



VICERRECTORIA DE INVESTIGACIÓN Y POSTGRADO
DIRECCIÓN DE POSTGRADOS Y POSTTULOS

FACULTAD DE CIENCIAS
DEPARTAMENTO DE ASTRONOMÍA

EL IMPACTO DE LAS BARRAS E INTERACCIONES EN
GALAXIAS DE NÚCLEOS ACTIVOS

Tesis para optar al grado Académico de Magíster en Astronomía

VALERIA ALVAREZ VERGARA

Profesor guía: Valeria Mesa

La Serena, Chile.

2025

Esta tesis está dedicada a Mariela, Luis e Israel

Contenido

Índice de figuras	3
Índice de tablas	8
Agradecimientos.	10
Resumen.	1
1. Introducción	5
1.1. Morfología galáctica	7
1.1.1. Las barras galácticas	10
1.1.2. Las interacciones	14
1.2. Núcleos activos de galaxias	18
1.2.1. Actividad nuclear: Barras e Interacciones	23
1.3. Objetivos	28
2. Datos y metodología	30
2.1. DECaLS y SDSS	31
2.2. Galaxy Zoo	33

2.3.	Muestra de AGNs	39
2.4.	Construcción de la muestra de galaxias barradas	42
2.5.	Construcción de la muestra de pares	45
2.6.	Muestras de control	47
2.6.1.	Galaxias AGN no-barradas	49
2.6.2.	Galaxias AGN Aisladas	51
2.6.3.	Ajuste de muestras	53
3.	El impacto de las barras	61
3.1.	Actividad nuclear: Luminosidad[OIII]	61
3.2.	Actividad nuclear: Tasa de acreción \mathcal{R}	68
3.2.1.	Masa del agujero negro	72
3.3.	Intensidad de la barra	76
3.4.	Influencia del ambiente	81
4.	Impacto de las interacciones	86
4.1.	Núcleos activos en pares de galaxias	86
4.2.	Pares AGN-AGN	98
4.3.	Presencia simultánea de barras y compañera	104

Índice de figuras

1.1. Esquema típico de árbol del escenario jerárquico de formación de galaxias. El eje del tiempo (vertical) va de arriba hacia abajo, donde la parte inferior representa la época actual en la cual se ha formado un halo masivo debido a fusiones de halos de menor masa. Fuente Calçada (2017)	6
1.2. Secuencia de Hubble	8
1.3. Ejemplo de galaxia barrada: NGC 1300	11
1.4. Ejemplo de galaxias en interacción: Arp 87	15
1.5. Modelo unificado de AGN. Imagen tomada de NASA (2016)	20
2.1. Categorías de clasificación de GZ de Lintott et al. (2008).	34
2.2. Árbol de decisiones del Galaxy Zoo DECaLS (Walmsley et al., 2022) . . .	36
2.3. Columnas pertenecientes al catálogo de clasificaciones morfológicas de Ga- laxy Zoo DECaLS. Como ejemplo se muestra el nombre <i>disk-edge-on-no- fraction</i>	38

2.4. Catálogo de objetos de SDSS. Objetos destacados en el panel izquierdo son aquellos clasificados como núcleo activo con líneas divisorias correspondientes a Kewley et al. (2001), Schawinski et al. (2007) y Kauffmann et al. (2003). En el panel de la derecha se muestran las galaxias AGN seleccionadas una vez aplicado el filtro por redshift.	42
2.5. Ejemplos galaxias barradas clasificadas por Galaxy Zoo DECaLS.	44
2.6. Ejemplos de pares de galaxias.	46
2.7. Ejemplos galaxias no-barradas clasificadas por Galaxy Zoo DECaLS	49
2.8. Ejemplo de galaxia barrada clasificada erróneamente como no-barrada por Galaxy Zoo 2. En el panel de la derecha se observa la galaxia sacada de <i>Legacy Surveys DR9 images</i> , en el panel de la izquierda para mostrar con mayor claridad la barra se muestra la misma galaxia a partir de <i>Legacy Surveys DR9 residuals</i>	51
2.9. Ejemplos de galaxias aisladas. En el centro se puede apreciar la galaxia seleccionada, todo objeto que se vea en sus alrededores: no es una galaxia, o es un efecto de proyección o esta más allá del umbral de 100kpc/h	52
2.10. Distribuciones normalizadas de redshift, z , magnitud absoluta M_r en la banda r , masa estelar, $\log(M^*)$, parámetro de densidad local e índice de concentración. Para galaxias barradas y no barradas. Se presentan los valores p del KS test.	57
2.11. Distribución normalizada de redshift, masa estelar, magnitud absoluta en banda r M_r , Σ_5 e índice de concentración C para pares de galaxias con AGN (línea solida) y su respectiva muestra de control (superficie completa). Las galaxias de estas muestras no fueron clasificadas por morfología, solo se consideró la presencia de una compañera.	59

3.1. Distribución de $\log(\text{Lum}[OIII])$ para galaxias AGN con barra, (línea sólida) y galaxias AGN sin barra (superficie completa). La línea vertical representa la mediana de la muestra de galaxias barradas. Se presentan los valores del KS-test.	62
3.2. Fracción de $\text{Lum}[OIII] > 10^{6.2} L_{\odot}$ en función de la masa estelar, el color ($M_u - M_r$) y el parámetro $D_n(4000)$ (gráficos izquierdo, centro y derecho respectivamente). Los gráficos interiores muestran la fracción de $\text{Lum}[OIII] > 10^7 L_{\odot}$ en función de las mismas propiedades. Se presentan los valores de la diferencia de σ entre las muestras en cada uno de los gráficos.	63
3.3. Distribución de color ($M_u - M_r$)	65
3.4. Distribución del parámetro de la tasa de acreción para ambas muestras. La línea sólida representa \mathcal{R} utilizando los mismo valores de α y β tanto para la muestra de barradas como no barradas. La línea discontinua representa \mathcal{R} teniendo en cuenta valores diferentes de α y β para la muestra de galaxias barradas. La línea vertical representa la mediana de la muestra de barradas. Se presentan los valores del KS-test.	69
3.5. Fracción de $\mathcal{R} > -0.9$ en función de la masa estelar, color ($M_u - M_r$) y el parámetro $D_n(4000)$ (paneles izquierdo, central y derecho respectivamente) para galaxias barradas y no barradas. Se presentan los valores de las diferencias de σ entre las muestras en cada uno de los paneles.	71
3.6. Fracción de $\mathcal{R} > -0.9$ en función de la masa del agujero negro $\log(M_{BH})$. El gráfico interior muestra la distribución de la masa de agujeros negros. Se presentan los valores del KS-test.	74
3.7. Descripción gráfica otorgada por Galaxy Zoo DECaLS para que los voluntarios puedan discernir entre barra fuerte o barra débil.	77

3.8. Ejemplo de galaxias DECaLS. En el panel izquierdo se muestra una galaxia clasificada como fuertemente barrada y en el panel derecho una galaxia débilmente barrada.	77
3.9. Fracción de $Lum[OIII] > 10^{6.4} L_{\odot}$ en función de la masa estelar, el color (Mu-Mr) y el parámetro $D_n(4000)$ (panel izquierdo, central y derecho respectivamente). El gráfico separa por intensidad de la barra, ya sea fuerte (línea amarilla) o débil (línea celeste) en comparación a la muestra de control.	78
3.10. Fracción de $\mathcal{R} > -0.9$ en función de la masa estelar, el color (Mu-Mr) y el parámetro $D_n(4000)$ (panel izquierdo, central y derecho respectivamente). El gráfico separa por intensidad de la barra, ya sea fuerte (línea amarilla) o débil (línea celeste) en comparación a la muestra de control.	79
3.11. $\log(\Sigma_5)$ en función la luminosidad media de [OIII] para la muestra completa (panel superior) y la muestra separada en barra fuerte y barra débil (panel inferior) y la muestra de control	83
4.1. Luminosidad media de [OIII] de AGNs en pares en función de la distancia proyectada r_p entre galaxias. La línea horizontal representa la mediana de los datos de la muestra de control.	87
4.2. Ejemplos de pares cercanos	89
4.3. Distribuciones de luminosidad en [OIII] correspondiente a pares cercanos ($r_p < 25 kpc h^{-1}$, línea punteada), en comparación con el resto de la muestra (línea continua) y la muestra de control (superficie completa gris).	90

4.4.	Distribuciones de la tasa de acreción \mathcal{R} correspondiente a pares cercanos ($r_p < 25kpc h^{-1}$, línea punteada), en comparación con el resto de la muestra (línea continua) y la muestra de control (superficie completa gris). En el gráfico interior, se muestra las distribuciones de las masas de agujeros negros.	92
4.5.	Fracción de $Lum[OIII] > 10^{6,1}L_{\odot}$ en función de la masa estelar, el color (Mu-Mr) y el parámetro $D_n(4000)$, paneles izquierdo, centro y derecho respectivamente.	95
4.6.	Distribución de $Lum[OIII]$ para pares con un único AGN (línea continua) y pares con dos AGN (línea discontinua).	100
4.7.	Fracción de $Lum[OIII] > 10^{6,1}L_{\odot}$ en función de la masa estelar, el color (Mu-Mr) y el parámetro $D_n(4000)$, paneles izquierdo, centro y derecho respectivamente para pares con un AGN (línea continua amarilla) y pares con dos AGN (línea azul discontinua)	102
4.8.	Ejemplos de pares de galaxias, una de las cuales es una espiral AGN con presencia de barra.	105
4.9.	Distribución de $\log(Lum[OIII])$ y \mathcal{R} para pares de galaxias con presencia de AGN y una barra simultáneamente.	106
4.10.	Fracción de $Lum[OIII] > 10^{6,2}L_{\odot}$ (panel superior) y $\mathcal{R} > -0.9$ (panel inferior) en función de la masa estelar, el color (Mu-Mr) y el parámetro $D_n(4000)$, paneles izquierdo, centro y derecho respectivamente para galaxias AGN barradas sin una compañera (línea continua morada), galaxias AGN barradas con una compañera (línea discontinua amarilla) y la muestra de control de AGNs no barrados.	107

Índice de tablas

2.1. Catálogos obtenidos para el análisis de las barras en la actividad nuclear. .	58
2.2. Catálogos de pares y sus características y muestra de control obtenida para este trabajo.	60
3.1. Porcentajes de galaxias AGN con actividad nuclear alta y extremadamente alta para la muestra principal y la muestra de control.	63
3.2. Porcentajes de galaxias AGN con exceso de tasa de acreción para la muestra de galaxias barradas y la muestra de control.	70
3.3. Porcentajes de AGNs con barra fuerte y débil con indicadores de actividad nuclear alta.	79
3.4. Porcentaje de galaxias con valores altos de $\text{Lum}[\text{OIII}]$ y \mathcal{R} para la muestra con barra y sin barra en diferentes ambientes.	84
4.1. Porcentaje de galaxias con altos valores de $\text{Lum}[\text{OIII}]$ para la muestra de pares, pares cercanos y la muestra de control.	91
4.2. Porcentajes de pares de galaxias con indicadores de actividad nuclear alta. .	101

Agradecimientos

Quisiera agradecer a todas las personas que contribuyeron a la realización de esta tesis de magíster. Mi reconocimiento más profundo es para mi directora, Valeria Mesa, cuya orientación académica, apoyo personal, su constante guía y paciencia fueron fundamentales para el desarrollar esta investigación. Me acompañó en cada momento de mi formación, siempre impulsándome a dar mi mejor esfuerzo, confiando en mis capacidades y ofreciéndome una gran cantidad de oportunidades científicas. Agradezco también el apoyo de mi co-director Marcelo Jaque, quien durante todo este proceso estuvo presente, dispuesto a dar una mano cada vez que lo necesitara con especial dedicación. Expreso mi más sincero agradecimiento a Sol Alonso, quien desde el primer momento en que me conoció, mostró un gran apoyo a mi ciencia, con consejos valiosos en varios ámbitos de esta tesis.

Gracias a todas las personas que de una u otra forma estuvieron presentes y ayudaron a que este trabajo fuese posible. A mi familia, por su amor y apoyo, porque jamás permitieron que me rindiera y estuvieron acompañándome en cada paso que daba. A mis amigos/as, Danae, Franco, Jullianne y Francisca, amigos incondicionales de la infancia, que estuvieron presentes con palabras de aliento, compañía y risas cuando más lo necesitaba. A mis amigas universitarias, Valentina, Elsie y Bárbara, por los infaltables Viernes de completos, tardes de pipí cucú y las conversaciones de oficina que ayudaban a seguir adelante, a ver las cosas desde otra perspectiva y hacerte sentir que todo valía la pena, porque hacemos lo que nos

gusta y apasiona. A Christopher, quien creyó en mí incluso en los momentos que yo dudé, gracias por sostenerme y estar para mí en los momentos más difíciles de este camino, dándome ese espacio seguro tanto para desahogarme como para poder ser yo misma. Gracias por tu comprensión, paciencia y amor. Mención especial a mi perro Israel, mi gordito que estuvo tantas veces acompañándome a estudiar, siempre a mi lado, recibíendome feliz al llegar a casa y haciéndome reír con sus locuras y presintiendo cada vez que me sentía mal para ir a estar conmigo. Quiero incluir en estos agradecimientos a profesores que fueron parte de este camino, Luis Tamblay y Jose Luis Nilo, quienes a pesar de no ser parte directa del desarrollo científico de este trabajo, siempre estuvieron con las puertas abiertas para darme apoyo, un consejo, o conversaciones profundas sobre la vida. Por último gracias a la agrupación DanceUls por ser mi lugar feliz en donde bailar durante estos dos años. Gracias a la Universidad de La Serena, al Departamento de Astronomía por proporcionarme las herramientas, el entorno y el apoyo económico necesario para llevar a cabo esta investigación a través de los proyectos DIDULS/ULS PR2353857, PTE23538516 y PTE23538510 y también al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas y la Secretaría de Ciencia y Técnica de la Universidad Nacional de San Juan.

Resumen

El estudio de los núcleos activos de galaxias (AGN) resulta fundamental para comprender los procesos físicos que regulan el crecimiento de los agujeros negros supermasivos y su vínculo con la evolución galáctica. Estos núcleos se originan cuando el material circundante es acumulado eficientemente por el agujero negro en el centro de la galaxia, generando una intensa emisión energética. Las interacciones de galaxias y las inestabilidades gravitacionales en el disco de las galaxias espirales barradas son conocidos por ser responsables de transportar grandes cantidades de flujo de gas hacia los núcleos. En esta tesis se analiza como distintas estructuras internas y mecanismos externos -particularmente las barras galácticas y las interacciones entre galaxias- influyen en la actividad nuclear. El objetivo principal es evaluar el papel de los procesos seculares y de las perturbaciones externas en el desencadenamiento de la actividad nuclear. Asimismo, se estudia cómo estos mecanismos se reflejan en las propiedades observables de las galaxias, tales como su masa estelar, color y edad, proporcionando una visión general sobre la conexión entre morfología, entorno y evolución nuclear.

Para ello se utilizaron datos del Sloan Digital Sky Survey (SDSS) y del proyecto Galaxy Zoo DECaLS con el fin de obtener muestras de estudio de galaxias barradas anfitrionas de AGN y galaxias en pares en donde al menos una de las galaxias albergara un AGN. Se aplicaron distintos trazadores de actividad nuclear como la luminosidad en la línea [OIII] y la tasa de acreción \mathcal{R} , estos permitieron dividir los AGNs poderosos de los débiles. Además se utilizaron distintas propiedades físicas de las galaxias huésped con el fin de explorar tendencias globales a partir del análisis estadístico de las muestras. Se discute el impacto de tanto de las estructuras internas como de las externas en la actividad del agujero negro supermasivo.

Los resultados arrojan que las galaxias barradas, tienden a presentar valores más altos

en los indicadores de actividad nuclear frente a sus contrapartes no barradas. Al analizar la $\text{Lum}[\text{OIII}]$ encontramos que las galaxias con mayor actividad nuclear tienden a ser masivas, azules y con poblaciones estelares jóvenes. Además se identificó una leve tendencia de las galaxias barradas a hospedar agujeros negros menos masivos, los cuales presentan tasas de acreción más eficientes. Se realizó además un análisis diferenciando entre barras fuertes y débiles, esto indicó que las galaxias con barras más prominentes exhiben valores más altos de actividad nuclear. Por otra parte se estudió la dependencia con el ambiente, y si bien no se encontraron diferencias significativas entre barras fuertes y débiles en ambientes de densidad intermedia, si observó una distinción en ambientes de alta y baja densidad, en donde las galaxias con barras fuertes presentan una mayor actividad nuclear.

En el análisis de galaxias en pares, los resultados indican que la actividad nuclear se intensifica a medida que disminuye la distancia proyectada, sugiriendo que aquellas galaxias en estados más avanzados de interacción son más eficientes transportando gas a las regiones nucleares. Sin embargo, no se halló una correlación clara con el parámetro de acreción, lo que indica que aunque las interacciones pueden incrementar la luminosidad del AGN, no necesariamente se traducen en una mayor tasa de acreción. Se analizaron los casos específicos en los que ambos miembros del par albergan un AGN. Se observó que estos sistemas presentan una fracción de AGNs poderosos más alta que aquellos pares en los que solo una galaxia está activa. Este resultado sugiere que la acreción simultánea en ambos núcleos puede ser altamente eficiente, posiblemente debido a un entorno compartido que favorece la canalización de gas hacia los centros galácticos.

En conjunto, estos resultados respaldan la idea de que las barras y las interacciones son mecanismos eficientes para redistribuir el gas a regiones centrales, promoviendo así el aumento o la activación de los agujeros negros.

Abstract

The study of active galactic nuclei (AGN) is fundamental for understanding the physical processes that regulate the growth of supermassive black holes and their link to galactic evolution. These nuclei originate when the surrounding material is efficiently accreted by the black hole at the center of the galaxy, generating intense energetic emission. Galaxy interactions and gravitational instabilities in the disk of barred spiral galaxies are known to be responsible for transporting large amounts of gas flux into the nuclei. In this thesis it is analyzed how different internal structures and external mechanisms -particularly galactic bars and galaxy interactions- influence nuclear activity. The main purpose is to assess the role of secular processes and external perturbations in triggering nuclear activity. Furthermore, it studies how these mechanism are reflected in the observable properties of galaxies, such as stellar mass, color and age, providing an overview of the connection between morphology, environment and nuclear evolution.

For this purpose, data from Sloan Digital Sky Survey (SDSS) and the Galaxy Zoo DE-CaLS project were used to obtain survey samples of AGN-host barred galaxies and paired galaxies where at least one of the galaxies hosted an AGN. Different nuclear activity tracers such as the [OIII] luminosity and the accretion rate \mathcal{R} were applied, these allowed dividing powerful AGNs from faint ones. In addition, different physical properties of the host galaxies were used in order to explore global trends from statistical analysis of the samples. The impact of both internal and external structures on supermassive black hole activity is discussed.

The results show that barred galaxies tend to have higher values of nuclear activity indicators than their unbarred counterparts. When analyzing Lum[OIII] we found that galaxies with higher values of nuclear activity tend to be massive, blue and with young stellar populations. We also identified a slight tendency for barred galaxies to host less massive black

holes, which have more efficient accretion rates. An analysis was also performed differentiating between strong and weak bars. This indicated that galaxies with more prominent bars exhibit higher values of nuclear activity. On the other hand, the dependence on the environment was studied. Although no significant differences were found between strong and weak bars in intermediate density environments, a distinction was observed in high and low density environments, where galaxies with strong bars exhibit higher values of nuclear activity.

In the analysis of paired galaxies, the results indicate that nuclear activity increases with decreasing projected distance, suggesting that those galaxies in more advanced states of interaction are more efficient at transporting gas to the nuclear regions. However, no clear correlation with the accretion parameter was found, indicating that although interactions may increase the AGN luminosity, they do not necessarily translate into a higher accretion rate. Specific cases where both members of the pair host an AGN were analyzed. It was found that pairs hosting two AGN tend to exhibit higher $\text{Lum}[\text{OIII}]$ values compared to those harboring only one AGN. The results suggest that simultaneous accretion in both nuclei may be highly efficient, possibly due to a shared environment that favors gas channeling toward the galactic centers.

Overall, these results support the idea that bars and interactions are efficient mechanism for redistributing gas to central regions, thus promoting the accretion or activation of black holes.

Capítulo 1

Introducción

El estudio de las galaxias comenzó a principios del siglo XX gracias al desarrollo de telescopios más potentes que permitieron observar objetos mucho más lejanos. Su descubrimiento revolucionó la astronomía como se conocía hasta entonces al revelar un universo compuesto por numerosos sistemas de gran masa formados por estrellas, similares a la Vía Láctea. Desde entonces, la astronomía extragaláctica se consolidó en una de las disciplinas centrales de la astronomía, orientando gran parte del esfuerzo científico hacia la comprensión de la formación y evolución de estas galaxias a lo largo del tiempo.

Las galaxias son sistemas complejos compuestos de estrellas, gas, polvo y materia oscura, unidos gravitacionalmente en una estructura más o menos definida. Su estudio resulta fundamental para entender la arquitectura y dinámica del universo (Binney and Merrifield, 1998). En las primeras etapas del universo, pequeñas fluctuaciones de densidad dieron origen a estructuras iniciales, en donde la materia bariónica se condensó en los pozos de potencial formados por los halos de materia oscura fría. Estas estructuras primordiales evolucionaron y con el tiempo se convirtieron en las galaxias que observamos en la actualidad.

Dado lo anterior, se plantea que los halos de materia oscura de baja masa de precedieron a

los de mayor masa (Schneider, 2015), lo que subraya la relevancia del paradigma cosmológico actual basado en un escenario jerárquico de formación de estructuras (ver Fig. 1.1). Este modelo postula que las estructuras menores se desarrollan y evolucionan progresivamente mediante procesos de fusión y acumulación de material, lo que finaliza en estructuras cada vez más grandes y complejas (Davis et al., 1985; Lacey and Cole, 1993).



Figura 1.1: Esquema típico de árbol del escenario jerárquico de formación de galaxias. El eje del tiempo (vertical) va de arriba hacia abajo, donde la parte inferior representa la época actual en la cual se ha formado un halo masivo debido a fusiones de halos de menor masa. Fuente Calçada (2017)

A lo largo de miles de millones de años, las galaxias experimentan transformaciones influenciadas por diversos procesos físicos, tales como fusiones, acreción de materia oscura, formación estelar o retroalimentación del agujero negro supermasivo. Estos mecanismos interactúan de forma compleja, modificando las propiedades dinámicas, morfológicas y es-

pectrales de las galaxias. Además permiten establecer conexiones clave entre procesos locales -como la formación estelar o la distribución del gas- y fenómenos de mayor escala, como la evolución de estructuras o la distribución de materia en el universo (White and Rees, 1978; Kauffmann et al., 1993).

En este marco, uno de los principales problemas de la astrofísica contemporánea consiste en comprender cómo la morfología galáctica y el ambiente en el que la galaxia se encuentra, afectan en su trayectoria evolutiva. Entender estas relaciones es fundamental para reconstruir la historia de formación y transformación de las galaxias, así como para identificar los mecanismos involucrados en diversos procesos físicos como la formación estelar, la actividad nuclear o la reorganización de su estructura interna.

1.1. Morfología galáctica

Clasificar galaxias basados en su forma y estructura se ha convertido en un enfoque común desde que Edwin Hubble (Hubble, 1926), estableció un sistema organizado para categorizar el diverso conjunto de galaxias observado en el universo. Desde entonces el campo extragaláctico ha experimentado un desarrollo considerable. Hubble propuso una clasificación en la cual dividía las galaxias en dos grandes categorías: Espirales y Elípticas, lo que se conoce actualmente como el diagrama de Hubble (véase la Figura 1.2). Este esquema, organiza según su morfología aparente. En un extremo se ubican las galaxias Elípticas (E), las cuales presentan una apariencia suave, sin rasgos internos y cuya “elipticidad” varía desde casi esférica (E0) hasta fuertemente achatada (E7). A continuación se encuentran las galaxias Lenticulares (S0), las cuales según Hubble, representan una etapa intermedia entre las elípticas y las espirales. Las S0 poseen una estructura discoidal con un bulbo central prominente. Mas allá continúa la secuencia con las galaxias Espirales (S), estas últimas

fácilmente identificables gracias a sus brazos espirales característicos.

Tanto las galaxias lenticulares como las espirales, se agrupan dentro del amplio grupo de galaxias tipo disco, debido a su estructura aplanada, cinemática dominada por rotación y presencia de un disco estelar, diferenciándose claramente de las elípticas, cuyo soporte dinámico es predominantemente por dispersión Binney and Merrifield (1998).

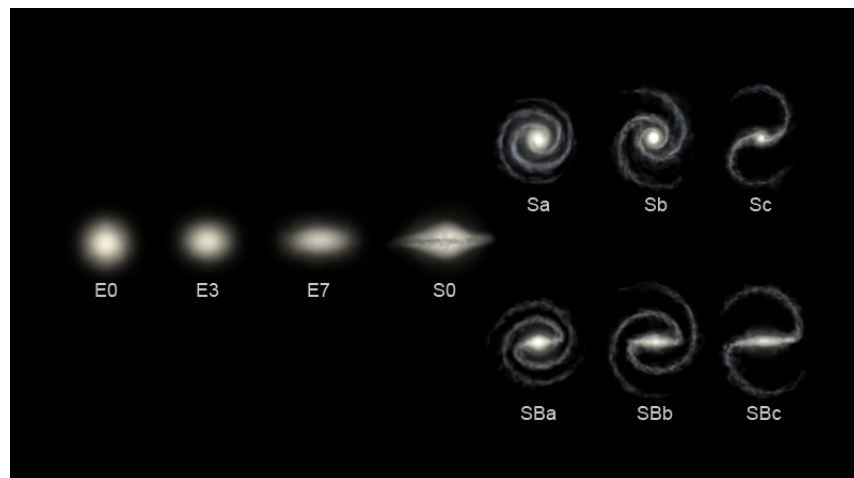


Figura 1.2: Secuencia de Hubble

Este esquema de clasificación, con los años ha sido ampliado y refinado con el fin de estudiar a detalle la estructura y evolución de las galaxias (Lintott et al., 2008; Buta, 2013). Por ejemplo de Vaucouleurs (1959) propuso un sistema tridimensional más completo que incluye barra, anillo y grado de desarrollo espiral. Aunque históricamente la secuencia de Hubble se ha interpretado como una secuencia evolutiva debido al uso de términos como *early-type* para galaxias elípticas y *late-type* para espirales, se cree que fueron usados más como una clasificación morfológica que como una indicación de evolución cronológica. Actualmente sabemos que el universo se rige por el paradigma jerárquico, basado en la acumulación y fusión progresiva de galaxias más pequeñas para formar sistemas más grandes,

por ejemplo fusiones violentas de espirales para formar galaxias elípticas (Toomre, 1977; White and Rees, 1978; Kormendy and Kennicutt, 2004)

La morfología es considerada un trazador e impulsor de la evolución galáctica. La forma y estructura de una galaxia se correlaciona ampliamente con múltiples parámetros físicos fundamentales (Kormendy and Kennicutt, 2004), como la formación estelar, la fracción de gas y su estado dinámico interno (Roberts and Haynes, 1994). Además la morfología también retiene información sobre el historial de fusiones de la galaxia, procesos que pueden alterar significativamente su estructura original (Martin et al., 2018).

La determinación detallada de la morfología, ya sea mediante técnicas fotométricas que analizan la distribución de la luz o mediante métodos espectroscópicos que permiten estudiar la cinemática y composición química, ofrece un abanico de posibilidades de estudio que permitirían dar explicación a diversos fenómenos: el estado de evolución de la galaxia, la eficiencia de la formación estelar en diferentes regiones, la presencia y efecto de procesos internos como barras y anillos o el impacto de eventos externos como fusiones mayores o menores (Kennicutt, 1998; Buta and Combes, 1996; Athanassoula, 2003; Hopkins et al., 2009). Por lo tanto un análisis morfológico riguroso y detallado, constituye una herramienta esencial para comprender la historia y el destino de las galaxias. Dentro de los distintos componentes estructurales que pueden observarse en las galaxias, algunos destacan por su impacto dinámico y su relevancia en el contexto evolutivo. Particularmente las barras y las interacciones entre galaxias han sido objeto de múltiples estudios por su capacidad de reorganizar el material galáctico, modificar tasas de formación estelar e influenciar la actividad nuclear.

El problema de la morfología radica en el hecho de comprender su relación directa con la evolución, lo cual requiere un alto nivel de precisión aplicado a grandes volúmenes de datos

al momento de resolver la estructura de una galaxia.

Existen diversos estudios en diferentes campos del cielo, cuyo principal objetivo ha sido realizar una clasificación morfológica de un gran volumen de galaxias (Abraham et al., 1996; Nair and Abraham, 2010; Vázquez-Mata et al., 2022), basándose en diversos métodos como la inspección visual, evaluación de parámetros estructurales y/o físicos, análisis de indicadores no paramétricos, *machine learning*, etc. Sin embargo, uno de los que ha tenido mayor éxito en esta tarea ha sido Galaxy Zoo¹ (Ver capítulo 2, sección 2.2 para mayor detalle).

1.1.1. Las barras galácticas

En particular para este trabajo, se prestó especial atención a aquellas galaxias clasificadas como espirales con barras (Fig. 1.3) de diversas intensidades, clasificadas como SB0, SBa, SBb, SBc, SBd, SBm según la secuencia de Hubble.

Las barras son estructuras rígidas no-axisimétricas bastante comunes, dinámicamente estables, compuestas principalmente de estrellas que se extienden desde el centro hasta los bordes de ambos lados en algunas galaxias tipo disco. Se cree que aproximadamente un tercio del total de galaxias disco, tiene una barra (de Vaucouleurs, 1963), sin embargo es posible que este número sea mucho mayor, siendo alrededor del 60 % las galaxias fuertemente barradas en el universo local en longitudes de onda infrarrojas (Eskridge et al., 2000; Menéndez-Delmestre et al., 2007) y alrededor del 30 % en longitudes de onda ópticas (Masters et al., 2011). La formación de una barra se explica dentro del marco de la dinámica como una inestabilidad gravitatoria en el disco de la galaxia (Ostriker and Peebles, 1973; Sellwood, 1981; Athanassoula, 2002), debido a heterogeneidades en el material. Su crecimiento puede estar influenciado por diversos factores como la materia oscura, la interacción

¹<https://www.zooniverse.org/projects/zookeeper/galaxy-zoo/>



Figura 1.3: Ejemplo de galaxia barrada: NGC 1300

con el halo, la disponibilidad y características del gas circundante en la galaxia y su ambiente (Athanassoula, 2003; Berentzen et al., 2006). No obstante, se considera que el mecanismo que da origen a estas estructuras depende fuertemente del escenario inicial, es decir, las condiciones presentes en el disco de la galaxia en un principio (Debattista and Sellwood, 2000; Athanassoula and Sellwood, 1986). Con respecto a esto, las simulaciones muestran que las barras se forman más eficientemente en galaxias con un contenido bajo de gas en el disco (Athanassoula, 2012; Seo et al., 2019; Łokas, 2020), esto se ve corroborado con el hecho de que la fracción de barras observadas es mayor en galaxias en discos pobres (Masters et al., 2012).

En los últimos años, se han refinado considerablemente las definiciones y caracterizaciones estructurales de las barras. Por ejemplo Méndez-Abreu et al. (2018), a partir de observaciones de CALIFA², demostraron que la mayoría de las barras no son estructuras pla-

²<https://califa.caha.es/>

nas, sino elipsoides triaxiales, lo que subraya la necesidad de un tratamiento tridimensional en su modelado. Hilmi et al. (2020) utilizando simulaciones, evidenciaron que propiedades como la longitud y la velocidad del patrón de la barra pueden experimentar fluctuaciones significativas en escalas temporales de 100Myrs, cuestionando así la suposición de la estabilidad estructural en escalas cortas. Por último, Łokas (2021) reportaron la existencia de barras asimétricas intrínsecas (o *lopsided bars*) las cuales no se deben simplemente a desplazamientos o interacciones externas, sino a inestabilidades internas de la galaxia.

Se cree que las barras desempeñan un papel fundamental en la evolución de su galaxia anfitriona (Bournaud and Combes, 2002), ya que modifica la distribución del momento angular en el disco, contribuye a la reorganización de su estructura interna (Athanasoulas, 2003; Sellwood, 2014; Buta and Combes, 1996); influye en la composición química del gas (Martin and Roy, 1994) llegando incluso a desencadenar episodios de formación estelar cerca del núcleo (Heckman, 1980; Ellison et al., 2011; Gadotti and Dos Anjos, 2001) y estar relacionada por ejemplo al proceso evolutivo vinculado a la formación de bulbos *boxy/peanut* (Erwin and Debattista, 2016). Otro fenómeno interesante, es la presencia de barras anidadas, también conocidas como barras dentro de barras. Esta configuración fue propuesta teóricamente por Shlosman et al. (1989) quienes plantearon que una barra secundaria, embebida en una primaria más grande, podría facilitar el transporte de gas hacia las regiones centrales de la galaxia, superando las barreras de resonancia de corrotación. Observacionalmente Emsellem et al. (2001) y Laine et al. (2002) confirmaron la existencia de estas estructuras dobles mediante imágenes en infrarrojo cercano, revelando que una fracción significativa de galaxias alberga una barra secundaria orientada de forma no alineada respecto a la principal. Du et al. (2017), basándose en simulaciones, muestran que las barras secundarias pueden rotar con velocidades de patrón diferentes e incluso desfasa-

das respecto a las barras primarias. Esto genera una dinámica compleja que puede persistir durante escalas temporales prolongadas.

Sin embargo aun no hay consenso sobre un modelo dinámico que describa de manera completa la evolución de galaxias barradas, esto se debe principalmente a diversas limitaciones observacionales y teóricas como por ejemplo dificultades para inferir su geometría tridimensional debido a la proyección en el plano del cielo.

A pesar de estos desafíos, el estudio de las propiedades observables de las barras ha avanzado significativamente gracias al desarrollo de grandes relevamientos observacionales y simulaciones cosmológicas de alta resolución. Estudio recientes como Wang and Zhou (2025), basados en datos del DESI Legacy Imaging Survey³, analizaron más de 230.000 galaxias en el universo local y encontraron que cerca del 43 % presentan barras, alcanzando un 62 % entre galaxias de disco. Determinaron que la mayoría de estas barras son fuertes, con longitudes entre 3 y 7 kpc y observaron una clara correlación entre la presencia de barra y propiedades como el color y la masa estelar. Por su parte Semczuk et al. (2024) utiliza simulaciones del proyecto TNG50 para estudiar la evolución de la velocidad de patrón de las barras en galaxias masivas y encontraron que muchas de estas estructuras evolucionan hacia barras lentas, en contraste con observaciones que favorecen barras rápidas.

En el contexto de altos redshift, Le Conte et al. (2024) empleó observaciones del James Webb Space Telescope (JWST⁴) para identificar barras en aproximadamente un 20 % de las galaxias entre 8 y 11 mil millones de años atrás, el doble de lo estimado previamente con el telescopio Hubble. Esto sugiere una aparición temprana y frecuente de barras en la evolución galáctica. A esto se suman estudios como Méndez-Abreu et al. (2023) en la muestra del

³<https://www.legacysurvey.org/>

⁴<https://webbtelescope.org/home>

cúmulo SMACS0723 con JWST, que validaron una fracción significativa de barras en un entorno de cúmulo a redshift $z \approx 0,39$, mejorando la detección gracias a la resolución en el infrarrojo cercano. En la misma línea, Yoon et al. (2019) analiza mas de 100 cúmulos del Sloan Digital Sky Survey (ver sección 2.1) y mostraron que la fracción de galaxias barradas es de 42 % en cúmulos interactuantes versus un 27 % en cúmulos aisladas, sugiriendo que grandes interacciones a escala de cúmulo pueden inducir formación de barras.

1.1.2. Las interacciones

Las interacciones entre galaxias constituyen uno de los mecanismos más influyentes en la evolución morfológica y estructural de las galaxias (Fig. 1.4). Cuando dos o más galaxias se encuentran a distancias suficientemente pequeñas, sus potenciales gravitacionales interactúan, generando perturbaciones que pueden modificar significativamente sus discos, inducir asimetrías, formar estructuras como puentes, colas de mareas y en casos más extremos dar lugar a fusiones completas (Toomre and Toomre, 1972; Barnes and Hernquist, 1992; Mihos and Hernquist, 1996; Schweizer, 1982). Estos procesos no solo alteran la morfología visible sino que también pueden afectar la cinemática interna, la distribución del gas y la tasa de formación estelar (Struck, 1999; Barnes and Hernquist, 1996; Di Matteo et al., 2007; Ellison et al., 2008; Lambas et al., 2003; Kennicutt, 1998; Mesa et al., 2014; Davies et al., 2015; Pan et al., 2019). En conjunto, estos efectos convierten a las interacciones en un componente clave en la transformación de galaxias a lo largo del tiempo.



Figura 1.4: Ejemplo de galaxias en interacción: Arp 87

El impacto de las interacciones depende de varios factores, incluyendo la geometría del encuentro, la masa estelar, el tipo morfológico de la galaxia, y la disponibilidad de gas frío (Di Matteo et al., 2007; Moreno et al., 2015). Un escenario particularmente relevante en este trabajo para el estudio de los efectos inducidos por interacciones lo constituyen los pares de galaxias, es decir, sistemas binarios de galaxias ubicadas a distancias proyectadas pequeñas y velocidades relativas bajas. La distancia proyectada (r_p) corresponde a la separación angular entre dos galaxias medida sobre el plano el cielo, sin considerar su posible diferencia a lo largo de la línea de visión. Para asegurar que ambas galaxias se encuentren efectivamente próximas en el espacio tridimensional, se requiere que ambas galaxias tengan redshifts similares entre si, lo cual permite minimizar el efecto de alineaciones aparentes con objetos no asociados físicamente. Una condición habitual para considerar un par como físicamente asociado es que la diferencia de redshift corresponda a una velocidad relativa (ΔV) (Charlton and Salpeter, 1991) menor a cierto umbral (generalmente $\Delta V < 350 - 500 km/s$) como se ha implementado en múltiples estudios (Lambas et al., 2003; Ellison et al., 2008; Patton

et al., 2000). El parámetro de velocidad relativa⁵ se estima a partir de la diferencia entre las velocidades radiales derivadas del redshift de cada componente. Proporciona una estimación indirecta del grado de ligadura gravitacional entre ambas galaxias. Gracias a que los pares de galaxias representan configuraciones relativamente simples y son observacionalmente frecuentes, han sido ampliamente utilizados como casos de estudio para investigar los efectos de las interacciones. Además, el análisis estadístico en grandes encuestas ha permitido establecer tendencias poblacionales y dependencias con el entorno, lo que contribuye a una comprensión más precisa de los mecanismos físicos que rigen la evolución galáctica.

Un enfoque ampliamente utilizado para identificar interacciones es el análisis de sus morfologías. Entre los primeros trabajos con este enfoque se encuentra Conselice (2003) quien propuso un sistema basado en tres parámetros estructurales: concentración (C), asimetría (A) y clumpiness (S) (CAS). Estos parámetros permiten distinguir etapas en las fusiones de galaxias. Posteriormente Lotz et al. (2004) introdujo dos nuevos parámetros: el coeficiente de Gini, que mide la desigualdad en la distribución del brillo superficial y el parámetro M_{20} (*second-order moment of the brightest 20 % of the galaxy's flux*). Estos métodos han sido aplicados con éxito a grandes catálogos como SDSS, COSMOS⁶ y CANDELS⁷ para estimar tasas de fusión y caracterizar el impacto morfológico de las interacciones a lo largo del tiempo (Hernández-Toledo et al., 2005; De Propris et al., 2007; Ellison et al., 2010; Lotz et al., 2008).

Observacionalmente, se ha encontrado evidencia robusta de que las galaxias en interacción tienden a presentar una tasa de formación estelar (SFR) elevada en comparación con galaxias aisladas. Barton et al. (2000), utilizando datos espectroscópicos, mostraron que la SFR aumenta significativamente con separaciones menores a 50kpc. Resultados similares se

⁵ $\Delta V = |v_{rad1} - v_{rad2}| = c \cdot |z_1 - z_2|$

⁶<https://cosmos.astro.caltech.edu/>

⁷<https://www.ipac.caltech.edu/project/candels>

obtuvieron en Lambas et al. (2003) para galaxias del 2dF Galaxy Redshift Survey (2dF-GRS; Yee and Ellingson, 1995), donde se observó un incremento en la fracción de galaxias con líneas de emisión $H\alpha$ intensas para separaciones proyectadas menores a 25kpc y velocidades relativas bajas. Resultados que fueron reforzados por Scudder et al. (2012) y Alonso et al. (2004), que bajo las mismas distancias proyectadas y con velocidades inferiores a 100km/s, las galaxias presentan en promedio un exceso significativo de formación estelar con respecto a galaxias aisladas. Estudios más recientes como Patton et al. (2013) y Pan et al. (2018) exploraron como esta actividad depende tanto de la masa como del tipo morfológico y el entorno local.

Por otra parte, las simulaciones han ayudado significativamente a comprender algunos de los mecanismos físicos que rigen los efectos de las interacciones. Tissera (2000) demostró que las fusiones inducen flujos de gas hacia las regiones internas, activando brotes de formación estelar y modificando el perfil de abundancias químicas, lo cual depende en gran medida de la masa de las galaxias. Hopkins et al. (2008) y Torrey et al. (2012) confirman que las fusiones mayores pueden desencadenar eventos simultáneos de formación estelar y acreción sobre el agujero negro central, dando lugar a coevolución entre el bulbo y el AGN.

Debido a que en este trabajo se presta especial atención tanto a las barras como a las interacciones, resulta interesante estudiar la relación entre la presencia de barras y las interacciones. Desde un enfoque teórico, Noguchi (1987, 1988) demostraron que las perturbaciones generadas por galaxias compañeras cercanas, pueden disparar inestabilidades que den lugar a la formación de barras. Łokas et al. (2016) observó que encuentros entre galaxias de masa comparable, pueden generar barras fuertes y persistentes. Desde el punto de vista observacional Elmegreen et al. (1990) reportó un exceso de estructuras no axisimétricas, como lo son las barras, en galaxias interactuantes. Estudios sistemáticos como Méndez-Abreu et al. (2012) encontraron que la frecuencia de barras es mayor en galaxias con signos de

interacción débil, sugiriendo que ciertos encuentros favorecen la formación o fortalecimiento de barras sin llegar a desestabilizar completamente el disco.

En conjunto, los estudios teóricos y observacionales convergen en la idea de que las interacciones entre galaxias contribuyen un proceso importante en la evolución morfológica y dinámica de los sistemas galácticos. Este contexto motiva el estudio detallado de sistemas en interacción desde diversos puntos de vista, en este trabajo en particular, con pares de galaxias los cuales ofrecen una oportunidad para analizar en tiempo real los efectos dinámicos y estructurales producidos por la influencia gravitacional mutua.

1.2. Núcleos activos de galaxias

La mayoría de las galaxias masivas en el universo local, albergan en sus centros un agujero negro supermasivo (SMBH), con masas que van desde unos pocos millones hasta varios miles de millones de masas solares (Kormendy and Ho, 2013; Heckman and Best, 2014). La presencia de estos objetos compactos ha sido confirmada mediante observaciones dinámicas de estrellas o del gas en el núcleo galáctico y su existencia parece estar relacionada íntimamente con las propiedades globales de la galaxia anfitriona (Gebhardt et al., 2000; Ferrarese and Merritt, 2000).

En determinadas circunstancias, el SMBH a menudo muestra una emisión nuclear cuyo origen no es estelar. La hipótesis más plausible sugiere que puede pasar por una fase de acreción activa, durante la cual la materia -como polvo, gas o estrellas- es atraída gravitatoriamente debido a perturbaciones dinámicas hacia el SMBH y absorbida por este (Lynden-Bell, 1969). Este proceso genera que el material se organice en un disco de acreción alrededor del agujero negro, donde las altas temperaturas y fricciones internas provocan una gran cantidad de energía. En esta etapa, el agujero negro es denominado *activo* (Ac-

tive Galactic Nuclei - AGN; Richstone et al., 1998; Padovani et al., 2017). La radiación emitida por un AGN abarca un amplio rango en el espectro electromagnético partiendo por el óptico, incluyendo rayos X (Gilli et al., 2007), radio (Best et al., 2005), ultravioleta (Trammell et al., 2007) e infrarrojo (Donley et al., 2012), esta es captada por los telescopios y analizada con el objetivo de estudiar su origen y permitir su caracterización (Netzer, 2015).

Los AGN se encuentran entre los objetos más luminosos del universo ($L_{bol} 10^{40} - 10^{48} \text{ erg/s}$ (Peterson, 1997)). A pesar de su diversidad observacional, la mayoría comparten una estructura básica: un disco de acreción de material frío, gas y polvo que se encuentra en torno al agujero negro, una estructura de polvo conocida como toro, un disco molecular delgado y un chorro de radio central que puede expandirse varios kiloparsec fuera de la galaxia. Estos componentes pueden dar lugar a diferentes tipos observacionales de AGN, como quásares, radiogalaxias o blazares. Trabajos claves como los de Antonucci (1993), Urry and Padovani (1995) y Krolik (1999) fueron fundamentales para consolidar el llamado modelo unificado (véase Fig. 1.5). Este modelo propone que la diversidad observada en AGNs puede explicarse a partir de una misma estructura central, cuya apariencia cambia principalmente según el ángulo de observación. Este paradigma permitió simplificar y ordenar la comprensión de los distintos tipos de núcleos activos observados.

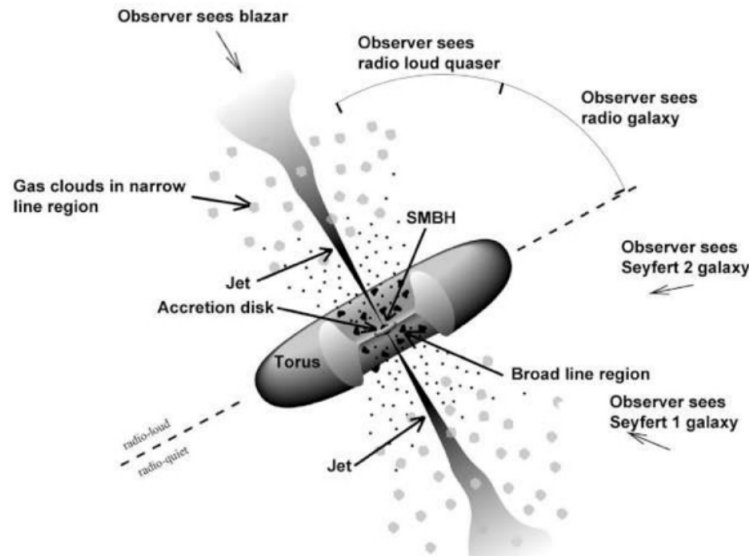


Figura 1.5: Modelo unificado de AGN. Imagen tomada de NASA (2016)

Dentro de este marco, existen diversas características espectrales que juegan un papel fundamental en la identificación y caracterización de estos objetos. Entre las características observacionales más relevantes se encuentran amplias líneas de emisión que provienen del material frío cercano al agujero negro, líneas ópticas más estrechas que provienen del material frío más distante o una emisión continua de rayos X debido a un *jet* y a la corona caliente del disco de acreción. A partir de estas firmas espectrales, surgió la necesidad de establecer una clasificación que permitiera organizar esta diversidad observada. Así se definieron categorías como Seyferts, LINERs (*Low-Ionization Nuclear Emission-line Regions*) y objetos compuestos. Esta categorización fue útil para la diferenciación de líneas de emisión, las cuales reflejan variaciones en la intensidad de la ionización, la naturaleza de la fuente central y los procesos de acreción y retroalimentación (Ho, 2008). Las galaxias Seyferts (Seyfert, 1943) se dividen en dos subtipos: 1 y 2. Exhiben líneas de emisión ($H\alpha$, $H\beta$, H γ , [OIII] λ 5007, [NII], [SII]) tanto anchas como estrechas, respectivamente, lo que sugiere la

presencia de una región de líneas anchas (BLR) con gas circundando al agujero negro a altas velocidades (hasta 10.000km/s) (Osterbrock and Ferland, 2006). La radiación emitida por estas regiones incluye emisión en rayos X y ultravioleta debido a la intensa actividad de acreción. Es común encontrar Seyferts en galaxias espirales y son menos energéticos que un quásar (Weedman, 1977; Kormendy and Ho, 2013). En contraste, los LINERs presentan líneas de emisión de baja ionización y suelen estar menos activos energéticamente y menos luminosos que los Seyferts (Heckman, 1980), sugiriendo un proceso de acreción menos intenso o la influencia de mecanismos de ionización alternativos (choques de gas, formación estelar, etc.). Las líneas de emisión más características en ese tipo de AGN provienen de elementos con nivel bajo de ionización, como [OII], [NII] y [SII]. Por último, los AGNs compuestos muestran características de ambos tipos, con líneas de emisión que revelan la coexistencia de un AGN y otras fuentes de excitación como la formación estelar, lo cual puede llegar a dificultar la clasificación (Kewley et al., 2006).

La interrogante sobre el origen de los núcleos activos de galaxias ha constituido un tema de extensa investigación durante largos años. Hasta la fecha aún persiste una discusión en torno a los mecanismos que sustentan y regulan el motor central de dichas galaxias, y los procesos físicos detrás de la acreción de material siguen siendo objeto de estudio.

Investigaciones recientes, han permitido caracterizar con mayor precisión los factores de regulación de los núcleos activos. Por ejemplo, Aird et al. (2022) analizó una muestra de 5.000 galaxias combinando datos del Hubble Space Telescope⁸ y detecciones en rayos X de Chandra⁹. Sus resultados sugieren que la evolución estructural -en particular la compactación- juega un rol determinante en el desencadenamiento de la actividad nuclear. De

⁸<https://science.nasa.gov/mission/hubble/>

⁹<https://chandra.harvard.edu/>

forma complementaria, Panessa et al. (2022) realizaron observaciones en radio, encontrando que la mayoría de los núcleos activos presentan emisión compacta en radio, y que una fracción significativa exhibe estructuras extendidas como jets o flujos de salida. Además, identificaron una correlación entre la emisión en radio y en rayos X, lo que sugiere un acoplamiento entre los procesos de crecimiento y eyección.

Continuando con estudios en diversas longitudes de onda, Mountrichas (2023) combina datos de la misión eROSITA¹⁰ con SDSS para analizar AGNs, clasificándolos en oscuros y no oscuros. Sus resultados incluyen que los AGNs oscuros residen en galaxias más masivas y con tasas de formación más bajas que sus contrapartes no oscuras.

Por otro lado López et al. (2023) realizó un estudio morfológico profundo mediante imágenes ópticas e infrarrojas de AGNs y galaxias inactivas. Sus hallazgos muestran que estructuras internas están significativamente correlacionadas con una mayor incidencia de AGNs, lo que apunta a mecanismos internos de redistribución de gas como condiciones facilitadoras del transporte del material hacia el agujero negro central.

Los avances tecnológicos recientes, en particular la puesta en operación del JWST, han abierto una nueva ventana para el estudio detallado de los núcleos activos de galaxias. Gracias a su alta resolución y sensibilidad en el infrarrojo, ha permitido observar estructuras circunnucleares que antes permanecían ocultas por el polvo. Kocevski et al. (2023) identificaron núcleos activos en galaxias a altos redshift, mostraron que la mayoría de estos AGNs se encuentran en sistemas esferoidales compactos sin evidencia clara de fusiones recientes, lo que desafía la hipótesis de que las interacciones mayores son el principal desencadenante de la actividad nuclear en el universo temprano (Hopkins et al., 2008; Treister et al., 2012; Capelo et al., 2015).

En conjunto, estos estudios recientes reafirman que la actividad nuclear en galaxias es

¹⁰<https://erosita.mpe.mpg.de/>

un fenómeno que puede deberse a múltiples factores, ya sean internos o por condiciones externas relacionadas con la morfología, el entorno y la evolución estructural. El estudio de AGNs continúa siendo un campo dinámico que, gracias al desarrollo de nuevas técnicas observacionales y a la disponibilidad de datos en múltiples longitudes de onda cada vez más profundos, sigue arrojando nuevas pistas sobre los mecanismos que gobiernan el crecimiento de los agujeros negros supermasivos y su conexión con las propiedades de sus galaxias anfitrionas.

1.2.1. Actividad nuclear: Barras e Interacciones

Como se mencionó anteriormente, los mecanismos presentes en este fenómeno nuclear, están relacionados con perturbaciones dinámicas que mueven el gas a las regiones internas de la galaxia (Rees, 1984). Tomando en cuenta esto, varios autores coinciden en que es necesario considerar las barras galácticas y las fusiones como posibles procesos para el torque del material de los centros galácticos (Mihos and Hernquist, 1996; Alonso et al., 2007, 2014). El gas y el polvo circundante bajo estas condiciones, pueden precipitarse hacia el núcleo, aumentando o activando la actividad del agujero negro.

Para el caso de las barras, las nubes de gas dentro de las galaxias sufren choques con los bordes de las barras (Shlosman et al., 1990), lo que produce una pérdida del momento angular y lleva a una redistribución del gas y la componente estelar al punto de influir en la evolución de la galaxia dirigiendo el flujo de material al núcleo y aumentando la probabilidad de albergar un AGN (Combes and Elmegreen, 1993).

La discusión sobre si existe o no una relación entre la presencia de una barra y la ocurrencia de AGNs o activación de estos, surgió hace varios años mientras algunos investigadores estudiaban la dinámica de las barras y su rol en la evolución de galaxias (Athanasoula,

1992, 2005; Combes, 2004), quienes eventualmente llegaron a la hipótesis de que una barra puede jugar un papel importante en el incremento de la actividad AGN, considerando las barras como uno de los principales mecanismos de evolución galáctica y de canalización del gas hacia el centro. Autores como Knapen et al. (2000) y Laine et al. (2002) muestran una fracción mayor de barras para galaxias que albergan un AGN. Más adelante Oh et al. (2012) encontró que las galaxias barradas exhiben valores mayores de actividad nuclear considerando agujeros negros menos masivos y colores azules. De la misma manera, Alonso et al. (2013, 2018) utilizaron datos de SDSS para analizar el impacto de las barras en la actividad AGN. Encontraron que las galaxias anfitrionas de AGN que poseen una barra muestran una actividad nuclear más eficiente que aquellas que no tienen una barra. Además Alonso et al. (2018) también analizó la tasa de acreción del agujero negro, nuevamente las galaxias barradas tienen mayor actividad de acreción alrededor del AGN en comparación con la muestra de control de no-barradas, lo que sugiere que las barras facilitan el flujo de gas hacia el centro de la galaxia, incrementando la probabilidad de activar un AGN.

En contraste, algunos estudios avalan la ausencia de una correlación entre la barra y la actividad alrededor del AGN. Lee et al. (2012) y Cheung et al. (2015) no hallaron evidencia clara de que el AGN se viera influenciado por la barra. Galloway et al. (2015) utilizó Galaxy Zoo 2 (Willett et al. (2013), ver sección 2.2) y evaluó la actividad nuclear y de formación estelar, sus resultados arrojaron una fracción mayor de galaxias barradas con AGN que galaxias barradas con formación estelar, sin embargo no hubo evidencia que la tasa de acreción dependiera de la presencia de una barra. Recientemente, Silva-Lima et al. (2022) reportó que las galaxias barradas albergan AGNs más poderosos pero solamente si la relación $M - \sigma$ para estimar la masa del agujero negro era diferente para galaxias barradas y no-barradas, descartando esta posibilidad, no halló correlación alguna.

En el contexto de las interacciones galácticas, el paradigma cosmológico actual para la formación de galaxias asume un escenario jerárquico. En este marco, estudios con grandes volúmenes de datos como 2dF Galaxy Redshift Survey (2dF-GRS; Yee and Ellingson, 1995), Lambas et al. (2003) junto a otros trabajos como Alonso et al. (2007) y Ellison et al. (2011) han proporcionado evidencia de que las fusiones e interacciones entre galaxias -o en general la presencia de una compañera cercana- indican alteraciones tanto morfológicas como en las propiedades físicas de las galaxias involucradas. Entre los efectos más destacados se encuentra el aumento de la formación estelar, la cual tiende a intensificarse a medida que disminuye la velocidad relativa y la separación proyectada entre los miembros del par. Este incremento de la formación estelar, se ha atribuido al ingreso del gas hacia regiones internas de las galaxias, promovido por perturbaciones gravitacionales generadas durante la interacción. Estas mareas, pueden provocar flujos significativos de gas que alimentan los estallidos estelares observados. No obstante, la magnitud de este efecto depende en gran medida de la cantidad de gas disponible en cada galaxia previo a la interacción.

Estos flujos de gas podrían también alimentar un agujero negro central y posiblemente iniciar la actividad nuclear (Sanders et al., 1988; Dahari, 1985; Hopkins et al., 2008). Las fuerzas gravitacionales entre las galaxias, producen torques, los cuales redistribuyen el gas y polvo dentro de las galaxias. El gas comprimido por las interacciones pierde momento angular y se mueve hacia el núcleo galáctico, donde puede ser consumido por el agujero negro supermasivo, desencadenando su actividad. Trabajos como los de Heckman et al. (2004) y Kauffmann et al. (2003) intentaron estudiar la coevolución entre los AGN y su galaxia anfitriona que surge luego de una colisión y disipación del gas. El proceso de retroalimentación del AGN a su vez ejerce una influencia significativa en el medio a través de la expulsión de material del núcleo y así regular la formación estelar subsecuente. Actualmente el tópico de interacciones y su impacto en la actividad nuclear, continúa desarrollando cada vez más

resultados. Por ejemplo si consideramos que una de las principales consecuencias de las interacciones se ve reflejada en la tasa de formación estelar, estudios como Storchi-Bergmann et al. (2001), Lackner et al. (2014) o Le and Xue (2025) encontraron una correlación entre los AGN y la actividad de formación estelar en galaxias en interacción.

Diversos estudios han investigado el impacto de las interacciones sobre la actividad nuclear en galaxias, mostrando evidencia consistente de que las interacciones de marea y las morfologías perturbadas están fuertemente asociadas a un aumento en la actividad nuclear, es decir, los AGNs alojados en galaxias con signos de interacción presentan una mayor actividad que aquellos ubicados en sistemas aislados o sin perturbaciones evidentes (Koss et al., 2010, 2012; Silverman et al., 2011; Ellison et al., 2013). En línea con estos hallazgos, Alonso et al. (2007) mostraron que la fracción de galaxias con actividad nuclear se incrementa notablemente en pares cercanos, especialmente en aquellos con separaciones menores a 25 kpc y velocidades radiales $\Delta V < 350 \text{ km/s}$. Esto sugiere que las interacciones más cercanas y dinámicamente vinculadas son particularmente eficientes para inducir el flujo de gas hacia las regiones centrales.

Sin embargo, Schmitt (2001) mostró que las interacciones no son una condición necesaria para el desencadenamiento de la actividad nuclear, dado que una fracción considerable de AGNs se encuentra en galaxias sin evidencias claras de interacción, lo que implica que otros mecanismo internos también pueden alimentar al agujero negro. De la misma manera, otros estudios que buscan evidencias de características de marea o morfologías distorsionadas en AGNs, no hallan diferencias significativas en comparación a galaxias no-AGN (Gabor et al., 2009; Cisternas et al., 2011).

Por el contrario, estudios posteriores han complementado la visión de la capacidad de las interacciones para canalizar gas frío hacia el centro galáctico. Por ejemplo, Satyapal et al. (2014) analizaron galaxias activas en el infrarrojo medio y encontraron una fracción

mayor de AGN en pares de galaxias en comparación con galaxias aisladas. Esta fracción aumenta al disminuir la separación entre pares. Khabiboulline et al. (2014) encuentra que la actividad de los núcleos varía con el entorno intergaláctico aumentando en pares de galaxias y disminuyendo en entornos más densos como cúmulos.

Una alternativa que se ha propuesto para estos resultados contradictorios, es que las fusiones pueden desencadenar AGNs, sin embargo, la mayoría de estos no se originan debido a las interacciones (Draper and Ballantyne, 2012).

Actualmente, la relación entre interacciones y la actividad nuclear sigue siendo un tema activo de investigación. La complejidad del fenómeno, junto con las limitaciones observacionales y la variabilidad intrínseca del AGN, han motivado trabajos recientes que buscan clarificar este vínculo. Shah et al. (2020) identificaron visualmente pares de galaxias que se encuentren en interacción a partir de observaciones de COSMOS y CANDELS que contengan AGNs seleccionados en rayos X e infrarrojo en intervalos de corrimiento al rojo más altos. Hallaron una leve tendencia al aumento de la fracción de AGNs a medida que disminuía la distancia proyectada entre galaxias, sin embargo no encontraron una mejora significativa en relación a la muestra de control en ningún intervalo de separación. Steffen et al. (2023) descubrieron que las interacciones pueden aumentar la probabilidad de activar un AGN, pero que no necesariamente inducen AGNs más luminosos que los producidos por otros procesos estocásticos. Por su parte, Araujo et al. (2023) emplean técnicas de machine learning para identificar características de interacción en galaxias anfitrionas de AGNs. Destacan que las interacciones si influyen en el desencadenamiento de la actividad nuclear según su muestra de cuásares tipo 2, y ocurre cuando la galaxia compañera esta a distancias comparables a los radios de las galaxias anfitrionas ($<9\text{kpc}$), por lo que ocurre cuando ya están en proceso de fusión, mismos resultados de Pierce et al. (2023).

Además de los estudios observacionales, las simulaciones hidrodinámicas han estado

presentes en este tipo de trabajos. Byrne-Mamahit et al. (2024) explora las condiciones dinámicas bajo las cuales una interacción puede inducir la acumulación eficiente de gas hacia el centro galáctico. Sus resultados apuntan a que no todas las interacciones desencadenan actividad nuclear significativa; factores como la masa de las galaxias y la estabilidad interna del disco juegan un papel crucial. Simulaciones anteriores como Capelo et al. (2015), también han destacado la importancia de las fusiones mayores y ciertas configuraciones para provocar un flujo de gas centralizado suficiente para activar el AGN. Estos modelos respaldan la idea de que, aunque las interacciones pueden favorecer la actividad nuclear, no siempre lo hacen y su efectividad depende de múltiples condiciones físicas que aún se están explorando en detalle.

No obstante, persiste un extenso camino para comprender la mecánica de este fenómeno. A partir de investigaciones antecedentes, es posible afirmar que las propiedades morfológicas específicas de cada galaxia, así como el ambiente en el que se encuentran, desempeñan un rol significativo al momento de desencadenar la actividad nuclear.

1.3. Objetivos

El estudio de la morfología comprende un área fundamental para el análisis del desarrollo de galaxias. Entender cómo las estructuras internas, como las barras, y los procesos externos como las interacciones, afectan los procesos dinámicos de sus anfitrionas y cómo influyen en la actividad nuclear es crucial para el avance en las teorías de evolución.

Las barras, estructuras lineales en el centro del disco de las galaxias, pueden tratarse de mecanismos eficientes para transportar gas hacia el centro galáctico. Este flujo puede llevar a la activación, reactivación o intensificación de la actividad del AGN. La confirmación de

este fenómeno, podría dar explicación a diversos tópicos en cuanto a evolución o dar paso a la compresión de los ciclos de actividad nuclear.

Por otro lado las interacciones entre galaxias, que incluyen encuentros cercanos, fusiones o acoplamientos gravitacionales representan procesos que pueden inducir perturbaciones en el gas y las estrellas, facilitando el transporte de material hacia el núcleo. Al igual que las barras pueden jugar un rol clave en la actividad nuclear.

El principal objetivo al cual está orientado este trabajo, es el de analizar de forma detallada la relación que existe entre las barras y/o interacciones y los efectos que estas producen sobre las propiedades de una galaxia anfitriona de un AGN y en su actividad nuclear. Se estudiará la ocurrencia de estos fenómenos en función de la presencia o no de una barra y si la galaxia posee una compañera cercana, esto a través de la comparación de distribuciones en color, la luminosidad y masa estelar, la velocidad de dispersión y la masa del agujero negro. Para este propósito se utilizarán datos ópticos del catálogo de Galaxy Zoo DECaLS y espectroscópicos del SDSS. Se obtendrán muestras de galaxias barradas y de pares en interacción para posteriormente realizar la identificación núcleos activos en estas muestras. Se realizará un análisis exhaustivo del impacto que producen estos fenómenos en las propiedades de las galaxias anfitrionas de AGN.

Los resultados proporcionaran un aporte importante a las teorías existentes e incluso pueden llegar a la generación de nuevas hipótesis o modelos de formación y alimentación de galaxias de núcleo activo, debido a que, en la actualidad, la co-evolución de interacciones, barras y actividad nuclear aun contiene varios puntos por descubrir.

Capítulo 2

Datos y metodología

En este trabajo se utilizaron datos obtenidos a partir de dos grandes surveys del cielo: Sloan Digital Sky Survey (SDSS; York et al., 2000) y el Dark Energy Camera Legacy Survey (DECaLS; Blum et al., 2016), los cuales ofrecen información fotométrica y espectroscópica de alta calidad para millones de galaxias en el cielo. Particularmente de este último se emplearon las clasificaciones morfológicas visuales provistas por el proyecto Galaxy Zoo DECaLS¹ (Walmsley et al., 2022). En las secciones siguientes, se describen en detalle las características de cada relevamiento, los catálogos utilizados, los criterios de selección aplicados para construir las distintas muestras de galaxias, así como la metodología adoptada para combinar la información morfológica y espectroscópica del análisis.

Como principal herramienta se utilizaron códigos de Python (Van Rossum and Drake Jr, 1995) mediante la interfaz de Jupyter Notebook y TOPCAT- Tool for Operations on Catalogues And Tables (Taylor, 2005), un entorno gráfico interactivo el cual permite un análisis y principalmente una manipulación de catálogos considerablemente más fluida.

¹<https://data.galaxyzoo.org/>

2.1. DECaLS y SDSS

El análisis realizado en este trabajo se basa en datos provenientes de dos relevamientos extragalácticos ampliamente utilizados en la literatura: SDSS y DECaLS. Ambos ofrecen información clave para caracterizar propiedades físicas de las galaxias, permitiendo un estudio conjunto y comparativo.

El Dark Energy Camera Legacy Survey es uno de los tres relevamientos ópticos profundos que componen el proyecto *Legacy Surveys*, cuyo propósito es proveer imágenes y fotometría de alta calidad para apoyar la selección de objetivos del experimento espectroscópico DESI (Instrumento Espectroscópico de Energía Oscura; Dey et al., 2019). DECaLS obtiene información de la Cámara de Energía Oscura (DECam), ubicada en el telescopio Blanco de 4 metros en el Observatorio Cerro Tololo. DECam es particularmente poderosa para observaciones de campo amplio, cuenta con un campo de visión de tres grados cuadrados y un arreglo de 62 CCDs, lo que permite capturar imágenes de alta calidad en grandes áreas de cielo. Cada píxel tiene una escala de 0.262 arcsec/píxel, proporcionando una resolución suficiente para estudios morfológicos detallados. DECaLS está diseñado para ser uno de los survey más profundos hasta la fecha, con el objetivo de detectar objetos más débiles e imágenes más detalladas en un área total de 9000 grados cuadrados de cielo principalmente en regiones ecuatoriales. Observa en los filtros g, r y z, con profundidades alcanzadas de aproximadamente 24, 23.4 y 22.5 magnitudes, respectivamente, elegidos para maximizar la información obtenida sobre las características de las galaxias.

DECaLS es parte de un esfuerzo más grande para lograr que los datos astronómicos sean accesibles a la comunidad científica global, es crucial para investigaciones espectroscópicas como para el avance general del conocimiento astronómico como formación y evolución de galaxias a través de observaciones altamente detalladas del cielo.

Por otra parte se utilizaron datos proporcionados por Sloan Digital Sky Survey, una de las iniciativas observacionales más extensas, reconocidas y con excelentes resultados operativo desde los 2000. Obtiene información desde el telescopio de 2.5 metros ubicado en el observatorio Apache Point en Nuevo México, Estados Unidos, capaz de capturar imágenes en cinco bandas desde ultravioleta a infrarrojo (u, g, r, i, y z). Este proyecto ha pasado por varias fases, cada una amplia aún más el alcance y precisión del mapeo del universo. Fue diseñado para obtener imágenes y espectroscopía de millones de objetos (estrellas, quásares y galaxias.) cubriendo más de un tercio del cielo del hemisferio norte. Sloan provee extensos catálogos de datos que facilitan el estudio detallado de diversas áreas de la astronomía. Los datos están disponibles a través de Data Releases que se producen regularmente a lo largo de los años, estos catálogos incluyen imágenes y mediciones espectroscópicas junto a herramientas de acceso como SkyServer y CasJobs².

Mientras que SDSS ha sido pionero en la implementación masiva y sistemática de tecnologías de fibra óptica para espectroscopía (York et al., 2000; Smee et al., 2013), lo cual permite un análisis simultáneo de múltiples objetos, DECaLS se ha centrado más en la profundidad de las imágenes, ofreciendo imágenes detalladas de diversos objetos. La profundidad alcanzada por las imágenes ($r=23.6$) de DECaLS, a comparación con las imágenes del SDSS ($r=22.2$)(Nair and Abraham, 2010), permite revelar estructuras antes no visibles para nosotros, como brazos espirales, barras débiles y características de marea.

²<http://skyserver.sdss.org/casjobs/>

2.2. Galaxy Zoo

El proyecto Galaxy Zoo (GZ; Lintott et al., 2008) es un programa de ciencia ciudadana iniciado en 2007 y forma parte del conjunto más amplio de proyectos Zooniverse³. El objetivo principal de esta iniciativa, es permitir que voluntarios de todo el mundo contribuyan al campo de la astronomía y poder realizar una clasificación a gran escala alrededor de un tópico que genera problemas dada la alta complejidad y variedad de formas que las galaxias pueden adoptar. La idea era automatizar el proceso de clasificación a través de la cuantificación de votos de los diferentes “científicos ciudadanos”, quienes observaban cada galaxia y decidían si se trataba, por ejemplo, de una galaxia temprana o de tipo tardío o que tuviese alguna característica particular.

Los catálogos generados por el GZ entregan una clasificación morfológica construida a partir de la inspección visual de imágenes. Los usuarios reciben breves instrucciones sobre como identificar características observables en las galaxias y clasifican las imágenes cargadas en el sitio web del proyecto a partir de una serie de preguntas estructuradas. Cada imagen recibe cierta cantidad de votos, estos votos contribuyen a una base de datos y son usados en investigación científica.

Lintott et al. (2008) lanza un primer proyecto⁴ el cual proporciona una clasificación de aproximadamente un millón de galaxias cercanas del SDSS separadas en seis categorías basadas en su apariencia (Ver Fig. 2.1).

³<https://www.zooniverse.org/>

⁴<http://zoo1.galaxyzoo.org/>







Class	Button	Description
1		Elliptical galaxy
2		Clockwise/Z-wise spiral galaxy
3		Anti-clockwise/S-wise spiral galaxy
4		Spiral galaxy other (e.g. edge on
5		Star or Don't Know (e.g. artefact)
6		Merger

Figura 2.1: Categorías de clasificación de GZ de Lintott et al. (2008).

Para esta primera etapa del proyecto, se dio especial enfoque a las galaxias espirales, por ejemplo, evidenciar una preferencia lateral de espirales o hallar una función de correlación de dos puntos para la rotación de este tipo de galaxias. A pesar de que el proyecto surgió con éxito, logrando resultados científicos consistentes, se continuó desarrollando un plan que minimizara los sesgos cada vez más. Las principales mejoras a considerar, fueron posibles cortes en magnitud y observaciones más detalladas a los discos galácticos. Lintott et al. (2011) “amplia la descripción realizada en el GZ de 2008”, entregando los primeros resultados de clasificación de alrededor de 900.000 galaxias. Minimiza los sesgos por color al incluir imágenes en escala de grises para los voluntarios, sin embargo sus principales sesgos siguen siendo por luminosidad, tamaño y distancia (Bamford et al., 2009).

Años después, llega Galaxy Zoo 2 (GZ2; Willett et al., 2013), en donde se reclasificaron aproximadamente 300.000 de las galaxias más brillantes del primer GZ y emplea un árbol de decisión multitarea. A diferencia de la primera versión del proyecto, que se limitaba a distinguir entre morfologías generales, GZ2 introdujo un árbol de decisión compuesto por un conjunto jerárquico de preguntas que permitían identificar estructuras con mayor precisión. Su clasificación morfológica, se vuelve más detallada o “fina” al incluir once clasificaciones y 37 respuestas posibles, incluyendo la existencia de barras, prominencia de bulbos y

posición del disco de la galaxia. En esta versión del proyecto, aproximadamente el 90 % de las clasificaciones de los voluntarios coinciden con las de astrónomos experimentados. Además, cada galaxia fue clasificada múltiples veces por diferentes voluntarios, lo que permitió aplicar técnicas estadísticas para limpiar y ponderar las respuestas (como ponderación por consistencia del clasificador).

En 2021, gracias a DECam, surge la versión GZ DECaLS. La profundidad y alta resolución de las imágenes otorgadas por este catálogo, permiten clasificar visualmente de forma más adecuada. Las preguntas fueron modificadas de manera que sus respuestas fueran mucho más “características” en cuanto a las galaxias. Se implementó un árbol de decisión más refinado (ver Fig. 2.2), en el que cada pregunta depende de la respuesta anterior, permitiendo al clasificador seguir un camino lógico que mejora la eficiencia y coherencia de las clasificaciones. Además se agregó una columna con la eliminación del sesgo por *redshift* y se limitó por luminosidad.

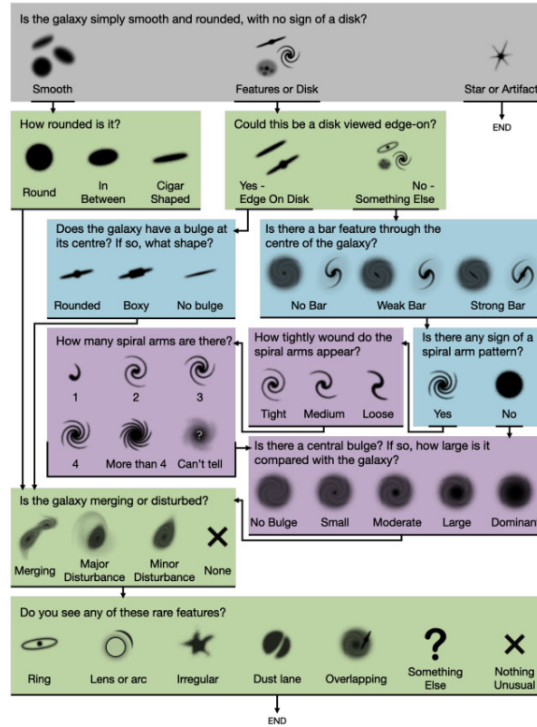


Figura 2.2: Árbol de decisiones del Galaxy Zoo DECaLS (Walmsley et al., 2022)

Por primera vez, se proporcionaron clasificaciones automáticas mediante aprendizaje profundo Bayesiano de 313.789 galaxias (Walmsley et al., 2022). Este algoritmo bayesiano permite aprender de respuestas de voluntarios inciertas y estimar la incertidumbre de las predicciones. El modelo fue entrenado a partir de 249.581 galaxias con al menos tres clasificaciones voluntarias. A pesar que la profundidad fue el factor fundamental para dar un paso más allá, la ponderación de los votos de voluntarios en cuanto a que objetos fueran más característicos de cada clasificación jugó un rol importante para el entrenamiento del modelo.

Desde su inicio, Galaxy Zoo ha evolucionado para incluir un nivel de detalle y precisión cada vez mayor. Ha sido bastante exitoso no solo en términos de volumen de datos procesa-

dos sino también en la calidad de investigación resultante. Además ha demostrado ser una herramienta poderosa en la educación y compromiso público de la ciencia, fomentando un amplio interés en esta área del conocimiento.

Para el propósito de este proyecto, se emplearon las clasificaciones morfológicas de un total de 313.789 galaxias provenientes del proyecto de GZ DECaLS. El catálogo a utilizar (*g_decaLS_auto_posteriors*) contiene un conjunto de probabilidades posteriores generadas automáticamente para una amplia variedad de características morfológicas. Cada entrada del catálogo incluye un identificador único para cada galaxia, junto con imágenes y fotometría correspondientes a la versión DECaLS DR5. Las columnas del catálogo están organizadas bajo el nombre “*some-question-an-answer*”, donde cada combinación representa la probabilidad estimada de que una galaxia cumpla con una determinada característica morfológica. Cabe señalar que el catálogo proporciona predicciones para todas las preguntas del árbol de decisiones, incluso si alguna de ellas puede no ser aplicable a ciertas morfologías. La Fig. 2.3 muestra algunas de las columnas con sus respectivos nombres y datos del catálogo utilizado en esta investigación.

ra	dec	iauname	petro_theta	elpetro_a...	redshift	mag_r	disk-edge-on_no_fraction	has-spiral-...	bar_stron...
146...	-1,0...	J094651...	7,24789	-19,30366	0,02...	14,3...	0,93206	0,19361	0,03425
146...	-0,7...	J094630...	5,61782	-19,9765	0,06...	16,5...	0,09948	0,22768	0,07619
146...	-0,9...	J094631...	4,76989	-18,43181	0,05...	17,7...	0,73778	0,14768	0,04996
146...	-0,6...	J094744...	6,24323	-21,55916	0,12...	16,3...	0,90043	0,02953	0,03562
146...	-0,5...	J094751...	8,89154	-19,10099	0,05...	17,1...	0,76967	0,49718	0,20759
146...	-0,7...	J094751...	3,54943	-20,08994	0,09...	17,2...	0,92237	0,04976	0,01837
146...	-0,8...	J094726...	5,86009	-21,06252	0,12...	17,2...	0,57854	0,11719	0,07807
146...	-0,7...	J094622...	5,95361	-19,97614	0,06...	16,5...	0,77464	0,43397	0,11893
146...	-0,5...	J094654...	43,31062	-19,9002	0,08...	17,2...	0,79207	0,19207	0,06981
146...	-1,2...	J094625...	10,69545	-21,1916	0,09...	15,8...	0,94796	0,04171	0,02059
147...	-0,4...	J094844...	13,5243	-20,94279	0,09...	16,1...	0,58599	0,71158	0,07882
146...	-0,3...	J094749...	9,79345	-21,62572	0,13...	16,6...	0,94804	0,23756	0,03509
147...	-0,3...	J094842...	16,48723	-15,53467	0,00...	16,0...	0,93894	0,0609	0,03437
147...	-0,0...	J094859...	5,8911	-20,48183	0,08...	16,5...	0,91348	0,06207	0,05587
146...	-0,3...	J094740...	6,62358	-21,34058	0,13...	16,8...	0,96765	0,84527	0,29063
147...	0,0...	J094919...	8,89154	-20,37175	0,04...	15,5...	0,97095	0,91688	0,64737
146...	-0,9...	J094617...	9,16455	-20,52644	0,06...	16,0...	0,23439	0,52881	0,25006
146...	-1,0...	J094615...	3,04441	-20,56769	0,09...	17,0...	0,38716	0,09341	0,23688
146...	-0,8...	J094526...	3,27308	-21,15305	0,12...	16,8...	0,89422	0,05472	0,02716

Figura 2.3: Columnas pertenecientes al catálogo de clasificaciones morfológicas de Galaxy Zoo DECaLS. Como ejemplo se muestra el nombre *disk-edge-on-no-fraction*

Para la clasificación morfológica se utilizó la columna *fractions* que muestra una probabilidad de predicción de la morfología de la galaxia en función de los posibles votos que haya podido recibir. Incluyen además la ascensión recta y declinación del objeto, *redshift* y magnitudes. En la descripción detallada del trabajo realizado a los datos, Walmsley (2021) expone el proceso por el cual el modelo de deep learning provee en forma probabilística las morfologías de las galaxias.

También se utilizaron datos del catálogo de Galaxy Zoo 2, el cual contiene clasificaciones morfológicas para galaxias con espectros obtenidos en el SDSS DR7. Este catálogo incluye identificadores compatibles con otros catálogos del SDSS, lo que facilita su combinación con catálogos externos. Cada galaxia fue clasificada visualmente por numerosos voluntarios, y para cada pregunta del árbol de decisión morfológico, se registraron múltiples parámetros asociados a las respuestas posibles. Estos parámetros incluyen: numero total de votos recibidos por cada respuesta, fracción de votos, votos ponderados (donde los votos de usuarios

con mejor historial de clasificación tienen mayor peso), etc. Para este trabajo, se utilizaron específicamente las columnas que contienen las fracciones de votos por respuesta para cada pregunta del árbol, ya que estas reflejan de manera directa el consenso de los clasificadores sobre la morfología de cada galaxia.

A diferencia de los datos utilizados de DECaLS, estas clasificaciones no pasaron por un algoritmo de aprendizaje, sino que son catálogos obtenidos directamente de la ponderación de votos de los voluntarios. Contiene además ascensión recta y declinación y una columna que resume la morfología que más votos tuvo una galaxia.

2.3. Muestra de AGNs

Para la muestra de AGN, se utilizaron los datos espectroscópicos del catálogo de galaxias AGN de Coldwell et al. (2017). Si bien en dicho trabajo se presentan únicamente los AGNs clasificados como LINERS, fue posible acceder al catálogo completo -que incluye otros tipos como Seyferts y compuestos- gracias a una colaboración directa con los autores. Esto permitió contar con una muestra más diversa y representativa de las distintas clases de AGNs. A continuación se describe como fue su construcción.

Coldwell et al. (2017) utilizó datos de SDSS Data Release 7 (SDSS-DR7; Abazajian et al., 2009), partiendo originalmente de una muestra de aproximadamente 700.000 objetos, definida por un límite de magnitud de Petrosian de $r < 17,7$. La mayoría de las galaxias de esta muestra se encontraban en un rango de corrimiento al rojo $0 < z < 0,25$ (Strauss et al. 2002).

Las galaxias con núcleos activos fueron seleccionadas a partir de medidas públicas de

flujos de líneas de emisión. La metodología utilizada para obtener estas medidas se describe en detalle en Tremonti et al. (2004). Los flujos de líneas de emisión fueron corregidos por enrojecimiento utilizando el decremento de Balmer y la curva de atenuación de Calzetti et al. (2000). La relación señal/ruido de cada línea fue recalculada considerando errores ajustados, basados en las estimaciones de incertidumbre proporcionadas por el catálogo MPA/JHU⁵.

Los objetos fueron clasificados utilizando un diagrama de diagnóstico estándar propuesto por Baldwin et al. (1981) (Baldwin, Philips & Terlevich, BPT desde ahora). Este diagrama permite separar los diferentes tipos de AGN de la formación estelar. Para esto se utilizan relaciones de líneas de emisión específicas y cuidadosamente elegidas, las cuales son sensibles a las condiciones físicas y químicas del gas ionizado pero que son casi independientes de la extinción por enrojecimiento. La respectiva posición de las galaxias en el diagrama permite inferir el mecanismo predominante de ionización. Dado que los AGN producen fotones mucho más energéticos que las estrellas masivas, el diagrama BPT es una herramienta eficaz para identificar galaxias con núcleos activos.

En el eje x, se presenta el cociente el cual compara la línea de emisión del nitrógeno ionizado $[\text{NII}]\lambda 6583$ y la línea de emisión del hidrógeno en su transición $H\alpha$. En el eje y se compara el cociente entre la línea de emisión del oxígeno doblemente ionizado $[\text{OIII}]\lambda 5007$ y la línea de emisión del hidrógeno $H\beta$. Las líneas de emisión utilizadas en este diagrama, son sensibles a la metalicidad de las galaxias, por lo que resulta asequible estudiar su composición química y los procesos físicos que ocurren dentro de ella.

El diagrama presenta la línea propuesta por Kauffmann et al. (2003), diseñada para separar las galaxias dominadas por fuentes de ionización como los AGN, bajo esta curva, caen aquellas galaxias generalmente clasificadas como galaxias de formación estelar, mientras que sobre ella son aquellas clasificadas como AGN. También se incluye la propuesta de Kewley

⁵http://www.mpa-garching.mpg.de/SDSS/DR7/raw_data.html

et al. (2001), una línea basada en modelos de fotoionización y representa el límite superior para las galaxias donde la formación estelar es la *única* fuente de ionización, debido a que sobre esta curva, las galaxias cuentan con un exceso de ionización que no puede ser explicado por la presencia de estrellas calientes y jóvenes.

Entre la línea de Kauffmann y Kewley, existe una región denominada “compuesta” en la cual se cree que las galaxias pueden tener contribuciones mixtas de formación estelar y actividad AGN.

También se añadió una línea complementaria propuesta por Schawinski et al. (2007), la cual permite una mejor distinción entre los tipos de AGN: Seyferts y LINERS. Los AGN tipo Seyfert se encuentran en la región superior derecha del diagrama, caracterizados por un cociente alto de $[OIII]/H\beta$, lo que indica una fuerte ionización asociada a núcleo activo. Por otra parte los tipo LINER se encuentran por debajo de la línea, se distinguen por valores más altos de $[NII]\lambda 6583/H\alpha$ pero menores que los de las galaxias Seyferts en lo que respecta a $[OIII]/H\beta$, presentando una ionización más débil o diferente al caso de los Seyferts.

Las propiedades de las galaxias anfitrionas de AGN, fueron calculadas a partir tanto de datos fotométricos como espectroscópicos, las cuales nos permiten entender su estructura, composición y evolución. La metodología utilizada por Coldwell et al. (2017) para la derivación de las propiedades de las galaxias se basan en las descripciones de Kauffmann et al. (2003), Salim et al. (2007) y Blanton et al. (2005). Estos datos están disponibles en MPA/JHU⁶ y NYU⁷, los cuales incluyen flujos de líneas de emisión, masas estelares, índices de SFR (tasa de formación estelar) y el parámetro $D_n(4000)$ utilizado como indicador de edad para poblaciones estelares (Balogh et al., 1999; Kauffmann et al., 2003).

⁶<http://www.mpa-garching.mpg.de/SDSS/DR7/>

⁷<http://sdss.physics.nyu.edu/vagc/>

Para seleccionar nuestra muestra de AGNs, se utilizó el catálogo de Coldwell et al. (2017), considerando aquellas galaxias ubicadas por encima de la curva de Kauffmann et al. (2003). Esto incluye galaxias clasificadas como AGN compuesto, Seyferts y LINERS, los cuales se muestran en color morado oscuro en el panel izquierdo de la Fig. 2.4. Se aplicó un corte en el desplazamiento al rojo ($z < 0.1$, Fig. 2.4, panel derecho) y la clasificación de cada núcleo activo se determinó siguiendo los criterios espectroscópicos previamente descritos. Finalmente para este trabajo, se obtiene una muestra de 44.747 galaxias con núcleo activo.

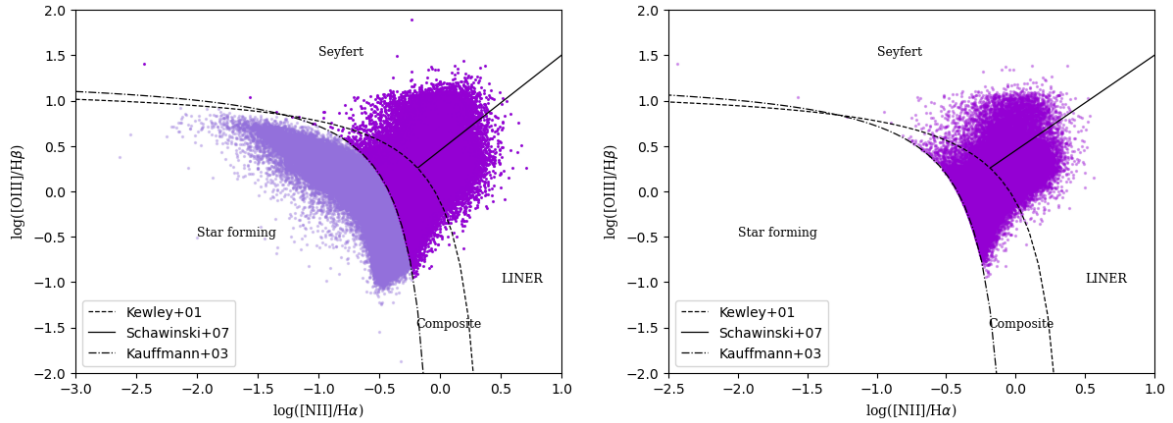


Figura 2.4: Catálogo de objetos de SDSS. Objetos destacados en el panel izquierdo son aquellos clasificados como núcleo activo con líneas divisorias correspondientes a Kewley et al. (2001), Schawinski et al. (2007) y Kauffmann et al. (2003). En el panel de la derecha se muestran las galaxias AGN seleccionadas una vez aplicado el filtro por redshift.

2.4. Construcción de la muestra de galaxias barradas

El catálogo del GZ DECaLS contiene 313.789 galaxias y contempla las clasificaciones morfológicas obtenidas mediante modelos de deep learning entrenados a partir de las respuestas proporcionadas por voluntarios del proyecto. Cada objeto tiene asignada una probabilidad para cada alternativa disponible dentro del árbol de decisión, estas decisiones no

son binarias, sino continuas entre 0 y 1. Las probabilidades reflejan el consenso obtenido para cada pregunta del árbol de decisiones, lo que permite establecer umbrales de confianza ajustables para la selección de la muestra según el objetivo del estudio. El esquema jerárquico empleado es consistente con versiones previas del proyecto y permite evaluar distintos aspectos morfológicos fundamentales. El catálogo incluye columnas específicas para cada una de las etapas del árbol de decisión. En este trabajo, se siguió estrictamente la estructura de dicho árbol (ver Fig. 2.2 para mayor claridad), aplicando una secuencia ordenada de filtros basada en probabilidades asociadas a cada respuesta, con el fin de seleccionar de manera robusta las galaxias de interés.

En primer lugar, se seleccionaron galaxias clasificadas como *featured or disk*, es decir, objetos que presentan morfología no elíptica y con rasgos estructurales discernibles. En segundo lugar, se descartaron las galaxias vistas de canto mediante un umbral sobre la columna $p_{disk-edge-on-no}$. Esto para retener solo aquellas clasificadas como *face-on*, dado que esta orientación favorece la identificación visual de estructuras internas como barras o brazos. Posteriormente, se exigió la presencia de una barra y el patrón espiral (p_{bar} y $p_{has-spiral-arms}$).

Para cada uno de estos tres criterios -tipo morfológico, orientación y presencia de estructuras- se adoptó un umbral de probabilidad mínima de 0.7, con el fin de asegurar que la muestra resultante este compuesta por galaxias cuya morfología se encuentre bien determinada, al tiempo que se conserva un tamaño de muestra suficiente para permitir un análisis estadístico robusto.



Figura 2.5: Ejemplos galaxias barradas clasificadas por Galaxy Zoo DECaLS.

Es importante destacar que, si bien el catálogo de Galaxy Zoo DECaLS distingue entre barras fuertes ($p_{bar-strong}$) y débiles ($p_{bar-weak}$), esta clasificación no fue aplicada en la etapa inicial de selección, sino que se incorporó en una fase posterior del análisis (ver sección 3.3).

La aplicación de las características antes aludidas redujo la muestra a un total de 5.636 galaxias espirales, barradas, de frente y cercanas. La Fig. 2.5 muestra ejemplos de algunas de galaxias barradas seleccionadas.

Una vez obtenida la muestra base de galaxias espirales barradas a partir del catálogo Galaxy Zoo DECaLS, se procedió a identificar cuáles de ellas albergaban un núcleo activo. Para ello se realizó un *crossmatch* de posiciones con el catálogo de AGNs descrito en la sección anterior, el cual contiene coordenadas precisas de núcleos activos identificados mediante criterios espectroscópicos. El *crossmatch* se llevó a cabo utilizando las coordenadas ecuatoriales (ascensión recta RA y declinación DEC) de cada objeto, aplicando un radio de búsqueda adecuado para evitar emparejamientos incorrectos debido a la resolución angular de los datos.

El objetivo de este procedimiento fue determinar que galaxias espirales barradas seleccionadas anteriormente coincide posicionalmente con una fuente clasificada como AGN, y por

lo tanto puede considerarse como hospedando un núcleo activo. El resultado: una muestra de aproximadamente 1.900 galaxias barradas anfitrionas de AGN.

2.5. Construcción de la muestra de pares

Las interacciones, son fenómenos claves en la evolución de las galaxias, ya que pueden alterar sus propiedades estructurales, cinemáticas y nucleares. Estudiar este proceso a través de pares de galaxias, permite identificar efectos atribuibles directamente a la interacción gravitacional. Con este objetivo, se construyó un catálogo ampliado de pares de galaxias a partir de la combinación de datos provenientes de los dos relevamientos principales: SDSS y DECaLS. La muestra proveniente del SDSS, corresponde a pares de galaxias previamente analizados los trabajos de Mesa et al. (2014) y Lambas et al. (2012). Ambos estudios emplearon datos espectroscópicos del SDSS DR7, con el objetivo de analizar, en el marco de sus respectivas investigaciones, el impacto de las interacciones galácticas sobre diferentes fenómenos físicos. Estos trabajos establecieron criterios claros de selección de pares físicos en base a la separación proyectada y a la diferencia de velocidades radiales, los cuales fueron adoptados y extendidos en este proyecto para garantizar la consistencia y profundidad del análisis.

En cuanto a la utilización de DECaLS, se construyó una muestra de pares basada en el catálogo morfológico de Galaxy Zoo DECaLS utilizado en la sección anterior. Esta muestra se construyó en base a criterios cuantitativos (los mismos utilizados para las muestras de SDSS) que serán explicados más adelante. Si bien el proyecto Galaxy Zoo DECaLS incluye una categoría de “fusiones” (*mergers*), esta clasificación presenta un alto nivel de subjetividad y variabilidad, por lo que fue descartada en favor de una metodología objetiva y reproducible. Esta combinación de surveys permitió extender el análisis a ambos hemisferios

celestes, maximizando la cobertura del cielo y la diversidad morfológica de la muestra.

La identificación de pares se basó en dos criterios físicos ampliamente aceptados en la literatura: una distancia proyectada entre galaxias (r_p) menor a 100kpc/h y una diferencia de velocidades radiales relativas (ΔV) menor a 350km/s. Estos umbrales se apoyan en estudios como Patton et al. (2000); Lambas et al. (2003) y Alonso et al. (2007), quienes demostraron que estos cortes permiten identificar pares con efectos físicos medibles sin introducir una fracción significativa de pares falsos, es decir, pares aparentes sin asociación tridimensional genuina. La distancia proyectada se estimó a partir de las posiciones (RA, DEC), mientras que ΔV se obtuvo directamente con el redshift espectroscópico de los catálogos.



Figura 2.6: Ejemplos de pares de galaxias.

A fin de garantizar la integridad del conjunto de datos y evitar duplicaciones que pudieran afectar las estadísticas, se aplicó una depuración rigurosa sobre los catálogos combinados. Se eliminaron registros repetidos de galaxias, así como duplicaciones de pares, por ejemplo, pares listados con el orden de galaxias invertido. También se revisaron los casos donde una misma galaxia participaba en más de un par, conservando únicamente las asociaciones pertinentes para el análisis.

Cabe destacar que no se impusieron restricciones morfológicas al momento de seleccionar

pares, lo cual permitió mantener una muestra estructuralmente diversa. Esta estrategia condujo a la construcción de un conjunto de datos robusto y representativo, adecuado para investigar de forma sistemática las propiedades de galaxias en pares.

Con la muestra de pares adecuada, se procedió a identificar qué galaxias dentro de los pares seleccionados presentan actividad nuclear. Para ello se realizó nuevamente un crossmatch entre las coordenadas de cada miembro del par y el catálogo de AGNs descrito en la sección 2.3. Este procedimiento replica la estrategia aplicada anteriormente en la identificación de AGNs dentro de la muestra de barradas (ver sección anterior), asegurando así consistencia metodológica a lo largo del estudio. Tras este proceso, el conjunto de datos compuesto por los pares extraídos de Mesa et al. (2014) y Lambas et al. (2012), junto con los pares identificados en Galaxy Zoo DECaLS, se obtuvo una muestra de 3168 pares en donde al menos uno de los miembros tuviese un AGN. En la Fig. 2.6 se pueden apreciar ejemplos de pares de galaxias con distintas morfologías y distintas distancias proyectadas.

El emparejamiento se ejecutó de manera secuencial, comenzando por una de las galaxias del par (denominada como galaxia 1) y posteriormente sobre la segunda (galaxia 2), registrando en cada caso si existía una coincidencia con el catálogo de AGNs. Este enfoque permitió determinar si el par contiene ningún AGN, un único AGN o un AGN doble, en donde ambas galaxias están clasificadas como activas. El análisis fue aplicado de forma uniforme a la totalidad de la muestra de pares, tanto a aquellos provenientes del SDSS como los contruidos a partir de DECaLS.

2.6. Muestras de control

Con el propósito de evaluar de manera confiable el impacto de distintos factores sobre la actividad nuclear, se construyeron dos muestras de control diseñadas específicamente para

cada caso de estudio. Para el análisis del efecto de la barra, se seleccionó una muestra de galaxias espirales no barradas que comparten el mismo proceso de selección que las espirales barradas, asegurando así una comparación adecuada. Por otro lado, para estudiar el efecto de las interacciones, se construyó una muestra de control compuesta por galaxias aisladas, seleccionadas a partir del catálogo de AGNs. En este caso, se incluyeron únicamente aquellas galaxias que no estuviesen asociadas a ningún par previamente identificado, lo que garantiza que no estén sujetas a efectos gravitacionales o procesos de interacción con una compañera. La inclusión de muestras de control permite aislar el efecto de la propiedad que se desea analizar, así reducir posibles sesgos asociados a otros factores. En este contexto, una muestra de control representa un conjunto de galaxias que no poseen la característica de estudio, pero que son comparables en términos de sus propiedades físicas y de selección, como se explicará a continuación. Esto posibilita establecer un punto de referencia claro y cuantitativo frente al cual evaluar la influencia ya sea de la barra o de las interacciones. Además, es recomendable que las muestras de control tengan un número mayor de objetos que las muestras con la propiedad en estudio, ya que esto reduce la incertidumbre estadística al momento de construir distribuciones de comparación y mejora la robustez de los análisis. Una muestra de control suficientemente numerosa, permite explorar subpoblaciones específicas, sin perder significancia estadística, lo cual sería más difícil si ambas muestras fueran del mismo tamaño o si la muestra de control fuera menor. Sin un grupo de control adecuadamente construido, cualquier correlación observada podría estar contaminada por diferencias subyacentes no relacionadas directamente con el fenómeno estudiado, comprometiendo así la validez de la conclusión.

2.6.1. Galaxias AGN no-barradas

En el caso de las galaxias no barradas, la selección se realizó aplicando la misma metodología de las galaxias barradas, y a partir del mismo catálogo base. En primer lugar, se filtraron aquellas clasificadas como *featured*, luego se aplicó el criterio de orientación *face-on* y se exigió la presencia de un patrón espiral. Finalmente se utilizó la columna que indica la probabilidad de no presentar una barra ($p_{bar-no-fraction}$) bajo el mismo umbral de 0.7. Aplicando todos estos criterios de manera secuencial, se obtuvo una muestra de 5.959 galaxias no-barradas que cumplían las condiciones para ser utilizadas como muestra de control, tal como se muestran en la Fig. 2.7.

De manera análoga al procedimiento aplicado a la muestra de galaxias barradas, estas galaxias no-barradas fueron entrecruzadas con el catálogo de AGNs, con el objetivo de construir una muestra de control comparable de galaxias no barradas que alberguen un núcleo activo. Sin embargo, el número de coincidencias obtenidas a partir de este crossmatch resultó significativamente menor que el de la muestra de AGNs barrados. Como se mencionó anteriormente, para garantizar un análisis estadístico robusto, la muestra de control debe ser más numerosa que la muestra principal. Por esta razón, fue necesario complementar la muestra con datos adicionales provenientes del catálogo de Galaxy Zoo 2.



Figura 2.7: Ejemplos galaxias no-barradas clasificadas por Galaxy Zoo DECaLS

El catálogo principal de redshifts espectroscópicos de GZ2, derivado del SDSS DR7, contiene 243.500 galaxias con clasificaciones morfológicas obtenidas mediante inspección visual por voluntarios. Para extraer una muestra adecuada de galaxias no barradas a partir de este catálogo, se siguieron criterios análogos a los aplicados al catálogo de Galaxy Zoo DECaLS, dado que ambos proyectos comparten una estructura de clasificación basada en un árbol de decisión jerárquico similar. Nuevamente se utilizaron las columnas que contenían la *fracción* de votos para cada pregunta del árbol. Se aplicó el umbral de probabilidad de 0.7 sobre la fracción de *featured*, *face-on*, ausencia de barra y presencia de estructura espiral, obteniendo así una muestra preliminar de aproximadamente 16.000 galaxias no barradas.

Es importante destacar que, a diferencia de GZ DECaLS, el catálogo de GZ2 no incorpora ningún proceso de clasificación automática mediante redes neuronales o algoritmos de machine learning. Por lo tanto, todas las clasificaciones se basan exclusivamente en la inspección visual de los voluntarios, lo que hace necesario considerar cuidadosamente los sesgos humanos asociados y la posible variación en la profundidad y calidad de imagen. Dado que las imágenes de SDSS utilizadas en GZ2 poseen una menor profundidad y resolución que la de DECaLS, fue necesario un tratamiento adicional para asegurar la coherencia morfológica entre catálogos.

Una vez construida la muestra preliminar de galaxias no barradas a partir de GZ2, se combinaron con aquellas obtenidas a partir de GZ DECaLS con el objetivo de ampliar el tamaño total de la muestra de control de galaxias no barradas que alojan un núcleo activo. Esto dio un resultado de aproximadamente 17.000 galaxias, de las cuales al realizar el entrecruzamiento con AGNs, se redujo a una muestra de 2.000 AGNs no-barrados.

Posteriormente se realizó una depuración exhaustiva para evitar la duplicación de objetos, ya que algunas galaxias podrían estar presentes en ambos catálogos. Esta revisión, que permitió identificar casos de superposición, también permitió hallar clasificaciones inconsistentes

entre GZ2 y GZ DECaLS. Las galaxias con clasificaciones discordantes (aproximadamente 50 casos) -por ejemplo barradas en DECaLS pero no barradas en GZ2, como se muestra en la Fig. 2.8- fueron inspeccionadas visualmente de forma individual, y reclasificadas cuando fue necesario. Este proceso aseguró la homogeneidad y precisión morfológica de la muestra final, lo cual es esencial para realizar comparaciones robustas con las galaxias barradas con AGN.



Figura 2.8: Ejemplo de galaxia barrada clasificada erróneamente como no-barrada por Galaxy Zoo 2. En el panel de la derecha se observa la galaxia sacada de *Legacy Surveys DR9 images*, en el panel de la izquierda para mostrar con mayor claridad la barra se muestra la misma galaxia a partir de *Legacy Surveys DR9 residuals*

2.6.2. Galaxias AGN Aisladas

Para construir una muestra de control adecuada para el análisis de pares, se seleccionaron galaxias aisladas, entendidas como aquellas que no presentan compañeras cercanas dentro del rango espacial relevante para inducir interacciones gravitacionales. Para esto, se tomó el catálogo de AGNs usado anteriormente proveniente de SDSS DR7. Con el fin de asegurar que las galaxias seleccionadas no formen parte de ningún sistema binario o múltiple, se impuso un criterio de aislamiento basado en la distancia proyectada, se descartaron todas aquellas galaxias del catálogo de AGNs que tuvieran una compañera identificada a una

distancia proyectada menor a 100kpc/h .



Figura 2.9: Ejemplos de galaxias aisladas. En el centro se puede apreciar la galaxia seleccionada, todo objeto que se vea en sus alrededores: no es una galaxia, o es un efecto de proyección o esta más allá del umbral de 100kpc/h

Esta condición fue aplicada tomando en cuenta las galaxias compañeras identificadas en los catálogos de Mesa et al. (2014); Lambas et al. (2012) y GZ DECaLS, garantizando que las seleccionadas para la muestra de control no estén bajo la influencia de perturbaciones externas significativas y libres de activación nuclear asociados a procesos de interacción gravitacional. Esto permitió establecer una base comparativa robusta frente a las galaxias en pares. La coherencia entre los catálogos utilizados -con el catálogo de AGNs y pares proviniendo ambos del SDSS DR7, sumado con el catálogo de DECaLS- refuerza la validez estadística de la muestra construida.

Es importante señalar que, en esta selección, no se aplicaron filtros adicionales por morfología ni por otras propiedades como orientación, ya que el objetivo principal de esta muestra es servir como grupo de referencia general para evaluar el impacto de las interacciones galácticas en la presencia de núcleos activos. Finalmente se obtuvo una muestra de galaxias aisladas con AGN de aproximadamente 30.000 objetos. En la Fig. 2.9 se observan imágenes de galaxias aisladas, en cada panel se ve un objeto brillante justo en el centro, esa

es la galaxia aislada que cumple con los criterios. Todo objeto que se pueda ver alrededor, no forma parte de la vecindad de la galaxia.

2.6.3. Ajuste de muestras

Una vez construidas las muestras preliminares de control para el análisis tanto de galaxias barradas como de galaxias en pares, se procedió a refinar dichas muestras mediante un proceso de emparejamiento más riguroso. Para ello se desarrolló un algoritmo en Python específicamente diseñado para seleccionar subconjuntos de galaxias con características físicas y estructurales comparables, asegurando así la validez estadística de las comparaciones. El código toma como entrada distribuciones de redshift, masa estelar, magnitud en la banda r , índice de concentración y parámetro de densidad local tanto de la muestra principal (galaxias barradas o pares de galaxias) como de las muestras que cumplen las condiciones para ser muestras de control. Luego realiza una selección de objetos de la muestra más grande de manera que su distribución conjunta en estas cinco variables reproduzca a la primera muestra. Para ello, se construyen histogramas bidimensionales en bins de todas las variables mencionadas, se calcula la fracción relativa de objetos en cada bin para la muestra de referencia. Finalmente se selecciona aleatoriamente un subconjunto de objetos de la segunda muestra que respete estas proporciones.

La decisión de igualar las distribuciones en redshift, masa estelar, magnitud en la banda r , índice de concentración y parámetro de densidad local, responde a la necesidad de controlar las principales variables que pueden influir de forma directa o indirecta en la actividad nuclear. Si no se controla por estas variables, cualquier diferencia observada en la fracción de AGNs entre galaxias barradas y no barradas, o entre galaxias en interacción y aisladas,

podrían atribuirse erróneamente a la propiedad estudiada, cuando en realidad reflejaría un sesgo en alguna de estas características subyacentes.

Perez et al. (2009) basados en galaxias simuladas en *Millennium Simulation*, demostraron que una muestra de control apropiada para pares de galaxias, debe ser similar al menos en el redshift, masa estelar y el parámetro de densidad local. Estos criterios también son aplicables al construir muestras de control de galaxias barradas. Además en este trabajo se amplió la comparación al incluir dos parámetros más, magnitud absoluta y el índice de concentración.

La similitud en redshift asegura que ambas poblaciones de galaxias estén en un rango similar de distancias, lo que evita sesgos relacionados con efectos observacionales o de evolución cosmológica. De igual manera, la masa estelar es un factor clave en la evolución de las galaxias, comparar galaxias con distintas distribuciones de masa implicaría comprar sistemas intrínsecamente distintos, por lo que mantenerla comparable en ambas muestras permite asociar diferencias a la presencia de una barra o a una compañera y no a diferencias en la escala de masa. La magnitud en la banda r , está correlacionada con el brillo y por tanto con la masa estelar de las galaxias. Puede afectar la visibilidad de las barras y el contraste morfológico, asegurar que ambas muestras tengan magnitudes comparables permite que las condiciones observacionales sean equivalentes.

Por su parte, el índice de concentración funciona como un trazador estructural de la morfología global de la galaxia. Se define como la razón entre los radios que contienen el 90 % y el 50 % de la luz, $C = R_{90}/R_{50}$. Valores altos de este índice se asocian a galaxias de tipo temprano, con bulbos prominentes, mientras que valores bajos son más comunes en galaxias de tipo tardío y discos dominantes. Esta relación se ha utilizado ampliamente para clasificar morfologías de manera cuantitativa en estudios estadísticos (Strateva et al., 2001; Shimasaku et al., 2001). Dado que existe la posibilidad de que la actividad nuclear varíe con el tipo morfológico de la galaxia, mantener distribuciones similares en el índice de

concentración es esencial para una comparación válida.

Finalmente, el parámetro de densidad local Σ_5 captura el grado de aislamiento o agrupamiento de una galaxia en su entorno inmediato y es especialmente relevante cuando se estudia la influencia de procesos externos como interacciones. Este parámetro se define mediante la distancia proyectada al quinto vecino más cercano ($\Sigma_5 = 5/(\pi r_p^2)$) con luminosidades más brillantes que $M_r < -20,5$ (Balogh et al., 2004) y una diferencia radial menor que 1000km/s. Si la muestra de galaxias barradas o en pares se encuentra en ambientes sistemáticamente más densos o más aislados que su muestra de control, cualquier diferencia atribuida a la propiedad estudiada podría, en realidad, estar reflejando diferencias ambientales.

Al controlar estos cinco parámetros, se garantiza una comparación equitativa entre muestras, lo que permite atribuir con mayor certeza cualquier diferencia observada en la actividad nuclear a la presencia de una barra o a la interacción galáctica, y no a otras propiedades intrínsecas o ambientales que podrían sesgar la interpretación de los resultados.

Para validar que las distribuciones en redshift, masa estelar, magnitud, parámetro de densidad local e índice de concentración sean efectivamente comparables entre las muestras de AGNs barrados y de control y AGNs en pares y aisladas, se utiliza el test de Kolmogorov Smirnov KS-test, (Jr., 1951). Este es un tipo de prueba estadística no paramétrica que permite comparar distribuciones acumuladas de dos muestras y cuantificar la probabilidad de que ambas provengan de una misma distribución subyacente. Al aplicar el KS test, se evalúa la hipótesis nula de que las dos muestras no presentan diferencias significativas, es decir, obtenemos un valor p, el cual representa una probabilidad de obtener un resultado tan extremo como el observado, bajo la hipótesis nula de que las dos muestras provengan de la misma distribución continua. Para todos los parámetros en los que se aplicó la prueba,

se logró un valor $p > 0.05$ tanto para el análisis de barras como el de pares, lo que indica que las muestras podrían provenir de la misma distribución. La aplicación de este test se realizó a través de Python utilizando la función *ks_2samp* de la biblioteca Scipy, la cual nos entrega directamente la diferencia máxima entre las distribuciones y el valor p que indica la significancia estadística de la comparación.

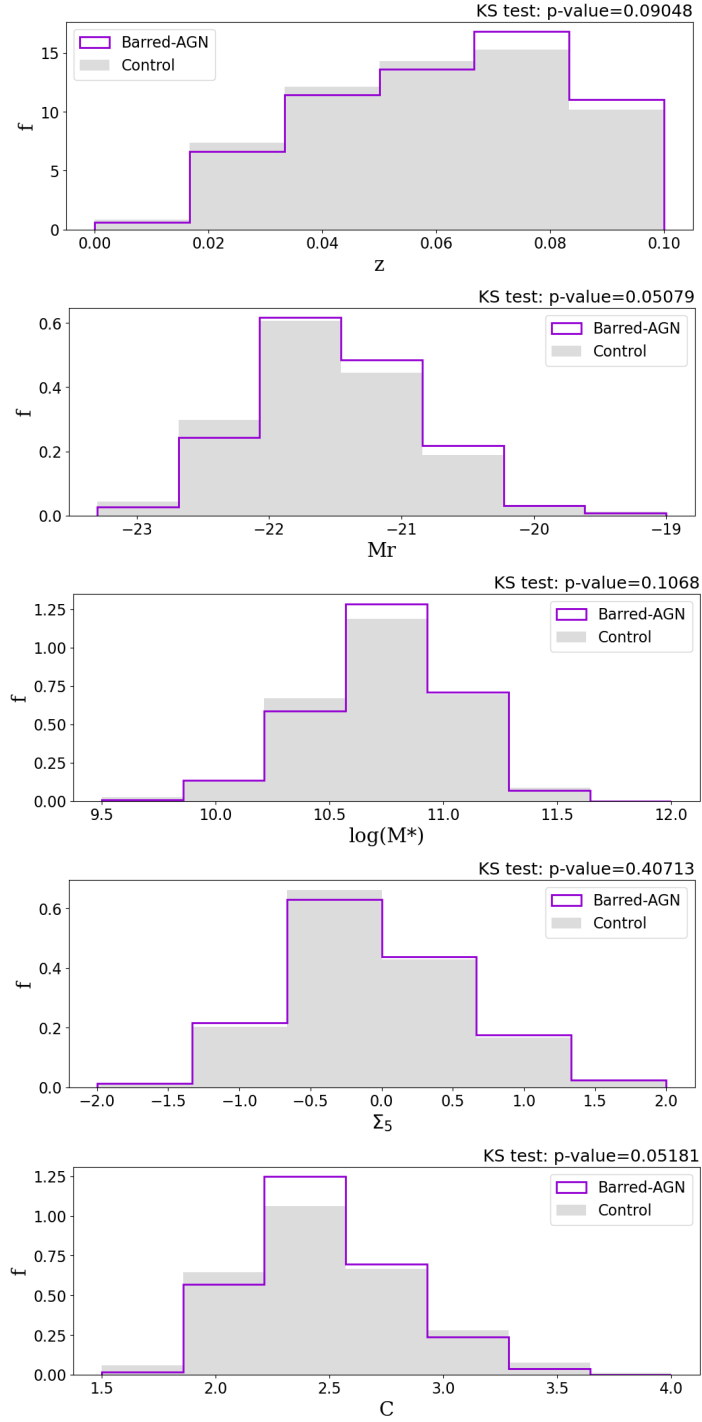


Figura 2.10: Distribuciones normalizadas de redshift, z , magnitud absoluta M_r en la banda r , masa estelar, $\log(M^*)$, parámetro de densidad local e índice de concentración. Para galaxias barradas y no barradas. Se presentan los valores p del KS test.

La Fig. 2.10 muestra las distribuciones ya ajustadas para todas las variables a las que fue sometida la muestra de control de galaxias no barradas. Una vez realizado todo este proceso, se obtuvo una muestra final de 1330 galaxias barradas con núcleo activo y una muestra de control de 1651 galaxias no-barradas con núcleo activo. Esto se resume en la Tabla 2.1.

Muestra	Criterio	Número
AGN-barrados	AGN en espirales barradas	1330
Muestra de control	AGN en espirales no-barradas	1651

Tabla 2.1: Catálogos obtenidos para el análisis de las barras en la actividad nuclear.

La Fig. 2.11 muestra las distribuciones de las galaxias en pares y su muestra de control con los cinco parámetros ajustados. Esto dió un total de 3048 pares que contienen al menos un AGN y 5613 galaxias AGN aisladas como muestra de control.

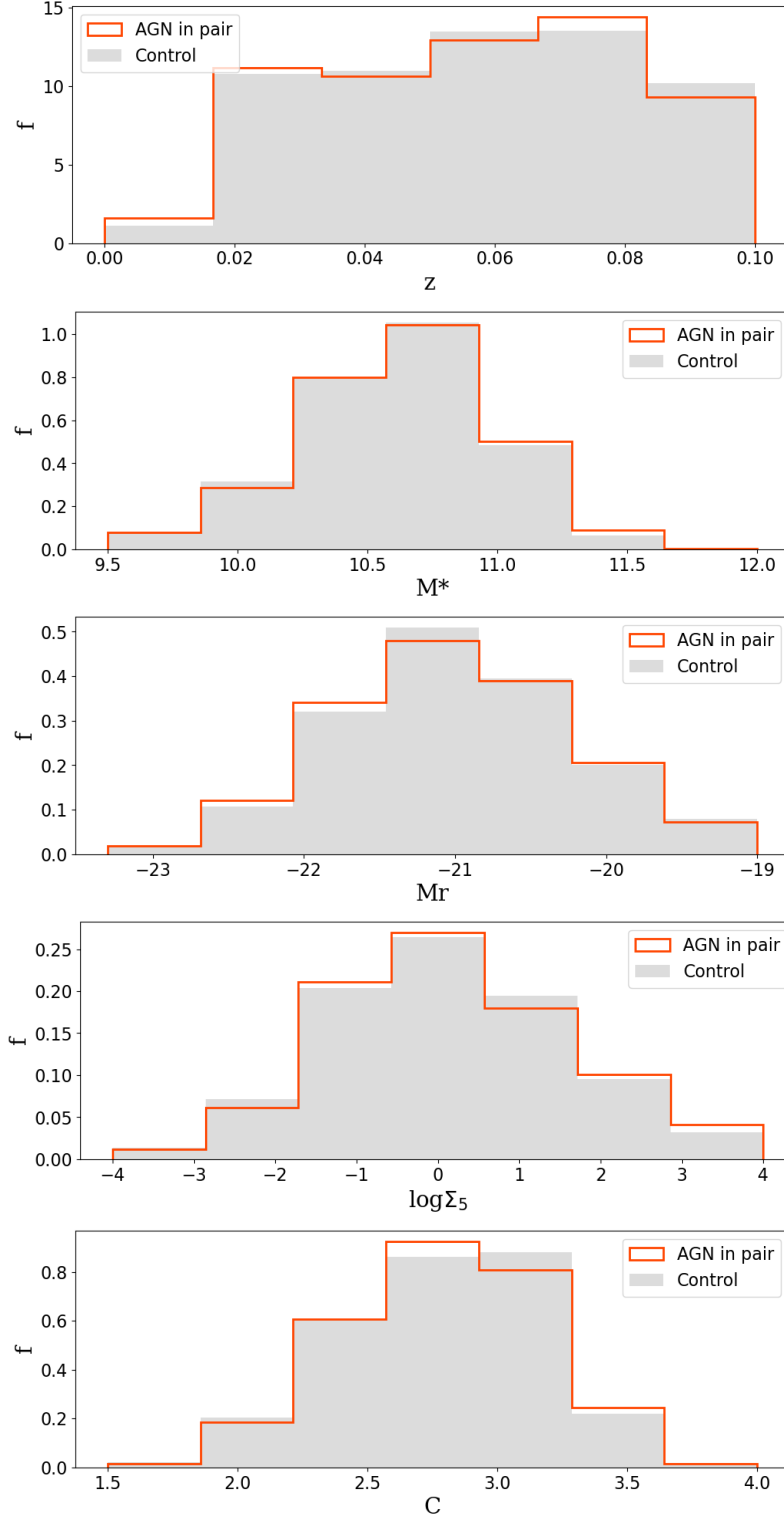


Figura 2.11: Distribución normalizada de redshift, masa estelar, magnitud absoluta en banda r , M_r , Σ_5 e índice de concentración C para pares de galaxias con AGN (línea sólida) y su respectiva muestra de control (superficie completa). Las galaxias de estas muestras no fueron clasificadas por morfología, solo se consideró la presencia de una compañera.

En el caso de las galaxias en pares, el catálogo final de 3048 pares se analizó con el fin de presentar sus características más importantes. Este catálogo cuenta con 1093 pares cercanos, es decir pares con una distancia proyectada menor a $25\text{kpc}/h$, este valor se considera como un umbral para diferenciar aquellos pares que estan interactuando con evidencias visibles de cambios morfológicos de aquellos que están menos perturbados. A esto se le dará especial relevancia y explicación más detallada en el capítulo 4. Además, dentro de este catálogo general, existen 230 pares AGN-AGN, es decir pares en donde ambas galaxias del sistema presentan un núcleo activo. Estos valores se resumen en la tabla 2.2

Muestra	Criterio	Número
Pares	Par con al menos un AGN	3048
Pares cercanos	Pares con $r_p < 25\text{kpc}/h$	1093
Pares AGN-AGN	Ambas galaxias del par tienen AGN	230
Muestra de control	Galaxias aisladas con AGN	5613

Tabla 2.2: Catálogos de pares y sus características y muestra de control obtenida para este trabajo.

Capítulo 3

El impacto de las barras

Los resultados descritos a continuación se encuentran resumidos en el artículo de Marels et al. (2025), en el que se presenta una versión concisa de este análisis.

3.1. Actividad nuclear: Luminosidad[OIII]

En esta sección se realizará un análisis comparativo sobre el impacto que puede tener la barra sobre la actividad nuclear en galaxias. Para esto el estudio se centrará principalmente en la luminosidad de la línea de [OIII] λ 5007, una línea de emisión prohibida que se origina en los átomos de oxígeno doblemente ionizados. Es considerada como un trazador de actividad nuclear AGN, ya que aparece intensificada debido a la alta energía de los fotones emitidos por el agujero negro. Es una de las líneas de emisión estrechas más potentes en este tipo de galaxias y su contaminación por la contribución de formación estelar es mínima, se sabe que es relativamente débil en galaxias ricas en metales que forman estrellas (Kauffmann et al., 2003) por lo que proporciona una medida confiable de la fuerza del núcleo activo. Su principal ventaja es la facilidad para ser detectada en la mayoría de las galaxias, sin embargo

puede verse afectada por el polvo dentro de la galaxia anfitriona.

La Fig. 3.1 muestra las distribuciones de $\text{Lum}[\text{OIII}]$ tanto para la muestra de galaxias barradas como la muestra de control. Se observa una tendencia de las AGN barradas a tener valores de actividad nuclear más altos en comparación a las galaxias no barradas, es decir muestran un exceso de $\text{Lum}[\text{OIII}]$ con respecto a la muestra de control.

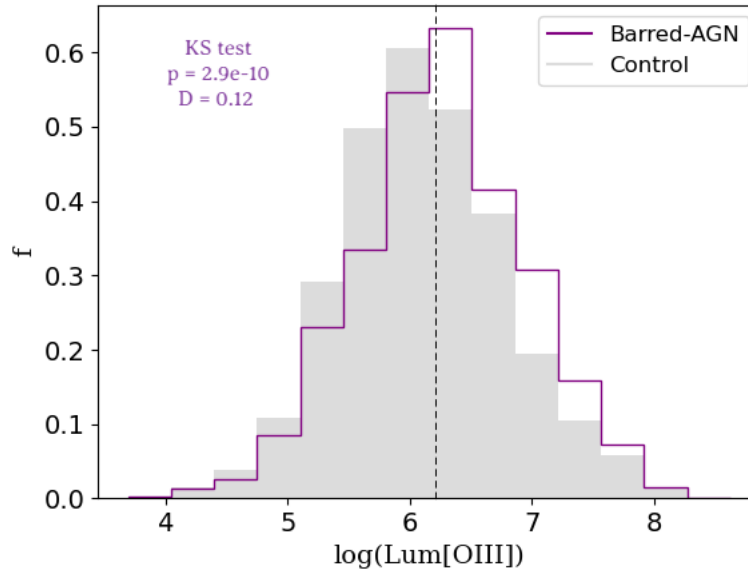


Figura 3.1: Distribución de $\log(\text{Lum}[\text{OIII}])$ para galaxias AGN con barra, (línea sólida) y galaxias AGN sin barra (superficie completa). La línea vertical representa la mediana de la muestra de galaxias barradas. Se presentan los valores del KS-test.

A partir de esta distribución, se consideró un valor de $\text{Lum}[\text{OIII}] = 10^{6.2} L_{\odot}$ para distinguir AGN poderosos ($\text{Lum}[\text{OIII}] > 6.2$) de los débiles, valor que coincide con la mediana de los datos. Kauffmann et al. (2003) además definió el valor $\text{Lum}[\text{OIII}] > 10^7$ para AGN extremadamente poderosos, el cual se muestra en los gráficos interiores de la Fig. 3.2. Las fracciones de AGNs poderosos con los valores aplicados para este trabajo y los valores

utilizados por Kauffmann et al. (2003) están presentados en la tabla 3.1.

Muestra	$Lum[OIII] > 10^{6.2} L_{\odot}$	$Lum[OIII] > 10^7 L_{\odot}$
% AGN-barrados	$53.4 \% \pm 1.3$	$15 \% \pm 0.9$
% CS	$42.3 \% \pm 1.2$	$10 \% \pm 0.7$

Tabla 3.1: Porcentajes de galaxias AGN con actividad nuclear alta y extremadamente alta para la muestra principal y la muestra de control.

En la tabla 3.1 se cuantifican los porcentajes de las galaxias que poseen un exceso de $Lum[OIII]$ y nuevamente se observa una tendencia al aumento en el numero de galaxias barradas con respecto a la muestra de control en ambas subdivisiones de luminosidad.

Para evaluar la influencia de las barras en la actividad nuclear de sus galaxias anfitrionas, se analizaron distintas propiedades intrínsecas de las galaxias en función de la fracción de AGNs poderosos.

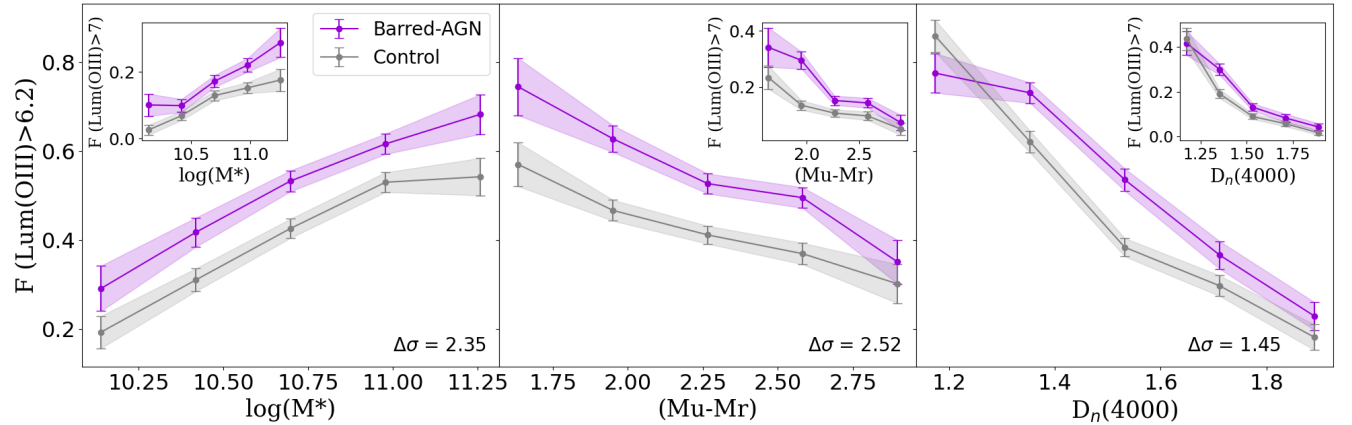


Figura 3.2: Fracción de $Lum[OIII] > 10^{6.2} L_{\odot}$ en función de la masa estelar, el color (Mu-Mr) y el parámetro $D_n(4000)$ (gráficos izquierdo, centro y derecho respectivamente). Los gráficos interiores muestran la fracción de $Lum[OIII] > 10^7 L_{\odot}$ en función de las mismas propiedades. Se presentan los valores de la diferencia de σ entre las muestras en cada uno de los gráficos.

En la Figura 3.2 se presenta la fracción de galaxias con $Lum[OIII] > 10^{6,2} L_{\odot}$ para AGN barrados y no-barrados en función de las propiedades de la galaxia anfitriona: masa estelar, color y el indicador de edad estelar $D_n(4000)$. El gráfico de la izquierda muestra la fracción de AGNs de alta luminosidad en función del contenido de masa estelar. Se observa que la fracción de AGNs poderosos aumenta para galaxias más masivas, lo que sugiere una dependencia entre la actividad nuclear y el contenido estelar del sistema. Además, se evidencia una tendencia a que las galaxias barradas presenten una fracción mayor de AGNs poderosos en comparación con aquellas las galaxias que no poseen una barra. Estos resultados son consistentes con los hallazgos de Alonso et al. (2018) y Oh et al. (2012), quienes demostraron que la potencia de un AGN se ve moderadamente aumentada en presencia de una barra independientemente de su contenido estelar. Sin embargo, este efecto se vuelve más pronunciado en galaxias más masivas, lo que sugiere que la combinación de una alta masa estelar y la presencia de una barra puede favorecer la ocurrencia de núcleos activos más energéticos.

En el gráfico central, se analiza la fracción $Lum[OIII] > 10^{6,2} L_{\odot}$ en función del color ($M_u - M_r$), se observa una tendencia moderada al incremento de la fracción de AGNs poderosos en ambas muestras a medida que las galaxias presentan colores más azules. Además, de manera consistente con el análisis basado en la masa estelar, las galaxias barradas exhiben una fracción más alta de AGNs de alta luminosidad en comparación con las galaxias no barradas, independientemente de su color. De manera similar Lee et al. (2012) encontró que las galaxias anfitrionas de núcleo activo en un cierto rango de color ($2,0 < (u - r) < 2,5$) tienen mayor actividad aquellas que tiene barra. A pesar de que se exhiben colores azules, generalmente las galaxias tienden a tener colores más rojos que las no-barradas (Combes and Sanders, 1981; Masters et al., 2010; Alonso et al., 2013; Geron et al., 2021; Sanders

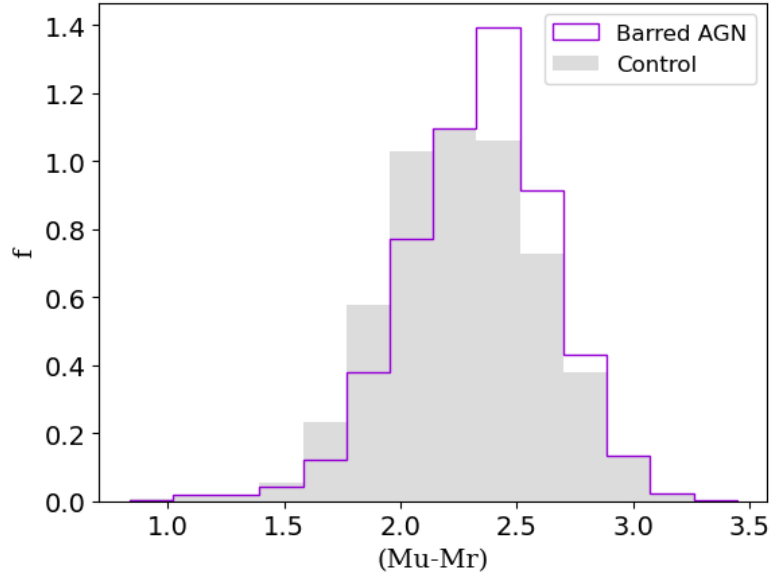


Figura 3.3: Distribución de color ($M_u - M_r$)

and Tubbs, 1980). En la muestra presentada en este trabajo aproximadamente el 57 % de las galaxias barradas están enrojecidas ($(u - r) > 2,3$), elevado en comparación al 45 % de colores rojos observados en galaxias sin barra (véase Figura 3.3).

El color de la galaxia, es una de sus propiedades intrínsecas más representativas, ya que es definido por las poblaciones estelares que posee la galaxia y se puede ver afectado por diversas situaciones. Neumann et al. (2019) explica que existen tres categorías de barras: las con formación estelar, sin formación estelar y una tercera categoría de formadoras de estrellas en las regiones centrales de la galaxia (Verley et al., 2007), esta última sería difícil de estudiar debido a la contaminación por el AGN.

Debido a la variedad de procesos físicos, resulta complejo analizar su dinámica de manera simultánea. Bajo este contexto, es importante analizar fenómenos como el feedback, el cual puede influir significativamente en la galaxia y su evolución. Es posible que el feedback

del AGN actúe como un mecanismo regulatorio dual, que dependiendo de las condiciones locales y temporales puede comprimir el gas circundante promoviendo episodios de formación estelar en etapas tempranas, o en caso contrario, calentar y suprimir el gas suprimiendo la formación de estrellas en escalas de tiempo más largas (Silk and Rees, 1998; Di Matteo et al., 2005; Fabian, 2012). En conjunto con las barras, el flujo de gas inducido por estas no solo intensifica la actividad nuclear, como lo sugieren los gráficos de la figura 3.2, sino que también amplifica el impacto de la retroalimentación del AGN. Es posible que la interacción entre la retroalimentación positiva del AGN y la compresión del gas generada por la barra, la cual precisamente alimenta al AGN, pueda prolongar la formación estelar principalmente en las regiones centrales. Sin embargo, para escalas de tiempo más largas, el feedback negativo, combinada con el agotamiento de gas central, puede contribuir a la transición de estas galaxias hacia colores más rojos, alineado con los procesos globales de evolución galáctica. Por el contrario, algunos estudios basados en simulaciones (Hopkins, 2012) sugieren que el impacto del feedback del AGN sobre el gas frío del núcleo en realidad es muy limitado, actuando sobre una cantidad muy pequeña de gas. Estas discrepancias reflejan la complejidad de los procesos dinámicos involucrados y subrayan la importancia de las barras como reguladores en la redistribución del gas hacia el núcleo.

En el panel de la derecha, se muestra el parámetro $D_n(4000)$. Este parámetro es una medida espectroscópica definida como la razón de flujo promedio entre dos bandas estrechas alrededor de la discontinuidad de Balmer a 4000 Angstroms (Dressler and Shectman, 1987) y tiene gran importancia al momento de estimar la edad de las poblaciones estelares en galaxias ya que el flujo cerca de esta banda se ve significativamente afectado por la presencia de estrellas ya sea jóvenes o viejas. El $D_n(4000)$ sigue una tendencia similar a la del color pero con una pendiente mucho más pronunciada. La fracción de AGNs poderosos disminuye a

medida que aumenta el parámetro $D_n(4000)$, es decir, disminuye para poblaciones estelares más viejas. Adicionalmente, las galaxias barradas muestran un leve aumento en la fracción de AGNs poderosos en comparación con la muestra de control. Estos resultados se asocian a que las galaxias con gran actividad nuclear desencadenan los episodios de formación estelar, lo cual está alineado con los hallazgos de Ellison et al. (2011) quien explica que las tasas de formación estelar central son mayores en galaxias barradas que en las no-barradas, en un rango de masa estelar similar al utilizado en este trabajo.

Como resumen, podemos decir que las galaxias con altos valores de actividad nuclear tienden a ser barradas, generalmente masivas, azules y con poblaciones estelares jóvenes. Además las diferencias entre las muestras de barradas y de control se ven respaldadas por la diferencia de los niveles de significancia, cuantificados con los valores $\Delta\sigma$ que se encuentran en cada panel de la Fig. 3.2. Estos indican cuántas desviaciones estándar separan las fracciones observadas en cada caso.

Con el propósito de corroborar la validez de las tendencias para cada una de las propiedades analizadas, se replicó el análisis utilizando un umbral de $Lum[OIII] > 10^7 L_\odot$. Este valor fue adoptado por Kauffmann et al. (2003) para identificar AGNs extremadamente poderosos. Los gráficos interiores de la figura 3.2 muestran la fracción de $Lum[OIII] > 10^7 L_\odot$. En todos los casos, los gráficos reproducen el mismo comportamiento observado previamente, lo que refuerza la solidez y estabilidad de los resultados obtenidos. De la misma manera, los resultados coinciden con Alonso et al. (2013), que explica que las galaxias con presencia de barra presenta una fracción mayor de AGNs poderosos con respecto a AGN no-barrados.

El error en los gráficos fue estimado a partir de la técnica estadística de remuestreo *Bootstrap* (Barrow et al., 1984), el cual estima la distribución de un estadístico (en este caso, desviación estándar) mediante el uso de muestras generadas aleatoriamente con reem-

plazos a partir de los datos originales. Esta técnica fue aplicada con 1000 iteraciones para este análisis.

3.2. Actividad nuclear: Tasa de acreción \mathcal{R}

La tasa de acreción \mathcal{R} es un estimador indirecto de la cantidad de material que esta siendo acumulado por un AGN (Heckman et al., 2004) dado por la ecuación 3.1:

$$R = \log\left(\frac{Lum[OIII]}{M_{BH}}\right) \quad (3.1)$$

Para este propósito se calculó la masa del agujero negro (M_{BH}) tanto para galaxias barradas como no barradas a través de la relación $M_{BH} - \sigma_*$ (Ferrarese and Merritt, 2000; Tremaine et al., 2002) donde σ_* es la velocidad de dispersión en el bulbo. Para más detalles, véase la sección 3.2.1.

Debido a que la luminosidad en la línea [OIII] a $\lambda 5007$ se emplea como trazador de la emisión en el rango óptico del AGN, su normalización por la masa del agujero negro permite caracterizar la eficiencia del proceso de acreción. Valores más altos de \mathcal{R} indican mayor eficiencia de acreción. Para evaluar el impacto de la presencia de una barra en la actividad del SMBH, se analizó este parámetro en galaxias barradas y en la muestra de control.

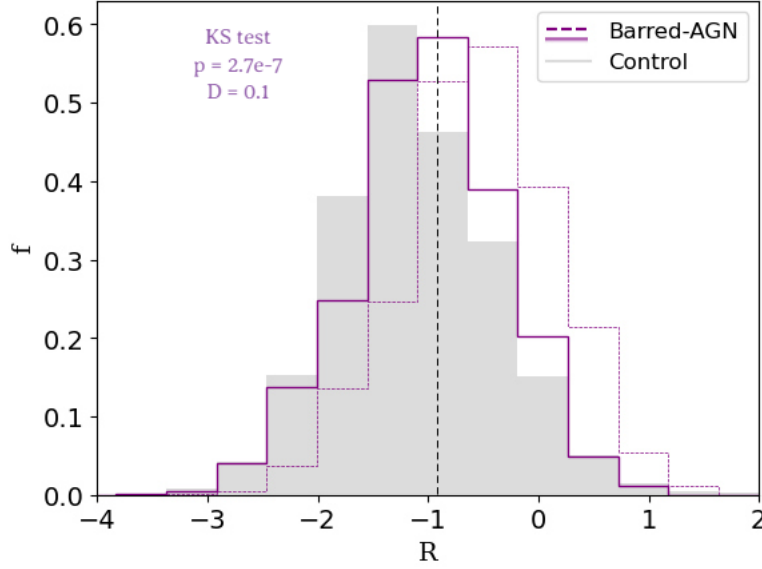


Figura 3.4: Distribución del parámetro de la tasa de acreción para ambas muestras. La línea sólida representa \mathcal{R} utilizando los mismo valores de α y β tanto para la muestra de barradas como no barradas. La línea discontinua representa \mathcal{R} teniendo en cuenta valores diferentes de α y β para la muestra de galaxias barradas. La línea vertical representa la mediana de la muestra de barradas. Se presentan los valores del KS-test.

Se representó la distribución de galaxias en función del parámetro \mathcal{R} (Fig. 3.4). Graham (2008) explica que la dispersión de velocidades puede verse afectada debido a la presencia de una barra, ya que esta altera el movimiento estelar en los alrededores del bulbo, de modo que la relación $M_{BH} - \sigma_*$ será diferente para las galaxias con y sin barra. Por esta razón en la fig. 3.4 se presentan dos distribuciones. La línea discontinua representa la distribución de la tasa de acreción utilizando los valores de α y β adecuados para galaxias barradas¹. Estos parámetros adoptados en Alonso et al. (2018) ilustran que empleando los valores específicos para galaxias barradas se obtiene una estimación mejorada de la tasa de acreción en comparación con los utilizados para galaxias no barradas. Sin embargo, para garantizar

¹ $\alpha = 7.67 \pm 0.115$; $\beta = 4.08 \pm 0.751$

una comparación coherente, se aplicaron los mismos valores² de α y β (Tremaine et al., 2002) tanto para las galaxias barradas (línea continua) como a las no barradas (superficie completa) durante el resto del análisis.

Aunque la diferencia entre las muestras es menos pronunciada que en la distribución de luminosidad de [OIII], se observa una tendencia moderada a que las galaxias barradas presenten valores de acreción más elevados en comparación con la muestra de control.

Para evaluar este comportamiento de manera más cuantitativa, se adoptó un umbral de $\mathcal{R} > -0.9$ como referencia para identificar un posible exceso en la tasa de acreción. Este valor fue seleccionado porque en este rango se evidencia la mayor discrepancia entre las distribuciones en ambas muestras.

Muestra	$\mathcal{R} > -0.9$
% AGN-barrados	45 % \pm 1.3
% CS	35 % \pm 1.2

Tabla 3.2: Porcentajes de galaxias AGN con exceso de tasa de acreción para la muestra de galaxias barradas y la muestra de control.

La tabla 3.2 muestra los porcentajes de galaxias con tasas de acreción elevadas. Se observa que la fracción de galaxias con un exceso en la tasa de acreción es mayor en el caso de las galaxias barradas en comparación con aquellas sin barra.

En la Fig. 3.5 se presenta la fracción de galaxias AGN barradas y no barradas con altas tasas de acreción en función de las propiedades de las galaxias: masa estelar, color ($M_u - M_r$) y el parámetro $D_n(4000)$, con el objetivo de verificar con mayor detalle la influencia de la barra en la actividad de los SMBH. Notamos tendencias similares a las observadas en la luminosidad en [OIII] tanto en color como en $D_n(4000)$ (paneles centro y derecho), es decir, las galaxias con mayor actividad nuclear tienden a ser galaxias azules con una

² $\alpha = 8,13 \pm 0,06; \beta = 4,02 \pm 0,32$

población estelar joven tanto para galaxias barradas como no barradas. Sin embargo, aunque se evidencia un exceso de tasa de acreción mayor para galaxias barradas que para las no barradas, el rango de diferencia es menor que en los gráficos en función de la luminosidad.

En el panel izquierdo, se muestra la variación de esta fracción en función de la masa estelar, evidenciando que la proporción de AGNs con $\mathcal{R} > -0.9$ disminuye a medida que la masa estelar aumenta, indicando que las galaxias con tasas de acreción elevadas tienden a ser galaxias menos masivas, en contraste con la tendencia observada en [OIII]. Nuevamente podemos decir que la fracción de galaxias con altas tasas de acreción es mayor para aquellas que presentan una barra.

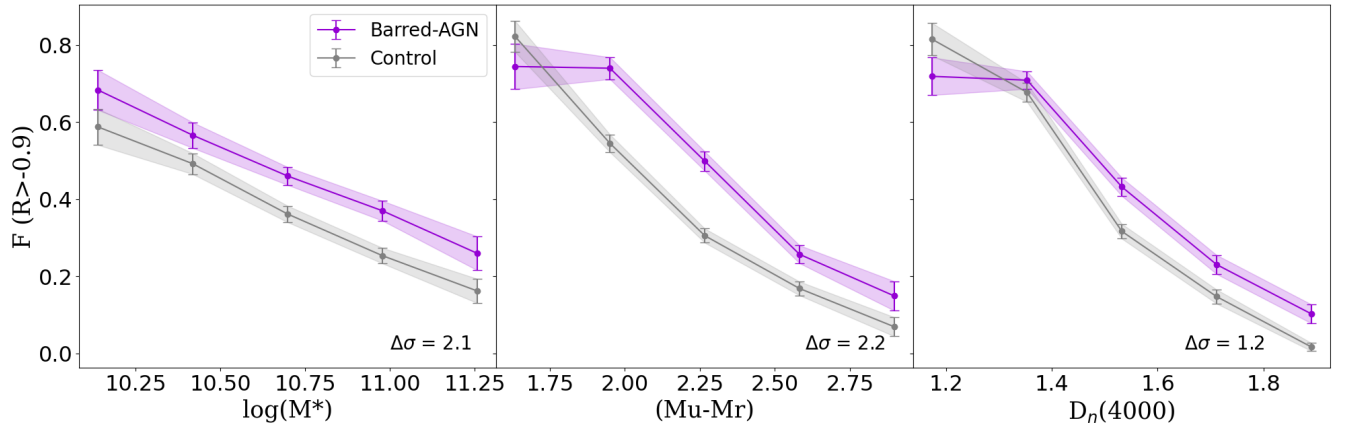


Figura 3.5: Fracción de $\mathcal{R} > -0.9$ en función de la masa estelar, color (Mu-Mr) y el parámetro $D_n(4000)$ (paneles izquierdo, central y derecho respectivamente) para galaxias barradas y no barradas. Se presentan los valores de las diferencias de σ entre las muestras en cada uno de los paneles.

Considerando estos resultados, debemos tomar en cuenta el impacto de la masa estelar en conjunto con la barra en la actividad nuclear en una galaxia. En general, se entiende que la barra no tiene mayor influencia en la masa estelar total de la galaxia, sino que su impacto se limita a la redistribución del gas que afecta la dinámica central (Athanasoula,

2003; Kormendy and Kennicutt, 2004; Erwin, 2018). En contradicción, las simulaciones muestran una mayor fracción de barras en galaxias menos masivas debido a inestabilidades del disco y distribución del halo de materia oscura (Athanasoula et al., 2013; Saha and Elmegreen, 2018). Para proporcionar una posible razón a esta tendencia, es que en realidad, la relación observada entre las barras y los diferentes rangos de masas no tiene una relación causal directa, sino que las propiedades estructurales y dinámicas de las galaxias modulan la influencia de la barra, es decir, el impacto relativo puede ser más o menos significativo debido a la diferencia de tamaños y escalas como menciona Aguerri et al. (2023). En galaxias menos masivas, las barras podrían tener un efecto dinámico proporcionalmente mayor, ya que pueden redistribuir una fracción considerable del gas y las estrellas dentro de un volumen más compacto. Sin embargo, este resultado puede estar más relacionado con el depósito de gas y la masa del agujero negro.

Nuevamente se presentan los valores de las diferencias en los niveles de significancia entre las muestras de barradas y de control en función de la tasa de acreción. Podemos notar que, a pesar que la diferencia sigue siendo significativa, esta es menor que la observada en los plots de Lum[OIII].

3.2.1. Masa del agujero negro

Los agujeros negros supermasivos localizados en el centro de las galaxias, poseen masas que varían desde 10^6 hasta $10^{10} M_{\odot}$ (Kormendy and Richstone, 1995). La determinación observacional estas masas se basa en métodos dinámicos, incluyendo el estudio de la cinemática estelar mediante espectroscopía de alta resolución y el análisis de líneas de emisión de gas ionizado en regiones circunucleares (McConnell and Ma, 2013). Adicionalmente, en núcleos activos la técnica de mapeo de reverberación permite estimar la masa del SMBH midiendo la variabilidad temporal de la líneas de emisión amplias y su respuesta al

continuo del disco de acreción (Peterson et al., 2004).

La caracterización precisa de la masa de los SMBH es crucial para comprender tanto su historial de crecimiento como su impacto en la evolución y dinámica de las galaxias que los albergan. En particular, la conexión entre la retroalimentación del SMBH y el medio interestelar puede regular procesos físicos influyendo en la morfología, la reserva de gas frío y la estabilización de los discos (Fabian, 2012).

Diversos estudios han establecido la existencia de una correlación entre la masa del agujero negro y la dispersión de velocidades (σ) de las estrellas en el bulbo galáctico, conocida como $M_{BH} - \sigma$ (Gebhardt et al., 2000; Ferrarese and Merritt, 2000). Esta relación sugiere un vínculo estrecho entre la evolución del SMBH y la estructura de la galaxia anfitriona, lo que indica que los procesos de crecimiento del agujero negro están conectados con la dinámica del bulbo. Empíricamente la relación $M_{BH} - \sigma$ se expresa generalmente mediante la ecuación:

$$\log M_{BH} = \alpha + \beta \log(\sigma/200) \quad (3.2)$$

donde α y β son constantes empíricas determinadas a través de un ajuste de datos observacionales, las cuales dependerán de la selección de la muestra y los tipos de galaxias, considerando además que la dispersión en esta relación puede diferir entre galaxias elípticas y espirales. Estas relaciones refuerzan la idea de que los agujeros negros y sus galaxias anfitrionas evolucionan conjuntamente, posiblemente a través de fusiones y procesos internos, consolidando así una de las relaciones fundamentales en astronomía extragaláctica. Los valores de las masas de agujeros negros utilizados en este trabajo, fueron calculados y presentados en Coldwell et al. (2017) a través de esta relación y los valores de la velocidad de dispersión se obtuvieron de los catálogos MPA/JHU.

El gráfico interior de la figura 3.6 muestra la distribución de la masa del agujero negro tanto para las galaxias barradas como para la muestra de control. El análisis de la distribución revela una ligera tendencia de las galaxias barradas a albergar agujeros negros menos masivos en comparación con sus contrapartes sin barras.

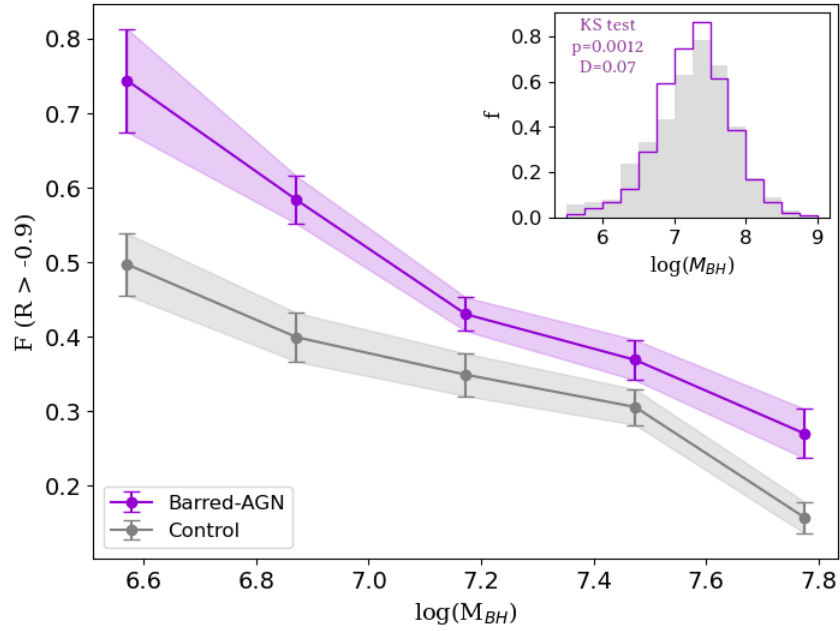


Figura 3.6: Fracción de $\mathcal{R} > -0.9$ en función de la masa del agujero negro $\log(M_{BH})$. El gráfico interior muestra la distribución de la masa de agujeros negros. Se presentan los valores del KS-test.

La figura principal, muestra la fracción de AGNs con mayor tasa de acreción en función de la masa del SMBH. En particular, se observa que las galaxias con agujeros negros de menor masa presentan una mayor fracción de $\mathcal{R} > -0.9$. Además, la fracción total de galaxias barradas es mayor en todo el rango de masas. Los resultados indican que los agujeros negros menos masivos son más eficientes acretando materia y a su vez, este fenómeno se acentúa para las galaxias barradas.

Estos resultados se alinean con las relaciones de escala $M_{BH} - M_{bulge}$ y $M_{BH} - \sigma$, las cuales proporcionan una evidencia robusta de la coevolución entre los SMBH y sus galaxias anfitrionas, con la retroalimentación del AGN desempeñando un papel clave en la regulación de este vínculo (McConnell and Ma, 2013). Sin embargo, la eficiencia de este mecanismo puede diferir según la estructura de la galaxia, por lo que los resultados motivan un análisis de las propiedades estructurales. En particular, las galaxias barradas suelen estar asociadas con pseudobulbos, los cuales se forman a través de procesos seculares, facilitados por la barra (Kormendy and Ho, 2013). A diferencia de los bulbos clásicos, que surgen de fusiones rápidas y violentas, los pseudobulbos crecen de manera gradual mediante evolución secular, lo que generalmente da lugar a agujeros negros menos masivos. Este fenómeno podría explicar la gran fracción de agujeros negros de baja masa observados en galaxias barradas, sin embargo, es posible que este no sea el único factor. Estudios previos han demostrado que la eficiencia de acreción de un agujero negro tiende a ser mayor en objetos de menor masa, especialmente en las primeras etapas de su crecimiento (Alexander and Hickox, 2012). En conjunto, estos factores refuerzan la idea de que la estructura de la galaxia influye en la evolución de su núcleo activo. Las barras pueden desempeñar un papel clave en la canalización de gas hacia el centro galáctico, facilitando la alimentación del SMBH y en algunos casos promoviendo episodios de acreción más eficientes en relación con la masa del agujero negro. No obstante, la influencia de las barras en la retroalimentación del AGN y su evolución, puede depender de otros factores no considerados en este análisis como la cantidad de gas, lo que sugiere que su impacto puede ser regulador más que determinante en la actividad nuclear.

3.3. Intensidad de la barra

Históricamente las galaxias se han clasificado como no barradas, fuertemente barradas y débilmente barradas (SA, SB y SAB respectivamente) dependiendo de su prominencia, distribución de luz y la habilidad para redistribuir masa y momento angular en la galaxia (de Vaucouleurs, 1963). A pesar de que no existe consenso entre la forma más adecuada para definir si una barra es fuerte o débil, existen diversos trabajos (e.g. Athanassoula, 1992; Elmegreen et al., 1996; Erwin, 2004; Gadotti, 2011), en los cuales se utilizan parámetros morfológicos, isofotas, elipticidad o perfiles de brillo superficial para determinar esta clasificación. Sin embargo, la clasificación visual sigue siendo un método ampliamente utilizado debido a su flexibilidad y capacidad para captar estructuras que pueden ser difíciles de cuantificar mediante métodos puramente analíticos. Aunque los métodos automáticos han avanzado significativamente, aún pueden verse limitados por la resolución de las imágenes, la presencia de estructuras secundarias o las variaciones en la inclinación de la galaxia. En este contexto, la experiencia del observador juega un papel crucial, ya que permite interpretar las imágenes con un criterio más amplio y adaptativo que los algoritmos matemáticos. Nair and Abraham (2010) construyeron un catálogo de galaxias usando clasificación visual y clasificaron en dos categorías: barra fuerte, con una estructura prominente, y dominaba claramente la distribución de luz en el disco de la galaxia y barras débiles, cuando la barra era más tenue o corta.

GZ DECaLS ha implementado un sistema de clasificación en el cual los voluntarios pueden distinguir entre barra “fuerte” y “débil” (Ver figura 3.7). La principal diferencia entre estas categorías radica esencialmente en la notoriedad o claridad de estas estructuras. Una barra fuerte típicamente tiene una forma mucho más larga y brillante, claramente definida cuya presencia es observada con facilidad. (Ver figura 3.7, ilustración de la izquierda). Por

el contrario, las barras débiles son menos “obvias”, cortas y poco luminosas, lo que dificulta su detección durante una inspección visual e incluso se puede llegar a decir que tiene un impacto menor en la estructura global y dinámica de la galaxia (Ver figura 3.7, ilustración de la derecha).



Figura 3.7: Descripción gráfica otorgada por Galaxy Zoo DECaLS para que los voluntarios puedan discernir entre barra fuerte o barra débil.



Figura 3.8: Ejemplo de galaxias DECaLS. En el panel izquierdo se muestra una galaxia clasificada como fuertemente barrada y en el panel derecho una galaxia débilmente barrada.

Recientemente Géron et al. (2021, 2023) estudiaron la velocidad del patrón de la barra en el cual incluyó la clasificación fuerte y débil de Galaxy Zoo en galaxias de disco. Encontraron que alrededor del 28 % de todas las galaxias disco presentan una barra débil y el 16 % tenían una barra fuerte; también hallaron que no son fenómenos físicos fundamentalmente diferentes y sugieren que existe un continuo de tipo de barra . Por otro lado, múltiples

estudios han sugerido que existen diferencias en el perfil de brillo superficial de las barras fuertes y débiles (Elmegreen et al., 1996; Kim et al., 2015).

Para este estudio utilizamos la clasificación morfológica proporcionada por GZ para diferenciar barras fuertes y débiles en nuestra muestra de AGNs barrados. Se obtuvieron 865 barras clasificadas como fuertes y 465 débiles, lo que representa el 65 % y 35 % respectivamente.

Una vez realizada esta diferenciación, se replicaron los gráficos tanto para la fracción de galaxias con $Lum[OIII] > 10^{6.2} L_{\odot}$ y $\mathcal{R} > -0.9$ (figuras 3.9 y 3.10) tanto para galaxias con barra fuerte (línea amarilla) y débil (línea celeste).

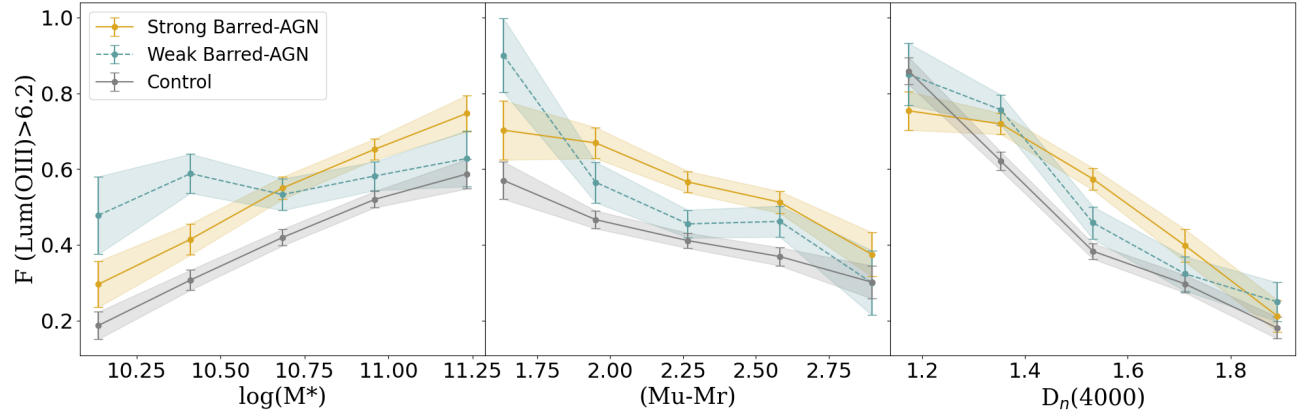


Figura 3.9: Fracción de $Lum[OIII] > 10^{6.4} L_{\odot}$ en función de la masa estelar, el color $(Mu-Mr)$ y el parámetro $D_n(4000)$ (panel izquierdo, central y derecho respectivamente). El gráfico separa por intensidad de la barra, ya sea fuerte (línea amarilla) o débil (línea celeste) en comparación a la muestra de control.

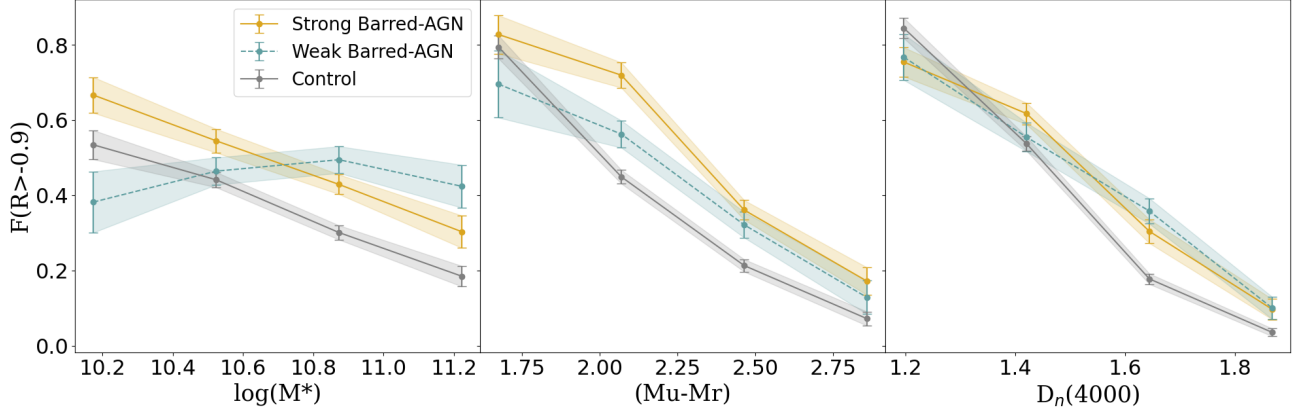


Figura 3.10: Fracción de $\mathcal{R} > -0.9$ en función de la masa estelar, el color (Mu-Mr) y el parámetro $D_n(4000)$ (panel izquierdo, central y derecho respectivamente). El gráfico separa por intensidad de la barra, ya sea fuerte (línea amarilla) o débil (línea celeste) en comparación a la muestra de control.

Podemos notar que las galaxias con barra fuerte se ajustan de mejor manera a las tendencias obtenidas en las figuras 3.2 y 3.5, mientras que las galaxias con barra débil muestran una mayor dispersión, lo que sugiere una desviación del comportamiento general. Esta tendencia podría tener dos posibles explicaciones. Por un lado, sugerimos que las barras fuertes ejercen una influencia mayor en la actividad AGN, sin embargo, la tendencia de estas galaxias, muestra un leve aumento en la fracción de AGNs poderosos con respecto a las galaxias con barra débil (Ver tabla 3.3). Esto indica que, si bien la fuerza de las barras puede influir en la alimentación del AGN, es probable que otros factores contribuyan a la distribución observada.

	% AGNs fuertemente barrados	% AGN débilmente barrados
$Lum[\text{OIII}] > 10^{6.2} L_{\odot}$	$55,9 \% \pm 1,6$	$48,6 \% \pm 2,3$
$\mathcal{R} > -0.9$	$47,0 \% \pm 1,6$	$40,2 \% \pm 2,2$

Tabla 3.3: Porcentajes de AGNs con barra fuerte y débil con indicadores de actividad nuclear alta.

Por el contrario, en nuestra muestra, el número de barras fuertes supera significativamente el número de barras débiles, por lo que para tener resultados estadísticos más robustos, sería necesario aumentar el número de galaxias con barra débil en el conjunto de datos.

Varios estudios sugieren que las barras fuertes tienen un impacto significativo en sus galaxias anfitrionas. Vera et al. (2016) encontró que las galaxias fuertemente barradas tienden a tener colores más rojos que las débilmente barradas y exhiben una eficiencia mucho menor en la formación estelar. Esto implica que las barras prominentes juegan un rol crucial en los procesos que regulan el gas dentro de la galaxia. Desde una perspectiva diferente, Garland et al. (2023) reporta que las galaxias con barra fuerte tienen mayor probabilidad de albergar un AGN que aquellas con galaxias débiles, lo que coincide con los resultados de este trabajo. Este hallazgo sugiere que las barras fuertes podrían ser más efectivas para desencadenar o potenciar la actividad de los agujeros negros.

Si las barras fuertes son de hecho más eficaces para impulsar la entrada de gas hacia el centro de las galaxias, podrían desempeñar un rol clave en la coevolución de los SMBH y sus galaxias anfitrionas. No obstante, como sugiere Geron et al. (2023), la intensidad de la barra existe a lo largo de un continuo en lugar de categorías discretas, lo que implica que la influencia de la barra varía de manera gradual en lugar de abrupta.

En resumen, con base en nuestros resultados y evidencia previa de diferencias entre barras fuertes y débiles, proponemos que las barras fuertes pueden tener un impacto más significativo en la actividad nuclear en comparación con las barras menos prominentes. Sin embargo, estudios futuros que contengan muestras más amplias y observaciones en múltiples longitudes de ondas serán esenciales para explorar con mayor profundidad la relación entre la fuerza de la barra, la eficiencia de alimentación de los AGNs y la evolución a largo plazo de este tipo de galaxias.

3.4. Influencia del ambiente

La morfología de una galaxia está estrechamente relacionada con la densidad del entorno en el que se encuentra. Las galaxias espirales tienden a hallarse en regiones de baja densidad, como el campo, mientras que galaxias elípticas son más comunes en ambientes de alta densidad como grupos y cúmulos (Dressler, 1980). Este fenómeno conocido como morfología-densidad, ha sido estudiado a lo largo de los años, sin embargo, en el caso de las barras galácticas, la influencia del entorno en su formación y evolución sigue siendo tema de debate.

Varios estudios observacionales han sugerido una correlación entre la presencia de barras y entornos densos. Investigaciones como Eskridge et al. (2000); Skibba et al. (2012); Sol Alonso et al. (2006) encontraron una fracción mayor de galaxias barradas en regiones de alta densidad, por lo que es posible que factores externos estén influenciando la formación o longevidad de estas estructuras. Elmegreen et al. (1990) reportó una mayor proporción de galaxias barradas en pares de galaxias, reforzando la idea de que las interacciones pueden desempeñar un papel importante en la generación de barras.

Los resultados de las simulaciones numéricas apoyan la hipótesis, mostrando que las barras pueden ser inducidas por interacciones entre galaxias (Noguchi, 1987; Berentzen et al., 2004). Otros estudios han indicado que la dinámica de marea en cúmulos y grupos de galaxias podrían afectar la estabilidad y evolución de las barras. Además, se ha explorado el papel del acoplamiento entre la barra y el halo de materia oscura, hallando que factores como la fricción dinámica pueden influir en la persistencia de estas estructuras (Debattista and Sellwood, 2000).

Sin embargo, otros estudios han encontrado que la frecuencia de galaxias barradas no presenta una dependencia clara con la densidad ambiental, es decir no hay diferencias sig-

nificativas entre la fracción de galaxias de campo y cúmulos, lo que sugiere que las barras podrían formarse principalmente a través de procesos internos como inestabilidades del disco y la evolución secular, en lugar de depender de factores externos.

Motivados por estos estudios, en este trabajo se analizó la fracción de galaxias con barras fuertes, barras débiles y sin barras en función de su entorno galáctico, diferenciando entre entornos de alta, media y baja densidad. Para ello, se utilizó la clasificación propuesta por Sol Alonso et al. (2006), quienes establecieron tres regiones según la densidad del entorno, medida a través del parámetro³ Σ_5 : baja densidad ($\log(\Sigma_5) < -0.57$), media ($-0.57 < \log(\Sigma_5) < 0.05$) y alta densidad ($\log(\Sigma_5) > 0.05$).

La muestra de galaxias presentada en este trabajo ha sido diseñada para mantener una distribución ambiental equilibrada entre galaxias barradas y no barradas, podemos evaluar el efecto de la barra en la actividad nuclear sin introducir sesgos asociados al entorno. Al considerar diferentes categorías de barras, podemos determinar si la intensidad de la estructura tiene un impacto diferenciado en la evolución de las propiedades de la galaxia en distintos entornos.

³ $\Sigma_5 = 5/(\pi r_{p_5}^2)$

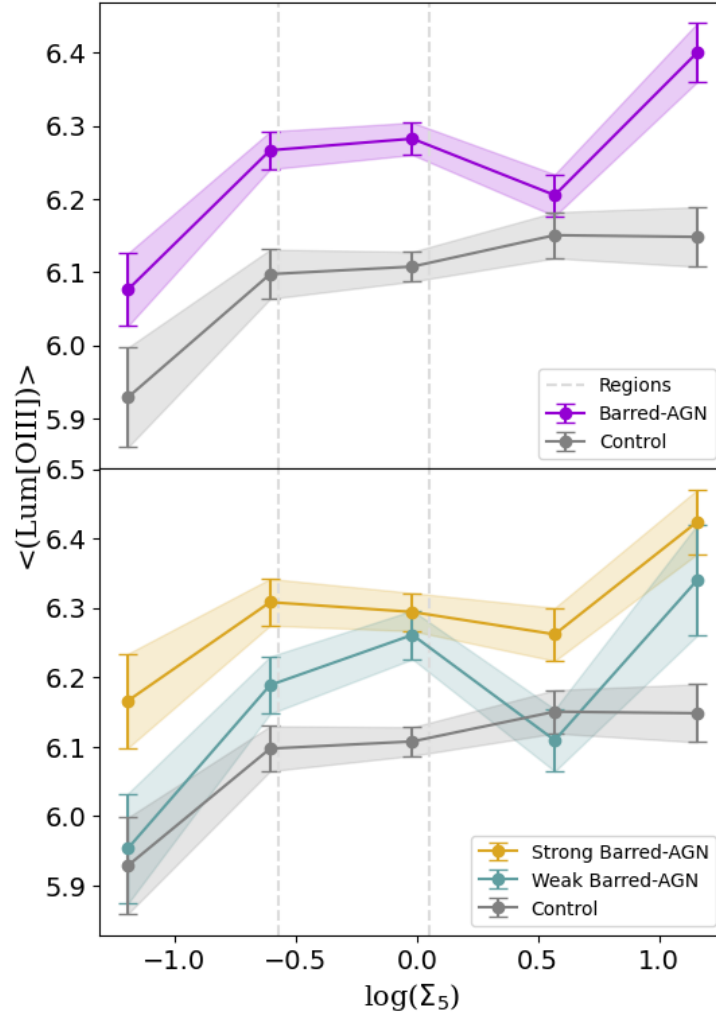


Figura 3.11: $\log(\Sigma_5)$ en función la luminosidad media de [OIII] para la muestra completa (panel superior) y la muestra separada en barra fuerte y barra débil (panel inferior) y la muestra de control

La Fig. 3.11 muestra la luminosidad media de [OIII] en función del parámetro de densidad local. En ambos paneles se observa una leve tendencia de las galaxias a presentar valores más altos de $\text{Lum}[\text{OIII}]$ en entornos más densos. Lo que sugiere que la influencia de la barra sobre el AGN aumenta a medida que el ambiente aumenta su densidad.

Tabla 3.4: Porcentaje de galaxias con valores altos de $Lum[OIII]$ y \mathcal{R} para la muestra con barra y sin barra en diferentes ambientes.

	Barradas		Control
$Lum[OIII] > 6,2$	Barra fuerte %	Barra débil %	Sin barra
Ambiente			
Baja densidad	54.4 ± 3.7	46.5 ± 4.9	39.5 ± 2.7
Densidad media	55.5 ± 3.6	52.3 ± 3.5	42.0 ± 1.8
Alta densidad	57.1 ± 2.6	45.5 ± 3.8	43.9 ± 1.9
$R > -0,9$	Barra Fuerte %	Barra débil %	Sin barra
Ambiente			
Baja densidad	48.8 ± 3.7	29.7 ± 4.5	38.3 ± 2.7
Densidad media	46.9 ± 2.7	47.6 ± 3.5	36.5 ± 1.8
Alta densidad	46.2 ± 2.6	37.8 ± 3.7	32.7 ± 1.8

Al analizar en detalle el panel inferior de la figura, se evidencia que las galaxias con barras fuertes siguen esta tendencia general, pero con valores de $Lum[OIII]$ sistemáticamente más altos en comparación con el resto de la muestra. Las galaxias con barras débiles exhiben una distribución más dispersa, lo que podría indicar una mayor variabilidad en la influencia de estos sistemas sobre la emisión de $[OIII]$. Esta diferencia en el comportamiento entre barras fuertes y débiles sugiere que la intensidad de la barra podría estar desempeñando un papel en la regulación del gas circunnuclear en conjunto con el entorno.

Para cuantificar esta tendencia, la tabla 3.4 presenta los porcentajes de galaxias barradas y de la muestra de control con alta actividad nuclear, desglosados según la intensidad de la barra y diferenciados por entorno.

Estos resultados indican que en entornos de densidad intermedia, la fracción de AGNs poderosos no muestran diferencias significativas entre los distintos tipos de barra. Sin embargo en los extremos de la distribución ambiental -es decir, en entornos de muy baja o muy alta densidad- estas diferencias se vuelven más pronunciadas.

Una posible explicación para este resultado está vinculada principalmente a los efectos ambientales que regulan la disponibilidad de gas. En entornos densos, las interacciones con el medio intracúmulo y las perturbaciones gravitacionales inducidas por galaxias cercanas pueden intensificar la afluencia de gas canalizado por la barra, fortaleciendo su impacto sobre la actividad del núcleo. En contraste, en entornos de baja densidad, la evolución de las galaxias es predominantemente secular, es decir, está gobernada por procesos internos que operan en escalas de tiempo prolongadas. Si una barra fuerte se forma tempranamente y logra mantenerse estable, tiene más tiempo para canalizar gas de manera eficiente hacia la región central, facilitando episodios recurrentes de actividad nuclear.

Estos resultados resaltan la importancia de considerar tanto los efectos ambientales como los procesos internos en la evolución de las galaxias barradas y su papel en la regulación de la alimentación del AGN, pudiendo influir conjuntamente en este fenómeno.

Capítulo 4

Impacto de las interacciones

Las interacciones galaxia-galaxia, se reconocen como uno de los mecanismos más influyentes en la evolución galáctica, eficiente tanto para los cambios morfológicos de las galaxias como para cambios en sus propiedades internas, como la tasa formación estelar (Toomre and Toomre, 1972; Barnes and Hernquist, 1992; Mihos and Hernquist, 1996). Diversos estudios han demostrado que estos encuentros pueden desencadenar inestabilidades gravitacionales, activando los núcleos (Alonso et al., 2007; Hopkins et al., 2006; Ellison et al., 2011), sugiriendo que procesos dinámicos involucrados como el colapso del gas frío y las perturbaciones gravitacionales pueden facilitar el transporte de material a las regiones centrales, alimentando así al agujero negro supermasivo (Capelo et al., 2015; Hopkins and Quataert, 2010; Steinborn et al., 2018).

4.1. Núcleos activos en pares de galaxias

En esta sección se analiza el rol que desempeñan las interacciones en la activación o aumento de la actividad nuclear. De manera similar al capítulo anterior, se considerará la

luminosidad en [OIII] como indicador de actividad nuclear en galaxias.

Como primer paso, con el objetivo de investigar cómo la proximidad entre galaxias puede afectar la presencia o el grado de actividad nuclear, se calculó la distancia proyectada entre los miembros de cada par. Posteriormente, se analizó el comportamiento de la luminosidad promedio de [OIII] en función de esta separación. (véase Fig 4.1).

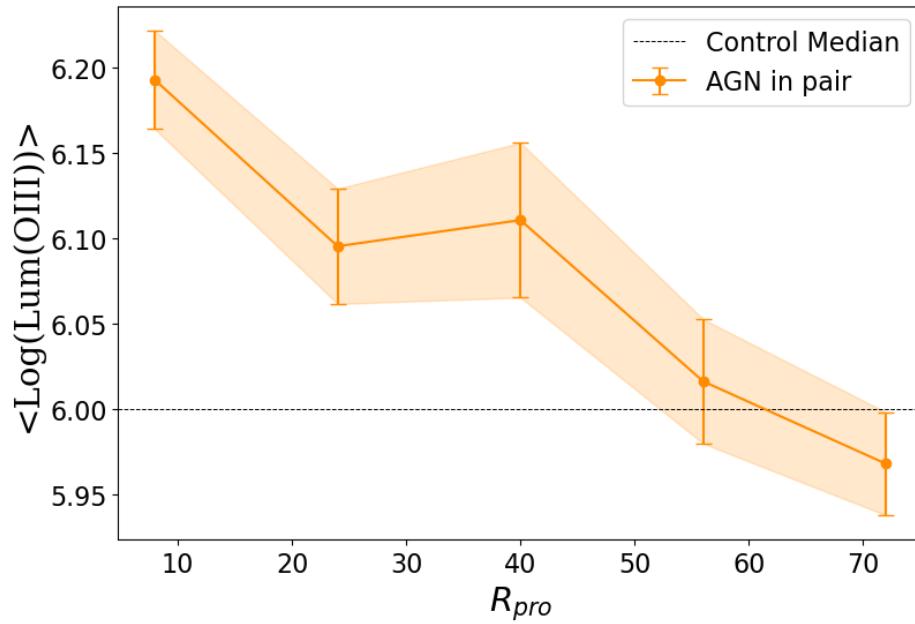


Figura 4.1: Luminosidad media de [OIII] de AGNs en pares en función de la distancia proyectada r_p entre galaxias. La línea horizontal representa la mediana de los datos de la muestra de control.

Los resultados muestran que, a medida que la distancia proyectada entre los miembros del par disminuye, los valores medios de luminosidad tienden a aumentar, sugiriendo una mejora relativa en la actividad nuclear en sistemas más cercanos.

Este resultado es consistente con trabajos previos en donde se ha argumentado que existe un umbral de separación por debajo del cual las perturbaciones inducidas por la

compañera son lo suficientemente fuertes para canalizar el gas a las regiones centrales de la galaxia, provocando un aumento en la formación estelar o en la fracción de AGNs. Lambas et al. (2003) asocia un aumento en la formación estelar con una disminución de la distancia proyectada, especialmente en sistemas con separaciones menores a $25\text{kpc}/h$. Este efecto ha sido confirmado por trabajos posteriores (Alonso et al., 2004; Sol Alonso et al., 2006; Silverman et al., 2011; Davies et al., 2015) los cuales destacan que los pares más cercanos con evidentes signos de interacción presentan respuestas internas que actúan como un mecanismo eficiente en la actividad de los núcleos galácticos.

Ellison et al. (2011) realizaron un estudio estadístico con datos del SDSS de la fracción de pares de galaxias que albergan núcleos activos en ambas componentes (par dual de AGN, para más detalles ver sección 4.1). Tomando alrededor de 11.000 pares a $z < 0,2$, encontraron que ésta fracción aumenta significativamente en sistemas con separaciones proyectadas pequeñas ($10\text{kpc } h^{-1}$), sin embargo, se puede observar una correlación con el aumento de la fracción hasta $80\text{kpc } h^{-1}$. Este resultado sugiere que la probabilidad de observar actividad nuclear en ambas galaxias es mayor cuando el sistema se encuentra en una fase relativamente avanzada de interacción.

Bajo esta premisa, es razonable inferir que las galaxias inmersas en una interacción cercana presentan una mayor eficiencia en la activación de sus núcleos. Las perturbaciones gravitacionales inducidas por una compañera cercana, pueden redistribuir el gas interestelar, lo que aumentará el suministro de material disponible para la acreción sobre el agujero negro. En consecuencia, éste se activará o potenciará su actividad (Di Matteo et al., 2005; Hopkins and Quataert, 2010; Hernández-Ibarra et al., 2016).

Sobre esta base, se estableció un umbral de $r_p < 25\text{kpc}/h$ para la selección de una submuestra de pares cercanos (Ver Fig. 4.2). Esta selección se fundamenta en estudios



Figura 4.2: Ejemplos de pares cercanos

previos que han demostrado que, por debajo de este límite, los efectos de la interacción gravitacional entre galaxias son más intensos (Alonso et al., 2007; Ellison et al., 2011; Patton et al., 2013). Por lo tanto, al restringir la muestra a estas separaciones proyectadas, se busca explorar con mayor claridad si la presencia de una compañera muy próxima se asocia con el aumento sistemático de la actividad nuclear.

La Fig. 4.3 muestra la distribución de la $\text{Lum}[\text{OIII}]$. La línea discontinua roja representa los pares cercanos con $r_p < 25kpc/h$ mientras que la línea continua naranja representa el resto de la muestra de pares. La superficie gris representa la muestra de control de galaxias aisladas. Notamos un leve aumento de los pares cercanos a presentar valores más altos de luminosidad en $[\text{OIII}]$ como se mencionó anteriormente. Esto sugiere que la interacción en sistemas con alta proximidad física puede desempeñar un rol importante en el fortalecimiento de la actividad nuclear.

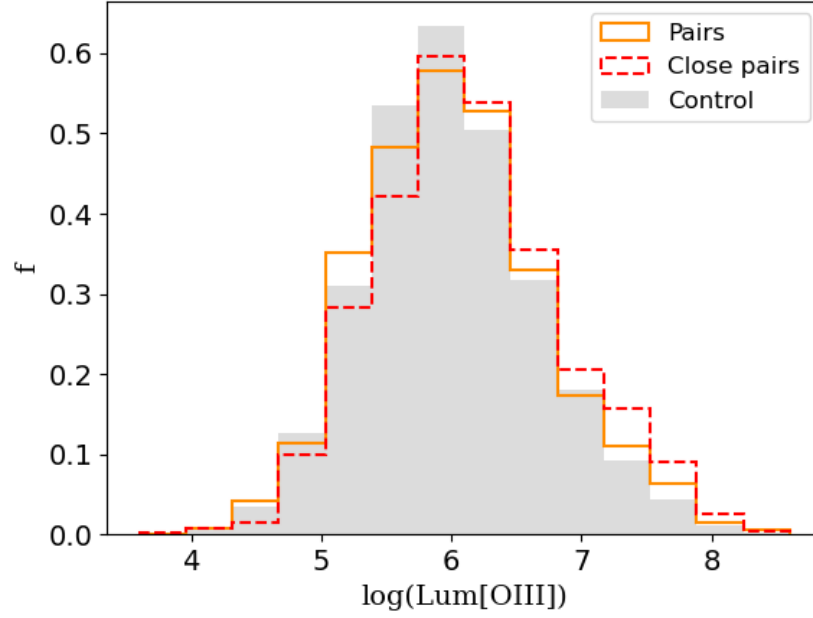


Figura 4.3: Distribuciones de luminosidad en [OIII] correspondiente a pares cercanos ($r_p < 25kpc h^{-1}$, línea punteada), en comparación con el resto de la muestra (línea continua) y la muestra de control (superficie completa gris).

Al igual que en el capítulo anterior, se adoptó una metodología consistente para la clasificación de AGNs, la cual fue adaptada en este caso a la muestra de pares. De forma análoga, definimos un AGN poderoso como aquel cuya luminosidad en [OIII] excede los $10^{6.1} L_{\odot}$, valor que corresponde a la mediana de la distribución de luminosidades de toda la muestra. Esta clasificación permite distinguir entre núcleos con distintos niveles de actividad, facilitando una comparación más directa. Observamos que las galaxias con compañeras muy cercanas ($r_p < 25kpc/h$) presentan sistemáticamente una fracción más alta de AGNs poderoso en comparación con el resto de los pares y con la muestra de control, como se resume en la tabla 4.1

	$\%Lum[OIII] > 10^{6,1}$
Pares	$42,8 \% \pm 1,1$
Pares cercanos ($r_p < 25kpc/h$)	$49,1 \% \pm 1,5$
Control	$41,1 \% \pm 0,6$

Tabla 4.1: Porcentaje de galaxias con altos valores de $Lum[OIII]$ para la muestra de pares, pares cercanos y la muestra de control.

Además, se incorporó el análisis de la tasa de acreción, la cual constituye una estimación indirecta de que tanto material está acretando el agujero negro. La metodología empleada para su cálculo y los datos utilizados, se detallan en las secciones 3.2 y 3.2.1. Como se puede observar en la Fig. 4.4, no se evidencia una variación significativa en los valores de \mathcal{R} ni para la muestra general, ni para la submuestra de pares cercanos.

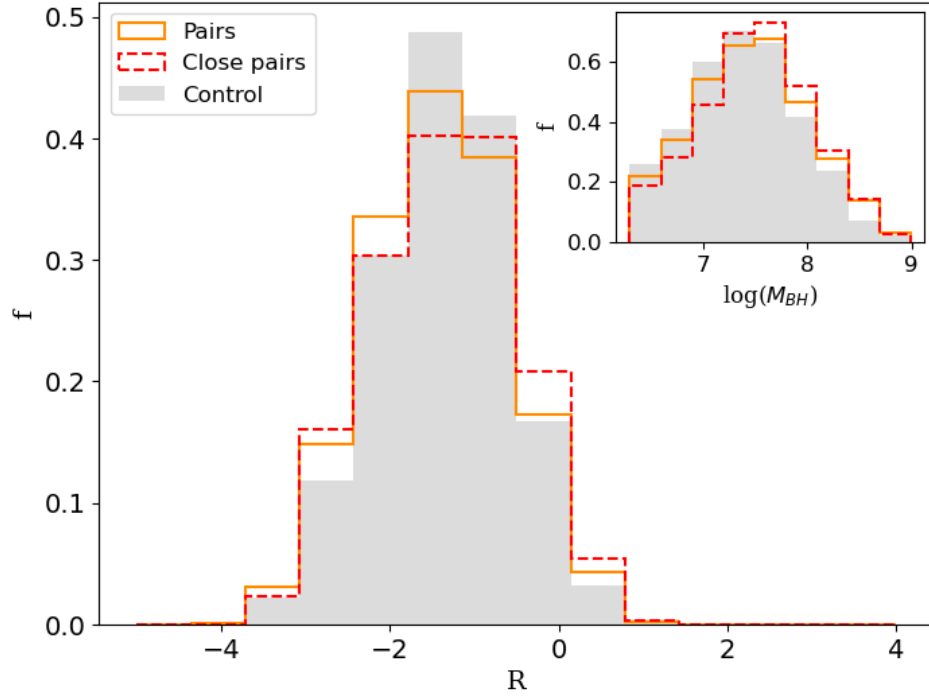


Figura 4.4: Distribuciones de la tasa de acreción \mathcal{R} correspondiente a pares cercanos ($r_p < 25 kpc h^{-1}$, línea punteada), en comparación con el resto de la muestra (línea continua) y la muestra de control (superficie completa gris). En el gráfico interior, se muestra las distribuciones de las masas de agujeros negros.

Considerando nuevamente la clasificación de AGN poderoso, esta vez definida por la tasa de acreción -específicamente, aquellos con $\mathcal{R} > -1.2$ -, no se observa una diferencia significativa entre las distintas muestras. La fracción de AGNs con altos valores de tasa de acreción corresponde al 47 % en la submuestra de pares cercanos, mientras que en la muestra de control alcanza un valor similar de 46 %. Estos resultados sugieren que la proximidad de una galaxia compañera no tiene un impacto claro sobre el régimen de acreción del agujero negro.

Esta ausencia de diferencias en la tasa de acreción, podría estar relacionada con la

etapa evolutiva de los sistemas analizados. Ellison et al. (2013) analizó una muestra de SDSS y halló que, si bien la fracción de AGNs puede aumentar moderadamente en galaxias en pares cercanos, el incremento más significativo sucede en galaxias post-fusión. Este resultado sugiere que, el mayor impacto sobre la acreción del agujero negro ocurre en las etapas posteriores a la coalescencia, cuando el gas frío es más eficientemente canalizado hacia el centro galáctico. Diversos estudios como Satyapal et al. (2014); Sabater et al. (2015) y recientes simulaciones (Byrne-Mamahit et al., 2024) han apoyado esta hipótesis, coincidiendo en que la acreción más eficiente y el mayor impacto sobre el agujero negro ocurre tras la coalescencia completa.

Por otra parte, el gráfico interior de la Fig. 4.4, muestra las distribuciones de masas de agujeros negros $\log(M_{BH})$ para las distintas muestras analizadas. Se observa una leve tendencia de las galaxias en pares a albergar agujeros negros más masivos en comparación con las galaxias aisladas. Esta diferencia no puede atribuirse a variaciones en la masa estelar de las galaxias ya que ambas muestras fueron construidas para ser estadísticamente similares en esta propiedad. Una posible explicación es que las galaxias en pares hayan atravesado eventos de interacción o fusión previos y no necesariamente son detectables en este estudio en específico, en especial si se encuentran en ambientes más densos. Esto pudo impulsar procesos de acreción en el pasado, contribuyendo al crecimiento del agujero negro supermasivo. Dado que la masa del agujero negro es una propiedad acumulativa, sensible a la historia evolutiva (Heckman and Best, 2014; Kormendy and Ho, 2013), esta podría retener información sobre episodios anteriores, incluso si la acreción actual es baja.

Considerando este resultado, una posible interpretación adicional de la ausencia de diferencias en la tasa de acreción entre las muestras, radica en la dependencia inversa entre la eficiencia de acreción y la masa del agujero negro. Algunos estudios han reportado que los agujeros negros más pequeños tienden a acretar materia de forma más eficiente que sus

contrapartes más masivas (Greene and Ho, 2007; Kauffmann and Heckman, 2009). En este trabajo, se observó que las galaxias en pares albergan agujeros negros sistemáticamente más masivos que las galaxias aisladas, por lo tanto es posible que estas diferencias modulen la actividad nuclear observada.

Cabe destacar que autores como Sabater et al. (2015), concluyen que la tasa de acreción depende fuertemente de la masa de la galaxia anfitriona. Si consideramos este factor, el impacto de la interacción en la actividad nuclear resulta ser secundario, por lo que el comportamiento de la tasa de acreción obtenido en este trabajo es coherente.

Dado que no se observó una diferencia clara y significativa en la tasa de acreción entre las muestras analizadas, no se consideró pertinente profundizar en un análisis más detallado de esta propiedad. En lugar de ello, se optó por continuar con el estudio utilizando la luminosidad en [OIII] como principal indicador de la actividad nuclear.

Con el objetivo de evaluar la influencia de la interacción galáctica en la intensidad de la actividad nuclear, se calculó la fracción de AGNs poderosos ($F(Lum[OIII] > 6,1)$) en función de propiedades clave de las galaxias: masa estelar, color ($M_u - M_r$) y el índice $D_n(4000)$. En la Fig. 4.5 se comparan la muestra de pares, la muestra de pares cercanos con $r_p < 25 kpc/h$ y la muestra de control de galaxias aisladas. Este enfoque permite identificar diferencias sistemáticas que podrían asociarse al efecto de la interacción, en particular en escenarios donde existe una alta proximidad entre las galaxias.

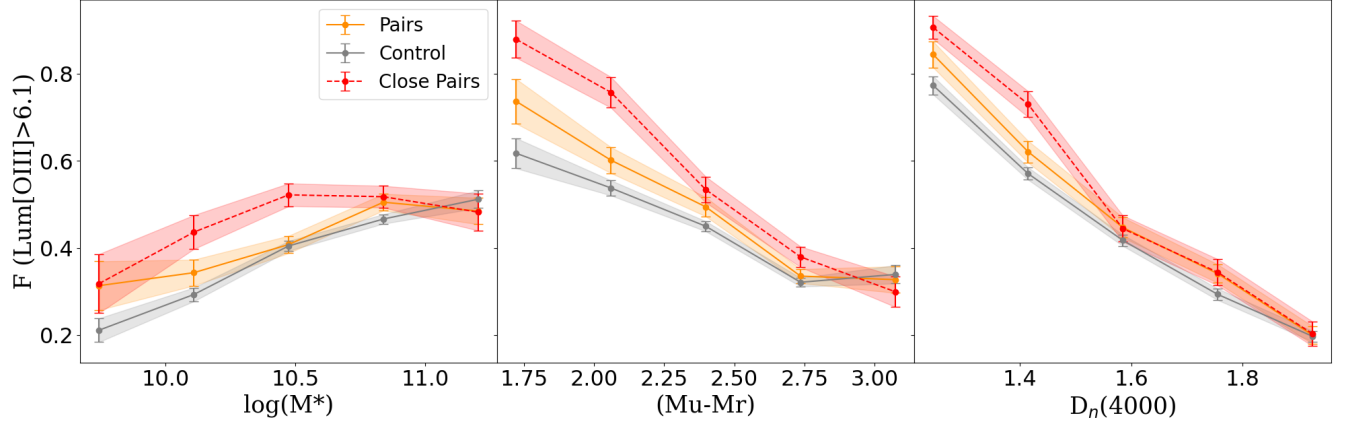


Figura 4.5: Fracción de $Lum[OIII] > 10^{6.1} L_{\odot}$ en función de la masa estelar, el color (Mu-Mr) y el parámetro $D_n(4000)$, paneles izquierdo, centro y derecho respectivamente.

Los comportamientos observados en esta sección reflejan tendencias consistentes con las obtenidas en el capítulo anterior, donde se analizó el impacto de las estructuras de barra. En particular, los AGNs que residen en galaxias que forman parte de sistemas en interacción presentan, en promedio, una mayor actividad nuclear que aquellos alojados en galaxias aisladas, independientemente de su masa estelar, color o población estelar. Esta tendencia se manifiesta de manera aun más evidente en los pares cercanos, lo que refuerza la idea de que la proximidad física entre galaxias desempeña un rol significativo en la activación o intensificación de la actividad AGN.

En el panel de la izquierda, se observa que tanto los pares de galaxias como la muestra de control tienden a mostrar una mayor fracción de AGNs poderosos en las galaxias más masivas. Este resultado es coherente con estudios previos que vinculan la actividad nuclear más intensa con mayores masas estelares (Alonso et al., 2018; Aird et al., 2012), posiblemente debido a una mayor disponibilidad de gas para la acreción.

Cabe destacar que, a pesar de que las muestras de pares y de control fueron construidas para ser estadísticamente comparables en términos de masa estelar global, ambas incluyen

galaxias con una amplia variedad de morfologías. Esta diversidad estructural implica que, por ejemplo, una galaxia elíptica con cierta dinámica interna y un contenido estelar distinto al de una espiral de masa similar, podría influir en la capacidad de alimentar al agujero negro central. De hecho, estudios previos como Schawinski et al. (2010) y Smethurst et al. (2016) han demostrado que la morfología de la galaxia puede afectar significativamente tanto la probabilidad de albergar un AGN como la intensidad de su actividad. Con esto, se sugiere que, si bien la masa estelar es una condición considerable para el desarrollo de una actividad nuclear intensa, la interacción cercana entre galaxias puede potenciar significativamente este efecto.

En el panel central de la Fig. 4.5, se observa que la fracción de AGNs poderosos varía sistemáticamente con el color de las galaxias. Se observa una clara tendencia de las galaxias con colores más azules a presentar una proporción mayor de núcleos activos con intensa actividad, en comparación con aquellas con poblaciones estelares más rojas. Este comportamiento se intensifica en la submuestra de pares cercanos, donde los AGNs con altos niveles de actividad nuclear son más frecuentes. Este resultado sugiere una conexión entre la interacción galáctica, el incremento en la formación estelar y la acreción eficiente de material hacia el agujero negro.

Este resultado se alinea con estudios previos que reportan una correlación entre el color azul de las galaxias y los diversos procesos físicos a los que están sometidas. Scudder et al. (2012) encuentra que las galaxias en pares con separaciones pequeñas tienden a mostrar un exceso de luminosidad en líneas de emisión, como resultado de procesos de formación estelar inducidos por la interacción. Patton et al. (2013) resalta que este efecto, se intensifica con separaciones menores a 30kpc. Por otra parte, Storchi-Bergmann et al. (2001) analizó una muestra de galaxias Seyfert 2 y encontraron que aquellas con evidencias de interacción o con estructuras internas perturbadas presentaban signos claros de formación estelar reciente en el

núcleo. Esta coincidencia entre actividad estelar y nuclear fue interpretada como parte de un escenario evolutivo en el que las interacciones canalizan gas hacia el centro, promoviendo la formación estelar circunnuclear y eventualmente alimentando al agujero negro supermasivo.

De la misma forma, Ellison et al. (2008) realizó un análisis estadístico sobre una muestra de galaxias del SDSS y concluyeron que los pares de galaxias con separaciones proyectadas pequeñas presentan tanto un exceso de formación estelar como una mayor probabilidad de albergar AGNs. Estudios un poco más recientes como Weston et al. (2017), utilizando simulaciones hidrodinámicas, mostraron que las interacciones pueden conducir simultáneamente a acumulaciones de gas frío hacia el centro de las galaxias, activando tanto la formación estelar como el AGN, con un desfase temporal corto entre ambos procesos.

Finalmente se compara la fracción de AGNs poderosos en función del índice espectral $D_n(4000)$, una medida sensible a la edad de la población estelar en las galaxias. Se observa que la muestra en general de pares no presenta diferencias significativas respecto a la muestra de control. Sin embargo al centrarse en pares más cercanos, se identifica una leve tendencia a una fracción mayor de AGNs poderosos en galaxias con poblaciones estelares más jóvenes.

Esta leve discrepancia entre los cambios de color y $D_n(4000)$ puede interpretarse como una consecuencia de la distinta sensibilidad temporal de ambos indicadores: mientras el color responde rápidamente a la presencia de poblaciones estelares jóvenes, el índice $D_n(4000)$ está dominado por la contribución de estrellas viejas y se ve menos afectado por episodios recientes. Por lo que los resultados sugieren que la interacción puede detonar procesos de acreción y formación estelar, sin alterar de forma significativa la edad promedio de la población estelar dominante. Este comportamiento ha sido reportado en simulaciones (Moreno et al., 2015; Torrey et al., 2012) que muestran como los brotes de formación estelar inducidos por interacción suelen ser rápidos y localizados.

4.2. Pares AGN-AGN

En el contexto de la evolución galáctica, las fusiones e interacciones entre galaxias desempeñan un papel fundamental en la transformación morfológica, en la regulación de la formación estelar y en la activación de los núcleos. En este ámbito, resulta particularmente interesante el estudio de los denominados *dual AGNs*, sistemas en los que ambas galaxias de un par presentan evidencia de actividad nuclear.

La presencia de dos núcleos activos ofrece una oportunidad única para estudiar los efectos de las interacciones sobre la acreción hacia los agujeros negros. Los AGNs duales representan una fase transitoria en la que ambos SMBHs han sido activados antes de su eventual coalescencia.

Diversos trabajos han identificado que la probabilidad de detectar un sistema con AGNs dobles aumenta significativamente con la cercanía física entre galaxias. Es decir, la mayoría de AGNs duales se encuentra en sistemas con evidentes signos morfológicos de interacción y separaciones proyectadas pequeñas (Koss et al., 2012; Ellison et al., 2011; Satyapal et al., 2014; Liu et al., 2011; Comerford et al., 2015). Estos sistemas representan una fase crítica en el proceso de fusión, en donde se cree que debido a la redistribución de gas inducida por las fuerzas de marea durante la interacción alimenta simultáneamente a ambos SMBHs.

Considerando que las interacciones son comunes, la detección de pares de AGNs debería ser relativamente común en el universo, sin embargo, los AGNs duales representan solo un pequeño porcentaje. Desde el punto de vista observacional, los AGNs dobles son difíciles de identificar debido a la superposición de líneas espectrales y a la necesidad de alta resolución espacial para separar los núcleos. Se ha sugerido que la frecuencia de AGNs duales podría estar subestimada en catálogos ópticos debido a la dificultad de detección en ciertas fases de la fusión o al oscurecimiento por polvo (Satyapal et al., 2017). De la misma forma, Yu

et al. (2011) propone que la baja frecuencia observada de estos sistemas -a pesar de la alta tasa de fusiones galácticas- es consistente con escenarios en los cuales la actividad nuclear significativa se desencadena únicamente cuando los progenitores son ricos en gas, albergan agujeros negros lo suficientemente masivos y están con separaciones lo suficientemente pequeñas. Además la ventana temporal en la que ambos AGNs están activos simultáneamente es estrecha, lo que limita aún más su detección (Van Wassenhove et al., 2012; Blecha et al., 2013).

Esta visión teórica/observacional se complementa con simulaciones hidrodinámicas. Estas han demostrado que este tipo de sistemas emergen de manera natural en etapas intermedias/tardías de una fusión mayor, cuando el gas frío es canalizado hacia los núcleos debido a perturbaciones gravitacionales inducidas por la interacción (Capelo et al., 2017; Van Wassenhove et al., 2012). Dichos estudios predicen que la actividad dual puede ocurrir a distancias entre decenas de kiloparsecs y subkiloparsecs, aunque no necesariamente ambas componentes estarán activas durante toda la interacción.

Los AGNs duales presentan gran relevancia en el contexto cosmológico, ya que aquellos con pocos kpc de separación constituyen las etapas previas a la formación de pares de SMBH compactos que eventualmente podrían desencadenar ondas gravitacionales (Volonteri et al., 2022). Por lo tanto su estudio no solo permite comprender mejor la coevolución de fusiones de galaxias y agujeros negros, sino también explorar la conexión entre la actividad nuclear y la evolución dinámica de estos sistemas.

En esta sección se analizarán los sistemas donde ambos miembros del par presentan un agujero negro activo. Esto con el objetivo de estudiar sus propiedades físicas y compararlas con aquellos con pares donde solo uno de los componentes es un AGN. Este análisis permite una visión más completa del impacto de las interacciones sobre la alimentación del SMBH

e investigar posibles factores que determinan una activación dual frente a una activación individual en pares de galaxias.

A partir del catálogo de 3048 pares de galaxias construidos para este estudio, se identificaron 464 núcleos activos, correspondientes a 232 sistemas en los cuales ambas galaxias albergan un AGN. Lo cual representa un 15 % de la muestra total. Estos pares con doble AGN representan un subconjunto de particular interés, ya que permiten investigar de forma directa la actividad nuclear simultánea en ambientes interactuantes. En la Fig. 4.6 se examinó la distribución de la luminosidad en [OIII]. Se encontró que los pares con doble AGN exhiben valores de Lum[OIII] sistemáticamente más altos en comparación con el resto de la muestra de AGNs en pares, lo cual sugiere una posible intensificación de la actividad nuclear cuando ambos miembros del par presentan núcleos activos.

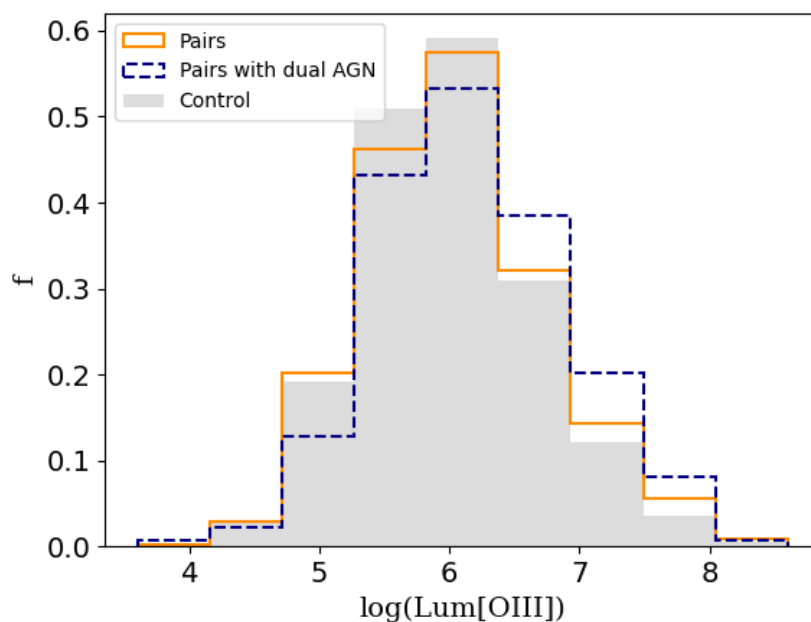


Figura 4.6: Distribución de Lum[OIII] para pares con un único AGN (línea continua) y pares con dos AGN (línea discontinua).

Al examinar la submuestra de pares AGN-AGN, se observa que aproximadamente la mitad corresponde a pares cercanos (44 %), definidos como aquellos con una separación proyectada menor a 25kpc/h, mientras que la otra mitad (56 %) se distribuye en distancias proyectadas moderadas (25-100 kpc/h). En la tabla 4.2 se observa que, a pesar que se observa un aumento en el porcentaje de Lum[OIII] para los pares AGN-AGN en comparación a los pares con un solo anfitrión, este aumento se ve aún más pronunciado para aquellos que se encuentran a una distancia proyectada pequeña. Esto va en concordancia con la sección anterior en donde se comenta que la separación entre las galaxias juega un papel importante. Sin embargo, esta distribución sugiere que la activación simultánea de ambos núcleos no se limita exclusivamente a interacciones muy estrechas y que puede estar influenciada por factores como la disponibilidad de gas frío (Satyapal et al., 2014), la estructura interna (Cheung et al., 2015) y el entorno global en donde se encuentran las galaxias (Hopkins et al., 2008).

	$\%Lum[OIII] > 10^{6,1}$
AGN-galaxia	44,1 % \pm 1,0
AGN-AGN	54,0 % \pm 2,3
AGN-AGN ($r_p < 25kpc/h$)	58,7 % \pm 3,4

Tabla 4.2: Porcentajes de pares de galaxias con indicadores de actividad nuclear alta.

Con el fin de explorar cómo varía la intensidad de la actividad nuclear en pares con doble AGN en función de las propiedades físicas de las galaxias, se construyó un gráfico que representa la luminosidad media de [OIII] en función de la masa estelar, el color y el índice espectral $D_n(4000)$ (Ver Fig. 4.7).

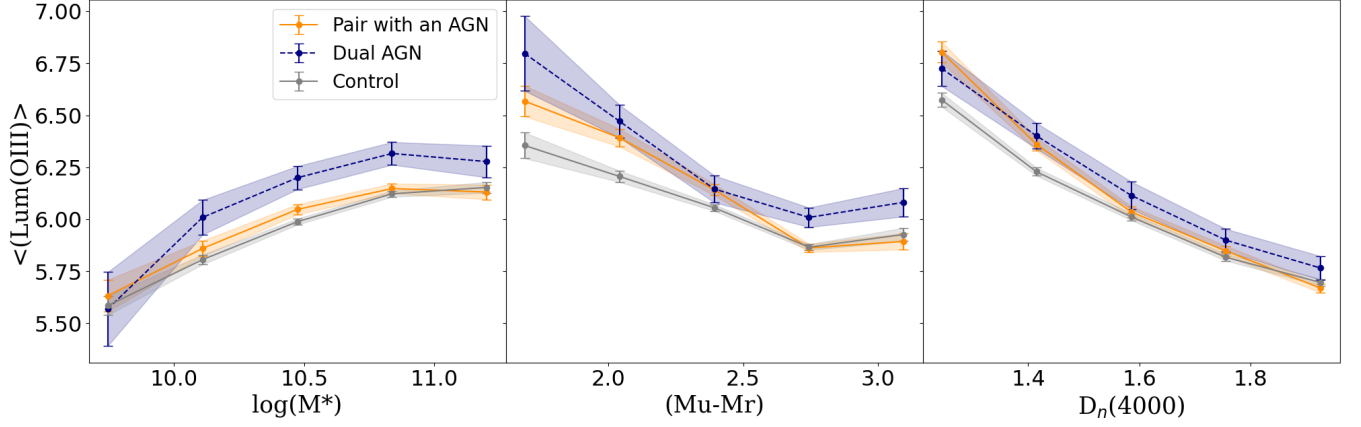


Figura 4.7: Fracción de $Lum[OIII] > 10^{6.1} L_{\odot}$ en función de la masa estelar, el color (Mu-Mr) y el parámetro $D_n(4000)$, paneles izquierdo, centro y derecho respectivamente para pares con un AGN (línea continua amarilla) y pares con dos AGN (línea azul discontinua)

Este análisis comparativo revela que los AGNs que se encuentran en compañía de otro AGN, tienden a exhibir en promedio, valores más altos de luminosidad en [OIII], que aquellos cuyos pares solo tienen uno de los miembros con núcleo activo y que la muestra de control de galaxias aisladas. Esta diferencia es más pronunciada en galaxias más masivas y de colores más azules. Lo que sugiere una posible relación entre la presencia simultánea de dos núcleos activos y condiciones físicas propicias para una mayor eficiencia de acreción. En concordancia con estos resultados, Duplancic et al. (2021) encuentra que la fracción de AGNs identificados con WISE aumenta hacia galaxias con colores más azules y poblaciones estelares más jóvenes. No obstante, al considerar el índice $D_n(4000)$, no se aprecia una diferencia clara entre ambos grupos, lo que indicaría que la edad estelar promedio de la población dominante no se ve fuertemente alterada en los sistemas de doble AGN, según esta métrica. Este resultado sigue la línea tanto para estos sistemas dobles como en los que albergan solo un AGN, donde es probable que el parámetro $D_n(4000)$ no sea sensible a los cambios esporádicos debido a la formación estelar.

En estos casos, es razonable suponer que aquellos sistemas con separaciones proyectadas pequeñas podrían haber experimentado una activación conjunta de sus núcleos como consecuencia directa de la interacción gravitacional entre las galaxias. Esta posibilidad es coherente con escenarios teóricos y observacionales en los que la fusión favorece el transporte de gas hacia el centro galáctico.

No obstante, para pares con separaciones más amplias, la influencia gravitacional mutua es menos intensa, por lo que la presencia de un AGN en ambas galaxias podría no estar relacionada directamente con la interacción, sino más bien con factores internos de la galaxia. Esto sugiere que la activación simultánea de ambos núcleos puede depender de múltiples factores, como la geometría de la interacción, el contenido de gas disponible de cada galaxia o el historial de formación previo. Estudios un poco recientes, como el de Stemo et al. (2021) encontraron que la activación de AGNs duales aumenta significativamente en separaciones entre 4 y 2 kpc, con un realce adicional en el rango de 11 a 14 kpc, particularmente en fusiones mayores. Además, observaron que las fusiones no desencadenan AGNs más luminosos, sino que los AGNs activados en sistemas con separaciones menores a 20kpc presentan distribuciones similares a las de la población general de AGNs. A partir de esto podemos deducir que es probable que las interacciones desencadenen la actividad nuclear, más no necesariamente la intensifican. De la misma manera, Fu et al. (2018) estima que entre el 60 % y 80 % de los AGNs binarios resultan de actividades correlacionadas, donde la activación de un núcleo favorece la activación del compañero, y que esta correlación aumenta a medida que disminuye la separación proyectada.

Evaluar con mayor precisión el origen de la actividad en estos casos requeriría un análisis detallado de la morfología y estructura de cada componente por separado, lo cual escapa del alcance del presente estudio. Sin embargo estudios como el de Zhang et al. (2021) han buscado precisamente ampliar el entendimiento de estos sistemas mediante la construcción

de muestras más extensas y sistemáticas de AGNs duales.

4.3. Presencia simultánea de barras y compañera

En el marco de este trabajo, se analizó de manera diferenciada el impacto de dos mecanismos propuestos para la activación de núcleos activos. Por un lado, procesos seculares internos asociados a la presencia de barras, y por otro, mecanismos externos vinculados a las interacciones entre galaxias. Motivados por esta dualidad de escenarios, se consideró de particular interés examinar casos en los que ambos mecanismos pudieran estar actuando de manera simultánea, es decir, galaxias espirales barradas con AGN que además presentan una compañera cercana.

En este estudio se identificaron 136 sistemas conformados por galaxias espirales barradas que albergan un núcleo activo y que presentan una galaxia compañera. Para esto, se tomó como base la muestra de galaxias barradas descrita en el Capítulo 3 de esta tesis, y se realizó un crossmatch con la muestra de galaxias en pares presentadas en este capítulo. De este modo, se seleccionaron aquellos casos que cumplían simultáneamente con la presencia de una barra y la de una compañera cercana. Como muestra de control utilizada en los gráficos siguientes, se mantuvo la muestra de galaxias AGN no barradas también descrita en el Capítulo 3.

Dado el número reducido de estos casos, no se aplicaron restricciones en la separaciones proyectadas entre las galaxias del sistema. Esto implica que los resultados podrían estar influenciados por la inclusión de pares que no se encuentran en una etapa avanzada de interacción. Como se discutió en la sección anterior, interacciones poco desarrolladas podrían ejercer un efecto menos significativo sobre la actividad nuclear de la galaxia principal, lo que introduce una posible limitación en la interpretación de los resultados.

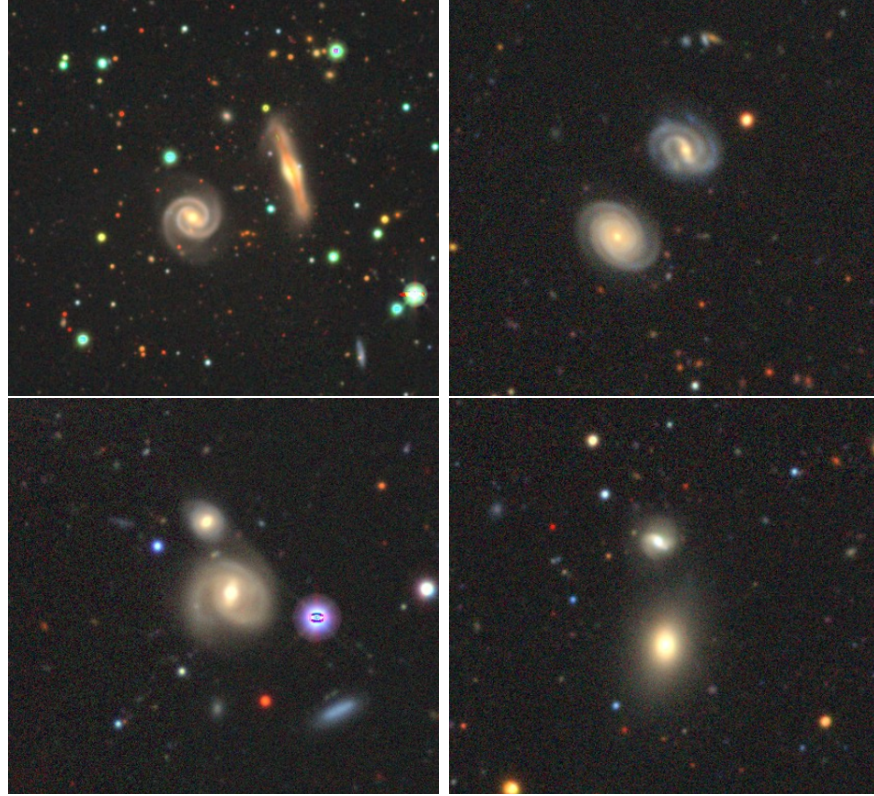


Figura 4.8: Ejemplos de pares de galaxias, una de las cuales es una espiral AGN con presencia de barra.

En la Fig. 4.8 se muestra una selección representativa de las morfologías que presentan las galaxias compañeras de espirales barradas, a distintos valores de distancia proyectada.

La Fig. 4.9 muestra la distribución de galaxias barradas en pares con respecto a la muestra de galaxias barradas aisladas en función de la $\text{Lum}[\text{OIII}]$ y la tasa de acreción \mathcal{R} .

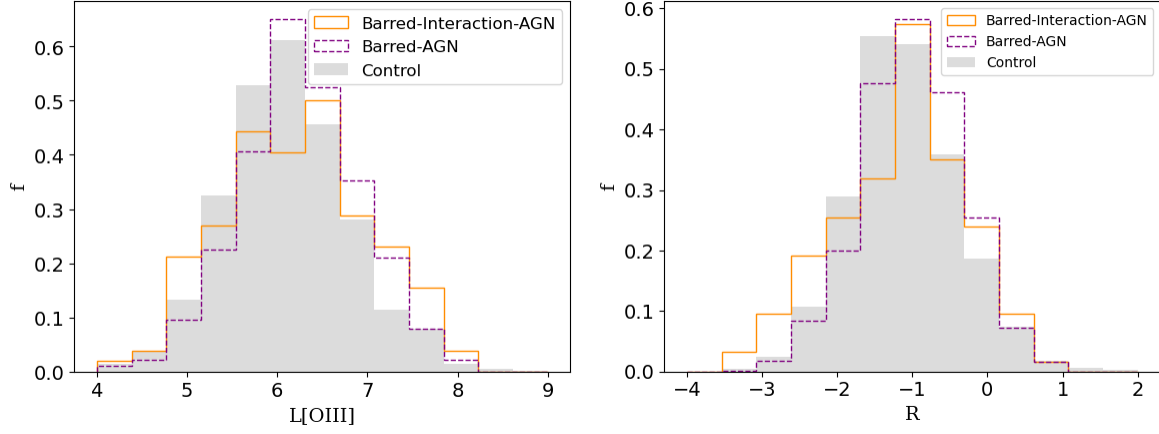


Figura 4.9: Distribución de $\log(\text{Lum}[\text{OIII}])$ y R para pares de galaxias con presencia de AGN y una barra simultáneamente.

Al comparar ambas distribuciones, no se observa una diferencia significativa en los valores de $\text{Lum}[\text{OIII}]$ ni en la tasa de acreción entre barradas en pares y aisladas. Esto sugiere que, en esta muestra la presencia de una compañera no parece potenciar de forma sistemática la actividad nuclear de las galaxias barradas. Como se explicó anteriormente, este resultado podría estar vinculado con el hecho de que muchas de las compañeras incluidas no se encuentran necesariamente con signos evidentes de fusión, lo que limita su capacidad para inducir un flujo adicional de gas hacia el núcleo.

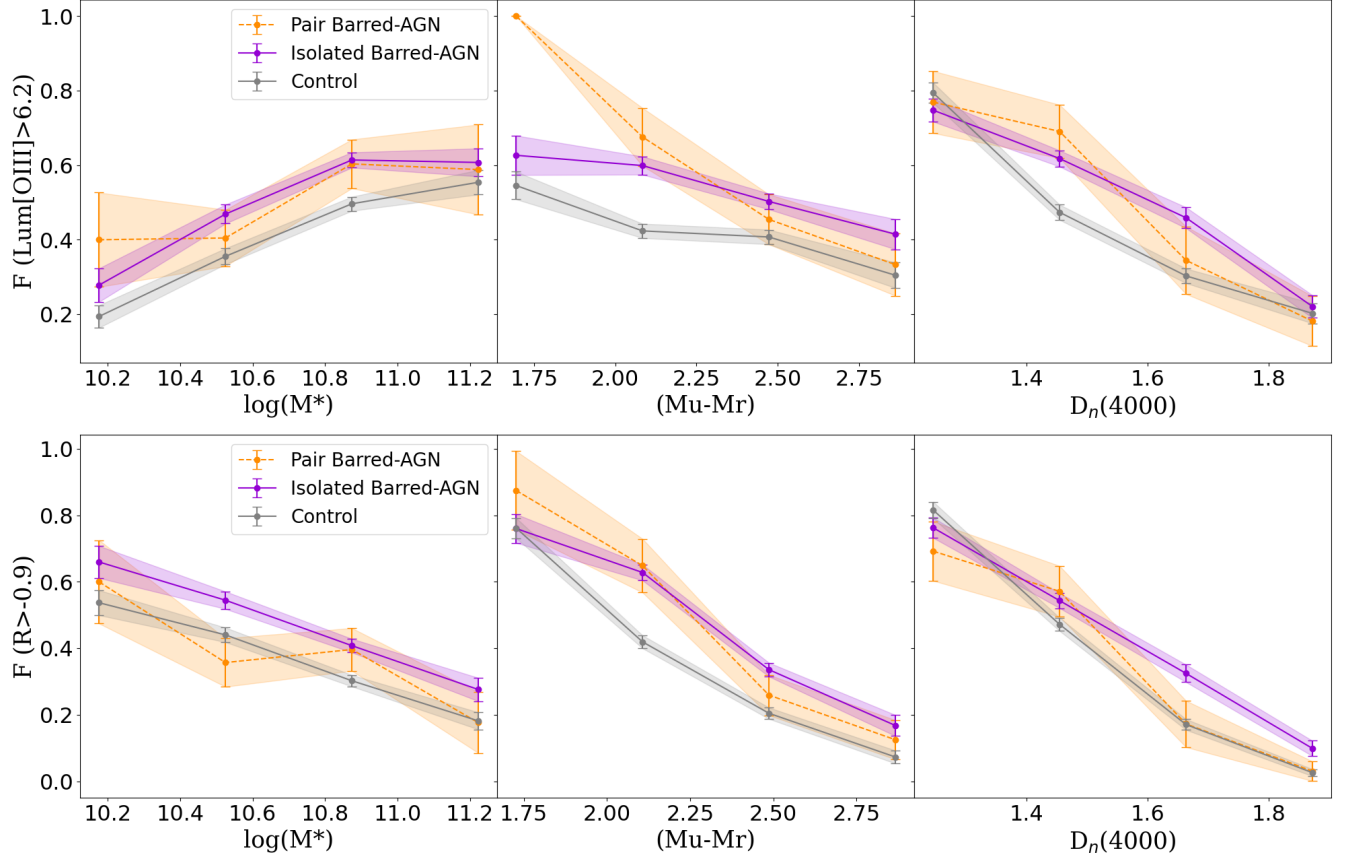


Figura 4.10: Fracción de $Lum[OIII] > 10^{6.2} L_{\odot}$ (panel superior) y $R > -0.9$ (panel inferior) en función de la masa estelar, el color $(Mu-Mr)$ y el parámetro $D_n(4000)$, paneles izquierdo, centro y derecho respectivamente para galaxias AGN barradas sin una compañera (línea continua morada), galaxias AGN barradas con una compañera (línea discontinua amarilla) y la muestra de control de AGNs no barrados.

Adicionalmente, se analizó nuevamente la fracción de AGNs poderosos -definidos como aquellos con $\log(Lum[OIII]) > 10^{6.2}$ y $R > -0.9$ (Ver Cap. 2 para más detalles) en función de las propiedades globales de las galaxias, masa estelar, color $(Mu-Mr)$ y $D_n(4000)$ (Fig. 4.10). Para ambas muestras, se mantienen las tendencias principales en todas las propiedades, no obstante, al igual que el análisis anterior, no se observaron diferencias significativas

entre las galaxias barradas en pares y barradas aisladas. Esto refuerza la idea de que, en esta muestra particular, la interacción de una compañera no modifica de manera clara las condiciones globales asociadas a la actividad nuclear en galaxias barradas. En consecuencia, podemos concluir que la actividad nuclear observada en estos sistemas, parece estar mayoritariamente asociado a la presencia de la barra, es decir, procesos seculares internos, más que al efecto del ambiente o de interacciones externas.

Este escenario es respaldado por diversos estudios recientes, Kim and Choi (2020), concluyen que en galaxias con barras prominentes, los efectos del entorno -como las interacciones con otras galaxias o la pertenencia a cúmulos- tienen un impacto menor en el disparo de la actividad nuclear. En particular, su estudio revela que el efecto más fuerte de la barra se manifiesta en entornos aislados, reforzando la idea de los resultados presentes en este trabajo, de que el mecanismo secular asociado a la barra puede ser suficiente para sostener la actividad nuclear independiente de factores externos. Esto está en concordancia con los resultados de Alonso et al. (2018), donde compararon muestras de galaxias AGN barradas aisladas y galaxias AGN en pares y concluyeron que la actividad nuclear medida por la luminosidad en [OIII] y la tasa de acreción, es sistemáticamente más intensa en galaxias barrada, que en sistemas en pares. Dando a entender que las barras son más eficientes transportando gas al centro galáctico.

Sin embargo, para explorar en mayor profundidad esta posible relación, sería necesario contar con una muestra más amplia que permita aplicar corte en la distancia proyectada y/o distinguir entre distintos tipos morfológicos de compañeras, lo que permitiría evaluar con mayor precisión el impacto de la naturaleza y la cercanía de la interacción sobre la actividad nuclear. En este sentido, Alonso et al. (2024) destaca que cuando se cumplen

dos condiciones -la presencia de una barra y la existencia de una compañera muy cercana ($r_p < 25kpc/h$)-de manera simultánea la actividad nuclear se ve significativamente intensificada. Considerando este umbral, el efecto combinado sugiere que la interacción externa, al perturbar la distribución interna del material, potencia la eficacia de la barra como mecanismo de transporte de gas hacia el núcleo. En este contexto, la interacción no actúa como factor detonante de la actividad nuclear, sino que actúa como un factor amplificador del efecto secular ya existente.

Este escenario encuentra respaldo en estudios como Moetazedian et al. (2017), donde muestran que las interacciones con satélites en galaxias disco pueden alterar significativamente el tiempo de formación de una barra, acelerando o retrasando dependiendo de la geometría orbital del encuentro. De manera complementaria, Pettitt and Wadsley (2018) encuentra que las interacciones en donde las galaxias no quedan ligadas gravitacionalmente (*fly-by*) tienden a acelerar la formación de barras en una amplia gama de modelos de galaxia disco, aunque sin modificar fuertemente sus propiedades estructurales. En este sentido, los resultados sugieren que, más allá de su rol directo en la canalización del gas, las interacciones externas podrían ejercer una influencia indirecta en la actividad nuclear al favorecer la formación temprana o más robusta de estructuras de barra, que luego operan como mecanismos de alimentación del agujero negro, coherente con el marco presentado en este trabajo.

Discusión y trabajo a futuro

En esta tesis se exploró el impacto de dos distintos mecanismos en la activación de núcleos galácticos activos (AGNs), centrándose específicamente en el rol de las barras estelares y de las interacciones entre galaxias. Para ello, se construyeron y analizaron muestras representativas de galaxias espirales barradas y no barradas, así como en sistemas en pares, considerando diversas propiedades físicas y espectrales. Dado que el trabajo abordó de forma separada estos dos escenarios -procesos seculares asociados a la presencia de barras, por un lado, y mecanismos externos vinculados a interacciones gravitacionales, por otro- las conclusiones se presentan en dos secciones diferenciadas. En primer lugar, se resumen los principales resultados obtenidos en relación con la influencia de las barras sobre la actividad nuclear; posteriormente, se exponen las conclusiones derivadas del análisis del ambiente y las interacciones galácticas.

Realizamos un análisis comparativo para determinar el impacto o la influencia que una barra puede tener en la actividad nuclear de una galaxia. Para este propósito, consideramos una muestra de AGNs construidas a partir del SDSS DR7 y una muestra de galaxias barradas clasificadas por Galaxy Zoo DECaLS. Ambas muestras fueron utilizadas para obtener una muestra final de galaxias espirales barradas con AGN. Para obtener una medida fiable de esta comparación, se construyó una muestra de control adecuada de galaxias AGN no barradas,

con características similares en redshift, masa estelar, magnitud absoluta en la banda r , índice de concentración, y en el parámetro de densidad local. El uso de Galaxy Zoo DECaLS en este estudio, ha sido fundamental debido a la profundidad y calidad de las imágenes del Dark Energy Camera Legacy Survey. Las clasificaciones morfológicas proporcionadas por miles de participantes a través de ciencia ciudadana en combinación con modelos de *deep learning*, permitió obtener acceso a un gran volumen de datos de alta precisión, lo que facilitó el análisis de propiedades morfológicas y su impacto en la actividad nuclear. Podemos resumir los principales resultados de este análisis en las siguientes conclusiones.

Se encontró que las galaxias barradas exhiben un incremento general en la actividad nuclear en comparación a sus contrapartes no-barradas. Utilizando un umbral de $Lum[OIII] > 6,2$ para distinguir los AGNs más potentes de los más débiles, se analizó la fracción de AGNs poderosos en función de la masa estelar, el color ($u-r$), y el índice $D_n(4000)$. Los resultados indican que las galaxias con mayor actividad nuclear tienden a ser más masivas, más azules y albergan una población estelar más joven. En particular, las galaxias barradas muestran un exceso de $Lum[OIII]$ en comparación con la muestra de control.

En este contexto se observa una dualidad compleja en los colores, mientras que las galaxias barradas tienden a presentar colores globales más rojos, esta tendencia se contrapone con que los AGNs más potentes en galaxias barradas suelen encontrarse en sistemas de color más azul. Esta aparente contradicción puede entenderse considerando el papel del *feedback* del AGN, que actúa como un mecanismo regulador dual. Dependiendo de las condiciones locales y temporales el *feedback* puede estimular la formación estelar o calentar y dispersar el gas inhibiendo estos episodios. En este escenario, el flujo de gas inducido por la barra no solo intensifica la actividad nuclear sino también amplifica el impacto del *feedback* del AGN y las propiedades observables en la galaxia.

También se realizó un análisis de la tasa de acreción (\mathcal{R}), el cual revela que el exceso

en este valor es más pronunciado en galaxias menos masivas, donde los AGNs barrados exhiben una mejora moderada en comparación con la muestra sin barra. Se sugiere que en las galaxias de baja masa, las barras pueden tener un efecto dinámico proporcionalmente mayor, redistribuyendo una fracción significativa de gas dentro de una región más compacta. Esta eficiencia en el transporte de gas podría mejorar el abastecimiento de combustible de los AGN, proporcionando una explicación plausible para el exceso de la tasa de acreción observado en los AGNs barrados a masas estelares más bajas. Esta interpretación se ve reforzada por el hallazgo adicional de que las galaxias barradas tienden a albergar agujeros negros de menor masa, en comparación con galaxias barradas en el mismo rango de masa estelar. Estas observaciones se alinean con lo que indican las relaciones de escala entre la masa del agujero negro y las propiedades estructurales del bulbo, proporcionando una evidencia sólida de una coevolución entre galaxias y agujeros negros. Una posible explicación a las tendencias observadas en este trabajo se encuentra en la naturaleza estructural de las galaxias barradas, que con frecuencia están asociadas a pseudobulbos en lugar de bulbos clásicos. Estos pseudobulbos (formados por procesos seculares) tienden a albergar agujeros negros menos masivos. Esta conexión entre estructura interna, masa del agujero negro y su tasa de acreción, sugiere que el contexto secular domina el régimen de crecimiento nuclear en estas galaxias.

Con base en las clasificaciones proporcionadas por Galaxy Zoo DECaLS, se exploró el aumento de la actividad nuclear diferenciando entre barras fuertes y barras débiles. Las barras fuertes, son estructuras mucho más visibles y fáciles de detectar, visualmente, abarcan una gran cantidad de la concentración de la luz en la galaxia. Por otra parte, las barras débiles tienden a ser más pequeñas y difíciles de observar. Se observó una ligera tendencia a que las barras fuertes muestren valores más altos de actividad nuclear que las barras débiles.

Por último se analizó el impacto del entorno en la actividad de los AGN. En conso-

nancia con la idea de que las barras no muestran preferencia por un entorno específico, observamos variaciones en la potencia de los AGN en función de la fuerza de las barras en diferentes entornos. Considerando el parámetro de densidad local Σ_5 , las galaxias se dividieron en ambientes de baja, media y alta densidad. Particularmente, se observó que en los entornos más extremos -ya sea regiones de baja o alta densidad- las galaxias con barras más fuertes tienden a mostrar una luminosidad media en [OIII] mayor que aquellas con barras débiles. Sin embargo esta tendencia no se observa en entornos de densidad media.

En conjunto, estos hallazgos apoyan un escenario en el cual las barras galácticas actúan como importantes factores reguladores ya que desempeñan un papel significativo en el fenómeno AGN al contribuir a la redistribución interna del gas y facilitar el abastecimiento del agujero negro supermasivo. Sin embargo, podrían no ser el factor principal, ya que otros elementos -como la disponibilidad de gas, la estabilidad de la barra y el estado evolutivo del agujero negro- también podrían influir en la actividad nuclear.

Para el análisis de las interacciones, se consideró la misma muestra de AGNs construida a partir del SDSS DR7, junto con una muestra de pares de galaxias compuesta por sistemas identificados tanto en SDSS DR7 (según catálogos de Mesa et al. (2014) y Lambas et al. (2012)) como en Galaxy Zoo DECaLS. Los pares fueron seleccionados bajo dos criterios principales: una distancia proyectada menor a 100kpc/h y una diferencia de velocidades radiales relativas inferior a 350km/s entre las galaxias del par. Posteriormente ambos catálogos fueron entrecruzados con el fin de obtener una muestra de pares en donde al menos una de las galaxias albergara un núcleo activo. Para realizar una comparación adecuada, se construyó una muestra de control compuesta por galaxias aisladas extraídas del catálogo de AGNs y se excluyeron todas aquellas galaxias que tuviesen una compañera dentro del radio

de 100kpc. Siguiendo la misma metodología empleada en el análisis anterior, se aseguró que ambas muestras fueran estadísticamente comparables en términos redshift, masa estelar, magnitud absoluta en la banda r , índice de concentración y parámetro de densidad local. A continuación se presentan las principales conclusiones derivadas de este análisis.

Uno de los principales resultados del análisis y que concuerda con múltiples trabajos previos, es la relación inversa entre la distancia proyectada y la actividad nuclear, evaluada a través de la luminosidad en la línea [OIII]. Se observó un aumento sistemático en la luminosidad de [OIII] a medida que disminuye la separación entre las galaxias del par, lo que sugiere que las interacciones más cercanas tienen un impacto más directo en el nivel de actividad del núcleo galáctico.

Se analizó la fracción de AGNs poderosos, definidos como aquellos con $Lum[OIII] > 6,1$ en función de propiedades físicas clave: masa estelar, color e índice espectral $D_n(4000)$, siguiendo el mismo enfoque utilizado en el análisis de galaxias barradas. En esta ocasión, se incorporó una submuestra de pares cercanos ($r_p < 25kpc/h$) con el objetivo de obtener una caracterización más directa del impacto de la interacción. Los resultados muestran que la fracción de AGNs poderosos aumenta en galaxias más masivas, con colores más azules y poblaciones estelares más jóvenes y en mayor medida para pares cercanos. Esto sugiere que los estallidos de formación estelar desencadenados por la interacción podrían estar relacionados con la activación nuclear. Sin embargo, al considerar el índice $D_n(4000)$, no se observaron diferencias significativas entre la muestra de pares y la de galaxias aisladas, lo que indica que este parámetro no es tan sensible para discriminar efectos de interacción en esta muestra.

En cuanto a la tasa de acreción, no se encontró correlación clara entre esta y la presencia de una compañera cercana. A diferencia de lo observado en el análisis de galaxias barradas, en este caso la interacción no parece tener un efecto significativo sobre la eficiencia de

acreción del agujero negro. Esto posiblemente se deba a que el impacto en la tasa de acreción se manifiesta en etapas post-fusión, escenario que no fue abordado en este estudio. Además la muestra analizada presenta una tendencia hacia agujeros negros más masivos, los cuales tienden a acretar con menor eficiencia. Esto contrasta el caso de las barradas, donde se observó un exceso de acreción asociado a agujeros negros de menor masa. En este contexto, los resultados sugieren que la interacción por si sola no es suficiente para aumentar la tasa de acreción.

También se realizó un análisis específico para los pares AGN-AGN, es decir aquellos en los que ambas galaxias del sistema presentan núcleos activos. Siguiendo el mismo análisis aplicado a los pares AGN-no-AGN, se evaluó la $L_{\text{[OIII]}}$ en función de distintas propiedades. Los resultados muestran que los pares AGN-AGN exhiben un exceso sistemático en la luminosidad de [OIII] en comparación a los pares en los que solo una de las galaxias alberga un AGN. Este comportamiento sugiere que la coexistencia de dos AGNs podría estar asociada una interacción más intensa o simultánea que promueve el flujo de gas hacia el centro de ambas galaxias. Sin embargo, algunos pares AGN-AGN tienen separaciones proyectadas moderadas, lo que indica que no todas las activaciones están ligadas a la interacción, por lo que otros factores podrían desempeñar un papel relevante en el fenómeno AGN.

Finalmente, se examinó el caso de galaxias en pares en las que el AGN se encuentra en una galaxia barrada, con el objetivo de evaluar si la presencia simultánea de estos fenómenos potenciaba la actividad nuclear. No se observaron diferencias significativas entre galaxias barradas con AGN en interacción y aquellas barradas aisladas. Esto sugiere que, en estos sistemas, la presencia de la barra constituye el principal mecanismo regulador de la actividad nuclear, por sobre la influencia que pueda ejercer la interacción externa.

A lo largo de este trabajo se ha evidenciado que tanto las estructuras internas como los

procesos externos, desempeñan un papel fundamental en la activación o intensificación de la actividad en los núcleos galácticos. Si bien la actividad nuclear puede depender de múltiples factores, las barras y las interacciones surgen como mecanismos relevantes para canalizar el gas hacia el centro de la galaxia y promover la actividad del agujero negro.

Si contrastamos ambos escenarios, los resultados indican que los efectos inducidos por procesos seculares, como los originados por la presencia de una barra, tienen un peso más determinante y sostenido que aquellos generados por interacciones externas. Las barras demuestran ser altamente eficientes para redistribuir el gas interno y alimentar al núcleo, incluso en ausencia de perturbaciones externas. Mientras que el impacto de las interacciones parece más dependiente de condiciones específicas, como la cercanía del par, el momento evolutivo del sistema o la cantidad de gas de las galaxias. En este sentido, la evolución interna guiada por barras, se posiciona como un factor clave en la comprensión del fenómeno AGN, por sobre efectos asociados a la interacción.

A pesar de los avances presentados en este trabajo, quedaron numerosas líneas abiertas que permitirían ampliar y profundizar sobre los mecanismos que regulan la actividad nuclear en las galaxias.

Una de las posibles líneas principales a partir de este trabajo consiste en la expansión de la muestra mediante el uso de nuevos catálogos morfológicos. Recientemente Galaxy Zoo liberó los datos de su nueva versión asociado al proyecto DESI (Dark Energy Spectroscopic Instrument), el cual contiene clasificaciones para aproximadamente 8 millones de galaxias. Su incorporación permite explorar con mayor profundidad cómo varían los mecanismos que regulan la actividad nuclear, dejando la posibilidad de acceder a un rango más amplio de masas, ambientes y redshifts.

Los resultados de esta tesis sugieren que el transporte y redistribución del gas producido

por las barras hacia el centro galáctico depende fuertemente del estado en el que se encuentre la galaxia. A fin de comprender estos procesos en su dimensión temporal, será clave complementar los estudios observacionales con simulaciones que permitan seguir la evolución conjunta de la barra y la actividad nuclear. Este enfoque posibilitaría examinar la secuencia y duración de los eventos físicos involucrados. Considerar los tiempos característicos de cada fenómeno es esencial para interpretar adecuadamente los resultados observacionales, que corresponden a un breve periodo dentro de una evolución mucho más larga.

Por otra parte, los resultados también sugieren que el impacto de las interacciones depende de la masa estelar de las galaxias involucradas, por lo que será fundamental distinguir entre fusiones mayores y menores, para evaluar como varía la eficiencia de activación del AGN en función de la relación de masas. Este enfoque permitiría refinar nuestra comprensión sobre el papel relativo de las interacciones frente a los procesos seculares.

En un futuro, será relevante extender el análisis a sistemas más complejos, como tripletes de AGN, con el fin de explorar escenarios de acreción múltiple y su posible sincronización. Estudiar estos sistemas permitiría abordar la coevolución conjunta de varios agujeros negros, evaluando con mayor profundidad la influencia del entorno.

Finalmente, para obtener una visión más completa del fenómeno AGN, será crucial integrar observaciones en distintas longitudes de onda. Una primera dirección consiste en incorporar observaciones de rayos X provenientes del satélite eROSITA, lo cual abriría la posibilidad de detectar AGNs oscurecidos o de baja luminosidad no accesibles en el óptico y evaluar con mayor robustez el impacto combinado de factores internos y externos en la actividad nuclear. Complementariamente, la inclusión de observaciones con espectroscopía integral de campo como las ofrecidas por el proyecto MaNGA, permitirá estudiar con mayor detalle las propiedades internas del gas, mapear flujos hacia el núcleo y caracterizar con precisión estructuras como barras y bulbos.

Bibliografía

- Abazajian, K. N., Adelman-McCarthy, J. K., Agüeros, M. A., Allam, S. S., Allende Prieto, C., An, D., Anderson, K. S. J., Anderson, S. F., Annis, J., and Bahcall (2009). The Seventh Data Release of the Sloan Digital Sky Survey. , 182(2):543–558.
- Abraham, R. G., Tanvir, N. R., Santiago, B. X., Ellis, R. S., Glazebrook, K., and van den Bergh, S. (1996). Galaxy morphology to $I=25$ mag in the Hubble Deep Field. , 279(3):L47–L52.
- Aguerri, J. A. L., Cuomo, V., Rojas-Roncero, A., and Morelli, L. (2023). Properties of barred galaxies with the environment. I. The case of the Virgo cluster. , 679:A5.
- Aird, J., Coil, A. L., and Kocevski, D. D. (2022). AGN accretion and black hole growth across compact and extended galaxy evolution phases. , 515(4):4860–4889.
- Aird, J., Coil, A. L., Moustakas, J., Blanton, M. R., Burles, S. M., and Cool (2012). PRIMUS: The Dependence of AGN Accretion on Host Stellar Mass and Color. , 746(1):90.
- Alexander, D. M. and Hickox, R. C. (2012). What drives the growth of black holes? , 56(4):93–121.
- Alonso, M. S., Coldwell, G., and Lambas, D. G. (2013). Effect of bars in AGN host galaxies and black hole activity. , 549:A141.

-
- Alonso, M. S., Lambas, D. G., Tissera, P., and Coldwell, G. (2007). Active galactic nuclei and galaxy interactions. , 375(3):1017–1024.
- Alonso, M. S., Tissera, P. B., Coldwell, G., and Lambas, D. G. (2004). Galaxy pairs in the 2dF survey - II. Effects of interactions on star formation in groups and clusters. , 352(3):1081–1088.
- Alonso, S., Coldwell, G., Duplancic, F., Mesa, V., and Lambas, D. G. (2018). The impact of bars and interactions on optically selected AGNs in spiral galaxies. , 618:A149.
- Alonso, S., Coldwell, G., and Lambas, D. G. (2014). AGN spiral galaxies in groups: effects of bars. , 572:A86.
- Alonso, S., Vera-Rueda, M., Coldwell, G., Duplancic, F., and Mesa, V. (2024). Barred active galactic nucleus galaxies in paired systems: Exploring the impact on nuclear activity. , 690:A273.
- Antonucci, R. (1993). Unified models for active galactic nuclei and quasars. , 31:473–521.
- Araujo, B. L. C., Storchi-Bergmann, T., Rembold, S. B., Kaipper, A. L. P., and Dall’Agnol de Oliveira, B. (2023). Nuclear activity in $z < 0.3$ QSO 2’s mainly triggered by galaxy mergers. , 522(4):5165–5179.
- Athanassoula, E. (1992). Morphology of bar orbits. , 259:328–344.
- Athanassoula, E. (2002). Bar-Halo Interaction and Bar Growth. , 569(2):L83–L86.
- Athanassoula, E. (2003). What determines the strength and the slowdown rate of bars? , 341(4):1179–1198.
-

-
- Athanassoula, E. (2005). Dynamical Evolution of Barred Galaxies. *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*, 91(1-2):9–31.
- Athanassoula, E. (2012). Manifold-driven spirals in N-body barred galaxy simulations. , 426(1):L46–L50.
- Athanassoula, E., Machado, R. E. G., and Rodionov, S. A. (2013). Bar formation and evolution in disc galaxies with gas and a triaxial halo: morphology, bar strength and halo properties. , 429(3):1949–1969.
- Athanassoula, E. and Sellwood, J. A. (1986). Bi-symmetric instabilities of the Kuz'min/Toomre disc. , 221:213–232.
- Baldwin, J. A., Phillips, M. M., and Terlevich, R. (1981). Classification parameters for the emission-line spectra of extragalactic objects. , 93:5–19.
- Balogh, M. L., Baldry, I. K., Nichol, R., Miller, C., Bower, R., and Glazebrook, K. (2004). The Bimodal Galaxy Color Distribution: Dependence on Luminosity and Environment. , 615(2):L101–L104.
- Balogh, M. L., Morris, S. L., Yee, H. K. C., Carlberg, R. G., and Ellingson, E. (1999). Differential Galaxy Evolution in Cluster and Field Galaxies at $z \sim 0.3$. , 527(1):54–79.
- Bamford, S. P., Nichol, R. C., Baldry, I. K., Land, K., Lintott, C. J., Schawinski, K., Slosar, A., Szalay, A. S., Thomas, D., Torki, M., Andreescu, D., Edmondson, E. M., Miller, C. J., Murray, P., Raddick, M. J., and Vandenberg, J. (2009). Galaxy Zoo: the dependence of morphology and colour on environment*. , 393(4):1324–1352.
- Barnes, J. E. and Hernquist, L. (1992). Dynamics of interacting galaxies. , 30:705–742.
-

-
- Barnes, J. E. and Hernquist, L. (1996). Transformations of Galaxies. II. Gasdynamics in Merging Disk Galaxies. , 471:115.
- Barrow, J. D., Bhavsar, S. P., and Sonoda, D. H. (1984). A bootstrap resampling analysis of galaxy clustering. , 210:19P–23P.
- Barton, E. J., Geller, M. J., and Kenyon, S. J. (2000). Tidally Triggered Star Formation in Close Pairs of Galaxies. , 530(2):660–679.
- Berentzen, I., Athanassoula, E., Heller, C. H., and Fricke, K. J. (2004). The regeneration of stellar bars by tidal interactions: numerical simulations of fly-by encounters. , 347(1):220–236.
- Berentzen, I., Shlosman, I., and Jogee, S. (2006). Stellar Bar Evolution in Cuspy and Flat-cored Triaxial CDM Halos. , 637(2):582–597.
- Best, P. N., Kauffmann, G., Heckman, T. M., Brinchmann, J., Charlot, S., Ivezić, Ž., and White, S. D. M. (2005). The host galaxies of radio-loud active galactic nuclei: mass dependences, gas cooling and active galactic nuclei feedback. , 362(1):25–40.
- Binney, J. and Merrifield, M. (1998). *Galactic Astronomy*.
- Blanton, M. R., Schlegel, D. J., Strauss, M. A., Brinkmann, J., Finkbeiner, D., Fukugita, M., Gunn, J. E., Hogg, D. W., Ivezić, Ž., Knapp, G. R., Lupton, R. H., Munn, J. A., Schneider, D. P., Tegmark, M., and Zehavi, I. (2005). New York University Value-Added Galaxy Catalog: A Galaxy Catalog Based on New Public Surveys. , 129(6):2562–2578.
- Blecha, L., Loeb, A., and Narayan, R. (2013). Double-peaked narrow-line signatures of dual supermassive black holes in galaxy merger simulations. , 429(3):2594–2616.
-

-
- Blum, R. D., Burleigh, K., Dey, A., Schlegel, D. J., Meisner, A. M., Levi, M., Myers, A. D., Lang, D., Moustakas, J., Patej, A., Valdes, F., Kneib, J.-P., Huanyuan, S., Nord, B., Olsen, K. A., Delubac, T., Saha, A., James, D., Walker, A. R., and DECaLS Team (2016). The DECam Legacy Survey. In *American Astronomical Society Meeting Abstracts #228*, volume 228 of *American Astronomical Society Meeting Abstracts*, page 317.01.
- Bournaud, F. and Combes, F. (2002). Gas accretion on spiral galaxies: Bar formation and renewal. , 392:83–102.
- Buta, R. and Combes, F. (1996). Galactic Rings. , 17:95–281.
- Buta, R. J. (2013). Galaxy Morphology. In Oswalt, T. D. and Keel, W. C., editors, *Planets, Stars and Stellar Systems. Volume 6: Extragalactic Astronomy and Cosmology*, volume 6, page 1.
- Byrne-Mamahit, S., Patton, D. R., Ellison, S. L., Bickley, R., Ferreira, L., Hani, M., Quai, S., and Wilkinson, S. (2024). Interacting galaxies in the IllustrisTNG simulations - VII: the connection between the most luminous active galactic nuclei and galaxy interactions. , 528(4):5864–5879.
- Calzetti, D., Armus, L., Bohlin, R. C., Kinney, A. L., Koornneef, J., and Storchi-Bergmann, T. (2000). The Dust Content and Opacity of Actively Star-forming Galaxies. , 533(2):682–695.
- Calçada, E. (2017). Galaxy mergers and formation. ESO. Accessed: 2024-07-15.
- Capelo, P. R., Dotti, M., Volonteri, M., Mayer, L., Bellovary, J. M., and Shen, S. (2017). A survey of dual active galactic nuclei in simulations of galaxy mergers: frequency and properties. , 469(4):4437–4454.

-
- Capelo, P. R., Volonteri, M., Dotti, M., Bellovary, J. M., Mayer, L., and Governato, F. (2015). Growth and activity of black holes in galaxy mergers with varying mass ratios. , 447(3):2123–2143.
- Charlton, J. C. and Salpeter, E. E. (1991). Galaxy Pairs in Redshift Catalogs as a Probe of Dark Matter. , 375:517.
- Cheung, E., Trump, J. R., Athanassoula, E., Bamford, S. P., Bell, E. F., Bosma, A., Cardamone, C. N., Casteels, K. R. V., Faber, S. M., Fang, J. J., Fortson, L. F., Kocevski, D. D., Koo, D. C., Laine, S., Lintott, C., Masters, K. L., Melvin, T., Nichol, R. C., Schawinski, K., Simmons, B., Smethurst, R., and Willett, K. W. (2015). Galaxy Zoo: Are bars responsible for the feeding of active galactic nuclei at $0.2 < z < 1.0$? , 447(1):506–516.
- Cisternas, M., Jahnke, K., Inskip, K. J., Kartaltepe, J., Koekemoer, A. M., Lisker, T., Robaina, A. R., Scodeggio, M., and Sheth (2011). The Bulk of the Black Hole Growth Since $z \sim 1$ Occurs in a Secular Universe: No Major Merger-AGN Connection. , 726(2):57.
- Coldwell, G. V., Pereyra, L., Alonso, S., Donoso, E., and Duplancic, F. (2017). Occurrence of LINER galaxies within the galaxy group environment. , 467(3):3338–3346.
- Combes, F. (2004). The role of bars. In Storchi-Bergmann, T., Ho, L. C., and Schmitt, H. R., editors, *The Interplay Among Black Holes, Stars and ISM in Galactic Nuclei*, volume 222, pages 383–388.
- Combes, F. and Elmegreen, B. G. (1993). Bars in early- and late-type galaxies. , 271:391–401.
- Combes, F. and Sanders, R. H. (1981). Formation and properties of persisting stellar bars. , 96:164–173.
-

-
- Comerford, J. M., Pooley, D., Barrows, R. S., Greene, J. E., Zakamska, N. L., Madejski, G. M., and Cooper, M. C. (2015). Merger-driven Fueling of Active Galactic Nuclei: Six Dual and Offset AGNs Discovered with Chandra and Hubble Space Telescope Observations. , 806(2):219.
- Conselice, C. J. (2003). The Relationship between Stellar Light Distributions of Galaxies and Their Formation Histories. , 147(1):1–28.
- Dahari, O. (1985). The Nuclear Activity of Interacting Galaxies. , 57:643.
- Davies, L. J. M., Robotham, A. S. G., Driver, S. P., Alpaslan, M., Baldry, I. K., Bland-Hawthorn, J., Brough, S., Brown, M. J. I., Cluver, M. E., Drinkwater, M. J., Foster, C., Grootes, M. W., Konstantopoulos, I. S., Lara-López, M. A., López-Sánchez, Á. R., Loveday, J., Meyer, M. J., Moffett, A. J., Norberg, P., Owers, M. S., Popescu, C. C., De Propriis, R., Sharp, R., Tuffs, R. J., Wang, L., Wilkins, S. M., Dunne, L., Bourne, N., and Smith, M. W. L. (2015). Galaxy And Mass Assembly (GAMA): the effect of close interactions on star formation in galaxies. , 452(1):616–636.
- Davis, M., Efstathiou, G., Frenk, C. S., and White, S. D. M. (1985). The evolution of large-scale structure in a universe dominated by cold dark matter. , 292:371–394.
- De Propriis, R., Conselice, C. J., Liske, J., Driver, S. P., Patton, D. R., Graham, A. W., and Allen, P. D. (2007). The Millennium Galaxy Catalogue: The Connection between Close Pairs and Asymmetry; Implications for the Galaxy Merger Rate. , 666(1):212–221.
- de Vaucouleurs, G. (1959). Classification and Morphology of External Galaxies. *Handbuch der Physik*, 53:275.
- de Vaucouleurs, G. (1963). Revised Classification of 1500 Bright Galaxies. , 8:31.
-

-
- Debattista, V. P. and Sellwood, J. A. (2000). Constraints from Dynamical Friction on the Dark Matter Content of Barred Galaxies. , 543(2):704–721.
- Dey, A., Schlegel, D. J., Lang, D., Blum, R., Burleigh, K., Fan, X., Findlay, J. R., and Finkbeiner (2019). Overview of the DESI Legacy Imaging Surveys. , 157(5):168.
- Di Matteo, P., Combes, F., Melchior, A. L., and Semelin, B. (2007). Star formation efficiency in galaxy interactions and mergers: a statistical study. , 468(1):61–81.
- Di Matteo, T., Springel, V., and Hernquist, L. (2005). Energy input from quasars regulates the growth and activity of black holes and their host galaxies. , 433(7026):604–607.
- Donley, J. L., Koekemoer, A. M., Brusa, M., Capak, P., Cardamone, C. N., Civano, F., Ilbert, O., Impey, C. D., Kartaltepe, J. S., Miyaji, T., Salvato, M., Sanders, D. B., Trump, J. R., and Zamorani, G. (2012). Identifying Luminous Active Galactic Nuclei in Deep Surveys: Revised IRAC Selection Criteria. , 748(2):142.
- Draper, A. R. and Ballantyne, D. R. (2012). A Tale of Two Populations: The Contribution of Merger and Secular Processes to the Evolution of Active Galactic Nuclei. , 751(1):72.
- Dressler, A. (1980). Galaxy morphology in rich clusters: implications for the formation and evolution of galaxies. , 236:351–365.
- Dressler, A. and Shectman, S. A. (1987). Systematics of the 4000 Angstrom Break in the Spectra of Galaxies. , 94:899.
- Du, M., Debattista, V. P., Shen, J., Ho, L. C., and Erwin, P. (2017). Black Hole Growth in Disk Galaxies Mediated by the Secular Evolution of Short Bars. , 844(2):L15.

-
- Duplancic, F., Lambas, D. G., Alonso, S., and Coldwell, G. V. (2021). AGNs in small galaxy systems: comparing the main properties of active objects in pairs, triplets, and groups. , 504(3):4389–4399.
- Ellison, S. L., Mendel, J. T., Patton, D. R., and Scudder, J. M. (2013). Galaxy pairs in the Sloan Digital Sky Survey - VIII. The observational properties of post-merger galaxies. , 435(4):3627–3638.
- Ellison, S. L., Patton, D. R., Mendel, J. T., and Scudder, J. M. (2011). Galaxy pairs in the Sloan Digital Sky Survey - IV. Interactions trigger active galactic nuclei. , 418(3):2043–2053.
- Ellison, S. L., Patton, D. R., Simard, L., and McConnachie, A. W. (2008). Galaxy Pairs in the Sloan Digital Sky Survey. I. Star Formation, Active Galactic Nucleus Fraction, and the Mass-Metallicity Relation. , 135(5):1877–1899.
- Ellison, S. L., Patton, D. R., Simard, L., McConnachie, A. W., Baldry, I. K., and Mendel, J. T. (2010). Galaxy pairs in the Sloan Digital Sky Survey - II. The effect of environment on interactions. , 407(3):1514–1528.
- Elmegreen, B. G., Elmegreen, D. M., Chromey, F. R., Hasselbacher, D. A., and Bissell, B. A. (1996). Light Profiles and Pattern Speeds for Bars in Early- and Late-Type Galaxies. , 111:2233.
- Elmegreen, D. M., Elmegreen, B. G., and Bellin, A. D. (1990). Statistical Evidence That Galaxy Companions Trigger Bars and Change the Spiral Hubble Type. , 364:415.
- Emsellem, E., Greusard, D., Combes, F., Friedli, D., Leon, S., Pécontal, E., and Wozniak,

-
- H. (2001). Dynamics of embedded bars and the connection with AGN. I. ISAAC/VLT stellar kinematics. , 368:52–63.
- Erwin, P. (2004). Double-barred galaxies. I. A catalog of barred galaxies with stellar secondary bars and inner disks. , 415:941–957.
- Erwin, P. (2018). The dependence of bar frequency on galaxy mass, colour, and gas content - and angular resolution - in the local universe. , 474(4):5372–5392.
- Erwin, P. and Debattista, V. P. (2016). Caught in the Act: Direct Detection of Galactic Bars in the Buckling Phase. , 825(2):L30.
- Eskridge, P. B., Frogel, J. A., Pogge, R. W., Quillen, A. C., Davies, R. L., DePoy, D. L., Houdashelt, M. L., Kuchinski, L. E., Ramírez, S. V., Sellgren, K., Terndrup, D. M., and Tiede, G. P. (2000). The Frequency of Barred Spiral Galaxies in the Near-Infrared. , 119(2):536–544.
- Fabian, A. C. (2012). Observational Evidence of Active Galactic Nuclei Feedback. , 50:455–489.
- Ferrarese, L. and Merritt, D. (2000). A Fundamental Relation between Supermassive Black Holes and Their Host Galaxies. , 539(1):L9–L12.
- Fu, H., Steffen, J. L., Gross, A. C., Dai, Y. S., Isbell, J. W., Lin, L., Wake, D., Xue, R., Bizyaev, D., and Pan, K. (2018). SDSS-IV MaNGA: Galaxy Pair Fraction and Correlated Active Galactic Nuclei. , 856(2):93.
- Gabor, J. M., Impey, C. D., Jahnke, K., Simmons, B. D., Trump, J. R., Koekemoer, A. M., Brusa, M., Cappelluti, N., Schinnerer, E., Smolčić, V., Salvato, M., Rhodes, J. D., Mo-
-

-
- basher, B., Capak, P., Massey, R., Leauthaud, A., and Scoville, N. (2009). Active Galactic Nucleus Host Galaxy Morphologies in COSMOS. , 691(1):705–722.
- Gadotti, D. A. (2011). Secular evolution and structural properties of stellar bars in galaxies. , 415(4):3308–3318.
- Gadotti, D. A. and Dos Anjos, S. (2001). Stellar Populations, Bars and Secular Evolution in Late-Type Galaxies. In Funes, J. G. and Corsini, E. M., editors, *Galaxy Disks and Disk Galaxies*, volume 230 of *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, pages 237–238.
- Galloway, M. A., Willett, K. W., Fortson, L. F., Cardamone, C. N., Schawinski, K., Cheung, E., Lintott, C. J., Masters, K. L., Melvin, T., and Simmons, B. D. (2015). Galaxy Zoo: the effect of bar-driven fuelling on the presence of an active galactic nucleus in disc galaxies. , 448(4):3442–3454.
- Garland, I. L., Fahey, M. J., Simmons, B. D., Smethurst, R. J., Lintott, C. J., Shanahan, J., Silcock, M. S., Smith, J., Keel, W. C., Coil, A., G  ron, T., Kruk, S., Masters, K. L., O’Ryan, D., Thorne, M. R., and Wiersema, K. (2023). The most luminous, merger-free AGNs show only marginal correlation with bar presence. , 522(1):211–225.
- Gebhardt, K., Bender, R., Bower, G., Dressler, A., Faber, S. M., Filippenko, A. V., Green, R., Grillmair, C., Ho, L. C., Kormendy, J., Lauer, T. R., Magorrian, J., Pinkney, J., Richstone, D., and Tremaine, S. (2000). A Relationship between Nuclear Black Hole Mass and Galaxy Velocity Dispersion. , 539(1):L13–L16.
- G  ron, T., Smethurst, R. J., Lintott, C., Kruk, S., Masters, K. L., Simmons, B., Mantha, K. B., Walmsley, M., Garma-Oehmichen, L., Drory, N., and Lane, R. R. (2023). Galaxy Zoo: kinematics of strongly and weakly barred galaxies. , 521(2):1775–1793.
-

-
- Géron, T., Smethurst, R. J., Lintott, C., Kruk, S., Masters, K. L., Simmons, B., and Stark, D. V. (2021). Galaxy zoo: stronger bars facilitate quenching in star-forming galaxies. , 507(3):4389–4408.
- Gilli, R., Comastri, A., and Hasinger, G. (2007). The synthesis of the cosmic X-ray background in the Chandra and XMM-Newton era. , 463(1):79–96.
- Graham, A. W. (2008). Fundamental Planes and the Barless $M_{BH}-\sigma$ Relation for Supermassive Black Holes. , 680(1):143–153.
- Greene, J. E. and Ho, L. C. (2007). A New Sample of Low-Mass Black Holes in Active Galaxies. , 670(1):92–104.
- Heckman, T. M. (1980). An Optical and Radio Survey of the Nuclei of Bright Galaxies - Activity in the Normal Galactic Nuclei. , 87:152.
- Heckman, T. M. and Best, P. N. (2014). The Coevolution of Galaxies and Supermassive Black Holes: Insights from Surveys of the Contemporary Universe. , 52:589–660.
- Heckman, T. M., Kauffmann, G., Brinchmann, J., Charlot, S., Tremonti, C., and White, S. D. M. (2004). Present-Day Growth of Black Holes and Bulges: The Sloan Digital Sky Survey Perspective. , 613(1):109–118.
- Hernández-Ibarra, F. J., Krongold, Y., Dultzin, D., del Olmo, A., Perea, J., González, J., Mendoza-Castrejón, S., and Bitsakis, T. (2016). The incidence of nuclear activity in galaxy pairs with different morphologies (E+E), (E+S) and (S+S). , 459(1):291–309.
- Hernández-Toledo, H. M., Avila-Reese, V., Conselice, C. J., and Puerari, I. (2005). The Structural Properties of Isolated Galaxies, Spiral-Spiral Pairs, and Mergers: The Robustness of Galaxy Morphology during Secular Evolution. , 129(2):682–697.
-

-
- Hilmi, T., Minchev, I., Buck, T., Martig, M., Quillen, A. C., Monari, G., Famaey, B., de Jong, R. S., Laporte, C. F. P., Read, J., Sanders, J. L., Steinmetz, M., and Wegg, C. (2020). Fluctuations in galactic bar parameters due to bar-spiral interaction. , 497(1):933–955.
- Ho, L. C. (2008). Nuclear activity in nearby galaxies. , 46:475–539.
- Hopkins, P. F. (2012). Dynamical delays between starburst and AGN activity in galaxy nuclei. , 420(1):L8–L12.
- Hopkins, P. F., Cox, T. J., Younger, J. D., and Hernquist, L. (2009). How do Disks Survive Mergers? , 691(2):1168–1201.
- Hopkins, P. F., Hernquist, L., Cox, T. J., and Kereš, D. (2008). A Cosmological Framework for the Co-Evolution of Quasars, Supermassive Black Holes, and Elliptical Galaxies. I. Galaxy Mergers and Quasar Activity. , 175(2):356–389.
- Hopkins, P. F. and Quataert, E. (2010). How do massive black holes get their gas? , 407(3):1529–1564.
- Hopkins, P. F., Somerville, R. S., Hernquist, L., Cox, T. J., Robertson, B., and Li, Y. (2006). The Relation between Quasar and Merging Galaxy Luminosity Functions and the Merger-driven Star Formation History of the Universe. , 652(2):864–888.
- Hubble, E. P. (1926). Extragalactic nebulae. , 64:321–369.
- Jr., F. J. M. (1951). The kolmogorov-smirnov test for goodness of fit. *Journal of the American Statistical Association*, 46(253):68–78.
- Kauffmann, G. and Heckman, T. M. (2009). Feast and Famine: regulation of black hole growth in low-redshift galaxies. , 397(1):135–147.
-

-
- Kauffmann, G., Heckman, T. M., Tremonti, C., Brinchmann, J., Charlot, S., White, S. D. M., Ridgway, S. E., Brinkmann, J., Fukugita, M., Hall, P. B., Ivezić, Ž., Richards, G. T., and Schneider, D. P. (2003). The host galaxies of active galactic nuclei. , 346(4):1055–1077.
- Kauffmann, G., White, S. D. M., and Guiderdoni, B. (1993). The formation and evolution of galaxies within merging dark matter haloes. , 264:201–218.
- Kennicutt, Jr., R. C. (1998). Star Formation in Galaxies Along the Hubble Sequence. , 36:189–232.
- Kewley, L. J., Groves, B., Kauffmann, G., and Heckman, T. (2006). The host galaxies and classification of active galactic nuclei. , 372(3):961–976.
- Kewley, L. J., Heisler, C. A., Dopita, M. A., and Lumsden, S. (2001). Optical Classification of Southern Warm Infrared Galaxies. , 132(1):37–71.
- Khabiboulline, E., Steinhardt, C. L., Silverman, J. D., Ellison, S. L., and Mendel, T. (2014). Relative Influence of Galaxy Mergers and Clusters on AGN Activity. In *American Astronomical Society Meeting Abstracts #223*, volume 223 of *American Astronomical Society Meeting Abstracts*, page 250.24.
- Kim, M. and Choi, Y.-Y. (2020). The Relative Role of Bars and Galaxy Environments in AGN Triggering of SDSS Spirals. , 901(2):L38.
- Kim, T., Sheth, K., Gadotti, D. A., Lee, M. G., Zaritsky, D., Elmegreen, B. G., Athanassoula, E., and Bosma (2015). The Mass Profile and Shape of Bars in the Spitzer Survey of Stellar Structure in Galaxies (S⁴G): Search for an Age Indicator for Bars. , 799(1):99.
- Knapen, J. H., Shlosman, I., and Peletier, R. F. (2000). A Subarcsecond Resolution Near-Infrared Study of Seyfert and “Normal” Galaxies. II. Morphology. , 529(1):93–100.
-

-
- Kocevski, D. D., Onoue, M., Inayoshi, K., Trump, J. R., Arrabal Haro, P., Grazian, A., Dickinson, M., Finkelstein, S. L., Kartaltepe, J. S., Hirschmann, M., and Aird (2023). Hidden Little Monsters: Spectroscopic Identification of Low-mass, Broad-line AGNs at $z \lesssim 5$ with CEERS. , 954(1):L4.
- Kormendy, J. and Ho, L. C. (2013). Coevolution (Or Not) of Supermassive Black Holes and Host Galaxies. , 51(1):511–653.
- Kormendy, J. and Kennicutt, Jr., R. C. (2004). Secular Evolution and the Formation of Pseudobulges in Disk Galaxies. , 42(1):603–683.
- Kormendy, J. and Richstone, D. (1995). Inward Bound—The Search For Supermassive Black Holes In Galactic Nuclei. , 33:581.
- Koss, M., Mushotzky, R., Treister, E., Veilleux, S., Vasudevan, R., and Trippe, M. (2012). Understanding Dual Active Galactic Nucleus Activation in the nearby Universe. , 746(2):L22.
- Koss, M., Mushotzky, R., Veilleux, S., and Winter, L. (2010). Merging and Clustering of the Swift BAT AGN Sample. , 716(2):L125–L130.
- Krolik, J. H. (1999). *Active galactic nuclei : from the central black hole to the galactic environment*.
- Lacey, C. and Cole, S. (1993). Merger rates in hierarchical models of galaxy formation. , 262(3):627–649.
- Lackner, C. N., Silverman, J. D., Salvato, M., Kampczyk, P., Kartaltepe, J. S., Sanders, D., Capak, P., Civano, F., Halliday, C., Ilbert, O., Jahnke, K., Koekemoer, A. M., Lee, N.,
-

-
- Le Fèvre, O., Liu, C. T., Scoville, N., Sheth, K., and Toft, S. (2014). Late-Stage Galaxy Mergers in Cosmos to $z \sim 1$. , 148(6):137.
- Laine, S., Shlosman, I., Knapen, J. H., and Peletier, R. F. (2002). Nested and Single Bars in Seyfert and Non-Seyfert Galaxies. , 567(1):97–117.
- Lambas, D. G., Alonso, S., Mesa, V., and O’Mill, A. L. (2012). Galaxy interactions. I. Major and minor mergers. , 539:A45.
- Lambas, D. G., Tissera, P. B., Alonso, M. S., and Coldwell, G. (2003). Galaxy pairs in the 2dF survey - I. Effects of interactions on star formation in the field. , 346(4):1189–1196.
- Le, H. A. N. and Xue, Y. (2025). Nuclear and Star Formation Activities in Nearby Galaxies: Roles of Gas Supply and Active Galactic Nucleus Feedback. , 979(1):58.
- Le Conte, Z. A., Gadotti, D. A., Ferreira, L., Conselice, C. J., de Sá-Freitas, C., Kim, T., Neumann, J., Fragkoudi, F., Athanassoula, E., and Adams, N. J. (2024). A JWST investigation into the bar fraction at redshifts $1 \leq z \leq 3$. , 530(2):1984–2000.
- Lee, G.-H., Woo, J.-H., Lee, M. G., Hwang, H. S., Lee, J. C., Sohn, J., and Lee, J. H. (2012). Do Bars Trigger Activity in Galactic Nuclei? , 750(2):141.
- Lintott, C., Schawinski, K., Bamford, S., Slosar, A., Land, K., Thomas, D., Edmondson, E., Masters, K., Nichol, R. C., Raddick, M. J., Szalay, A., Andreescu, D., Murray, P., and Vandenberg, J. (2011). Galaxy Zoo 1: data release of morphological classifications for nearly 900 000 galaxies. , 410(1):166–178.
- Lintott, C. J., Schawinski, K., Slosar, A., Land, K., Bamford, S., Thomas, D., Raddick, M. J., Nichol, R. C., Szalay, A., Andreescu, D., Murray, P., and Vandenberg, J. (2008).
-

-
- Galaxy Zoo: morphologies derived from visual inspection of galaxies from the Sloan Digital Sky Survey. , 389(3):1179–1189.
- Liu, X., Shen, Y., Strauss, M. A., and Hao, L. (2011). Active Galactic Nucleus Pairs from the Sloan Digital Sky Survey. I. The Frequency on ~ 5 -100 kpc Scales. , 737(2):101.
- Łokas, E. L. (2020). The effect of warm gas on the buckling instability in galactic bars. , 634:A122.
- Łokas, E. L. (2021). Lopsided galactic bars. , 655:A97.
- Łokas, E. L., Ebrov, I., del Pino, A., Sybilska, A., Athanassoula, E., Semczuk, M., Gajda, G., and Fouquet, S. (2016). Tidally Induced Bars of Galaxies in Clusters. , 826(2):227.
- Lpez, I. E., Brusa, M., Bonoli, S., Shankar, F., Acharya, N., Laloux, B., Dolag, K., Georgakakis, A., Lapi, A., Ramos Almeida, C., Salvato, M., Chaves-Montero, J., Coelho, P., Daz-Garca, L. A., Fernandez-Ontiveros, J. A., Hernan-Caballero, A., Gonzalez Delgado, R. M., Marquez, I., Povic, M., Soria, R., Queiroz, C., Rahna, P. T., Abramo, R., Alcaniz, J., Benitez, N., Carneiro, S., Cenarro, J., Cristobal-Hornillos, D., Dupke, R., Ederoclite, A., Lpez-Sanjuan, C., Marın-Franch, A., Mendes de Oliveira, C., Moles, M., Sodre, L., J., Taylor, K., Varela, J., and Vazquez Ramio, H. (2023). The miniJPAS survey: AGN and host galaxy coevolution of X-ray-selected sources. , 672:A137.
- Lotz, J. M., Jonsson, P., Cox, T. J., and Primack, J. R. (2008). Galaxy merger morphologies and time-scales from simulations of equal-mass gas-rich disc mergers. , 391(3):1137–1162.
- Lotz, J. M., Primack, J., and Madau, P. (2004). A New Nonparametric Approach to Galaxy Morphological Classification. , 128(1):163–182.
- Lynden-Bell, D. (1969). Galactic Nuclei as Collapsed Old Quasars. , 223(5207):690–694.
-

-
- Marels, V., Mesa, V., Jaque Arancibia, M., Alonso, S., Coldwell, G., Damke, G., and Contreras Rojas, V. (2025). The role of bars in triggering active galactic nuclei galaxies. *arXiv e-prints*, page arXiv:2505.23958.
- Martin, G., Kaviraj, S., Devriendt, J. E. G., Dubois, Y., and Pichon, C. (2018). The role of mergers in driving morphological transformation over cosmic time. , 480(2):2266–2283.
- Martin, P. and Roy, J.-R. (1994). The Influence of Bars on the Chemical Composition of Spiral Galaxies. , 424:599.
- Masters, K. L., Nichol, R., Bamford, S., Mosleh, M., Lintott, C. J., Andreescu, D., Edmondson, E. M., Keel, W. C., Murray, P., Raddick, M. J., Schawinski, K., Slosar, A., Szalay, A. S., Thomas, D., and Vandenberg, J. (2010). Galaxy Zoo: dust in spiral galaxies. , 404(2):792–810.
- Masters, K. L., Nichol, R. C., Haynes, M. P., Keel, W. C., Lintott, C., Simmons, B., Skibba, R., Bamford, S., Giovanelli, R., and Schawinski, K. (2012). Galaxy Zoo and ALFALFA: atomic gas and the regulation of star formation in barred disc galaxies. , 424(3):2180–2192.
- Masters, K. L., Nichol, R. C., Hoyle, B., Lintott, C., Bamford, S. P., Edmondson, E. M., Fortson, L., Keel, W. C., Schawinski, K., Smith, A. M., and Thomas, D. (2011). Galaxy Zoo: bars in disc galaxies. , 411(3):2026–2034.
- McConnell, N. J. and Ma, C.-P. (2013). Revisiting the Scaling Relations of Black Hole Masses and Host Galaxy Properties. , 764(2):184.
- Méndez-Abreu, J., Costantin, L., and Kruk, S. (2023). The JWST view of the barred galaxy population in the SMACS0723 galaxy cluster. , 678:A54.
-

-
- Méndez-Abreu, J., Sánchez-Janssen, R., Aguerri, J. A. L., Corsini, E. M., and Zarattini, S. (2012). The Nature and Nurture of Bars and Disks. , 761(1):L6.
- Menéndez-Delmestre, K., Sheth, K., Schinnerer, E., Jarrett, T. H., and Scoville, N. Z. (2007). A Near-Infrared Study of 2MASS Bars in Local Galaxies: An Anchor for High-Redshift Studies. , 657(2):790–804.
- Mesa, V., Duplancic, F., Alonso, S., Coldwell, G., and Lambas, D. G. (2014). Interacting galaxies: corotating and counter-rotating systems with tidal tails. , 438(2):1784–1793.
- Mihos, J. C. and Hernquist, L. (1996). Gasdynamics and Starbursts in Major Mergers. , 464:641.
- Moetazedian, R., Polyachenko, E. V., Berczik, P., and Just, A. (2017). Effects of galaxy-satellite interactions on bar formation. , 604:A75.
- Moreno, J., Torrey, P., Ellison, S. L., Patton, D. R., Bluck, A. F. L., Bansal, G., and Hernquist, L. (2015). Mapping galaxy encounters in numerical simulations: the spatial extent of induced star formation. , 448(2):1107–1117.
- Mountrichas, G. (2023). The co-evolution of supermassive black holes and galaxies in luminous AGN over a wide range of redshift. , 672:A98.
- Méndez-Abreu, J., Costantin, L., Aguerri, J. A. L., de Lorenzo-Cáceres, A., and Corsini, E. M. (2018). The intrinsic three-dimensional shape of galactic bars. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 479(3):4172–4186.
- Nair, P. B. and Abraham, R. G. (2010). A Catalog of Detailed Visual Morphological Classifications for 14,034 Galaxies in the Sloan Digital Sky Survey. , 186(2):427–456.
-

-
- NASA (2016). Exploring active galactic nuclei. Fermi Gamma-ray Space Telescope. Accessed: 2024-07-15.
- Netzer, H. (2015). Revisiting the Unified Model of Active Galactic Nuclei. , 53:365–408.
- Neumann, J., Gadotti, D. A., Wisotzki, L., Husemann, B., Busch, G., Combes, F., Croom, S. M., Davis, T. A., Gaspari, M., Krumpe, M., Pérez-Torres, M. A., Scharwächter, J., Smirnova-Pinchukova, I., Tremblay, G. R., and Urrutia, T. (2019). The Close AGN Reference Survey (CARS). Comparative analysis of the structural properties of star-forming and non-star-forming galaxy bars. , 627:A26.
- Noguchi, M. (1987). Close encounter between galaxies - II. Tidal deformation of a disc galaxy stabilized by massive halo. , 228:635–651.
- Noguchi, M. (1988). Gas dynamics in interacting disc galaxies. , 203:259–272.
- Oh, S., Oh, K., and Yi, S. K. (2012). Bar Effects on Central Star Formation and Active Galactic Nucleus Activity. , 198(1):4.
- Osterbrock, D. E. and Ferland, G. J. (2006). *Astrophysics of gaseous nebulae and active galactic nuclei*.
- Ostriker, J. P. and Peebles, P. J. E. (1973). A Numerical Study of the Stability of Flattened Galaxies: or, can Cold Galaxies Survive? , 186:467–480.
- Padovani, P., Alexander, D. M., Assef, R. J., De Marco, B., Giommi, P., Hickox, R. C., Richards, G. T., Smolčić, V., Hatziminaoglou, E., Mainieri, V., and Salvato, M. (2017). Active galactic nuclei: what’s in a name? , 25(1):2.

-
- Pan, H.-A., Lin, L., Hsieh, B.-C., Barrera-Ballesteros, J. K., Sánchez, S. F., Hsu, C.-H., Keenan, R., Tissera, P. B., Boquien, M., Dai, Y. S., Knapen, J. H., Riffel, R., Argudo-Fernández, M., Xiao, T., and Yuan, F.-T. (2019). SDSS-IV MaNGA: Spatial Evolution of Star Formation Triggered by Galaxy Interactions. , 881(2):119.
- Pan, H.-A., Lin, L., Hsieh, B.-C., Xiao, T., Gao, Y., Ellison, S. L., Scudder, J. M., Barrera-Ballesteros, J., and Yuan (2018). The Effect of Galaxy Interactions on Molecular Gas Properties. , 868(2):132.
- Panessa, F., Chiaraluce, E., Bruni, G., Dallacasa, D., Laor, A., Baldi, R. D., Behar, E., McHardy, I., Tombesi, F., and Vagnetti, F. (2022). Hard-X-ray-selected active galactic nuclei - II. Spectral energy distributions in the 5-45 GHz domain. , 515(1):473–490.
- Patton, D. R., Carlberg, R. G., Marzke, R. O., Pritchet, C. J., da Costa, L. N., and Pellegrini, P. S. (2000). New Techniques for Relating Dynamically Close Galaxy Pairs to Merger and Accretion Rates: Application to the Second Southern Sky Redshift Survey. , 536(1):153–172.
- Patton, D. R., Torrey, P., Ellison, S. L., Mendel, J. T., and Scudder, J. M. (2013). Galaxy pairs in the Sloan Digital Sky Survey - VI. The orbital extent of enhanced star formation in interacting galaxies. , 433(1):L59–L63.
- Perez, J., Tissera, P., and Blaizot, J. (2009). Building a control sample for galaxy pairs. , 397(2):748–756.
- Peterson, B. M. (1997). *An Introduction to Active Galactic Nuclei*.
- Peterson, B. M., Ferrarese, L., Gilbert, K. M., Kaspi, S., Malkan, M. A., Maoz, D., Merritt, D., Netzer, H., Onken, C. A., Pogge, R. W., Vestergaard, M., and Wandel, A. (2004).
-

-
- Central Masses and Broad-Line Region Sizes of Active Galactic Nuclei. II. A Homogeneous Analysis of a Large Reverberation-Mapping Database. , 613(2):682–699.
- Pettitt, A. R. and Wadsley, J. W. (2018). Bars and spirals in tidal interactions with an ensemble of galaxy mass models. , 474(4):5645–5671.
- Pierce, J. C. S., Tadhunter, C., Ramos Almeida, C., Bessiere, P., Heaton, J. V., Ellison, S. L., Speranza, G., Gordon, Y., O’Dea, C., Grimmer, L., and Makrygianni, L. (2023). Galaxy interactions are the dominant trigger for local type 2 quasars. , 522(2):1736–1751.
- Rees, M. J. (1984). Black Hole Models for Active Galactic Nuclei. , 22:471–506.
- Richstone, D., Ajhar, E. A., Bender, R., Bower, G., Dressler, A., Faber, S. M., Filippenko, A. V., Gebhardt, K., Green, R., Ho, L. C., Kormendy, J., Lauer, T. R., Magorrian, J., and Tremaine, S. (1998). Supermassive black holes and the evolution of galaxies. , 385(6701):A14.
- Roberts, M. S. and Haynes, M. P. (1994). Physical Parameters along the Hubble Sequence. , 32:115–152.
- Sabater, J., Best, P. N., and Heckman, T. M. (2015). Triggering optical AGN: the need for cold gas, and the indirect roles of galaxy environment and interactions. , 447(1):110–116.
- Saha, K. and Elmegreen, B. (2018). Why Are Some Galaxies Not Barred? , 858(1):24.
- Salim, S., Rich, R. M., Charlot, S., Brinchmann, J., Johnson, B. D., Schiminovich, D., Seibert, M., Mallery, R., Heckman, T. M., Forster, K., Friedman, P. G., Martin, D. C., Morrissey, P., Neff, S. G., Small, T., Wyder, T. K., Bianchi, L., Donas, J., Lee, Y.-W., Madore, B. F., Milliard, B., Szalay, A. S., Welsh, B. Y., and Yi, S. K. (2007). UV Star Formation Rates in the Local Universe. , 173(2):267–292.
-

-
- Sanders, D. B., Soifer, B. T., Elias, J. H., Neugebauer, G., and Matthews, K. (1988). Warm Ultraluminous Galaxies in the IRAS Survey: The Transition from Galaxy to Quasar? , 328:L35.
- Sanders, R. H. and Tubbs, A. D. (1980). Gas as a tracer of barred spiral dynamics. , 235:803–820.
- Satyapal, S., Ellison, S. L., McAlpine, W., Hickox, R. C., Patton, D. R., and Mendel, J. T. (2014). Galaxy pairs in the Sloan Digital Sky Survey - IX. Merger-induced AGN activity as traced by the Wide-field Infrared Survey Explorer. , 441(2):1297–1304.
- Satyapal, S., Secrest, N. J., Ricci, C., Ellison, S. L., Rothberg, B., Blecha, L., Constantin, A., Gliozzi, M., McNulty, P., and Ferguson, J. (2017). Buried AGNs in Advanced Mergers: Mid-infrared Color Selection as a Dual AGN Candidate Finder. , 848(2):126.
- Schawinski, K., Thomas, D., Sarzi, M., Maraston, C., Kaviraj, S., Joo, S.-J., Yi, S. K., and Silk, J. (2007). Observational evidence for AGN feedback in early-type galaxies. , 382(4):1415–1431.
- Schawinski, K., Urry, C. M., Virani, S., Coppi, P., Bamford, S. P., Treister, E., Lintott, C. J., Sarzi, M., Keel, W. C., Kaviraj, S., Cardamone, C. N., Masters, K. L., Ross, N. P., Andreescu, D., Murray, P., Nichol, R. C., Raddick, M. J., Slosar, A., Szalay, A. S., Thomas, D., and Vandenberg, J. (2010). Galaxy Zoo: The Fundamentally Different Co-Evolution of Supermassive Black Holes and Their Early- and Late-Type Host Galaxies. , 711(1):284–302.
- Schmitt, H. R. (2001). The Frequency of Active and Quiescent Galaxies with Companions: Implications for the Feeding of the Nucleus. , 122(5):2243–2256.
-

-
- Schneider, P. (2015). *Extragalactic Astronomy and Cosmology: An Introduction*.
- Schweizer, F. (1982). Colliding and merging galaxies. I. Evidence for the recent merging of two disk galaxies in NGC 7252. , 252:455–460.
- Scudder, J. M., Ellison, S. L., Torrey, P., Patton, D. R., and Mendel, J. T. (2012). Galaxy pairs in the Sloan Digital Sky Survey - V. Tracing changes in star formation rate and metallicity out to separations of 80 kpc. , 426(1):549–565.
- Sellwood, J. A. (1981). Bar instability and rotation curves. , 99(2):362–374.
- Sellwood, J. A. (2014). Secular evolution in disk galaxies. *Reviews of Modern Physics*, 86(1):1–46.
- Semczuk, M., Dehnen, W., Schönrich, R., and Athanassoula, E. (2024). Pattern speed evolution of barred galaxies in TNG50. , 692:A159.
- Seo, W.-Y., Kim, W.-T., Kwak, S., Hsieh, P.-Y., Han, C., and Hopkins, P. F. (2019). Effects of Gas on Formation and Evolution of Stellar Bars and Nuclear Rings in Disk Galaxies. , 872(1):5.
- Seyfert, C. K. (1943). Nuclear Emission in Spiral Nebulae. , 97:28.
- Shah, E. A., Kartaltepe, J. S., Magagnoli, C. T., Cox, I. G., Wetherell, C. T., Vanderhoof, B. N., Calabro, A., Chartab, N., Conselice, C. J., Croton, D. J., Donley, J., de Groot, L., de la Vega, A., Hathi, N. P., Ilbert, O., Inami, H., Kocevski, D. D., Koekemoer, A. M., Lemaux, B. C., Mantha, K. B., Marchesi, S., Martig, M., Masters, D. C., McGrath, E. J., McIntosh, D. H., Moreno, J., Nayyeri, H., Pampliega, B. A., Salvato, M., Snyder, G. F., Straughn, A. N., Treister, E., and Weston, M. E. (2020). Investigating the Effect of Galaxy Interactions on the Enhancement of Active Galactic Nuclei at $0.5 < z < 3.0$. , 904(2):107.
-

-
- Shimasaku, K., Fukugita, M., Doi, M., Hamabe, M., Ichikawa, T., Okamura, S., Sekiguchi, M., and Yasuda (2001). Statistical Properties of Bright Galaxies in the Sloan Digital Sky Survey Photometric System. , 122(3):1238–1250.
- Shlosman, I., Begelman, M. C., and Frank, J. (1990). The fuelling of active galactic nuclei. , 345(6277):679–686.
- Shlosman, I., Frank, J., and Begelman, M. C. (1989). Bars within bars: a mechanism for fuelling active galactic nuclei. , 338(6210):45–47.
- Silk, J. and Rees, M. J. (1998). Quasars and galaxy formation. , 331:L1–L4.
- Silva-Lima, L. A., Martins, L. P., Coelho, P. R. T., and Gadotti, D. A. (2022). Revisiting the role of bars in AGN fuelling with propensity score sample matching. , 661:A105.
- Silverman, J. D., Kampczyk, P., Jahnke, K., Andrae, R., Lilly, S. J., Elvis, M., Civano, F., Mainieri, V., Vignali, C., Zamorani, G., Nair, P., Le Fèvre, O., de Ravel, L., Bardelli, S., Bongiorno, A., Bolzonella, M., Cappi, A., and Caputi (2011). The Impact of Galaxy Interactions on Active Galactic Nucleus Activity in zCOSMOS. , 743(1):2.
- Skibba, R. A., Masters, K. L., Nichol, R. C., Zehavi, I., Hoyle, B., Edmondson, E. M., Bamford, S. P., Cardamone, C. N., Keel, W. C., Lintott, C., and Schawinski, K. (2012). Galaxy Zoo: the environmental dependence of bars and bulges in disc galaxies. , 423(2):1485–1502.
- Smee, S. A., Gunn, J. E., Uomoto, A., Roe, N., Schlegel, D., Rockosi, C. M., Carr, M. A., Leger, F., and Dawson (2013). The Multi-object, Fiber-fed Spectrographs for the Sloan Digital Sky Survey and the Baryon Oscillation Spectroscopic Survey. , 146(2):32.

-
- Smethurst, R. J., Lintott, C. J., Simmons, B. D., Schawinski, K., Bamford, S. P., Cardamone, C. N., Kruk, S. J., Masters, K. L., Urry, C. M., Willett, K. W., and Wong, O. I. (2016). Galaxy Zoo: evidence for rapid, recent quenching within a population of AGN host galaxies. , 463(3):2986–2996.
- Sol Alonso, M., Lambas, D. G., Tissera, P., and Coldwell, G. (2006). Effects of galaxy interactions in different environments. , 367(3):1029–1038.
- Steffen, J. L., Fu, H., Brownstein, J. R., Comerford, J. M., Cruz-González, I., Sophia Dai, Y., Drory, N., Gross, A. C., Alenka Negrete, C., and Yan, R. (2023). SDSS-IV MaNGA: How Galaxy Interactions Influence Active Galactic Nuclei. , 942(2):107.
- Steinborn, L. K., Hirschmann, M., Dolag, K., Shankar, F., Juneau, S., Krumpe, M., Remus, R.-S., and Teklu, A. F. (2018). Cosmological simulations of black hole growth II: how (in)significant are merger events for fuelling nuclear activity? , 481(1):341–360.
- Stemo, A., Comerford, J. M., Barrows, R. S., Stern, D., Assef, R. J., Griffith, R. L., and Schechter, A. (2021). A Catalog of 204 Offset and Dual Active Galactic Nuclei (AGNs): Increased AGN Activation in Major Mergers and Separations under 4 kpc. , 923(1):36.
- Storchi-Bergmann, T., González Delgado, R. M., Schmitt, H. R., Cid Fernandes, R., and Heckman, T. (2001). Circumnuclear Stellar Population, Morphology, and Environment of Seyfert 2 Galaxies: An Evolutionary Scenario. , 559(1):147–156.
- Strateva, I., Ivezić, Ž., Knapp, G. R., Narayanan, V. K., Strauss, M. A., Gunn, J. E., Lupton, R. H., Schlegel, D., Bahcall, N. A., Brinkmann, J., Brunner, R. J., Budavári, T., Csabai, I., Castander, F. J., Doi, M., Fukugita, M., Györy, Z., Hamabe, M., Hennessey, G., Ichikawa, T., Kunszt, P. Z., Lamb, D. Q., McKay, T. A., Okamura, S., Racusin, J., Sekiguchi, M.,
-

-
- Schneider, D. P., Shimasaku, K., and York, D. (2001). Color Separation of Galaxy Types in the Sloan Digital Sky Survey Imaging Data. , 122(4):1861–1874.
- Struck, C. (1999). Galaxy collisions. , 321:1–137.
- Taylor, M. B. (2005). TOPCAT & STIL: Starlink Table/VOTable Processing Software. In Shopbell, P., Britton, M., and Ebert, R., editors, *Astronomical Data Analysis Software and Systems XIV*, volume 347 of *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, page 29.
- Tissera, P. B. (2000). Analysis of Star Formation in Galaxy-like Objects. , 534(2):636–649.
- Toomre, A. (1977). Theories of spiral structure. , 15:437–478.
- Toomre, A. and Toomre, J. (1972). Galactic Bridges and Tails. , 178:623–666.
- Torrey, P., Cox, T. J., Kewley, L., and Hernquist, L. (2012). The Metallicity Evolution of Interacting Galaxies. , 746(1):108.
- Trammell, G. B., Vanden Berk, D. E., Schneider, D. P., Richards, G. T., Hall, P. B., Anderson, S. F., and Brinkmann, J. (2007). The UV Properties of SDSS-Selected Quasars. , 133(4):1780–1794.
- Treister, E., Schawinski, K., Urry, C. M., and Simmons, B. D. (2012). Major Galaxy Mergers Only Trigger the Most Luminous Active Galactic Nuclei. , 758(2):L39.
- Tremaine, S., Gebhardt, K., Bender, R., Bower, G., Dressler, A., Faber, S. M., Filippenko, A. V., Green, R., Grillmair, C., Ho, L. C., Kormendy, J., Lauer, T. R., Magorrian, J., Pinkney, J., and Richstone, D. (2002). The Slope of the Black Hole Mass versus Velocity Dispersion Correlation. , 574(2):740–753.

-
- Tremonti, C. A., Heckman, T. M., Kauffmann, G., Brinchmann, J., Charlot, S., White, S. D. M., Seibert, M., Peng, E. W., Schlegel, D. J., Uomoto, A., Fukugita, M., and Brinkmann, J. (2004). The Origin of the Mass-Metallicity Relation: Insights from 53,000 Star-forming Galaxies in the Sloan Digital Sky Survey. , 613(2):898–913.
- Urry, C. M. and Padovani, P. (1995). Unified Schemes for Radio-Loud Active Galactic Nuclei. , 107:803.
- Van Rossum, G. and Drake Jr, F. L. (1995). *Python reference manual*. Centrum voor Wiskunde en Informatica Amsterdam.
- Van Wassenhove, S., Volonteri, M., Mayer, L., Dotti, M., Bellovary, J., and Callegari, S. (2012). Observability of Dual Active Galactic Nuclei in Merging Galaxies. , 748(1):L7.
- Vázquez-Mata, J. A., Hernández-Toledo, H. M., Avila-Reese, V., Herrera-Endoqui, M., Rodríguez-Puebla, A., Cano-Díaz, M., Lacerna, I., Martínez-Vázquez, L. A., and Lane, R. (2022). SDSS IV MaNGA: visual morphological and statistical characterization of the DR15 sample. , 512(2):2222–2244.
- Vera, M., Alonso, S., and Coldwell, G. (2016). Effect of bars on the galaxy properties. , 595:A63.
- Verley, S., Combes, F., Verdes-Montenegro, L., Bergond, G., and Leon, S. (2007). Star formation in isolated AMIGA galaxies: dynamical influence of bars. , 474(1):43–53.
- Volonteri, M., Pfister, H., Beckmann, R., Dotti, M., Dubois, Y., Massonneau, W., Musoke, G., and Tremmel, M. (2022). Dual AGN in the Horizon-AGN simulation and their link to galaxy and massive black hole mergers, with an excursus on multiple AGN. , 514(1):640–656.

-
- Walmsley, M. (2021). Galaxy Zoo DECaLS: Detailed Visual Morphology Measurements from Volunteers and Bayesian Deep Learning. 53:119.02.
- Walmsley, M., Lintott, C., Geron, T., Kruk, S., Krawczyk, C., Willett, K. W., Bamford, S., Kelvin, L. S., Fortson, L., Gal, Y., Keel, W., Masters, K. L., Mehta, V., Simmons, B. D., Smethurst, R., Smith, L., Baeten, E. M., and Macmillan, C. (2022). Galaxy Zoo DECaLS: Detailed visual morphology measurements from volunteers and deep learning for 314 000 galaxies. , 509(3):3966–3988.
- Wang, W. and Zhou, Z. (2025). Identification and Analysis of Galactic Bars in DESI Legacy Imaging Surveys. , 982(2):129.
- Weedman, D. W. (1977). Seyfert galaxies. , 15:69–95.
- Weston, M. E., McIntosh, D. H., Brodwin, M., Mann, J., Cooper, A., McConnell, A., and Nielsen, J. L. (2017). Incidence of WISE -selected obscured AGNs in major mergers and interactions from the SDSS. , 464(4):3882–3906.
- White, S. D. M. and Rees, M. J. (1978). Core condensation in heavy halos: a two-stage theory for galaxy formation and clustering. , 183:341–358.
- Willett, K. W., Lintott, C. J., Bamford, S. P., Masters, K. L., Simmons, B. D., Casteels, K. R. V., Edmondson, E. M., Fortson, L. F., Kaviraj, S., Keel, W. C., Melvin, T., Nichol, R. C., Raddick, M. J., Schawinski, K., Simpson, R. J., Skibba, R. A., Smith, A. M., and Thomas, D. (2013). Galaxy Zoo 2: detailed morphological classifications for 304 122 galaxies from the Sloan Digital Sky Survey. , 435(4):2835–2860.
- Yee, H. K. C. and Ellingson, E. (1995). Statistics of Close Galaxy Pairs from a Faint-Galaxy Redshift Survey. , 445:37.
-

-
- Yoon, Y., Im, M., Lee, G.-H., Lee, S.-K., and Lim, G. (2019). Observational evidence for bar formation in disk galaxies via cluster-cluster interaction. *Nature Astronomy*, 3:844–850.
- York, D. G., Adelman, J., Anderson, John E., J., Anderson, S. F., Annis, J., Bahcall, N. A., Bakken, J. A., Barkhouser, R., and Bastian (2000). The Sloan Digital Sky Survey: Technical Summary. , 120(3):1579–1587.
- Yu, Q., Lu, Y., Mohayaee, R., and Colin, J. (2011). The Low Frequency of Dual Active Galactic Nuclei versus the High Merger Rate of Galaxies: A Phenomenological Model. , 738(1):92.
- Zhang, Y.-W., Huang, Y., Bai, J.-M., Liu, X.-W., Wang, J.-g., and Dong, X.-b. (2021). A Systematic Search for Dual Active Galactic Nuclei in Merging Galaxies (ASTRO-DARING) II: First Results from Long-slit Spectroscopic Observations. , 162(6):289.