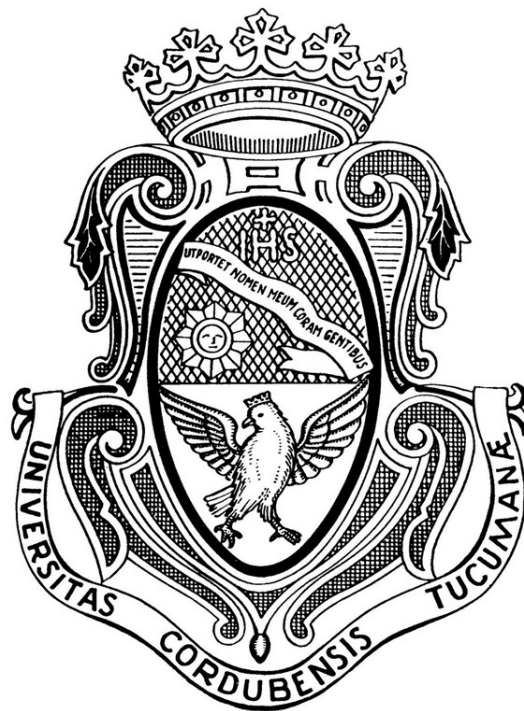


UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA
Facultad de Matemática, Astronomía, Física y Computación

Trabajo Especial de Licenciatura en Astronomía

Estudio infrarrojo de la galaxia activa NGC 2992



Autora: Selene Levis

Directora: Dra. Gaia Gaspar

Basado en datos del Observatorio Gemini



Esta obra está bajo una *Licencia Creative Commons Atribución-CompartirIgual 4.0 Internacional*.

A mi abuelo

Fuiste un cuento breve que leeré infinitas veces

Resumen

NGC 2992 es una galaxia que posee un núcleo activo de tipo Seyfert con coordenadas (J2000) $\alpha = 09^{\text{h}} 45^{\text{m}} 42.045^{\text{s}}$ y $\delta = -14^{\circ} 19' 34.90''$. Diferentes estudios sobre esta galaxia han presentado perfiles asimétricos, curvas distintas de velocidad radial de gas, variabilidad en su magnitud medida y submasividad del agujero negro supermasivo que hospeda. En el contexto de este trabajo, a partir de observaciones espectrales e imágenes en el infrarrojo cercano obtenidas con el instrumento *Flamingos-2* ubicado en el Observatorio Gemini, se busca realizar una caracterización estructural para conocer las diferentes componentes que la conforman, así como también contribuir al escenario de variabilidad, sumando un punto de comparación a los reportes que se encuentran en la literatura científica.

Abstract

NGC 2992 is a galaxy that has an active nucleus of the Seyfert type with $\alpha = 09^{\text{h}} 45^{\text{m}} 42.045^{\text{s}}$ y $\delta = -14^{\circ} 19' 34.90''$ (J2000) coordinates. Different studies on this galaxy have presented asymmetric profiles, different radial gas velocity curves, variability in its magnitude and submassiveness of the supermassive black hole it hosts. This work, based on spectral observations and near-infrared images obtained with the *Flamingos-2* instrument located at the Gemini Observatory, a structural characterization is sought to determine the different components that make it up, as well as contribute to the variability context, adding a point of comparison to the reports found in the scientific literature.

Índice general

Resumen	III
1. Introducción	2
1.1. Núcleos Activos de Galaxias	2
1.1.1. AGN tipo Seyfert y modelo unificado	3
1.2. Características del infrarrojo	6
1.3. Caracterización de NGC 2992	8
1.3.1. Marco histórico	9
2. Observaciones y reducción	20
2.1. Observatorio Gemini	20
2.1.1. Instrumento: Flamingos-2	21
2.2. Datos infrarrojos	22
2.3. Reducción fotométrica	23
2.3.1. Calibración en flujo	27
2.4. Reducción espectroscópica	34
2.4.1. Reducción del espectro bidimensional	35
2.4.2. Extracción del espectro unidimensional	38
2.4.3. Corrección telúrica	39
3. Resultados y análisis	43
3.1. Caracterización estructural de NGC 2992	43
3.1.1. Perfil espacial	43
3.1.2. Curva de velocidad radial de gas molecular	48
3.1.3. Espectro unidimensional descentrado	51
3.2. Escenario de variabilidad en NGC 2992	53
3.2.1. Magnitud nuclear en banda J	53
3.2.2. Comparación de la magnitud con reportes anteriores	54

Índice general	1
3.2.3. Ajuste de componentes en la línea de emisión Br γ	57
3.3. Reservorios de material	60
4. Conclusiones	63
Referencias	66

Capítulo 1

Introducción

1.1. Núcleos Activos de Galaxias

En el Universo existen más de cien mil millones de galaxias, conformadas por polvo, gas interestelar, estrellas con sus sistemas planetarios y, en muchos casos, un agujero negro supermasivo (*Supermasive Black Hole* o SMBH por sus siglas en inglés) en su centro, unidos por la fuerza de gravedad. En el campo observacional, se espera que la emisión de las galaxias se deba a procesos estelares, pero ocurre que existen galaxias en el universo cuya emisión no puede ser explicada sólo con ellos. El escenario aceptado al día de la fecha es el de un SMBH en el centro de la galaxia huésped acreta materia. A estas regiones centrales se las denomina núcleos activos de galaxias (*Active Galaxy Nuclei* o AGNs por sus siglas en inglés).

El trabajo pionero que da lugar a la existencia de los AGNs fue desarrollado por Fath (1909) quien, a partir de una serie de observaciones realizadas en el Observatorio Lick, buscó dar una explicación a las diferentes componentes espectrales de las llamadas “nebulosas espirales” con el fin de demostrar que sus espectros se debían a un conjunto de estrellas no resueltas, sin la presencia de líneas en emisión típicas de espectros de nebulosas gaseosas. Sin embargo, fue el caso de NGC 1068, cuyo espectro contenía no sólo la contribución estelar, sino también líneas en emisión, abriendo el camino al estudio que prospera hasta la actualidad sobre los AGNs.

Seyfert (1943) estudió un conjunto de galaxias que contenían características similares a las observadas en NGC 1068 por Fath (1909). El autor concluyó que el espectro similar al de nebulosas planetarias, que se superponía al espectro de la contribución estelar caracterizado por la presencia de líneas de absorción, provenía de una región compacta ubicada en el centro de estas galaxias. El ancho de las líneas en emisión causado por el efecto Doppler revelaba velocidades muy superiores a las

correspondientes a estrellas en galaxias de tipo espiral, indicando así la presencia de un fuerte potencial gravitatorio, causado por un objeto compacto y masivo, que provocaba altas velocidades de rotación del gas caliente ubicado en la región nuclear.

1.1.1. AGN tipo Seyfert y modelo unificado

Desde que se conoce la existencia de los núcleos activos, los diferentes estudios realizados en la literatura científica han llevado a clasificarlos en categorías basadas en sus propiedades observacionales.

Dentro de los tipos de AGNs que se observan, las galaxias espirales que presentan un núcleo excesivamente brillante son denominadas de tipo Seyfert, en honor a su descubridor, el astrónomo estadounidense Carl Seyfert. Esta clasificación se divide originalmente en Seyfert tipo 1 y tipo 2 (Khachikian y Weedman, 1974), donde el continuo en los espectros de tipo 2 suele ser débil y en su mayoría estelar, mientras que en los espectros de tipo 1, además de la contribución estelar, se tiene una ley de potencias hacia el ultravioleta (UV) provocada por la emisión de un disco de material que se forma alrededor del SMBH conocido como disco de acreción. Las líneas de emisión en ambos casos son causadas por la fotoionización que se da en las nubes próximas al disco de acreción, conocidas como región de líneas anchas (*Broad Line Region* o BLR por sus siglas en inglés) y región de líneas angostas (*Narrow Line Region*, abreviada NLR, también por sus siglas en inglés). En particular, la componente angosta de las líneas proviene de la NLR, mientras que la componente ancha se origina en la BLR. En el caso de los AGN Seyfert 2, las líneas de emisión se ven completamente dominadas por la componente angosta y las líneas anchas no están presentes, en tanto que en los AGN Seyfert 1 se ven dominadas por la componente ancha y las líneas angostas están superpuestas a las anchas. En la Figura 1.1 se presenta un espectro típico de AGN Seyfert 1 y uno de AGN Seyfert 2.

Hace algunas décadas, se planteó que esta clasificación guardaba estrecha relación con la inclinación de la región central con respecto a la línea de la visual. Antonucci (1993) propuso un escenario unificado de AGN que, si bien ha sufrido modificaciones a lo largo de los años, ha sido de gran utilidad para explicar el fenómeno. La idea del modelo unificado, como se puede observar en la Figura 1.2, consiste en un SMBH rodeado por un disco de acreción que está circundado, a su vez, por una nube de polvo ópticamente gruesa llamada toroide que, en el caso de algunos AGNs, no permite ver la zona central. Por encima y por debajo de esta región nuclear se tiene

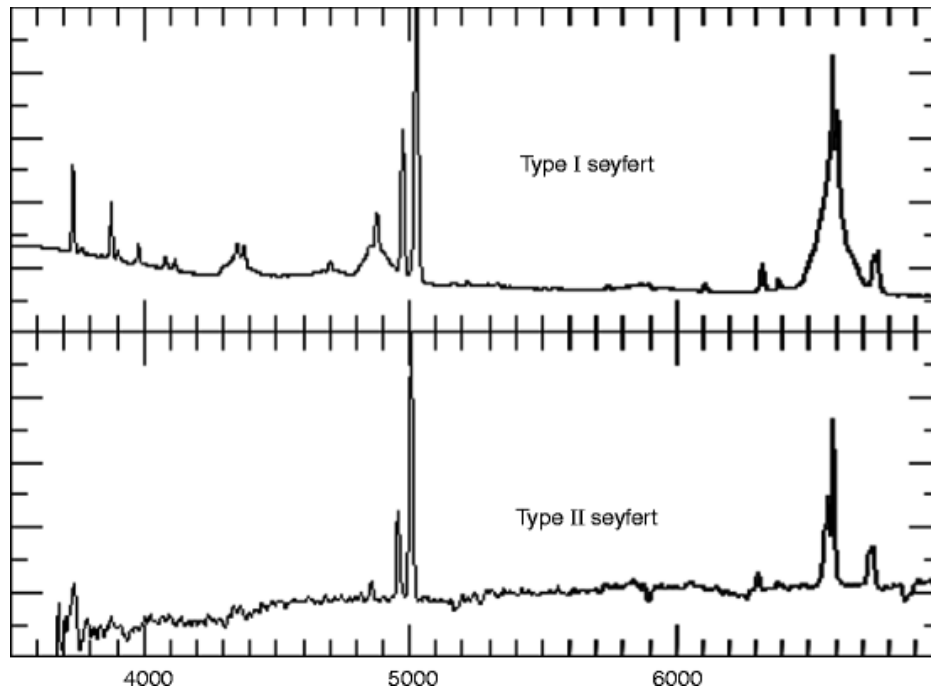


Figura 1.1: Espectros típicos de Seyfert tipo 1 (panel superior) y Seyfert tipo 2 (panel inferior) extraída de Courvoisier (2013). El eje horizontal corresponde a longitud de onda en unidades de angstrom y el eje vertical es flujo normalizado. En el espectro de una galaxia Seyfert tipo 1 se observa la ley de potencias hacia el UV en el continuo y el ancho apreciable en las líneas de emisión de hidrógeno ionizado.

una región de nubes más próxima, la BLR, y otra más alejada, la NLR. Además, algunos AGN muestran una eyección de materia y energía que da origen a un *jet*, el cual en general se observa en ondas de radio (Beckmann y Shrader, 2012). Este modelo expone que las diferencias observadas entre los diferentes tipos, se deben a distintas orientaciones del AGN con respecto a la línea de visión del observador.

Una de las modificaciones más importantes al modelo unificado que se encuentra en la literatura científica fue expuesta por Nenkova et al. (2008). Los autores propusieron que la estructura toroidal que rodea a la región nuclear no está compuesta de una nube homogénea, sino que sería una estructura más bien grumosa, como se ve en la Figura 1.3. Los resultados de este artículo muestran un buen acuerdo con los de Krolik y Begelman (1988) respecto a que el polvo no podría sobrevivir en un toroide homogéneo. Si el toroide fuese homogéneo y suponiendo que el material allí tuviese velocidades del orden de los 100 km s^{-1} o mayores, la temperatura del polvo sería del orden de 1×10^6 Kelvin, la cuál está por encima de la temperatura de sublimación del polvo, que es de aproximadamente 2000 K . Esto indica que el toroide no podría tener una estructura homogénea, sino que debería estar formado por nubes discretas ópticamente gruesas. Este tipo de resultados ponen en tela de

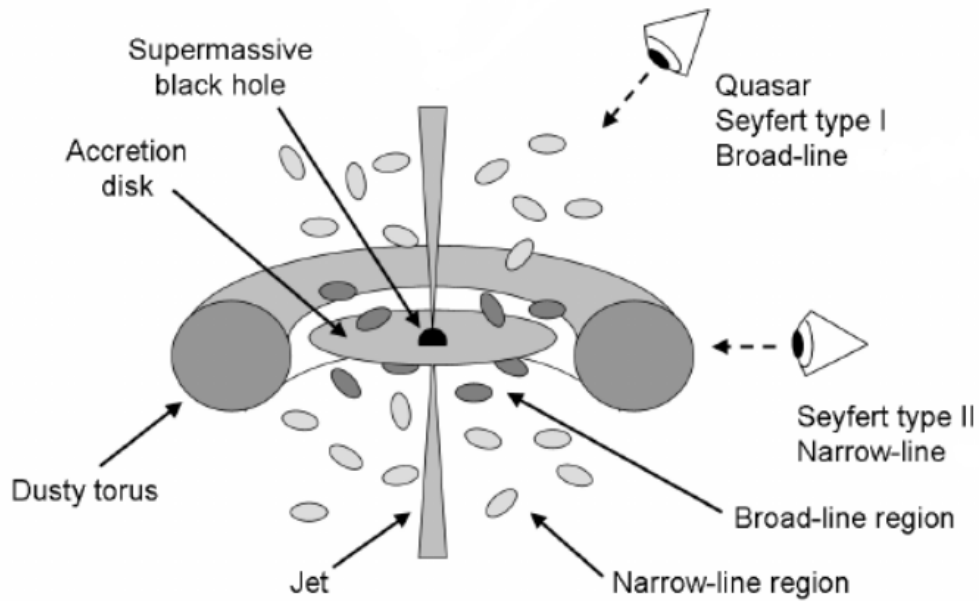


Figura 1.2: Figura extraída de González (2017). Esquema del modelo unificado de AGN.

juicio al modelo unificado de Antonucci, ya que siguiendo el razonamiento del toroide grueso, la diferencia entre los AGN Seyfert 1 y 2 podría no deberse sólo a un ángulo de inclinación de la galaxia observada, sino a una determinada extinción en la línea de la visual causada por el material del toro. Así, al variar dicha cantidad de material debido a la rotación del toroide, la extinción cambiaría y con ella su clasificación de tipo. Esto podría ser aún más influyente para ángulos de visión que rozan con el borde del toroide oscurecedor.

Por otra parte, además de los tipos Seyfert 1 y 2, Osterbrock (1981) agregó dos clasificaciones intermedias. Los Seyfert 1.8, que muestran las componentes anchas débiles de las líneas de emisión $H\alpha$ y $H\beta$, y los Seyfert 1.9, que muestran sólo la componente ancha débil en $H\alpha$. En Trippe et al. (2010) se realizó un estudio en el rango espectral óptico, con el fin de determinar la razón por la que un AGN puede presentar un tipo de emisión intermedia, llegando a la conclusión de que existen dos fuertes hipótesis. Por un lado, en el caso de los Seyfert 1.9, puede ocurrir que la componente ancha de $H\beta$, la cual es más débil que la de $H\alpha$, está extinguida por enrojecimiento debido a una línea de la visual que “roza” con el borde del toroide, alcanzando a extinguir $H\beta$ pero no $H\alpha$. Podría ocurrir también que el continuo ionizante del AGN es “bajo” o “débil” y por consiguiente la ionización en la BLR es baja, provocando que la componente ancha de $H\beta$ al ser débil se pierda en el ruido del espectro. Por otro lado, en el caso de las Seyfert 1.8 el razonamiento es el mismo,

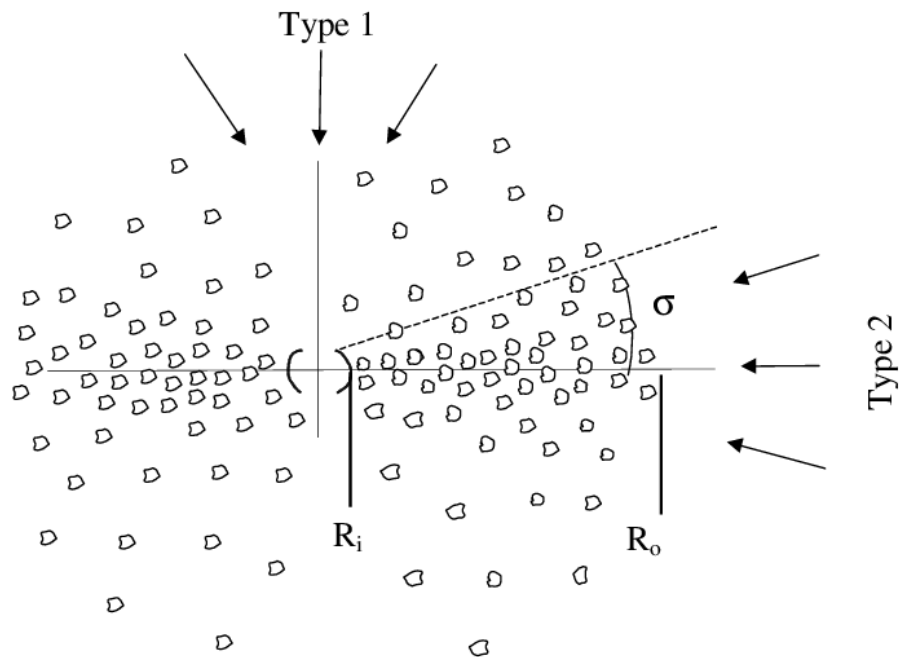


Figura 1.3: Esquema del toroide grueso expuesto por Nenkova et al. (2008). R_i y R_o corresponden a los límites interno y externo del toro, respectivamente.

pero aplicado de manera que debilita dichas componentes sin hacerlas desaparecer por completo.

1.2. Características del infrarrojo

Una particularidad muy interesante de los AGNs es que emiten en todo el espectro electromagnético. Al estudiar su distribución espectral de energía se pueden discretizar cada una de las componentes que contribuyen al continuo en los distintos rangos espectrales.

El disco de acreción emite en el UV/óptico como consecuencia de la caída libre de material hacia el SMBH que produce fricción generando un progresivo aumento de la temperatura que causa que dicho material emita radiación de forma similar a un cuerpo negro. Esta estructura posee diferentes temperaturas: en la zona más cercana al SMBH está más caliente y emite radiación en el UV, mientras que en la región más externa está más fría y emite en el óptico y hasta en el infrarrojo (*infrared* o IR por sus siglas en inglés) (Netzer, 1990). La emisión en rayos X procede una corona de electrones muy energéticos ubicada en la región más interna del disco de acreción. Por otro lado, la emisión en el infrarrojo cercano (*near-infrared* o NIR por sus siglas en inglés) e infrarrojo medio (*mid-infrared* o MIR por sus siglas en inglés)

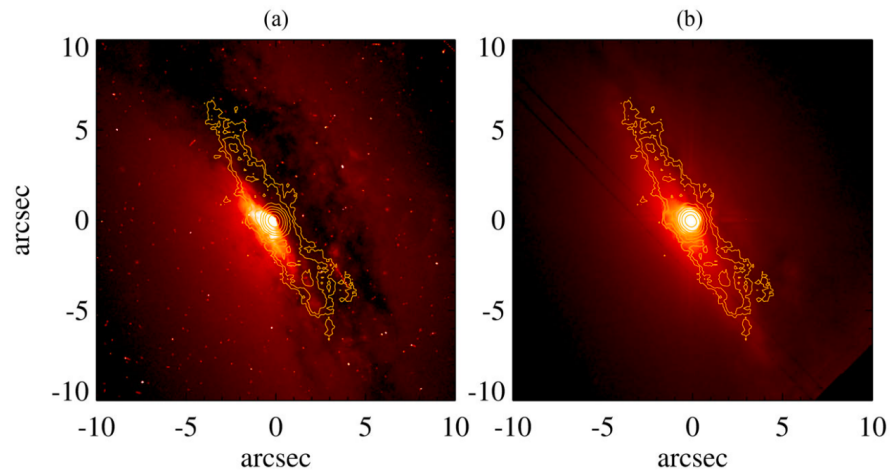


Figura 1.4: Figura extraída de García-Bernete et al. (2015). Imagen óptica de NGC 2992 (panel izquierdo) e imagen infrarroja de NGC 2992 (panel derecho).

está dada por el gas y el polvo presente en la estructura toroidal, debido a que la emisión del disco de acreción, de la BLR y de la corona es reprocesada y reemitida. La radiación en radio es causada por la presencia de *jets* de electrones y positrones, moviéndose a velocidades cercanas a la de la luz en direcciones perpendiculares al disco de acreción. En este último caso, las partículas eyectadas se aceleran por la acción de fuertes campos magnéticos, asociados al AGN, y emiten lo que se conoce como radiación sincrotrón.

En la práctica, la mayoría de los trabajos científicos están destinados a estudiar una parte limitada de todo el espectro electromagnético, es decir que al observar una galaxia con AGN, se examina sólo una fracción de la emisión total del mismo. En general, la mayoría de los trabajos que se encuentran en la literatura están realizados en el rango espectral óptico. Sin embargo, existen algunas virtudes de observar otros rangos espectrales. En particular, en el IR las ventajas son:

- La extinción debida al polvo es mucho menor que la observada en el óptico. En particular, en Mathis (1990) se expone que la extinción provocada por polvo en la banda K del IR es del 10% de la extinción observada en la banda V del óptico. Un ejemplo de ello muestran García-Bernete et al. (2015) (ver Figura 1.4) quienes observan la diferencia en la extinción por polvo en NGC 2992 al comparar una imagen obtenida en el rango óptico con una imagen en el NIR. Observar en el IR permite penetrar más profundamente en las regiones más extinguidas, lo cual resulta de mucha utilidad para estudiar a los AGN Seyfert 2 y sus entornos, ya que se trata de regiones fuertemente oscurecidas (Goulding y Alexander, 2009).

- En las bandas NIR, además de líneas de gas ionizado, hay líneas del hidrógeno molecular que permiten el estudio de la cinemática del gas en una fase que presenta menos turbulencia que la fase ionizada. Esto se debe a que dado que el gas molecular tiene menor temperatura tiende a caer hacia el plano del sistema, ya sea el disco galáctico o el disco circumnuclear, por lo cual sólo tiene componente rotacional en su velocidad. Por el contrario, el gas ionizado al estar a mayor temperatura tiende a expandirse formando, por ejemplo, *outflows* y haciendo que la presencia de estas componentes cinemáticas dificulten el modelado del perfil de líneas del espectro, debido a mayor turbulencia, consecuencia directa de una mayor dispersión de velocidad de las partículas.
- Se puede observar la presencia de líneas corales, las cuales entre otras aplicaciones permiten clasificar una galaxia como activa, debido a que para que estas líneas se produzcan se necesita un continuo ionizante duro, es decir, fotones altamente energéticos que contribuyen al continuo en el UV (Goulding et al., 2012).
- Es posible estudiar la emisión del polvo calentado por el AGN, debido a que en conjunto con la emisión de la región externa del disco de acreción y la contribución de la población estelar vieja conforman las principales contribuciones al continuo en el rango espectral del NIR.
- Es posible observar líneas de emisión de hidrógeno ionizado de la serie de Paschen y a la serie de Bracket, como por ejemplo $Br\gamma$ en $2.16 \mu m$.

1.3. Caracterización de NGC 2992

El objeto de estudio de este trabajo es NGC 2992 (ver Figura 1.5), una galaxia de tipo Sa (espiral sin barra central) observada desde el Hemisferio Sur y que alberga un núcleo activo de tipo Seyfert (Paturel, G. et al., 2003). Sus coordenadas (J2000) son $\alpha = 09^h 45^m 42.045^s$ y $\delta = -14^\circ 19' 34.90''$ (Skrutskie et al., 2006). El corrimiento al rojo reportado por Marinucci et al. (2018) es 0.0077 y la inclinación respecto a la línea de la visión del observador es de 70° . NGC 2992 es una de las tres galaxias que forma el sistema interactuante llamado Arp 245 (García-Bernetete et al., 2015), junto a NGC 2993 y A245N. La masa de su SMBH fue obtenida por Onori et al. (2017) con la técnica de reverberación, utilizando la componente ancha de la línea $Pa\beta$ ($\lambda_c = 1.28 \mu m$) con espectros conseguidos con el espectrómetro infrarro-

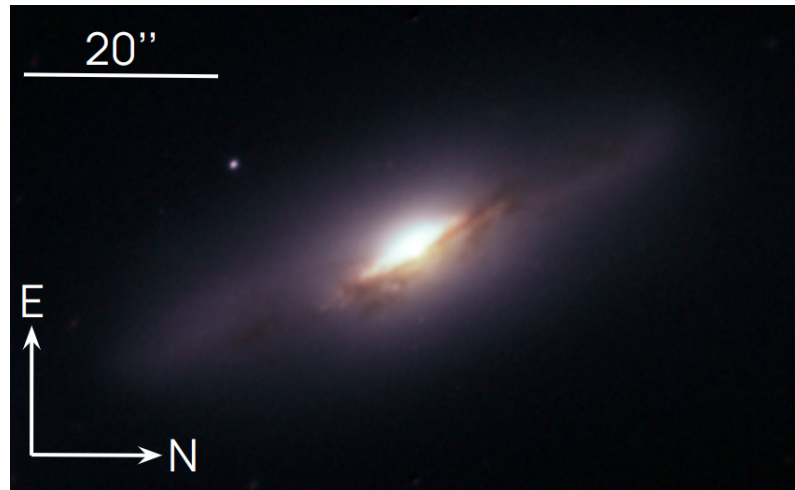


Figura 1.5: Imagen RGB de NGC 2992 obtenida a partir de las imágenes en banda J, H y Ks de Flamingos-2, Gemini Sur.

jo *Infrared Spectrometer And Array Camera* (ISAAC) ubicado en el Observatorio Europeo Austral en el año 2012, y es de $5.24 \times 10^6 M_{\odot}$.

1.3.1. Marco histórico

Escenario de variabilidad

Existen resultados científicos que hacen a NGC 2992 un objeto interesante de estudiar. En particular, desde que se la observó espectroscópicamente por primera vez, donde Veron et al. (1980), Ward et al. (1980) y Shuder (1980) la clasificaron como Seyfert 1.9 debido a la presencia de la componente ancha en la línea en emisión $H\alpha$ pero no en $H\beta$, ha presentado episodios de aparición y desaparición de la componente ancha en las líneas de hidrógeno ionizado en sus espectros, así como también variaciones en la magnitud nuclear medida fotométricamente a lo largo de los años.

Allen et al. (1999) presentaron espectros ópticos de NGC 2992 correspondientes a 1994 tomados con el telescopio de la Universidad Nacional Australiana (*Australian National University* o ANU por sus siglas en inglés), donde observaron que la galaxia había “perdido” la componente ancha de $H\alpha$, llevando así a una clasificación de tipo Seyfert 2. Posteriormente, un espectro de 1999 tomado por Gilli et al. (2000) mostró la recuperación de la componente ancha en $H\alpha$. Los autores estudiaron también la correlación entre la presencia de la componente ancha y el flujo de rayos X de la galaxia, encontrando que NGC 2992 estaba en un estado de alta emisión de rayos X cuando fue observada alrededor de 1980, pero que el flujo de rayos X había ido

Fecha	Componente ancha de $H\alpha$	Referencia
07/1977	D	Ward et al. (1980)
01/1979	D	Shuder (1980)
05/1988	D	Storchi Bergmann et al. (1990)
03/1991	ND	Marquez et al. (1998)
03/1994	ND	Allen et al. (1999)
04/1998	D	García-Lorenzo et al. (2001)
01/1999	D	Gilli et al. (2000)
01/2006	ND	Trippe et al. (2008)
12/2006	ND	Trippe et al. (2008)
06/2007	ND	Trippe et al. (2008)
02/2014	D	Schnorr-Müller et al. (2016)
02/2015	D	Mingozzi et al. (2019)
02/2018	D	Guolo et al. (2021)
03/2021	D	Guolo et al. (2021)
04/2021	D	Guolo et al. (2021)

Tabla 1.1: Reportes de aparición y desaparición de la componente ancha en la línea de emisión $H\alpha$. "D" significa detectada y "ND", no detectada.

disminuyendo lentamente con el tiempo y estaba en un mínimo en 1994. Para 1999, NGC 2992 había regresado nuevamente a su estado anterior de actividad en rayos X. Debido a esto, los autores postularon que estas variaciones eran causadas por diferentes fases de reconstrucción del disco de acreción central.

Trippe et al. (2008) estudiaron la posibilidad de que la variabilidad dependiera de cambios en el enrojecimiento y/o las densidades de columna de hidrógeno en la línea de visión, pero concluyeron que es poco probable que el enrojecimiento variable debido al polvo sea la causa del historial de variación de línea ancha de NGC 2992. Un cálculo simple que exponen los autores de la escala de tiempo de variación debido al polvo en una galaxia anfitriona, que se mueve a 300 km s^{-1} a través de una BLR de diez días luz de tamaño, da una escala de tiempo $\tau \sim 30$ años, demasiado larga para ser la causa de las variaciones observadas en sólo unos pocos años. Es por esto que propusieron que la fuerte correlación entre el flujo de la componente ancha de $H\alpha$ y el flujo de rayos X mostrado por Gilli et al. (2000), así como el hecho de que la densidad de la columna en la línea de visión se había mantenido prácticamente constante a pesar de las variaciones presentadas por NGC 2992, eran indicadores de

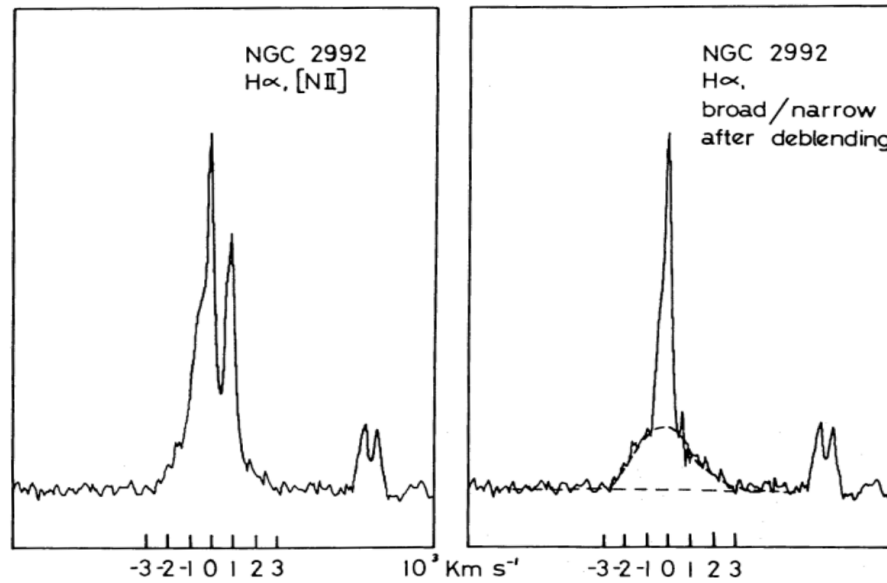


Figura 1.6: Figura extraída de Ward et al. (1980) donde se muestra el ajuste de la componente ancha de $H\alpha$ en un espectro de NGC 2992 correspondiente a 1977.

un origen intrínseco en la variabilidad de esta galaxia.

En las últimas cuatro décadas, diferentes trabajos mencionados en la Tabla 1.1, exponen la aparición y desaparición de la componente ancha en $H\alpha$. En particular, en la Figura 1.6 se muestra el ajuste de la componente ancha en $H\alpha$ en el espectro de NGC 2992 reportado por Ward et al. (1980). En la Figura 1.7 se muestra una imagen extraída de Guolo et al. (2021), donde se ven distintos ajustes de componentes sobre las líneas $H\alpha$ y $H\beta$ realizados en diferentes espectros de NGC 2992 obtenidos entre 2006 y 2021. Se observa que en 2006 $H\beta$ no presentaba componente ancha, mientras que a partir de los espectros de 2014 hasta la actualidad la componente ancha está presente, tanto en $H\alpha$ como en $H\beta$.

Por otra parte, en cuanto a los trabajos fotométricos encontrados en la literatura, Glass (1997) reportó variabilidad en los filtros infrarrojos J, H y K con observaciones del telescopio reflector de 1.9 m del Observatorio Astronómico de Sudáfrica en un período de aproximadamente 18 años, desde 1978 a 1996, utilizando una apertura nuclear de $12''$. En dicho período, la magnitud de NGC 2992 presentó variaciones de hasta 0.3, 0.4 y 0.6 magnitudes en los filtros J, H y K, respectivamente. El autor sugirió como hipótesis una variabilidad debida a que NGC 2992 podría tratarse de un híbrido entre una Seyfert intermedia y una galaxia con brotes estelares, causada por la etapa de interacción en la que se encuentra con la galaxia NGC 2993. Entre otros reportes de magnitud nuclear se encuentra el de Alonso-Herrero et al. (2001), quienes reportaron la magnitud de NGC 2992 en la banda J de (12.34 ± 0.09) con

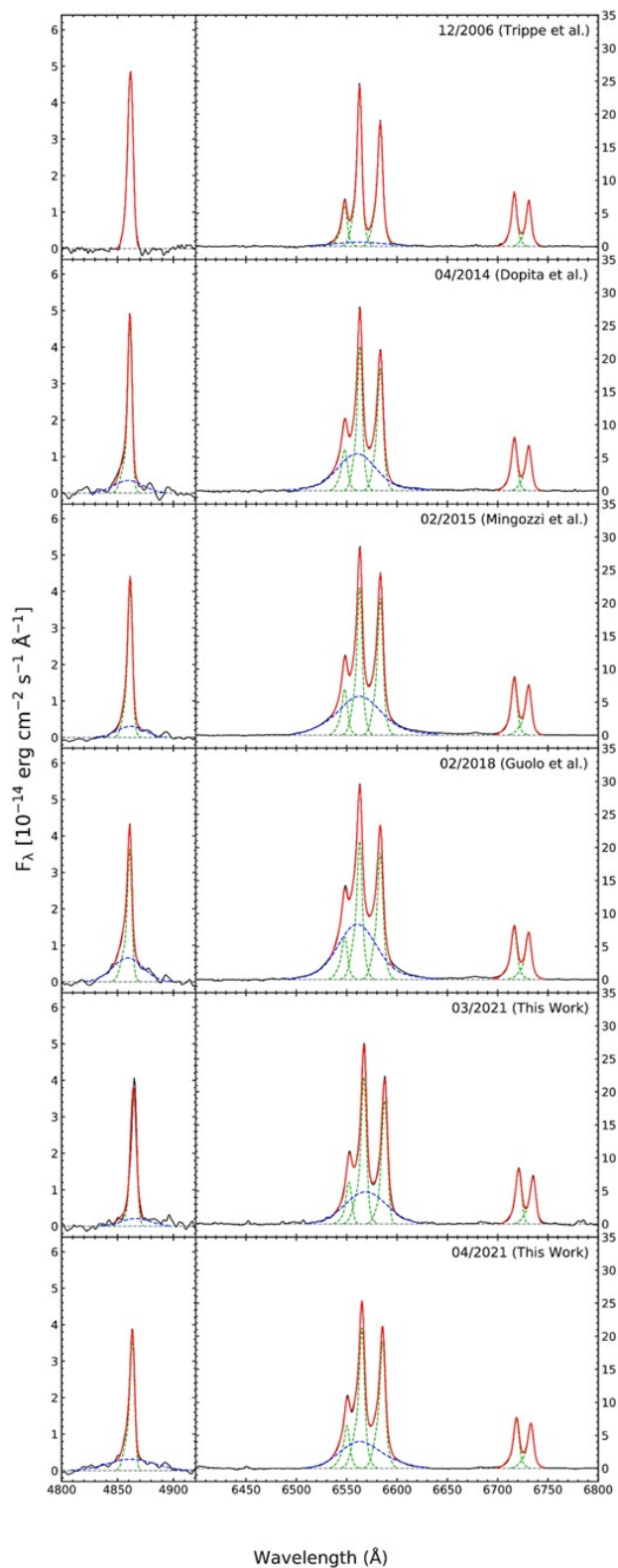


Figura 1.7: Figura extraída de Guolo et al. (2021) donde se muestra el ajuste de las componentes angosta y ancha sobre las líneas $H\beta$ (panel izquierdo) y $H\alpha$ (panel derecho) para diferentes espectros de NGC 2992, obtenidos entre 2006 y 2021.

observaciones obtenidas en 1998 con el telescopio infrarrojo del Reino Unido (*United Kingdom Infrared Telescope* o UKIRT por sus siglas en inglés) en una apertura nuclear de 3".

Consecuentemente, las principales hipótesis que dan explicación a la causa de este fenómeno son: por un lado, el hecho de que la variabilidad observada tanto fotométrica como espectroscópicamente pueda deberse a variaciones intrínsecas del AGN y, por otro lado, la posibilidad de que el origen de la variabilidad se deba al cambio en la extinción en la línea de la visual debido a la presencia del material que conforma las nubes discretas en el toroide oscurecedor. La primera de las hipótesis sería el resultado de diferentes factores que hacen variar la tasa de acreción del SMBH. Esta variación en la tasa de acreción impacta en la energía liberada en forma de fotones en todas las longitudes de onda del espectro por el agujero negro, la cual hace variar la emisión de las diferentes estructuras. Las primeras estructuras en mostrar variabilidad serán las más internas y luego las exteriores. Primero impactará en el disco de acreción, luego en la BLR y, por último, en el toroide y la NLR. En cambio, la segunda de las hipótesis se debería a procesos gravitacionales, en los cuales las nubes discretas de gas ionizado, polvo y/o gas molecular que forman las diferentes estructuras del AGN se mueven alrededor del centro de potencial, haciendo que varíe la cantidad de material que se encuentra en la línea de la visual. La diferencia principal entre ambas hipótesis radica en los tiempos involucrados en la variabilidad: la variación que se podría observar debido a la energía en forma de fotones que viajan a la velocidad de la luz involucra escalas temporales mucho menores que las causadas por cambios en la extinción.

En este trabajo se realiza el ajuste de componentes sobre la línea en emisión $Br\gamma$, la cual corresponde a una línea de hidrógeno ionizado, a partir de un espectro de NGC 2992 en banda K del infrarrojo cercano correspondiente a junio de 2021, a fines de reportar la presencia o no de la componente ancha en esta línea. Además, se mide la magnitud de NGC 2992 en diferentes aperturas para comparar con los reportes anteriores encontrados en la literatura científica. El objetivo es contribuir con nuevos resultados a intentar determinar el origen de la variabilidad nuclear teniendo como posibles escenarios los mencionados anteriormente.

Caracterización estructural de la región circumnuclear

Otra de las motivaciones que hacen interesante de estudiar a NGC 2992 radica en los resultados observacionales que indican falta de simetría entre las estructuras de la región interna de la galaxia.

En la Figura 1.8, extraída de Friedrich et al. (2010), se muestran las velocidades radiales obtenidas a partir de la línea de hidrógeno molecular correspondiente a espectros de ranura larga tomados con ISAAC a lo largo del eje principal de NGC 2992. Sobregraficada se encuentra una curva de velocidad radial dibujada a partir de datos del espectrógrafo infrarrojo para campo integral (*Spectrograph for Integral Field Observations in the Near Infrared* o SINFONI por su abreviación en inglés) también a lo largo del eje principal. Estos autores encuentran que la curva de velocidad radial muestra un fuerte aumento hasta un radio de $1.5''$ desde el pico de emisión hacia el suroeste (SO), seguido de una fuerte disminución hasta aproximadamente $2''$ y, posteriormente, una pendiente menos profunda. Friedrich et al. (2010) interpretaron de sus resultados que las regiones nuclear y circumnuclear están dinámicamente desacopladas. Además, hicieron pruebas cambiando el ángulo de posición de la ranura para corroborar que el desacople observado dentro de $1''$ se debiese a efectos cinemáticos y no fotométricos, lo que les permitió argumentar que esto no ocurre por un efecto de extinción. Consecuentemente, se evidencian dos centros diferentes.

Otro resultado que da lugar a una posible evidencia observacional de núcleo descentrado en NGC 2992 es reportado por Boisson et al. (2002). Los autores utilizaron un perfil de flujo logarítmico (ver Figura 1.9) que obtuvieron de la imagen espectral en banda H de la galaxia para determinar dónde extraer los espectros 1D del núcleo y las regiones a su alrededor. Al realizar este perfil de flujo, encontraron un núcleo distintivo junto a una componente galáctica asimétrica. Además, reportaron que en los $5''$ internos, la región NE puede ser parcialmente absorbida por la prominente franja de polvo que atraviesa la galaxia. A partir de la extracción de un espectro nuclear y dos extracciones a $1.5''$ del núcleo, uno hacia el NE y otro hacia el SO, encontraron que los espectros circumnucleares muestran una cinemática diferente: el espectro SO está desplazado hacia el rojo en aproximadamente 50 km s^{-1} , mientras que el espectro NE está desplazado hacia el azul en aproximadamente 15 km s^{-1} , respecto al espectro nuclear. La similitud hallada en los espectros circumnucleares los llevó a concluir la presencia de una población estelar homogénea externa a la región central.

García-Lorenzo et al. (2001) mostraron a partir de observaciones en el rango

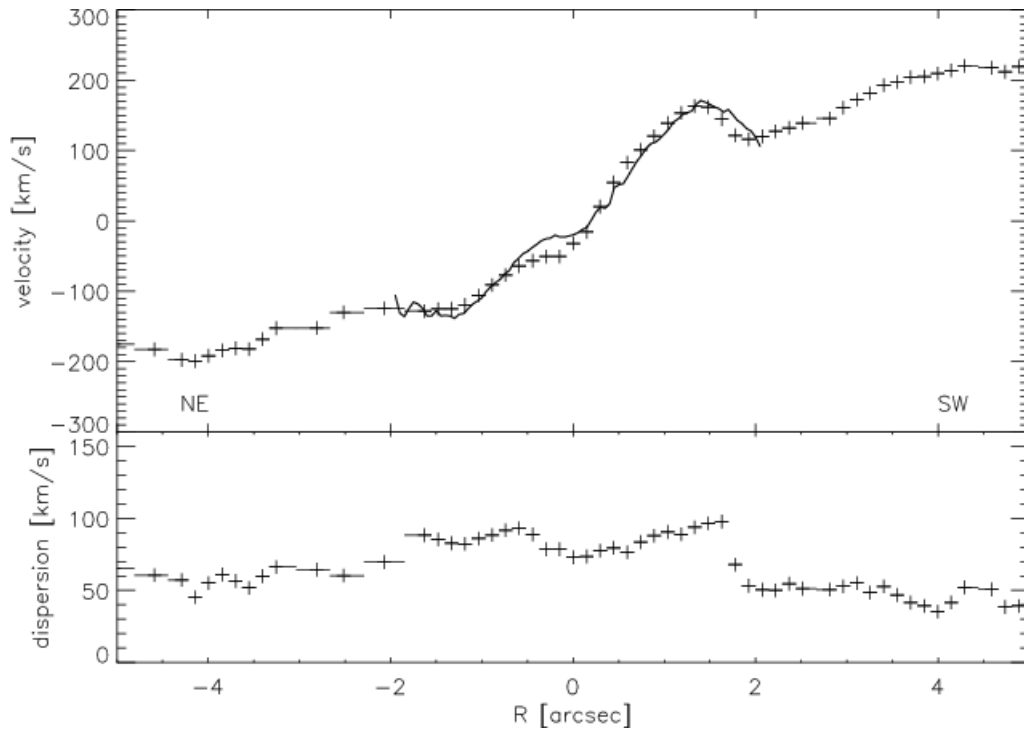


Figura 1.8: Figura extraída de Friedrich et al. (2010) donde se muestran las velocidades radiales (panel superior) y dispersiones de velocidad (panel inferior) correspondiente a espectros de NGC 2992 tomados con ISAAC a lo largo del eje principal. En el panel superior se superpone una curva de velocidad radial obtenida a partir de datos SINFONI.

espectral óptico, que el pico de emisión en NGC 2992 no coincide con el centro cinemático del gas. En la Figura 1.10 se puede observar el campo de velocidades de la componente estelar, donde con una cruz blanca se indica el pico de emisión óptico y en diferentes colores se muestra el efecto Doppler: la zona naranja/roja está alejándose y la parte azul acercándose, respecto de la velocidad sistémica de la galaxia. La línea de puntos indica la región con la velocidad sistémica. Es notable que el núcleo no parece coincidir con el centro cinemático del disco. Este resultado podría deberse a dos posibles causas: el pico de emisión óptico podría no coincidir con la posición del núcleo, ya que este podría estar detrás de la banda de polvo, o que el pico de emisión óptico sí coincidiera con la posición del núcleo y existan estructuras cinemáticamente desacopladas.

Lo que hace interesante la caracterización estructural de las regiones nuclear y circumnuclear es que, tanto en observaciones como en simulaciones, se deduce que la falta de simetría en las decenas de pársecs internos implicaría la pérdida de momento angular en el material circundante, dando lugar a la acreción eficiente del mismo.

A distintas escalas actúan diferentes mecanismos de remoción del momento angular del material. A escalas galácticas estos mecanismos están bien determinados:

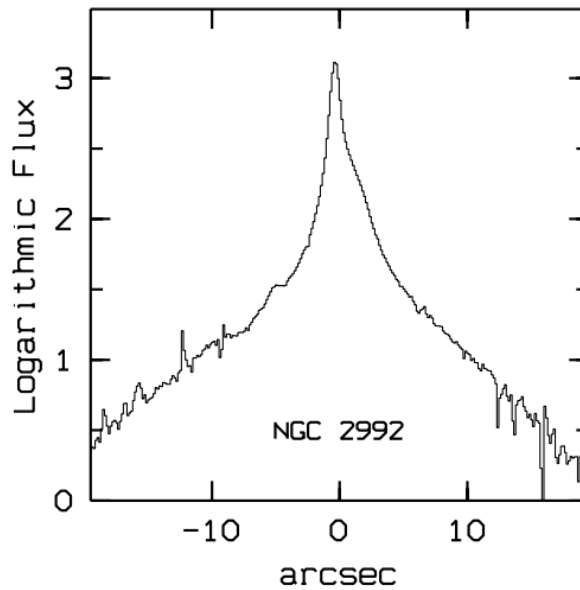


Figura 1.9: Figura extraída de Boisson et al. (2002) donde se muestra el perfil de flujo logarítmico de NGC 2992 obtenido a partir del espectro en banda H ($1.57\text{--}1.64\ \mu\text{m}$) del NIR.

seculares (como por ejemplo barras o brazos espirales) e interacciones (fusiones de galaxias). Diferentes trabajos como García-Burillo y Combes (2012) o Brum et al. (2017) toman muestras de galaxias que poseen AGN y estudian la dinámica y cinemática del gas en el kilopársec interno, con el objetivo de comprender el ciclo de abastecimiento de combustible AGN. En estos trabajos se evidencia que las barras nucleares o las estructuras de polvo como brazos espirales permiten remover el momento angular del material en escalas mayores a 100 pársecs. Luego, trabajos como Capelo y Dotti (2017) muestran que las interacciones también son un mecanismo de remoción del momento angular. Ellos usan simulaciones hidrodinámicas de fusiones de galaxias y encuentran que estas interacciones desencadenan grandes flujos de gas hacia las regiones centrales provocando ráfagas intensas de formación estelar.

Sin embargo, ninguno de los mecanismos mencionados anteriormente logra explicar qué sucede a escalas de las pocas decenas de pársecs. Las asimetrías entre las estructuras internas son propuestas como un mecanismo eficiente para estas regiones. Por ejemplo, Emsellem et al. (2015) realizan una simulación de una galaxia tipo Vía Láctea con un AGN y encuentran que la oscilación del centro de masa, la cual posee una amplitud máxima de 50 pársecs, hace que se desacoplen las estructuras internas. Los autores concluyen que la formación estelar nuclear se debe en gran medida al descentrado de las estructuras.

Por otro lado, en el escenario de coevolución entre la galaxia y el SMBH, es

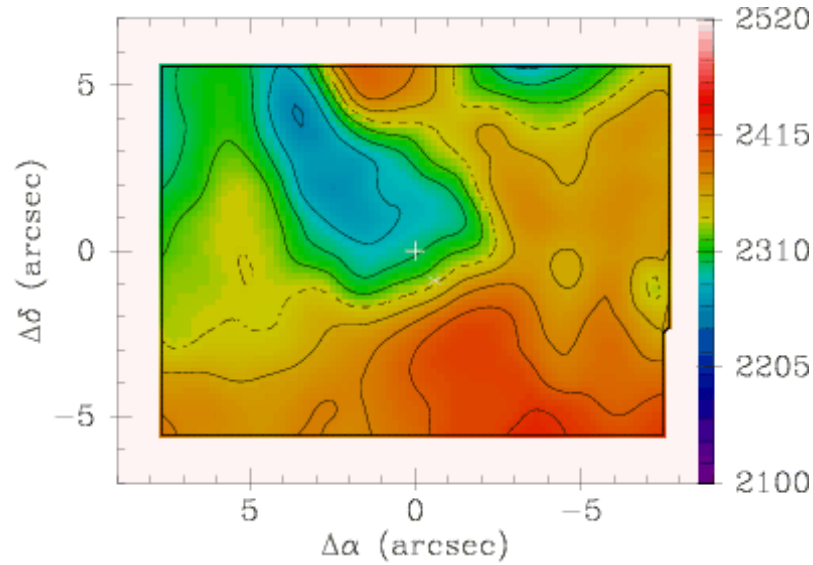


Figura 1.10: Figura extraída de García-Lorenzo et al. (2001) donde se muestra el campo de velocidades de la componente estelar de NGC 2992. El eje vertical derecho indica la velocidad del material en $km s^{-1}$ respecto del Universo local.

importante mencionar la relación $M - \sigma$, la cual fue propuesta por Merritt (1999) y evidencia una correlación empírica entre la dispersión de las velocidades estelares del bulbo de la galaxia (σ) y la masa del SMBH que hospeda en su centro (M). Esta relación sugiere que debería existir algún modelo de retroalimentación que mantenga la conexión entre los dos parámetros involucrados. Dos modelos diferentes que podrían explicarla son los llamados *feedback* y *feeding*. El *feedback* negativo de AGN se debe a que los fuertes vientos producidos por este último dan lugar a la inhibición de formación estelar en regiones externas, como el bulbo de la galaxia, mientras que el *feeding* explica cómo se mueve el material en las distintas escalas galácticas, llegando así a alimentar el SMBH.

La relación $M - \sigma$ fue estudiada por diversos autores, entre ellos se encuentra el *review* de Kormendy y Ho (2013), quienes a partir de observaciones obtenidas con el Telescopio espacial Hubble estudiaron diferentes correlaciones entre el SMBH y la galaxia huésped, entre ellas la relación $M - \sigma$. Woo et al. (2013) buscaron validar si las galaxias activas y las galaxias no-activas poseían la misma relación $M - \sigma$, a partir de una muestra de 72 galaxias inactivas y 25 con AGN. Como se ve en la Figura 1.11, estos autores plantearon que desde una perspectiva física no es obvio que ambas muestras deban seguir la misma relación $M - \sigma$, debido a que las galaxias activas se encuentran en una fase evolutiva de crecimiento continuo de su SMBH.

En la Figura 1.12 se observa el ajuste a la relación $M - \sigma$ para diferentes muestras: con línea sólida una muestra de galaxias no-activas de Kormendy y Ho (2013), con

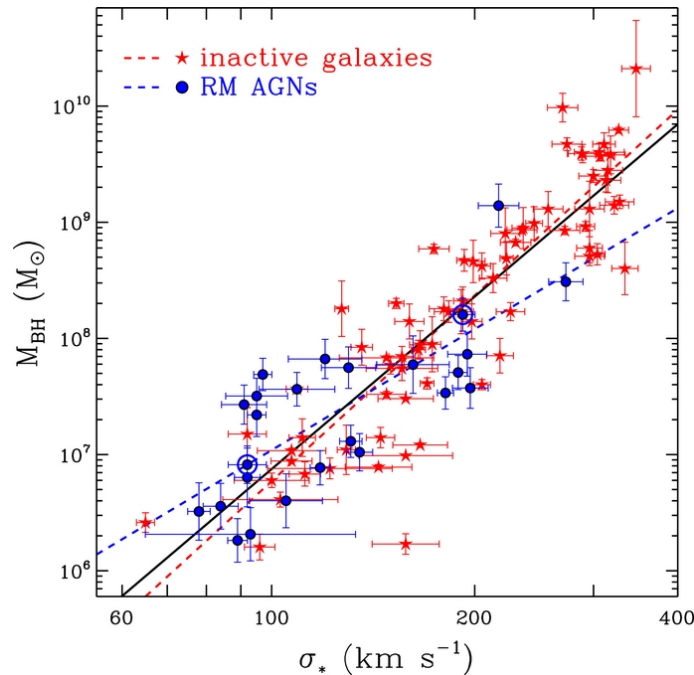


Figura 1.11: Figura extraída de Woo et al. (2013) donde se muestra la relación $M - \sigma$ para galaxias activas y no-activas. La línea discontinua roja corresponde al mejor ajuste para las galaxias no-activas, mientras que la línea discontinua azul muestra la relación de los AGN mapeados con reverberación. La línea continua negra corresponde al mejor ajuste para la muestra completa.

línea discontinua la muestra de galaxias correspondiente a van den Bosch (2016) y con línea de puntos y barras la muestra de galaxias con AGN de Woo et al. (2013). Superpuesto a estos ajustes, los puntos de color rosa y gris corresponden a las galaxias de la muestra de van den Bosch (2016) discriminando según la técnica utilizada para obtener la masa del SMBH, los puntos color celeste corresponden a la muestra de Ricci et al. (2017), y el punto color azul es la ubicación de NGC 2992 en la relación $M - \sigma$ obtenida a partir de los datos de Ricci et al. (2017). Es notable que NGC 2992 se encuentra por debajo de la relación $M - \sigma$ conocida para galaxias no-activas (Kormendy y Ho, 2013), lo que quiere decir que presentaría una dispersión de velocidades del bulbo alta en comparación a la masa que se esperaría que tenga su SMBH. Esto podría deberse a dos posibles causas: un sesgo dado por las diferentes técnicas con las que se obtiene la masa de los SMBH o una submasividad física real. Bajo la suposición de esta segunda causa y dado que existe evidencia observacional de un posible descentrado en las estructuras, lo que se traduciría en una oscilación del SMBH alrededor del centro de potencial galáctico que ayude a remover el momento angular del material circundante haciendo eficiente la acreción por parte del agujero negro, sumado a que en las muestras de control de galaxias no-activas se encuentra poco contenido de gas, es lógico preguntarse, dentro de la hipótesis de *feeding*, qué

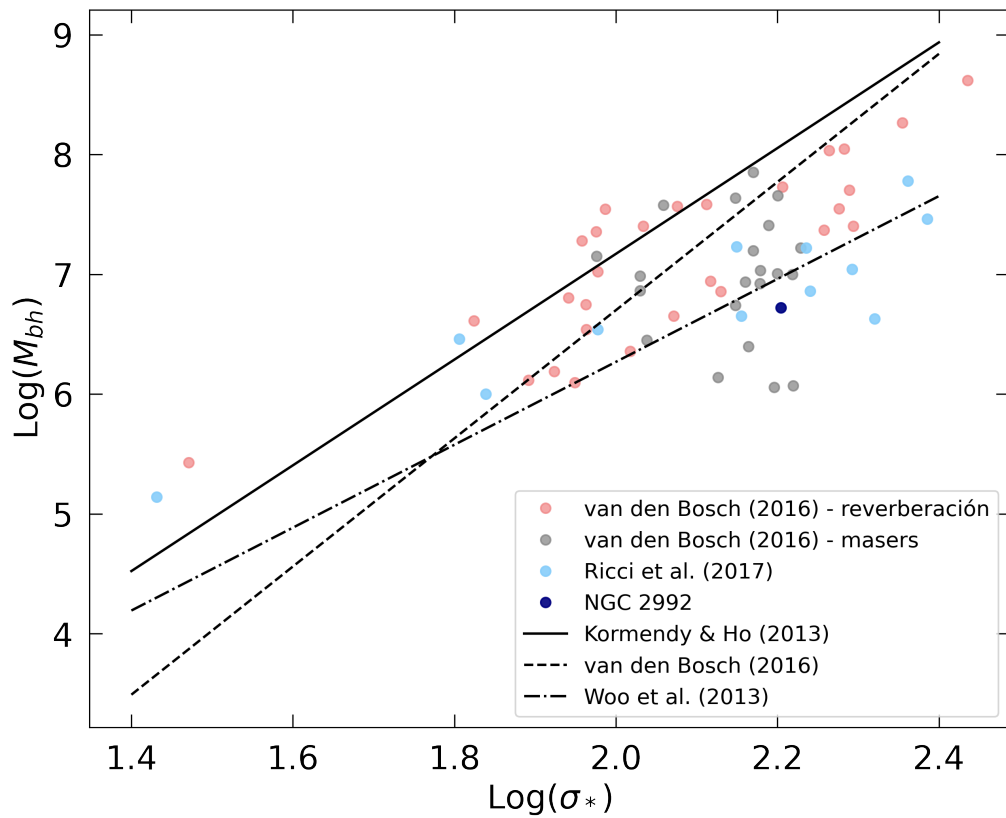


Figura 1.12: Diferentes ajustes de la relación $M - \sigma$ para distintas muestras de galaxias. El punto azul corresponde a la ubicación de NGC 2992 en el diagrama.

ocurriría si el reservorio de gas y demás material circumnuclear es consumido en un ciclo de actividad AGN, el cual posee una duración de 10^7 a 10^8 años según trabajos como Hickox et al. (2014).

En este trabajo, se contribuye a los resultados que evidencian un posible núcleo descentrado en NGC 2992, identificando las diferentes estructuras físicas que conforman NGC 2992 a partir de un ajuste de componentes al perfil espacial de la galaxia obtenido de la imagen espectral en el NIR. Además, se construye la curva de velocidad radial de hidrógeno molecular para compararla con la de Friedrich et al. (2010), identificando que existen estructuras dinámicamente desacopladas y, bajo la hipótesis de *feeding*, se reporta la masa encerrada en el reservorio acoplado cinemáticamente al AGN.

Capítulo 2

Observaciones y reducción

Con el objetivo de llevar a cabo los estudios propuestos en la Sección 1.3 del Capítulo 1, se utilizaron datos fotométricos y espectroscópicos de NGC 2992 obtenidos con el telescopio Gemini Sur. Este Capítulo está destinado tanto a la descripción del observatorio, el instrumento utilizado y la presentación de las observaciones como a la especificación del proceso de reducción y calibración de los datos.

2.1. Observatorio Gemini

El Observatorio Astronómico Gemini¹ está formado por dos telescopios gemelos de 8.1 metros de diámetro que permiten realizar observaciones en el óptico e infrarrojo. Uno de estos se ubica en Hawaii, llamado Gemini Norte, mientras que el otro se encuentra en Chile, denominado Gemini Sur. Las ubicaciones de ambos están pensadas estratégicamente para poder acceder a casi todo el cielo, a excepción de dos regiones pequeñas muy cercanas a los Polos Celestes. El telescopio Gemini Norte, llamado también Telescopio Gemini Frederic C. Gillet, se encuentra en el volcán inactivo Mauna Kea, en Hawaii, a 4200 metros sobre el nivel del mar. Por otra parte, el telescopio Gemini Sur (ver Figura 2.1) está ubicado en Cerro Pachón, en Chile, a 2700 metros sobre el nivel del mar y a 80 kilómetros de la ciudad La Serena. Este observatorio integra una cooperación internacional entre Estados Unidos, Canadá, Corea del Sur, Brasil, Argentina y Chile. Los astrónomos de los países que integran la cooperación internacional pueden postularse para obtener tiempo de observación en proporción al aporte financiero que realiza cada país.

¹<http://www.gemini.edu/>



Figura 2.1: Observatorio Gemini Sur.

2.1.1. Instrumento: Flamingos-2

Flamingos-2 (F2) es un instrumento que opera en Gemini Sur desde el año 2013, el cual permite realizar fotometría en el infrarrojo cercano entre 10000 \AA ($1 \mu m$) y 25000 \AA ($2.5 \mu m$) en un campo de visión circular de $6.1'$. Además, admite dos modos de espectroscopía en el mismo rango de longitudes de onda: de ranura larga y multiobjeto. Este instrumento posee un muestreo espacial de $0.18''/\text{píxel}$. Dentro de las bandas con las que se pueden realizar observaciones fotométricas se encuentran los filtros J ($\lambda_c = 1.255 \mu m$), H ($\lambda_c = 1.631 \mu m$) y Ks ($\lambda_c = 2.157 \mu m$), mientras que en el caso de la espectroscopía, el filtro K disponible recibe el nombre de K_{long} ($\lambda_c = 2.2 \mu m$). En la Figura 2.2 se pueden ver las curvas de sensibilidad de estas bandas, las cuales son obtenidas a partir de los datos brindados por Gemini².

²<http://www.gemini.edu/instrumentation/flamingos-2/components>

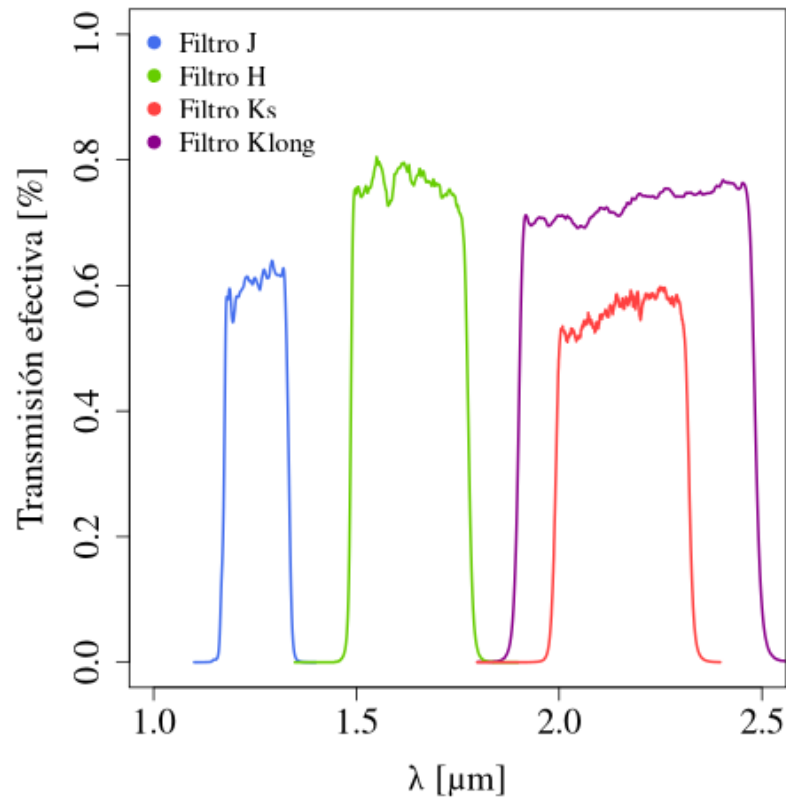


Figura 2.2: Curvas de sensibilidad de los filtros J, H y Ks de *Flamingos-2*.

2.2. Datos infrarrojos

En este trabajo se utilizaron datos fotométricos (ver Tabla 2.1) y espectroscópicos (ver Tabla 2.2) del instrumento *Flamingos-2*, ubicado en el telescopio Gemini Sur del Observatorio Astronómico Gemini, de la galaxia activa NGC 2992. En cuanto a los datos fotométricos, el número de programa de las observaciones obtenidas en formato Fast Turn Around es GS-2021B-FT-210. El set de imágenes corresponde a enero de 2022 y contiene datos de NGC 2992 en los filtros J, H y Ks.

Con respecto a los datos espectroscópicos, las observaciones se realizaron en junio de 2021, utilizando la técnica de ranura larga en banda K_{long} del NIR, en condiciones climáticas de calidad de la imagen $IQ = 70\%$, cobertura de nubes $CC = 70\%$, vapor de agua $WV = any$, brillo de cielo $SB = any$ y masa de aire $m_{aire} = 1.5$. El filtro K_{long} permitió obtener el espectro en un rango que va desde 1.90 μm hasta 2.48 μm . El número de programa es GS-2021A-Q-233.

Tipo de imagen	Filtro	Tiempo de exposición <i>seg</i>
Imágenes de <i>dark</i>	H	3
Imágenes de <i>dark</i>	H	60
Imágenes de <i>flat</i>	J	60
Imágenes de <i>flat</i>	H	3
Imágenes de <i>flat</i>	Ks	3
Imágenes de cielo	J	3
Imágenes de cielo	H	3
Imágenes de cielo	Ks	3
Imágenes de NGC 2992	J	3
Imágenes de NGC 2992	H	3
Imágenes de NGC 2992	Ks	3

Tabla 2.1: Datos fotométricos obtenidos en la noche de observación en enero de 2022.

2.3. Reducción fotométrica

El Observatorio Gemini ofrece un *software* de reducción de datos para la mayoría de los instrumentos de sus instalaciones. El paquete Gemini IRAF y la plataforma DRAGONS (Labrie et al., 2019) son el *software* oficial de reducción compatible con Gemini. Para realizar la reducción de los datos fotométricos de NGC 2992 se utilizó DRAGONS.

En primera instancia, se usó la herramienta `dataselect` para contabilizar las imágenes y clasificarlas en diferentes listas de archivos de entrada que alimentaron posteriormente el sistema de recetas de reducción³. Esta herramienta encontró archivos que coincidían con ciertos criterios definidos a través de etiquetas o descriptores conseguidos del encabezado (*header*) de las imágenes, como el tipo de imagen, el filtro y el tiempo de exposición.

Dentro del conjunto de imágenes obtenidas en la noche de observación se contaba con imágenes de *dark*, que indicaban el ruido térmico generado en las observaciones, imágenes de *flat*, destinadas a proporcionar la información sobre la diferencia de sensibilidad píxel a píxel del CCD, imágenes de cielo, necesarias para restar el fondo

³<https://dragons.readthedocs.io/projects/recipe-system-users-manual/en/release-3.0.x/suptools.html#dataselect>

Tipo de imagen	Filtro	Tiempo de exposición <i>seg</i>
Imágenes de <i>dark</i>	H	9
Imágenes de <i>dark</i>	H	30
Imágenes de <i>dark</i>	H	180
Imágenes de <i>dark</i>	H	310
Espectros bidimensionales de <i>flat</i>	K_{long}	9
Espectros bidimensionales de <i>flat-close</i>	K_{long}	180
Lámpara de comparación para HIP 41987	K_{long}	180
Lámpara de comparación para NGC 2992	K_{long}	180
Espectros bidimensionales de HIP 41987	K_{long}	30
Espectros bidimensionales de NGC 2992	K_{long}	310

Tabla 2.2: Datos espectroscópicos obtenidos en la noche de observación en junio de 2021.

de cielo, e imágenes del objeto de estudio, NGC 2992. Se debe tener en cuenta que el filtro en el que se toman las imágenes de *dark* no es relevante para su uso en la reducción, debido a que la corriente de oscuridad es una propiedad intrínseca del detector y no depende del filtro, pero sí resulta importante el tiempo de exposición. Por otro lado, en el caso de la corrección por *flat* sucede lo opuesto: el tiempo de exposición no es relevante, ya que durante el proceso de reducción este se normaliza para no afectar el número de cuentas en las imágenes del objeto, pero sí lo es el filtro con el que observan dichas imágenes de *flat* debido a la respuesta intrínseca del detector.

Luego de clasificar las imágenes, se armaron los *masterdark*, los *masterflat* y las máscaras de píxeles defectuosos, las cuales fueron creadas a partir de las imágenes de *dark* y de *flat* con el objetivo de corregir la presencia de píxeles defectuosos del CCD. Tanto el *masterdark* como el *masterflat* se obtuvieron a partir de la combinación de imágenes individuales de *dark* y *flat*, respectivamente. Para esto, se utilizó el comando `reduce` seguido por la lista que se deseaba reducir. Este comando identificó la naturaleza de las entradas usando las etiquetas y buscó la receta y las tareas más apropiadas para la reducción del conjunto de datos.

Por último, se aplicó la herramienta `reduce` a las imágenes de cielo y las del objeto, utilizando el *masterdark* y el *masterflat* y la máscara de píxeles defectuosos correspondientes en cada caso. Las imágenes de cielo se usaron para restar el fondo

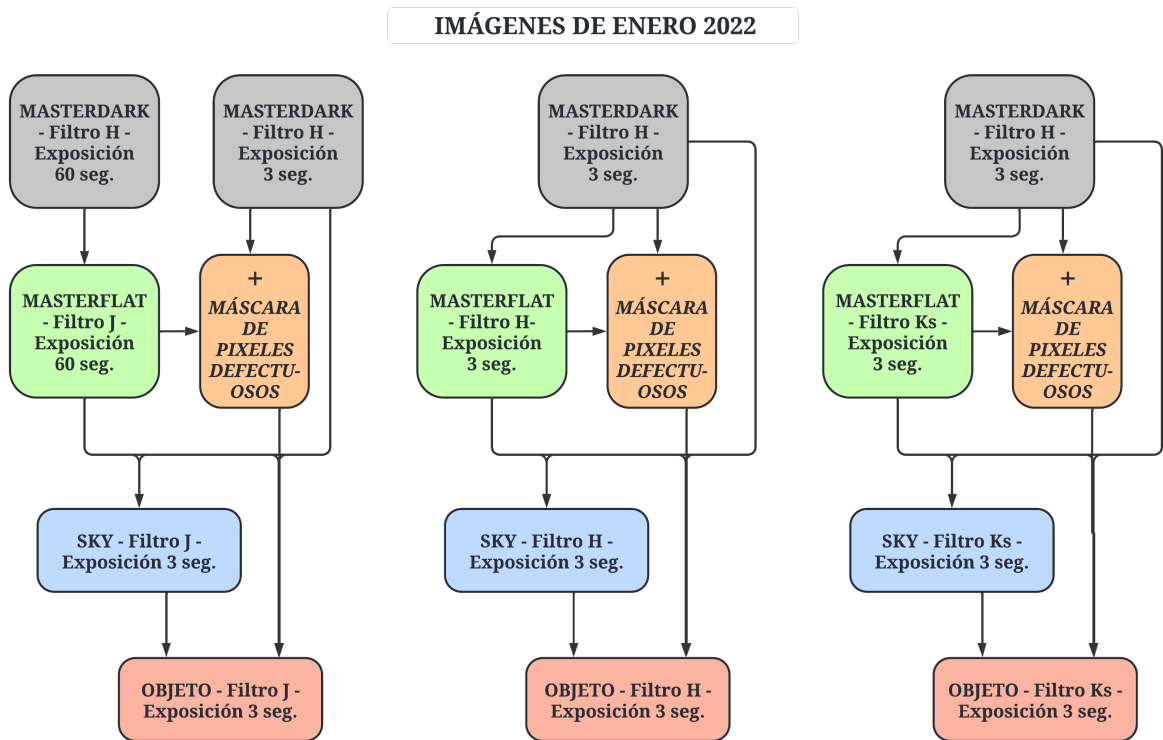


Figura 2.3: Cursograma de la reducción del conjunto de imágenes de NGC 2992.

de cielo de las imágenes del objeto. Esta reducción no incluyó corrección por *bias*, que contiene el ruido de lectura del CCD, debido a que el instrumento *Flamingos-2*, corrige por *bias* internamente durante la lectura de las imágenes en el CCD en la noche de observación.

En la Figura 2.3 se puede observar un cursograma donde se desarrolla el camino de reducción para obtener las imágenes de NGC 2992 en cada filtro. Se aclara en el mismo cuáles son los cuatro *masterdark* generados a partir de la combinación de imágenes de *dark* según en tiempo de exposición y, de la misma forma, los tres *masterflat* clasificados según el filtro. Las flechas indican el orden de reducción y la conexión entre qué tipo de imágenes se utiliza para corregir la siguiente.

Una vez obtenidas las imágenes reducidas de NGC 2992 en los filtros J, H y Ks (ver Figura 2.4), se realizaron una serie de pasos para verificar la correcta reducción fotométrica. En primer lugar, se hizo una inspección del fondo de cielo de las imágenes con el fin de observar que éste estuviese lo más plano posible y no hubiese ningún tipo de estructuras. A modo de ejemplo, se presenta la Figura 2.5 donde se muestra un corte vertical sobre la imagen en banda J de NGC 2992 con la herramienta *imexamine* de IRAF.

Además, se midió el valor de fondo de cielo para corroborar que estuviese cercano

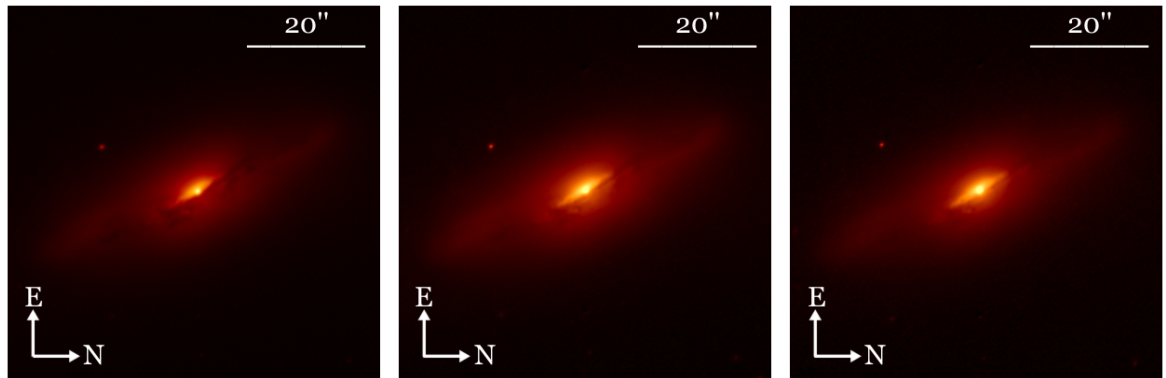


Figura 2.4: Imágenes reducidas de NGC 2992 en banda J (panel izquierdo), banda H (panel central) y banda Ks (panel derecho) del infrarrojo cercano, correspondientes a las observaciones de enero de 2022 con el instrumento Flamingos-2 ubicado en el telescopio Gemini Sur.

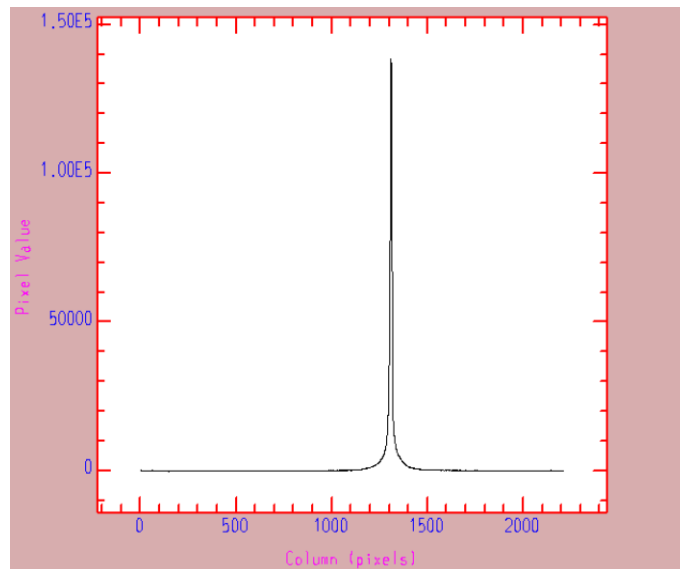


Figura 2.5: Corte vertical en intensidad sobre la imagen de NGC 2992 en banda J.

a cero. Se encontró que, si bien el fondo de cielo era negativo, el promedio estaba en -60 ADU's aproximadamente, que equivale a un 0.03 % del valor del pico de emisión de la galaxia, por lo que no impactaría significativamente al momento de medir la magnitud nuclear de la misma. En la Figura 2.6 se presenta un corte realizado con la herramienta `pvector` de IRAF, donde se puede notar alrededor de qué valor oscila el fondo de cielo.

Se utilizó el ajuste de contornos de la tarea `imexamine` de IRAF para corroborar que las isofotas de las estrellas de campo de las imágenes reducidas fueran circulares, lo que permite utilizar un ajuste gaussiano para modelar la fuente puntual del núcleo activo de la galaxia. Un ejemplo de ello se presenta en la Figura 2.7.

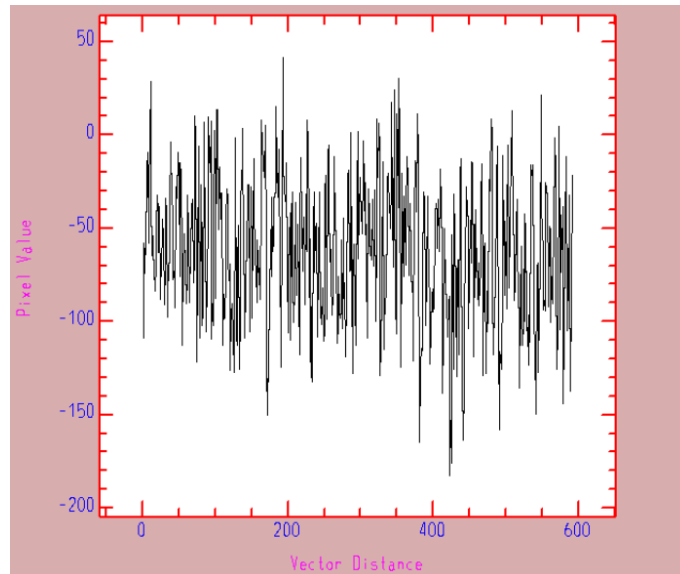


Figura 2.6: Corte vertical en intensidad sobre la imagen de NGC 2992 en banda J sólo incluyendo el fondo.

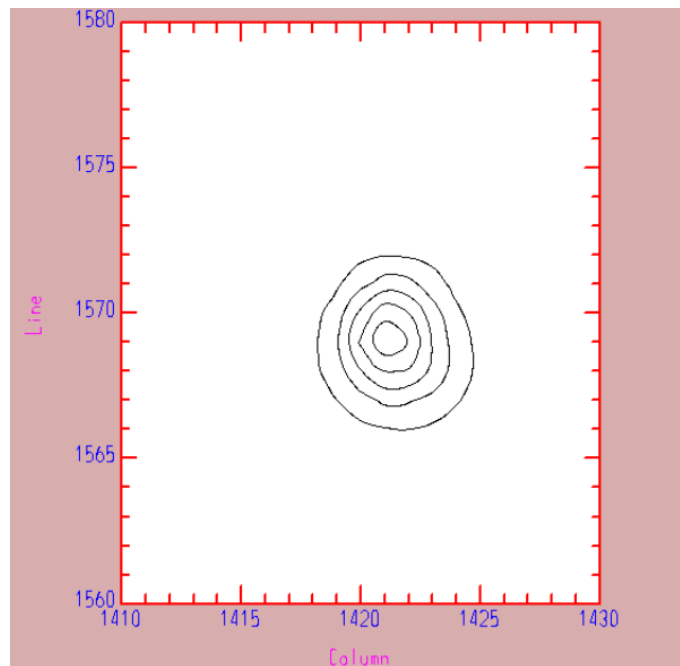


Figura 2.7: Isofotas ajustadas a una estrella de campo en la imagen reducida de NGC 2992 en banda J.

2.3.1. Calibración en flujo

Tanto la imagen en banda H como en banda Ks estaban saturadas en la región central de la galaxia NGC 2992, por lo cual, a los fines de calcular la magnitud de la galaxia como uno de los objetivos de este trabajo, la calibración en flujo fue realizada únicamente sobre la imagen en banda J que no lo estaba.

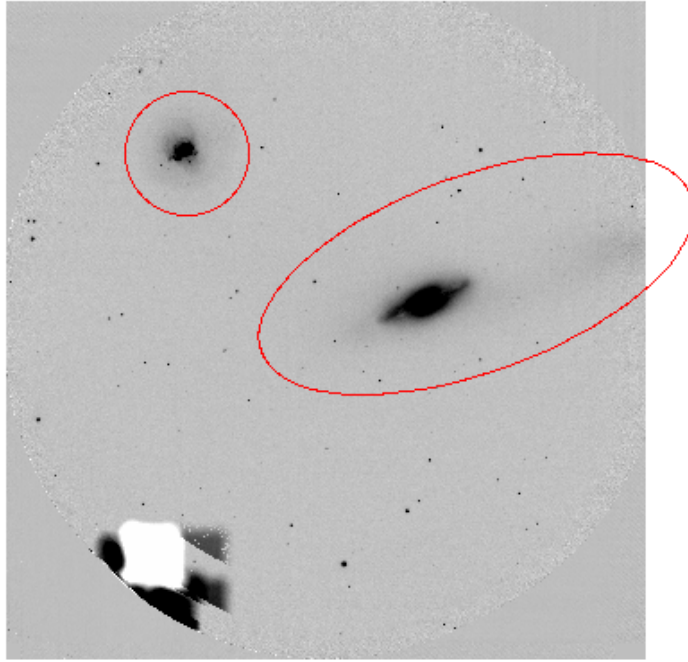


Figura 2.8: Imagen de NGC 2992 y NGC 2993 en banda J. Con una elipse roja se encierra a NGC 2992 y con un círculo rojo a NGC 2993. La "mancha" observada en la región inferior izquierda corresponde al brazo guía del telescopio que sigue a una estrella brillante con el objetivo de no perder el objeto de interés del campo de visión.

Para calibrar en flujo fue necesario obtener el cero fotométrico (PZ) de la imagen, el cual permite pasar de la magnitud instrumental medida sobre la imagen reducida a la magnitud en algún sistema estándar, a través de la siguiente fórmula:

$$PZ = m_{estandar} - m_{instrumental} \quad (2.3.1)$$

Para esto, se seleccionaron estrellas de campo teniendo en cuenta algunas condiciones que permitieran hallar las más adecuadas para obtener el valor buscado. En primer lugar, se descartaron aquéllas que estaban dentro de las regiones cercanas a las galaxias (ver Figura 2.8), debido a que el fondo de cielo cercano a esas estrellas se veía mayormente afectado por el brillo de los objetos extendidos. También, se descartaron las estrellas que se encontraban en los bordes del campo de visión, considerando que la sensibilidad del detector es mayor en las zonas centrales que en las periféricas.

Otra condición fue que las estrellas tuvieran más de 500 ADU's en su zona central. Esta cota inferior se utilizó para reducir la incerteza asociada al ruido fotónico a la hora de medir las magnitudes. Al multiplicar por la ganancia del detector de

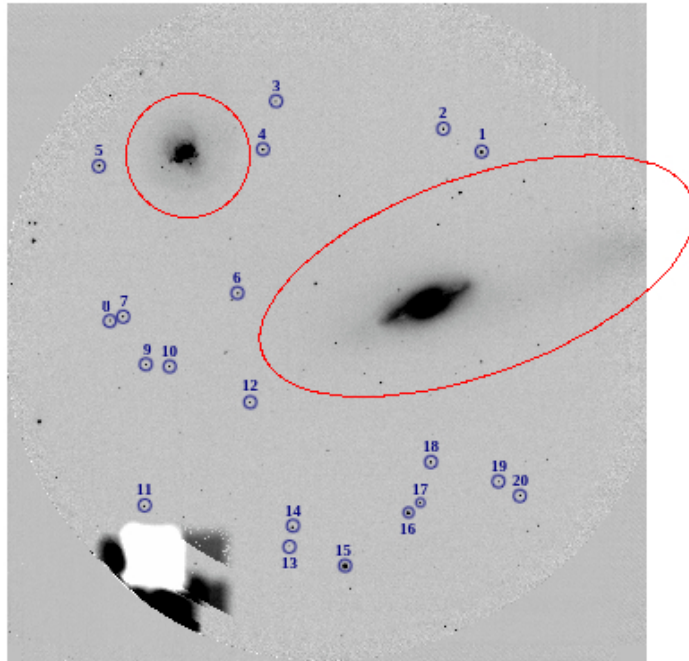


Figura 2.9: Preselección de 20 estrellas de campo sobre la imagen de NGC 2992 en banda J.

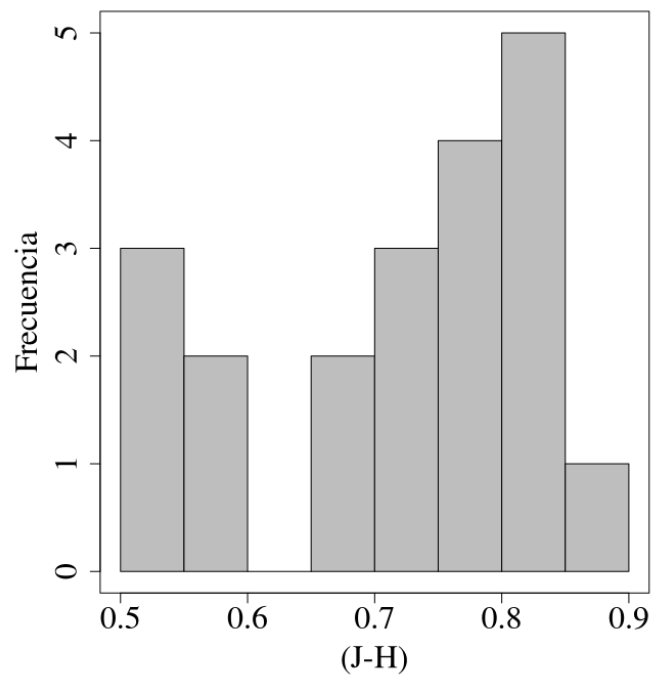


Figura 2.10: Distribución del índice de color ($J - H$) de las 20 estrellas preseleccionadas.

F2, la cual es de $(4.44 \pm 0.35) e^-/ADU$, se obtiene que 500 ADU's corresponden aproximadamente a 2000 fotoelectrones. Usando la Ley de Pogson (Clariá, 2007) para calcular diferencia de magnitudes, considerando el intervalo de incerteza dado

por el ruido fotónico de dicha señal, se tiene que para magnitudes mayores a 500 ADU's la diferencia en magnitud será menor a 0.02 magnitudes.

Por lo tanto, teniendo en cuenta cada condición se realizó una preselección de las 20 estrellas marcadas en la Figura 2.9. Sobre estas fuentes puntuales se midió la magnitud instrumental en los filtros J y H y el FWHM, ajustando a las mismas un perfil gaussiano con la tarea `a-imexam` de IRAF. De las magnitudes instrumentales medidas se calculó el índice de color ($J - H$) para construir la distribución de color observada en la Figura 2.10. Al analizar la distribución de color ($J - H$), se encontró una población de estrellas levemente enrojecidas, las cuales no se usaron para calcular el cero fotométrico. Por ello, se descartaron las estrellas de campo preseleccionadas que tenían un índice de color ($J - H$) menor a 0.6.

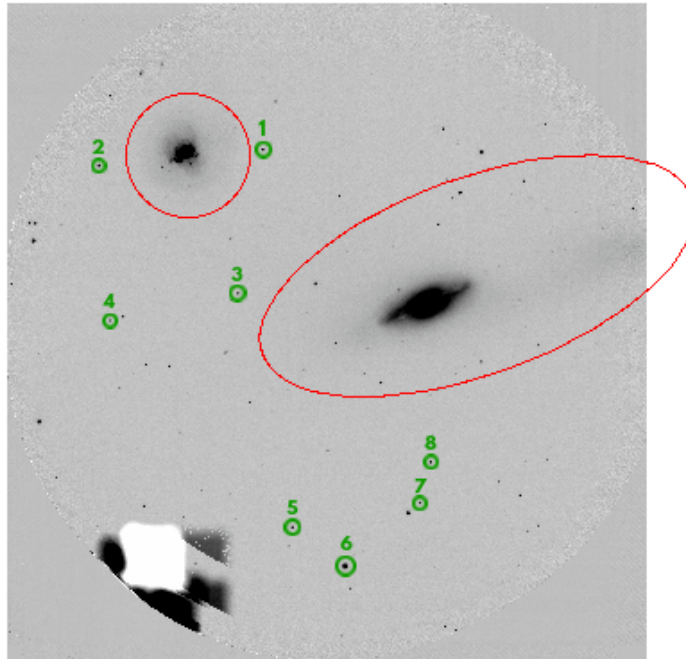


Figura 2.11: Selección final de las ocho estrellas de campo utilizadas para calcular el cero fotométrico.

Por otra parte, utilizando el FWHM de las 20 estrellas se calculó el valor del *seeing* de la imagen, obteniendo un valor de promedio y desviación estándar de:

$$SEEING = (3.08 \pm 0.11) \text{ pixeles} \quad (2.3.2)$$

Estrella	m_J^{2MASS}	$err(m_J^{2MASS})$	m_K^{2MASS}	$err(m_K^{2MASS})$
	<i>mag</i>	<i>mag</i>	<i>mag</i>	<i>mag</i>
(1) 2MASS J09454849-1421168	16.137	0.265	15.539	0.600
(2) 2MASS J09454782-1422582	15.355	0.104	14.426	0.275
(3) 2MASS J09454236-1421322	16.352	0.105	15.109	0.285
(4) 2MASS J09454124-1422515	16.792	0.162	15.762	0.454
(5) 2MASS J09453238-1420589	15.903	0.116	15.252	0.443
(6) 2MASS J09453086-1420248	13.316	0.020	12.733	0.039
(7) 2MASS J09453343-1419402	16.649	0.359	15.148	0.356
(8) 2MASS J09454849-1421168	15.990	0.141	14.999	0.161

Tabla 2.3: Información de las ocho estrellas seleccionadas para la calibración en flujo. Se especifica nombre y magnitudes en banda J y banda K con sus respectivos errores.

Teniendo en cuenta que la escala de placa de F2 es de $0.18''/\text{píxel}$, este valor resulta:

$$SEEING = (0.55 \pm 0.02) '' \quad (2.3.3)$$

Por último, para calcular el PZ se necesitaron las magnitudes de las estrellas de campo en algún sistema estándar con el cual comparar, por lo que se tomaron las del sistema 2MASS (Skrutskie et al., 2006). Algunas de las estrellas preseleccionadas no contaban con su magnitud medida en los filtros J, H y K de 2MASS y, en consecuencia, la selección final para realizar la calibración en flujo contuvo las ocho estrellas de campo marcadas en la Figura 2.11. En la Tabla 2.3 se presentan los parámetros necesarios para la obtención del PZ.

Las magnitudes obtenidas de 2MASS indicaban el brillo promedio corregido por apertura de la curva de crecimiento medido en una apertura de radio de $4''$ centrada en la posición de la fuente. Por lo tanto, fue necesario corregir por apertura a las magnitudes instrumentales medidas sobre la imagen en banda J obtenida con F2, es decir, calcular cuál era la apertura sobre la imagen que contenía el 100% del flujo de una fuente puntual. Para ello, se creó la curva de crecimiento de la Figura 2.12 a partir de la magnitud instrumental, en diferentes aperturas, de algunas estrellas de campo. Analizando este gráfico, se calculó que 24 píxeles, que equivale a $4.32''$, incluía el 100% del flujo de una fuente puntual. Con esto, se encontró que 22.22 píxeles, que equivale a $4''$, incluía el 99.2% del flujo de una fuente puntual.

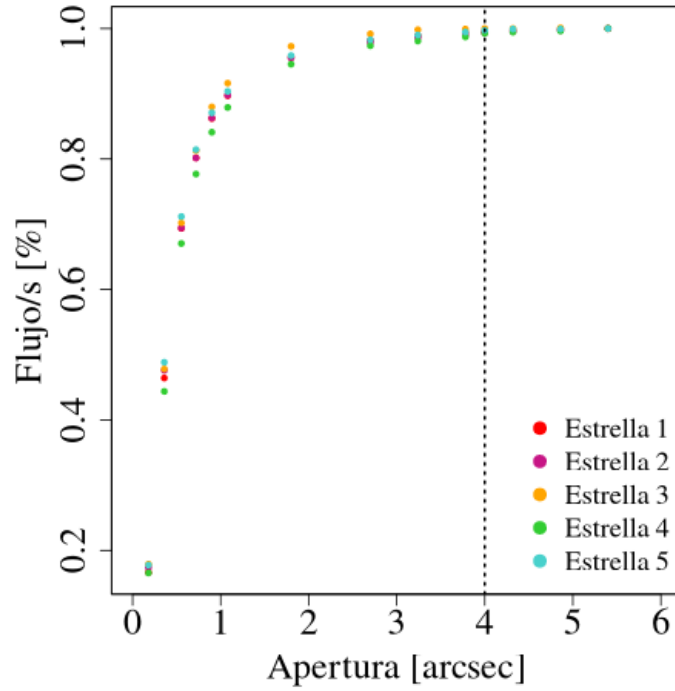


Figura 2.12: Curva de crecimiento donde se muestra el porcentaje de flujo medido en cinco fuentes puntuales en función de diferentes tamaños de apertura.

Estrella	m_J^{inst} del 99.2 % del flujo total	m_J^{inst} del 100 % del flujo total
(1)	-10.910	-10,901
(2)	-11.526	-11,517
(3)	-10.478	-10,47
(4)	-9.698	-9,69
(5)	-10.657	-10,65
(6)	-13.525	-13,516
(7)	-10.119	-10,11
(8)	-10.483	-10,47

Tabla 2.4: Magnitudes instrumentales de las ocho estrellas de campo obtenidas en la imagen en banda J.

Luego, al medir la magnitud instrumental en banda J de las ocho estrellas de campo seleccionadas, la corrección por apertura a la magnitud fue de -0.0087 magnitudes, obtenida a partir del siguiente análisis. Partiendo de la expresión:

$$F(100\%) = F(99.2\%) * 1.00806 \quad (2.3.4)$$

Estrella	m_J^{MKO}	m_J^{2MASS}	m_J^{inst}
(1)	16.10	-10,901	27,00
(2)	15.29	-11,517	26,81
(3)	16.27	-10,47	26,74
(4)	16.72	-9,69	26,41
(5)	15.86	-10,6	26,51
(6)	13.28	-13,516	26,80
(7)	16.55	-10,11	26,66
(8)	15.92	-10,47	26,39

Tabla 2.5: Magnitudes de 2MASS y magnitudes instrumentales, ambas en el sistema fotométrico MKO, junto al cero fotométrico obtenido en cada comparación.

Luego,

$$mag(100\%) = -2.5 * \log(F(100\%)) = -2.5 * \log(F(99.2\%) * 1.00806) \quad (2.3.5)$$

$$mag(100\%) = -2.5 * \log(F(99.2\%)) + (-2.5) * \log(1.00806) \quad (2.3.6)$$

Entonces,

$$mag(100\%) = mag(99.2\%) - 0.00872 \quad (2.3.7)$$

En la Tabla 2.4 se muestran las magnitudes instrumentales de las ocho estrellas de campo medidas en una apertura de 4" y las mismas magnitudes corregidas por apertura. Estas magnitudes fueron tomadas con un PZ igual a cero (de allí sus valores tan bajos).

Por último, para poder comparar las magnitudes instrumentales en banda J corregidas por apertura con las magnitudes de 2MASS se transformaron estas últimas al mismo sistema fotométrico que las primeras: el sistema fotométrico *Mauna Kea Observatory* (MKO). Esta transformación según Leggett et al. (2007) se obtiene a partir de la fórmula:

$$m_J^{MKO} = 0.001 - 0.069 * (m_J^{2MASS} - m_K^{2MASS}) + m_J^{2MASS} \quad (2.3.8)$$

Consecuentemente, en la Tabla 2.5 se tienen las magnitudes de 2MASS y las magnitudes instrumentales, ambas en el sistema fotométrico MKO. Además, se muestra

el PZ que se obtuvo usando la ecuación 2.3.1.

Del promedio y la desviación estándar de estos datos se consiguió el valor del PZ para la imagen de NGC 2992 en el filtro J correspondiente a enero 2022:

$$PZ = (26.66 \pm 0.21) \text{ mag} \quad (2.3.9)$$

2.4. Reducción espectroscópica

Para obtener el espectro unidimensional de NGC 2992 en banda K_{long} correspondiente a junio de 2021, en primer lugar, se llevó a cabo la reducción del espectro bidimensional siguiendo la *pipeline* para IRAF que ofrece el Observatorio Gemini, luego se realizó la extracción del espectro unidimensional con el *software QFitsView*⁴ y, por último, se hizo la corrección telúrica utilizando *Python*. El conjunto de espectros e imágenes que se obtuvo en la noche de observación contenía:

- Espectros bidimensionales de la galaxia NGC 2992 en banda K_{long} con un tiempo de exposición de 310 segundos. El ángulo de posición (PA) de la ranura larga fue de 32° desde el norte hacia el este, quedando aproximadamente en la en la dirección suroeste-noreste.
- Espectros bidimensionales de la estrella HIP 41987 en banda K_{long} con un tiempo de exposición de 30 segundos, que se utilizó como estrella telúrica para corregir la absorción atmosférica.
- Espectros bidimensionales de lámparas de comparación de Argón para el objeto y para la estrella, en banda K_{long} y con un tiempo de exposición de 180 segundos, con las que se realizó la calibración en longitud de onda.
- Espectros bidimensionales del cielo en banda K_{long} , con un tiempo de exposición de 310 segundos, usados para corregir la emisión de la atmósfera.
- Espectros bidimensionales de *flat*, en banda K_{long} con un tiempo de exposición de 9 segundos, los cuales dieron la respuesta de sensibilidad píxel a píxel.
- Espectros bidimensionales de *flat-close*, que cuantificaron la respuesta espectral dada por el sistema óptico utilizado para obtener las lámparas, midiendo un fondo térmico que tenían las lámparas de comparación, el cual, si no se

⁴<https://www.mpe.mpg.de/~ott/QFitsView/>

sustraer, hace que éstas queden con una pendiente térmica en la dirección espectral hacia el rojo. Estos fueron obtenidos con el obturador cerrado y un tiempo de exposición de 180 segundos.

- Imágenes de *dark*, que contenían el ruido térmico generado en las exposiciones del objeto (tiempo de exposición de 310 segundos), de la estrella (tiempo de exposición de 30 segundos), del *flat* (tiempo de exposición de 9 segundos) y del *flat-close* (tiempo de exposición de 180 segundos).

2.4.1. Reducción del espectro bidimensional

Para obtener el espectro bidimensional reducido, primero se realizó una clasificación de los espectros e imágenes conseguidos en la noche de observación en listas con el fin de separar los distintos tipos mencionados anteriormente y, seguido de esto, fue necesario hacer una inspección visual para corroborar que no hubiese saturaciones o estructuras inesperadas. Esta visualización se realizó con el servidor de visualización de imágenes IRAF DS9⁵ (ver Figura 2.13).

Luego de la inspección, se combinaron las imágenes de *dark* para generar los *masterdark* correspondientes, en función de los diferentes tiempos de exposición. Esto se debe a que, al igual que como se comentó en la reducción fotométrica, la corrección por ruido térmico depende del tiempo de exposición de las imágenes que se desean corregir. En este caso se crearon cuatro *masterdark*: uno para corregir los espectros bidimensionales del objeto, uno para corregir los de la estrella telúrica, otro para corregir los *flat* y otro para la corrección de los *flat-close*.

Posteriormente, se creó el *masterflat* normalizado para corregir la diferencia de sensibilidad entre los píxeles del CCD. Para esto, primero se restó el *masterdark* de los *flat* individuales, luego se los cortó y por último se los combinó. Dado que los *flat* presentaban una estructura no deseada, determinada por líneas verticales claras y oscuras y una línea muy clara en la posición del continuo de los espectros de la galaxia, y dado que esta estructura no aparecía, por ejemplo, en los espectros bidimensionales del objeto, lo cual indicaba que no se debía a la diferencia de sensibilidad píxel a píxel, fue necesario realizar un suavizado del *masterflat* combinado antes de hacer la normalización. Para esto, se tomó un recuadro de 3×3 píxeles sobre el *masterflat* combinado y se promedió el valor de cuentas en ese recuadro; después se barrió el espectro con esta misma técnica, obteniendo así otro espectro al que se lo denominó

⁵<http://ds9.si.edu/>

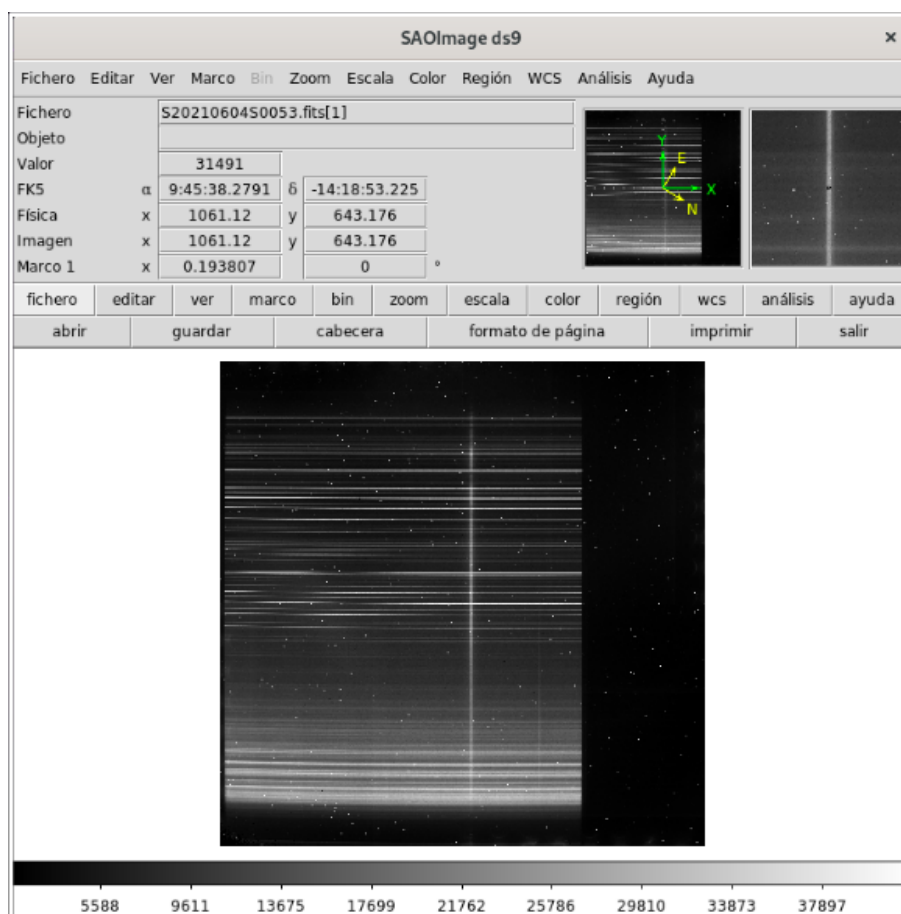


Figura 2.13: Pantalla de visualización de imágenes en DS9. Se muestra allí un espectro bidimensional de NGC 2992 sin ninguna corrección realizada.

masterflat combinado-suavizado. Al *masterflat* combinado-suavizado se lo dividió por el *masterflat* combinado y se obtuvo finalmente el *masterflat* normalizado con el que se corrigió la diferencia de sensibilidad píxel a píxel.

Con los *masterdark* y el *masterflat* normalizado creados, fue posible empezar a reducir las lámparas, la estrella, el cielo y el objeto de estudio. En primer lugar, se redujeron las lámparas de comparación, restando el *masterdark* a los espectros de lámpara individuales, sustrayendo el *masterdark* correspondiente al *flat-close*, quitando el *flat-close* corregido por *masterdark* de las lámparas y, por último, cortando y dividiendo las lámparas por el *masterflat* normalizado. Este proceso se hizo tanto para la lámpara de comparación asociada al objeto de estudio, como para la lámpara de comparación asociada a la estrella telúrica.

Para la reducción de los espectros de HIP 41987, en primer lugar, se corrigió por *masterdark* a los espectros bidimensionales individuales de la estrella. Luego, se cortaron, se dividieron por el *masterflat* normalizado y se realizó la resta del cielo.

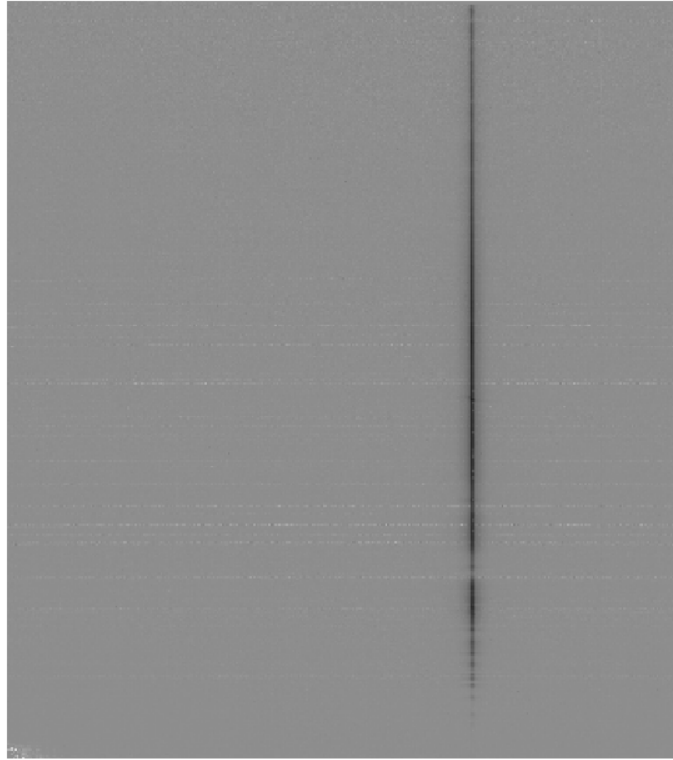


Figura 2.14: Espectro bidimensional reducido y calibrado en longitud de onda de NGC 2992.

Para hacer esto último, se utilizó la técnica Chop-Nod, que consiste en tomar el espectro de la fuente puntual y luego de un corto tiempo calar el telescopio levemente hacia el costado (en el caso de HIP 41987 fue de 30"), para obtener otro espectro de la estrella pero levemente corrido. Usando esta técnica, para restar el cielo se usó un espectro de la estrella y su espectro siguiente, que al estar corrido contenía cielo en la posición de la estrella. Esto se hace así debido a que la atmósfera en el infrarrojo es altamente variable, por lo que restar un cielo tomado mucho tiempo después que el objeto no tiene sentido. Luego de esto, se combinaron los espectros de la estrella reducidos y se obtuvo el espectro estelar bidimensional combinado. Posteriormente, se realizó la calibración en longitud de onda con la lámpara de comparación, identificando las líneas espectrales en la lámpara y referenciando esta lámpara al espectro bidimensional combinado de la estrella telúrica con el fin de transformar los píxeles de la dirección espectral en angstrom (\AA).

Para la reducción de los espectros bidimensionales de cielo, se restó el *masterdark* correspondiente a los cielos individuales, se los cortó y se los dividió por el *masterflat* normalizado.

Por último, para la reducción de los espectros bidimensionales del objeto de estudio, la galaxia NGC 2992, se restó el *masterdark* correspondiente a los espectros

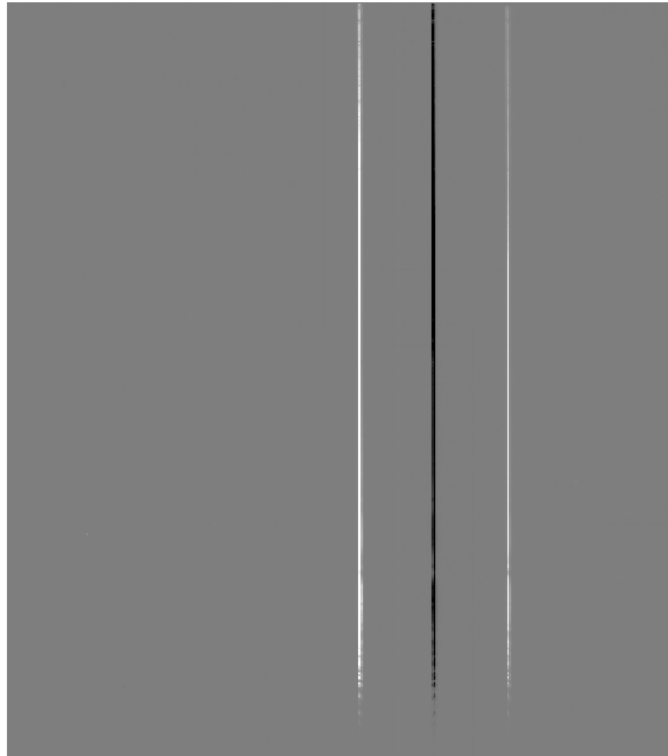


Figura 2.15: Espectro bidimensional reducido y calibrado en longitud de onda de HIP 41987. La línea negra corresponde al espectro positivo y las blancas al espectro negativo que se obtiene como residuo del proceso de restado de cielo en la reducción del espectro de la estrella.

bidimensionales individuales, se cortaron y dividieron por el *masterflat* normalizado. Posteriormente, se hizo la resta de cielo, donde a cada espectro de la galaxia se le restó el espectro de cielo obtenido inmediatamente después de cada espectro de la galaxia. Si bien este procedimiento no es el mismo que el de la técnica Chop-Nod, debido a que esta se utiliza para fuentes puntuales y una galaxia es una fuente extendida, la finalidad es la misma: restar un cielo que tenga sentido físico dada la alta variabilidad de la atmósfera en el infrarrojo). Luego se combinaron los espectros de la galaxia y se calibraron en longitud de onda, al igual que para la estrella, pero con la lámpara referenciada al objeto.

Una vez finalizado todo este procedimiento de reducción, el resultado neto fueron dos espectros bidimensionales calibrados en longitud de onda: uno de la galaxia NGC 2992 (ver Figura 2.14) y otro de la estrella telúrica HIP 41987 (ver Figura 2.15).

2.4.2. Extracción del espectro unidimensional

El paso siguiente fue la extracción del espectro unidimensional, que consistió en realizar un corte en la dirección espectral, con un determinado ancho de la ventana de

extracción, donde se suman los valores de cuentas en la dirección espacial, quedando así la intensidad asociada en función de la longitud de onda. Esto fue realizado con el programa *QFitsView*. Se extrajo un espectro unidimensional de la estrella telúrica con una ventana de extracción de 6 píxeles que tuviese la mayor porción del flujo proveniente de la estrella y, por otra parte, sobre el espectro de la galaxia se realizó una extracción aproximadamente del tamaño del *seeing* (3 píxeles), centrada en el pico de emisión, y 21 extracciones de 2 píxeles de ancho, donde se centró una de ellas en el pico de emisión de la galaxia y se tomaron diez extracciones independientes a cada lado. En la Figura 2.16 se presenta el resultado de la extracción central del espectro de la galaxia y en la Figura 2.17, la de la estrella.

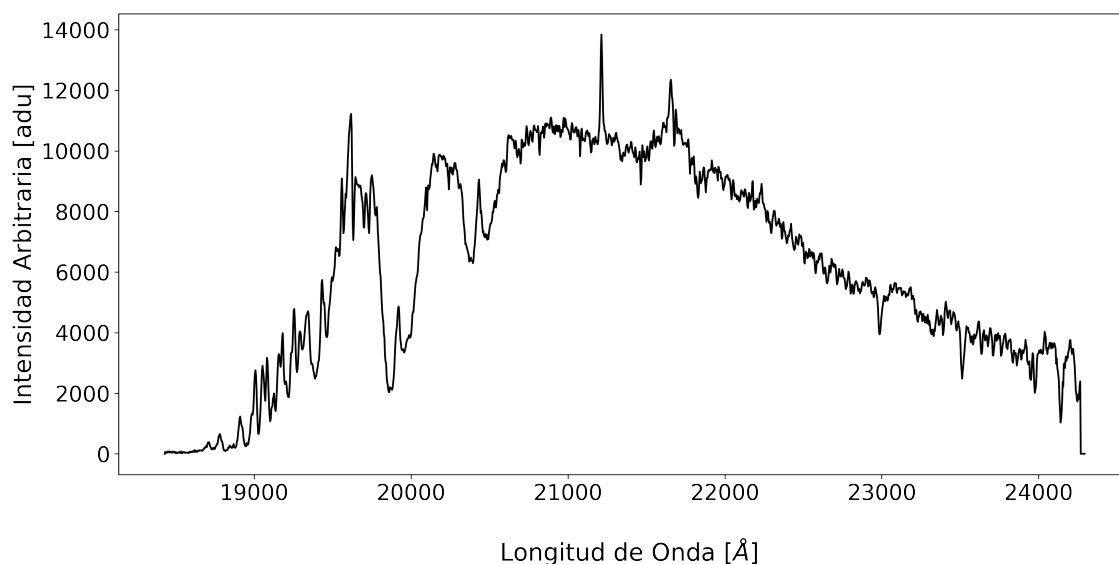


Figura 2.16: Espectro unidimensional de NGC 2992 obtenido con una ventana de extracción de 3 píxeles centrada en el pico de emisión de la galaxia.

2.4.3. Corrección telúrica

Por último, teniendo los espectros unidimensionales de NGC 2992 y de HIP 41987, se realizó la corrección telúrica. La atmósfera terrestre emite y absorbe fotones. Cuando se restan los espectros bidimensionales de cielo a los de la galaxia en el proceso de reducción, se corrigen los efectos causados por la emisión de la atmósfera, es decir, las líneas espectrales de emisión de cielo y la contribución del continuo de la atmósfera. Pero la absorción atmosférica, es decir los fotones que son retenidos por la presencia de la atmósfera en la región del NIR, se corrige tomando la noche de observación el espectro de una estrella con el que se construye la denominada

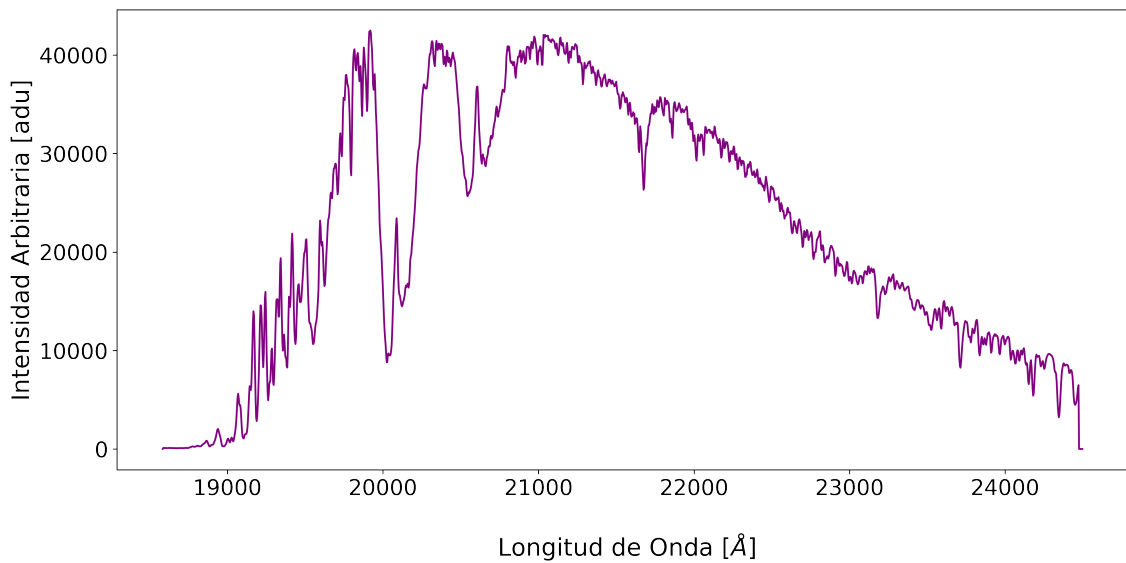


Figura 2.17: Espectro unidimensional de HIP 41987 obtenido con una ventana de extracción de 6 píxeles centrada en el pico de emisión de la estrella.

curva de transmisión. La misma cuantifica la absorción de la atmósfera y del sistema óptico utilizado, por lo cual se le debe sustraer la contribución estelar, tanto el continuo estelar, dado por un cuerpo negro como las líneas espectrales de absorción en caso de ser necesario.

Uno de los objetivos de este trabajo es analizar la línea en emisión $Br\gamma$ ($\lambda_c = 2.625 \mu m$) que se encuentra en el espectro de NGC 2992. En la Figura 2.17 puede verse que HIP 41987 tiene $Br\gamma$ en absorción, por esto es necesario quitar dicha absorción para la corrección telúrica con el fin de evitar alterar el perfil de la línea en emisión en el espectro de NGC 2992. Para esto se ajustó una Lorentziana a la línea en absorción en el espectro de la estrella y se sustrajo. En la Figura 2.18 la curva violeta corresponde al espectro de HIP 41987 y la modificación en rojo es el resultado en esa región del espectro de quitar la absorción sobre $Br\gamma$.

Por otro lado, se ajustó una curva de cuerpo negro teniendo en cuenta que el tipo estelar y clase de luminosidad de la estrella HIP 41987 es A(V)⁶. Luego de sustraer la curva de cuerpo negro al espectro de la estrella sin la absorción en $Br\gamma$, se obtuvo la curva de transmisión que se observa en color azul, superpuesta al espectro de NGC 2992 como se muestra en la Figura 2.19.

Dividir el espectro de la galaxia por la curva de transmisión da como resultado el espectro final sobre el que se realizará la ciencia. En la Figura 2.20 se presenta el

⁶[http://cdsportal.u-strasbg.fr/?target=HIP %2041987](http://cdsportal.u-strasbg.fr/?target=HIP%2041987)

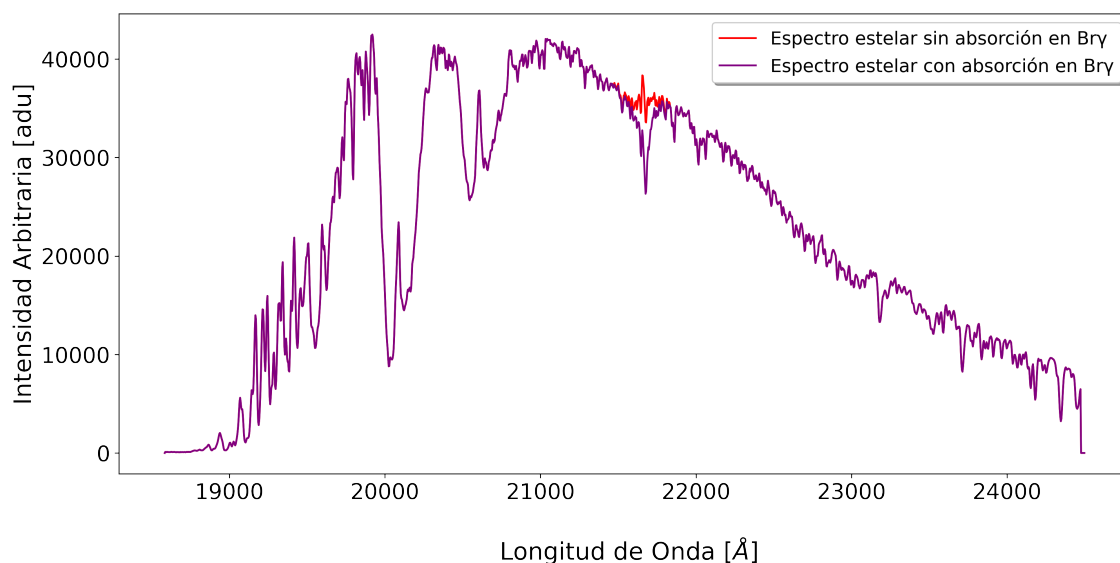


Figura 2.18: En violeta se muestra el espectro unidimensional de HIP 41987 con la correspondiente absorción en $Br\gamma$. En rojo se muestra la modificación luego de quitar dicha absorción.

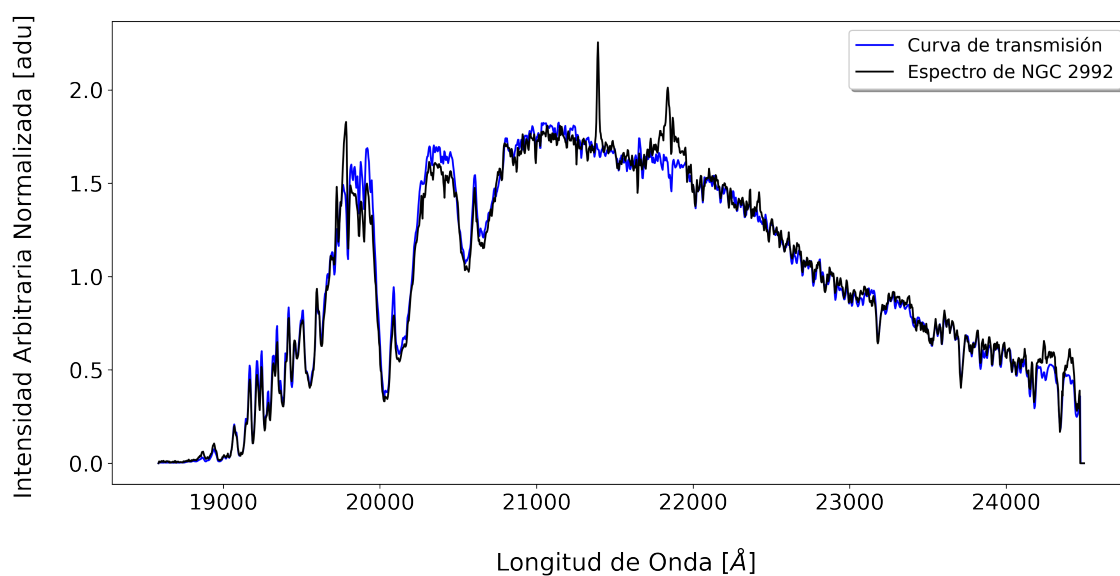


Figura 2.19: En azul se muestra la curva de transmisión y en negro el espectro de NGC 2992.

espectro final de NGC 2992 correspondiente a la extracción del tamaño del *seeing* (3 píxeles). Este espectro está en un sistema de referencia en reposo, lo que significa que se encuentra corregido por *redshift*. La intensidad observada está en cuentas arbitrarias debido a que, si bien durante la reducción y la corrección telúrica se corrigen los efectos de la atmósfera y del sistema óptico, no está calibrado en flujo. Para los objetivos de este trabajo no fue necesaria la calibración en flujo. Además, en el infrarrojo, esta calibración puede representar una fuente grande de error. Las líneas

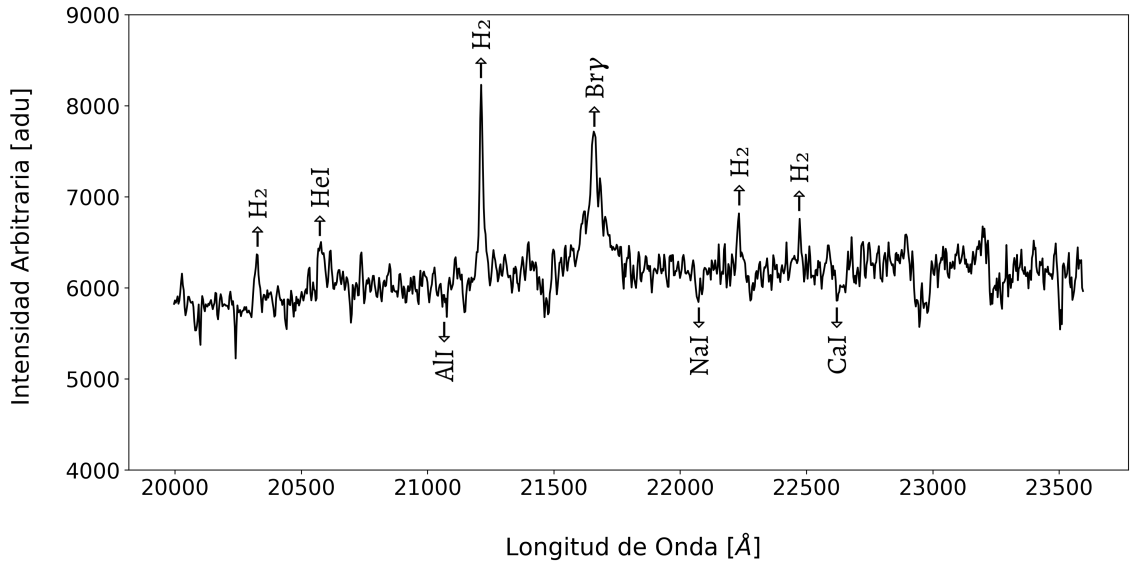


Figura 2.20: Espectro final de NGC 2992 correspondiente a la extracción del tamaño del *seeing* corregido por *redshift*. Se identifican líneas en emisión y en absorción a lo largo del rango espectral abarcado. El eje espectral está en \AA , mientras que la intensidad observada está en cuentas arbitrarias.

identificadas corresponden a líneas en emisión de helio neutro, hidrógeno ionizado y molecular y líneas de absorción de calcio, sodio y aluminio.

El procedimiento de corrección telúrica fue aplicado de manera análoga a lo desarrollado en esta sección para las 21 extracciones realizadas sobre el espectro bidimensional de NGC 2992 con una ventana de extracción de 2 píxeles.

El *seeing* correspondiente a la noche de observación de los datos espectroscópicos se obtuvo realizando ajustes gaussianos con la tarea `j-imexam` de IRAF a los perfiles espaciales de la estrella HIP 41987, tomados a lo largo de todo el rango de longitudes de onda de la banda K_{long} en el espectro bidimensional de la estrella. De cada corte se tomó el valor del FWHM, el cual indica el ancho de la PSF y se utiliza como indicador del *seeing*, y se realizó un promedio y desviación estándar de los datos recolectados, obteniendo:

$$SEEING = (2.49 \pm 0.11) \text{ pixeles} \quad (2.4.10)$$

lo que, teniendo en cuenta la escala de placa, equivale a:

$$SEEING = (0.49 \pm 0.02) '' \quad (2.4.11)$$

Capítulo 3

Resultados y análisis

A partir del estudio de las distintas estructuras que conforman la región central de la galaxia activa NGC 2992 y del análisis de perfiles de línea, los cuales fueron realizados utilizando la imagen reducida en banda J y el espectro unidimensional en banda K_{long} de la galaxia obtenidos en el Capítulo 2, se encuentran evidencias de que el AGN podría estar descentrado respecto de estructuras de mayor tamaño. También, se reportan nuevos resultados que contribuyen al escenario de variabilidad en el que está inmerso la galaxia desde que fue observada espectroscópicamente por primera vez hace aproximadamente cuatro décadas. En este Capítulo, se desarrolla la metodología utilizada para hallar los diferentes indicadores que contribuyen a caracterizar la galaxia activa NGC 2992, así como también proporcionar un breve análisis de cada uno de estos resultados.

3.1. Caracterización estructural de NGC 2992

3.1.1. Perfil espacial

Las extracciones unidimensionales en los espectros bidimensionales pueden realizarse en dos direcciones: en la dirección espectral o de la dispersión, donde se obtiene la intensidad en función de la longitud de onda, y en la dirección espacial, consiguiendo el perfil de brillo de la galaxia en función de la distancia al centro a partir de la imagen de la ranura.

El espectro de NGC 2992 en banda K_{long} corresponde a la región nuclear y circumnuclear de la galaxia. Para modelar las diferentes componentes de una extracción espacial es necesario definir las distintas distribuciones de brillo que se ajustan a este tipo de regiones. Varias décadas atrás, de Vaucouleurs (1959) propuso una ley para

ajustar el perfil de luz de una galaxia elíptica, donde el brillo decaía en función del radio como $1/4$. Años más tarde, Sérsic (1963) generalizó dicha ley para diferentes modelos morfológicos, proponiendo que la intensidad de una galaxia varía en función de la distancia al centro (radio) de la siguiente manera:

$$I(R) = I_o * \exp \left(-b_n \left[\left(\frac{R}{R_e} \right)^{1/n} - 1 \right] \right) \quad (3.1.1)$$

donde I_o es la intensidad en el radio efectivo R_e , el cual comprende la mitad de la luz de la galaxia, n es llamado “n de Sérsic” y sirve para modelar distintos tipos morfológicos ya que define la forma del perfil de luz. Por último, b_n es un parámetro que depende de n . Graham y Driver (2005) propusieron algunos valores típicos para modelar diferentes estructuras: $n = 4$ para galaxias elípticas o el bulbo de galaxias S0, $2 < n < 4$ para el bulbo de galaxias espirales más tardías, $n = 1$ para un disco y $0.5 < n < 1$ para estructuras como discos ensanchados o barras. Por otra parte, en diferentes trabajos se ha utilizado una componente gaussiana para modelar al AGN, debido a que ésta se presenta como una fuente puntual no resuelta debido a la resolución de las observaciones (por ejemplo, Savorgnan, 2016).

Es importante tener en cuenta que en muchas ocasiones al modelar el perfil de luz de la región nuclear de una galaxia que contiene un AGN, puede ocurrir que se encuentren descentrados entre las diferentes estructuras, los cuales se identifican como asimetrías en el perfil. Estas estructuras, consideradas en su mayoría de origen estelar, se pueden representar con distintas componentes de Sérsic que develen tanto su forma como su tamaño. Si bien los perfiles espaciales pueden extraerse tanto de imágenes como de espectroscopía 2D, una de las ventajas de utilizar espectros es que permite reconstruir el perfil de luz en diferentes rangos de longitudes de onda, pudiendo ser estos sobre el continuo o sobre las líneas de emisión.

Las diferentes componentes ajustadas al perfil espacial se suman de manera que la adición de todas ellas ajusten a los valores discretos obtenidos del perfil espacial. Los residuos se miden como la diferencia entre los valores del perfil y los valores del ajuste total de todas las componentes. En este caso, el criterio para lograr el mejor ajuste fue obtener aquél que minimice los residuos.

Se extrajeron dos perfiles espaciales de NGC 2992 del espectro en banda K_{long} , utilizando la herramienta `pvector` de IRAF. Uno de ellos corresponde a la región azul del filtro sobre el continuo (con un ancho $\Delta\lambda = 150 \text{ \AA}$) desde $\lambda = 21050 \text{ \AA}$ hasta $\lambda = 21200 \text{ \AA}$ (ver Figura 3.1), mientras que el otro corresponde a la parte roja del filtro, también sobre el continuo, desde $\lambda = 22900 \text{ \AA}$ hasta $\lambda = 23050 \text{ \AA}$ (ver

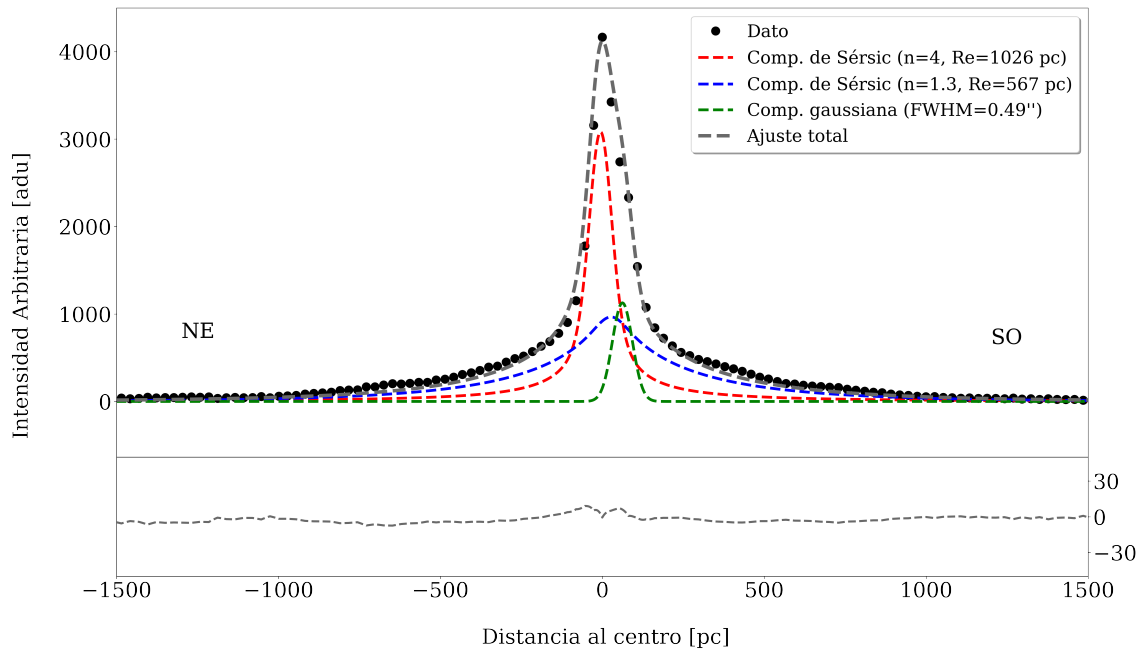


Figura 3.1: Ajuste de componentes sobre el perfil espacial de NGC 2992 extraído de la región azul del espectro en banda K_{long} . En el panel inferior se muestran los residuos del ajuste.

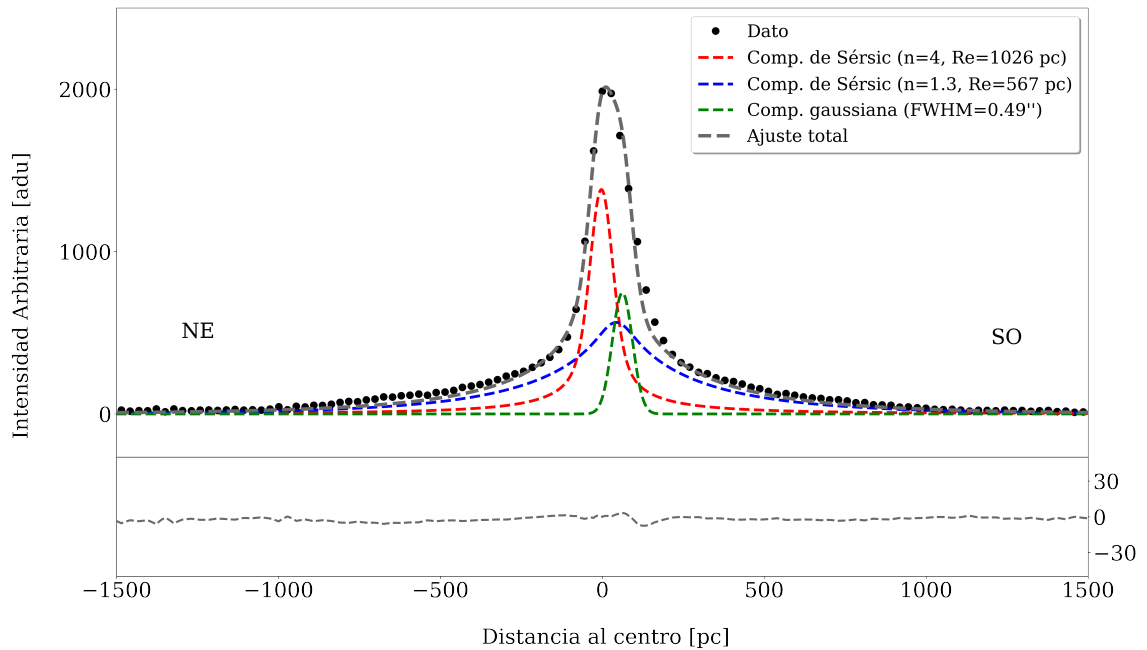


Figura 3.2: Ajuste de componentes sobre el perfil espacial de NGC 2992 extraído de la región roja del espectro en banda K_{long} . En el panel inferior se muestran los residuos del ajuste.

Figura 3.2). El hecho de mostrar ambos perfiles se debe a que en el caso del perfil azul la señal es mayor, mientras que el perfil rojo, si bien la señal es menor, presenta menos extinción.

Al ajustar las componentes estructurales clásicas para una galaxia espiral, es de-

Componente	FWHM ["]	Corrimiento [pc]	n_{SERSIC}	Radio efectivo [pc]
Gaussiana	0.49	54	-	-
Sérsic	-	0	4	1026
Sérsic	-	0	1.3	567

Tabla 3.1: Parámetros de las diferentes componentes ajustadas tanto en el perfil espacial de NGC 2992 de la región azul como en el de la región roja.

cir, un disco más un bulbo, se detectó un exceso de emisión hacia el suroeste (SO), por lo que se incluyó una gaussiana asociada al AGN no resuelto. Esta estructura puede tener tanto contribución del disco de acreción que se encuentra alrededor del SMBH, como de polvo calentado por el AGN o de la población estelar de la región nuclear. Tanto para el perfil azul como para el rojo, se ajustó una componente gaussiana a una distancia de 2 píxeles del pico de emisión, hacia el SO, es decir, centrada a 54 pc. Si se tiene en cuenta que para la distancia de NGC 2992, 1" representa 150 pc y que la escala de placa de F2 es de 0.18"/píxel, entonces ese corrimiento espacial equivale a 54 pc. Además, se utilizaron dos componentes de Sérsic, con los mismos valores en sus parámetros y variando únicamente la intensidad. En la tabla 3.1 se especifican los parámetros obtenidos para cada estructura. Es importante aclarar que el FWHM de la gaussiana corresponde al *seeing* de la noche de observación del espectro.

Por otra parte, la componente de Sérsic con $n = 4$ y un radio efectivo de 1026 pc denota que la forma de esta estructura es de tipo bulbo y, teniendo en cuenta que no presenta corrimiento espacial, sería un indicador de que el pico de emisión de esta galaxia es estelar y está dado por esta estructura esférica central. La tercera, es una componente de Sérsic con $n = 1.3$ correspondiente a un disco que, por su tamaño de 567 pc, es circumnuclear.

Por otro lado, se obtuvo el perfil espacial sobre las líneas en emisión H_2 y $Br\gamma$ tomando una extracción del ancho de las líneas que contuviera la mayor parte de flujo posible sin incluir las colas del perfil de línea (para evitar tomar más ruido que señal). A esta extracción en cada caso se le restó la contribución del continuo tomando una extracción del mismo ancho a cada lado de la línea para promediarlos y posteriormente restar dicho promedio al perfil de H_2 y $Br\gamma$, respectivamente. Con esto, se obtuvieron los perfiles espaciales presentados en las Figuras 3.3 y 3.4.

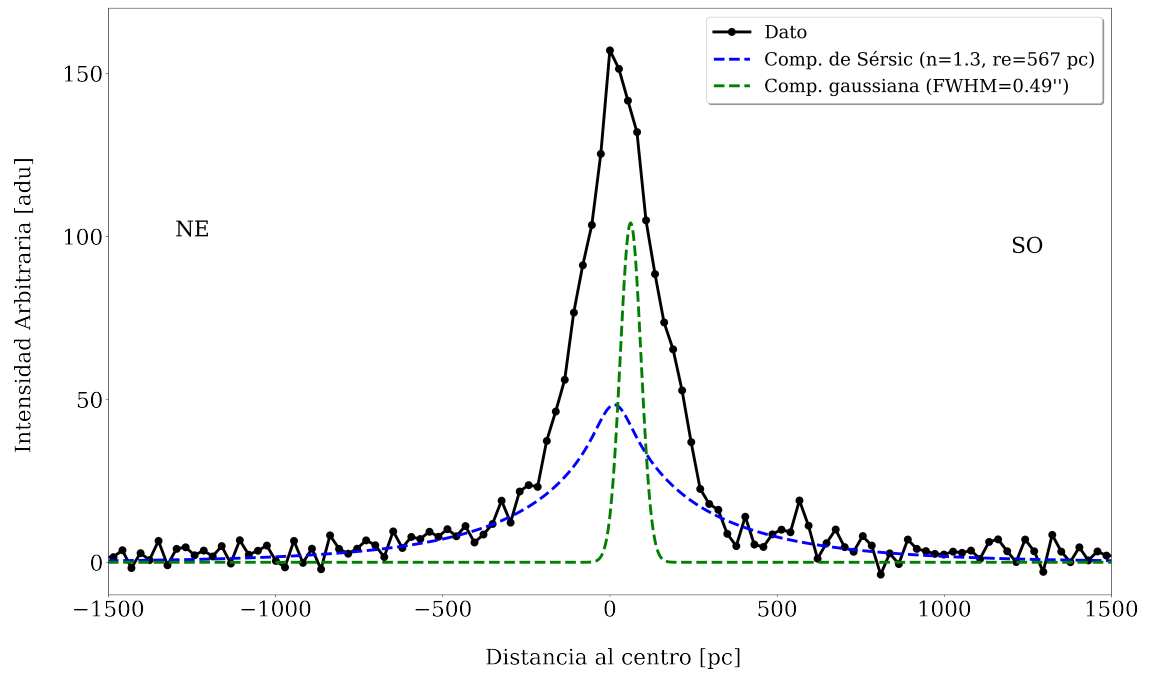


Figura 3.3: Perfil espacial de la línea en emisión H_2 extraído del espectro en banda K_{long} de NGC 2992.

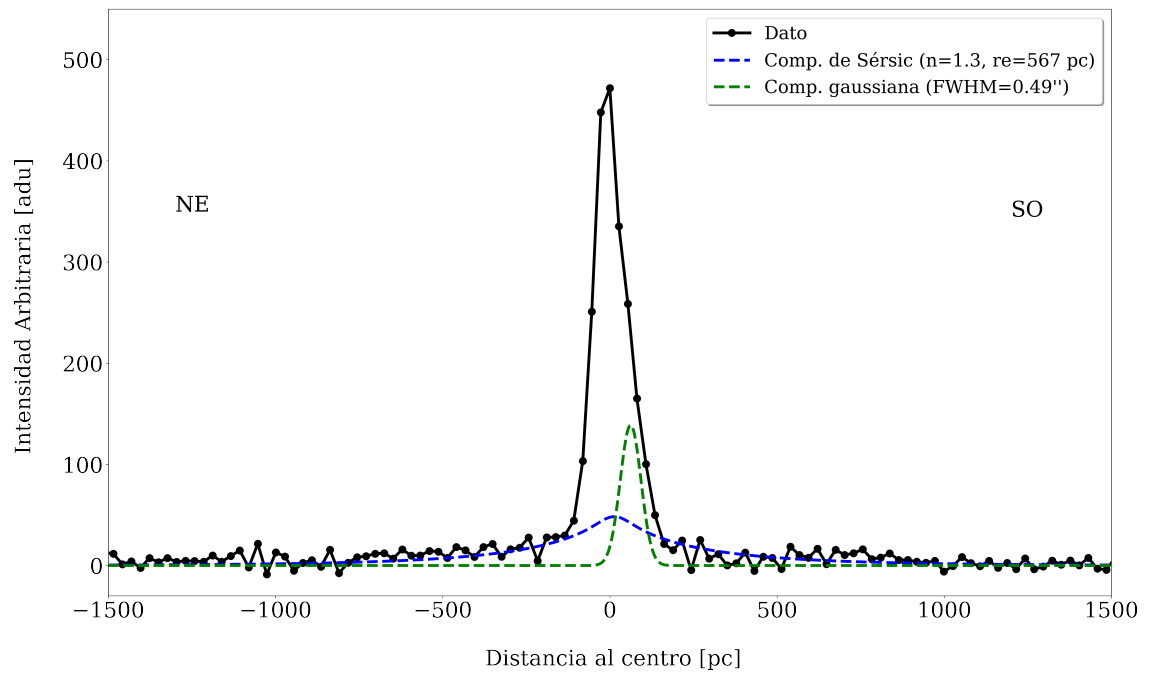


Figura 3.4: Perfil espacial de la línea en emisión $Br\gamma$ extraído del espectro en banda K_{long} de NGC 2992.

Si bien ambos perfiles son demasiado complejos como para ser modelados de manera confiable, sí es posible notar que tanto para el caso del perfil de H_2 como el de $Br\gamma$ existe emisión de gas extendida y que el disco circunuclear observado

en los perfiles espaciales sobre el continuo también está presente, lo cual muestra que las estructuras de gas están centradas en el pico de emisión de la galaxia. Si se supone que el exceso de emisión detectado a $54 pc$ hacia el SO es donde se encuentra el AGN, se estaría insinuando un desacople con las estructuras de gas, el cual podría generar una pérdida de momento angular que dejase caer el gas a la región del SMBH de forma eficiente, como se explicó en el Capítulo 1.

3.1.2. Curva de velocidad radial de gas molecular

Como se vió en la Sección 1.3.1, la curva de velocidad radial de gas molecular es una herramienta interesante para hallar asimetrías respecto del centro del potencial alrededor del cual giran las diferentes estructuras que conforman la galaxia. Se utiliza gas molecular y no gas ionizado, debido a que el primero se encuentra en una fase de menor turbulencia que el segundo. Esta curva relaciona específicamente el valor de velocidad radial (v_R) del gas, a determinada distancia del centro, y puede obtenerse de la medición de la longitud de onda central observada ($\lambda_{obs}^{central}$) de la línea en emisión del gas estudiado para diferentes radios en el espectro bidimensional mediante la relación:

$$v_R = \frac{(\lambda_{obs}^{central} - \lambda_{reposito}^{central}) * c}{\lambda_{reposito}^{central}} \quad (3.1.2)$$

donde $\lambda_{reposito}^{central}$ es la longitud de onda central de la línea en un sistema de referencia en reposo y c es la velocidad de la luz.

En la Figura 3.5 se presenta la línea de hidrógeno molecular (H_2), cuya $\lambda_{reposito}^{central} = 21250 \text{ \AA}$, para las 21 extracciones de 2 píxeles realizadas a diferentes radios. La extracción centrada en el radio cero corresponde al pico de emisión de la galaxia. Puede observarse el corrimiento de la línea dado por el efecto Doppler. De cada extracción se midió la $\lambda_{obs}^{central}$, a partir de un ajuste automático de componente única realizado con el *software LiMe*¹, y utilizando la ecuación 3.1.2 se obtuvo la curva de velocidad radial expuesta en la Figura 3.6. Las velocidades no fueron deproyectadas por inclinación debido a que el espectro está tomado a lo largo del semieje mayor. Dado el ángulo de posición de 32, la izquierda del gráfico corresponde a la dirección noreste (NE), mientras que la derecha a la dirección suroeste (SO), aproximadamente.

¹<https://lime-stable.readthedocs.io/en/latest/>

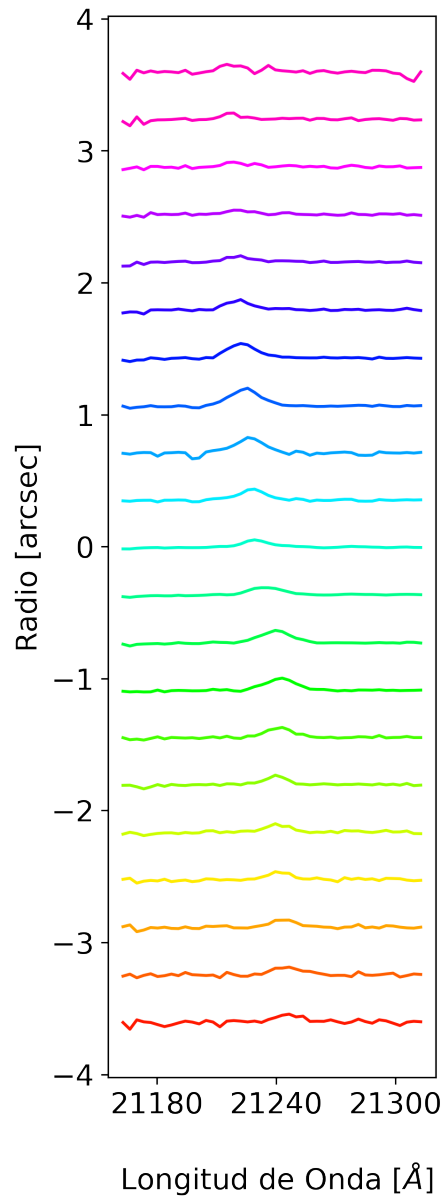


Figura 3.5: Línea de H_2 observada en 21 extracciones a diferentes radios espaciales del espectro bidimensional de NGC 2992 en banda K correspondiente a junio de 2022.

Puede notarse que la diferencia de velocidad radial no es simétrica respecto al pico de emisión de la galaxia, es decir, la extracción central. Al centrar esta curva en el primer radio hacia el SO, es decir a $54 pc$ del pico de emisión, y reflejar los puntos que quedan del lado SO sobre los del NE, se detecta un centro cinemático que domina una región de hasta aproximadamente $1''$ de radio (ver Figura 3.7). Respecto de ese nuevo centro, la curva de rotación presenta una pendiente más pronunciada, lo que indica que allí el pozo de potencial es más profundo, pudiendo evidenciar que ésta sería la posición más probable para el AGN.

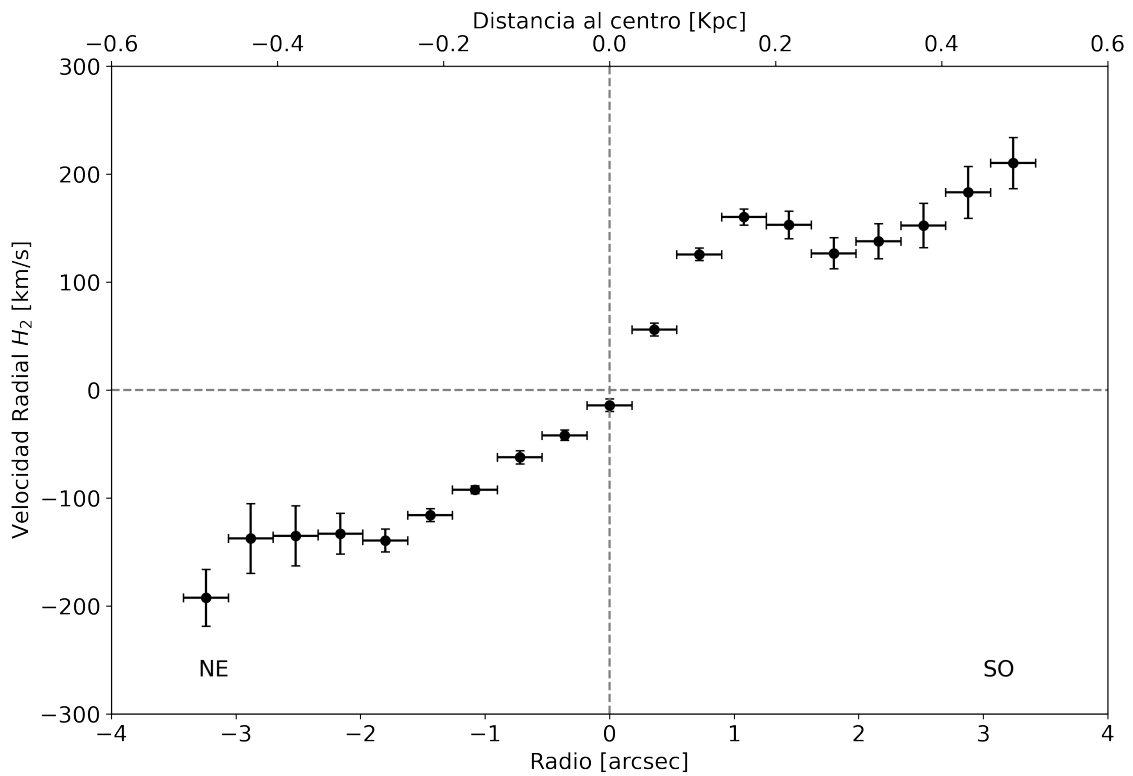


Figura 3.6: Curva de velocidad radial de H_2 construida a partir del espectro en banda K de NGC 2992.

Por otro lado, si se centra la curva de velocidad radial en el primer radio hacia el NE respecto del pico de emisión y se reflejan los puntos que quedan hacia el SO sobre los puntos que quedan hacia el NE, como se muestra en la Figura 3.8, se puede notar una segunda estructura, más externa, que parece estar centrada respecto de este nuevo radio central. En este caso, como hacia el lado SO se encuentra la estructura que se está suponiendo es la nuclear, al hacer la reflexión y obtener los puntos azules no se espera que queden exactamente por encima de los negros. Si es notable la tendencia de la forma que toman ambas curvas, la azul y la negra, del lado NE, lo que da indicios de una segunda estructura, a la que se denomina circumnuclear, con un centro cinemático diferente al de la región nuclear.

Recordando el trabajo de Friedrich et al. (2010) presentado en la Sección 1.3.1, se puede decir que los resultados de la curva de velocidad radial de H_2 obtenida con el espectro de NGC 2992 en banda K correspondiente a junio de 2022, está en buen acuerdo con los resultados de la literatura que interpretan dos regiones, una nuclear y otra circumnuclear, con diferentes centros de simetría.

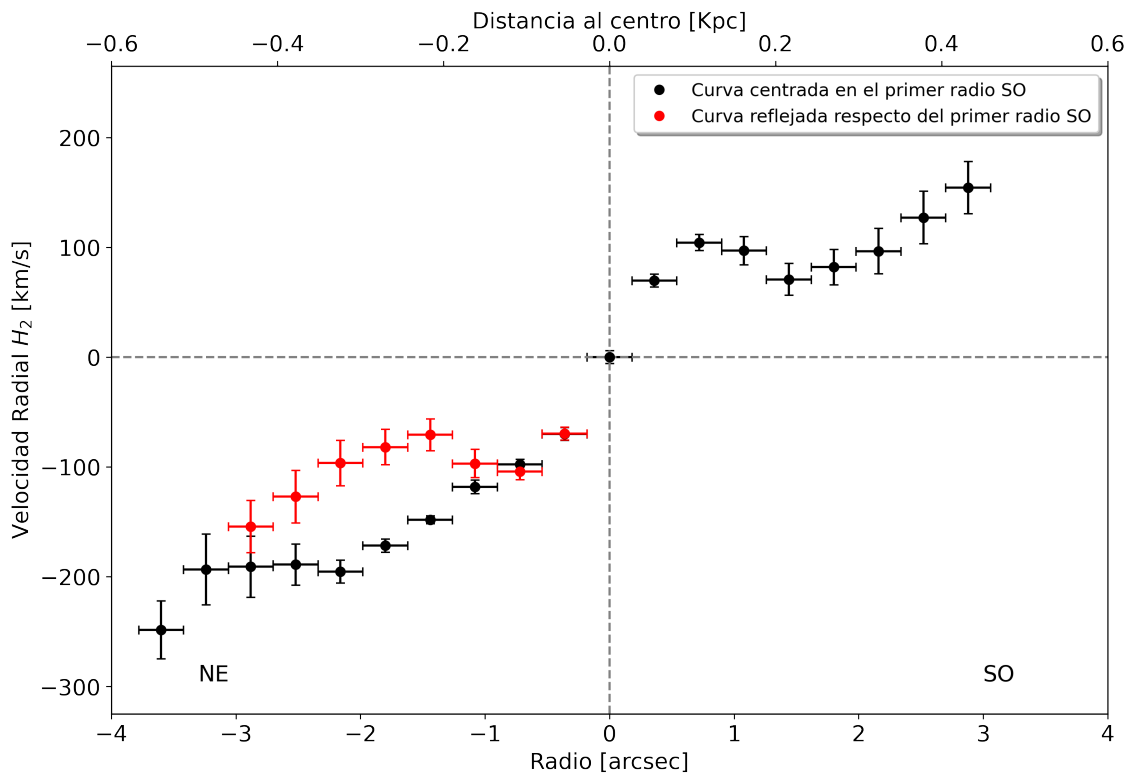


Figura 3.7: Curva similar a Figura 3.6, esta vez centrada en el primer radio hacia el SO respecto al pico de emisión de la galaxia. En rojo se muestran los puntos que quedan a la derecha del centro reflejados del lado izquierdo.

3.1.3. Espectro unidimensional descentrado

De los resultados anteriores, surge la necesidad de observar cómo es el espectro unidimensional de NGC 2992 en la región donde el estudio estructural de la galaxia devala que podría ubicarse el núcleo activo. Es por ello que se realizó una extracción de 3 píxeles centrada a $54 pc$ del pico de emisión hacia el SO y se le hizo las correspondientes correcciones telúrica y por *redshift*, obteniendo el espectro presentado en la Figura 3.9.

Es notable que existe una diferencia en la pendiente hacia el rojo en comparación al espectro de la Figura 2.20, el cual también corresponde a una extracción del tamaño del *seeing* pero centrada en el pico de emisión. Esta pronunciada pendiente, esperada para un AGN, ha sido interpretada en otras fuentes como debida al polvo calentado por el disco de acreción de un SMBH o a la emisión del disco de acreción en sí misma (e.g. Dwek et al., 2007; Durré y Mould, 2018; Gaspar et al., 2019; Gaspar et al., 2022; GRAVITY Collaboration et al., 2020; Riffel et al., 2022). Por lo tanto, es un indicio adicional del descentrado del AGN con respecto a las estructuras más externas.

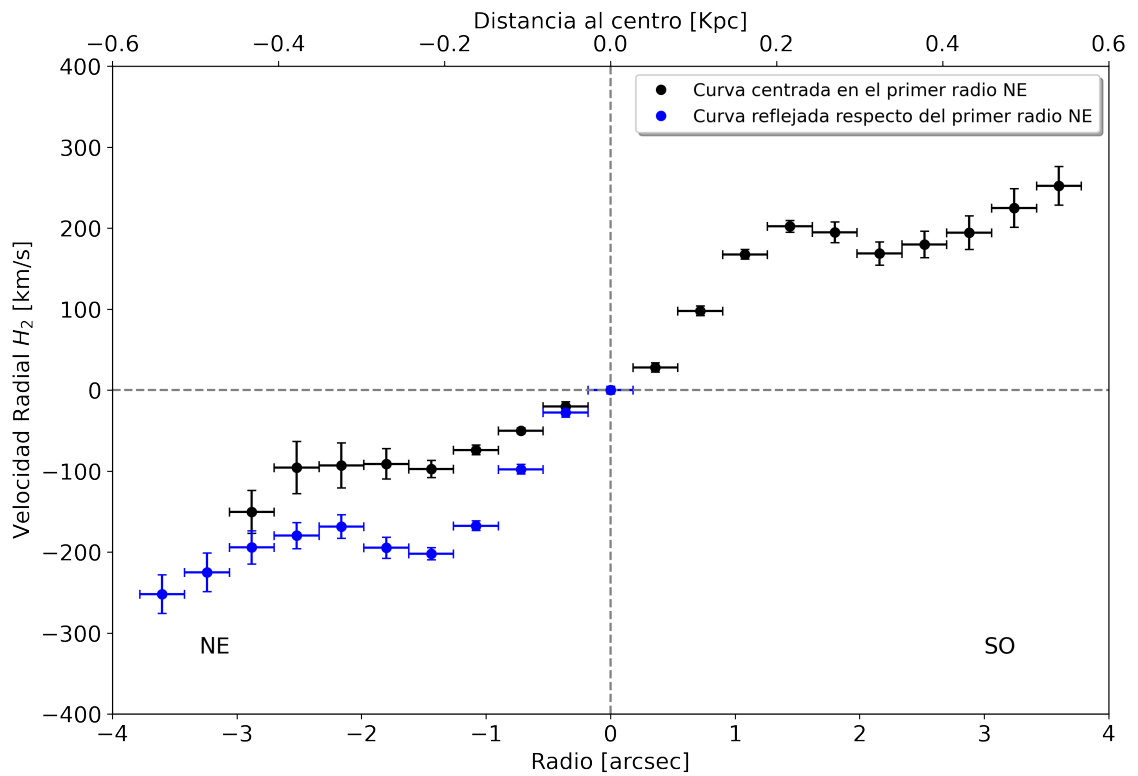


Figura 3.8: Curva de velocidad radial de hidrógeno molecular, construida a partir del espectro en banda K de NGC 2992, centrada en el primer radio hacia el NE respecto al pico de emisión de la galaxia. En azul se muestran los puntos que quedan a la derecha del centro reflejados del lado izquierdo.

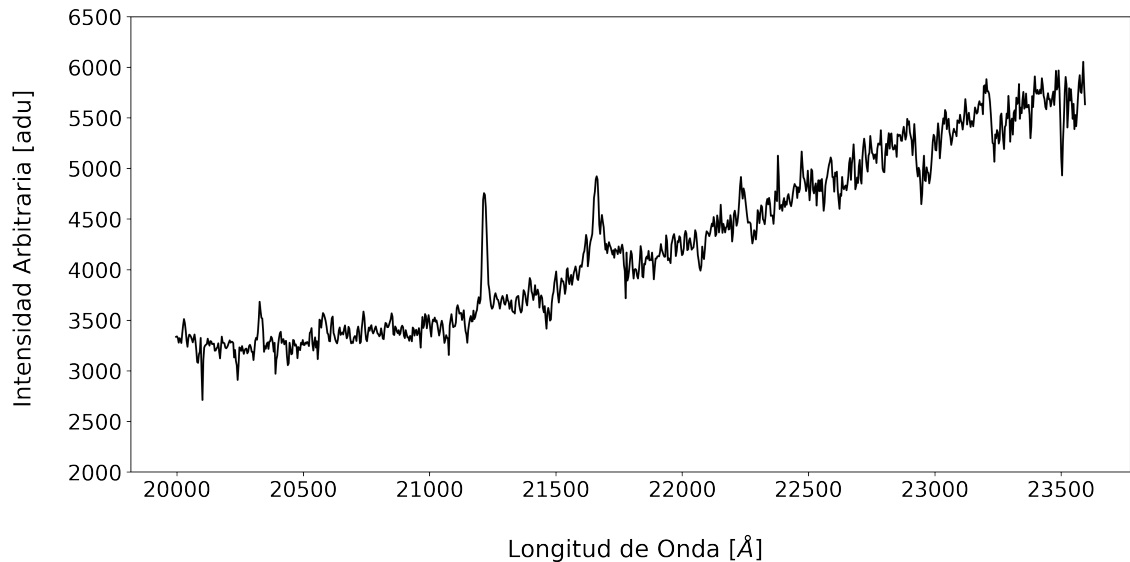


Figura 3.9: Espectro unidimensional de NGC 2992 obtenido de una extracción del tamaño del *seeing* realizada a 54 pc del pico de emisión hacia el SO.

3.2. Escenario de variabilidad en NGC 2992

3.2.1. Magnitud nuclear en banda J

Además de la caracterización estructural, otro de los objetivos de este trabajo es contribuir con el escenario de variabilidad de NGC 2992 que se menciona en la literatura científica, tanto en magnitud medida como en el tipo de emisión. Para ello, en primer lugar, se presentan los cálculos realizados para obtener la magnitud de la galaxia con observaciones correspondientes a enero de 2022. Cabe mencionar que si bien se tienen imágenes en los filtros J, H y Ks, fue posible medir la magnitud nuclear solamente en la imagen en banda J, ya que en las otras dos el núcleo se hallaba saturado.

La magnitud fue medida con la herramienta `qphot` de IRAF. Dicha tarea solicita una región circular, un radio centrado en el objeto y un ancho que utiliza para calcular la contribución del fondo. Si bien el fondo de cielo fue removido durante la reducción, NGC 2992 presenta una cola de marea como se puede ver en la Figura 3.10. Por esto, se realizó un análisis para estudiar la variación del valor de la magnitud medida en una determinada apertura, al variar el tamaño de la región circular. Se tomaron dos anchos y dos radios diferentes y se obtuvo que la magnitud no varía, al menos dentro de las tres cifras significativas, indicando que la contribución de la cola de manera no es influyente al momento de calcular la magnitud.

Utilizando la tarea `qphot`, con los valores de radio y ancho del panel superior derecho en la Figura 3.10 y con el valor de cero fotométrico calculado en la Sección 2.3, se presentan en la segunda columna de la Tabla 3.2 los valores de magnitud medidos en el sistema fotométrico MKO, sin corrección por apertura, en dos aperturas diferentes centradas en el pico de emisión: $2''$ y $1''$. Los errores asociados son los arrojados por la tarea de IRAF.

Apertura	m_J^{MKO} (SC)	m_J^{MKO} (CC)
	<i>mag</i>	<i>mag</i>
$1''$	(12.731 ± 0.002)	(12.6 ± 0.2)
$2''$	(11.965 ± 0.001)	(11.9 ± 0.2)

Tabla 3.2: Magnitud de NGC 2992 para dos aperturas diferentes. En la segunda columna, los valores sin corrección por apertura (SC) y en la tercera columna, los valores con corrección por apertura (CC). El error asociado a la segunda columna es arrojado por la tarea en IRAF luego de la medición instrumental de las magnitudes.

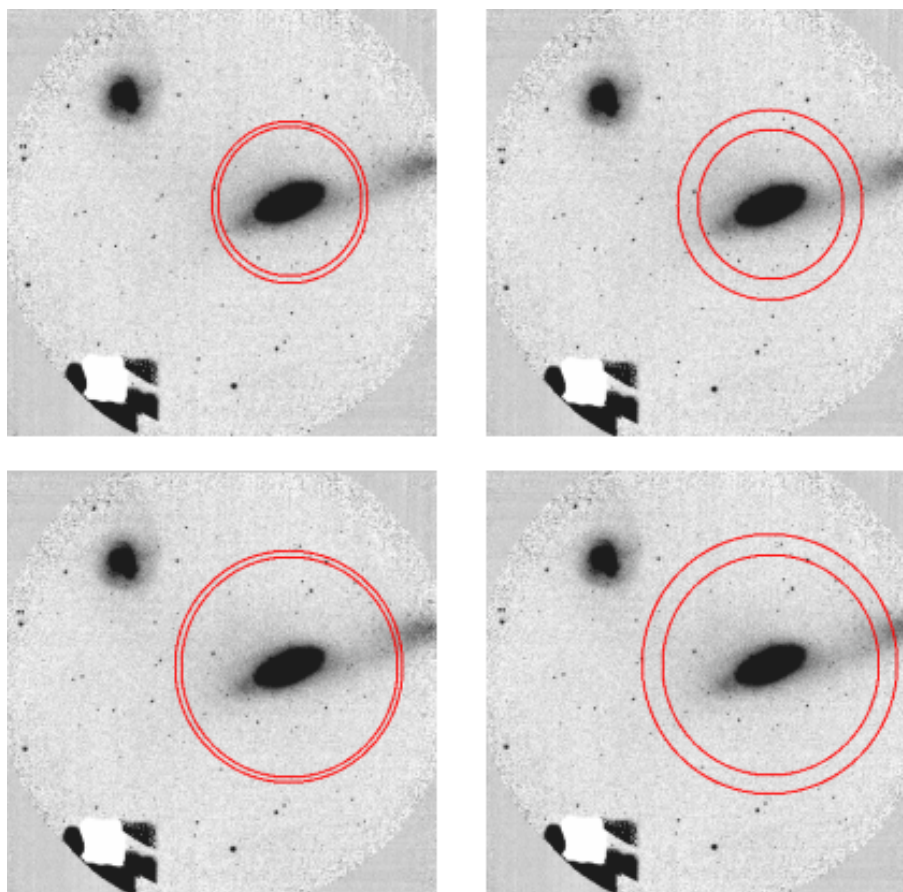


Figura 3.10: Imagen de NGC 2992 en banda J. El área encerrada tiene un radio interno de 370 píxeles y un ancho de 30 píxeles (panel superior izquierdo), un radio interno de 370 píxeles y un ancho de 100 píxeles (panel superior derecho), un radio interno de 550 píxeles y un ancho de 30 píxeles (panel inferior izquierdo) y un radio interno de 550 píxeles y un ancho de 100 píxeles (panel inferior derecho).

Luego, de la Figura 2.12 presentada en la Sección 2.3, se obtuvo que la corrección por apertura en la imagen de NGC 2992 en banda J para $1''$ fue de -0.1158 magnitudes y para la de $2''$ de -0.012 magnitudes. En la tercera columna de la Tabla 3.2 se muestran las magnitudes corregidas por aperturas. Los errores asociados se deben a que, dentro de las fuentes de error en el cálculo, la obtención del cero fotométrico es la mayor (con un valor de 0.2 magnitudes), por lo que se asocia esta incertidumbre a las magnitudes medidas.

3.2.2. Comparación de la magnitud con reportes anteriores

Otro de los objetivos de este trabajo radicó en agregar un punto de comparación al escenario de variabilidad. Se buscó comparar la magnitud medida sobre la imagen de NGC 2992 en banda J de F2 con el resultado presentado por Alonso-Herrero et al.

(2001) de la magnitud de la galaxia en banda J medida en el año 1998. Los autores reportaron dicha magnitud, corregida por apertura (medida en una apertura de $3''$), en el sistema fotométrico UKIRT. Dado esto, para poder realizar la comparación, en primer lugar se transformó esta magnitud al sistema fotométrico MKO. Según Leggett et al. (2007), la transformación del sistema fotométrico UKIRT a MKO está dada por:

$$m_J^{MKO} = (0.017 \pm 0.004) - (0.044 \pm 0.007) * (m_J^{UKIRT} - m_K^{UKIRT}) + m_J^{UKIRT} \quad (3.2.3)$$

Dado el reporte de Alonso-Herrero et al. (2001) de (12.34 ± 0.09) magnitudes en el filtro J y (10.94 ± 0.08) magnitudes en el filtro K para NGC 2992, usando la ecuación 3.2.3 se obtuvo la magnitud de los autores en el sistema fotométrico MKO utilizando dos métodos. El primero fue usando la fórmula 3.2.3 de manera directa y calculando el error asociado a partir de derivadas parciales:

$$m_J^{MKO}_{1998/D} = (12.30 \pm 0.11) \text{ mag} \quad (3.2.4)$$

El segundo método fue basado en MonteCarlo, tomando como gaussiana cada variable de la ecuación 3.2.3, obteniendo:

$$m_J^{MKO}_{1998/MC} = (12.38 \pm 0.09) \text{ mag} \quad (3.2.5)$$

Por otro lado, para cotejar con la magnitud medida sobre la imagen de NGC 2992 en banda J correspondiente al año 2022, es necesario degradar la imagen de F2 al *seeing* reportado por Alonso-Herrero et al. (2001), el cuál fue de $0.7''$. Para esto, se utilizó la herramienta **gauss** de IRAF, que solicita, además de la imagen de entrada, un valor de sigma para realizar la degradación. Este valor fue obtenido a partir del valor de *seeing*, $0.7''$, y de la escala de placa de *Flamingos-2*, de $0.18''/\text{pixel}$:

$$FWHM = 2.355 * \sigma \rightarrow \sigma = \frac{FWHM}{2.355} \rightarrow \sigma['] = \frac{0.7''}{2.355} \quad (3.2.6)$$

Si $0.7''/(0.18''/\text{pixel}) \equiv 3.889$ píxeles entonces:

$$\sigma[\text{píxeles}] = \frac{3.889 \text{ píxeles}}{2.355} \rightarrow \sigma[\text{píxeles}] = 1.65 \text{ píxeles} \quad (3.2.7)$$

Cabe destacar que se corroboró en la imagen degradada que, tomando este valor de σ , el FWHM de las estrellas de campo sea el correcto.

Antes de calcular la magnitud de la imagen de F2 en la apertura correspondiente, fue necesario conocer cómo era la corrección por apertura en la imagen degradada:

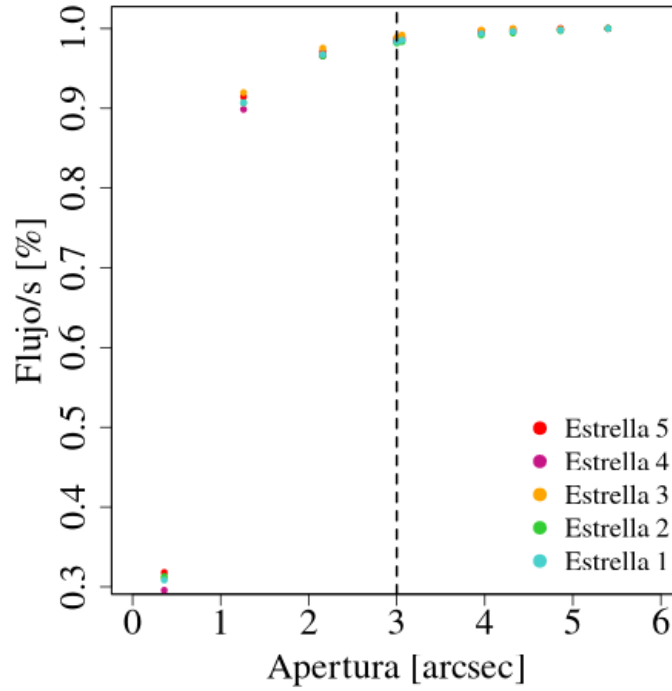


Figura 3.11: Curva de crecimiento donde se muestra el porcentaje de flujo medido en fuentes puntuales en función de diferentes tamaños de apertura. Las magnitudes fueron tomadas sobre la imagen de NGC 2992 en banda J correspondiente a enero de 2022 degradada al *seeing* de Alonso-Herrero et al. (2001).

de igual manera a como se desarrolló en la Sección 2.3, en la Figura 3.11 se muestra la magnitud medida sobre las mismas estrellas de campo que las utilizadas para obtener la Figura 2.12, pero sobre la imagen correspondiente a enero 2022 en filtro J y degradada al *seeing* reportado por Alonso-Herrero et al. (2001). Se halló que una apertura de 3'' en esta imagen contiene el 98.5 % del flujo total de una fuente puntual.

Entonces, teniendo en cuenta esto, la magnitud de NGC 2992 corregida por apertura, en el sistema fotométrico MKO, tomada sobre la imagen degradada es:

$$m_J^{MKO}_{2022} = (11.54 \pm 0.21) \text{ magnitudes} \quad (3.2.8)$$

De la comparación entre este valor y los obtenidos en las ecuaciones 3.2.4 y 3.2.5 se encontró una variación de (0.76 ± 0.32) magnitudes y (0.84 ± 0.30) magnitudes en banda J, respectivamente. Este resultado indica que NGC 2992 está en un estado de emisión mayor que hace 24 años.

3.2.3. Ajuste de componentes en la línea de emisión Br γ

Existen diferentes criterios para definir la clasificación de tipo Seyfert de una galaxia con núcleo activo. Utilizando los criterios propuestos por Osterbrock (1981), Whittle (1992) presentó una forma de clasificar galaxias activas desde una Seyfert 1 a una Seyfert 2, pasando por los tipos intermedios, a partir de la relación entre cocientes de líneas y ancho de las componentes que surgen de realizar ajustes a las líneas de emisión. La clasificación específica lo siguiente:

- Seyfert 1: hay componente ancha de $H\alpha$ y $H\beta$ con un valor de cociente de flujo de $\frac{[OIII]}{H\beta} < 0.3$.
- Seyfert 1.2: hay componente ancha de $H\alpha$ y $H\beta$ con un valor de cociente de flujo de $0.3 < \frac{[OIII]}{H\beta} < 1.0$.
- Seyfert 1.5: hay componente ancha de $H\alpha$ y $H\beta$ con un valor de cociente de flujo de $1.0 < \frac{[OIII]}{H\beta} < 4.0$.
- Seyfert 1.8: hay componente ancha de $H\alpha$ y $H\beta$ con un valor de cociente de flujo de $4.0 < \frac{[OIII]}{H\beta}$.
- Seyfert 1.9: no hay componente ancha de $H\beta$, pero si de $H\alpha$.
- Seyfert 2: no hay componente ancha de $H\alpha$ ni de $H\beta$.

Así como se puede ver en este criterio, la mayoría de los métodos de clasificación encontrados en la literatura científica corresponden a la medición de flujo o de ancho de líneas que se encuentran en el rango espectral óptico y, por ello, no es posible utilizarlos para conocer la clasificación de tipo Seyfert de NGC 2992 con el espectro correspondiente a junio de 2022 en la banda K del infrarrojo cercano.

Sin embargo, Netzer (1990) propuso en su libro "*AGN Emission Lines*" que si la componente angosta de las líneas de hidrógeno es entre un 10 % y un 20 % más intensa que la componente ancha, entonces la galaxia activa puede clasificarse como una Seyfert 1.5. Dado que la línea en emisión Br γ es una línea de hidrógeno ionizado, es posible utilizar este criterio. Es importante aclarar que la falta de unificación que existe entre las diferentes formas de catalogar un AGN, hace que reportar el tipo de Seyfert no sea muy útil al momento de analizar el escenario de variabilidad de la galaxia. Es por esto que, como se presentó en la Tabla 1.1 de la Sección 1.3, además de utilizar este criterio propuesto por Netzer (1990), el principal objetivo del ajuste

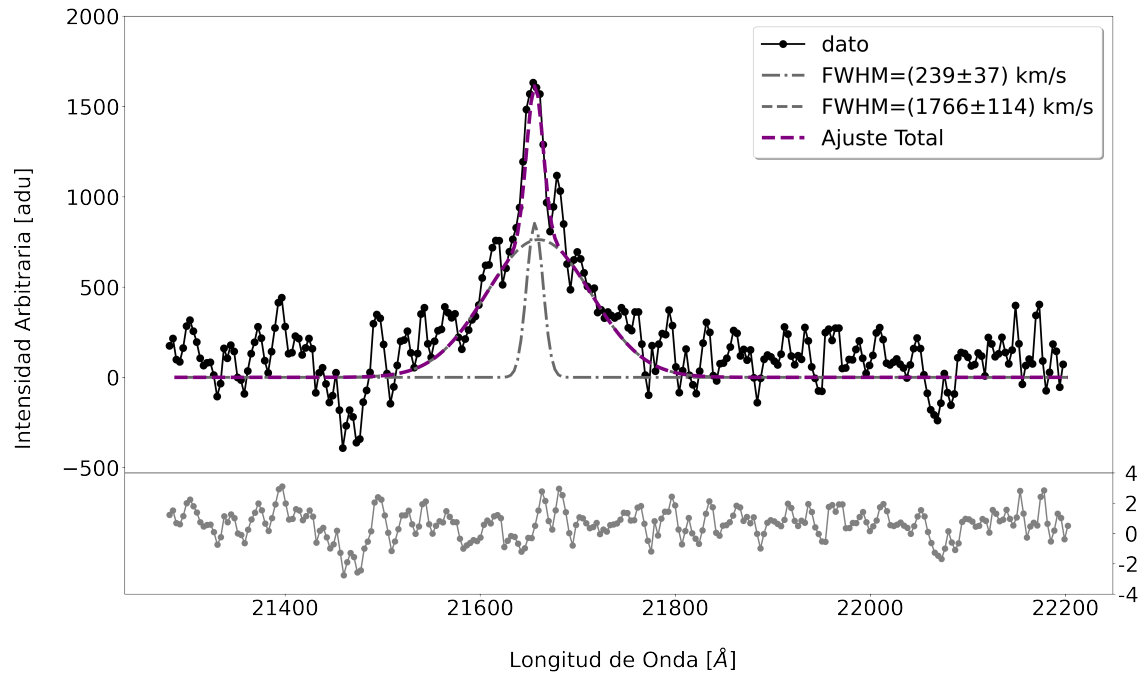


Figura 3.12: Ajuste de componentes sobre la línea en emisión del espectro en banda K de NGC 2992 correspondiente a junio de 2022. Se especifica el FWHM en $km s^{-1}$ para cada componente. En el panel inferior de muestran los residuos del ajuste.

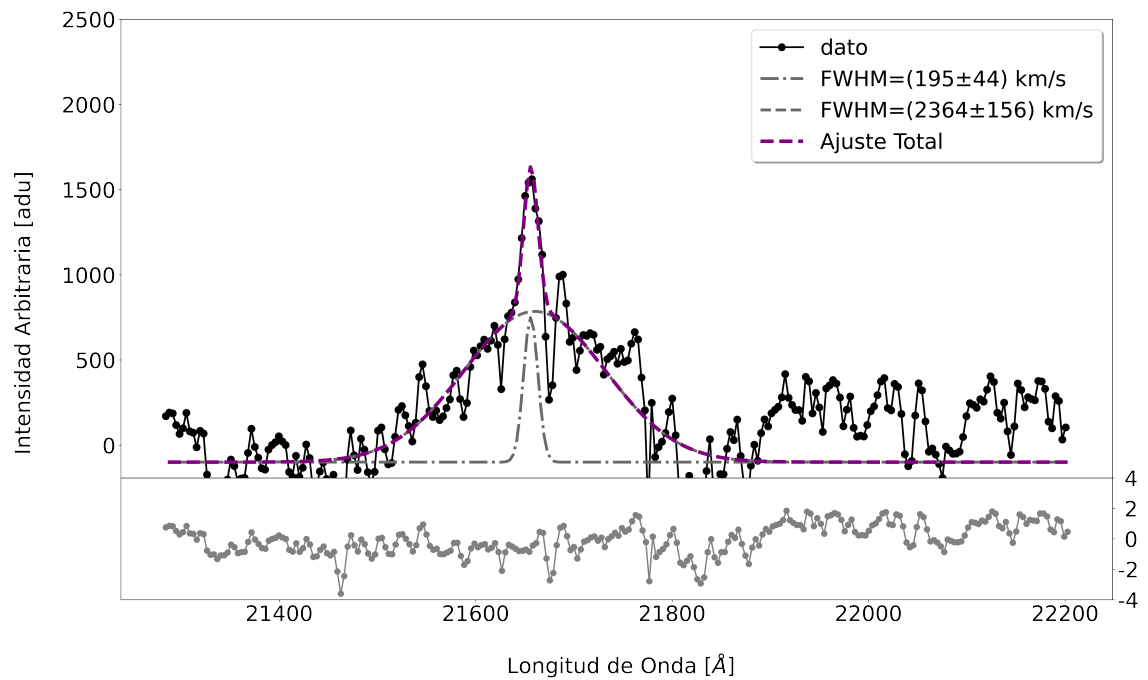


Figura 3.13: Ajuste de componentes sobre la línea en emisión $Br\gamma$ del espectro en banda K_{long} de NGC 2992 correspondiente a la extracción centrada a $54 pc$ SO del pico de emisión. Se especifica el FWHM en $km s^{-1}$ para cada componente. En el panel inferior de muestran los residuos del ajuste.

de componentes sobre la línea en emisión $Br\gamma$ está en reportar la presencia o no de la componente ancha en los espectros de banda K de junio de 2022 de NGC 2992.

En primera instancia se realizó un ajuste de doble componente en la línea $Br\gamma$ del espectro unidimensional de NGC 2992 de la Figura 2.20 (centrado en el pico de emisión) donde, recordando el modelo unificado presentado en la Sección 1.1, es posible argumentar que una de ellas es angosta, proveniente del gas ubicado en la región de líneas angostas (NLR) y el toroide, mientras que la otra componente es ancha, originada en la región de líneas anchas (BLR). Este ajuste automático de dos componentes gaussianas fue obtenido con el programa *QFitsView*, el cual arroja los valores especificados en la Tabla 3.3. Los valores de FWHM fueron deconvolucionados por perfil instrumental. El resultado puede observarse en la Figura 3.12.

Componente	Intensidad $ADUs$	Centro \AA	FWHM $km\ s^{-1}$
<i>Angosta</i>	(1380 ± 170)	(21844 ± 1)	(239 ± 37)
<i>Ancha</i>	(1230 ± 100)	(21848 ± 3)	(1766 ± 114)

Tabla 3.3: Valores obtenidos del ajuste automático de componentes sobre la línea en emisión $Br\gamma$ del espectro unidimensional de NGC 2992 centrado en el pico de emisión.

Componente	Intensidad $ADUs$	Centro \AA	FWHM $km\ s^{-1}$
<i>Angosta</i>	(849 ± 127)	(21840 ± 1)	(195 ± 44)
<i>Ancha</i>	(884 ± 52)	(21844 ± 4)	(2364 ± 156)

Tabla 3.4: Valores obtenidos del ajuste automático de componentes sobre la línea en emisión $Br\gamma$ del espectro unidimensional de NGC 2992 centrado a $54\ pc$ SO del pico de emisión.

Ahora bien, teniendo en cuenta los indicios de un posible AGN descentrado, presentados en las secciones anteriores de este Capítulo, se realizó un procedimiento análogo del ajuste de doble componente (ver Figura 3.13) sobre la línea $Br\gamma$ del espectro unidimensional de NGC 2992 de la Figura 3.9 (centrado a $54\ pc$ al SO del pico de emisión), obteniendo los valores presentados en la Tabla 3.4. Se encuentra que la componente ancha es notablemente más ancha que la obtenida de la extracción centrada en el pico de emisión. Consecuentemente, a partir de los valores de FWHM

obtenidos, se reporta que la componente ancha de las líneas de emisión de hidrógeno ionizado está presente en espectros de NGC 2992 de junio 2022.

3.3. Reservorios de material

Si se toma como pozo de potencial del AGN el primer radio resuelto hacia el SO del pico de emisión de NGC 2992, es decir, el centro cinemático de la Figura 3.7, es posible calcular la masa encerrada alrededor de este centro, la cual tomando como referencia a Gaspar et al. (2019) está dada por:

$$M_{radio} = \frac{233\Delta v_R^2 R}{\sin i} \quad (3.3.9)$$

donde i corresponde a la inclinación de la galaxia, que para el caso de NGC 2992 es de $i = 70^\circ$ (Marinucci et al., 2018), y Δv_R se obtiene de la diferencia de velocidad radial entre el centro y un determinado radio. En este caso, teniendo en consideración la simetría presentada en la Figura 3.7, al reflejar los puntos rojos es posible calcular la masa encerrada dentro del primer y el segundo radio respecto al centro. En el caso de la masa encerrada dentro del primer radio, al sustraerle el valor de la masa del SMBH reportada por Onori et al. (2017) de $5.24 \times 10^6 M_\odot$ se obtiene lo que se llama primer reservorio de material, mientras que si a la masa encerrada en el segundo radio se le resta la masa del SMBH y también la del primer reservorio, se obtiene el segundo reservorio de material. Por los argumentos de simetría expuestos previamente en la curva de rotación, es posible decir que estos dos reservorios están acoplados cinemáticamente al AGN, a diferencia del material circundante en regiones más externas. Por lo tanto:

$$M_{reservorio1} = M_{radio1} - M_{SMBH} \quad (3.3.10)$$

$$M_{reservorio2} = M_{radio2} - (M_{SMBH} + M_{reservorio1}) \quad (3.3.11)$$

De la Figura 3.7 se obtienen los radios medidos desde el centro hasta el primer y segundo punto de la curva, con una incerteza de $1 \text{ px} = 27 \text{ pc}$ asociada al radio de extracción de los espectros de los cuales se tomó el dato de la posición en longitud de onda central de H_2 para construir la curva. A partir de estos radios se calcula la dispersión de velocidad para cada caso. Así es que, se obtiene un $\Delta v_{R_1} = (69.86 \pm 5.90) \text{ km s}^{-1}$ hasta el primer radio $R_1 = (54 \pm 27) \text{ pc}$ y un $\Delta v_{R_2} = (101.05 \pm 6.09) \text{ km s}^{-1}$ hasta el segundo radio $R_2 = (108 \pm 27) \text{ pc}$.

Luego, utilizando las ecuaciones 3.3.9 y 3.3.10 y la propagación de errores mediante derivada parciales para calcular la incertidumbre, la masa del primer reservorio es:

$$M_{reservorio1} = (6.0 \pm 3.5)10^7 M_{\odot} \quad (3.3.12)$$

De igual forma, a partir de las ecuaciones 3.3.9 y 3.3.11, la masa del segundo reservorio es:

$$M_{reservorio2} = (20.8 \pm 8.3)10^7 M_{\odot} \quad (3.3.13)$$

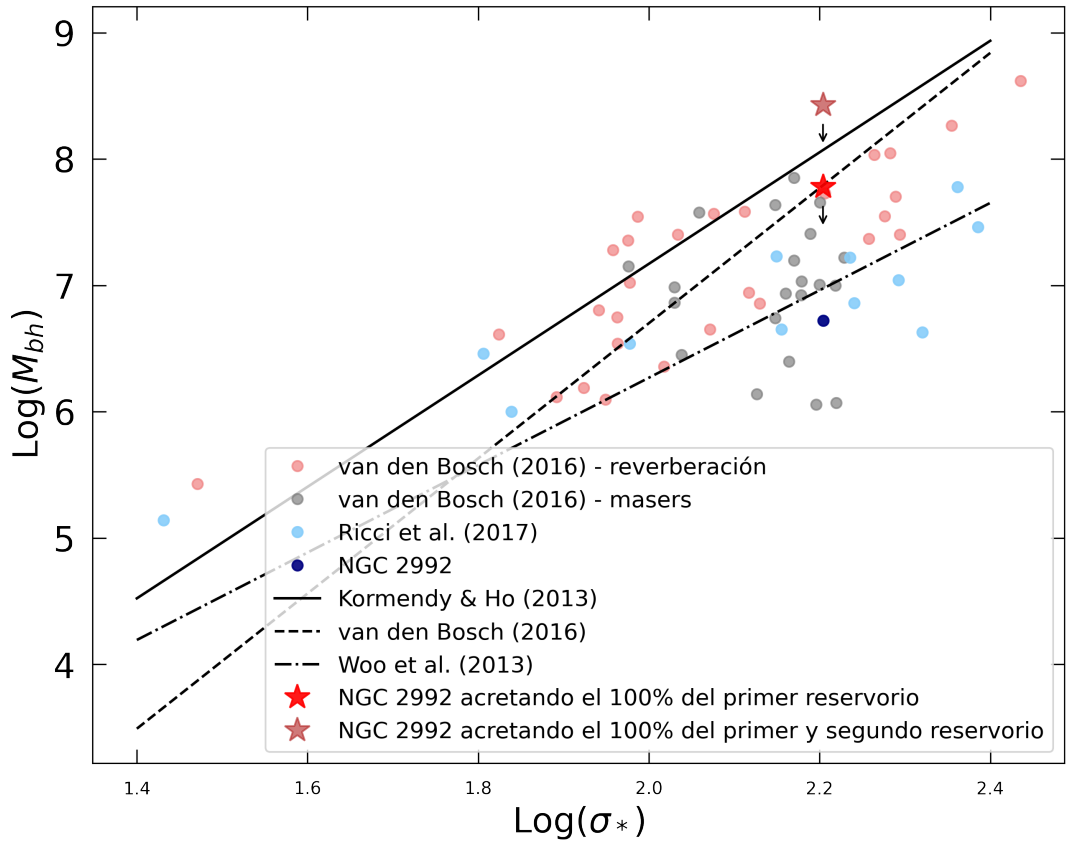


Figura 3.14: Diferentes ajustes de la relación $M - \sigma$ para distintas muestras de galaxias. El punto azul corresponde a la ubicación de NGC 2992 en el diagrama con datos de Ricci et al. (2017). La estrella roja corresponde a la ubicación de esta galaxia luego de acretar todo el material contenido en el primer reservorio resuelto. La estrella roja con transparencia indica la ubicación de NGC 2992 luego de acretar todo el contenido del primer y segundo reservorio. Las flechas en ambos casos indican que la acreción puede ser mucho menor.

Del 100% de la masa de los reservorios sólo un porcentaje será acretado y hará crecer al SMBH. Se piensa que un 10% de esa masa se convertirá en radiación (Yu

y Tremaine, 2002) y otra parte será eyectada de diferentes formas como, por ejemplo, *outflows*. Aún no se conoce con certeza cuál es la tasa de acreción de una galaxia de tipo Seyfert o una galaxia con las características de NGC 2992. Sin embargo, hay valores en la literatura con los cuales es posible, a priori, hacer la siguiente hipótesis: si se toma como tasa de acreción el valor reportado para galaxias de tipo Seyfert por Bian y Zhao (2003), $\log(\dot{M}_{SMBH}/M_{\odot}) = (-0.54 \pm 0.20)$, lo que equivale a $\dot{M}_{SMBH} = 0.28 M_{\odot} yr^{-1}$, se obtiene que el tiempo en el cual sería acretado el material del primer reservorio es de aproximadamente 2×10^8 años, mientras que para el material del segundo reservorio se necesitarían 7.5×10^8 años más. Sin embargo, otros trabajos como Wada (2003) encuentran que la tasa de acreción es del orden de $0.1 M_{\odot} yr^{-1}$, lo que implica que se necesitaría de 6×10^8 años para acretar todo el material del primer reservorio y 2×10^9 años más para el 100 % del segundo reservorio.

En el Capítulo 1 se mencionó que el tiempo estimado para la durabilidad de un ciclo de AGN es de entre 10^7 y 10^8 años (Hickox et al., 2014). Sin embargo, éste tampoco es un valor consolidado en la literatura científica, ya que existen trabajos como Schawinski et al. (2015) donde se expone que la duración de la actividad AGN es del orden de 10^5 años.

Con estas incertidumbres, no se puede decir a ciencia cierta si los reservorios de material acoplados cinemáticamente al AGN serán acretados durante uno o más ciclos de actividad. Además, tampoco es posible saber qué porcentaje de esa masa total será realmente consumida por el SMBH. Por lo tanto, con el reporte de masas de los reservorios, sólo se puede dar una cota superior (ver Figura 3.14) que indique la posición de NGC 2992 luego de acretar el material, asumiendo que los tiempos de variación de la dispersión de velocidades del bulbo estelar de la galaxia son mucho mayores que el tiempo de duración de un ciclo de AGN.

Capítulo 4

Conclusiones

Utilizando datos espectroscópicos e imágenes del Observatorio Gemini en el infrarrojo cercano, se ha caracterizado la región nuclear y circumnuclear de la galaxia NGC 2992, la cual posee un núcleo activo de tipo Seyfert. Las observaciones realizadas en el rango espectral del infrarrojo han permitido obtener resultados menos afectados por extinción que los presentados en estudios anteriores realizados en el rango óptico. Además, el análisis hecho sobre gas molecular ha dado lugar a estudiar las estructuras con mayor precisión, asegurado por la menor dispersión de velocidad que posee este gas en comparación al gas ionizado.

NGC 2992 es una galaxia que, desde que fue observada espectroscópicamente por primera vez hace aproximadamente cuatro décadas, ha presentado diferentes características en cuanto a cambios en el brillo observado tanto en espectros como en imágenes (eg. Shuder 1980, Storchi Bergmann et al. 1990, Glass 1997, Allen et al. 1999, Schnorr-Müller et al. 2016, Guolo et al. 2021). Diferentes autores, como Gilli et al. (2000) o Trippe et al. (2008), han intentado explicar el origen de esta variabilidad. En este contexto, se realizaron mediciones de la magnitud de NGC 2992 en banda J del NIR con imágenes correspondientes a enero de 2022, las cuales revelaron que la galaxia se encuentra actualmente en un estado de emisión mayor que hace 24 años en comparación con los resultados de Alonso-Herrero et al. (2001). Esto está en concordancia con la presencia de la componente ancha de las líneas de hidrógeno ionizado en los espectros recientes de NGC 2992. Sin embargo, dentro del marco de las dos hipótesis planteadas en el Capítulo 1, sobre una posible causa de variabilidad intrínseca de la luz del AGN dada por cambios en la tasa de acreción del agujero negro o un origen en el cambio de material en la línea de la visual que de lugar a variaciones en la extinción del flujo recibido, se concluye que, si bien los tiempos involucrados coinciden con los tiempos planteados por Trippe et al. (2008)

para dar indicios de una variación intrínseca, es necesario un estudio de la magnitud de esta galaxia sostenido en el tiempo para determinar con mayor exactitud el origen de este fenómeno. De todas formas, con los reportes de magnitud en banda J y de la componente ancha en la línea de emisión $Br\gamma$ se han añadido nuevos datos en la historia de la galaxia que permitirán dar seguimiento al escenario de variabilidad.

Por otro lado, autores como García-Lorenzo et al. (2001), Boisson et al. (2002) y Friedrich et al. (2010) exponen en sus trabajos que NGC 2992 posee una asimetría en la distribución de luz de la región central tanto en el óptico como en el infrarrojo cercano. Los resultados espectroscópicos aquí desarrollados arrojaron información sobre la caracterización estructural de la galaxia. A partir del análisis del perfil espacial de NGC 2992 en banda K_{long} , se detectó una asimetría presentada como un exceso de flujo a 54 pc del pico de emisión de la galaxia hacia el suroeste, que fue modelada con una gaussiana que representa el AGN como fuente puntual no resuelta, dada la resolución de las observaciones. Por otra parte, la curva de velocidad radial de gas molecular reveló un centro cinemático instalado a 54 pc hacia el SO del pico de emisión que domina la región más nuclear hasta $1''$ de radio, debido a que representa la región con pendiente más pronunciada, pudiendo evidenciar que ésta sería la posición más probable para el AGN. Estos resultados, llevaron a la iniciativa de estudiar el espectro unidimensional de la galaxia del ancho del seeing centrado en el pico de emisión y el espectro, también del ancho del seeing, pero centrado a 54 pc al SO del pico. En el espectro extraído en esa zona se encontró una pendiente mucho más pronunciada que en el resto de las extracciones, la cual presenta una subida hacia el rojo que puede ser relacionada con la emisión del disco de acreción y/o la presencia de polvo calentado por el AGN. Por último, tanto para el espectro con centro de extracción en el pico de emisión como el espectro con centro a 54 pc SO de este pico, se realizó un ajuste de componentes de la línea en emisión $Br\gamma$, hallando que en el espectro descentrado del pico la componente ancha era considerablemente más ancha. Todos estos resultados son evidencia de que el AGN se encuentra descentrado de las estructuras más externas y que el pico de emisión de NGC 2992 estaría dominado por el bulbo estelar de la galaxia.

Por último, y en el marco de una caracterización estructural de NGC 2992, donde el descentrado de las diferentes componentes de la galaxia contribuyen a la idea de un SMBH oscilando alrededor del centro de potencial, se han reportado los reservorios de material acoplados cinemáticamente a la región donde se evidencia que está el AGN, los cuales según el tiempo de duración de un ciclo de actividad, podrían caer al SMBH siendo parte del material acregado por el mismo.

Perspectivas futuras

Los estudios sobre la estructura de la galaxia activa NGC 2992, han permitido encontrar evidencia de que el AGN se encuentra descentrado respecto de las demás componentes de la galaxia. Sin embargo, existen diferentes incógnitas que quedan por resolver. Entre ellas, resulta interesante analizar si es factible que la pendiente del espectro en la posición del AGN esté relacionada a la emisión de polvo caliente y del disco de acreción. Por otro lado, también es de interés seguir estudiando porqué la emisión de la componente ancha de $Br\gamma$ se extiende más allá de donde se evidencia que se encuentra el AGN. Por último, la hipótesis de que uno de los mecanismos de acreción está dado por la remoción del momento angular del gas y demás material circundante podría ser reforzada estudiando los movimientos de material en caída hacia el AGN (*inflows*). Para esto, en un futuro, observaciones de mayor resolución espacial serán de gran importancia.

Referencias

- (1) Allen, M. G.; Dopita, M. A.; Tsvetanov, Z. I. y Sutherland, R. S. *ApJ* **1999**, *511*, 686-708.
- (2) Alonso-Herrero, A.; Quillen, A. C.; Simpson, C.; Efstathiou, A. y Ward, M. J. *AJ* **2001**, *121*, 1369-1384.
- (3) Antonucci, R. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* **1993**, *31*, 473-521.
- (4) Beckmann, V. y Shrader, C. R., *Active Galactic Nuclei*, 2012.
- (5) Bian, W.-H. y Zhao, Y.-H. *Publications of the Astronomical Society of Japan* **2003**, *55*, 599-603.
- (6) Boisson, C.; Coupé, S.; Cuby, J. G.; Joly, M. y Ward, M. J. *A&A* **2002**, *396*, 489-501.
- (7) Brum, C.; Riffel, R. A.; Storchi-Bergmann, T.; Robinson, A.; Schnorr Müller, A. y Lena, D. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **2017**, *469*, 3405-3423.
- (8) Capelo, P. R. y Dotti, M. *MNRAS* **2017**, *465*, 2643-2653.
- (9) Clariá, J. J., *Astronomía general I: parte astrofísica*; Universidad Nacional de Córdoba: 2007.
- (10) Courvoisier, T. J.-L. en *High Energy Astrophysics: An Introduction*; Springer Berlin Heidelberg: Berlin, Heidelberg, 2013, págs. 297-320.
- (11) de Vaucouleurs, G. *Handbuch der Physik* **1959**, *53*, 311.
- (12) Durré, M. y Mould, J. *ApJ* **2018**, *867* 149, 149.
- (13) Dwek, E.; Galliano, F. y Jones, A. P. *ApJ* **2007**, *662*, 927-939.
- (14) Emsellem, E.; Renaud, F.; Bournaud, F.; Elmegreen, B.; Combes, F. y Gabor, J. M. *MNRAS* **2015**, *446*, 2468-2482.
- (15) Fath, E. A. *Lick Observatory Bulletin* **1909**, *149*, 71-77.

- (16) Friedrich, S.; Davies, R. I.; Hicks, E. K. S.; Engel, H.; Müller-Sánchez, F.; Genzel, R. y Tacconi, L. J. *A&A* **2010**, *519* A79, A79.
- (17) García-Burillo, S. y Combes, F. *Journal of Physics: Conference Series* **2012**, *372*, 012050.
- (18) García-Lorenzo, B.; Arribas, S. y Mediavilla, E. *A&A* **2001**, *378*, 787-799.
- (19) García-Bernete, I. et al. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **2015**, *449*, 1309-1326.
- (20) Gaspar, G.; Díaz, R. J.; Mast, D.; Agüero, M. P.; Schirmer, M.; Günthardt, G. y Schmidt, E. O. *AJ* **2022**, *163* 230, 230.
- (21) Gaspar, G.; Díaz, R. J.; Mast, D.; D'Ambra, A.; Agüero, M. P. y Günthardt, G. *The Astronomical Journal* **2019**, *157*, 44.
- (22) Gilli, R.; Maiolino, R.; Marconi, A.; Risaliti, G.; Dadina, M.; Weaver, K. A. y Colbert, E. J. M. *A&A* **2000**, *355*, 485-498.
- (23) Glass, I. S. *MNRAS* **1997**, *292*, L50-L54.
- (24) González, L. B. Determinación de las propiedades del material que oscurece los núcleos galácticos activos, Facultad de Ciencias. Universidad de Cantabria, 2017.
- (25) Goulding, A. D. y Alexander, D. M. *MNRAS* **2009**, *398*, 1165-1193.
- (26) Goulding, A. D.; Alexander, D. M.; Bauer, F. E.; Forman, W. R.; Hickox, R. C.; Jones, C.; Mullaney, J. R. y Trichas, M. *The Astrophysical Journal* **2012**, *755*, 5.
- (27) Graham, A. W. y Driver, S. P. *Publications of the Astronomical Society of Australia* **2005**, *22*, 118-127.
- (28) GRAVITY Collaboration et al. *A&A* **2020**, *634* A1, A1.
- (29) Guolo, M.; Ruschel-Dutra, D.; Grupe, D.; Peterson, B. M.; Storchi-Bergmann, T.; Schimoia, J.; Nemmen, R. y Robinson, A. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **2021**, *508*, 144-156.
- (30) Hickox, R. C.; Mullaney, J. R.; Alexander, D. M.; Chen, C.-T. J.; Civano, F. M.; Goulding, A. D. y Hainline, K. N. *ApJ* **2014**, *782* 9, 9.
- (31) Khachikian, E. Y. y Weedman, D. W. *ApJ* **1974**, *192*, 581-589.
- (32) Kormendy, J. y Ho, L. C. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* **2013**, *51*, 511-653.

- (33) Krolik, J. H. y Begelman, M. C. *ApJ* **1988**, *329*, 702.
- (34) Labrie, K.; Anderson, K.; Cárdenes, R.; Simpson, C. y Turner, J. E. en *Astronomical Data Analysis Software and Systems XXVII*, ed. por Teuben, P. J.; Pound, M. W.; Thomas, B. A. y Warner, E. M., 2019; vol. 523, pág. 321.
- (35) Leggett, S.; Currie, M.; Varricatt, W.; Hawarden, T.; Adamson, A.; Buckle, J.; Davies, J.; Davis, C.; Kerr, T.; Kuhn, O. y Seigar, M. *VizieR Online Data Catalog* **2007**.
- (36) Marinucci, A; Bianchi, S; Braitto, V; Matt, G; Nardini, E y Reeves, J *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **2018**, *478*, 5638-5649.
- (37) Marquez, I.; Boisson, C.; Durret, F. y Petitjean, P. *A&A* **1998**, *333*, 459-465.
- (38) Mathis, J. S. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* **1990**, *28*, 37-70.
- (39) Merritt, D. Black Holes and Galaxy Evolution, 1999.
- (40) Mingozzi, M. et al. *A&A* **2019**, *622* A146, A146.
- (41) Nenkova, M.; Sirocky, M. M.; Ivezić, Ž. y Elitzur, M. *ApJ* **2008**, *685*, 147-159.
- (42) Netzer, H. en *Active Galactic Nuclei*, ed. por Blandford, R. D.; Netzer, H.; Woltjer, L.; Courvoisier, T. J. L. y Mayor, M., 1990, págs. 57-160.
- (43) Onori, F.; Ricci, F.; La Franca, F.; Bianchi, S.; Bongiorno, A.; Brusa, M.; Fiore, F.; Maiolino, R.; Marconi, A.; Sani, E. y Vignali, C. *MNRAS* **2017**, *468*, L97-L102.
- (44) Osterbrock, D. E. *ApJ* **1981**, *249*, 462-470.
- (45) Paturel, G.; Petit, C.; Prugniel, Ph.; Theureau, G.; Rousseau, J.; Brouty, M.; Dubois, P. y Cambrésy, L. *A&A* **2003**, *412*, 45-55.
- (46) Ricci, F.; Franca, F. L.; Marconi, A.; Onori, F.; Shankar, F.; Schneider, R.; Sani, E.; Bianchi, S.; Bongiorno, A.; Brusa, M.; Fiore, F.; Maiolino, R. y Vignali, C. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters* **2017**, *471*, L41-L46.
- (47) Riffel, R.; Dahmer-Hahn, L. G.; Riffel, R. A.; Storchi-Bergmann, T.; Dametto, N. Z.; Davies, R.; Burtscher, L.; Bianchin, M.; Ruschel-Dutra, D.; Ricci, C. y Rosario, D. J. *MNRAS* **2022**, *512*, 3906-3921.
- (48) Savorgnan, G. A. D. *The Astrophysical Journal* **2016**, *821*, 88.
- (49) Schawinski, K.; Koss, M.; Berney, S. y Sartori, L. F. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **2015**, *451*, 2517-2523.

- (50) Schnorr-Müller, A. et al. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **2016**, *462*, 3570-3590.
- (51) Seyfert, C. K. *ApJ* **1943**, *97*, 28.
- (52) Shuder, J. M. *ApJ* **1980**, *240*, 32-40.
- (53) Skrutskie, M. F. et al. *AJ* **2006**, *131*, 1163-1183.
- (54) Storchi Bergmann, T.; Bica, E. y Pastoriza, M. G. *MNRAS* **1990**, *245*, 749.
- (55) Sérsic, J. L. *Boletín de la Asociación Argentina de Astronomía La Plata Argentina* **1963**, *6*, 41-43.
- (56) Trippe, M. L.; Crenshaw, D. M.; Deo, R. y Dietrich, M. *AJ* **2008**, *135*, 2048-2054.
- (57) Trippe, M. L.; Crenshaw, D. M.; Deo, R. P.; Dietrich, M.; Kraemer, S. B.; Rafter, S. E. y Turner, T. J. *ApJ* **2010**, *725*, 1749-1767.
- (58) Van den Bosch, R. C. E. *The Astrophysical Journal* **2016**, *831*, 134.
- (59) Veron, P.; Lindblad, P. O.; Zuiderwijk, E. J.; Veron, M. P. y Adam, G. *A&A* **1980**, *87*, 245-249.
- (60) Wada, K. Fueling Gas to the Central Region of Galaxies, 2003.
- (61) Ward, M.; Penston, M. V.; Blades, J. C. y Turtle, A. J. *MNRAS* **1980**, *193*, 563-582.
- (62) Whittle, M. *ApJS* **1992**, *79*, 49.
- (63) Woo, J.-H.; Schulze, A.; Park, D.; Kang, W.-R.; Kim, S. C. y Riechers, D. A. *ApJ* **2013**, *772* 49, 49.
- (64) Yu, Q. y Tremaine, S. *MNRAS* **2002**, *335*, 965-976.