



**Universidad
de La Laguna**

Trabajo Fin de Master

OUTFLOWS DE GAS EN LAS REGIONES CENTRALES DE GALAXIAS SIN BULBO

Rubén López Pedreira

Supervisores:

Casiana Muñoz Tuñón

Jairo Mendez Abreu

Máster Universitario en Astrofísica

UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Índice

1. Resumen	6
2. Introducción	7
2.1. Tipos morfológicos de galaxias. Secuencia de Hubble	7
2.2. Galaxias sin bulbo	8
2.3. El problema de las galaxias sin bulbo para la Λ CDM.	9
2.4. La importancia del feedback negativo en las simulaciones numéricas	9
2.5. El proyecto BEARD y su contribución a entender la problemática de las galaxias sin bulbo	11
2.5.1. Espectroscopía de rendija larga con TNG	12
2.5.2. Observaciones de gran campo con INT	12
2.5.3. Fotometría de banda estrecha con LT	12
2.5.4. Espectroscopía de campo integral con GTC	13
3. La galaxia NGC 1087 y los datos de MEGARA	13
3.1. Descripción general de NGC 1087	13
3.2. Investigaciones previas sobre NCG 1087	14
4. MEGARA y su importancia en este estudio	15
4.1. Características del instrumento MEGARA	17
4.2. Reducción de datos	17
5. Metodología	18
5.1. Teselación de Voronoi	19
5.2. Librerías espectrales	20

5.3.	Sustracción del continuo estelar e identificación de las principales líneas en el espectro	20
5.4.	Ajuste multigaussiano a las líneas de emisión	21
6.	Resultados	23
6.1.	Cinemática estelar	23
6.2.	Descripción de los mapas de velocidad y dispersión de velocidades	23
6.2.1.	Estudio de las simetrías y capacidad para detectar los knots de formación estelar en nuestros mapas	24
6.3.	Análisis multigaussiano	26
6.3.1.	Análisis multigaussiano en [OIII] 5007	26
6.3.2.	Análisis multigaussiano en [OIII] 4959	29
6.3.3.	Análisis multigaussiano en [NI] 5199, 5201	31
6.3.4.	Comparación entre las librerías de Coelho y ELODIE	31
7.	Conclusiones	33
8.	Trabajos futuros	33
	Bibliografía	34

Summary

In this work we will study one of the problems that exist inside the actual conception of the Λ CDM model, the cosmological standard model. This problem is the tendency of Λ CDM to predict a number of bulgeless galaxies in the Local Universe that is hugely smaller than the given by the observations. For this matter, we will use as object of study one significant bulgeless galaxy in the Cetus constellation that belongs to this region, NGC 1087.

In recent years, a promising solution for the Λ CDM problem with the prediction of bulgeless galaxies aroused, associated to the feedback phenomena produced in the stellar formation regions or in active galactic nuclei (AGN). This feedback is due to outflows transporting material which is ejected to the system adding an extra amount of mechanical energy to it. This energy interacts with the preexisting gas of the region, being capable of heating it and quenching the stellar formation. In the last decade, hydrodynamical simulations were steadily improving by the implementation of feedback phenomena, reducing the difference between the model predictions and observations. Nevertheless, there is still a long way to the correct calibration of the correct weight of the feedback in the simulations.

We make in this work a contribution to measure the importance of the feedback in the formation of bulgeless galaxies, and for that purpose we look for dynamic features which will allow us to identify what happens in the central regions of these kind of galaxies, obtaining conclusions about their high prevalence. We will be basing the analysis in the high spectral resolution of the integral field spectrography (IFS) obtained with the MEGARA instrument installed in the GTC telescope of the Roque de los Muchachos Observatory . The spectral capability of MEGARA and the detection area of GTC are an ideal combination for detecting multiple velocity components in the emission lines of the center of the sample of galaxies observed by BEARD, project in which this study is framed.

BEARD (Bulgeless Evolution And the Rise of Disks) is a project born with the ambition of helping in the solution of the Λ CDM model problem with the prediction of bulgeless galaxies. Its objective is to analyze a sample, limited in volume, of 66 bulgeless galaxies in the Local Universe using a multidisciplinary approach (using photometry and spectroscopy) in multiple wavelengths with high resolution. BEARD has obtained observational time in two international time programs granted by the ISC, and works with four instruments installed in four telescopes of the Roque de Los Muchachos Observatory. Each one of the instruments works in a different observational methodology, each of them contributing to the completeness of the global investigation.

In the next pages we will discuss the association of the dynamical features discovered in the emission lines of the studied galaxy with outflow and feedback phenomena that are present in its central region. We will analyze the relation between the outflows of gas in explosive phenomena and the slowdown of the stellar formation observed in NGC 1087. The high spectral resolution of MEGARA is a key factor in this analysis because the studied galaxy is almost a pure disc, and in a disc the stellar movement is mainly a rotation. MEGARA is capable of provide an adequate resolution to obtain lines sufficiently free of instrumental noise to make us able to distinguish the intrinsic features of the lines.

The spectral range we have used is relatively small because of the high resolution of MEGARA, but we can see in it some important emission lines to work with, [OIII] 4959, 5007 and [NI] 5199,2001. These lines are the relevant element of our study, because we will use them to detect the gas outflows in the region associated with those emissions. In stellar formation regions we will also have emission associated to stellar creation, so the lines will not be perfect Gaussians due to the interaction of different sources in the ionized gas. The asymmetries produced are the key to identify different velocity fields in the gas movements.

Our main objective is to find the different velocity fields of the gas in the central regions of the galaxy, and for that we use a multigaussian analysis that make us able of identify those different components in the movement of the gas. To get that, we remove the stellar component of the spectra observed with MEGARA using the pPXF routine (with a previous implementation of a Voronoi tessellation to reach an adequate noise to signal ratio in our data to obtain a proper stellar fit). Next, we develop a code to search the best fit of the lines to Gaussian models up to three Gaussian elements. Once we have that, we are able to associate each of the individual fits to a different field of gas velocities.

Our results show that we are able to identify which of the multigaussian fits obtained are associated with the global rotation movement of the gas in our galaxy, and having that we can associate the rest of the fits to another kind of coherent movements of the ionized gas in the center of the galaxy. We provide also argumentations to identify the searched outflows in the other Gaussian fits.

Another of our intentions is the comparison between the performances of two different stellar libraries used in the pPXF fit, to help BEARD project to determine which of them is adequate for future works. We made the stellar fit using ELODIE and Coelho libraries, reaching similar results in the stellar velocities even when ELODIE library has a smaller resolution.

This is the first time that an outflow, probably due to stellar formation, is detected in NGC 1087, and the first step to characterize it. In future works, it will be necessary to use the high spectral resolution of MEGARA to study the geometry of the system and deproject the outflow velocity. Another important point for the future is the utilization of the HST observational data of NGC 1087. This data allow us to identify the central region with a great definition, much bigger than the one in preexisting observations, and is a necessary step to get a more precise characterization of the stellar clusters originating these outflows.

1. Resumen

Con este trabajo buscaremos conocer un poco más sobre uno de los problemas que existen dentro de la concepción actual del modelo Λ CDM, que atañe a su tendencia a subestimar enormemente el número de galaxias sin bulbo presentes en el Universo Local. Para ello utilizaremos como objeto de estudio una galaxia significativa que pertenece a esta región, NGC 1087.

Queremos encontrar rasgos dinámicos que nos permitan caracterizar qué ocurre en las zonas centrales de este tipo de galaxias y conseguir así llegar a conclusiones sobre su alta prevalencia. Nos basaremos, para ello, en la espectrografía de campo integral (IFS) de alta resolución que se obtiene del instrumento MEGARA instalado en el GTC. La capacidad espectral de MEGARA y el área de detección de GTC resultan una combinación ideal para detectar componentes múltiples de velocidad en las líneas de emisión en el centro de las galaxias a observar, que se buscarán asociar a fenómenos de outflows (expulsiones de gas) y de feedback (retroalimentación) presentes en la región. Analizaremos estas líneas de emisión y discutiremos, a partir de ellas, la relación existente entre el gas expulsado por fenómenos explosivos y la ralentización de la formación estelar que se observa en la galaxia objeto de estudio. La alta resolución de MEGARA es un factor clave debido a que la galaxia estudiada es un disco casi puro y en un disco el movimiento estelar es principalmente de rotación. MEGARA es capaz de aportar una resolución suficiente para obtener líneas suficientemente libres de ruido instrumental para permitir distinguir los rasgos intrínsecos de las mismas.

2. Introducción

2.1. Tipos morfológicos de galaxias. Secuencia de Hubble

Tras el Gran Debate de 1920 [1] se acabó aceptando que los cuerpos que hasta aquel entonces se habían llamado nebulosas eran en realidad sistemas extragalácticos, y por tanto necesitaban una caracterización específica. Los sistemas de clasificación morfológica de galaxias actuales son adaptaciones de un mismo esquema propuesto originalmente por Edwin Hubble en 1936 [3]. La secuencia de Hubble (Figura 1) es un diagrama de clasificación basado en la apariencia observable de las galaxias, y las clasifica en tres grandes grupos: elípticas, espirales normales y espirales barradas. El propio Hubble fijó originalmente varios subgrupos dentro de los principales, que con el paso de los años se han ido refinando para conseguir una mejor caracterización de las subespecies dentro de los distintos tipos [2]. A día de hoy se define también el tipo de las galaxias irregulares para encuadrar aquellas con una apariencia amorfa y que no se amoldan a ninguno de los otros.

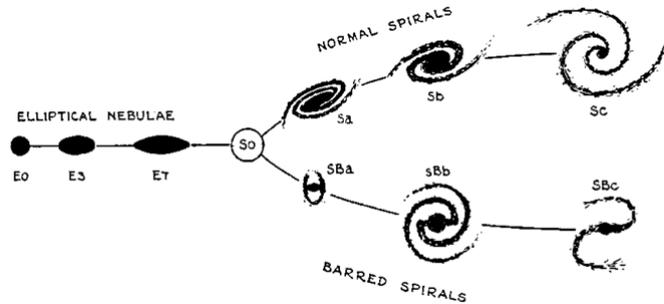


Figura 1: Diagrama de Hubble tal como fue publicado originalmente por el astrónomo estadounidense en su 'Realm of the Nebulae' [3]

Las galaxias **elípticas** suponen alrededor de un tercio de las galaxias conocidas y sus formas varían desde muy elongadas a casi circulares. Son, comparativamente, pobres en gas y polvo y están dominadas por estrellas viejas, no tienen formación estelar activa.

Las galaxias **espirales** son discos relativamente finos de estrellas, gas y polvo cuyos centros están generalmente dominados por un bulbo. Se dividen entre espirales comunes y espirales barradas y son sistemas con formación estelar activa. A medio camino entre las galaxias elípticas y las espirales existe el grupo de las galaxias **lenticulares**, que también son galaxias de disco como las segundas pero carecen de formación estelar y de brazos espirales, que son las regiones donde se produce principalmente la formación estelar en las espirales.

Por último, las galaxias **irregulares** son aquellas que (como se dijo antes) no caen dentro de la clasificación de elípticas ni de espirales. Las observaciones muestran que eran comunes sobre todo en etapas tempranas del Universo, antes de que los otros dos tipos comenzaran a desarrollarse.

2.2. Galaxias sin bulbo

La clasificación galáctica basada en el diagrama de Hubble tiene subcategorías según como sean las características diferenciadoras que presenta la galaxia a clasificar. En el caso de las galaxias de disco (espirales y lenticulares), se abarca un amplio rango que va desde galaxias dominadas por bulbo hasta aquellas en las que el sistema carece de esta estructura central. Esto nos lleva a galaxias dominadas por disco, con bulbos inexistentes o casi inexistentes, que como se verá en el siguiente apartado generan una problemática destacada en el modelo cosmológico actual.

Fue a partir de los años 60 cuando comenzó el interés por este tipo especial de galaxias [4] que presentaban la particularidad de que, a pesar de ser de disco, no mostraban signos de bulbo central al ser observadas de canto (en esta perspectiva es más sencillo comprobar la ausencia de bulbo), y debido a su apariencia fueron recibiendo comunmente el nombre de *galaxias planas*. La Figura 2 muestra un ejemplo comparativo en perspectiva edge-on entre una galaxia de disco con y sin bulbo.

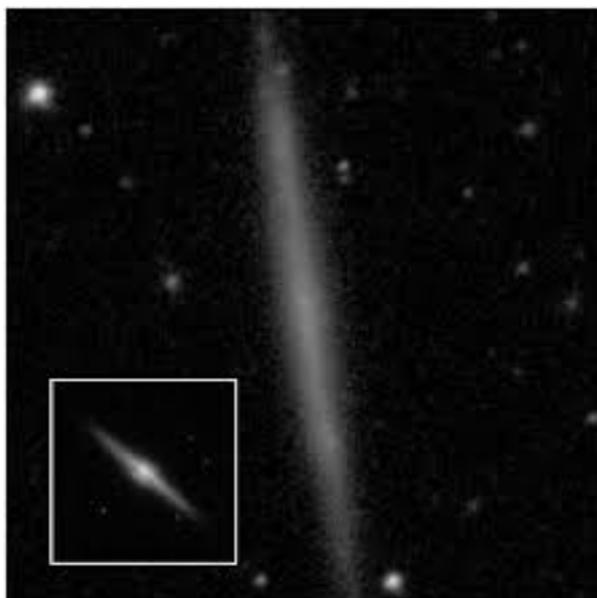


Figura 2: La galaxia sin bulbo J214439.43-064122.5 como ejemplo de galaxia dominada por disco, comparada (recuadro interno) con un galaxia con bulbo típica (J111146.36+364442.3) [8]

En general, las galaxias sin bulbo son galaxias de masa baja con poco brillo superficial, color azulado y velocidad de rotación lenta. Este tipo de sistemas tienen una incidencia destacada en el universo cercano, y las estimaciones de su prevalencia dentro del grupo de las galaxias de disco van desde aproximadamente un 20% [5] hasta un 74% [6]. Cuanto más cerca del límite superior resulte estar la fracción real, más necesario resultará solucionar el problema que suponen dentro del modelo cosmológico de consenso.

La mayoría de los trabajos estadísticos realizados hasta la fecha sobre este tipo de sistemas han sido

realizados sobre muestras de galaxias 'edge-on' (de canto) [8], proyección que permite determinar con mayor sencillez la ausencia de bulbo, pero impide analizar las propiedades cinemáticas y también buena parte de las morfológicas (como la presencia de barras, por ejemplo). Nuestro trabajo, en cambio es un estudio cinemático en galaxias con inclinaciones intermedias que permite un estudio más exhaustivo de las características internas.

2.3. El problema de las galaxias sin bulbo para la Λ CDM.

La teoría aceptada en la actualidad para regir la formación de estructuras en el Universo es el **modelo Λ CDM**[7]. Esta teoría resulta muy sólida describiendo la evolución de estructuras a escalas de Mpc, pero a escalas galácticas se cree que los procesos no lineales que implican física bariónica (como la formación estelar o el feedback) juegan papeles importantes a la hora de definir la estructura de la galaxia y eso genera problemas en la adecuación del modelo a las observaciones.

A día de hoy está bien establecido que casi todas las galaxias de masa comparable o mayor a la de la Vía Láctea experimentaron fusiones en el pasado [9]. Por ello, uno de los principales problemas a los que se enfrenta el modelo Λ CDM es el de la alta fracción de galaxias sin bulbo observadas en el universo cercano. Las simulaciones numéricas que toman como base el modelo Λ CDM predicen que, como los discos son sistemas frágiles fácilmente perturbables por fusiones, las galaxias masivas creadas mediante fusiones deberían ser galaxias elípticas o galaxias de disco con bulbos prominentes, sin embargo lo que se obtiene es un panorama bastante distinto, con alta presencia de galaxias de disco sin bulbo. Por ello, podría ser que las galaxias masivas sin bulbo existieran por no haber sufrido fusiones en el pasado y, si eso resulta ser cierto, o el modelo Λ CDM o su implementación bariónica deberían ser revisados.

2.4. La importancia del feedback negativo en las simulaciones numéricas

Una solución prometedora para el problema que acabamos de introducir se encontró en el feedback negativo producido en las regiones de formación estelar o en los núcleos galácticos activos (AGNs) [10]. Este feedback es debido a outflows que transportan material y que se eyectan sobre el sistema, aportando una energía mecánica extra al interactuar con el gas preexistente en la región que es capaz de calentarlo y frenar la formación estelar. En la última década, las simulaciones hidrodinámicas han ido mejorando con la implementación de fenómenos de feedback por supernovas o AGNs y han permitido dar un paso adelante hacia la predicción adecuada de galaxias enanas sin bulbo [11], pero por lo general los modelos que llevan a la presencia de discos sin bulbo llevan también a otras inexactitudes como la presencia de discos demasiado grandes para galaxias de masa similar a la de la Vía Láctea.

En el caso de los núcleos galácticos activos (AGN), estos son fuentes luminosas compactas que se encuentran en el centro de muchas galaxias gigantes y que se alimentan de la materia gaseosa que cae dentro de un agujero negro supermasivo. Tienen importancia porque su influencia suele definir algunas propiedades de su galaxia, como se ve por ejemplo en el acoplamiento existente entre la masa del agujero negro supermasivo y la dispersión de velocidades del esferoide central de la galaxia. El feedback de los

AGN es uno de los mecanismos que se creen responsables de limitar el crecimiento de las galaxias masivas [12].

Estos mecanismos de feedback provocados por AGNs incluyen outflows, que se creen implicados en los mecanismos de autoregulación del crecimiento de los agujeros negros supermasivos y en la extinción de la formación estelar en las regiones centrales de la galaxia. Estos outflows son un mecanismo de gran interés, pues se ha comprobado que su inclusión en las simulaciones cosmológicas mejora la adecuación a la realidad de los resultados y se desvela como pieza clave en la evolución galáctica, provocando una deceleración de formación estelar que es especialmente pronunciado para galaxias masivas, en las que se llega a observar que tomando en cuenta este efecto las simulaciones arrojan unos resultados con hasta un 20% de la masa estelar que se habría obtenido con respecto al caso sin feedback [13].

Análisis comparativos del contenido en bariones entre distintas simulaciones revela que el feedback debido a AGNs frena la formación estelar porque provoca la reducción de gas presente en el halo y a la vez previene también la acreción de gas externo, frenando los inflows. En galaxias pequeñas ($M \leq 10^9 M_\odot$) este efecto no se hace tan evidente y en ellas las simulaciones teniendo en cuenta feedback de AGNs generan resultados similares a las que se realizan sin tener en cuenta ese efecto [13].

El redshift de la galaxia también tiene relevancia. Según aumenta z , la influencia del feedback va cobrando importancia incluso para galaxias poco masivas, hasta llegar a un punto en el que el frenado en la formación estelar debido a AGNs se hace también relevante. Para ver numéricamente este efecto, algunos estudios [13] estiman que mientras para una galaxia de masa $M = 2.24 \times 10^{10} M_\odot$ el feedback se vuelve importante a $z=0.1$, para una galaxia de $M = 1.48 \times 10^9 M_\odot$ comenzaría a serlo a partir de $z=4.9$.

Otro tipo de feedback importante a tener en cuenta para las simulaciones es el generado por las supernovas, siendo este relevante sobre todo en el rango de baja masa galáctica. Este tipo de feedback es precisamente el relevante para este trabajo debido a que es el que tenemos en NGC 1087, pues la estrechez de las líneas en el espectro observado parece indicar que la galaxia no posee un AGN.

Las explosiones de supernovas también producen un calentamiento que frena la formación estelar, pero tienen peso en un rango de energías más bajo que los núcleos activos, y apartan del centro de las galaxias los bariones con bajo momento angular. Los outflows debidos a SN se observan tanto en galaxias de alto como de bajo redshift y son eficientes eliminando gas de los discos a un ritmo de varias veces la tasa de formación estelar [11].

En general, por tanto, tener en cuenta estos mecanismos de feedback contribuye a reproducir adecuadamente rasgos realistas de las galaxias en las simulaciones cosmológicas y son un añadido necesario de cara al futuro, cuyo peso e implementación estamos empezando a calibrar en estudios como este.

2.5. El proyecto BEARD y su contribución a entender la problemática de las galaxias sin bulbo

El problema de las galaxias sin bulbo dentro del modelo Λ CDM se une al hecho de que, hasta la fecha, ha habido poco progreso desde un punto de vista observacional debido a la inexistencia de estudios sistemáticos de muestras amplias de galaxias sin bulbo, y el proyecto BEARD (Bulgeless Evolution And the Rise of Disks) nace con la intención de ayudar a solucionar esta carencia (Figura3). El objetivo de BEARD es analizar una muestra limitada en volumen de 66 galaxias sin bulbo en el universo cercano de manera multidisciplinar (fotometría y espectroscopía) y para múltiples longitudes de onda con alta resolución.

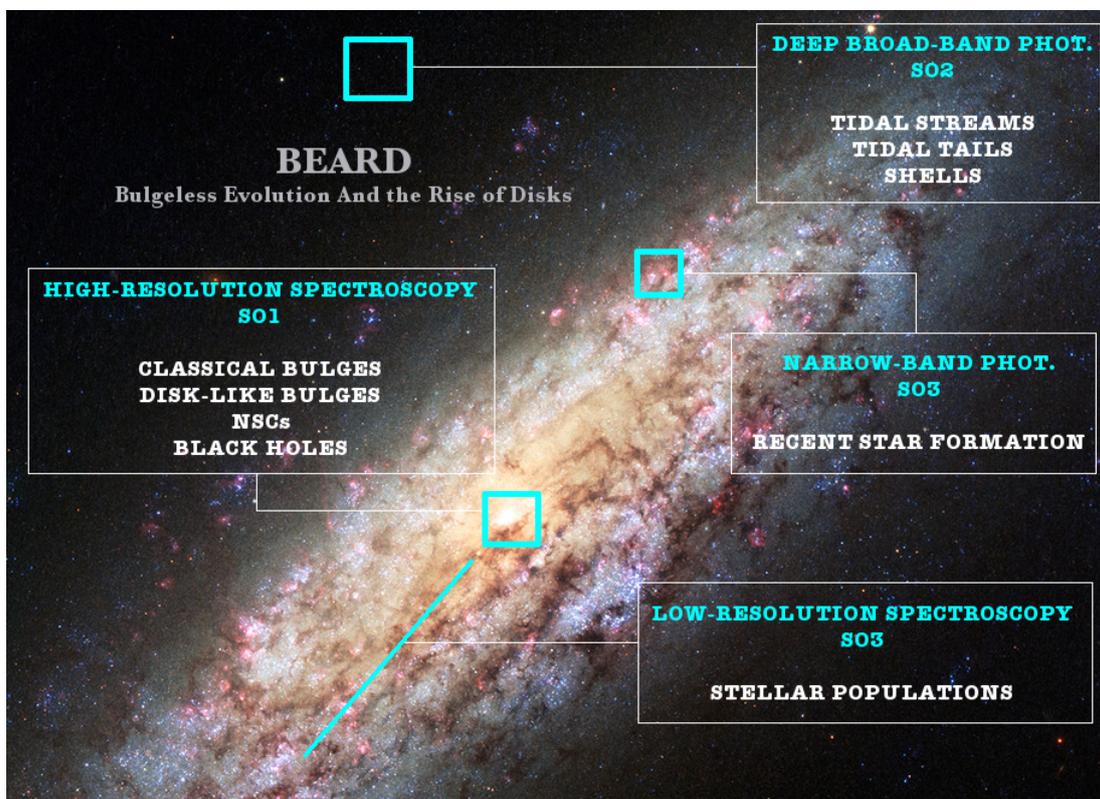


Figura 3: Presentación del proyecto BEARD. Las observaciones mutidisciplinarias y de varios rangos espectrales mostrarán el historial de fusiones pasado de las galaxias sin bulbo

Este trabajo se enmarca dentro de BEARD, una iniciativa que ha conseguido tiempo de observación a través de dos programas de tiempo internacional otorgados por el CCI y que trabaja utilizando cuatro instrumentos diferentes en cuatro telescopios situados en el ORM (GTC, TNG, Liverpool e INT), cada uno trabajando en una metodología observacional distinta (espectroscopía de rendija larga, observaciones de gran campo, fotometría de banda estrecha y espectroscopía de campo integral) y cuyas diferentes

aproximaciones al objetivo buscado contribuyen a darle completitud a la investigación. Se busca suministrar rasgos observacionales irrefutables que demuestren el éxito o el fracaso del modelo Λ CDM en escalas galácticas.

En los sucesivos apartados se describirán los principales objetivos del proyecto BEARD en función de sus observaciones.

2.5.1. Espectroscopía de rendija larga con TNG

Las poblaciones estelares a lo largo del eje mayor de las galaxias sin bulbo estudiadas serán medidas usando el espectrógrafo de baja resolución DOLORES instalado en el Telescopio Nazionale Galileo (TNG).

Los gradientes de población estelar (incluyendo edad, metalicidad...) son fundamentales para entender la ruta de formación de las galaxias, y esto se consigue mediante la espectroscopía de rendija larga a lo largo del eje mayor de las galaxias que permite realizar DOLORES. Este instrumento ofrece la combinación idónea entre el rango de longitudes de onda (que cubre los puntos donde se encuentran las líneas de absorción que se necesitan), resolución y diámetro de telescopio (para obtener suficiente relación señal-ruido) para medir poblaciones estelares.

2.5.2. Observaciones de gran campo con INT

El tamaño medio de nuestra muestra de galaxias es de $\langle R_{90} \rangle = 45$ arcsec, siendo $\langle R_{90} \rangle$ el radio que contiene el 90 % de la luz de la galaxia medido por SDSS. No obstante, el bajo brillo superficial de las estructuras observadas hace que lo ideal sea observar con métodos más allá de la fotometría de SDSS. La Wide Field Camera (WFC) instalada en el Isaac Newton Telescope aporta un campo de visión de 30×30 $arcmin^2$ y permite cubrir muchas estructuras que se pueden escapar a otro tipo de observaciones.

Las observaciones de gran campo son esenciales para caracterizar las componentes estelares en las regiones más externas, en las que el escaso brillo que producen hace necesario este tipo de aproximación. La WFC asegura cubrir todas las posibles estructuras alrededor de las galaxias así como identificar posibles puentes de marea entre galaxias vecinas.

Se utilizan dos bandas diferentes (g y r), pues resulta necesario para discernir entre estructuras reales y efectos observacionales. El objetivo es conseguir una estimación lo más certera posible de las propiedades estelares en las componentes de bajo brillo superficial alejadas del centro de las galaxias.

2.5.3. Fotometría de banda estrecha con LT

Las mediciones espacialmente resueltas de la formación estelar reciente se están obteniendo usando una combinación de filtros de banda estrecha para mapear la línea de H_α en el sistema de reposo de las galaxias. Para ello se utiliza el instrumento IO:O del Liverpool Telescope.

La medida de la luminosidad de la línea de H_α es la estrategia más utilizada para sacar la tasa de formación estelar reciente, y se puede realizar también mediante espectroscopía. No obstante, a pesar de que la espectroscopía tiene ventajas, esta técnica suele permitir cubrir una fracción demasiado pequeña del área la galaxia. La fotometría de banda estrecha tiene mayor capacidad para cubrir todo el área de las galaxias, especialmente en las zonas externas, y es eso lo que busca el proyecto.

2.5.4. Espectroscopía de campo integral con GTC

Introducimos, por último, las observaciones que serán utilizadas en este trabajo, que son las realizadas mediante el instrumento MEGARA, un espectrógrafo de alta resolución espectral instalado en el Gran Telescopio de Canarias.

La alta resolución espectral que consigue MEGARA es necesaria para entender la naturaleza de las regiones centrales de las galaxias sin bulbo y el modo IFU de MEGARA permite capturar, en un solo apuntado, los radios típicos de las zonas centrales de las galaxias de nuestra muestra (donde, en caso de existir bulbo, este dominaría la luminosidad). Para obtener medidas de alta calidad de la dispersión de velocidades en el centro de las galaxias de nuestra muestra es necesario conseguir una señal-ruido superior a un determinado umbral para cada elemento de resolución espectral, y MEGARA logra un gran rendimiento haciendo que las medidas resulten útiles para este propósito.

Debe tenerse en cuenta que los núcleos de las galaxias muestreadas son tenues y rodeados de discos de brillo más fuerte. También se espera de ellos que tengan valores bajos de dispersión de velocidad, y esa es la explicación principal de que necesitemos alta resolución (además de un telescopio suficientemente grande) para que los resultados de la derivación de la cinemática estelar sean suficientemente certeros. Debido a que observaciones de esta calidad no son fáciles de conseguir, este tipo de medidas son escasas en la literatura. MEGARA consigue un salto cualitativo, tanto en resolución como en poder de recolección de la luz, que permitirá obtener resultados fiables para los bulbos menos masivos del Universo Local.

3. La galaxia NGC 1087 y los datos de MEGARA

Las observaciones con MEGARA que forman la base de este trabajo tienen como objeto la galaxia NGC 1087 (Figura 4), una galaxia cercana dominada por disco. En esta sección nos centraremos en introducir este objeto astronómico y el instrumento utilizado en las observaciones.

3.1. Descripción general de NGC 1087

NGC 1087 es una galaxia espiral cercana situada en la constelación de Cetus, cuyo centro presenta varios brotes de formación estelar alineados. La tabla 1 muestra sus características generales. La masa estelar está calculada usando colores de SDSS calibrados a la relación masa-luminosidad tabulada en [15].

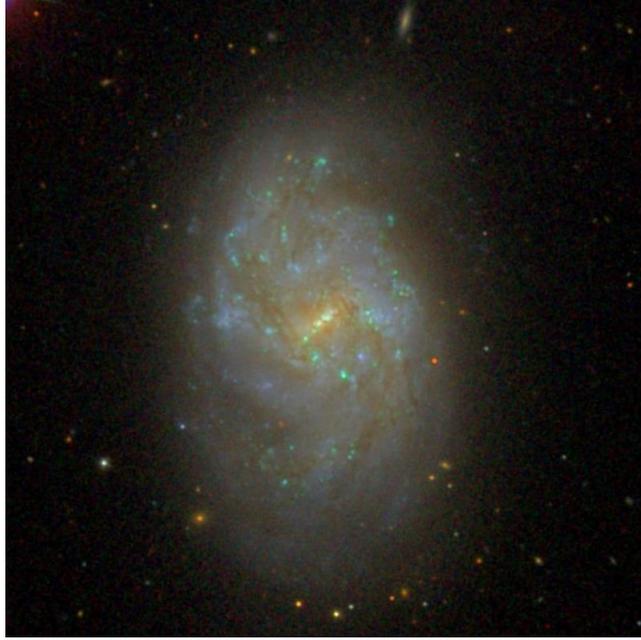


Figura 4: Imagen de NGC 1087 tomada por el proyecto SDSS.

NGC 1087						
Características generales						
Distancia [Mpc]	Masa estelar ($10^{10}M_{\odot}$)	RA [deg]	DEC [deg]	Tipo	z [14]	Magnitud (V)
19.2	1.189[15]	41.604	-0.498	SAB(rs)c	0.00508	12.2

Tabla 1: Características generales de la galaxia estudiada

Su elección, dentro de las 33 galaxias observadas con MEGARA, fue debida a que existen datos de HST que permiten apreciar que en su centro no existe un bulbo, como la imagen de SDSS (Figura 4) podría hacer creer, sino que en realidad son brotes de formación estelar como ya se mencionó. Estos brotes contienen múltiples cúmulos estelares en formación y representan un laboratorio ideal para entender y caracterizar la presencia de vientos estelares en este tipo de galaxias.

3.2. Investigaciones previas sobre NCG 1087

Haremos aquí un breve repaso a los trabajos que existen en la literatura sobre la galaxia objeto de nuestro estudio, interesándonos sobre todo aquellos referentes a sus líneas de emisión y outflows.

En el estudio de Zaragoza-Cardiel et al. (2020) [16] utilizaron a NGC 1087 dentro de su muestra de galaxias observadas con MUSE para estudiar el proceso de formación estelar en las galaxias y buscar dar

respuesta a por qué los valores de las masas galácticas estelares son consistentemente más bajos de los que salen de las simulaciones basadas en modelos cosmológicos. Este estudio explora el feedback como uno de los mecanismos involucrados en esta discrepancia y logra (estudiando espectros de regiones seleccionadas con formación estelar relevante en las galaxias y haciendo síntesis de poblaciones estelares) obtener las historias de formación estelar y analizar las densidades de formación estelar recientes y pasadas. Estudiando estos valores se encontraron correlaciones locales entre el mass-loading factor y la densidad superficial de masa estelar. También se hallaron correlaciones globales para los parámetros extrapolados a la galaxia total. Estos resultados son indicativos de que el feedback estelar, debido a supernovas, regula el crecimiento en masa galáctico especialmente en el rango de baja masa. Esto se corresponde con nuestra teoría de base para el presente trabajo, aunque su efecto en la formación de bulbos galácticos está todavía en discusión.

Más recientemente, Stuber et al. (2021) [17] utilizaron NGC 1087 en su muestra de galaxias observadas en PHANGS-ALMA para estudiar cómo los outflows de gas molecular en regiones centrales de las galaxias espirales modulan la tasa de formación estelar. Lo que realizaron fue una evaluación de los espectros centrales de diversas galaxias, evaluándolos conjuntamente con diagramas de posición-velocidad y mapas de intensidad integrada a un rango determinado de velocidades (que busca localizar la emisión en dicho rango de velocidad para compararla después con la distribución total de gas). La metodología aplicada les llevó a caracterizar 20 candidatos a tener outflows (entre los que no se encuentra NGC 1087) dentro de su muestra de 90 galaxias. Esto se traduce en una frecuencia estimada de outflows moleculares de $25 \pm 2\%$ en galaxias masivas. El resultado para nuestra galaxia en contradicción con nuestros resultados (ver sección 6.2.1) pero posiblemente se deba a la resolución espectral que utilizaron, de ahí la importancia de nuestro análisis utilizando una resolución mayor.

Por último, en términos de morfología galáctica, Gao et al. (2019) [18] publicaron un catálogo de galaxias clasificadas según la naturaleza de sus bulbos. Para ellos, NGC 1087 es una galaxia con un bulbo tipo disco que se puede ajustar como una continuación del disco utilizando una función exponencial. En este estudio trabajamos sobre la base de que la galaxia no presenta un bulbo, pues en los resultados vemos que los campos de velocidad no se corresponden con la presencia de bulbo ya que para esa región son perfectamente asociables al campo de rotación global de la galaxia en lugar de ver velocidades de rotación propios como se corresponde a los bulbos de tipo disco.

4. MEGARA y su importancia en este estudio

MEGARA (Multi-Espectrógrafo en GTC de Alta Resolución para Astronomía) es un espectrógrafo con capacidad para trabajar en régimen de campo integral (IFU) y multiobjeto(MOS), instalado en el GTC en primavera de 2017 (Figura 5).

Dentro de BEARD, lo que nos interesa hacer con la espectroscopía de campo integral es caracterizar la naturaleza de las regiones centrales galácticas, que son estructuras estelares que dominarían la luminosidad en caso de existir un bulbo. Como además queremos medir velocidades de dispersión en galaxias de tipo



Figura 5: Imagen de los componentes de MEGARA compartiendo el foco con el espectrógrafo EMIR en la plataforma Naysmith A del GTC

disco y los discos tienen un brillo superficial relativamente bajo (con caída exponencial), para que la espectroscopia pueda realizarse adecuadamente debemos usar un telescopio de tamaño suficiente. Los 10 metros de diámetro del GTC resultan idóneos, junto con la alta resolución solo alcanzable por MEGARA, para medir también la emisión, que es lo que nos resulta de interés en este estudio.

Para estudiar las líneas de emisión, es necesario detectar el gas ionizado, y de él se espera (al estar sujetos a outflows y choques) que tenga unas líneas más anchas que para el caso de la dinámica estelar. Si solo tuviéramos gas rotando conjuntamente con las estrellas tendríamos líneas más estrechas, pero los outflows generan ensanchamiento. Esto hace que para nuestro objeto de estudio la resolución de MEGARA pudiera no parecer tan importante como para la dinámica estelar, pero no es así. Ha de tenerse en cuenta que para la detección de los outflows dependemos en gran parte de su proyección en el plano del cielo.

Si los movimientos de outflow (que según nuestra hipótesis son los generadores de asimetrías en las líneas de emisión) fueran perpendiculares a nuestra línea de visión no podríamos observarlos. Todos los movimientos que vemos tienen una componente de su velocidad dirigida a lo largo de la línea de visión. En nuestros resultados medimos velocidades relativamente bajas para estos outflows en nuestra línea de visión, y eso quiere decir que probablemente los estamos viendo con una inclinación significativa. La alta resolución espectral de MEGARA será vital para conseguir caracterizar la proyección real de estos vientos en trabajos futuros. Con resoluciones espectrales más bajas, outflows importantes como los de NGC 1087 podrían perderse debido a efectos de proyección.

4.1. Características del instrumento MEGARA

El IFU de MEGARA, llamado Large Compact Bundle (LCB), cubre un campo de $12.5 \times 11.3 \text{ arcsec}^2$ usando 567 spaxels hexagonales de 0.62 arcsec, además de 56 spaxels de cielo del mismo tamaño distribuidos en 8 haces de 7 fibras situados en la zona externa del campo. El sistema MOS hace uso de un conjunto de 92 posicionadores robotizados, manejando cada uno un minihaz de 7 spaxels de también 0.62 arcsec por spaxel. Estos posicionadores se distribuyen en una región cuadrada de $3.5 \times 3.5 \text{ arcmin}^2$, que corresponde al plano focal de GTC en sus focos Cassegrain acodados.

El LCB y el MOS están montados en los focos Cassegrain acodados de GTC y las 623 fibras de LCB y las 644 de los 92 posicionadores de MOS se llevan hasta la plataforma Naysmith a lo largo de un camino de 42.5 metros hasta llegar al espectrógrafo de MEGARA, que es un sistema colimador-cámara alimentado desde LCB/MOS.

Posee, además, la opción de utilizar diversos gratings. En nuestras observaciones hemos utilizado el MR-G, con resolución $R=12000$.

4.2. Reducción de datos

El desarrollo de MEGARA dentro del GTC fue acompañado de la instalación de un pipeline de reducción de datos (DRP), desarrollado en Python.

Este DRP fue diseñado para hacerse cargo de todos los efectos asociados a las observaciones con un espectrógrafo de fibras con detección de luz por CCD. Estos efectos incluyen la eliminación del bias y la corriente de oscuridad asociada a los CCD, la extracción del flujo de cada fibra en el CCD, mejoras en la calibración de longitudes de onda en las rendijas del espectrógrafo, correcciones en la variación de sensibilidad entre las fibras y la determinación de la eficiencia del sistema.

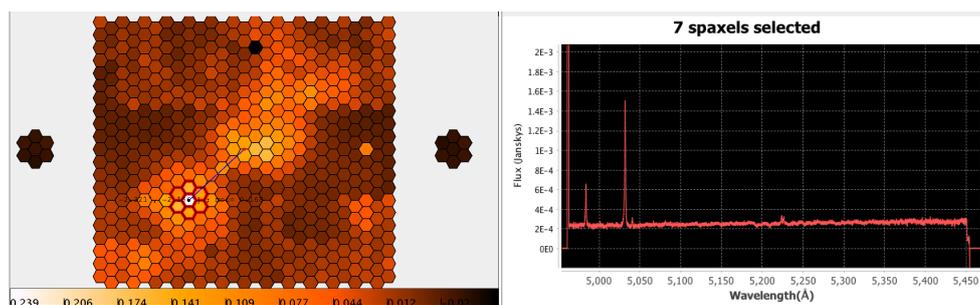


Figura 6: Observación con MEGARA de la galaxia NGC 1087, con los spaxels hexagonales. A la derecha se muestra el espectro correspondiente a los spaxels seleccionados

Los productos finales del DRP son imágenes reducidas RSS (Row-Stacked spectra) con 623 espectros para el modo LCB (que es el que nos interesa aquí). Basándose en el espectro medio para todas las fibras

asignadas a la calibración de cielo, el DRP genera un espectro RSS final sustrayendo esta cantidad.

Como se ve en la Figura 6, MEGARA tiene hexágonos como ventanas de entrada. Esto no es cómodo a la hora de ser manejado en el análisis de datos y por ello, a la hora de combinar todas las exposiciones, hemos realizado una interpolación (Figura 7) para convertir en spaxels cuadrados el mapa observacional arrojado por el instrumento. El spaxel final de nuestros cubos de datos es de 0.4 arcsec.

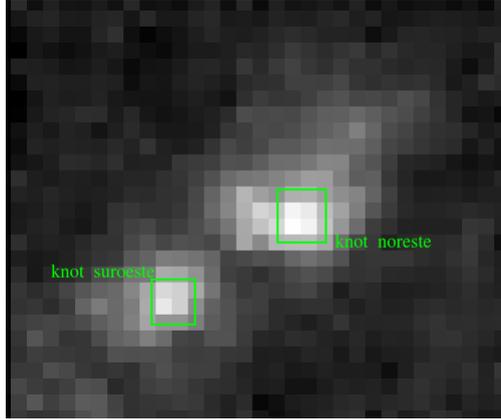


Figura 7: Interpolación a spaxels cuadrados del mapa observacional de MEGARA para NGC 1087. Se etiquetan los dos knots de formación estelar observados

5. Metodología

El rango espectral observado es relativamente pequeño debido a la alta resolución buscada, pero a pesar de todo nos permite trabajar con algunas líneas importantes como la del [OIII] 5007 en emisión. Las líneas en emisión son las relevantes en nuestro estudio del feedback, pues las utilizaremos para detectar los outflows de gas relacionados con esa emisión. Debido a que en las regiones de formación estelar tendremos también emisión asociada a la creación de estrellas, que ionizan el gas a su alrededor, en nuestros espectros las líneas observadas no serán gaussianas perfectas. La interacción entre diversos orígenes del gas ionizado hará que presenten asimetrías que pueden permitir identificar campos de velocidades diferentes, lo que dejará ver influencia entre el campo de rotación normal de la galaxia y los outflows de gas en la zona. Bajo esta idea, buscamos mapear esos campos de velocidades y medir la velocidad del sistema, lo que permitirá caracterizar los outflows en NGC 1087 y ver el peso que tiene sobre la formación estelar.

El campo de MEGARA (Figura 8) abarca la zona central de NGC 1087, y el cubo de datos con el que trabajamos tiene la información observada en esa región. Sobre ese cubo aplicaremos, como primer paso, una adaptación del programa pPXF [19]. Este es un código de ajuste espectral que resulta necesario para ajustar la componente estelar. En nuestro caso, ya que estamos interesados en analizar la componente del gas ionizado, tenemos que sustraer el continuo estelar ya que en varias regiones del espectro algunas líneas

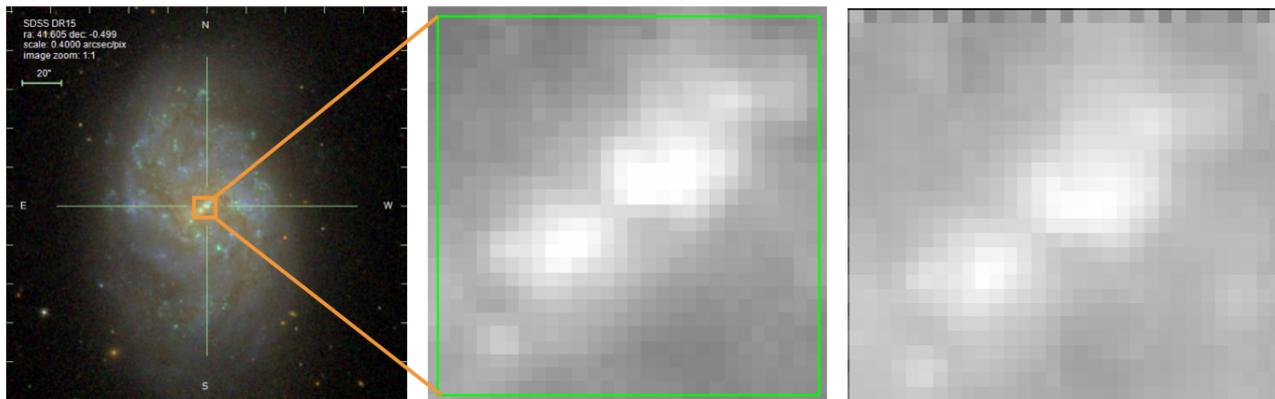


Figura 8: IZQUIERDA: Imagen a color de NGC 1087 obtenida con SDSS. CENTRO: Imagen en banda-r obtenida con SDSS del centro de NGC 1087. DERECHA: Imagen de luz blanca obtenida al colapsar el cubo de MEGARA

de emisión coinciden con las análogas observadas en absorción debido a que a la vez tenemos estrellas emitiendo el elemento de la línea a la vez que el gas. Si queremos entender la forma de la línea debe hacerse antes un modelado lo más realista posible de la absorción y del continuo para quedarnos solo con la línea de emisión que nos interesa, y este modelado lo realizamos usando la rutina pPXF. Con esto podemos extraer posteriormente la emisión línea a línea y ajustar sobre las líneas los modelos gaussianos para buscar asimetrías y estudiar los posibles desvíos de la gaussianidad.

Por tanto, el procedimiento esencial se basa en:

- Enmascarar las líneas de emisión
- Ajustar el continuo y las líneas de absorción mediante pPXF
- Crear un cubo libre de continuo y absorción.
- Ajustar las líneas de emisión con múltiples Gaussianas y determinar su número óptimo para cada espectro.

La aplicación de pPXF también permite derivar los mapas de velocidades y dispersiones para caracterizar el movimiento de las estrellas de la región y buscar información sobre la existencia y tipo del casi imperceptible bulbo presente en la galaxia.

5.1. Teselación de Voronoi

Una cuestión importante al realizar el estudio pasa por determinar el valor de la relación señal-ruido (S/R) de nuestros espectros de forma adecuada para que los resultados sean relevantes. Una ventaja de

querer trabajar con emisión es que, en general, la S/R de la emisión es trivialmente mayor que para el continuo o la absorción, una línea por encima del continuo resulta más sencilla de ver que una que está por debajo de él.

Para conseguir la S/R en el continuo adecuada para hacer un estudio de su cinemática estelar se hace necesario realizar, antes de la aplicación de pPXF, un remuestreado del tipo Voronoi que nos permita quitar de forma eficiente la componente estelar [20]. El remuestreado de Voronoi nos permite ganar S/R de cara a la componente estelar y de ese modo poder aplicar bien el ppxf a nuestros datos sin perder información.

Lo que hará el Voronoi será unir la señal de diferentes spaxels, cuando sea necesario, hasta tener un nuevo cubo remuestreado en el que cada voxel (nuevo elemento espacial) tenga como mínimo el valor de S/R que se estime necesario para conseguir la eficiencia adecuada de cara a eliminar la componente estelar. Después, al hacer el ajuste de la componente estelar, a todos los spaxels que pertenezcan al mismo voxel de Voronoi se le restará el mismo ajuste de pPXF. Para este trabajo fijamos un valor de $S/R = 20$.

5.2. Librerías espectrales

Para realizar el ajuste, pPXF recurre a librerías espectrales que son capaces de caracterizar, a partir de estrellas o modelos de poblaciones estelares simples, el espectro total de la región ajustada. Para poder realizar este análisis de manera correcta necesitamos recurrir a librerías estelares con una resolución, R, que sea cercana o superior a la de nuestros datos.

En la mayoría de los casos, estas librerías contienen una cantidad de estrellas o SSP (Single Stellar Populations) demasiado elevada para producir un ajuste adecuado y se ha de realizar, a priori, una selección de las estrellas o SSPs que sean representativas de la galaxia para evitar carencias a la hora de ajustar el sistema. Por tanto, no solo la librería y su resolución, sino también la selección que se hace de sus templates es importante.

En nuestro caso, trabajaremos con las librerías de Coelho [21], una librería de desarrollo teórico con resolución $R=20000$. Además, haremos un estudio comparativo de sus resultados con los obtenidos utilizando ELODIE [22], una librería empírica de resolución algo menor a la de MEGARA ($R=10000$, por $R=12000$ de MEGARA) y que contiene 908 espectros sacados de 709 estrellas obtenidos con el espectrógrafo de su mismo nombre. Esta comparativa nos ayudará a decidir qué librería es más adecuada para tratar los datos generales del proyecto BEARD.

5.3. Sustracción del continuo estelar e identificación de las principales líneas en el espectro

Como ya hemos comentado, un primer paso necesario para realizar el ajuste multigaussiano que se quiere realizar en este trabajo es el de ajustar la componente estelar. Para ello, han de enmascarse las líneas de emisión presentes en el espectro y utilizar el programa de ajuste pPXF para obtener un

espectro válido para nuestros datos que se pueda sustraer más tarde para estudiar las líneas de emisión individualmente.

Una vez caracterizado el continuo y la componente estelar, podremos centrarnos ya en las líneas de emisión que encontramos en el espectro. Por un lado, el doblete de [OIII] 4959,5007 y por otro el [NI] 5199. En siguientes apartados estudiaremos las características cinemáticas de estas líneas, centrándonos sobre todo en la línea intensa del doblete de oxígeno ([OIII] 5007), que es la que permite un mejor análisis global al ser claramente observable en casi toda la región estudiada.

5.4. Ajuste multigaussiano a las líneas de emisión

La parte central del trabajo se basa, como ya hemos mencionado, en ajustar las líneas de emisión a formas gaussianas que nos permitan inferir información del movimiento del gas ionizado. En las observaciones reales, lo que tenemos son formas gaussianas con desviaciones diferentes en cada una de las alas (asimetrías), algo que permite determinar que existen velocidades diferentes en el gas que se mueve hacia un lado y hacia el otro, asociando eso como síntoma de la presencia de outflows. Se realizó un ajuste multigaussiano (de hasta tres gaussianas) sobre estas líneas, llegando a los resultados que veremos en la siguiente sección del trabajo.

En el caso de ajustes multigaussianos, lo que queremos ver es, con respecto a la velocidad del pico de la línea (velocidad del movimiento global del gas), cual es la velocidad (posición) de las diferentes gaussianas. Con esto buscamos encontrar que, aparte del movimiento global del gas (que sigue generalmente la rotación galáctica), existen otras componentes en velocidad que podemos asociar con un outflow, y que se moverá con una dirección determinada. Para verlo debemos normalizar las gaussianas correspondientes a todos los espectros del cubo de datos a un mismo valor, que es el valor promedio de la velocidad del gas. Esto nos permite normalizar el punto de referencia y comparar adecuadamente. La referencia que tomamos es la de seleccionar la región más brillante de la galaxia (pico de intensidad, que se da en los knots de formación estelar) y promediar sobre su velocidad de línea de visión (del inglés, L.O.S.) de gas. El promedio de estos valores nos dará la velocidad de recesión de la galaxia, y esa es la velocidad que se tomará como punto 0 de referencia en los mapas de gaussianas.

La búsqueda del ajuste multigaussiano parte de la idea de encontrar un sentido a cada uno de los ajustes individuales. Cuando se hace un ajuste multigaussiano sobre las líneas de emisión, se consigue obtener unos mapas de diferentes distribuciones de velocidad. Es decir, en el ejemplo para el que el ajuste ideal de la línea se realice mediante tres gaussianas, lo que estaremos caracterizando en las zonas ajustadas será gas moviéndose con tres campos de velocidad diferentes. Las gaussianas que representen el movimiento global del gas de la galaxia serán la que caractericen el pico pronunciado de la línea, y las restantes son las que provocan sus desviaciones de gaussianidad.

Cabe, por tanto, hacerse la pregunta de si se pueden entender esas distribuciones de velocidades de forma que se pueda identificar cual describe el movimiento de gas de rotación asociado al movimiento galáctico y cuales describen outflows que se observan en el mapa que nos da la desviación de la gaussia-

nidad. El mapa global de velocidades devuelve el movimiento global del gas en la galaxia y será algo muy parecido a lo que sería la superposición de los tres mapas que describen el movimiento galáctico, pero además nos permite descomponer los restantes movimientos coherentes que realiza el gas utilizando los mapas de las otras componentes (los otros tres mapas). A efectos prácticos, los mapas restantes actúan como si se hubiese eliminado la componente que describe el movimiento de rotación de la galaxia y lo que queda son otros gases cuyos movimientos son diferentes. Este es el gas que nos interesa, el que puede asociarse a outflows. Es, por tanto, un método de desacoplamiento dinámico de masas de gas.

Para seleccionar el número adecuado de gaussianas a ajustar en cada región utilizamos el criterio BIC (Bayesian Information Criterion). A cada línea particular se le realizan los tres tipos de ajuste posibles (Figura 9), y se selecciona el que mejor resultado BIC genera en cada caso.

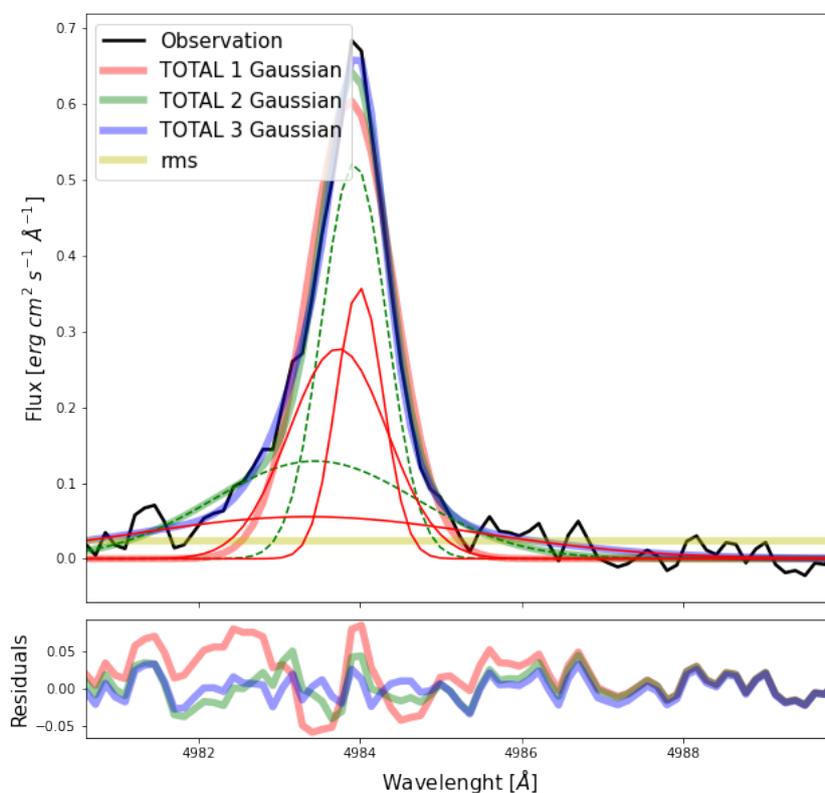


Figura 9: Ejemplo de ajuste multigaussiano. La imagen muestra las diferentes alternativas para ajustar con tres gaussianas (líneas continuas en rojo), dos gaussianas (líneas punteadas en verde) y una gaussiana (ajuste TOTAL rojo). El criterio BIC establece que para este caso el uso de dos gaussianas en el ajuste es suficiente

6. Resultados

6.1. Cinemática estelar

Con el primer paso, en el que ajustamos la componente estelares mediante la rutina pPXF, generamos mapas remuestreados de los diferentes momentos de la luz estelar, mostrados en la Figura 10.

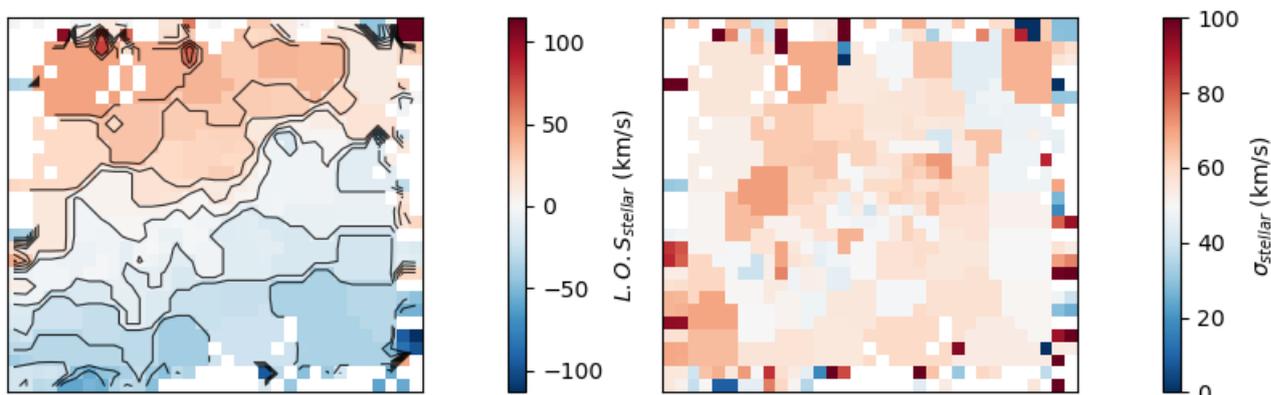


Figura 10: Velocidad en la línea de visión y dispersión de velocidades para la componente estelar

La figura muestra los mapas de los momentos de orden 1 y 2, integrado en todo el rango del espectro excluyendo las líneas de emisión. El mapa de velocidades permite ver un movimiento muy uniforme, con un eje menor bien definido que es esperable en un conjunto rotante.

6.2. Descripción de los mapas de velocidad y dispersión de velocidades

En la Figura 11 se muestra el mapa de velocidad global del gas galáctico. Cabe destacar que no es el mapa de velocidad de la línea ni el centro de la línea, sino que tanto el de velocidad como el de sigma son mapas de momentos calculados usando el mejor ajuste. Es por tanto, un promedio pesado por la luz.

En este caso encontramos una estructura más compleja que la del apartado anterior, en la que se distinguen perfectamente los dos knots de formación estelar diferenciados. En el knot noreste vemos que existen proyectadas velocidades del orden de 40 km/s. El knot suroeste provoca un cambio visible en la cinemática del gas. Vemos que el eje menor de rotación que se identificaba en la componente estelar se dispersa aquí, probablemente a causa de la influencia de la formación estelar.

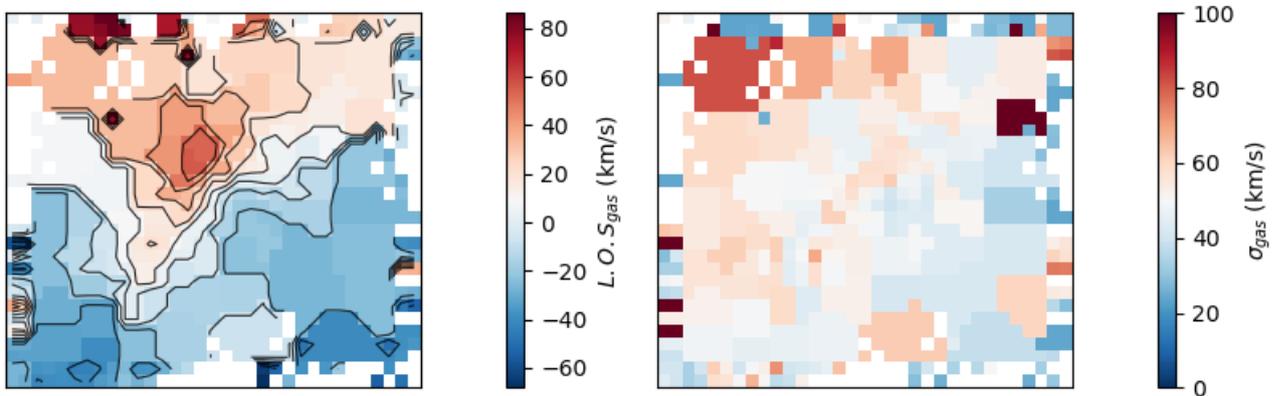


Figura 11: Velocidad en la línea de visión y dispersión de velocidades para la emisión

6.2.1. Estudio de las simetrías y capacidad para detectar los knots de formación estelar en nuestros mapas

Definimos un parámetro de asimetría en base a los perfiles multigaussianos ajustados. Utilizando estos ajustes se definen diferentes percentiles en las gaussianas (0.05, 0.5 y 0.95) y se calculan los dos valores de las diferencias entre el percentil medio y los dos de los extremos, de modo que obtendremos un valor de referencia negativo y otro positivo. Cuando la línea es simétrica, este calculo sería igual a cero, pero si existe asimetría el resultado no será nulo e indicará que existe un exceso de velocidades en una dirección con respecto a la otra. Este cálculo, que nos da la cantidad de luz que se va más al azul o al rojo de lo que deberían si la línea fuese gaussiana ideal, permite establecer el mencionado parámetro de asimetría, Δv , que se representa en la Figura 12.

Se comprueba que en el knot noreste nace desde un lado una asimetría de velocidades en sentido de la línea de visión y desde el otro lado otra asimetría en el sentido opuesto (Figura 13). Como lo que nos mide este parámetro son desviaciones respecto al centro, nos indica que ahí hay gas que se mueve a velocidades distintas de la de rotación principal y por ello podemos hacer la hipótesis de que se trata de gas que está siendo expulsado desde esta región central de formación estelar.

Por otro lado, en el knot suroeste toda la asimetría va en la dirección de nuestra línea de visión. Esto nos permite hipotetizar que podría haber también un outflow, pero en caso de existir estaría dirigido totalmente hacia nosotros. Ello no implicaría que no existan outflows en otra dirección para esa región, pues es posible que la estructura que genera el outflow tape el gas enviado en otras direcciones.

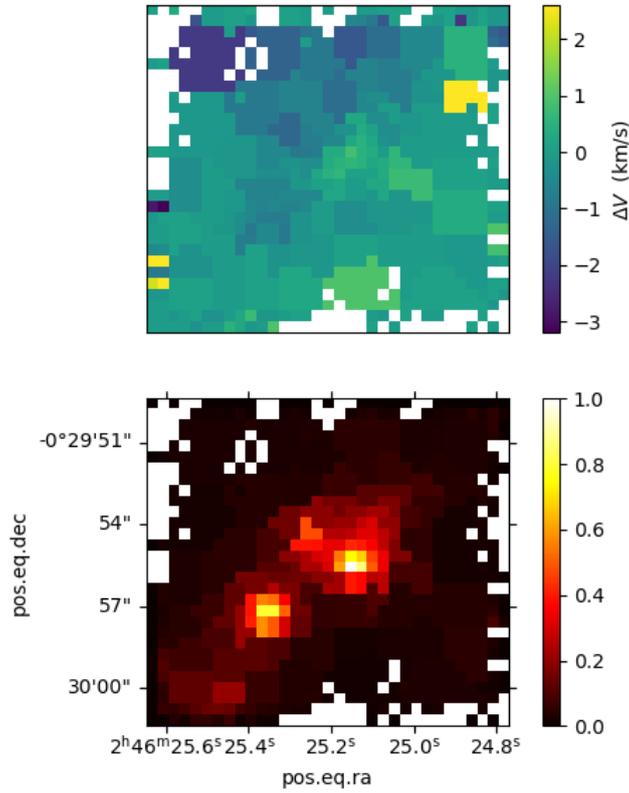


Figura 12: Parametro de asimetría (mapa superior) representado junto al momento de orden cero de la luz (mapa inferior)

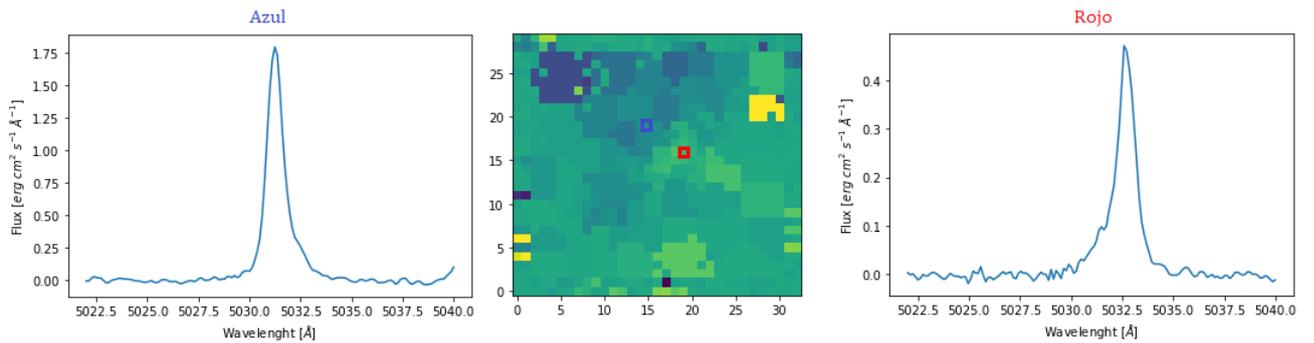


Figura 13: Representación gráfica de las asimetrías en el espectro de la línea a cada lado del knot noreste de formación estelar. Vemos que las líneas se desvían hacia lados opuestos en cada extremo del knot

6.3. Análisis multigaussiano

Vista en el apartado anterior la existencia de asimetrías en la línea, tiene sentido llevar a cabo la descomposición espectroscópica de cuantas gaussianas pueden identificarse en cada región para caracterizar campos de velocidades diferenciados y a qué movimientos se pueden asociar cada una de ellas.

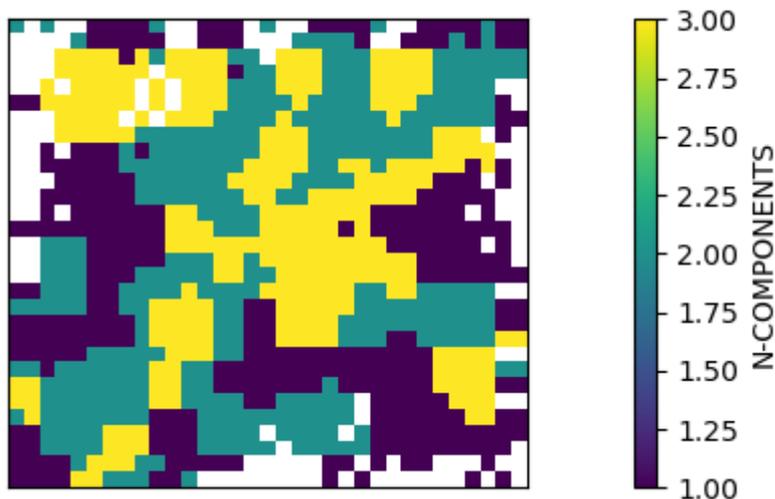


Figura 14: Mapa del número de componentes gaussianas ajustadas en cada región del campo de visión utilizando la línea de [OIII] 5007

La Figura 14 muestra el número de componentes gaussianas para el mejor ajuste de nuestros datos. Se puede ver que en las regiones en las que se posicionan los knots de formación estelar es donde necesitamos ajustar un número de componentes mayor. Esto podría ser debido a que diferentes masas de gas se mueven a distintas velocidades, caracterizables mediante cada una de las gaussianas. Los alrededores de estos knots se ajustan a dos y en las zonas más externas basta con una.

Vease que esta situación podría asociarse también a una cuestión de S/R, que al ser más alta en el centro podría provocar que la caracterización de las alas gaussianas sea mejor en la zona de los knots. Esta hipótesis no es descartable, aunque hemos hecho pruebas con diferentes valores de S/R en el Voronoi y los resultados son comparables.

6.3.1. Análisis multigaussiano en [OIII] 5007

Ya vimos el mapa global de velocidades, mostrado en la sección 6.2, pero la parte central de este trabajo pasa por hacer ahora una descomposición cinemática de las líneas de emisión del gas que nos ayuden a comprender cuantas componentes cinemáticas hay contribuyendo en cada spaxel. La perspectiva general de este estudio es la mostrada en la Figura 14, pero en este apartado descompondremos esos resultados.

Si echamos un vistazo a los mapas de 3 gaussianas para la línea de [OIII] 5007 que se presentan en la Figura 15, es en la 3.1 en la que se aprecia un patrón de rotación más claro, se identifican dos regiones diferenciadas con un eje de simetría central. Por tanto, esta gaussiana la consideraríamos como representativa de la rotación global del gas en la galaxia. Los ajustes en tres gaussianas están presentes sobre todo en la zona de los knots de formación estelar y esto se adecua a lo esperado, pues es ahí donde se espera que, debido al feedback y la formación estelar, el movimiento del gas sea más turbulento. La gaussiana 3.2 resulta difícil de asociar con un movimiento coherente, las velocidades que refleja son bajas y de comportamiento general aparentemente inconexo, pero en la 3.3 sí se ve un comportamiento que podemos asociar al outflow buscado, debido a que las velocidades que representa son altas y sus zonas rojas y azules son identificables con las zonas de asimetría en las inmediaciones del knot noreste (Figura 13).

Para los mapas de dos gaussianas, encontramos que el ajuste 2.1 es consistente con las velocidades de 3.1 y por ello la asociamos también al movimiento global. La gaussiana 2.2 muestra un comportamiento significativamente uniforme de velocidades negativas, con lo que nos describe un movimiento orientado en nuestra dirección en las inmediaciones de los knots de formación estelar.

Por su parte, las regiones en las que el movimiento se ajusta a una sola gaussiana son zonas en las que sólo existe un campo de velocidades. Es decir, en ellas podemos asimilar todo el movimiento existente al movimiento propio de la galaxia. Este tipo de ajuste se genera, como cabe esperar, en las regiones más externas del campo de visión.

Tenemos, entonces, que 1.1, 2.1 y 3.1 serían los ajustes que definen el movimiento global de la galaxia y, por tanto, las restantes han de definir movimientos de otra naturaleza, sobre los que ya se teorizó en los anteriores párrafos.

Los mapas individuales son coherentes entre sí, lo cuál es esperable, y su confluencia nos genera algo muy similar al mapa de velocidad global del gas, aunque no igual, pues el mapa de velocidad de la Figura 11 es un momento pesado por la luz y por ello las asimetrías presentes en la línea tienen su peso en él, mientras que en los mapas de las gaussianas no ya que ahí sí que tenemos gaussianas perfectas.

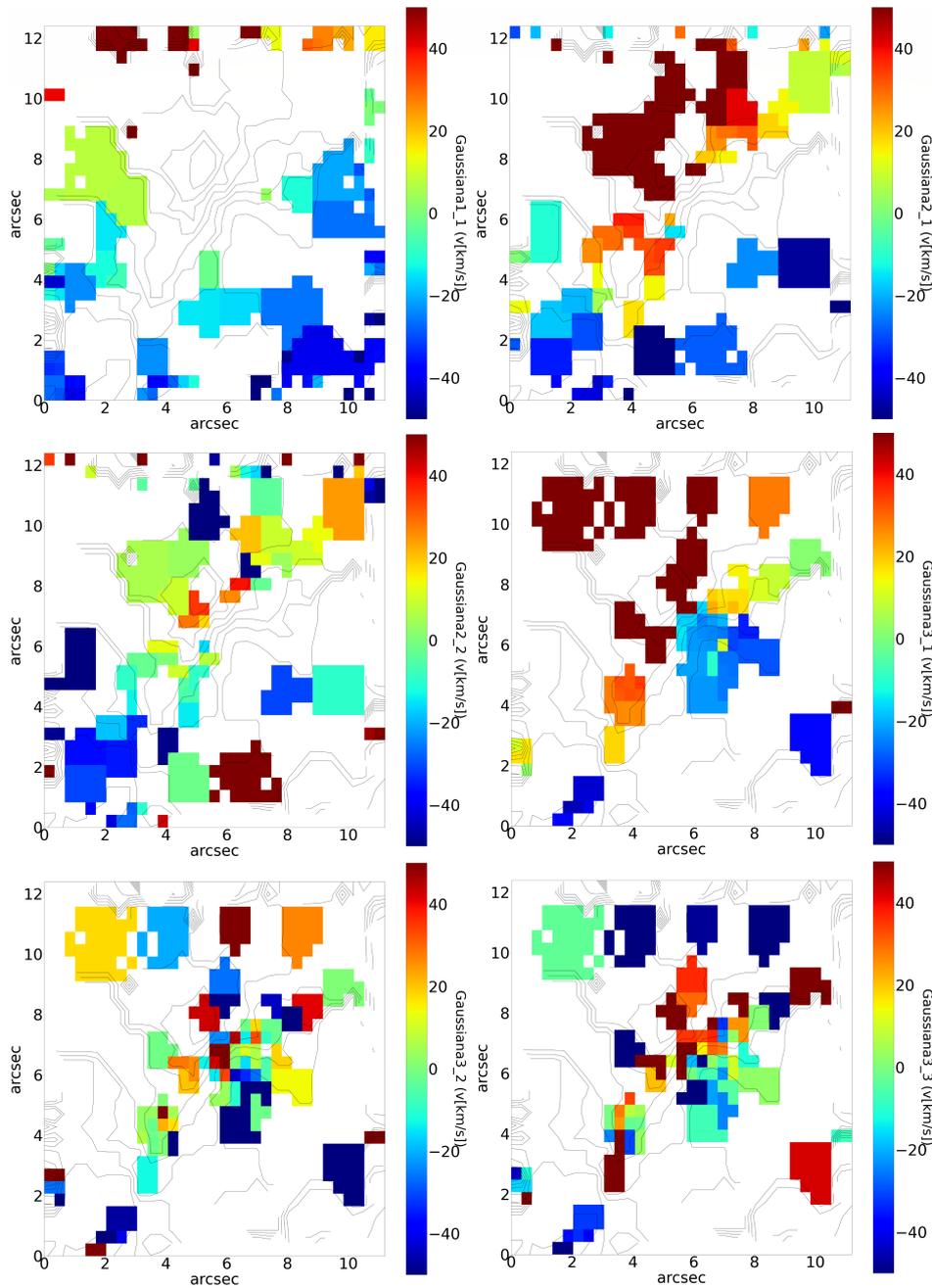


Figura 15: Ajustes multigaussianos de los campos de velocidades para la línea de [OIII] 5007. Se presentan, por orden de izquierda a derecha y de arriba a abajo los ajustes para 1, 2 y 3 gaussianas. Los isocontornos superpuestos representan las estructuras dinámicas que se sacan del mapa de velocidad del gas (Figura 11)

6.3.2. Análisis multigaussiano en [OIII] 4959

Las dos líneas de OIII que analizamos aquí son un doblete, el mecanismo que las ioniza es el mismo. Esta segunda línea, más azul, es menos intensa que su pareja. Al ser un doblete, es evidente que sus resultados dinámicos deben tener comportamientos relacionados.

Lo que quisimos hacer en este trabajo fue ver hasta qué punto son compatibles los mapas de ambas líneas utilizando sus ajustes libres, sin condiciones de ligadura. A ambos conjuntos de mapas les restamos la misma velocidad de recesión, pero no se forzó a que ajustaran al mismo valor de velocidades en cada región.

Cualitativamente, las gaussianas (Figura 16) se correlacionan bien con la otra línea de OIII (Figura 15), mostrando comportamientos y valores de velocidad compatibles, y eso nos reafirma en nuestros resultados previos con la línea brillante. Vemos los mismos rasgos dinámicos y estructurales.

En el apartado de trabajos futuros, en la sección 8, exploraremos alguna forma de perfeccionar estos datos de cara a otros trabajos.

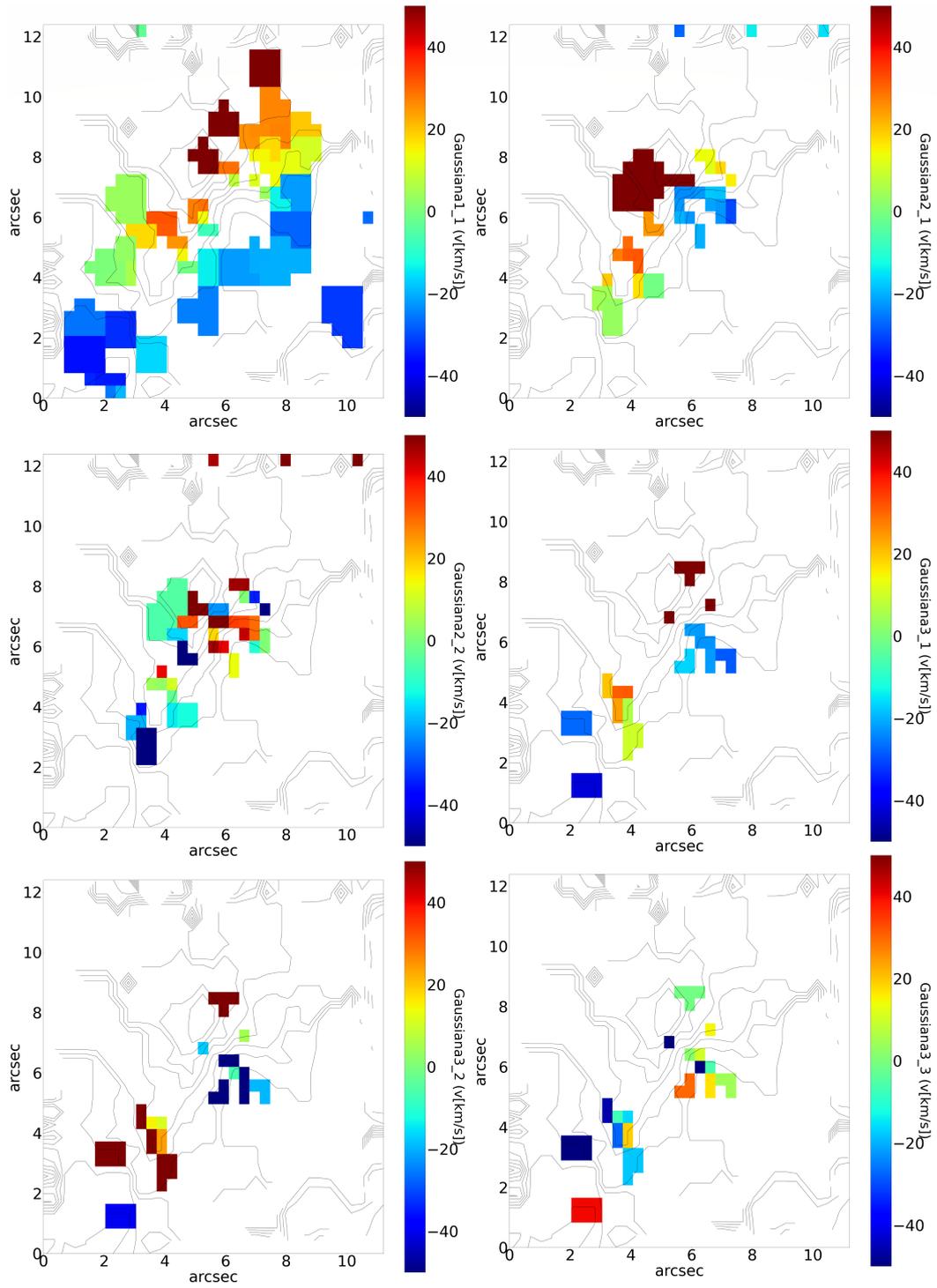


Figura 16: Ajustes multigaussianos de los campos de velocidades para la línea de [OIII] 4959. Se presentan, por orden de izquierda a derecha y de arriba a abajo los ajustes para 1, 2 y 3 gaussianas

6.3.3. Análisis multigaussiano en [NI] 5199, 5201

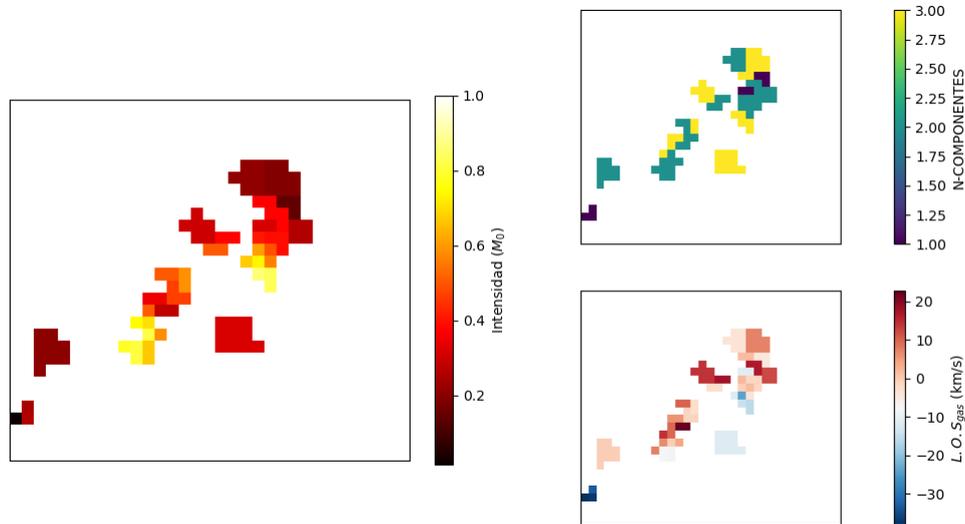


Figura 17: Mapas de intensidad, velocidad de gas y número de componentes gaussianas ajustados utilizando el doblete [NI] 5199,5201

En este apartado exponemos brevemente algunas características del ajuste del doblete de nitrógeno, por completitud (Figura 17). Estas líneas no adquieren nitidez en la mayoría de nuestro campo de visión, por ello no se puede sacar tanta información como con el oxígeno. No obstante, algo que se comprueba a simple vista es que el nitrógeno se encuentra especialmente en las regiones de formación estelar luminosas.

6.3.4. Comparación entre las librerías de Coelho y ELODIE

Si estudiamos los mapas generales de cinemática estelar sacados con la librería ELODIE, vemos que se obtienen unos resultados bastante similares a los obtenidos con la librería de Coelho a pesar de su menor resolución. La Figura 18 representa la comparación de los datos que se obtienen para la velocidad y la dispersión de velocidades estelar con cada una de las librerías.

Lo que vemos es un comportamiento con tendencia lineal (aunque con algunos valores alejados de la línea 1:1, especialmente en los extremos). Teniendo en cuenta que el valor medio para las velocidades ajustadas utilizando la librería ELODIE es de (56.15 ± 17.61) km/s, la media de desviación de los valores de la librería de Coelho con respecto a esa referencia es de (0.870 ± 0.016) km/s, lo que supone una diferencia muy baja (1.5%) entre los valores obtenidos con las dos librerías.

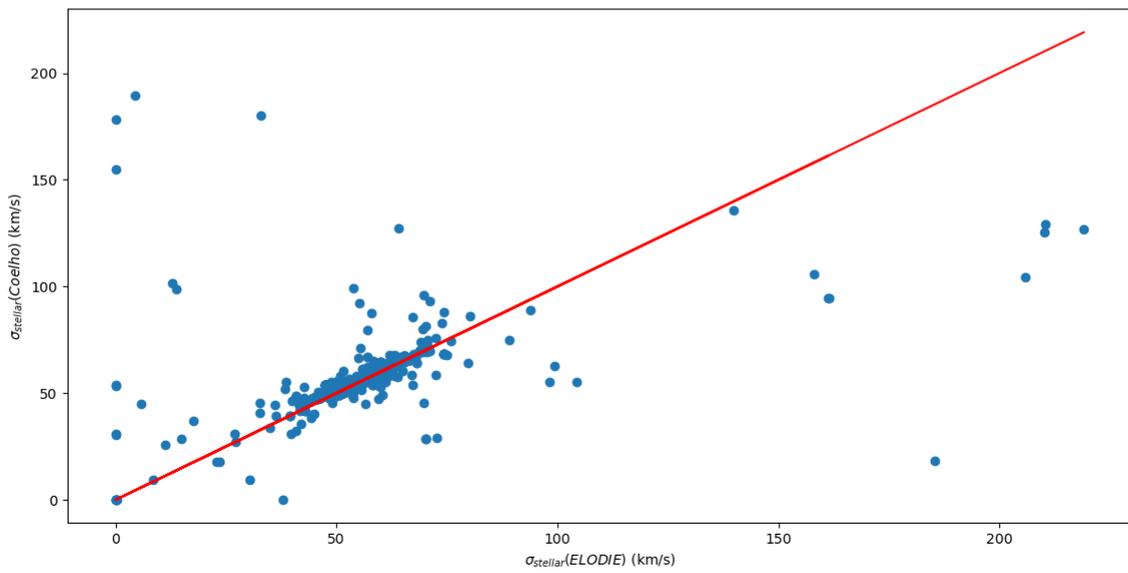
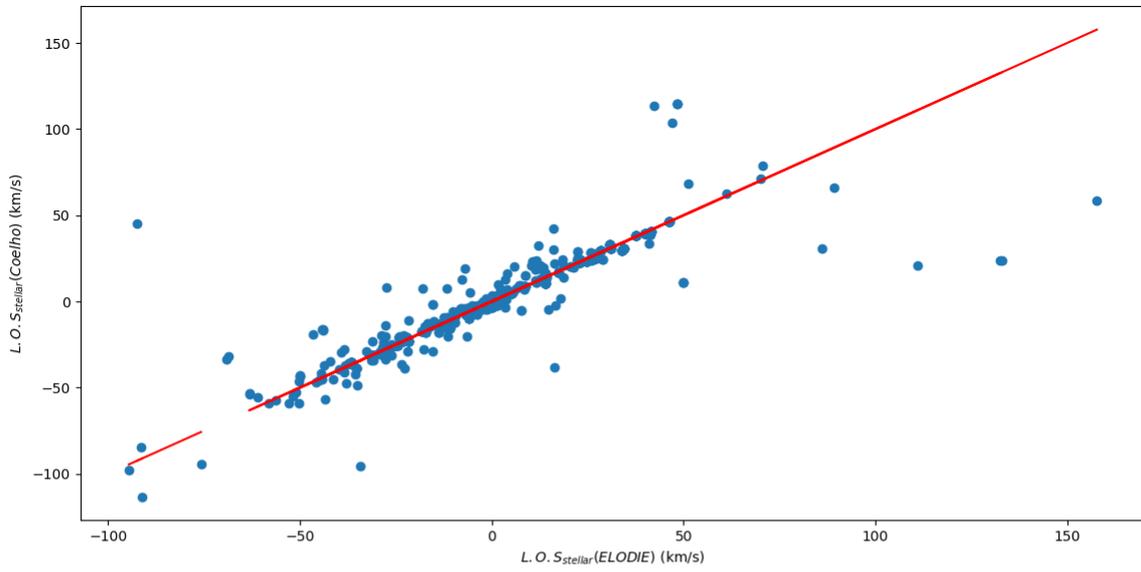


Figura 18: Comparativa de los datos de velocidad y dispersión de velocidades entre los resultados obtenidos con Coelho y ELODIE

7. Conclusiones

En este trabajo hemos analizado la galaxia NGC 1087, que forma parte de la muestra de galaxias de BEARD, y nos hemos centrado en el estudio de las líneas de emisión para entender la posibilidad de que existan outflows en este tipo de galaxias sin bulbo.

Hemos realizado una sustracción precisa del continuo estelar para poder analizar las líneas de emisión correctamente. Esta sustracción se ha realizado mediante la rutina pPXF junto con las dos librerías espectrales que hemos comparado, obteniendo resultados similarmente comportados para ELODIE y Coelho.

Se han analizado las tres líneas de emisión más prominentes en el rango espectral de MEGARA, que son [OIII] 5007, [OIII] 4959 y [NI] 5199,5201. Del análisis de la línea más intensa ([OIII] 5007) se han detectado unas asimetrías que hemos estudiado a través de un ajuste multigaussiano y hemos detectado la presencia de un outflow del knot noreste de formación estelar. En el knot sureste se detecta también una asimetría, pero sin llegar a detectar las dos direcciones del outflow. No podemos saber, por tanto, si en este caso se encuentra perfectamente perpendicular a nuestra línea de visión o es otro tipo de fenómeno. Las velocidades proyectadas en el knot noreste son del orden de 40 km/s, pero necesitamos un análisis geométrico del sistema que permita determinar la velocidad real del viento estelar.

Ha sido también un trabajo relevante para la colaboración BEARD. Hemos explorado diferentes librerías estelares para comprobar cómo puede afectar la elección a efectos de resolución, teniendo en cuenta que nuestros datos son de una resolución muy elevada con respecto a las que se utilizan en la mayoría de estudios y por ello no existen demasiados templates adecuados para este nivel de resolución espectral y permitirá decidir qué librería es la más adecuada.

Esta es la primera vez que se detecta un outflow, probablemente debido a formación estelar, en NGC 1087. Otros trabajos anteriores no lo habían detectado en otros rangos espectrales [17].

8. Trabajos futuros

De cara a trabajos futuros resultaría interesante, sabiendo la relación de doblete entre las dos líneas de [OIII] estudiadas, hacer un ajuste de velocidades ligado entre las dos líneas y conseguir de esa manera una mayor calidad en el ajuste al poder ganar un mayor nivel de señal a ruido en la línea más tenue, pues si se obliga a que las tres gaussianas que definen el movimiento de la galaxia ajusten a la misma velocidad se consigue esa ganancia en los restantes ajustes incluso para la línea menos brillante.

También, como ya se comentó, será necesario para una caracterización adecuada de los outflows aprovechar la alta resolución espectral de MEGARA para estudiar la geometría del sistema y deproyectar la velocidad del outflow.

El estudio comparativo de las dispersiones de velocidad del gas de las diferentes componentes para

entender la turbulencia de este gas y el cálculo de la masa expulsada al medio a través de la supernova son también trabajos importantes a realizar.

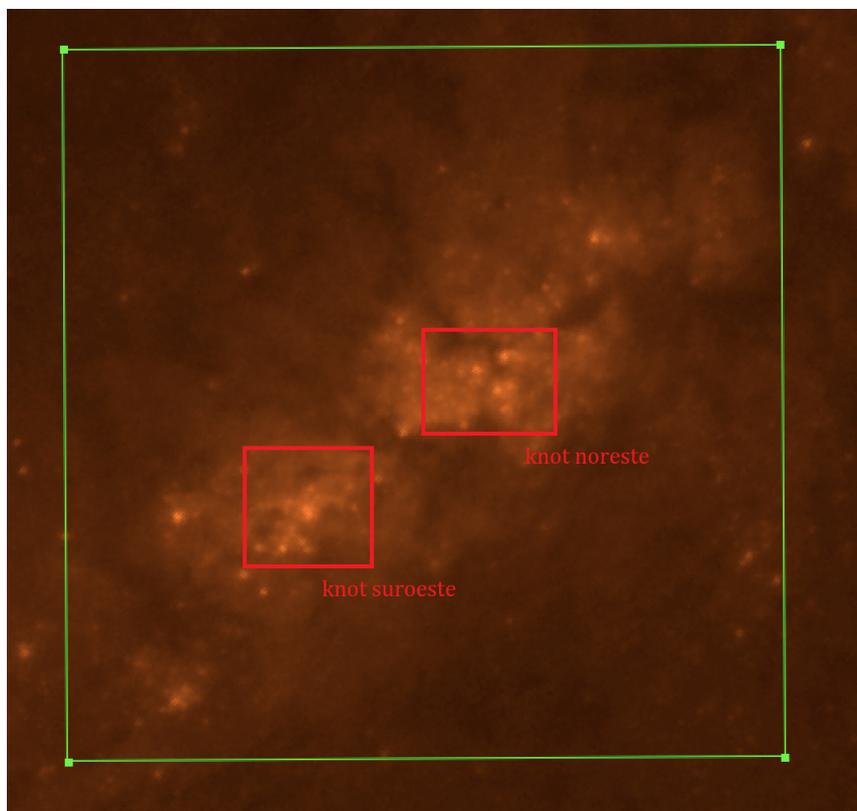


Figura 19: NGC 1087 observada en el filtro F814W con el HST. Se indica sobre ella el campo de MEGARA (verde) y los dos knots de formación estelar (rojo)

Por último, debería realizarse una comparación más precisa con la observación de HST de la galaxia (Figura 19) es necesario para conseguir una caracterización más precisa de los cúmulos estelares que dan lugar a estos outflows.

Bibliografía

- [1] TRIMBLE, V., “ *The 1920 Shapley-Curtis Discussion: Background, Issues, and Aftermath* ”, Publications of the Astronomical Society of the Pacific, v.107, p.1133 (1995).
- [2] DE VAUCOULEURS, G., “ *Classification and Morphology of External Galaxies.* ”, Handbuch der Physik, Volume 53, p.275 (1959).

- [3] HUBBLE, E.P., “ *Realm of the Nebulae* ”, Yale University Press, 1936.
- [4] HEIDMANN, J. ET AL., “ *Inclination and absorption effects on the apparent diameters, optical luminosities and neutral hydrogen radiation of galaxies—I. Optical and 21-cm line data* ”, *Memoirs of the Royal Astronomical Society*, Vol. 75, p.85 (1972).
- [5] BARAZZA, F.D.; JOGEE, S.; MARINOVA, I., “ *Bars in Local Galaxies: Evidence for a higher Optical Bar Fraction in Disk-Dominated Galaxies*”, *Astrophysical Journal*, Vol. 675-2, p. 1194-1212 (2008).
- [6] KORMENDY, J. ET AL., “ *Bulgeless Giant Galaxies Challenge Our Picture of Galaxy Formation by Hierarchical Clustering*”, *Astrophysical Journal*, Vol. 723-1, p. 54-80 (2010).
- [7] CONDON, J.J., MATTHEWS, A.M., “ *Λ CDM Cosmology for Astronomers*”, *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, Volume 130, Issue 989, pp. 073001 (2018).
- [8] KAUTSCH, S.J., “ *The Edge-On Perspective of Bulgeless, Simple Disk Galaxies* ”, *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, Volume 121, Issue 886, pp. 1297 (2009).
- [9] STEWART, K. R. ET AL., “ *Galaxy Mergers and Dark Matter Halo Mergers in Λ CDM: Mass, Redshift, and Mass-Ratio Dependence* ”, *Astrophysical Journal*, Vol. 702-2, p. 1005-1015 (2009).
- [10] BENSON, A.J., “ *AGN and the necessity of feedback: One contribution of 13 to a Discussion Meeting ‘The impact of active galaxies on the Universe at large’* ”, *Royal Society of London Transactions Series A*, vol. 363, Issue 1828, p.695-704 (2005).
- [11] GOVERNATO, F. ET AL., “ *Bulgeless dwarf galaxies and dark matter cores from supernova-driven outflows* ”, *Nature*, Vol. 463, p. 203-206 (2010).
- [12] HARRISON, C.M., “ *Impact of supermassive black hole growth on star formation* ”, *Nature Astronomy*, Volume 1, id. 0165 (2017).
- [13] BECKMANN, R.S. ET AL., “ *Cosmic evolution of stellar quenching by AGN feedback: clues from the Horizon-AGN simulation* ”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Volume 472, Issue 1, p.949-965 (2017).
- [14] VAN DRIEL, W. ET AL., “ *NIBLES: an H I census of stellar mass selected SDSS galaxies. I. The Nançay H I survey*”, *Astronomy & Astrophysics*, Volume 595, id.A118, 43 pp (2016).
- [15] ZIBETTI, S. ET AL., “ *Resolved stellar mass maps of galaxies. I: method and implications for global mass estimates* ”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Volume 400, Issue 3, pp. 1181-1198 (2009).
- [16] ZARAGOZA-CARDIEL, J. ET AL., “ *A quantitative demonstration that stellar feedback locally regulates galaxy growth* ”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Volume 499, Issue 1, pp.1172-1187 (2020).
- [17] STUBER, S. K. ET AL., “ *Frequency and nature of central molecular outflows in nearby star-forming disk galaxies* ”, arXiv:2107.11227 (2021).

- [18] GAO, H. ET AL.,“ *The Carnegie-Irvine Galaxy Survey. VIII. Demographics of Bulges along the Hubble Sequence* ”, The Astrophysical Journal Supplement Series, Volume 244, Issue 2, article id. 34, 24 pp. (2019).
- [19] CAPPELLARI, M.,“ *pPXF: Penalized Pixel-Fitting stellar kinematics extraction* ”, Astrophysics Source Code Library, ascl:1210.002 (2012).
- [20] CAPPELLARI, M.; COPIN, Y.,“ *Adaptive Spatial Binning of 2D Spectra and Images Using Voronoi Tessellations* ”, Galaxies: the Third Dimension, 282, 515 (2002).
- [21] COELHO, P.,“ *A new library of theoretical stellar spectra for stellar population applications* ”, Revista Mexicana de Astronomia y Astrofisica (Serie de conferencias), 44, 151 (2014).
- [22] PRUGNIEL, P. ; SOUBIRAN, C. ,“*A database of high and medium-resolution stellar spectra*”, Revista Mexicana de Astronomia y Astrofisica (Serie de conferencias), 44, 151 (2014).