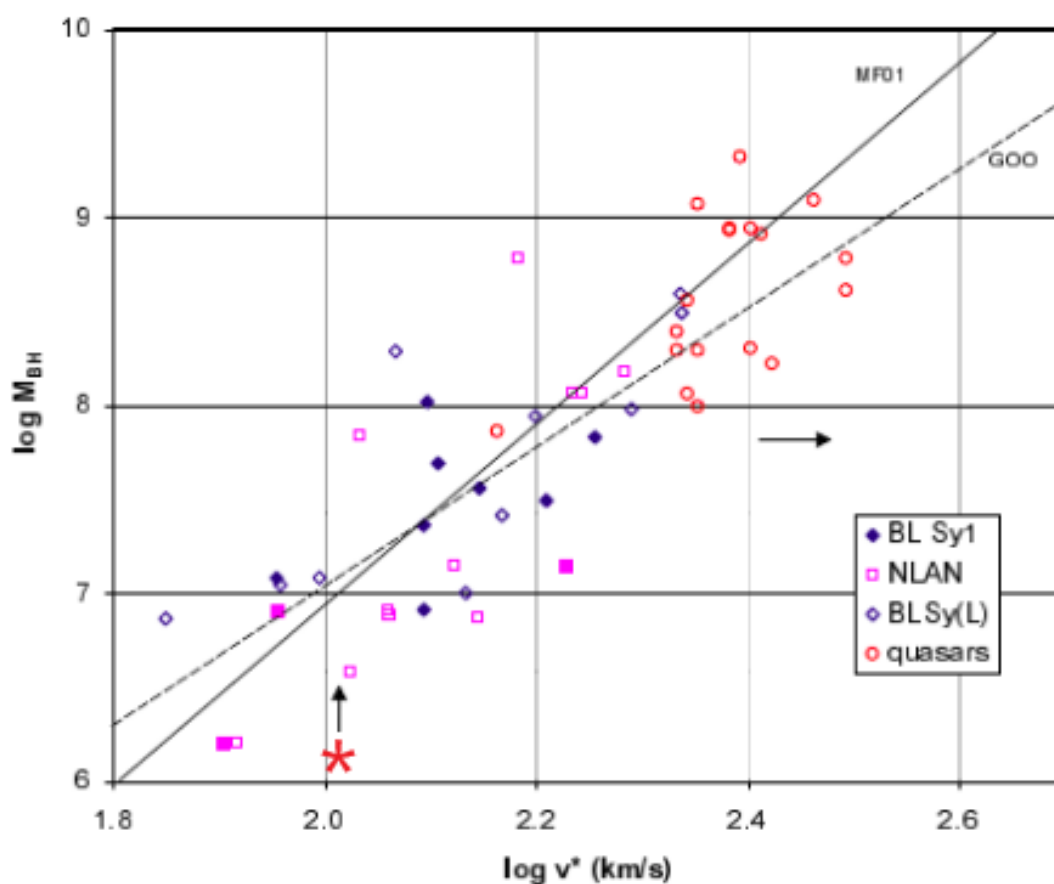


Figura 6.12: Relación $M_{\text{ANSM}} - \sigma$. La figura fue extraída de Wandel (2001) y muestra dos ajustes para esta relación (ver texto). Con un asterisco rojo abajo a la izquierda se marca la posición que ocupa NGC 4945 en el diagrama. La flecha indica la dirección en la que se moverá en menos de 10^8 años, una vez que haya acrecido la masa de $\sim 10^7 M_{\odot}$ que se encuentra ya muy cerca del ANSM, dentro de un radio de 8.2 ± 4.1 pc.

¹<http://leda.univ-lyon1.fr/>

6.3.5. Perfiles Espaciales

Se extrajeron los perfiles espaciales de intensidad vs. radio a lo largo de la ranura para las tres galaxias de la muestra. En la Fig. 6.13 se presentan los 10'' centrales para cada una. Mientras que los perfiles para NGC 5643 y NGC 134 son suaves, sin estructura, para NGC 4945 se ven depresiones y máximos locales que indican que la morfología de la región central aún en esta longitud de onda se encuentra afectada en su apariencia por efecto del polvo. Esto hace que el ajuste de sus componentes sea complejo por lo que dejaremos éste perfil y los de NGC 5643 y NGC 134 para ser ajustados en otro trabajo. Sin embargo, aunque no es mostrado aquí, hemos ajustado los perfiles de las últimas dos galaxias con tres componentes (una *gaussiana* nuclear, un disco externo y una componente con índice de Sérsic $n < 1$), las cuales no muestran descentrados entre las componentes.

6.3.6. Imágenes en banda K

En la Figura 6.14 se muestra la imagen composición JHK (en código de color RGB) obtenida a partir de nuestras observaciones (el mapa de color fue cortesía de Mischa Schirmer). El círculo delimita el campo de Flamingos-2 de 6' de diámetro que a la distancia de NGC 4945 (4.7 Mpc) corresponde a 8.2 kpc. El PA de la ranura con la que se tomaron los espectros es 43° (ver Fig. 6.2). A esta escala se observan varios complejos de bandas de polvo que rodean el núcleo y en particular una de ellas, hacia el SO, parece llegar directo al núcleo. Para ver imágenes de la región nuclear de NGC 4945 tomadas con *NICMOS/HST* ver, por ejemplo, Marconi et al. (2000).

En la Figura 6.15 se muestra un zoom de $\sim 2' \times 2'$, es decir $\sim 2.7 \times 2.7$ kpc, de la región nuclear donde a simple vista ya se puede apreciar la gran luminosidad del núcleo y la gran cantidad de polvo que lo rodea. En la parte superior del núcleo (en la dirección NO) se observa como el cono de ionización posiblemente ha barrido las trazas de polvo. El cono de gas ionizado ha sido atribuido al *starburst* y no al AGN, debido a la ausencia de la línea de emisión del [OIII] (Moorwood, van der Werf et al., 1996), estos autores proponen también que grandes cantidades de H_2 residen en las paredes del cono a partir de una imagen tomada en la línea $\lambda 2.1211 \mu\text{m}$.

En una escala de $\sim 15''$ o ~ 340 pc se puede ver la estructura de polvo y gas molecular que rodea al núcleo, esta estructura es la que alberga el *starburst* que domina la emisión nuclear y parece ser aproximadamente coplanar con el disco de la galaxia. Prominentes bandas de polvo llegan al núcleo desde el kpc central y desde varias

6 Caracterización de núcleos oscurecidos

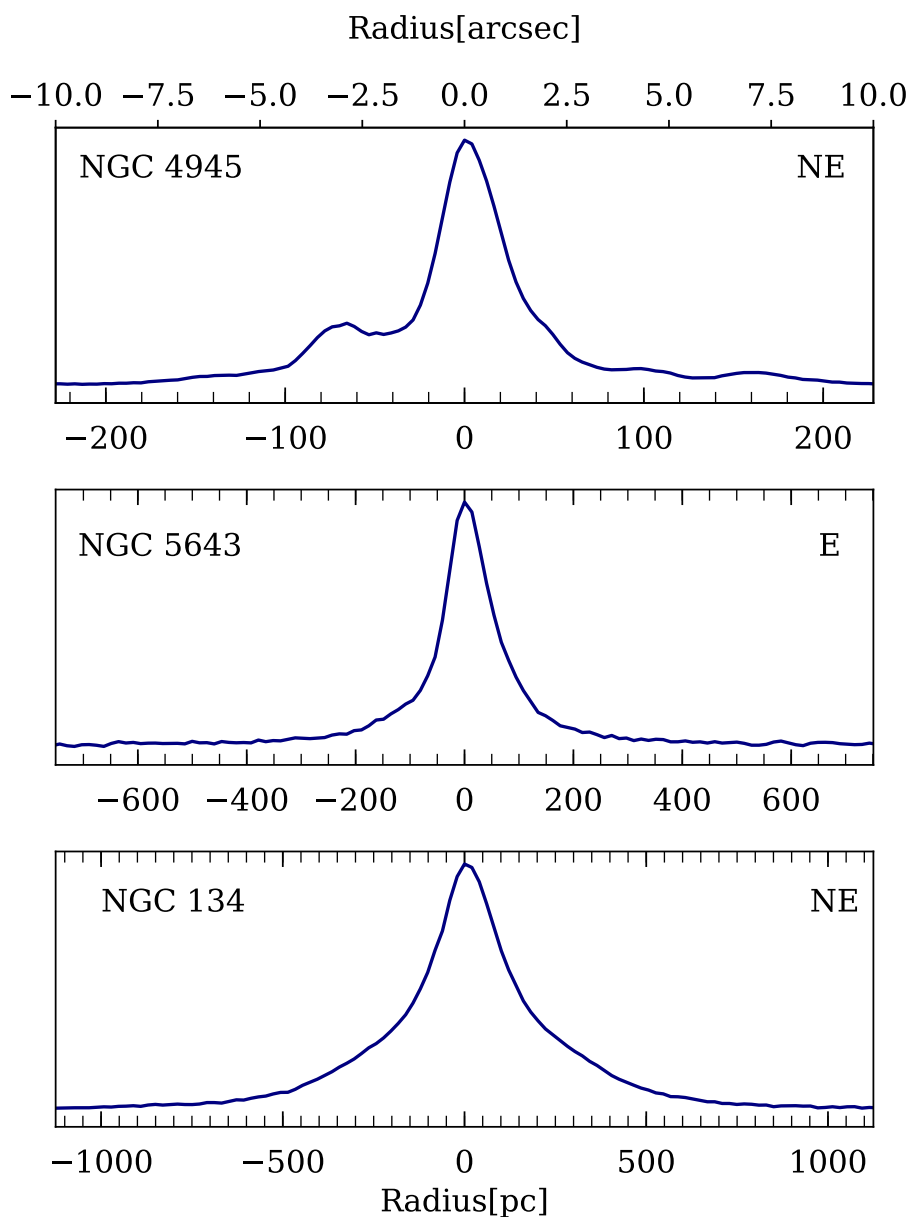


Figura 6.13: Perfiles espaciales en banda K_{long} para los 10" centrales de las tres galaxias de la muestra.

direcciones. Las bandas de polvo o estructuras nucleares como espirales de polvo o mini-barras son comunes en los núcleos galácticos activos (por ejemplo, F. Combes, S. García-Burillo, V. Casasola, L. Hunt et al. (2013), F. Combes, S. García-Burillo, V. Casasola, L. K. Hunt et al. (2014), S. García-Burillo, F. Combes, Usero et al. (2014), Pogge y Paul Martini (2002)) y han sido propuestas como uno de los mecanismos que transporta material desde escalas del kpc a escalas de las decenas de pc. Por ejemplo, Simoes Lopes et al. (2007) encuentran una fuerte correlación entre la presencia de

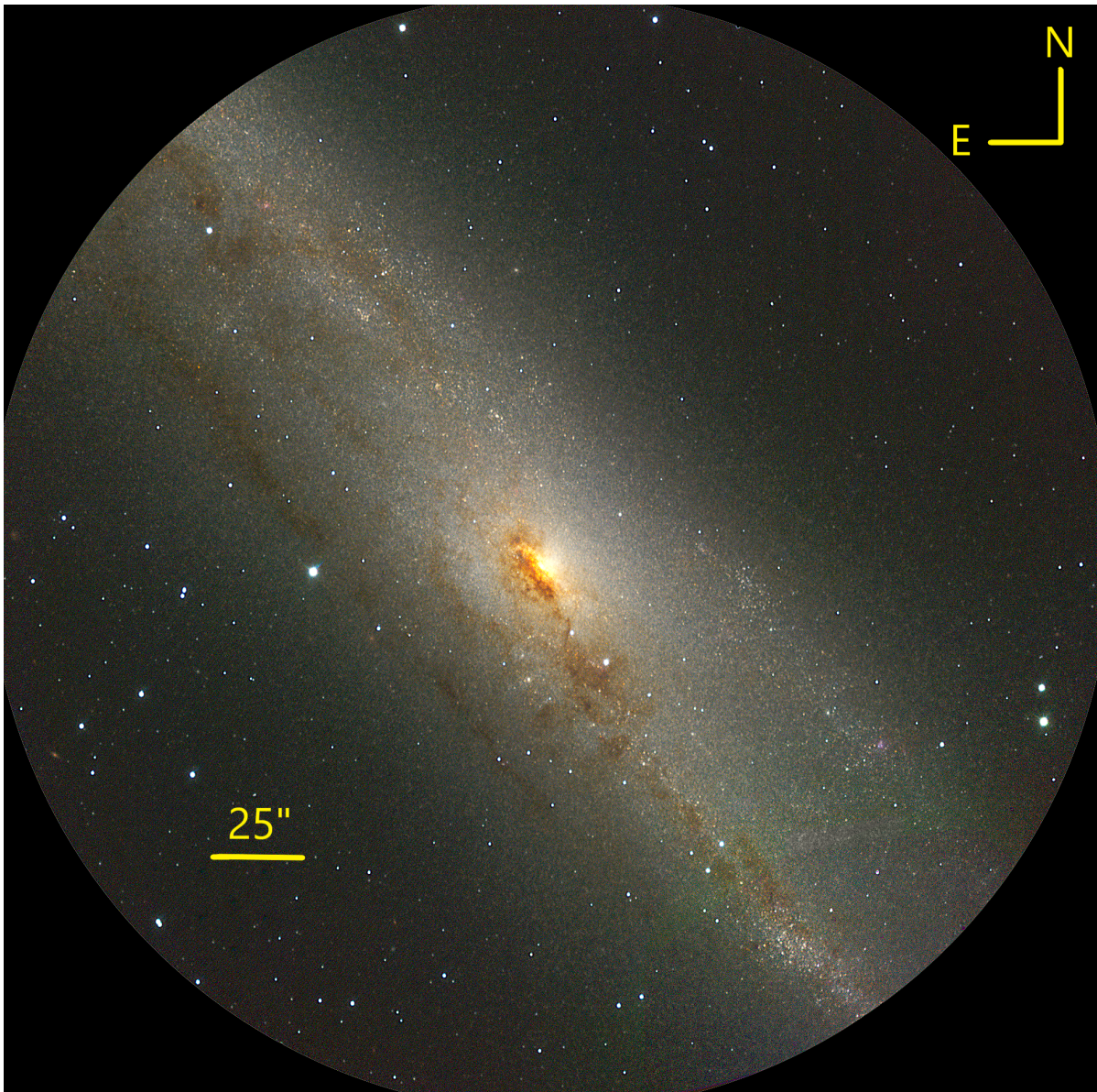


Figura 6.14: Imagen composición JHK_s tomada con Flamingos-2. El círculo delimita el campo del espectrógrafo, de $6'$ de diámetro. Notar las prominentes bandas de polvo que aún persisten en estas bandas infrarrojas. Cortesía de Mischa Schrimmer

estructuras nucleares de polvo y la actividad nuclear en una muestra de galaxias de tipo temprano. Este núcleo podría ser un candidato a poseer un *starburst* en un anillo nuclear producido por la acumulación de gas en la resonancia de Lindblad interna (ver por ejemplo Van Der Laan et al. (2012) y E. O. Schmidt et al. (2019)) dada la escala a la que se observa el disco de polvo que rodea al núcleo.

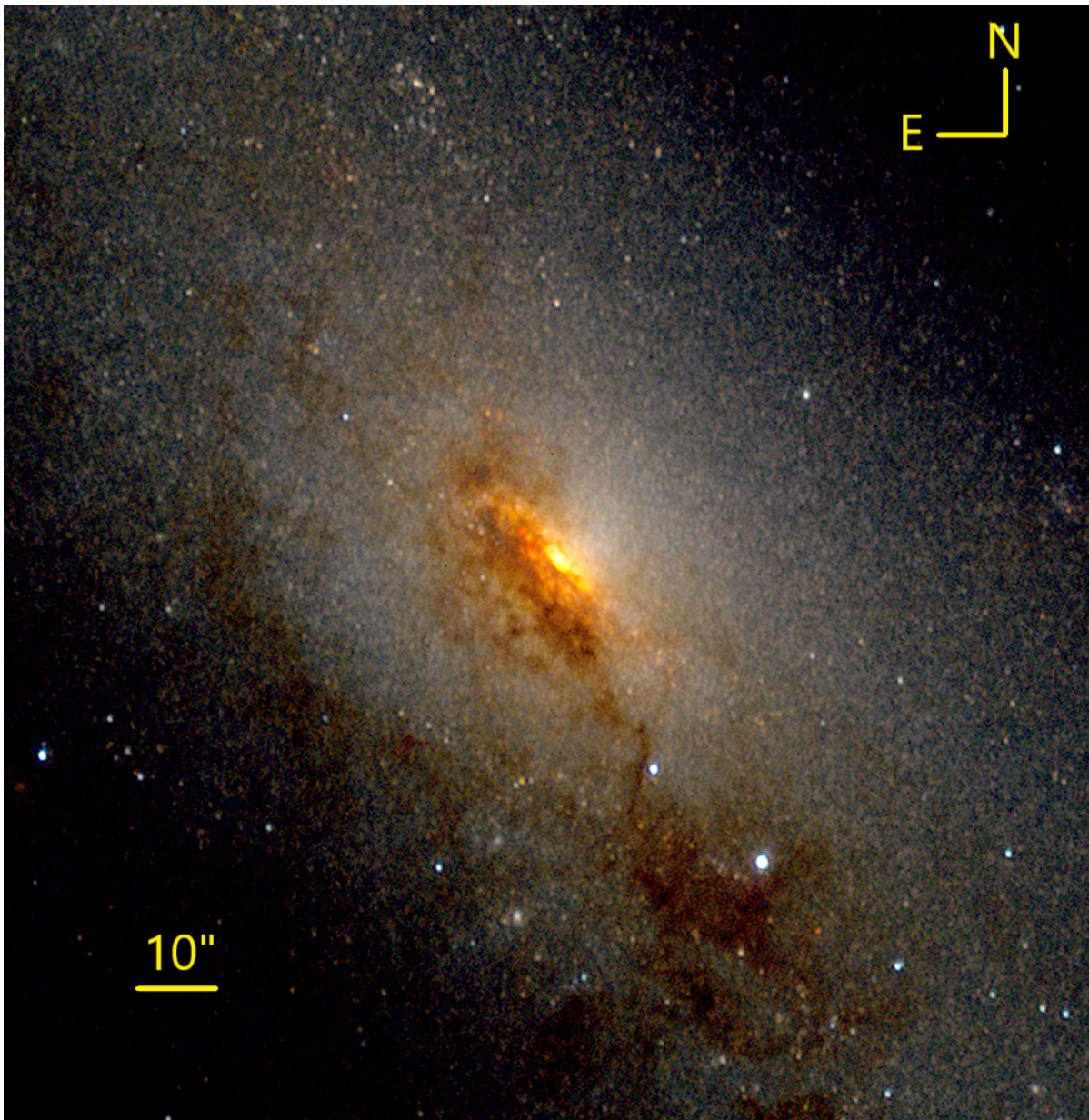


Figura 6.15: Zoom de la Figura 6.14. Se distinguen con gran detalle los filamentos de polvo que ingresan a la región circumnuclear, concentrándose mayormente en la región del plano galáctico. También se intuye el cono de ionización hacia la región noroeste que ha barrido el polvo de esa región. La estructura compacta que rodea al núcleo es el disco de polvo y gas que contiene el *starburst* nuclear.

6.4. Resumen

En este capítulo hemos presentado y analizado observaciones de tres galaxias: NGC 4945, NGC 5643 y NGC 134, tomadas con el espectrógrafo Flamingos-2 en banda K_{long} ($1.9 - 2.5\mu m$) en modo imagen y espectroscópico. En particular, esto nos permitió

penetrar el polvo y poder estudiar en detalle el núcleo de NGC 4945, un AGN fuertemente oscurecido que en el óptico no presenta actividad de tipo *Seyfert*. Nuestros espectros no muestran ninguna característica de emisión de éste tipo, probablemente debido a que incluso en esta banda el núcleo sigue estando oscurecido y a la presencia de un *starburst* nuclear que domina fuertemente el espectro nuclear y circumnuclear dentro de los 200 pc de diámetro y que ha sido ampliamente estudiado por otros autores.

Hemos podido determinar una temperatura de 1000 – 1100 K para el polvo confinado dentro de 200 pc, el cual probablemente está asociado espacialmente a la región que ocupa el *starburst* nuclear. Sin embargo la temperatura a la que se encuentra indica que debe estar siendo calentado por fotones UV provenientes del ANSM que reside en el núcleo de NGC 4945.

A partir de las curvas de velocidad radial y los *FWHM* de las líneas de Hidrógeno hemos propuesto un escenario en el que el Hidrógeno molecular se encuentra en un disco rotante, confinado al plano de la galaxia y con poca turbulencia mientras que el Hidrógeno ionizado medido a partir de la línea de recombinación $Br\gamma$ se encuentra en un estado más turbulento y ocupando un volumen más expandido respecto del disco galáctico. Bajo esta hipótesis, hemos utilizado la curva de velocidades radiales del H_2 para medir la masa dentro del menor radio resuelto, equivalente a (8.4 ± 4.1) pc. La masa calculada es de $(1.2 \pm_{0.6}^{0.3}) \times 10^7 M_\odot$ y hemos propuesto que la misma consiste en una suma entre la masa del ANSM medida en $\sim 1.4 \times 10^6 M_\odot$ por Greenhill, Moran y Herrnstein (1997) y la masa que rodea al ANSM que incluye parte del *starburst*, gas y polvo y que será acretaada por el ANSM en un tiempo menor a 10^8 años. Además, a partir de un diagrama de diagnóstico, hemos determinado que la excitación del H_2 se debe principalmente a mecanismos térmicos como *shocks* y absorción de radiación UV y X con una contribución creciente hacia radios externos de fluorescencia UV, donde los fotones UV serían producidos en complejos de formación estelar embebidos en el disco de polvo y H_2 .

Finalmente, presentamos una imagen en banda K_s de $0''.47$ (~ 11 pc) de resolución espacial donde se aprecian en detalle las bandas de polvo que posiblemente están alimentando el *starburst* y la actividad nuclear así como también el cono de ionización que ha sido relacionado con el *starburst* por otros autores.

El tipo de actividad dominante en NGC 4945 ha sido ampliamente discutido a lo largo de las últimas 4 décadas. La actividad nuclear tipo *Seyfert* es indiscutible a partir de la emisión X presentada por varios autores, sin embargo en otras bandas su actividad nuclear es menos obvia. Nuestras observaciones en el infrarrojo cercano apuntan a un

6 Caracterización de núcleos oscurecidos

escenario donde los efectos de la actividad nuclear tipo *Seyfert* se extiende al menos hasta un radio de ~ 100 pc, en forma de polvo calentado por fotones UV duros. La coexistencia entre el polvo caliente y el *starburst* nuclear, plantea el interrogante sobre la posible causalidad entre la presencia de radiación UV a escalas tan extendidas y el disparo de la formación estelar.

7 Conclusiones

Hemos caracterizado 20 núcleos activos mediante las técnicas de espectroscopia y análisis de imágenes en el NIR, principalmente en la banda K . A partir de datos de dos espectrógrafos: Flamingos-2 y GNIRS, ambos ubicados en los telescopios Gemini (Sur y Norte, respectivamente).

Como hemos establecido previamente, la banda K es ideal para estudiar núcleos galácticos ya que éstos constituyen los lugares más extinguidos de las galaxias (pudiendo alcanzar extinciones de $A_V \geq 3$ mag, Goulding y Alexander, 2009). En esta banda infrarroja desaparecen casi completamente dos elementos que dificultan los estudios estructurales de los núcleos: la contribución a la emisión de las estrellas jóvenes y las prominentes bandas de polvo que oscurecen las regiones centrales.

A partir de relevamientos infrarrojos (como 2MASS, WISE, etc) y de facilidades espaciales como Spitzer y HST, se han realizado grandes avances en el estudio de los núcleos galácticos en el NIR; sin embargo, la combinación de espectroscopia de resolución espectral media y la alta resolución espacial que presentan los espectrógrafos de los telescopios Gemini gracias a su gran área colectora, hacen de los espectros presentados en esta tesis herramientas únicas para éste tipo de trabajo. Notar por ejemplo la capacidad de resolución del diagrama de diagnóstico presentado en la Fig. 6.11 o en las curvas de velocidad de las Fig. 5.7 y 6.10.

Esta capacidad de resolución espacial nos ha dado también la posibilidad de detectar polvo caliente en los núcleos de 16 galaxias de manera resuelta hasta radios mucho más extendidos de lo esperado para las temperaturas encontradas:

Para 14 de las 16 galaxias de la muestra estudiada con espectros de GNIRS en el Capítulo 3, hemos encontrado excesos de emisión en $2.247 - 2.254 \mu\text{m}$ respecto de la emisión en $2.097 - 2.104 \mu\text{m}$. Los mismos corresponden al "bulto" que se encuentra en el NIR para los AGNs y que tiene su origen en polvo calentado a temperaturas de $800 - 1500$ K (ver Sec. 1.3). En 12 de las 14 galaxias este exceso es espacialmente resuelto, es decir que su tamaño es real y no está limitado por *seeing*. También hemos

7 Conclusiones

encontrado excesos infrarrojos con extensiones que varían entre 53 y 385 pc (es decir, radios de entre ~ 25 y 200 pc).

Resultados similares fueron obtenidos para NGC 6300 y NGC 4945 a partir de espectros tomados con *Flamingos-2*. En NGC 6300 identificamos polvo con una temperatura de 1255 K en el espectro nuclear (que cubre un radio de hasta 13.5 pc) y polvo con una temperatura de 1225 K un poco más extendido, hasta 27 ± 13.5 pc. Para NGC 4945 pudimos mapear la temperatura del polvo hasta un radio de ~ 100 pc, encontrando una temperatura aproximadamente constante de 1000 – 1100 K. Esta región coincide espacialmente con un intenso *starburst* que alberga en el núcleo; sin embargo, las altas temperaturas del polvo mostraron que el mismo está siendo calentado por fotones producidos en el ANSM y no en la formación estelar.

Todos estos resultados indican que el polvo calentado por un ANSM activo puede extenderse a radios tan grandes como 200 pc.

En la literatura se han propuesto diversos modelos para explicar la emisión proveniente de los AGN. Respecto de la distribución del polvo que oscurece la fuente central se pueden mencionar tres grandes grupos: los toroides homogéneos (por ejemplo Fritz, Franceschini y Hatziminaoglou, 2006), los toroides de tipo grumoso (por ejemplo M. Nenkova et al., 2008) y un nuevo tipo de distribución de polvo que incluye básicamente un toroide grumoso y una componente de polvo polar en forma de vientos (Sebastian F. Hönig y Makoto Kishimoto, 2017). Ninguno de estos modelos, como es previsible, es capaz de reproducir todas las observaciones. El toroide homogéneo original es incapaz de modelar las variabilidades observadas en los AGNs (por ejemplo, Elvis et al., 2004, Puccetti, Fiore et al., 2007, Grupe et al., 2019), ni la componente de polvo polar detectada en la última década mediante observaciones en el MIR (Asmus, S. F. Hönig y Gandhi, 2016, entre otros). Los toroides grumosos resuelven el asunto de la variabilidad pero no logran explicar la componente polar. El modelo de Sebastian F. Hönig y Makoto Kishimoto (2017) incorpora la componente polar pero no es capaz de reproducir el polvo caliente extendido. Por otro lado, el polvo en la dirección polar no parece ser algo general, sino que Asmus, S. F. Hönig y Gandhi (2016) en un estudio estadístico, la encontraron en sólo un 12% de las galaxias.

Por otro lado, las extensiones de las estructuras de polvo reportadas en la literatura que han sido atribuidas a toroides varían entre escalas de los 0.1 pc M. Kishimoto, S. F. Hönig, R. Antonucci, Kotani et al. (2009) a escalas de los 528 pc (Carilli et al., 2019).

7 Conclusiones

Por lo tanto entendemos que los modelos de distribución de polvo en los AGNs son variados y aún no hay uno que logre reproducir todas las observaciones, en Leonard Burtscher et al. (2016) se puede ver un buen resumen de la variedad de observaciones diferentes en los rangos del NIR, MIR y sub-mm. Lo que si es claro es que el término "toroide" ya no ajusta a la diversidad de estructuras encontradas.

El polvo que hemos encontrado en este trabajo se extiende hasta radios de ~ 200 pc y sin embargo las temperaturas de $\sim 1000 - 1250$ K encontradas para NGC 6300 y NGC 4945 requieren que el mismo sea calentado por fotones UV duros provenientes del ANSM nuclear. Para las 12 galaxias observadas con GNIRS que presentan el exceso en el extremo rojo de la banda K_{long} la evidencia de que se trata de polvo calentado por un ANSM nuclear proviene de dos hechos: que el exceso se produce en el NIR y que haya una correlación entre los dos anchos medidos indicaría que la fuente que produce el calentamiento está en el centro del exceso.

La única manera de que los fotones UV necesarios para calentar el polvo a esta temperatura recorran el camino desde el disco de acreción del ANSM hasta un radio ≤ 200 pc es que la estructura de polvo sea de tipo grumoso. A pesar de que cada nube de polvo será ópticamente gruesa, los fotones aún pueden viajar libremente entre las nubes si logran evitarlas (M. Nenkova et al., 2008). Entonces será necesario que el factor de llenado del disco de polvo sea chico ($\ll 1$). Mediante interferometría en banda K, Gravity Collaboration et al. (2020) han logrado observar una estructura de este tipo en el núcleo de la galaxia *Seyfert 2* NGC 1068 (ver Fig. 1.3). Esta imagen muestra una estructura grumosa con grumos muy separados entre sí. Notar que en esta banda solo se pueden ver los grumos calentados a temperaturas de $\sim 800 - 1500$ K; si hubiera regiones más escudadas, y por lo tanto más frías, no serían detectables en esa banda. A pesar del hecho de que con esta técnica solo pueden ser observados campos muy pequeños (de 5×5 pc en éste caso), se puede ver como los grumos continúan hasta el borde de la imagen, sugiriendo que la estructura es de mayor tamaño. Un modelo para el polvo que contempla la presencia de agujeros suficientes para que los fotones UV alcancen grandes extensiones fue propuesto por Marshall et al. (2018) para las galaxias Ultra Luminosas en el IR (ULIRGS).

Para el caso de NGC 4945, en la estructura de polvo que rodea el ANSM y que es calentada por el mismo hasta ~ 100 pc, debe ser capaz de coexistir con el *starburst* ampliamente reportado en la literatura que se encuentra confinado también en un radio de ~ 100 pc. Esto sería posible si algunas líneas de visión a través de la estructura de polvo se encuentran fuertemente escudadas de la radiación UV tal que las nubes de polvo molecular puedan subsistir y formar estrellas. Entonces, este

7 Conclusiones

disco de polvo no solo debe tener suficientes "agujeros" entre las nubes de polvo sino que el factor de llenado del mismo debe admitir la suficiente inhomogeneidad como para que algunas líneas de visión al centro estén relativamente libres de polvo y otras estén fuertemente oscurecidas y por lo tanto más frías. Grandes cantidades de polvo tibio detectado en el MIR han sido reportadas en el mismo espacio ocupado por el *starburst* y el polvo calentado por el AGN (Brock et al., 1988, Mouri, 1994), evidenciando la coexistencia de polvo calentado a distintas temperaturas en una misma región espacial. Podría ser la presión de la radiación UV dura proveniente del disco de acreción del AGN un mecanismo de disparo para la actividad *starburst* ? Que cantidad de polvo es acretado a través de bandas de polvo y que cantidad es generada por el *starburst* ? Sin dudas, el estudio multibanda de éste emblemático núcleo puede llevar a pistas sobre la conexión AGN-*starburst* .

Respecto del mecanismo de alimentación nuclear en los últimos 10 pc, hemos buscado descentrados en AGNs de distintos tipos (*Seyfert 1*, *Seyfert 2*, LINER 1 y LINER 2) con el objetivo de identificar una fase de crecimiento de los ANSM donde el mismo no se encuentra fijo en el pozo de potencial sino que oscila entorno al centro de masa global de la galaxia. Este escenario ha sido propuesto tanto numéricamente (por ejemplo Taga e Iye, 1998, Emsellem et al., 2015 y referencias adentro) como observacionalmente (por ejemplo, R. Díaz et al., 1999b, Binggeli, Barazza y Jerjen, 2000, Côté et al., 2006, F. Combes, S. García-Burillo, Audibert et al., 2019). Hemos encontrado que el 20 % de los núcleos de las galaxias de nuestra muestra se encuentran descentradas en 5 – 20 pc respecto de una estructura de mayor tamaño, con radios de escala de 0.3 – 1.5 kpc. Si bien la muestra no es estadísticamente significativa, los resultados son robustos ya que han sido limpiados de posibles falsos descentrados producidos por presencia de polvo en uno de los lados de la ranura.

Las galaxias para las que reportamos descentrados nucleares son NGC 3718, NGC 5033 y NGC 7331. Estas tres galaxias presentan masas de $\text{Log}(M/M_{\odot}) \sim 8$, es decir que se trata de ANSM de masas intermedias. El hecho de que no encontremos descentrados en los núcleos más masivos apunta en la dirección del escenario en el cual un ANSM lo suficientemente masivo ($\text{Log}(M/M_{\odot}) \sim 9 - 9.5$) se encuentra fijo en el pozo de potencial galáctico.

La causa de que no hayamos encontrado descentrados en ANSM menos masivos $\text{Log}(M/M_{\odot}) < 8$ probablemente sea que éstos no dominan la dinámica de la población estelar subyacente y, por lo tanto, es probable que no se encuentren en el pico de emisión de la banda K_{long} . Debido a esto no es posible detectar confiablemente su posición a partir de este tipo de datos.

7 Conclusiones

El hecho de que los ANSM de baja a mediana masa oscilen en torno al centro de masa del potencial galáctico en vez de estar fijos en el mismo ha sido propuesto como un mecanismo que podría causar la remoción de momento angular en el material circundante a través de la generación de potenciales no-axisimétricos (Taga e Iye, 1998, Emsellem et al., 2015, F. Combes, S. García-Burillo, Audibert et al., 2019, entre otros) y por lo tanto podría constituir el mecanismo de acreción de masa en los últimos 10 pc.

En cuanto a la técnica, hemos encontrado que es eficiente para encontrar descentrados en ANSM de masa intermedia; sin embargo, utilizada en datos de este tipo encuentra dificultades para determinar unívocamente el índice de Sérsic de la componente externa, y por lo tanto, su radio de escala. Esto no introduce incertezas en la detección de descentrados, pero sí en la descripción de las componentes estructurales de las galaxias. En el perfil ajustado para NGC 6300, a partir de un espectro tomado con Flamingos-2, el muestreo de las alas del perfil es mucho más extenso, y por lo tanto, permitió no solo ajustar la componente externa con mayor precisión sino también agregar una tercera componente en la región intermedia. Esta tercera componente es evidentemente necesaria en los ajustes de las galaxias observadas con GNIRS, pero no ha sido considerada para no aumentar los grados de libertad del ajuste.

La detección de estos tres núcleos descentrados aumenta la muestra de núcleos descentrados conocidos hasta la fecha y abre las puertas para el estudio de éste fenómeno en una muestra más grande observada en el NIR con Flamingos-2 para buscar un respaldo estadístico significativo a la tendencia encontrada en la correlación M_{ANSM} -descentrado.

A continuación se hace un resumen de todos los resultados más relevantes presentados en esta tesis:

- Se modelaron los perfiles de intensidad radial para 16 galaxias a partir de espectros observados con el instrumento GNIRS de Gemini Norte. Se encontró que el 20% de las galaxias de la muestra presenta un descentrado (5 – 20 pc) entre el núcleo y una estructura de mayor tamaño (0.3 – 1.5 kpc). Los descentrados fueron encontrados en núcleos con masas del ANSM de $\text{Log}(M/M_{\odot}) \sim 8$, lo que podría indicar que el descentrado favorece el crecimiento de los ANSM de masas bajas e intermedias a partir de la remoción del momento angular del gas circundante.
- Para NGC 6300 se modeló el perfil de intensidad radial en la banda K_s . Se encontró que la estructura que domina los 0.25 kpc centrales está compuesta

7 Conclusiones

por una gaussiana central con $FWHM = 0.07 \pm 0.01$ kpc y un disco nuclear con un radio de escala de 0.073 ± 0.005 kpc. Esta estructura presenta un descentrado de 25 pc con respecto a un disco circumnuclear que domina hasta la escala del kpc y que presenta un radio de escala de 0.60 ± 0.03 kpc. La detección de este descentrado es reforzada por la curva de velocidad circular obtenida de las líneas de H_2 de la cual hemos medido un descentrado de 55 pc entre el centro cinemático y el pico de emisión, asociado al ANSM.

- Se encontraron estructuras de polvo calentado por el AGN en 16 galaxias y con escalas entre 25 y 200 pc; sugiriendo que la radiación UV dura del AGN podría estar alcanzado escalas tan grandes como estas. Para que esto sea posible, la estructura de polvo nuclear debe ser de tipo grumoso y con un bajo factor de llenado.
- Se midieron cotas superiores para las masas de los ANSM de NGC 6300 y NGC 4945. En particular, para NGC 4945, al contar con una masa previamente medida dentro de un radio menor, se pudo estimar la masa del reservorio de gas dentro de 8.2 ± 4.1 pc. Esto nos permitió sugerir que esta galaxia, que hoy no sigue la relación $M_{ANSM} - \sigma$ podría llegar a cumplirla en un tiempo menor a 10^8 años, una vez que haya acregado el material del reservorio.
- Utilizamos diagramas de diagnósticos para las líneas de Hidrógeno molecular para las galaxias NGC 6300 y NGC 4945. En ambos casos determinamos que el mecanismo dominante de excitación de este elemento es la excitación térmica por colisión partícula-partícula o *shocks*.
- Hemos caracterizado los espectros nucleares para 3 galaxias en la banda K_{long} (NGC 4945, NGC 5643 y NGC 134) y para NGC 6300 en las bandas J y K_s .

A partir de los resultados encontrados en esta tesis surgen varios interrogantes que pueden ser explorados en un futuro mediante nuevas observaciones espectroscópicas en la banda K con Flamingos-2: es posible que las galaxias que se encuentran por debajo de la relación $M_{ANSM} - \sigma$ contengan, estadísticamente, grandes reservorios de gas susceptibles de ser acregados por el ANSM a corto plazo? Tiene ésto alguna relación con la presencia de *starburst* nucleares como en el caso de NGC 4945? La masa de un ANSM tiene alguna relación con el hecho de que el mismo se encuentre descentrado respecto del centro de masa de la galaxia huésped? Una muestra estadísticamente significativa es necesaria para explorar la tendencia que

7 Conclusiones

hemos encontrado en éste trabajo. Finalmente, a partir de la misma muestra sería interesante explorar que tan común es encontrar polvo calentado por el AGN a escalas de 10 – 200 pc y aportar más restricciones al posible modelo "Emmenthal" de un disco de polvo con agujeros tal que la radiación UV llegue a recorrer el rango de distancias encontrado. Esto podría aportar pistas a la posible relación *starburst* -AGN a partir de considerar la presión de la radiación UV proveniente del ANSM como un mecanismo de disparo para la formación estelar.

Bibliografía

- Ables, J. G. et al. (1987). «An H I study of the galaxy NGC 4945 with a two-element synthesis telescope.» En: *MNRAS* 226, págs. 157-171. DOI: [10.1093/mnras/226.1.157](https://doi.org/10.1093/mnras/226.1.157) (vid. pág. 88).
- Ackermann, M. et al. (2012). «GeV Observations of Star-forming Galaxies with the Fermi Large Area Telescope.» En: *ApJ* 755.2, 164, pág. 164. DOI: [10.1088/0004-637X/755/2/164](https://doi.org/10.1088/0004-637X/755/2/164). arXiv: [1206.1346](https://arxiv.org/abs/1206.1346) [astro-ph.HE] (vid. pág. 89).
- Alonso-Herrero, A., C. Ramos Almeida et al. (2011). «Torus and Active Galactic Nucleus Properties of Nearby Seyfert Galaxies: Results from Fitting Infrared Spectral Energy Distributions and Spectroscopy.» En: *ApJ* 736, 82, pág. 82. DOI: [10.1088/0004-637X/736/2/82](https://doi.org/10.1088/0004-637X/736/2/82). arXiv: [1105.2368](https://arxiv.org/abs/1105.2368) (vid. pág. 9).
- Alonso-Herrero, A., C. Simpson et al. (1998). «A Near-Infrared Imaging Study of Seyfert Galaxies with Extended Emission-Line Regions.» En: *ApJ* 495, págs. 196-221. DOI: [10.1086/305269](https://doi.org/10.1086/305269) (vid. págs. 15, 77).
- Alton, P. B. et al. (1998). «Resolved zoomu M images of nearby galaxies - evidence for an extended distribution of cold dust.» En: *A&A* 335, págs. 807-822 (vid. pág. 90).
- Antonucci, R. R. J. y J. S. Miller (1985). «Spectropolarimetry and the nature of NGC 1068.» En: *ApJ* 297, págs. 621-632. DOI: [10.1086/163559](https://doi.org/10.1086/163559) (vid. págs. 3, 4).
- Armus, L. et al. (2006). «Detection of the Buried Active Galactic Nucleus in NGC 6240 with the Infrared Spectrograph on the Spitzer Space Telescope.» En: *ApJ* 640.1, págs. 204-210. DOI: [10.1086/500040](https://doi.org/10.1086/500040). arXiv: [astro-ph/0511381](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0511381) [astro-ph] (vid. pág. 88).
- Asmus, D. (2019). «New evidence for the ubiquity of prominent polar dust emission in AGN on tens of parsec scales.» En: *MNRAS* 489.2, págs. 2177-2188. DOI: [10.1093/mnras/stz2289](https://doi.org/10.1093/mnras/stz2289). arXiv: [1908.03552](https://arxiv.org/abs/1908.03552) [astro-ph.GA] (vid. págs. 12, 90).
- Asmus, D., S. F. Hönig y P. Gandhi (2016). «The Subarcsecond Mid-infrared View of Local Active Galactic Nuclei. III. Polar Dust Emission.» En: *ApJ* 822.2, 109, pág. 109. DOI: [10.3847/0004-637X/822/2/109](https://doi.org/10.3847/0004-637X/822/2/109). arXiv: [1603.02710](https://arxiv.org/abs/1603.02710) [astro-ph.GA] (vid. págs. 12, 116).

Bibliografía

- Awaki, H. et al. (2005). «A Variability Study of the Seyfert 2 Galaxy NGC 6300 with XMM-Newton». En: *ApJ* 632, págs. 793-798. DOI: [10.1086/433161](https://doi.org/10.1086/433161). eprint: [astro-ph/0507469](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0507469) (vid. pág. 66).
- Baldwin, J. A., M. M. Phillips y R. Terlevich (1981). «Classification parameters for the emission-line spectra of extragalactic objects.» En: *PASP* 93, págs. 5-19. DOI: [10.1086/130766](https://doi.org/10.1086/130766) (vid. pág. 88).
- Bañados, Eduardo et al. (2018). «Chandra X-Rays from the Redshift 7.54 Quasar ULAS J1342+0928». En: *ApJ* 856.2, L25, pág. L25. DOI: [10.3847/2041-8213/aab61e](https://doi.org/10.3847/2041-8213/aab61e). arXiv: [1803.08105](https://arxiv.org/abs/1803.08105) [[astro-ph.GA](#)] (vid. pág. 1).
- Battaner, E. et al. (2003). «Axisymmetrical gas inflow in the central region of NGC 7331». En: *A&A* 401, págs. 67-71. DOI: [10.1051/0004-6361:20020997](https://doi.org/10.1051/0004-6361:20020997). arXiv: [astro-ph/0207329](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0207329) [[astro-ph](#)] (vid. pág. 52).
- Beckmann, Volker y Chris R. Shrader (2012). *Active Galactic Nuclei* (vid. págs. 1, 5).
- Beckmann, V. et al. (2009). «The second INTEGRAL AGN catalogue». En: *A&A* 505, págs. 417-439. DOI: [10.1051/0004-6361/200912111](https://doi.org/10.1051/0004-6361/200912111). arXiv: [0907.0654](https://arxiv.org/abs/0907.0654) (vid. pág. 20).
- Beifiori, A. et al. (2009). «Upper Limits on the Masses of 105 Supermassive Black Holes from Hubble Space Telescope/Space Telescope Imaging Spectrograph Archival Data». En: *ApJ* 692, págs. 856-868. DOI: [10.1088/0004-637X/692/1/856](https://doi.org/10.1088/0004-637X/692/1/856). arXiv: [0809.5103](https://arxiv.org/abs/0809.5103) (vid. pág. 82).
- Bell, Eric F. (2008). «Galaxy Bulges and their Black Holes: a Requirement for the Quenching of Star Formation». En: *ApJ* 682.1, págs. 355-360. DOI: [10.1086/589551](https://doi.org/10.1086/589551). arXiv: [0804.4001](https://arxiv.org/abs/0804.4001) [[astro-ph](#)] (vid. pág. 20).
- Bendo, G. J. et al. (2016). «Free-free and H_{42α} emission from the dusty starburst within NGC 4945 as observed by ALMA». En: *MNRAS* 463.1, págs. 252-269. DOI: [10.1093/mnras/stw1659](https://doi.org/10.1093/mnras/stw1659). arXiv: [1607.02304](https://arxiv.org/abs/1607.02304) [[astro-ph.GA](#)] (vid. pág. 99).
- Benesty, Jacob et al. (2009). «Pearson correlation coefficient». En: *Noise reduction in speech processing*. Springer, págs. 37-40 (vid. pág. 59).
- Bertoldi, F. et al. (2003). «Dust emission from the most distant quasars». En: *A&A* 406, págs. L55-L58. DOI: [10.1051/0004-6361:20030710](https://doi.org/10.1051/0004-6361:20030710). arXiv: [astro-ph/0305116](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0305116) [[astro-ph](#)] (vid. pág. 18).
- Bianchi, S. et al. (2005). «A search for changing-look AGN in the Grossan catalog». En: *A&A* 442, págs. 185-194. DOI: [10.1051/0004-6361:20053389](https://doi.org/10.1051/0004-6361:20053389). eprint: [astro-ph/0507323](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0507323) (vid. pág. 67).
- Binggeli, B., F. Barazza y H. Jerjen (2000). «Off-center nuclei in dwarf elliptical galaxies». En: *A&A* 359, págs. 447-456 (vid. págs. 25, 118).

Bibliografía

- Bower, Gary A. et al. (1993). «A Search for Dead Quasars among Nearby Luminous Galaxies. I. The Stellar Kinematics in the Nuclei of NGC 2613, NGC 4699, NGC 5746, and NGC 7331». En: *ApJ* 402, pág. 76. DOI: [10.1086/172114](https://doi.org/10.1086/172114) (vid. pág. 52).
- Brock, David et al. (1988). «Far-Infrared Observations of a Luminous Dust-shrouded Source in the Nucleus of NGC 4945». En: *ApJ* 329, pág. 208. DOI: [10.1086/166370](https://doi.org/10.1086/166370) (vid. págs. 88, 99, 118).
- Broeils, A. H. y S. Courteau (1997). «Modelling the Mass Distribution in Spiral Galaxies». En: *Dark and Visible Matter in Galaxies and Cosmological Implications*. Ed. por Massimo Persic y Paolo Salucci. Vol. 117. Astronomical Society of the Pacific Conference Series, pág. 74 (vid. pág. 38).
- Brum, Carine et al. (2017). «Dusty spirals versus gas kinematics in the inner kiloparsec of four low-luminosity active galactic nuclei». En: *MNRAS* 469.3, págs. 3405-3423. DOI: [10.1093/mnras/stx964](https://doi.org/10.1093/mnras/stx964). arXiv: [1704.08274](https://arxiv.org/abs/1704.08274) [astro-ph.GA] (vid. pág. 23).
- Bujang, Mohamad Adam y Nurakmal Baharum (2016). «Sample Size Guideline for Correlation Analysis». En: *SCHOLINK* 3.1, págs. 37-46. DOI: [10.22158](https://doi.org/10.22158) (vid. pág. 59).
- Burtscher, Leonard et al. (2016). «Infrared interferometry and AGNs: Parsec-scale disks and dusty outflows». En: vol. 9907. Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series, 99070R. DOI: [10.1117/12.2231077](https://doi.org/10.1117/12.2231077) (vid. págs. 7, 117).
- Burtscher, L. et al. (2015). «Obscuration in active galactic nuclei: near-infrared luminosity relations and dust colors». En: *A&A* 578, A47, A47. DOI: [10.1051/0004-6361/201525817](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201525817). arXiv: [1504.01104](https://arxiv.org/abs/1504.01104) [astro-ph.GA] (vid. pág. 15).
- Buta, R. (1987). «The structure and dynamics of ringed galaxies. IV - Surface photometry and kinematics of the ringed barred spiral NGC 6300». En: *ApJ* S 64, págs. 383-409. DOI: [10.1086/191199](https://doi.org/10.1086/191199) (vid. págs. 66, 75).
- Capelo, Pedro R. y Massimo Dotti (2017). «Shocks and angular momentum flips: a different path to feeding the nuclear regions of merging galaxies». En: *MNRAS* 465.3, págs. 2643-2653. DOI: [10.1093/mnras/stw2872](https://doi.org/10.1093/mnras/stw2872). arXiv: [1610.08507](https://arxiv.org/abs/1610.08507) [astro-ph.GA] (vid. pág. 22).
- Carilli, C. L. et al. (2019). «Imaging the Active Galactic Nucleus Torus in Cygnus A». En: *ApJ* 874.2, L32, pág. L32. DOI: [10.3847/2041-8213/ab1019](https://doi.org/10.3847/2041-8213/ab1019). arXiv: [1904.01365](https://arxiv.org/abs/1904.01365) [astro-ph.HE] (vid. págs. 8, 116).
- Carollo, C. Marcella et al. (2002). «Spiral Galaxies with HST/NICMOS. I. Nuclear Morphologies, Color Maps, and Distinct Nuclei». En: *AJ* 123.1, págs. 159-183. DOI: [10.1086/324725](https://doi.org/10.1086/324725). arXiv: [astro-ph/0110281](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0110281) [astro-ph] (vid. pág. 24).

Bibliografía

- Casasola, Viviana et al. (2015). «The resolved star-formation relation in nearby active galactic nuclei». En: *A&A* 577, A135, A135. DOI: [10.1051/0004-6361/201425313](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201425313). arXiv: [1503.00280](https://arxiv.org/abs/1503.00280) [astro-ph.GA] (vid. págs. 23, 107).
- Combes, F., S. García-Burillo, A. Audibert et al. (2019). «ALMA observations of molecular tori around massive black holes». En: *A&A* 623, A79, A79. DOI: [10.1051/0004-6361/201834560](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201834560). arXiv: [1811.00984](https://arxiv.org/abs/1811.00984) [astro-ph.GA] (vid. págs. 8, 25, 118, 119).
- Combes, F., S. García-Burillo, V. Casasola, L. K. Hunt et al. (2014). «ALMA reveals the feeding of the Seyfert 1 nucleus in NGC 1566». En: *A&A* 565, A97, A97. DOI: [10.1051/0004-6361/201423433](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201423433). arXiv: [1401.4120](https://arxiv.org/abs/1401.4120) [astro-ph.GA] (vid. págs. 22, 23, 107, 110).
- Combes, F., S. García-Burillo, V. Casasola, L. Hunt et al. (2013). «ALMA observations of feeding and feedback in nearby Seyfert galaxies: an AGN-driven outflow in NGC 1433». En: *A&A* 558, A124, A124. DOI: [10.1051/0004-6361/201322288](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201322288). arXiv: [1309.7486](https://arxiv.org/abs/1309.7486) [astro-ph.CO] (vid. págs. 22, 110).
- Côté, Patrick et al. (2006). «The ACS Virgo Cluster Survey. VIII. The Nuclei of Early-Type Galaxies». En: *ApJ S* 165.1, págs. 57-94. DOI: [10.1086/504042](https://doi.org/10.1086/504042). arXiv: [astro-ph/0603252](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0603252) [astro-ph] (vid. págs. 25, 38, 118).
- Cowan, John J., W. Romanishin y David Branch (1994). «Detection of a Nuclear Radio Source in NGC 7331: A Relatively “Radio-quiet” Liner». En: *ApJ* 436, pág. L139. DOI: [10.1086/187652](https://doi.org/10.1086/187652) (vid. pág. 52).
- Crocker, D. A., P. D. Baugus y R. Buta (1996). «H II Regions in Resonance Ring Spiral Galaxies». En: *IAU Colloq. 157: Barred Galaxies*. Ed. por R. Buta, D. A. Crocker y B. G. Elmegreen. Vol. 91. Astronomical Society of the Pacific Conference Series, pág. 80 (vid. pág. 66).
- Das, M. et al. (2017). *Dual Active Galactic Nuclei in Nearby Galaxies*. arXiv: [1708.01185](https://arxiv.org/abs/1708.01185) [astro-ph.GA] (vid. pág. 1).
- Davies, R. I. et al. (2007). «A Close Look at Star Formation around Active Galactic Nuclei». En: *ApJ* 671.2, págs. 1388-1412. DOI: [10.1086/523032](https://doi.org/10.1086/523032). arXiv: [0704.1374](https://arxiv.org/abs/0704.1374) [astro-ph] (vid. pág. 19).
- Davis, Benjamin L., Joel C. Berrier et al. (2014). «The Black Hole Mass Function Derived from Local Spiral Galaxies». En: *ApJ* 789.2, 124, pág. 124. DOI: [10.1088/0004-637X/789/2/124](https://doi.org/10.1088/0004-637X/789/2/124). arXiv: [1405.5876](https://arxiv.org/abs/1405.5876) [astro-ph.GA] (vid. págs. 82, 90).
- Davis, Benjamin L., Alister W. Graham y Françoise Combes (2019). «A Consistent Set of Empirical Scaling Relations for Spiral Galaxies: The $(v_{max}, M_{oM})-(\sigma_0, M_{BH}, \phi)$ Relations». En: *ApJ* 877.1, 64, pág. 64. DOI: [10.3847/1538-4357/ab1aa4](https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab1aa4). arXiv: [1901.06509](https://arxiv.org/abs/1901.06509) [astro-ph.GA] (vid. pág. 108).

Bibliografía

- de Blok, W. J. G. et al. (2008). «High-Resolution Rotation Curves and Galaxy Mass Models from THINGS». En: *AJ* 136.6, págs. 2648-2719. DOI: [10.1088/0004-6256/136/6/2648](https://doi.org/10.1088/0004-6256/136/6/2648). arXiv: [0810.2100](https://arxiv.org/abs/0810.2100) [astro-ph] (vid. pág. 45).
- de Jong, T. y K. Brink (1987). «A Simple Two-Component Model for the Far Infrared Emission from Galaxies». En: *NASA Conference Publication*. Ed. por Carol J. Lonsdale Persson. Vol. 2466. NASA Conference Publication, págs. 323-328 (vid. pág. 14).
- de Vaucouleurs, Gerard (1959). «General Physical Properties of External Galaxies.» En: *Handbuch der Physik* 53, pág. 311 (vid. pág. 37).
- de Vaucouleurs, G. et al. (1991). «Book-Review - Third Reference Catalogue of Bright Galaxies». En: 82, pág. 621 (vid. pág. 81).
- Díaz, R. J. et al. (2013). «Estado y rendimiento del espectrógrafo infrarrojo criogénico F2». En: *Boletín de la Asociación Argentina de Astronomía La Plata Argentina* 56, págs. 457-460 (vid. pág. 67).
- Díaz, R. et al. (1999a). «Kinematics of the Central Regions of NGC 1672». En: *ApJ* 512.2, págs. 623-629. DOI: [10.1086/306781](https://doi.org/10.1086/306781) (vid. pág. 24).
- Díaz, R. et al. (1999b). «Kinematics of the Central Regions of NGC 1672». En: *ApJ* 512, págs. 623-629. DOI: [10.1086/306781](https://doi.org/10.1086/306781) (vid. pág. 118).
- Dos Santos, P. M. y J. R. D. Lepine (1979). «Detection of strong H₂O emission from galaxy NGC4945». En: *Nature* 278.5699, págs. 34-35. DOI: [10.1038/278034a0](https://doi.org/10.1038/278034a0) (vid. pág. 89).
- Dumas, Gaëlle et al. (2007). «Central kiloparsec of Seyfert and inactive host galaxies: a comparison of two-dimensional stellar and gaseous kinematics». En: *MNRAS* 379.4, págs. 1249-1278. DOI: [10.1111/j.1365-2966.2007.12014.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2007.12014.x). arXiv: [0705.4162](https://arxiv.org/abs/0705.4162) [astro-ph] (vid. pág. 52).
- Durré, Mark y Jeremy Mould (2018). «The AGN Ionization Cones of NGC 5728. I. Excitation and Nuclear Structure». En: *ApJ* 867.2, 149, pág. 149. DOI: [10.3847/1538-4357/aae68e](https://doi.org/10.3847/1538-4357/aae68e). arXiv: [1810.03258](https://arxiv.org/abs/1810.03258) [astro-ph.GA] (vid. pág. 15).
- Dwek, Eli, Frédéric Galliano y Anthony P. Jones (2007). «The Evolution of Dust in the Early Universe with Applications to the Galaxy SDSS J1148+5251». En: *ApJ* 662.2, págs. 927-939. DOI: [10.1086/518430](https://doi.org/10.1086/518430). arXiv: [0705.3799](https://arxiv.org/abs/0705.3799) [astro-ph] (vid. págs. 6, 7, 13, 19).
- Edelson, R. A. y M. A. Malkan (1986). «Spectral energy distributions of active galactic nuclei between 0.1 and 100 microns». En: *ApJ* 308, págs. 59-77. DOI: [10.1086/164479](https://doi.org/10.1086/164479) (vid. pág. 77).
- Eikenberry, S. et al. (2012). «FLAMINGOS-2: the facility near-infrared wide-field imager and multi-object spectrograph for Gemini». En: *Ground-based and Airborne*

Bibliografía

- Instrumentation for Astronomy IV*. Vol. 8446. Pág. 84460I. DOI: [10.1117/12.925679](https://doi.org/10.1117/12.925679) (vid. pág. 67).
- Elmegreen, Debra Meloy (1998). *Galaxies and galactic structure* (vid. pág. 2).
- Elvis, M. et al. (2004). «An Unveiling Event in the Type 2 Active Galactic Nucleus NGC 4388: A Challenge for a Parsec-Scale Absorber». En: *ApJ* 615, págs. L25-L28. DOI: [10.1086/424380](https://doi.org/10.1086/424380). eprint: [astro-ph/0407291](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0407291) (vid. págs. 10, 67, 116).
- Emsellem, E. (2003). «So close, and yet so far: Bringing gas in the central 10 pc via Inner Density Waves». En: *Active Galactic Nuclei: From Central Engine to Host Galaxy*. Ed. por Suzy Collin, Francoise Combes e Isaac Shlosman. Vol. 290. Astronomical Society of the Pacific Conference Series, pág. 441 (vid. pág. 22).
- Emsellem, E. et al. (2015). «The interplay between a galactic bar and a supermassive black hole: nuclear fuelling in a subparsec resolution galaxy simulation». En: *MNRAS* 446, págs. 2468-2482. DOI: [10.1093/mnras/stu2209](https://doi.org/10.1093/mnras/stu2209). arXiv: [1410.6479](https://arxiv.org/abs/1410.6479) (vid. págs. 23, 24, 34, 118, 119).
- Erwin, Peter (2004). «Double-barred galaxies. I. A catalog of barred galaxies with stellar secondary bars and inner disks». En: *A&A* 415, págs. 941-957. DOI: [10.1051/0004-6361:20034408](https://doi.org/10.1051/0004-6361:20034408). arXiv: [astro-ph/0310806](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0310806) [[astro-ph](#)] (vid. pág. 45).
- Eskridge, Paul B. et al. (2002). «Near-Infrared and Optical Morphology of Spiral Galaxies». En: *ApJ S* 143.1, págs. 73-111. DOI: [10.1086/342340](https://doi.org/10.1086/342340). arXiv: [astro-ph/0206320](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0206320) [[astro-ph](#)] (vid. pág. 90).
- Falcón-Barroso, J. et al. (2014). «The circumnuclear environment of NGC 613: a nuclear starburst caught in the act?». En: *MNRAS* 438, págs. 329-340. DOI: [10.1093/mnras/stt2189](https://doi.org/10.1093/mnras/stt2189). arXiv: [1311.2041](https://arxiv.org/abs/1311.2041) (vid. págs. 80, 105).
- Fath, E. A. (1909). «The Spectra of Some Spiral Nebulae and Globular Star Clusters». En: *PASP* 21.126, págs. 138-143. DOI: [10.1086/121907](https://doi.org/10.1086/121907) (vid. pág. 2).
- Ferrarese, Laura y David Merritt (2000). «A Fundamental Relation between Supermassive Black Holes and Their Host Galaxies». En: *ApJ* 539.1, págs. L9-L12. DOI: [10.1086/312838](https://doi.org/10.1086/312838). arXiv: [astro-ph/0006053](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0006053) [[astro-ph](#)] (vid. págs. 21, 22, 108).
- Ferruit, P. et al. (2004). «Ionized gas and stars in the central kiloparsec of the type 2 Seyfert galaxy NGC 2110 - I. The data». En: *MNRAS* 352, págs. 1180-1198. DOI: [10.1111/j.1365-2966.2004.08009.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2004.08009.x) (vid. pág. 77).
- Forbes, Duncan A. y R. P. Norris (1998). «Star formation in southern Seyfert galaxies». En: *MNRAS* 300.3, págs. 757-766. DOI: [10.1046/j.1365-8711.1998.01940.x](https://doi.org/10.1046/j.1365-8711.1998.01940.x). arXiv: [astro-ph/9804298](https://arxiv.org/abs/astro-ph/9804298) [[astro-ph](#)] (vid. pág. 89).
- Fritz, J., A. Franceschini y E. Hatziminaoglou (2006). «Revisiting the infrared spectra of active galactic nuclei with a new torus emission model». En: *MNRAS* 366.3, págs. 767-786. DOI: [10.1111/j.1365-2966.2006.09866.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2006.09866.x). arXiv: [astro-ph/0511428](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0511428) [[astro-ph](#)] (vid. págs. 11, 116).

Bibliografía

- Gadotti, Dimitri Alexei (2008). «Image decomposition of barred galaxies and AGN hosts». En: *MNRAS* 384.1, págs. 420-439. DOI: [10.1111/j.1365-2966.2007.12723.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2007.12723.x). arXiv: [0708.3870](https://arxiv.org/abs/0708.3870) [astro-ph] (vid. pág. 38).
- Gallimore, Jack F. et al. (2016). «High-velocity Bipolar Molecular Emission from an AGN Torus». En: *ApJ* 829.1, L7, pág. L7. DOI: [10.3847/2041-8205/829/1/L7](https://doi.org/10.3847/2041-8205/829/1/L7). arXiv: [1608.02210](https://arxiv.org/abs/1608.02210) [astro-ph.GA] (vid. pág. 8).
- García-Burillo, S., F. Combes, C. Ramos Almeida et al. (2016). «ALMA Resolves the Torus of NGC 1068: Continuum and Molecular Line Emission». En: *ApJ* 823.1, L12, pág. L12. DOI: [10.3847/2041-8205/823/1/L12](https://doi.org/10.3847/2041-8205/823/1/L12). arXiv: [1604.00205](https://arxiv.org/abs/1604.00205) [astro-ph.GA] (vid. pág. 8).
- García-Burillo, S., F. Combes, A. Usero et al. (2014). «Molecular line emission in NGC 1068 imaged with ALMA. I. An AGN-driven outflow in the dense molecular gas». En: *A&A* 567, A125, A125. DOI: [10.1051/0004-6361/201423843](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201423843). arXiv: [1405.7706](https://arxiv.org/abs/1405.7706) [astro-ph.GA] (vid. págs. 22, 110).
- García-Burillo, Santiago y Francoise Combes (2012). «The feeding of activity in galaxies: a molecular line perspective». En: *Journal of Physics Conference Series*. Vol. 372. Journal of Physics Conference Series, pág. 012050. DOI: [10.1088/1742-6596/372/1/012050](https://doi.org/10.1088/1742-6596/372/1/012050). arXiv: [1205.0758](https://arxiv.org/abs/1205.0758) [astro-ph.CO] (vid. pág. 22).
- Gaspar, G., R. J. Díaz, G. Günthardt et al. (2012). «Estimación de la incerteza cinemática de los espectros obtenidos con REOSC (CAsLeo), Flamingos-2 y PHOENIX (Gemini) para observaciones de gas ionizado en galaxias». En: *Boletín de la Asociación Argentina de Astronomía La Plata Argentina* 55, págs. 297-301 (vid. pág. 104).
- Gaspar, G., R. J. Díaz, D. Mast et al. (2019). «A Near-infrared View of Nearby Galaxies: The Case of NGC 6300». En: *AJ* 157.2, 44, pág. 44. DOI: [10.3847/1538-3881/aaf4b9](https://doi.org/10.3847/1538-3881/aaf4b9). arXiv: [1902.02373](https://arxiv.org/abs/1902.02373) [astro-ph.GA] (vid. pág. 65).
- Gebhardt, Karl et al. (2000). «A Relationship between Nuclear Black Hole Mass and Galaxy Velocity Dispersion». En: *ApJ* 539.1, págs. L13-L16. DOI: [10.1086/312840](https://doi.org/10.1086/312840). arXiv: [astro-ph/0006289](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0006289) [astro-ph] (vid. págs. 1, 17, 19, 21, 22, 108).
- Ghosh, S. K. et al. (1992). «Far-Infrared Observations of NGC 4945 and the Circinus Galaxy». En: *ApJ* 391, pág. 111. DOI: [10.1086/171328](https://doi.org/10.1086/171328) (vid. pág. 89).
- Glass, I. S. y A. F. M. Moorwood (1985). «JHKL properties of emission-line galaxies.» En: *MNRAS* 214, págs. 429-447. DOI: [10.1093/mnras/214.4.429](https://doi.org/10.1093/mnras/214.4.429) (vid. pág. 15).
- González-Martín, Omaira et al. (2019). «Exploring the Mid-infrared SEDs of Six AGN Dusty Torus Models. II. The Data». En: *ApJ* 884.1, 11, pág. 11. DOI: [10.3847/1538-4357/ab3e4f](https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab3e4f). arXiv: [1908.11389](https://arxiv.org/abs/1908.11389) [astro-ph.GA] (vid. págs. 11, 12).
- Goulding, A. D. y D. M. Alexander (2009). «Towards a complete census of AGN in nearby Galaxies: a large population of optically unidentified AGN». En: *MNRAS*

Bibliografía

- 398, págs. 1165-1193. DOI: [10.1111/j.1365-2966.2009.15194.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2009.15194.x). arXiv: [0906.0772](https://arxiv.org/abs/0906.0772) (vid. págs. [3](#), [13](#), [16](#), [18](#), [66](#), [87-89](#), [115](#)).
- Goulding, A. D., D. M. Alexander et al. (2012). «Deep Silicate Absorption Features in Compton-thick Active Galactic Nuclei Predominantly Arise due to Dust in the Host Galaxy». En: *ApJ* 755, 5, pág. 5. DOI: [10.1088/0004-637X/755/1/5](https://doi.org/10.1088/0004-637X/755/1/5). arXiv: [1205.1800](https://arxiv.org/abs/1205.1800) (vid. págs. [65](#), [90](#)).
- Gravity Collaboration et al. (2020). «An image of the dust sublimation region in the nucleus of NGC 1068». En: *A&A* 634, A1, A1. DOI: [10.1051/0004-6361/201936255](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201936255). arXiv: [1912.01361](https://arxiv.org/abs/1912.01361) [[astro-ph.GA](#)] (vid. págs. [9](#), [10](#), [16](#), [117](#)).
- Greene, Jenny E. y Luis C. Ho (2007). «The Mass Function of Active Black Holes in the Local Universe». En: *ApJ* 667.1, págs. 131-148. DOI: [10.1086/520497](https://doi.org/10.1086/520497). arXiv: [0705.0020](https://arxiv.org/abs/0705.0020) [[astro-ph](#)] (vid. pág. [21](#)).
- Greenhill, L. J., J. M. Moran y J. R. Herrnstein (1997). «The Distribution of H₂O Maser Emission in the Nucleus of NGC 4945». En: *ApJ* 481.1, págs. L23-L26. DOI: [10.1086/310643](https://doi.org/10.1086/310643). arXiv: [astro-ph/9702220](https://arxiv.org/abs/astro-ph/9702220) [[astro-ph](#)] (vid. págs. [89](#), [107](#), [113](#)).
- Grupe, Dirk et al. (2019). «Swift catches the changing-look AGN NGC 1566 in an X-ray outburst again». En: *The Astronomer's Telegram* 12826, pág. 1 (vid. págs. [10](#), [116](#)).
- Guainazzi, M. (2002). «The formerly X-ray reflection-dominated Seyfert 2 galaxy NGC 6300». En: *MNRAS* 329, págs. L13-L17. DOI: [10.1046/j.1365-8711.2002.05132.x](https://doi.org/10.1046/j.1365-8711.2002.05132.x). eprint: [astro-ph/0111148](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0111148) (vid. págs. [10](#), [67](#)).
- Guainazzi, M. et al. (2000). «A broad-band X-ray view of NGC 4945». En: *A&A* 356, págs. 463-474. arXiv: [astro-ph/0001528](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0001528) [[astro-ph](#)] (vid. pág. [89](#)).
- Günthardt, G. I. et al. (2015). «Uncovering the Nucleus Candidate for NGC 253». En: *AJ* 150.5, 139, pág. 139. DOI: [10.1088/0004-6256/150/5/139](https://doi.org/10.1088/0004-6256/150/5/139). arXiv: [1509.00330](https://arxiv.org/abs/1509.00330) [[astro-ph.GA](#)] (vid. pág. [80](#)).
- Heckman, T. M. et al. (1997). «A Powerful Nuclear Starburst in the Seyfert Galaxy Markarian 477: Implications for the Starburst-Active Galactic Nucleus Connection». En: *ApJ* 482.1, págs. 114-132. DOI: [10.1086/304139](https://doi.org/10.1086/304139) (vid. pág. [19](#)).
- Heckman, Timothy M. y Philip N. Best (2014). «The Coevolution of Galaxies and Supermassive Black Holes: Insights from Surveys of the Contemporary Universe». En: *ARAA* 52, págs. 589-660. DOI: [10.1146/annurev-astro-081913-035722](https://doi.org/10.1146/annurev-astro-081913-035722). arXiv: [1403.4620](https://arxiv.org/abs/1403.4620) [[astro-ph.GA](#)] (vid. pág. [13](#)).
- Ho, L. C., A. V. Filippenko y W. L. Sargent (1995). «A Search for “Dwarf” Seyfert Nuclei. II. an Optical Spectral Atlas of the Nuclei of Nearby Galaxies». En: *ApJ* 5 98, pág. 477. DOI: [10.1086/192170](https://doi.org/10.1086/192170) (vid. pág. [35](#)).
- Ho, Luis C., Alexei V. Filippenko y Wallace L. W. Sargent (1997). «A Search for “Dwarf” Seyfert Nuclei. III. Spectroscopic Parameters and Properties of the Host Galaxies».

Bibliografía

- En: *ApJ S* 112.2, págs. 315-390. DOI: [10.1086/313041](https://doi.org/10.1086/313041). arXiv: [astro-ph/9704107](https://arxiv.org/abs/astro-ph/9704107) [[astro-ph](#)] (vid. págs. 17, 35).
- Hönig, S. F. y M. Kishimoto (2010). «The dusty heart of nearby active galaxies. II. From clumpy torus models to physical properties of dust around AGN». En: *A&A* 523, A27, A27. DOI: [10.1051/0004-6361/200912676](https://doi.org/10.1051/0004-6361/200912676). arXiv: [0909.4539](https://arxiv.org/abs/0909.4539) [[astro-ph.CO](#)] (vid. pág. 11).
- Hönig, S. F., M. Kishimoto et al. (2012). «Parsec-scale Dust Emission from the Polar Region in the Type 2 Nucleus of NGC 424». En: *ApJ* 755.2, 149, pág. 149. DOI: [10.1088/0004-637X/755/2/149](https://doi.org/10.1088/0004-637X/755/2/149). arXiv: [1206.4307](https://arxiv.org/abs/1206.4307) [[astro-ph.CO](#)] (vid. pág. 12).
- Hönig, Sebastian F. (2019). «Redefining the Torus: A Unifying View of AGNs in the Infrared and Submillimeter». En: *ApJ* 884.2, 171, pág. 171. DOI: [10.3847/1538-4357/ab4591](https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab4591). arXiv: [1909.08639](https://arxiv.org/abs/1909.08639) [[astro-ph.GA](#)] (vid. pág. 14).
- Hönig, Sebastian F. y Makoto Kishimoto (2017). «Dusty Winds in Active Galactic Nuclei: Reconciling Observations with Models». En: *ApJ* 838.2, L20, pág. L20. DOI: [10.3847/2041-8213/aa6838](https://doi.org/10.3847/2041-8213/aa6838). arXiv: [1703.07781](https://arxiv.org/abs/1703.07781) [[astro-ph.GA](#)] (vid. págs. 13, 14, 64, 116).
- Hopkins, Philip F. et al. (2012). «Why are active galactic nuclei and host galaxies misaligned?» En: *MNRAS* 425.2, págs. 1121-1128. DOI: [10.1111/j.1365-2966.2012.21449.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2012.21449.x). arXiv: [1111.1236](https://arxiv.org/abs/1111.1236) [[astro-ph.CO](#)] (vid. pág. 20).
- Iwasawa, K. et al. (1993). «X-Ray Evidence for Seyfert Activity Buried in the Infrared Galaxy NGC 4945». En: *ApJ* 409, pág. 155. DOI: [10.1086/172651](https://doi.org/10.1086/172651) (vid. págs. 17, 89).
- Jarrett, T. H. et al. (2003). «The 2MASS Large Galaxy Atlas». En: *AJ* 125.2, págs. 525-554. DOI: [10.1086/345794](https://doi.org/10.1086/345794) (vid. págs. 45, 49, 51, 52, 88, 90).
- Kauffmann, Guinevere et al. (2003). «The host galaxies of active galactic nuclei». En: *MNRAS* 346.4, págs. 1055-1077. DOI: [10.1111/j.1365-2966.2003.07154.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2003.07154.x). arXiv: [astro-ph/0304239](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0304239) [[astro-ph](#)] (vid. pág. 19).
- Keel, W. C. et al. (1985). «The effects of interactions on spiral galaxies. I. Nuclear activity and star formation.» En: *AJ* 90, págs. 708-730. DOI: [10.1086/113779](https://doi.org/10.1086/113779) (vid. pág. 52).
- Khorunzhev, G. A. et al. (2012). «Masses and accretion rates of supermassive black holes in active galactic nuclei from the INTEGRAL survey». En: *Astronomy Letters* 38, págs. 475-491. DOI: [10.1134/S1063773712080026](https://doi.org/10.1134/S1063773712080026). arXiv: [1210.6279](https://arxiv.org/abs/1210.6279) [[astro-ph.CO](#)] (vid. pág. 82).
- Kishimoto, M., S. F. Hönig, R. Antonucci, R. Barvainis et al. (2011). «The innermost dusty structure in active galactic nuclei as probed by the Keck interferometer». En: *A&A* 527, A121, A121. DOI: [10.1051/0004-6361/201016054](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201016054). arXiv: [1012.5359](https://arxiv.org/abs/1012.5359) [[astro-ph.CO](#)] (vid. pág. 15).

Bibliografía

- Kishimoto, M., S. F. Hönl, R. Antonucci, T. Kotani et al. (2009). «Exploring the inner region of type 1 AGNs with the Keck interferometer». En: *A&A* 507.3, págs. L57-L60. DOI: [10.1051/0004-6361/200913512](https://doi.org/10.1051/0004-6361/200913512). arXiv: [0911.0666](https://arxiv.org/abs/0911.0666) [astro-ph.CO] (vid. págs. 8, 116).
- Knapen, J. H. (2004). «Fuelling starbursts and AGN». En: *Penetrating Bars Through Masks of Cosmic Dust*. Ed. por David L. Block et al. Vol. 319. Astrophysics and Space Science Library, pág. 189. DOI: [10.1007/978-1-4020-2862-5_16](https://doi.org/10.1007/978-1-4020-2862-5_16) (vid. pág. 19).
- Kobayashi, Y. et al. (1993). «An infrared study of hot dust in quasars using prism spectrophotometry». En: *ApJ* 404, págs. 94-99. DOI: [10.1086/172261](https://doi.org/10.1086/172261) (vid. pág. 77).
- Koornneef, Jan (1993). «NGC 4945: A Postburst Infrared Galaxy». En: *ApJ* 403, pág. 581. DOI: [10.1086/172229](https://doi.org/10.1086/172229) (vid. págs. 88, 89, 98).
- Kormendy, J. y D. Richstone (1995). «Inward Bound—The Search For Supermassive Black Holes In Galactic Nuclei». En: *ARAA* 33, pág. 581. DOI: [10.1146/annurev.aa.33.090195.003053](https://doi.org/10.1146/annurev.aa.33.090195.003053) (vid. pág. 17).
- Kormendy, John (1988). «Evidence for a Supermassive Black Hole in the Nucleus of M31». En: *ApJ* 325, pág. 128. DOI: [10.1086/165988](https://doi.org/10.1086/165988) (vid. pág. 38).
- Kormendy, John y Luis C. Ho (2013). «Coevolution (Or Not) of Supermassive Black Holes and Host Galaxies». En: *ARAA* 51.1, págs. 511-653. DOI: [10.1146/annurev-astro-082708-101811](https://doi.org/10.1146/annurev-astro-082708-101811). arXiv: [1304.7762](https://arxiv.org/abs/1304.7762) [astro-ph.CO] (vid. pág. 22).
- Krolik, Julian H. y Mitchell C. Begelman (1988). «Molecular Tori in Seyfert Galaxies: Feeding the Monster and Hiding It». En: *ApJ* 329, pág. 702. DOI: [10.1086/166414](https://doi.org/10.1086/166414) (vid. pág. 9).
- Landt, H. et al. (2019). «The first spectroscopic dust reverberation programme on active galactic nuclei: the torus in NGC 5548». En: *MNRAS* 489.2, págs. 1572-1589. DOI: [10.1093/mnras/stz2212](https://doi.org/10.1093/mnras/stz2212). arXiv: [1908.01627](https://arxiv.org/abs/1908.01627) [astro-ph.GA] (vid. pág. 8).
- Laurikainen, Eija, Heikki Salo y Ronald Buta (2005). «Multicomponent decompositions for a sample of So galaxies». En: *MNRAS* 362.4, págs. 1319-1347. DOI: [10.1111/j.1365-2966.2005.09404.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2005.09404.x). arXiv: [astro-ph/0508097](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0508097) [astro-ph] (vid. pág. 45).
- Laurikainen, Eija, Heikki Salo, Ronald Buta y Sergiy Vasylyev (2004). «Bar-induced perturbation strengths of the galaxies in the Ohio State University Bright Galaxy Survey - I». En: *MNRAS* 355.4, págs. 1251-1271. DOI: [10.1111/j.1365-2966.2004.08410.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2004.08410.x). arXiv: [astro-ph/0409503](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0409503) [astro-ph] (vid. pág. 45).
- Lehnert, Matthew D. y Timothy M. Heckman (1996). «The Nature of Starburst Galaxies». En: *ApJ* 472, pág. 546. DOI: [10.1086/178086](https://doi.org/10.1086/178086) (vid. pág. 14).
- Leighly, K. M. et al. (1999). «An RXTE Observation of NGC 6300: A New Bright Compton Reflection-dominated Seyfert 2 Galaxy». En: *ApJ* 522, págs. 209-213. DOI: [10.1086/307649](https://doi.org/10.1086/307649). eprint: [astro-ph/9904155](https://arxiv.org/abs/astro-ph/9904155) (vid. pág. 67).

Bibliografía

- Li, Zhi et al. (2016). «Gas Dynamics in the Milky Way: A Low Pattern Speed Model». En: *ApJ* 824.1, 13, pág. 13. DOI: [10.3847/0004-637X/824/1/13](https://doi.org/10.3847/0004-637X/824/1/13). arXiv: [1603.09650](https://arxiv.org/abs/1603.09650) [astro-ph.GA] (vid. pág. 22).
- Lin, Lin et al. (2013). «Gradients of Stellar Population Properties and Evolution Clues in a Nearby Galaxy M101». En: *ApJ* 769.2, 127, pág. 127. DOI: [10.1088/0004-637X/769/2/127](https://doi.org/10.1088/0004-637X/769/2/127). arXiv: [1304.3017](https://arxiv.org/abs/1304.3017) [astro-ph.CO] (vid. págs. 28, 29).
- López-Gonzaga, N. et al. (2014). «Revealing the large nuclear dust structures in NGC 1068 with MIDI/VLTI». En: *A&A* 565, A71, A71. DOI: [10.1051/0004-6361/201323002](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201323002). arXiv: [1401.3248](https://arxiv.org/abs/1401.3248) [astro-ph.GA] (vid. pág. 12).
- Ludwig, Johannes et al. (2012). «Giant Galaxies, Dwarfs, and Debris Survey. I. Dwarf Galaxies and Tidal Features around NGC 7331». En: *AJ* 144.6, 190, pág. 190. DOI: [10.1088/0004-6256/144/6/190](https://doi.org/10.1088/0004-6256/144/6/190). arXiv: [1211.3764](https://arxiv.org/abs/1211.3764) [astro-ph.CO] (vid. pág. 52).
- Maciejewski, Witold (2002). «Simulations of Gas Flow from a Galactic Disk Towards the Black-Hole Accretion Disk». En: 281.1, págs. 325-326. DOI: [10.1023/A:1019551003881](https://doi.org/10.1023/A:1019551003881) (vid. pág. 22).
- Madejski, G. et al. (2000). «Chandra Observations of Highly Obscured Seyfert 2 Galaxy NGC 4945». En: *AAS/High Energy Astrophysics Division #5*. Vol. 5. AAS/High Energy Astrophysics Division, pág. 01.07 (vid. pág. 89).
- Makarov, Dmitry e Igor Karachentsev (2011). «Galaxy groups and clouds in the local ($z < 0.01$) Universe». En: *MNRAS* 412.4, págs. 2498-2520. DOI: [10.1111/j.1365-2966.2010.18071.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2010.18071.x). arXiv: [1011.6277](https://arxiv.org/abs/1011.6277) [astro-ph.CO] (vid. pág. 52).
- Marconi, A. et al. (2000). «The elusive active nucleus of NGC 4945». En: *A&A* 357, págs. 24-36. arXiv: [astro-ph/0002244](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0002244) [astro-ph] (vid. págs. 99, 109).
- Marinucci, A. et al. (2016). «NuSTAR catches the unveiling nucleus of NGC 1068». En: *MNRAS* 456.1, págs. L94-L98. DOI: [10.1093/mnras1/slv178](https://doi.org/10.1093/mnras1/slv178). arXiv: [1511.03503](https://arxiv.org/abs/1511.03503) [astro-ph.HE] (vid. pág. 10).
- Marshall, J. A. et al. (2018). «The Nature of Deeply Buried Ultraluminous Infrared Galaxies: A Unified Model for Highly Obscured Dusty Galaxy Emission». En: *ApJ* 858.1, 59, pág. 59. DOI: [10.3847/1538-4357/aabcc0](https://doi.org/10.3847/1538-4357/aabcc0). arXiv: [1708.04709](https://arxiv.org/abs/1708.04709) [astro-ph.GA] (vid. págs. 14, 117).
- Martini, Paul (2004). «Bars from the Inside Out: An HST Study of Their Dusty Circumnuclear Regions». En: *Penetrating Bars through Masks of Cosmic Dust*. Ed. por David L. Block et al. Dordrecht: Springer Netherlands, págs. 213-222. ISBN: 978-1-4020-2862-5 (vid. pág. 69).
- Martini, Paul, Daniel Dicken y Thaisa Storchi-Bergmann (2013). «The Origin of Dust in Early-type Galaxies and Implications for Accretion onto Supermassive Black Holes». En: *ApJ* 766.2, 121, pág. 121. DOI: [10.1088/0004-637X/766/2/121](https://doi.org/10.1088/0004-637X/766/2/121). arXiv: [1302.5124](https://arxiv.org/abs/1302.5124) [astro-ph.CO] (vid. pág. 23).

Bibliografía

- Martini, P. et al. (2003). «Circumnuclear Dust in Nearby Active and Inactive Galaxies. II. Bars, Nuclear Spirals, and the Fueling of Active Galactic Nuclei». En: *ApJ* 589, págs. 774-782. DOI: [10.1086/374685](https://doi.org/10.1086/374685). eprint: [astro-ph/0212391](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0212391) (vid. pág. 90).
- Martins, L. P. et al. (2010). «Nuclear and extended spectra of NGC 1068 - I. Hints from near-infrared spectroscopy». En: *MNRAS* 406, págs. 2168-2184. DOI: [10.1111/j.1365-2966.2010.17042.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2010.17042.x). arXiv: [1005.3553](https://arxiv.org/abs/1005.3553) (vid. pág. 77).
- Masini, A. et al. (2016). «NuSTAR observations of water megamaser AGN». En: *A&A* 589, A59, A59. DOI: [10.1051/0004-6361/201527689](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201527689). arXiv: [1602.03185](https://arxiv.org/abs/1602.03185) [[astro-ph.HE](#)] (vid. pág. 107).
- Mason, R. E. et al. (2015). «The Nuclear Near-Infrared Spectral Properties of Nearby Galaxies». En: *ApJ S* 217, 13, pág. 13. DOI: [10.1088/0067-0049/217/1/13](https://doi.org/10.1088/0067-0049/217/1/13). arXiv: [1503.01836](https://arxiv.org/abs/1503.01836) (vid. págs. 35-37, 51, 57).
- Matsumoto, C. et al. (2004). «An XMM-Newton Observation of the Seyfert 2 Galaxy NGC 6300. I. The Nucleus». En: *ApJ* 617, págs. 930-938. DOI: [10.1086/425566](https://doi.org/10.1086/425566). eprint: [astro-ph/0411328](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0411328) (vid. pág. 67).
- Matt, G. (2000). «Dust lanes, thick absorbers, and the unification model for Seyfert galaxies». En: *A&A* 355, págs. L31-L33. eprint: [astro-ph/0002427](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0002427) (vid. pág. 67).
- Matt, Giorgio, Matteo Guainazzi y Roberto Maiolino (2003). «Changing look: from Compton-thick to Compton-thin, or the rebirth of fossil active galactic nuclei». En: *MNRAS* 342.2, págs. 422-426. DOI: [10.1046/j.1365-8711.2003.06539.x](https://doi.org/10.1046/j.1365-8711.2003.06539.x). arXiv: [astro-ph/0302328](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0302328) [[astro-ph](#)] (vid. pág. 10).
- Mediavilla, E. et al. (2005). «Asymmetrical structure of ionization and kinematics in the Seyfert galaxy NGC 5033». En: *A&A* 433.1, págs. 79-86. DOI: [10.1051/0004-6361:20034537](https://doi.org/10.1051/0004-6361:20034537). arXiv: [astro-ph/0412410](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0412410) [[astro-ph](#)] (vid. pág. 51).
- Michard, R. y J. Marchal (1994). «Quantitative morphology of E-So galaxies. III. Coded and parametric description of 108 galaxies in a complete sample». En: *A&AS* 105, págs. 481-501 (vid. pág. 47).
- Miller, R. H. y B. F. Smith (1992). «Off-Center Nuclei in Galaxies». En: *ApJ* 393, pág. 508. DOI: [10.1086/171523](https://doi.org/10.1086/171523) (vid. págs. 23, 38).
- Moorwood, A. F. M. y E. Oliva (1990). «H₂ emission in galaxies : observational constraints on ultraviolet excitation.» En: *A&A* 239, pág. 78 (vid. págs. 89, 98, 104).
- Moorwood, A. F. M., P. P. van der Werf et al. (1996). «Starburst superwind and LINER activity in NGC4945». En: *A&A* 308, pág. L1 (vid. págs. 87, 109).
- Morganti, R. et al. (1999). «Radio continuum morphology of southern Seyfert galaxies». En: *A&AS* 137, págs. 457-471. DOI: [10.1051/aas:1999258](https://doi.org/10.1051/aas:1999258). eprint: [astro-ph/9905006](https://arxiv.org/abs/astro-ph/9905006) (vid. pág. 66).
- Mould, Jeremy R. et al. (2000). «The Hubble Space Telescope Key Project on the Extragalactic Distance Scale. XXVIII. Combining the Constraints on the Hubble

Bibliografía

- Constant». En: *ApJ* 529.2, págs. 786-794. DOI: [10.1086/308304](https://doi.org/10.1086/308304). arXiv: [astro-ph/9909260](https://arxiv.org/abs/astro-ph/9909260) [[astro-ph](#)] (vid. págs. 88, 90).
- Mouri, H. (1994). «Molecular hydrogen emission in galaxies: Determination of excitation mechanism». En: *ApJ* 427, págs. 777-783. DOI: [10.1086/174184](https://doi.org/10.1086/174184) (vid. págs. 79, 80, 88, 118).
- Mulchaey, John S., Michael W. Regan y Arunav Kundu (1997). «The Fueling of Nuclear Activity. I. A Near-Infrared Imaging Survey of Seyfert and Normal Galaxies». En: *ApJ S* 110.2, págs. 299-319. DOI: [10.1086/313005](https://doi.org/10.1086/313005) (vid. págs. 28, 40, 44, 63).
- Muñoz Marín, V. M. et al. (2007). «An Atlas of the Circumnuclear Regions of 75 Seyfert Galaxies in the Near-Ultraviolet with the Hubble Space Telescope Advanced Camera for Surveys». En: *AJ* 134, págs. 648-667. DOI: [10.1086/519448](https://doi.org/10.1086/519448). arXiv: [0704.3617](https://arxiv.org/abs/0704.3617) (vid. pág. 45).
- Muxlow, Tom et al. (2006). «Starburst galaxies». En: *Proceedings of the 8th European VLBI Network Symposium*, pág. 31. arXiv: [astro-ph/0611951](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0611951) [[astro-ph](#)] (vid. pág. 18).
- Nagar, N.M. et al. (2002). «NGC 5506 unmasked as a Narrow Line Seyfert 1: A direct view of the broad line region using near-IR spectroscopy». En: *A&A* 391, págs. L21-L24. DOI: [10.1051/0004-6361:20021039](https://doi.org/10.1051/0004-6361:20021039). eprint: [astro-ph/0207432](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0207432) (vid. págs. 3, 13).
- Nenkova, Maia et al. (2008). «AGN Dusty Tori. II. Observational Implications of Clumpiness». En: *ApJ* 685.1, págs. 160-180. DOI: [10.1086/590483](https://doi.org/10.1086/590483). arXiv: [0806.0512](https://arxiv.org/abs/0806.0512) [[astro-ph](#)] (vid. págs. 11, 12).
- Nenkova, M. et al. (2008). «AGN Dusty Tori. I. Handling of Clumpy Media». En: *ApJ* 685, 147-159, págs. 147-159. DOI: [10.1086/590482](https://doi.org/10.1086/590482). arXiv: [0806.0511](https://arxiv.org/abs/0806.0511) (vid. págs. 116, 117).
- Nilson, P. (1973). «Uppsala General Catalogue of Galaxies, 1973, Acta Universitatis Upsalienis, Nova Regiae Societatis Upsaliensis, Series v: a Vol.» En: *Nova Acta Regiae Soc. Sci. Upsaliensis Ser. V*, pág. 5 (vid. pág. 47).
- Norman, Colin y Nick Scoville (1988). «The Evolution of Starburst Galaxies to Active Galactic Nuclei». En: *ApJ* 332, pág. 124. DOI: [10.1086/166637](https://doi.org/10.1086/166637) (vid. pág. 20).
- Osterbrock, D. E. y G. J. Ferland (2006). *Astrophysics of gaseous nebulae and active galactic nuclei* (vid. págs. 3, 82, 83).
- Padovani, P. et al. (2017). «Active galactic nuclei: what's in a name?» En: 25, 2, pág. 2. DOI: [10.1007/s00159-017-0102-9](https://doi.org/10.1007/s00159-017-0102-9). arXiv: [1707.07134](https://arxiv.org/abs/1707.07134) (vid. pág. 71).
- Peng, Fang-Kun et al. (2019). «Evidence of AGN Activity in the Gamma-Ray Emission from Two Starburst Galaxies». En: *ApJ* 884.1, 91, pág. 91. DOI: [10.3847/1538-4357/ab3e6f](https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab3e6f). arXiv: [1906.06720](https://arxiv.org/abs/1906.06720) [[astro-ph.HE](#)] (vid. pág. 89).

Bibliografía

- Peng, Z. et al. (2006). «The K-band properties of Seyfert 2 galaxies». En: *A&A* 453, págs. 863-868. DOI: [10.1051/0004-6361:20054664](https://doi.org/10.1051/0004-6361:20054664). eprint: [astro-ph/0603849](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0603849) (vid. pág. 69).
- Pérez-Beaupuits, J. P. et al. (2011). «The deeply obscured AGN of NGC 4945. I. Spitzer-IRS maps of [Ne V], [Ne II], H₂ o-o S(1), S(2), and other tracers». En: *A&A* 533, A56, A56. DOI: [10.1051/0004-6361/201117153](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201117153). arXiv: [1107.0224](https://arxiv.org/abs/1107.0224) [[astro-ph.CO](#)] (vid. pág. 99).
- Phillips, M. M., P. A. Charles y J. A. Baldwin (1983). «Nearby galaxies with Seyfert-like nuclei». En: *ApJ* 266, págs. 485-501. DOI: [10.1086/160797](https://doi.org/10.1086/160797) (vid. págs. 66, 90).
- Pogge, Richard W. y Paul Martini (2002). «Hubble Space Telescope Imaging of the Circumnuclear Environments of the CfA Seyfert Galaxies: Nuclear Spirals and Fueling». En: *ApJ* 569.2, págs. 624-640. DOI: [10.1086/339400](https://doi.org/10.1086/339400). arXiv: [astro-ph/0201185](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0201185) [[astro-ph](#)] (vid. págs. 22, 110).
- Price-Whelan, A. M. et al. (2018). «The Astropy Project: Building an Open-science Project and Status of the v2.0 Core Package». En: *AJ* 156, 123, pág. 123. DOI: [10.3847/1538-3881/aabc4f](https://doi.org/10.3847/1538-3881/aabc4f) (vid. pág. 41).
- Prieto, M. A. et al. (2010). «The spectral energy distribution of the central parsecs of the nearest AGN». En: *MNRAS* 402, págs. 724-744. DOI: [10.1111/j.1365-2966.2009.15897.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2009.15897.x). arXiv: [0910.3771](https://arxiv.org/abs/0910.3771) (vid. pág. 77).
- Puccetti, S., F. Fiore et al. (2007). «Rapid N_H changes in NGC 4151». En: *MNRAS* 377.2, págs. 607-616. DOI: [10.1111/j.1365-2966.2007.11634.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2007.11634.x). arXiv: [astro-ph/0612021](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0612021) [[astro-ph](#)] (vid. págs. 10, 116).
- Puccetti, S., G. Risaliti et al. (2004). «Rapid N_H changes in NGC 4151». En: *Nuclear Physics B Proceedings Supplements* 132, págs. 225-228. DOI: [10.1016/j.nuclphysbps.2004.04.039](https://doi.org/10.1016/j.nuclphysbps.2004.04.039). eprint: [astro-ph/0311446](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0311446) (vid. pág. 67).
- Raban, David et al. (2009). «Resolving the obscuring torus in NGC 1068 with the power of infrared interferometry: revealing the inner funnel of dust». En: *MNRAS* 394.3, págs. 1325-1337. DOI: [10.1111/j.1365-2966.2009.14439.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2009.14439.x). arXiv: [0901.1306](https://arxiv.org/abs/0901.1306) [[astro-ph.GA](#)] (vid. págs. 12, 15).
- Rafanelli, P. et al. (2011). «The Starburst – AGN Connection: a Critical Review». En: *Baltic Astronomy* 20, págs. 419-426. DOI: [10.1515/astro-2017-0313](https://doi.org/10.1515/astro-2017-0313) (vid. pág. 19).
- Ramos Almeida, C., A. M. Pérez Garcéa et al. (2008). «Unveiling the Narrow-Line Seyfert 1 Nature of Markarian 573 Using Near-Infrared Spectroscopy». En: *ApJ* 680, L17, pág. L17. DOI: [10.1086/589771](https://doi.org/10.1086/589771). arXiv: [0805.0796](https://arxiv.org/abs/0805.0796) (vid. pág. 13).
- Ramos Almeida, C., A. M. Pérez García y J. A. Acosta-Pulido (2009). «Near-Infrared Spectroscopy of Seyfert Galaxies. Nuclear Activity and Stellar Population». En: *ApJ* 694, págs. 1379-1394. DOI: [10.1088/0004-637X/694/2/1379](https://doi.org/10.1088/0004-637X/694/2/1379). arXiv: [0901.0999](https://arxiv.org/abs/0901.0999) [[astro-ph.GA](#)] (vid. págs. 3, 57, 77, 80).

Bibliografía

- Ramos Almeida, Cristina y Claudio Ricci (2017). «Nuclear obscuration in active galactic nuclei». En: *Nature Astronomy* 1, págs. 679-689. DOI: [10.1038/s41550-017-0232-z](https://doi.org/10.1038/s41550-017-0232-z). arXiv: [1709.00019](https://arxiv.org/abs/1709.00019) [astro-ph.GA] (vid. págs. 1, 4, 7).
- Reunanen, J., J. K. Kotilainen y M. A. Prieto (2002). «Near-infrared spectroscopy of nearby Seyfert galaxies - I. First results». En: *MNRAS* 331, págs. 154-168. DOI: [10.1046/j.1365-8711.2002.05181.x](https://doi.org/10.1046/j.1365-8711.2002.05181.x). eprint: [astro-ph/0111463](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0111463) (vid. pág. 79).
- Reunanen, J., J. K. Kotilainen y M. A. Prieto (2003). «Near-infrared spectroscopy of nearby Seyfert galaxies - II. Molecular content and coronal emission». En: *MNRAS* 343, págs. 192-208. DOI: [10.1046/j.1365-8711.2003.06771.x](https://doi.org/10.1046/j.1365-8711.2003.06771.x). eprint: [astro-ph/0305100](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0305100) (vid. pág. 71).
- Reunanen, J., M. A. Prieto y R. Siebenmorgen (2010). «VLT diffraction-limited imaging at 11 and 18 μ m of the nearest active galactic nuclei». En: *MNRAS* 402.2, págs. 879-894. DOI: [10.1111/j.1365-2966.2009.15997.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2009.15997.x). arXiv: [0911.2112](https://arxiv.org/abs/0911.2112) [astro-ph.CO] (vid. pág. 12).
- Ricci, C., F. E. Bauer et al. (2016). «IC 751: A New Changing Look AGN Discovered by NuSTAR». En: *ApJ* 820.1, 5, pág. 5. DOI: [10.3847/0004-637X/820/1/5](https://doi.org/10.3847/0004-637X/820/1/5). arXiv: [1602.00702](https://arxiv.org/abs/1602.00702) [astro-ph.HE] (vid. pág. 10).
- Ricci, C., Y. Ueda et al. (2015). «Compton-thick Accretion in the Local Universe». En: *ApJ* 815.1, L13, pág. L13. DOI: [10.1088/2041-8205/815/1/L13](https://doi.org/10.1088/2041-8205/815/1/L13). arXiv: [1603.04852](https://arxiv.org/abs/1603.04852) [astro-ph.HE] (vid. pág. 11).
- Riffel, R., A. Rodríguez-Ardila y M. G. Pastoriza (2006). «A 0.8-2.4 μ m spectral atlas of active galactic nuclei». En: *A&A* 457, págs. 61-70. DOI: [10.1051/0004-6361:20065291](https://doi.org/10.1051/0004-6361:20065291). eprint: [astro-ph/0605463](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0605463) (vid. pág. 3).
- Risaliti, G., M. Elvis, G. Fabbiano et al. (2005). «Rapid Compton-thick/Compton-thin Transitions in the Seyfert 2 Galaxy NGC 1365». En: *ApJ* 623, págs. L93-L96. DOI: [10.1086/430252](https://doi.org/10.1086/430252). eprint: [astro-ph/0503351](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0503351) (vid. págs. 67, 90).
- Risaliti, G., M. Elvis y F. Nicastro (2002). «Ubiquitous Variability of X-Ray-absorbing Column Densities in Seyfert 2 Galaxies». En: *ApJ* 571, págs. 234-246. DOI: [10.1086/324146](https://doi.org/10.1086/324146). eprint: [astro-ph/0107510](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0107510) (vid. pág. 67).
- Rodríguez-Ardila, A. et al. (2011). «The Near-infrared Coronal Line Spectrum of 54 nearby Active Galactic Nuclei». En: *ApJ* 743, 100, pág. 100. DOI: [10.1088/0004-637X/743/2/100](https://doi.org/10.1088/0004-637X/743/2/100). arXiv: [1109.0984](https://arxiv.org/abs/1109.0984) (vid. pág. 71).
- Rosario, D. J. et al. (2018). «LLAMA: normal star formation efficiencies of molecular gas in the centres of luminous Seyfert galaxies». En: *MNRAS* 473.4, págs. 5658-5679. DOI: [10.1093/mnras/stx2670](https://doi.org/10.1093/mnras/stx2670). arXiv: [1710.04224](https://arxiv.org/abs/1710.04224) [astro-ph.GA] (vid. pág. 23).
- Rosenthal, M. J. et al. (2020). «Star Formation and AGN Contributions in the Water Maser Host Galaxy NGC 4945». En: *American Astronomical Society Meeting Abstracts*.

Bibliografía

- Vol. 52. American Astronomical Society Meeting Abstracts, pág. 233.01 (vid. pág. 89).
- Ryder, S. D. et al. (1996). «Neutral Hydrogen in the Ringed Barred Galaxies NGC 1433 and NGC 6300». En: *ApJ* 460, pág. 665. DOI: [10.1086/177000](https://doi.org/10.1086/177000). eprint: [astro-ph/9512043](https://arxiv.org/abs/astro-ph/9512043) (vid. pág. 67).
- Sadler, D. H. (1965). «The unit of time-interval». En: *The system of Astronomical Constants*. Ed. por Jean Kovalevsky. Vol. 21. IAU Symposium, pág. 133 (vid. pág. 89).
- Satyapal, S. et al. (2008). «Spitzer Uncovers Active Galactic Nuclei Missed by Optical Surveys in Seven Late-Type Galaxies». En: *ApJ* 677.2, págs. 926-942. DOI: [10.1086/529014](https://doi.org/10.1086/529014). arXiv: [0801.2759](https://arxiv.org/abs/0801.2759) [[astro-ph](#)] (vid. pág. 17).
- Savorgnan, Giulia A. D. (2016). «Supermassive Black Holes and their Host Spheroids III. The Mbh-nsph Correlation». En: *ApJ* 821.2, 88, pág. 88. DOI: [10.3847/0004-637X/821/2/88](https://doi.org/10.3847/0004-637X/821/2/88). arXiv: [1603.01910](https://arxiv.org/abs/1603.01910) [[astro-ph.GA](#)] (vid. pág. 38).
- Schawinski, Kevin et al. (2015). «Active galactic nuclei flicker: an observational estimate of the duration of black hole growth phases of 10^5 yr». En: *MNRAS* 451.3, págs. 2517-2523. DOI: [10.1093/mnras/stv1136](https://doi.org/10.1093/mnras/stv1136). arXiv: [1505.06733](https://arxiv.org/abs/1505.06733) [[astro-ph.GA](#)] (vid. pág. 21).
- Schinnerer, E. et al. (2000). «Bars and Warps Traced by the Molecular Gas in the Seyfert 2 Galaxy NGC 1068». En: *ApJ* 533.2, págs. 850-868. DOI: [10.1086/308702](https://doi.org/10.1086/308702). arXiv: [astro-ph/9911488](https://arxiv.org/abs/astro-ph/9911488) [[astro-ph](#)] (vid. págs. 23, 107).
- Schmidt, E. O. et al. (2019). «Circumnuclear Rings and Lindblad Resonances in Spiral Galaxies». En: *AJ* 158.2, 60, pág. 60. DOI: [10.3847/1538-3881/ab2882](https://doi.org/10.3847/1538-3881/ab2882). arXiv: [1906.04843](https://arxiv.org/abs/1906.04843) [[astro-ph.GA](#)] (vid. pág. 111).
- Schmidt, M. y R. F. Green (1983). «Quasar evolution derived from the Palomar bright quasar survey and other complete quasar surveys.» En: *ApJ* 269, págs. 352-374. DOI: [10.1086/161048](https://doi.org/10.1086/161048) (vid. pág. 2).
- Schmitt, H. R., J. L. Donley et al. (2003). «A Hubble Space Telescope Survey of Extended [O III] $\lambda 5007$ Emission in a Far-Infrared Selected Sample of Seyfert Galaxies: Observations». En: *ApJ S* 148.2, págs. 327-352. DOI: [10.1086/377440](https://doi.org/10.1086/377440). arXiv: [astro-ph/0307254](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0307254) [[astro-ph](#)] (vid. pág. 57).
- Schmitt, H. R. y A. L. Kinney (2000). «Jet Directions in Seyfert Galaxies: B and I Imaging Data». En: *ApJ S* 128.2, págs. 479-489. DOI: [10.1086/313397](https://doi.org/10.1086/313397). arXiv: [astro-ph/0002132](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0002132) [[astro-ph](#)] (vid. pág. 19).
- Schwarz, U. J. (1985). «HI observations of the peculiar galaxy NGC 3718 and its companion NGC3729». En: *A&A* 142, págs. 273-288 (vid. pág. 45).
- Seigar, Marc S. et al. (2008). «Discovery of a Relationship between Spiral Arm Morphology and Supermassive Black Hole Mass in Disk Galaxies». En: *ApJ* 678.2, pág. L93. DOI: [10.1086/588727](https://doi.org/10.1086/588727). arXiv: [0804.0773](https://arxiv.org/abs/0804.0773) [[astro-ph](#)] (vid. pág. 90).

Bibliografía

- Sérsic, Jose Luis (1968). *Atlas de Galaxias Australes* (vid. pág. 37).
- Seyfert, Carl K. (1943). «Nuclear Emission in Spiral Nebulae.» En: *ApJ* 97, pág. 28. DOI: [10.1086/144488](https://doi.org/10.1086/144488) (vid. pág. 2).
- Shabala, Stanislav S., Sugata Kaviraj y Joseph Silk (2011). «Active galactic nucleus feedback drives the colour evolution of local galaxies». En: *MNRAS* 413.4, págs. 2815-2826. DOI: [10.1111/j.1365-2966.2011.18353.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2011.18353.x). arXiv: [1102.3464](https://arxiv.org/abs/1102.3464) [astro-ph.CO] (vid. pág. 20).
- Shlosman, Isaac, Mitchell C. Begelman y Julian Frank (1990). «The fuelling of active galactic nuclei». En: *Nature* 345.6277, págs. 679-686. DOI: [10.1038/345679a0](https://doi.org/10.1038/345679a0) (vid. pág. 22).
- Simoës Lopes, Ramiro D. et al. (2007). «A Strong Correlation between Circumnuclear Dust and Black Hole Accretion in Early-Type Galaxies». En: *ApJ* 655.2, págs. 718-734. DOI: [10.1086/510064](https://doi.org/10.1086/510064). arXiv: [astro-ph/0610380](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0610380) [astro-ph] (vid. págs. 22, 23, 110).
- Singh, R. et al. (2013). «The nature of LINER galaxies: Ubiquitous hot old stars and rare accreting black holes». En: *A&A* 558, A43, A43. DOI: [10.1051/0004-6361/201322062](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201322062). arXiv: [1308.4271](https://arxiv.org/abs/1308.4271) [astro-ph.GA] (vid. pág. 2).
- Smith, Rachel et al. (2012). «Infrared surface photometry of dwarf galaxies in Fornax». En: *MNRAS* 420.4, págs. 3412-3426. DOI: [10.1111/j.1365-2966.2011.20266.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2011.20266.x) (vid. pág. 38).
- Soltan, A. (1982). «Masses of quasars.» En: *MNRAS* 200, págs. 115-122. DOI: [10.1093/mnras/200.1.115](https://doi.org/10.1093/mnras/200.1.115) (vid. pág. 3).
- Sosa-Brito, Rafael M. et al. (2001). «Integral Field Near-Infrared Spectroscopy of a Sample of Seyfert and LINER Galaxies. I. The Data». En: *ApJ S* 136.1, págs. 61-98. DOI: [10.1086/321796](https://doi.org/10.1086/321796). arXiv: [astro-ph/0104197](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0104197) [astro-ph] (vid. pág. 98).
- Sparke, Linda S. et al. (2009). «The Remarkable Warped and Twisted Gas Disk in NGC 3718». En: *AJ* 137.4, págs. 3976-3992. DOI: [10.1088/0004-6256/137/4/3976](https://doi.org/10.1088/0004-6256/137/4/3976). arXiv: [0902.2492](https://arxiv.org/abs/0902.2492) [astro-ph.GA] (vid. pág. 45).
- Spinoglio, Luigi y Juan Antonio Fernández-Ontiveros (2019). «AGN types and unification model». En: *arXiv e-prints*, arXiv:1911.12176, arXiv:1911.12176. arXiv: [1911.12176](https://arxiv.org/abs/1911.12176) [astro-ph.GA] (vid. págs. 7, 11).
- Spoon, H. W. W. et al. (2000). «Mid-infrared ISO spectroscopy of NGC 4945». En: *A&A* 357, págs. 898-908. arXiv: [astro-ph/0003457](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0003457) [astro-ph] (vid. págs. 17, 88).
- Springel, Volker, Tiziana Di Matteo y Lars Hernquist (2005). «Black Holes in Galaxy Mergers: The Formation of Red Elliptical Galaxies». En: *ApJ* 620.2, págs. L79-L82. DOI: [10.1086/428772](https://doi.org/10.1086/428772). arXiv: [astro-ph/0409436](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0409436) [astro-ph] (vid. pág. 20).
- Storchi-Bergmann, Thaisa, Rosa M. González Delgado et al. (2001). «Circumnuclear Stellar Population, Morphology, and Environment of Seyfert 2 Galaxies: An

Bibliografía

- Evolutionary Scenario». En: *ApJ* 559.1, págs. 147-156. DOI: [10.1086/322290](https://doi.org/10.1086/322290). arXiv: [astro-ph/0105538](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0105538) [[astro-ph](#)] (vid. pág. 19).
- Storchi-Bergmann, Thaisa y Allan Schnorr-Müller (2019). «Observational constraints on the feeding of supermassive black holes». En: *Nature Astronomy* 3, págs. 48-61. DOI: [10.1038/s41550-018-0611-0](https://doi.org/10.1038/s41550-018-0611-0). arXiv: [1904.03338](https://arxiv.org/abs/1904.03338) [[astro-ph.GA](#)] (vid. págs. 22, 23, 107).
- Taga, Masatoshi y Masanori Iye (1998). «Orbital motion of a massive object in a dense stellar system». En: *MNRAS* 299.1, págs. 111-117. DOI: [10.1046/j.1365-8711.1998.01753.x](https://doi.org/10.1046/j.1365-8711.1998.01753.x) (vid. págs. 23, 24, 118, 119).
- Tanaka, M. et al. (1989). «Infrared spectroscopy of interstellar molecular hydrogen - Decomposition of thermal and fluorescent components». En: *ApJ* 336, págs. 207-211. DOI: [10.1086/167006](https://doi.org/10.1086/167006) (vid. pág. 79).
- Terlevich, R. et al. (1995). «The starburst model for active galactic nuclei-II. The nature of the lag». En: *MNRAS* 272.1, págs. 198-212. DOI: [10.1093/mnras/272.1.198](https://doi.org/10.1093/mnras/272.1.198) (vid. pág. 2).
- Terlevich y Cid Fernandes (2003). «The Starburst-AGN Connection. Discussion Session». En: *Star Formation Through Time*. Ed. por Enrique Perez, Rosa M. Gonzalez Delgado y Guillermo Tenorio-Tagle. Vol. 297. Astronomical Society of the Pacific Conference Series, pág. 373 (vid. pág. 2).
- Tremaine, S. et al. (2002). «The Slope of the Black Hole Mass versus Velocity Dispersion Correlation». En: *ApJ* 574, págs. 740-753. DOI: [10.1086/341002](https://doi.org/10.1086/341002). eprint: [astro-ph/0203468](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0203468) (vid. págs. 1, 19, 90).
- Tristram, Konrad R. W. et al. (2014). «The dusty torus in the Circinus galaxy: a dense disk and the torus funnel». En: *A&A* 563, A82, A82. DOI: [10.1051/0004-6361/201322698](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201322698). arXiv: [1312.4534](https://arxiv.org/abs/1312.4534) [[astro-ph.GA](#)] (vid. pág. 12).
- Tueller, J. et al. (2008). «Swift BAT Survey of AGNs». En: *ApJ* 681.1, págs. 113-127. DOI: [10.1086/588458](https://doi.org/10.1086/588458). arXiv: [0711.4130](https://arxiv.org/abs/0711.4130) [[astro-ph](#)] (vid. pág. 11).
- Van Der Laan, Tessel et al. (2012). «Formation and Evolution of Circumnuclear Starburst rings». En: *American Astronomical Society Meeting Abstracts #219*. Vol. 219. American Astronomical Society Meeting Abstracts, pág. 323.02 (vid. pág. 111).
- Veron-Cetty, M. -P. y P. Veron (1989). «A Catalogue of Quasars and Active Nuclei (4th Edition).» En: *European Southern Observatory Scientific Report* 7, pág. 1 (vid. pág. 89).
- Wandel, Amri (2001). «Black Holes of Active and Quiescent Galaxies. I. The Black Hole-Bulge Relation Revisited». En: *The Astrophysical Journal* 565. DOI: [10.1086/338134](https://doi.org/10.1086/338134) (vid. págs. 107, 108).
- Wang, J. et al. (2019). «Two New “Turn-off” Changing-look Active Galactic Nuclei and Implication on “Partially Obscured” AGNs». En: *ApJ* 887.1, 15, pág. 15. DOI: [10.3847/1538-4357/ab4d90](https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab4d90). arXiv: [1910.02392](https://arxiv.org/abs/1910.02392) [[astro-ph.GA](#)] (vid. pág. 10).

Bibliografía

- Whiteoak, J. B. (1986). «NGC 4945 - a galaxy with a nucleus full of surprises.» En: *Proceedings of the Astronomical Society of Australia* 6, págs. 467-470 (vid. pág. 89).
- Whiteoak, J. B. y F. F. Gardner (1979). «Optical line studies of the nuclei of NGC 4945 and 5128». En: *Proceedings of the Astronomical Society of Australia* 3.5-6, págs. 319-321 (vid. pág. 89).
- Young, J. S. y N. Scoville (1982). «On the origin of molecular cloud rings in spiral galaxies - CO observations of NGC 7331 and NGC 2841». En: *ApJ* 260, págs. L41-L44. DOI: [10.1086/183866](https://doi.org/10.1086/183866) (vid. pág. 52).
- Young, Judith S. et al. (1989). «Global Properties of Infrared Bright Galaxies». En: *ApJ* S 70, pág. 699. DOI: [10.1086/191355](https://doi.org/10.1086/191355) (vid. pág. 14).
- Zaw, Ingyin, Glennys R. Farrar y Jenny E. Greene (2009). «Galaxies Correlating with Ultra-High Energy Cosmic Rays». En: *ApJ* 696.2, págs. 1218-1229. DOI: [10.1088/0004-637X/696/2/1218](https://doi.org/10.1088/0004-637X/696/2/1218). arXiv: [0806.3470](https://arxiv.org/abs/0806.3470) [astro-ph] (vid. pág. 89).