



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE POSGRADO EN ASTROFÍSICA

INSTITUTO DE RADIOASTRONOMÍA Y ASTROFÍSICA

EL EFECTO DE LA PRESIÓN HIDRODINÁMICA SOBRE LA
FORMACIÓN ESTELAR EN GALAXIAS MEDUSA.

TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS

PRESENTA

IVETH ADAENA GASPAR GOROSTIETA

DIRECTOR DE TESIS

DR. JACOPO FRITZ,
INSTITUTO DE RADIOASTRONOMÍA Y ASTROFÍSICA

MORELIA, MICHOACÁN, MÉXICO. AGOSTO 2020



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Índice general

Índice general	II
Índice de figuras	IV
Índice de tablas	VII
1. Introducción	7
1.1. Clasificación morfológica de las galaxias	8
1.1.1. Galaxias elípticas	9
1.1.2. Galaxias lenticulares (<i>S0</i>)	10
1.1.3. Galaxias espirales	10
1.1.4. Galaxias irregulares	11
1.2. Mecanismos físicos involucrados en la evolución galáctica en cúmulos	12
1.2.1. Procesos internos	13
1.2.2. Procesos externos	13
1.3. Galaxias medusa	16
1.4. Simulaciones numéricas de fenómenos de presión hidrodinámica	18
1.5. Objetivo de la tesis	21
1.6. Estructura de la tesis	21
2. Muestras, datos y herramientas utilizadas	23
2.1. WINGS y OmegaWINGS	23
2.2. PM2GC	24
2.3. GASP	25
2.3.1. Selección de galaxias medusas	26
2.3.2. Propiedades de la muestra	26
2.3.3. Estrategia para el estudio de la muestra	29
2.4. Herramientas de análisis para el estudio de la muestra	30
2.4.1. KUBEVIZ	30
2.4.2. pPXF	31
2.4.3. SINOPSIS	31
2.4.4. Obtención de los datos	33
3. Formación estelar en las galaxias de GASP	37
3.1. Definición del disco estelar	38
3.2. La Star Formation Rate (SFR) actual	38
3.3. Diagramas diagnósticos	40
3.4. SFR en otros bins de edad (2, 3, 4)	40

3.5. Mapas de SFR y masa: análisis de las asimetrías	42
3.6. Búsqueda de evidencias de interacciones de presión hidrodinámica	45
3.7. Análisis de la dirección del frente de choque	46
3.8. Búsqueda de señales de Ram Pressure (RP) en galaxias con formación estelar apagada	49
3.9. Mapas de densidad electrónica.	50
4. Comparación con las galaxias de cúmulo	63
4.1. Comparación de la tasa de formación estelar específica	64
4.2. Comparación de la historia de formación estelar	65
5. Interpretación de resultados	73
5.1. Dependencias en la masa estelar	74
5.2. Dependencias en la distancia proyectada del centro del cúmulo	77
5.3. Dependencias en la velocidad	78
5.4. Dependencias en la “J class”	78
5.5. Dependencias en la fase del desprendimiento del gas	80
5.6. Dependencias en la posición del espacio-fase	84
6. Conclusiones y trabajo a futuro	89
6.1. Estudio de las poblaciones estelares	90
6.2. Brotes de formación estelar	91
6.3. En búsqueda del frente de choque	92
6.4. ¿Qué parámetros influyen en la formación estelar?	93
6.5. Resultados principales	95
6.6. Trabajo a futuro	96

Índice de figuras

1.1.	Resultados del satélite WMAP sobre la composición actual del Universo.	7
1.2.	Clasificación de Hubble.	8
1.3.	Galaxia espiral ESO 137-001.	16
1.4.	A la izquierda una imagen RGB de las partes interiores del cúmulo A957. La galaxia JO204, que se puede apreciar con un cuadro blanco correspondiente al campo observado por MUSE, se localiza a $\sim 2'$ de la Brightest Cluster Galaxy (BCG). En el panel de la derecha se muestra la imagen RGB de la galaxia JO204, obtenida a partir de la emisión de líneas [OIII]5007 (color azul), $H\alpha$ (en color verde) y la emisión del continuo entre 7100 y 7200 Å (color rojo). Los puntos marcados con la letra “K” son puntos emisores compactos. La etiqueta “S1” indica una galaxia que se encuentra a $z \simeq 0.052$ con un espectro post-starburst típico. “S2” es una región a un redshift similar a “S1”, sin líneas de emisión con y líneas de Balmer en absorción débiles. “S3” es una estrella de la Vía Láctea. “S4” es una galaxia con formación estelar a $z \simeq 0.36$ (imagen tomada de Gullieuszik et al., 2017).	17
1.5.	Simulación numérica de una galaxia cayendo de dos maneras diferentes: de cara y de canto. En blanco se aprecia la distribución del gas y en azul turquesa las nuevas estrellas formadas debido a la Ram Pressure Stripping (RPS) (Kronberger et al., 2008)	18
1.6.	Distribución del perfil de densidad del gas.	19
1.7.	Resultados de una simulación numérica de una galaxia desplazándose “face-on”. . . .	20
1.8.	Resultados de una simulación numérica de una galaxia desplazándose “edge-on”. . . .	20
2.1.	Galaxia de clase “J5” de la muestra GAs Stripping Phenomena in galaxies (GASP). . .	26
2.2.	Galaxias de la muestras WIdE-field Nearby Galaxy-cluster Survey (WINGS) y OmegaCAM-VST observations of WINGS galaxy clusters (OmegaWINGS) candidatos a desprendimiento de gas.	27
2.3.	Comparaciones entre la muestra de galaxias medusa de GASP y las galaxias de cúmulos (Poggianti et al., 2016).	28
2.4.	Las galaxias JO204, JW100 y JO206 en imágenes creadas a partir de los datos de MUSE. En blanco se tiene la suma del flujo a todas las longitudes de onda, mientras que en rojo se puede observar la emisión de la línea $H\alpha$	29
2.5.	Función doble exponencial (izquierda) y lognormal (derecha) representantes unos posibles patrones de historia de formación estelar que SINOPSIS puede utilizar. . . .	32
2.6.	Ejemplo de un ajuste a un espectro realizado con SIMulatiNg OPTical Spectra wIth population Synthesis models (SINOPSIS).	33
2.7.	Proceso de obtención de los datos.	35
3.1.	Mapas de $H\alpha$ y $H\beta$ de JO206.	39

3.2.	Diagrama BPT de JO206.	41
3.3.	Mapa BPT espacialmente resuelto de JO206.	42
3.4.	Representación esquemática de la primer interacción de una galaxia medusa con el cúmulo.	43
3.5.	Gráficas que muestran la diferencia relativa entre los valores de (a) masa, (b-d) y de SFR2, 3 y 4 para el caso de la galaxia A3376_B_0214. La línea verde representa los valores de tasa de formación estelar en el lado izquierdo y la línea roja en el lado derecho.	52
3.6.	Comparación del índice de asimetría promedio de los mapas de SFR1 para galaxias medusas y en la sub-muestra de control.	53
3.7.	Índices de asimetría de las galaxias medusa con el valor promedio obtenido en galaxias de la muestra de control, para los mapas de SFR2, SFR3, SFR4 y masa estelar.	54
3.8.	Vectores de dirección de JO206 para los mapas de SFR 1 y 2.	55
3.9.	Ubicación de JO206 con respecto al centro del cúmulo.	55
3.10.	Vector de dirección encontrado para la galaxia JO119 al utilizar el mapa de SFR del primer bin.	56
3.11.	La figura (a) muestra el mapa de SFR en el segundo bin de tiempo y la figura (b) muestra el mapa de SFR de la época actual. El vector azul indica hacia dónde está el centro del cúmulo y el vector negro señala la dirección encontrado para la galaxia JO147.	56
3.12.	Comparación de los ángulos obtenidos con el índice de asimetría y de los ángulos a los cuales los vectores apuntan a la BCG en SFR1.	57
3.13.	Comparación de los ángulos obtenidos con el índice de asimetría y de los ángulos a los cuales los vectores apuntan a la BCG en SFR2.	57
3.14.	Mapa de SFR1 de JO206.	58
3.15.	Mapa de SFR1 de JW100.	58
3.16.	La figura (a) representa el mapa de SFR actual de JO153. La figura (b) muestra el mapa de SFR de la segunda época cósmica más reciente. El vector de movimiento está en color negro y el vector que apunta al centro del cúmulo aparece en color azul.	59
3.17.	Mapa de SFR2 y gráfica de diferencias relativas para la galaxia A500_F_0152.	59
3.18.	Star Formation History (SFH) de A500_F_0152.	60
3.19.	Representación de la generación del “doblete” de azufre	60
3.20.	Densidad electrónica vs SFR1	61
4.1.	Relación entre sSFR y masa para las galaxias de WINGS y OmegaWINGS y las galaxias clasificadas en algún estadio de “stripping”.	65
4.2.	Espectro de la galaxia JO10.	66
4.3.	SFR como función de la masa en cuatro intervalos de tiempo.	67
4.4.	Comparación de las muestras WINGS y GASP respecto al número de galaxias con cierta SFR a un intervalo de tiempo determinado.	69
4.5.	Comparación de las muestras WINGS y GASP respecto al número de galaxias con cierta SFR a un intervalo de tiempo determinado.	70
5.1.	SFH de las galaxias de GASP dependiendo de la masa.	75
5.2.	SFH normalizadas de las galaxias de GASP dependiendo de la masa.	76
5.3.	SFHs de galaxias medusa dependiendo de la distancia.	77
5.4.	SFHs de galaxias medusa dependiendo de la velocidad.	79
5.5.	SFHs de galaxias medusa dependiendo de la velocidad.	80

5.6. SFHs de galaxias medusa dependiendo de la velocidad. 81

5.7. sSFR vs Masa en las galaxias medusas de GASP dependiendo de la fase del desprendimiento en el que se encuentra el gas del disco galáctico (Vulcani, 2018). 82

5.8. sSFR vs Masa en las galaxias medusas de GASP y galaxias de WINGS y Omega-WINGS dependiendo de la fase del desprendimiento en el que se encuentra el gas del disco galáctico. 83

5.9. Espacio fase para las galaxias medusas de GASP. 85

5.10. Espacio fase para las galaxias medusas de GASP. 86

Índice de cuadros

3.1. Valores promedios del índice de asimetría y desviación estándar para galaxias de la muestra de control (columnas 2 y 3) y de las galaxias bajo influencia de RP (columnas 4 y 5).	46
3.2. Comparación de los ángulos de inclinación para los vectores que apuntan a la BCG y para los que se obtiene el índice de asimetría en los mapas de SFR1 y 2. También se muestra el valor de los índices de asimetría, aunque se coloca un * en el caso de que las asimetrías no sean significativas.	47
3.3. Propiedades de las poblaciones estelares en las galaxias con tasa de formación estelar apagada.	53
5.1. SFR promedio para las galaxias en cada bin de masa estelar. También se muestran los cocientes de SFR entre cada dos épocas diferentes contiguas.	75

Agradecimientos

Agradezco a mi familia: mi mamá, mi papá, Ady y don Dey, por la confianza y el apoyo incondicional que siempre me brindan para realizar mis estudios y cumplir todas mis metas, todo lo que soy es gracias a ellos. A mis tíos y primos, quienes también me han alentado a seguir realizándome en el ámbito académico.

A mi asesor, el Dr. Jacopo, por su tiempo, paciencia y profesionalismo durante la elaboración de esta tesis, por el apoyo moral y académico que me brindó durante la maestría y por las grandes oportunidades académicas que me otorgó para mi formación en la investigación, las cuales ampliaron mi horizonte hacia nuevos rumbos. Gracias a la motivación que me transmitió quedó más arraigada en mí la pasión por la ciencia y por la astronomía.

A mis sinodales: el Dr. Gustavo, el Dr. Sebastián, el Dr. Gilberto, la Dra. Yara y el Dr. Javier por sus valiosos comentarios y atentas sugerencias que ayudaron a mejorar el presente trabajo.

Al Dr. Luis Felipe y la Dra. Yolanda, quienes me abrieron las puertas al Instituto de Radioastronomía y Astrofísica a temprana edad y me guiaron en mis estudios hacia la Astronomía. A mis profesores Adela Miranda Bello, J. Jesús Salgado Villegas y Jesús David Robles Glz., quienes formaron parte de la persona y la alumna que soy, por compartir conmigo los logros que he ido obteniendo en cada paso de mi carrera profesional.

A Caro, Mariana, Toño y Gisela, a quienes conocí mientras realizaba el servicio social en el departamento de cómputo del IRyA: desde la prepa, siempre me impulsaron a seguir mi sueño de estudiar astronomía. A Ezequiel por su grandiosa amistad, por estar conmigo en toda situación y por los ánimos y consejos brindados. A Paolo (astrónomo DJ internacional), por su amistad y motivación, por sus sets super geniales y por brindarme la oportunidad académica de conocer nuevas experiencias. Todos ellos son mi ejemplo a seguir, yo soy su fan.

A Gris y Osmar por ser la mejor compañía para mí durante la maestría, dentro y fuera de clase, conformando un gran equipo. A Pablo y Tania por su amistad y apoyo incondicional.

Especialmente agradezco al Dr. Jacopo, el Dr. Gustavo, Dr. Roberto, Paolo, Toño y Gisela por permitirme tener la grandiosa experiencia académica de compartir mi trabajo en importantes instituciones extranjeras y recibir un valioso entrenamiento que me hizo crecer en el ámbito científico y poder realizar parte de este trabajo.

A DGAPA-UNAM-PAPIIT,
por el apoyo económico otorgado con los No. De Re.: IG100319 y IN104319.

Resumen

En esta tesis se presenta el análisis de las propiedades de las poblaciones estelares en una muestra de “galaxias medusas” observadas con MUSE @ VLT en el marco del proyecto GASP. Estas galaxias toman su nombre por el parecido morfológico a las medusas, mostrando largas colas de gas y estrellas recién formadas, creadas por el desprendimiento de gas debido a la presión hidrodinámica entre el medio intracumular caliente y el gas dentro de la propia galaxia. De acuerdo con simulaciones numéricas, la presión hidrodinámica provoca la compresión del gas dentro de la galaxia, lo cual puede conducir a un aumento de formación estelar dentro del disco galáctico un factor que, según estos estudios, se encuentra entre 2 y 3. Después, la presión hidrostática desprenderá el gas que una vez estuvo dentro del disco galáctico, creando así largas colas (hasta ~ 80 kpc) donde puede ocurrir la formación estelar. El objetivo de mi trabajo es estudiar la relación entre el aumento de la actividad de formación estelar y las propiedades tanto de la galaxia como del cúmulo que se acreta.

Abstract

In this thesis, I am presenting the analysis of the stellar population properties in a sample of the so-called jellyfish galaxies observed with MUSE@VLT in the frame of the GASP project. These galaxies take their name from the morphological resemblance to jellyfishes, displaying long tails of gas and newly born stars provoked by the interaction, via ram pressure stripping, between the hot intracluster medium and the gas with the galaxy itself. According to numerical simulations, ram pressure has a double effect: firstly, by compressing the gas within the galaxy, it might provoke an enhancement of the star formation activity, which according to these works can lead to an increase in the star formation rate within the galactic disk by up to a factor of 2 to 3, depending on the model. Later on in the interaction, ram pressure will push away the gas that was once inside the galactic disk, thus creating long (up to 80 kpc) tails where star formation can occur. The aim of my work is to study the relation between the “enhanced” star formation activity, and the properties of both the galaxy (stellar mass, morphology, gas content, position within the cluster, velocity) and the cluster it is accreting onto.

Capítulo 1

Introducción

De acuerdo al modelo cosmológico estándar de materia oscura fría (*cold dark matter*, Λ CDM), el universo está actualmente conformado en un 71.4% por energía oscura, un 24% por materia oscura y un 4.6% por materia bariónica, tal y como puede apreciarse en la figura 1.1.

El experimento WMAP permitió saber que la densidad del universo es igual a la densidad crítica ($9.9 \times 10^{-30} \text{ g/cm}^3$), con una incertidumbre del 0.5%, lo cual indica que el universo en el que vivimos es plano. Mediante estudios de supernovas tipo I se encontró que nuestro universo se encuentra expansión acelerada (Goldhaber, 2009), estudio que le valió el premio Nobel de Física 2011 a Saul Perlmutter, y a Brian P. Schmidt y Adam G. Riess por aportar evidencias a favor de la expansión del universo mediante la colaboración *High-Z Supernova Search Team* (Equipo de búsqueda de Supernovas a alto-Z).

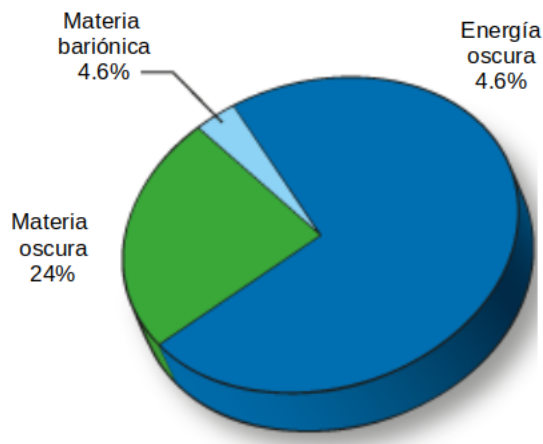


Figura 1.1: Resultados del satélite WMAP sobre la composición actual del Universo. Créditos: NASA/ESA/Planck. (Pla)

De igual manera, sabemos que a gran escala el universo se constituye mayormente por materia oscura y energía oscura, y que la materia bariónica sigue la distribución de la materia oscura a grandes escalas. Hablando en términos de materia visible, podemos decir que los bloques que constituyen al universo son las galaxias: una galaxia es un conjunto de estrellas y material interestelar, el cual está constituido por gas que se puede encontrar en varias fases (atómico, molecular o ionizado). Según el modelo de Λ CDM hay también una componente de materia oscura, la cual se detecta nada más por su interacción gravitacional con las otras componentes.

Las galaxias pueden encontrarse de manera aislada en el universo, en sistemas muy poco densos (grupos pequeños o pares), sistemas de baja densidad (grupos de galaxias) o en sistemas de alta densidad (cúmulos de galaxias). En términos generales, los grupos son conjuntos de menos de 50 galaxias en un volumen de una esfera con diámetro $1.5h^{-1}$ Mpc. Por otra parte, los cúmulos de galaxias contienen más de 50 galaxias en ese volumen y se conforman principalmente por gas intra-cumular caliente de baja densidad y por materia oscura.

1.1. Clasificación morfológica de las galaxias

Existen varios tipos de galaxias y, dependiendo de sus propiedades físicas, también se han propuesto varios tipos de clasificaciones. Mediante su diagrama del “diapasón”, Edwin Hubble desarrolló en 1936 una primera clasificación, basada en las características morfológicas. En la figura 1.2 se muestra el sistema de clasificación de Hubble para los tipos de galaxias. Él pensaba que las galaxias se formaban con formas elípticas y que más tarde evolucionaban hasta formar galaxias espirales, es por eso que del lado izquierdo del diagrama colocó a las galaxias “tempranas” (también les llamó “elípticas”) y del lado derecho a las “tardías” (las clasificó como “espirales” o “irregulares”). Aunque hasta hoy en día continúa en uso esos nombres dados a las galaxias por la secuencia de Hubble, gracias a estudios sobre los cúmulos de galaxias se sabe ahora que si el diagrama de Hubble representara el proceso evolutivo de las galaxias, eso sería al contrario de como lo vió el: las galaxias de tipo tardío pueden, bajo algunas circunstancias, evolucionar en galaxias de tipo temprano (como se ve por ejemplo en Poggianti et al., 2009, y en las referencias que se encuentran allí).

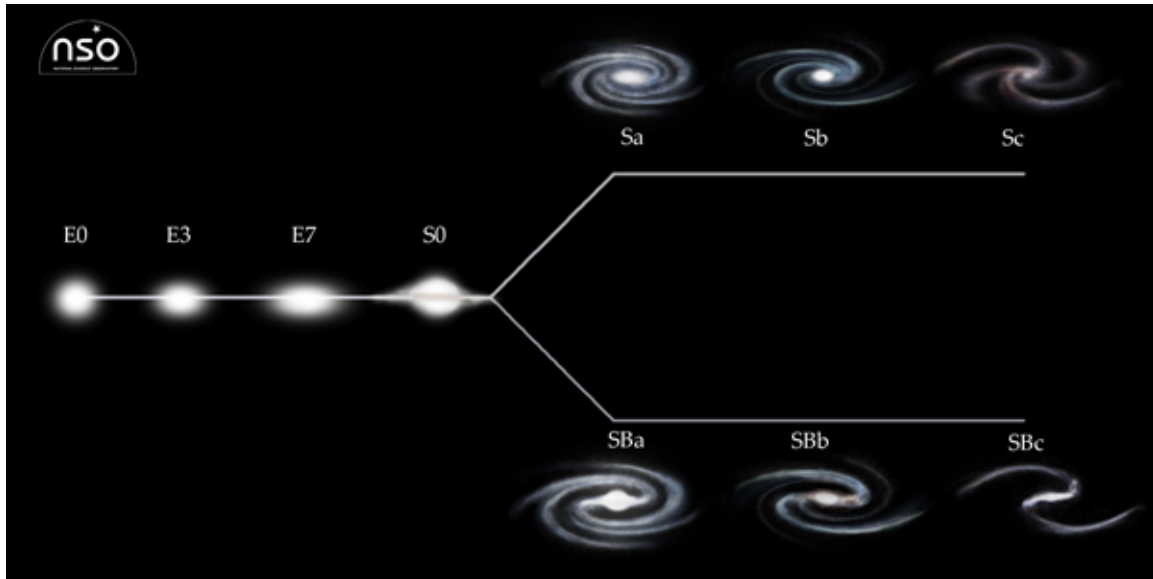


Figura 1.2: Esta clasificación fue propuesta por Edwin Hubble, y se le conoce también como “diagrama de diapasón” en 1936 y sigue utilizándose hasta hoy en día. Créditos: NSO (NSO)

Hubble clasificó a las galaxias “elípticas” o “tempranas” con la letra “E”, y dependiendo de su elipticidad les asignó un número “n” entre 0 y 7 que resulta de aplicar la siguiente fórmula:

$$n = 10 \times \left(1 - \frac{b}{a}\right), \quad (1.1)$$

donde a es el semieje mayor y b es el semieje menor de la galaxia. De este modo, las galaxias más redondas se clasifican como “E0”, y el número va incrementando conforme más “aplanadas” sean las galaxias.

Las galaxias “S0” son las llamadas “lenticulares” y se encuentran entre las elípticas y las espirales en la secuencia de Hubble, pues tienen un disco pero no la estructura con brazos espirales, además, estas galaxias están dominadas por el bulbo. Tanto las galaxias elípticas como las S0 tienen gas caliente cuya temperatura aproximada es de $10^7 K$ y cuya masa va de $10^8 - 10^{10} M_{\odot}$ (Padmanabham, 2002).

En la parte derecha del diagrama de Hubble se encuentran las galaxias “espirales”, o “tardías”. Tienen forma de un disco con grandes brazos espirales, Hubble les asignó una letra “S”, seguida por una letra “B” mayúscula en el caso de que la galaxia presente una estructura de barra central (se les llama espirales “barradas”). También se le agrega a la etiqueta una letra minúscula que indica qué tan abiertos se encuentran los brazos: las galaxias con los brazos más enrollados llevan la letra “a”, y así las demás letras en orden alfabético indican que los brazos espirales están más “apretados”.

A pesar de que en esta clasificación no se encuentran muchas galaxias de tipos muy peculiares, como el que se estudia en esta tesis y del que se hablará más adelante, vemos que la secuencia de Hubble es una buena herramienta para poder estudiar y distinguir ciertas galaxias de una manera más genérica. A continuación se hace una explicación más profunda de las características de cada tipo de galaxias.

1.1.1. Galaxias elípticas

Se componen generalmente de estrellas muy viejas (estrellas de Población tipo II), su forma es esferoidal y no tienen disco (por ejemplo Castelli et al., 2008). También se caracterizan por tener poco polvo o carecer de él, sin embargo, observaciones en infrarrojo han develado la presencia de este material en algunas galaxias elípticas (De Looze et al., 2010; Bregman et al., 1998). Estas galaxias son pobres en gas frío (Nipoti and Binney, 2007), sin embargo sabemos que es posible encontrar formación estelar porque hay observaciones en CO (Sage et al., 2007), HI (Morganti et al., 2006; Oosterloo et al., 2007) y líneas en el óptico (Sarzi et al., 2006) que nos lo indican.

Desde un punto de vista dinámico, las galaxias elípticas están soportadas por dispersión de velocidad y su perfil de luminosidad ajusta muy bien con la ley de Vaucouleur, la cual describe cómo cambia el brillo superficial como función del radio aparente, y se expresa con la fórmula (de Vaucouleurs, 1948):

$$I(R) = I_e \exp \left\{ -7.67 \left[\left(\frac{R}{R_e} \right)^{\frac{1}{4}} - 1 \right] \right\}, \quad (1.2)$$

donde R es el radio a partir del centro galáctico, $I(R)$ es el brillo superficial de un bulbo o de una galaxia elíptica al radio R , R_e es el radio efectivo definido como el radio de la isofota que encierra la mitad de la luz, I_e el brillo superficial a R_e . En unidades de magnitud por arcosegundo, lo que se tiene es:

$$\mu(R) = \mu_e + 8.3268 \exp \left\{ \left[\left(\frac{R}{R_e} \right)^{\frac{1}{4}} - 1 \right] \right\}. \quad (1.3)$$

Morfológicamente, puede hacerse la siguiente clasificación de las galaxias elípticas:

cD: pueden medir casi 1 Mpc de ancho, se localizan con frecuencia cerca del centro de grandes cúmulos de galaxias, también se les conoce como “galaxias elípticas dominantes” o “galaxias centrales gigantes” y para producirlas se han propuesto dos mecanismos: las fusiones de galaxias y las fuerzas de marea (Lugger and Liller, 2004).

elípticas normales: tienen un brillo superficial en el centro relativamente alto, y se subdividen en galaxias elípticas gigantes (gE), elípticas de luminosidad intermedia (E) y las elípticas compactas.

dEs: son galaxias enanas elípticas de baja masas y entonces bajo potencial gravitacional, que les impide retener cantidades significativas de gas; su brillo superficial es menor que el de las elípticas normales, su diámetro mide entre 1 y 10 Kpc, y la cantidad de galaxias en el centro es mayor que en las partes externas.

dSphs: se denominan como galaxias esferoidales enanas, no tienen gas y su brillo es muy bajo (las magnitudes absolutas que presentan van de -8 a -15).

BCD: son galaxias de tamaño más pequeño con respecto a sus contra partes más comunes. Debido a la presencia de grandes cantidades de medio interestelar (con respecto a sus masas), presentan formación estelar activa y poblaciones estelares medianamente jóvenes y por lo tanto sus colores fotométricos son más “azules”, con valores en $B - V$ que van de 0.0 a 0.30 magnitudes, típico de las estrellas jóvenes azules de tipo A.

Además, hay otras características que pueden destacarse de estos tipos de galaxias, por ejemplo: el brillo superficial de las galaxias cD y de las elípticas normales sigue una ley $r^{1/4}$, ya que a medida que la masa de la galaxia decrece, hay una transición suave del perfil exponencial característico de las galaxias enanas elípticas y enanas esferoidales. Por otro lado, los brillos superficiales, magnitudes absolutas y metalicidades de las dEs y dSphs son mucho menores que los de las elípticas de masa similar.

1.1.2. Galaxias lenticulares ($S0$)

Son conocidas como galaxias $S0$ y, de acuerdo a su distribución de brillo superficial, se caracterizan por tener un bulbo prominente que las hace lucir como galaxias elípticas, pero también un disco que generalmente carece de brazos espirales y cuyo perfil de brillo superficial decae de manera exponencial. Los discos de estas galaxias están compuestos de estrellas viejas, y generalmente no tienen actividad de formación estelar reciente ni regiones de gas o polvo asociadas a formación estelar. Al igual que las galaxias espirales, pueden clasificarse como barradas (“S0B”) o sin barra (“S0A”).

Los colores de las $S0$ son casi tan rojos como los de las galaxias elípticas y más rojos que los de las espirales; la relación de luminosidad del bulbo con respecto a la total de toda la galaxia en la banda B es aproximadamente de 0.6 (Alvensleben, 2004) y la relación M/L también se encuentra en medio de esos dos tipos de galaxias.

Debido a la evolución de la abundancia de estas galaxias en los cúmulos, se piensa que las $S0$ son resultado de transformaciones morfológicas de galaxias espirales entrando a cúmulos de galaxias y se ha visto que las poblaciones estelares de las $S0$ tienen propiedades parecidas a las de las elípticas (Dressler et al., 1997).

1.1.3. Galaxias espirales

Las galaxias espirales se caracterizan por presentar formación estelar y ser muy ricas en gas, ya que algo fundamental para que haya actividad de formación estelar es la disposición de este material. Debido a que hay formación estelar, los colores azules son característicos de estas galaxias ya que las emisiones en UV nos hablan de gas ionizado y para que esto suceda debe haber fuentes que generen

fotones lo suficientemente energéticos para ionizarlo: las estrellas de tipo espectral O y B son las que cumplen con estas características y resulta que al ser muy masivas, sabemos que viven poco tiempo, así que puede decirse que en dicha región hay formación estelar por tener estrellas jóvenes. Como ya se explicó previamente, siguiendo la clasificación de Hubble estas galaxias se identifican con la letra “S” seguida de una letra minúscula a, b, c, etc. dependiendo del nivel de enrollamiento de sus brazos y del tamaño del bulbo con respecto al disco.

Estas galaxias tienen dos componentes estructurales principales, los cuales son:

Disco de gas, polvo y estrellas que presenta brazos espirales. Aquí puede haber actividad de formación estelar.

Bulbo central formado por estrellas viejas de población II y baja metalicidad que lo hacen parecerse a una galaxia elíptica con la diferencia de que las estrellas pueden o no presentar rotación (Kormendy and D., 1982), y esto ocurre tanto en los bulbos de las galaxias espirales como en los de las S0.

Algunas galaxias pueden presentar además otras componentes morfológicas como:

Barra en el núcleo galáctico. De Vaucouleurs utilizó la notación “SA” para las galaxias sin barra. Como en la clasificación de Hubble las galaxias con barra se denotan con las letras “SB”, hay una clase intermedia “SAB”. Esta forma de categorizar a las galaxias presentada por De Vaucouleurs en 1959 fue una extensión de la clasificación de Hubble.

Anillo. A las galaxias que tienen esta estructura se les agrega “(r)” y a las que no poseen anillos se les identifica con una “(s)”.

Los discos de las galaxias espirales siguen un perfil de luminosidad exponencial según la ley:

$$L(R, z) = L_0 \exp \left\{ \left(- \frac{R}{R_d} \right) \operatorname{sech}^2 \frac{z}{z_0} \right\} \quad (1.4)$$

donde L es la luminosidad, R es la coordenada bidimensional en el radio del disco, z es la altura del disco y z_0 y R_0 son constantes.

Dado que el disco de las galaxias espirales está soportado por rotación, el estudio de las curvas de rotación como función de la distancia radial es imprescindible para examinar el perfil de densidad dentro y fuera del disco, incluso ha sido una herramienta determinante para el estudio de la distribución de la materia oscura.

1.1.4. Galaxias irregulares

Además de los tipos morfológicos descritos hasta ahora, hay galaxias con morfologías que no están bien definidas y no entran en ninguna de las clases de la clasificación de Hubble, así que se incluyen como un tipo de galaxias espirales irregulares y se denotan como “Im/Ir”. Se piensa que posiblemente son resultado de varias interacciones que ocurrieron entre galaxias. Lucen como galaxias que han sufrido ciertas interacciones que cambian drásticamente su morfología de tal manera que no pueden clasificarse en las categorías anteriores. Estas galaxias tienen grandes cantidades de gas y polvo, y presentan mucha formación estelar, debido a lo cual son muestran muy azules. Hay estudios que muestran que los discos de algunas galaxias irregulares tienen un gradiente de abundancia radial (Pilyugin et al., 2015). Dentro de esta categoría de galaxias podríamos incluso clasificar a ciertos objetos como las galaxias anillo. Dos de las galaxias irregulares más conocida son las Nubes de Magallanes Grande y Pequeña, galaxias irregulares satélites de la Vía Láctea.

1.2. Mecanismos físicos involucrados en la evolución galáctica en cúmulos

Las galaxias no permanecen con las mismas características a lo largo de su historia, se llevan a cabo procesos de evolución que dependen de su interacción con otras galaxias y de las propiedades del medio ambiente en el que se encuentran. Así, las galaxias cambian con el tiempo y esto se puede comprobar observando cambios en las propiedades en función del corrimiento al rojo. Los cúmulos de galaxias se caracterizan por ser lugares donde los procesos evolutivos de las galaxias pueden darse de manera muy eficiente y relativamente rápida: el medio intra-cúmulo se constituye por gas caliente y denso que se detecta principalmente rayos X debido a procesos de emisión libre-libre.

Las galaxias aisladas evolucionan de manera muy diferente a las galaxias en medio ambientes más densos como son los cúmulos de galaxias: la densidad más alta de galaxias, el potencial gravitacional del cúmulo y la presencia de una gran cantidad de gas muy caliente (el medio intra-cumular), facilitan el surgimiento de mecanismos que cambian de forma rápida las propiedades de una galaxia que llegue a encontrarse en este medio ambiente, determinando además su evolución futura.

La evidencia más fuerte de la evolución de galaxias en los cúmulos, y una de las primeras que se descubrió, es el efecto Butcher-Oemler (Butcher and Oemler, 1978), el cual consiste en observar una alta fracción de galaxias espirales azules y de alta masa observadas en cúmulos de alto redshifts, comparada con la baja fracción que se tiene de ellas en cúmulos cercanos. Este resultado observacional apunta a un mecanismo de evolución, tanto morfológico como en las poblaciones estelares, muy eficiente que nos permite de explicar las distintas mezclas en los tipos morfológicos observada entre los cúmulos a alto y bajo corrimiento al rojo. Estudios sobre transformaciones morfológicas en cúmulos nos dan pruebas de que la fracción de galaxias elípticas en estos medio ambientes se ha mantenido mas o menos constante a altos y bajos corrimientos al rojo, a diferencia de la fracción de galaxias S_0 y espirales que han evolucionado más fuertemente (Poggianti et al., 2009).

Este resultado observacional hace plantearse el hecho de que hay una secuencia evolutiva en la que las galaxias espirales evolucionan en galaxias de tipo S_0 . También ha habido estudios sobre transformaciones morfológicas en cúmulos de galaxias: la fracción de galaxias elípticas en los cúmulos se ha mantenido invariante a altos y bajos corrimientos al rojo, a diferencia de la fracción de galaxias S_0 y espirales que han evolucionado más fuertemente en cúmulos poco masivos y de bajo σ (Poggianti et al., 2009).

Por otro lado, la formación estelar es uno de los procesos que determinan la evolución de una galaxia y está limitada por la cantidad del gas disponible. Sin embargo, la evolución de las galaxias en cúmulos no está influenciada solamente por el gas y polvo que presenta cada una, sino también por las propiedades del medio ambiente donde se encuentran las galaxias. Esto se debe a que la densidad del medio ambiente determina la eficiencia en la que se llevan a cabo los cambios en las características de las poblaciones estelares de las galaxias y las transformaciones morfológicas de las mismas, y puede tener una influencia sobre el contenido y el estado físico del medio interestelar.

Particularmente, en regiones de alta densidad hay varios mecanismos físicos involucrados en la detención de la formación estelar y causantes de la diferencia que se da entre la evolución de galaxias en cúmulos y la evolución de galaxias aisladas. Estos procesos físicos pueden perturbar el gas que posee cada galaxia, ya sea quitándose o agregándose, definiendo así las características de la formación estelar de cada galaxia y con ello la evolución de la misma. Dichos mecanismos pueden ser procesos internos a la galaxia o externos. A continuación se revisan los procesos que se piensa tengan el papel mas importante sobre los cambio morfológicos y de las poblaciones estelares.

1.2.1. Procesos internos

a) Retroalimentación por AGNs

Este mecanismo consiste en la supresión de la actividad de formación estelar (por ej. Pandge et al., 2019) debido a efectos mecánicos producidos por los jets de los AGNs. Este proceso está limitado a altos corrimientos al rojo a objetos de muy alta luminosidad (por ej. Heckman and Best, 2014; Sanders and Mirabel, 1996; Hopkins et al., 2009; Silk and Rees, 1998). Las simulaciones numéricas de formación de galaxias altamente masivas recurren a este mecanismo para explicar el apagado de la formación estelar (por ej. Silk and Mamon, 2012).

b) Formación estelar

La actividad de formación estelar es determinante para el futuro de la galaxia. Una región que presenta formación estelar activa va a presentar estrellas masivas y azules y es rica en gas y polvo. La retroalimentación por formación estelar es el principal mecanismo que se utiliza en simulaciones numéricas cosmológicas de formación de galaxias para regular la formación estelar en galaxias de baja y alta masa (por ej. Schaye et al., 2015; Hayward and Hopkins, 2016): las explosiones de supernovas puede generar vientos fuertes que barren el medio interestelar apagando la formación de estrellas (por ej. Hayward and Hopkins, 2016) y, por otro lado, los vientos estelares, la presión de radiación y la fotoionización también son procesos importantes en la retroalimentación estelar. En contraparte, mientras que la formación estelar es frenada por explosiones de supernovas (por ej. Zaragoza-Cardiel et al., 2019; Lin et al., 2017; Saintonge et al., 2011), se predice que la retroalimentación por AGNs es el mecanismo que genera el apagado de la formación estelar.

c) Formación ó presencia de barra

Como se mencionó al inicio de la introducción, una de las características morfológicas que pueden presentar las galaxias espirales es la barra estelar, la cual se forma de manera espontánea en sistemas donde hay un exceso de movimientos en bulto. De acuerdo a simulaciones numéricas, las interacciones de marea entre galaxias conducen generalmente a la formación de una barra transitoria y la refuerzan en el caso de que ésta ya se haya formado (Shlosman et al., 1990). La formación de la barra constituye uno de los mecanismos más importantes para canalizar el flujo radial de gas hacia en centro de la galaxia (Lin et al., 2017; Chown et al., 2019). Se están llevando a cabo estudios para determinar cómo la barra de las galaxias afecta la dinámica del gas interestelar y con ello la evolución de la galaxia, puesto que puede afectarse la densidad del gas y con ello la tasa de formación estelar: cuando la galaxia tiene gas, la SFR aumenta debido a que la barra va guiando al gas a lo largo de ésta, y en casos especiales, hacia el centro (Saintonge et al., 2011).

1.2.2. Procesos externos

Estos mecanismos físicos se clasifican a su vez en procesos gravitacionales o hidrodinámicos. Más adelante explicaremos en detalle cada uno de ellos.

■ Procesos gravitacionales

a) Fusiones galácticas (*Galaxy mergers*)

Consisten en encuentros cercanos entre pares de galaxias que terminan por unirse en un sólo sistema, que normalmente es una galaxias esferoidal soportada por dispersión de velocidad

(por ej. Pfister et al., 2020). Puede deberse a galaxias de masas similares (fusiones mayores) o al canibalismo galáctico (fusiones menores; Toomre and Toomre, 1972). La escala de tiempo de este proceso es del orden de la escala de tiempo que tienen las órbitas estelares internas de las galaxias: $\sim 10^8$ años (por ej. Lugger and Liller, 2004).

Cuando la fusión se da entre galaxias con gas, se habla de una “fusión húmeda” (*wet merger*), pero si se encuentran carentes de gas, se le conoce como “fusión seca” (*dry merger*). El primer caso involucra a las estrellas viejas y a las originadas en brotes de formación estelar, dando lugar a las galaxias *starbursts* cuando esto ocurre por toda la galaxia.

Activando la formación estelar, las fusiones llegan a cambiar la función de luminosidad de las galaxias. Esto último se logra mediante la combinación de las luminosidades de cada galaxia y incremento de la luminosidad del *merger* debido al incremento en la SFR (por ej. Collobert et al., 2006). Además, este proceso ocasiona también cambios en la densidad espacial, masa, luminosidad y morfología de las galaxias, y es más eficiente cuando las velocidades relativas entre las galaxias son bajas (por ej. Iñesta et al., 2006), de modo que se espera que sea más eficiente en los grupos de galaxias, en los cuales las velocidades relativas son menores con respecto a las velocidades de las galaxias en los cúmulos.

b) Interacciones de marea

Consiste en las interacciones provocadas por el efecto diferencial gravitatorio en diferentes zonas de una galaxia debido a que la misma es extensa y por tanto la gravedad a la que se vé sometida por un cuerpo externo (otra galaxia, un cúmulo), no es la misma en toda su extensión.

Los efectos de marea causan colisiones entre nubes que generan actividad de formación estelar en galaxias de disco, incluso puede ser más eficiente que la activación de formación estelar debida a RP (Byrd and Valtonen, 1990), así mismo, de modo que las perturbaciones por marea incrementan la actividad nuclear y del disco.

c) “Acoso galáctico”

Consiste en encuentros múltiples y frecuentes de una galaxia que interactúa a alta velocidad con otras galaxias cercanas, las órbitas dejan de ser frías teniendo un momento angular bajo, entonces el gas de la galaxia en cuestión se calienta (Moore, 1996). Dicho de otra forma: una galaxia que se encuentra en un cúmulo sufre los efectos tanto de la fuerza gravitacional del cúmulo (a una escala de tiempo corta) como de la fuerza gravitacional debida a encuentros galaxia-galaxia (con una escala de tiempo larga). Estos dos efectos combinados constituyen el “*Galaxy Harassment*” o “acoso galáctico” (por ej. Smith et al., 2010).

Como resultado de la acción de estas fuerzas se tiene que la galaxia presenta un despreñamiento de gas que es despojado de ella (por ej. Lugger and Liller, 2004). De este modo, el acoso galáctico origina cambios principalmente en el aspecto morfológico de las galaxias en cuestión (aunque también los procesos evolutivos de las poblaciones estelares pueden quedar afectados (por ej. Moore, 1996)).

Este proceso es importante en cúmulos de galaxias y en particular en galaxias pequeñas poco masivas: explica muy bien cómo las galaxias de disco de tipo tardío poco masivas se transforman morfológicamente en galaxias de tipo temprano, tal y como lo mostró Moore (1996) con su conjunto de simulaciones de N-cuerpos.

Se espera que su eficiencia dependa de las órbitas de las galaxias que están cayendo en el cúmulo, puesto que mientras más se aproximen las galaxias al centro del cúmulo, las fuerzas de marea son más fuertes y además ahí es más probable que tengan encuentros con otros de los miembros (por ej. Bialas et al., 2015). Según simulaciones numéricas, el material de gas y estrellas que resulta de los encuentros crea colas de escombros, las cuales pueden generar choques de marea que impulsan la formación de galaxias enanas (por ej. Barnes, 1992; Mirabel et al., 1992).

■ Efectos hidrodinámicos

Son principalmente inanición ó “estrangulación”, evaporación térmica y presión hidrodinámica.

a) Inanición

También se conoce como sofocamiento o estrangulamiento e incluye varios procesos que detienen la entrada del gas frío que se encuentra en un halo extendido en las partes exteriores a las galaxias (Larson et al., 1980) y que pueden ser consecuencia de la interacción del medio interestelar con el medio intracumular caliente (Cowie and Songaila, 2007) arriba de 10^8 K, por ejemplo, evaporación térmica o RPS. Dicho gas frío es el combustible que una galaxia necesita para la formación de estrellas nuevas.

b) Evaporación térmica

Este mecanismo consiste en el calentamiento del gas interestelar de las galaxias hasta evaporarse, esto gracias a la conducción térmica del medio interestelar caliente (Kim and Pellegrini, 2011). En las galaxias masivas, la evaporación térmica se da en una escala de tiempo dinámico, por lo cual se inhibe la formación estelar; en cambio, en las menos masivas este proceso es menos eficiente, de modo que cantidades grandes de gas frío pueden llegar al centro galáctico y formar nuevas estrellas (Nipoti and Binney, 2007).

c) Presión hidrodinámica o “Ram Pressure”

La presión hidrodinámica, o RP por sus siglas en inglés, es la presión provocada por el choque entre dos medios que se mueven a gran velocidad uno respecto del otro. En particular, esto ocurre cuando un cuerpo se mueve a través de un fluido, donde el fluido ejerce una fuerza de arrastre en el cuerpo. Los primeros en hablar de RP en el medio intergaláctico fueron Gunn Gott en 1972, explicando la caída de materia en cúmulos de galaxias y el efecto que tienen en la evolución galáctica (Gunn and Gott, 1972).

En este contexto tenemos que la RP se genera por la interacción del medio interestelar de los discos galácticos y el medio intra-cumular de baja densidad y caliente; esto genera un choque que incrementa la densidad del gas. Si pensamos en galaxias que están cayendo a centros de cúmulos, podemos encontrarnos con este efecto entre el medio intra-cumular y el medio interestelar de la galaxia. El medio intra-cumular contiene gas de muy alta temperatura que puede generar una presión en el medio interestelar de la galaxia que se encuentra cayendo hacia el cúmulo, lo suficiente como para arrancar el gas del disco galáctico. A este proceso se le conoce como desprendimiento de gas por presión hidrodinámica o “Ram Pressure Stripping”

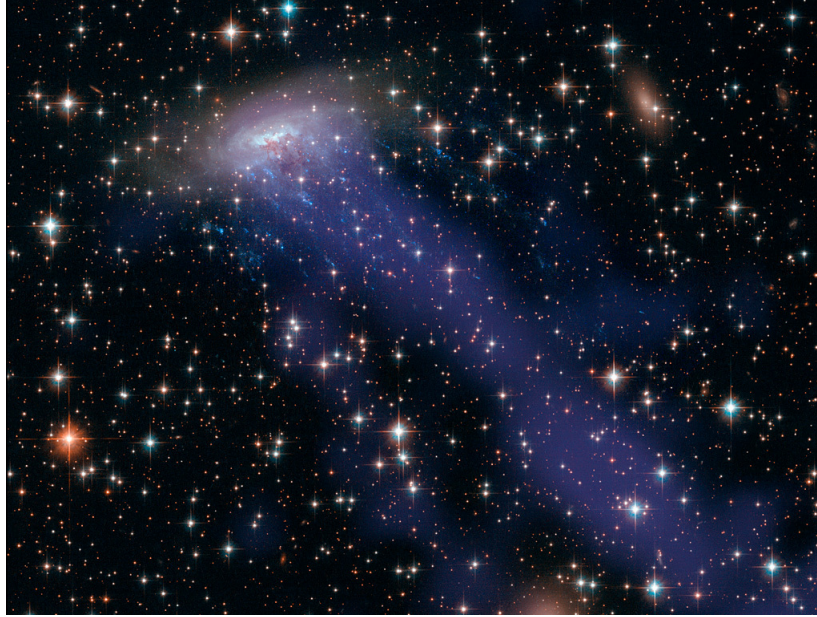


Figura 1.3: Galaxia espiral ESO 137-001 del cúmulo de Abell 3627 a una distancia de más de 67 Mpc. Créditos: Rayos-X: NASA/CX-C/UAH/M, Sun et al. (se muestra con color azul). Óptico: NASA, ESA, (STScI/AURA; se muestra con colores cian, naranja y blanco). (ESO)

”(RPS, por sus siglas en inglés), porque el disco galáctico pierde su gas debido a la presión hidrodinámica que provoca su arrastre. Hay estudios que muestran que en el cúmulo de Virgo la RP retira cantidades significativas de hidrógeno atómico del disco de las galaxias espirales gigantes (Vollmer et al., 2002). Este mecanismo se diferencia de los demás por sus escalas de tiempo muy cortas, aproximadamente de cien millones de años, y por no afectar a la dinámica de las estrellas, únicamente al gas interestelar, lo cual provoca cambios notorios en la forma de las galaxias, pues la SFH depende fuertemente de la cantidad, distribución y densidad del gas que genera formación estelar.

1.3. Galaxias medusa

Existen galaxias espirales que se encuentran cayendo hacia el centro de cúmulos y sufren un desprendimiento de gas y polvo en sus discos. Esto se debe a la presión hidrodinámica generada por el choque entre el medio intracumular caliente y el medio interestelar de la misma galaxia. A este fenómeno se le conoce como desprendimiento por presión hidrodinámica (ver la sección 1.2.2). Como se observan discos de polvo truncados como deficiencia de $H\alpha$, se piensa que el gas y polvo fueron arrancados del disco formando largas estelas (o colas) de material, que pueden extenderse hasta o incluso más de 100 kpc (Fossati et al., 2015; Poggianti et al., 2017), donde también hay formación estelar. La forma que adquieren estas galaxias se asemeja a la de las medusas, es por esto que toman el nombre de “galaxias medusas”, utilizado por primera vez en Smith et al. (2010).

Entre los ejemplos más extremos de galaxias con RPS tenemos el caso de la espectacular galaxia ESO 137-001 (Fig. 1.3), que presenta una cola de aproximadamente 80 kpc de largo (Fossati et al., 2015). Esta galaxia pertenece al cúmulo de Abel 3627, se encuentra a una distancia de aproximadamente 67 Mpc y puede observarse en la constelación del Triángulo Austral. La imagen es una composición de colores realizada por el Telescopio Espacial Hubble (*HST*), el cual permite observar

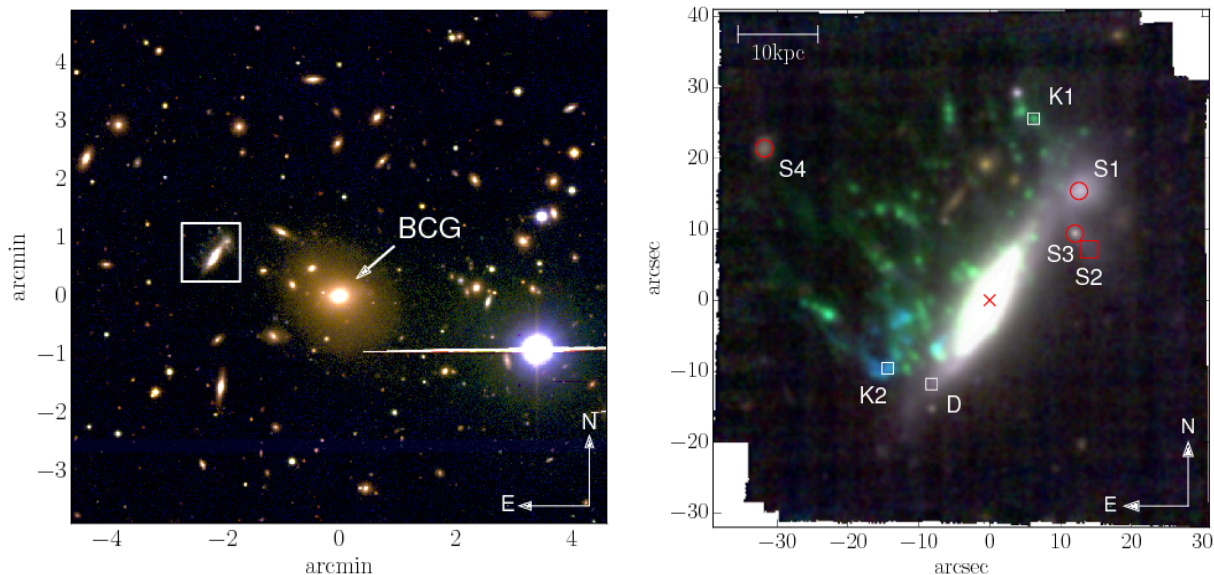


Figura 1.4: A la izquierda una imagen RGB de las partes interiores del cúmulo A957. La galaxia JO204, que se puede apreciar con un cuadro blanco correspondiente al campo observado por MUSE, se localiza a $\sim 2'$ de la BCG. En el panel de la derecha se muestra la imagen RGB de la galaxia JO204, obtenida a partir de la emisión de líneas [OIII]5007 (color azul), $H\alpha$ (en color verde) y la emisión del continuo entre 7100 y 7200 Å (color rojo). Los puntos marcados con la letra “K” son puntos emisores compactos. La etiqueta “S1” indica una galaxia que se encuentra a $z \simeq 0.052$ con un espectro post-starburst típico. “S2” es una región a un redshift similar a “S1”, sin líneas de emisión con y líneas de Balmer en absorción débiles. “S3” es una estrella de la Vía Láctea. “S4” es una galaxia con formación estelar a $z \simeq 0.36$ (imagen tomada de Gullieuszik et al., 2017).

las estrellas, y el Observatorio Espacial en rayos X Chandra (*CXC*), que nos ayuda a distinguir que el gas está siendo arrancado.

La parte superior de la figura 1.4 muestra una imagen del cúmulo A957 con la galaxia JO204 localizada a $\sim 2'.1$ del centro (o de la BCG), y en la segunda imagen se ve a la galaxia JO204, donde se aprecian las líneas del oxígeno dos veces ionizado [OIII]5007, las regiones $H\alpha$ y la emisión del continuo entre 7100 y 7200 Å (Gullieuszik et al., 2017).

Las galaxias medusas pueden observarse en el Universo Local (Poggianti et al., 2017) o a corrimientos al rojo altos (Ebeling et al., 2014a), por ejemplo se han encontrado galaxias de este tipo en cúmulos a $z > 0.3$ (Ebeling et al., 2014b; McPartland et al., 2015). Dados los efectos de la RPS y la SFR, se han también observado galaxias medusas a diferentes longitudes de onda (Gavazzi et al., 1995; Deb et al., 2020; Ramatsoku et al., 2019; Fumagalli et al., 2014); un ejemplo de esto último es la galaxia JO201 estudiada con observaciones en UV (George et al., 2018) donde se demuestra que dicha galaxia presenta actividad de formación estelar fuera del disco galáctico.

Observaciones de la transición 1-0 de la molécula de CO realizadas con APEX (Moretti et al., 2018), junto con observaciones de hidrógeno atómico (Deb et al., 2020) han permitido corroborar que en las colas de las galaxias medusa hay presencia de gas en varias fases. El gas en la fase molecular se formó muy probablemente en las mismas colas y parece constituir la reserva ideal para la formación estelar observada por la presencia de gas ionizado.

Se ha encontrado que en las colas de las galaxias medusas generadas por RPS hay una SFR promedio de $\sim 0.25 M_{\odot} yr^{-1}$ por cúmulo (Poggianti et al., 2019). Extrapolando este resultado se

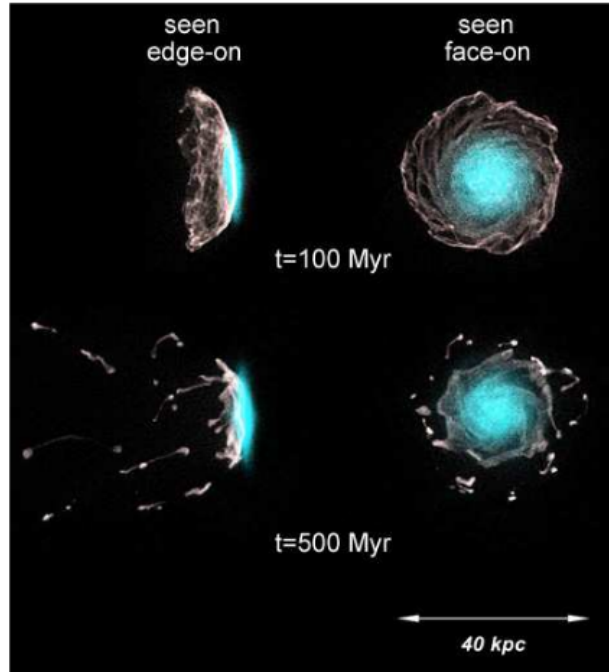


Figura 1.5: Simulación numérica de una galaxia cayendo de dos maneras diferentes: de cara y de canto. En blanco se aprecia la distribución del gas y en azul turquesa las nuevas estrellas formadas debido a la RPS (Kronberger et al., 2008)

obtuvo que desde un $z \sim 1$, se formaron en las colas $\sim 4 \times 10^9 M_{\odot}$ de estrellas.

Para poder estudiar la evolución de las galaxias que sufren RPS es útil y necesario analizar las Historias de Formación Estelar (SFH, por sus siglas en inglés) y comparar sus propiedades con las de otras galaxias en condiciones normales para poder determinar los mecanismos que más influyen en su evolución. Esto permitirá distinguir posibles características en las galaxias medusa a tiempos antiguos y recientes y determinar qué procesos son los que más las afectan.

1.4. Simulaciones numéricas de fenómenos de presión hidrodinámica

Por otro lado, y de un punto de vista teórico, se han desarrollado simulaciones numéricas de galaxias que presentan RPS, como la que se puede ver en la Fig. 1.5 por Kronberger et al. (2008), donde se presenta la evolución temporal de la distribución del gas de una galaxia moviéndose a través de un cúmulo, de manera que cae de frente, observada desde diferente perspectiva. Este tipo de simulaciones nos ayudan a estudiar las propiedades del gas de las galaxias medusas, pues pueden presentarnos los efectos que sufren bajo diferentes condiciones, tales como la presencia de campos magnéticos (Ramos-Martínez et al., 2018) o el ángulo de incidencia de la galaxia con respecto a la velocidad del medio intracumular (Kronberger et al., 2008). Por ejemplo, pueden darnos información sobre las propiedades del gas y de la formación estelar después de sufrir estos procesos y qué tan eficaz es la RPS en quitarle el gas a una galaxia y qué papel juegan los varios parámetros físicos (masa de la galaxia, velocidad, densidad del medio, etc.) (Kapferer et al., 2009; Bekki, 2013; Book and Benson, 2010; Köppen et al., 2018; Steinhauser et al., 2012).

En la Fig. 1.6 se muestra qué sucede con el perfil de densidad del gas de una galaxia simulada en

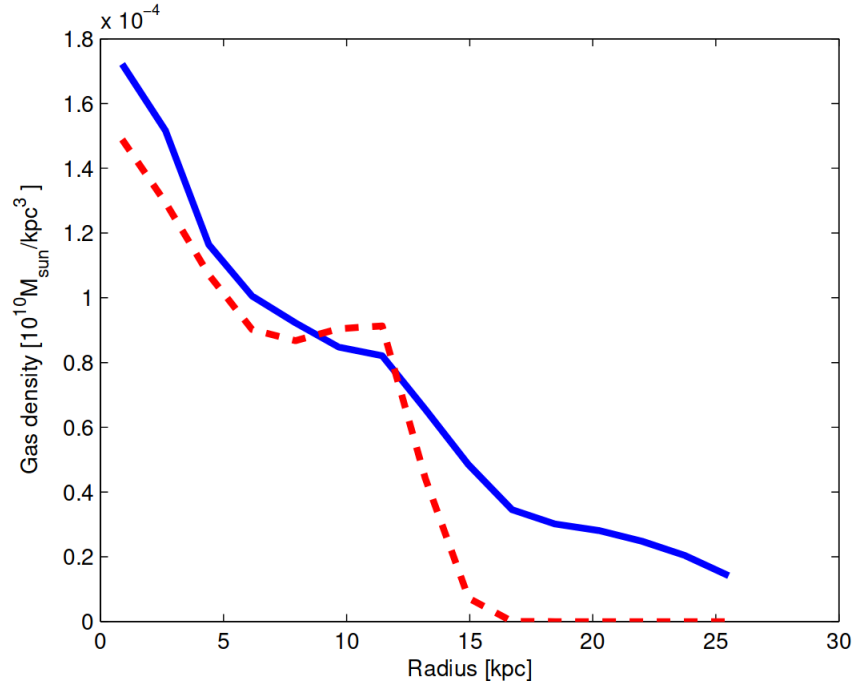


Figura 1.6: La línea punteada roja representa el caso de una galaxia que presenta el efecto de RPS producido por vientos y la línea continua azul representa el caso de la galaxia aislada.

dos casos diferentes: cuando la galaxia está presentando RPS debido a vientos (línea roja) después de 100 millones de años y cuando la misma galaxia es simulada en condiciones de aislamiento (línea azul, a la misma edad). Los resultados de estas simulaciones muestran que el perfil de densidad del gas en el primer caso decae más rápidamente a una distancia entre 10 y 15 kpc (Kronberger et al., 2008), con respecto al caso de la galaxia aislada.

De este manera, a través de simulaciones numéricas pueden estudiarse los procesos que sufren las galaxias a lo largo de su trayecto por el medio intra-cumular. Así, se ha observado un doble efecto (Kronberger et al., 2008; Fujita and Nagashima, 1999):

1. debido a la compresión del gas hay un aumento en la densidad del medio interestelar de la galaxia, lo cual facilita una actividad de formación estelar incrementándola dentro del disco galáctico. A su vez, como las galaxias pueden moverse en diferentes ángulos, se ha encontrado que la SFR varía dependiendo de la forma en la que se desplazan a través del medio intra-cumular: los trabajos de (Kronberger et al., 2008) muestran que si la galaxia se mueve de cara la actividad de formación estelar puede aumentar hasta 2 veces, mientras que si se mueve de canto, el aumento puede ser de 3 veces, tal y como se aprecia en las figuras 1.7 y 1.8;
2. debido al empuje del gas fuera de la galaxia por la presión RAM, el gas que una vez estuvo en el disco forma unas largas estructuras en forma de colas que pueden llegar a medir hasta 80 kpc y en las cuales puede ocurrir formación estelar (Fujita and Nagashima, 1999). Estas colas están entonces asociadas a una pérdida de masa en forma de medio interestelar, provocada por un conjunto de procesos como la RPS, vientos y la depleción del gas a medida que la galaxia se acerca hacia el centro del cúmulo.

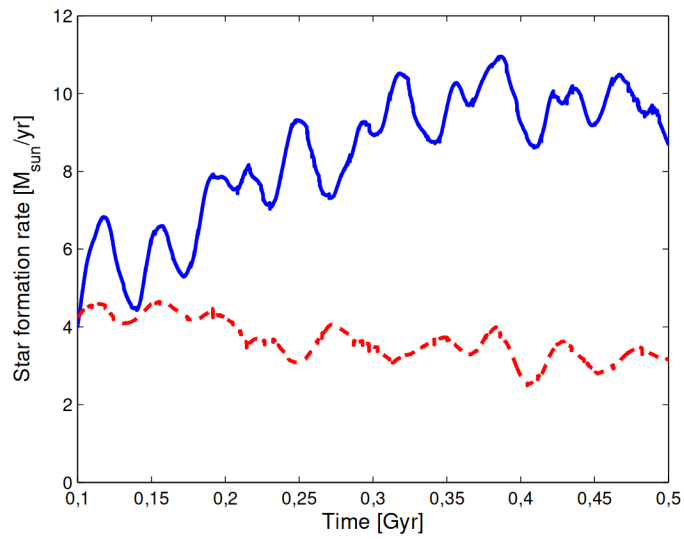


Figura 1.7: Resultado de una simulación numérica de la SFR en una galaxia en dos casos: cuando la galaxia está aislada (línea roja) y cuando se mueve en un modo “face-on” a través del medio intracumular (línea azul).

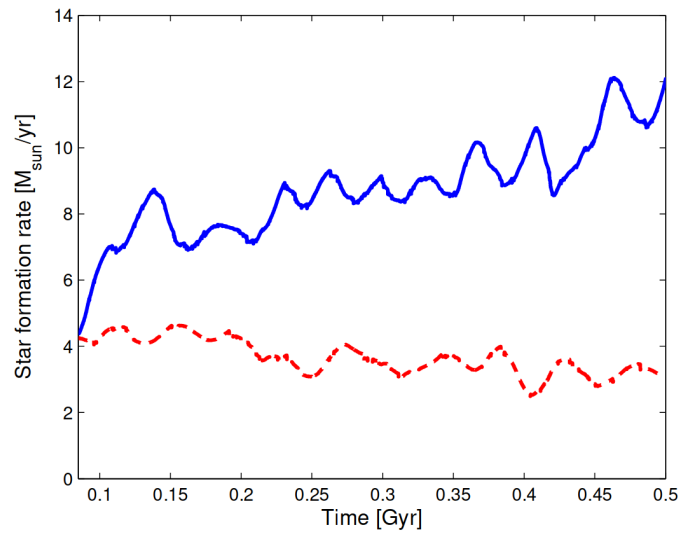


Figura 1.8: Resultado de una simulación numérica de la SFR en una galaxia en dos casos: cuando la galaxia está aislada (línea roja) y cuando se mueve en un modo “edge-on” a través del medio intracumular (línea azul).

1.5. Objetivo de la tesis

Actualmente una de las cuestiones que se tienen en el campo de la astronomía extragaláctica es comprender cuáles de los procesos que influyen en la evolución galáctica en cúmulos son los más importantes, qué condiciones son las que determinan la importancia de uno de estos procesos sobre otro, cómo y qué características de las galaxias son las que presentan los mayores efectos, y si las consecuencias afectan principalmente a las galaxias o al cúmulo en general. Previamente se ha encontrado que la SFR en las galaxias medusas es más alta que en las galaxias de cúmulos (Vulcani et al., 2018).

La presente tesis se centra en el estudio de una muestra de 114 galaxias que fueron observadas por el espectrógrafo de campo integral Multi Unit Spectroscopic Explorer (MUSE@VLT). Dicha muestra fue obtenida por el proyecto GASP, el cual está dedicado al estudio de las galaxias medusas. Se presta especial interés en el efecto del RPS presente en las galaxias medusas en la actividad de formación estelar mientras están interactuando con el medio intra-cumular. De esta manera, se realiza un estudio de los efectos que provoca la RPS en la SFR en las galaxias medusas, y cómo se relaciona con las propiedades tanto de las galaxias como de los cúmulos en los que se encuentran; asimismo, se indaga cuál es la relación entre la SFR y las historias de formación estelar de las galaxias medusas respecto a las galaxias de cúmulos.

Todo esto se realiza con el objetivo de entender la dinámica y las propiedades físicas de las galaxias medusas y los cúmulos, por ejemplo: se pretende comprender por qué, cómo y cuándo se da un incremento en el valor de la tasa de formación estelar en las galaxias medusas en una época que corresponde al momento en el cual las galaxias tienen su primera interacción con el cúmulo en el que están cayendo y cómo se relaciona dicho incremento con la RP que sufren en ese momento. Del mismo modo, analizando las morfologías y las propiedades espacialmente resultas de las poblaciones estelares, vamos a intentar de validar un método, que se ha propuesto para el análisis de las simulaciones numéricas (Troncoso-Iribarren et al., 2020), para detectar interacciones de este tipo, y para poder deducir más informaciones sobre la dirección de movimiento de estas galaxias cayendo al cúmulo.

1.6. Estructura de la tesis

En esta tesis se realiza un estudio de la relación entre los efectos de la presión hidrodinámica (RPS) y la formación estelar en una muestra de galaxias medusas. Se indaga por qué el valor de la SFR aumenta en este tipo de galaxias y se investiga cuál es la relación entre este incremento y las propiedades de las galaxias medusas y los cúmulos.

El primer capítulo se conformó por la contextualización del tema y la explicación de los conceptos principales que se estarán utilizando en este documento, tales como los tipos de galaxias, la presión hidrodinámica, las galaxias medusas y algunas simulaciones numéricas sobre su estudio, planteándose así cuál es la problemática que se tiene respecto a estos temas y cuál es el objetivo de esta tesis.

En el segundo capítulo se presentan los surveys de donde se obtuvieron los datos: WINGS OmegaWINGS y Padova Millennium Galaxy and Group Catalog (PM2GC). También se aclara en qué consiste el programa GASP, se presenta la muestra de galaxias que se utiliza en esta tesis y la manera en la que se obtuvo. De igual manera, se explica cuáles son las herramientas utilizadas para el análisis de los datos en este trabajo (SINOPSIS, KUBEVIZ y Penalized Pixel-Fitting (pPXF)), explicando el funcionamiento de estos softwares.

El tercer capítulo es dedicado al estudio de la SFR espacialmente resuelta en las galaxias medusas de la muestra GASP a diferentes épocas cósmicas, es decir, la SFH resuelta. Aquí se presentan los mapas de formación estelar creados y el análisis de la distribución espacial de la SFR en cuatro bins de edad. Para cada galaxia se elaboraron mapas de SFR: se estudia la tasa de formación estelar en el disco galáctico delimitado por una región definida con el propósito de encontrar asimetrías que nos puedan decir si las galaxias sufrieron efectos de RPS, esto se hace a diferente época cósmica con el fin de determinar si hay un posible frente de choque que nos hable de los movimientos que pudo haber seguido la galaxia en su trayecto por el cúmulo y se propone una explicación sobre cómo que pueden ocasionar los comportamientos que se observan.

El capítulo cuarto muestra comparaciones directas entre las propiedades de la muestra de galaxias medusas analizadas en esta tesis (muestra GASP) con las muestras de galaxias del cúmulo (muestras WINGS, OmegaWINGS y PM2GC).

En el capítulo cinco se da una interpretación física para el incremento de la SFR en la época en la cual las galaxias medusas tuvieron su primera interacción con el cúmulo, y se presenta el análisis de la SFH como función de ciertas propiedades físicas de las galaxias, como la masa, el medio ambiente donde se encuentran, la clasificación, etc..

El capítulo seis muestran el resumen y las conclusiones a las que se llegaron con esta tesis, y finalmente, plantea el trabajo a futuro y las perspectivas que se tienen.

Para esta tesis, se adoptó una cosmología estándar con $H_0=70 \text{ Km s}^{-1}\text{Mpc}^{-1}$, $\Omega_M = 0.3$ y $\Omega_\Lambda = 0.7$ y la Initial Mass Function (IMF) que utiliza es la de Chabrier (2003).

Capítulo 2

Muestras, datos y herramientas utilizadas

En esta tesis se hace uso de la muestra GASP, la cual se conforma de 114 galaxias: 64 de ellas fueron seleccionadas por tener posibles evidencias del efecto de presión hidrodinámica, las de mas son galaxias de grupos y galaxias del campo, observadas como muestra de control. Su creación fue el resultado de seleccionar datos de dos grandes muestras: por un lado WINGS (Fasano, G. et al., 2006), y Omega-WINGS (Gullieuszik et al., 2015) y por otro, PM2GC (Calvi et al., 2011). Para tener un mayor entendimiento de los datos que se están manejando es necesario conocer de manera precisa cada uno de ellos, y es por esto que a continuación se realiza una descripción más específica de cada uno con el fin de comprender mejor el origen y las características tanto de la muestra que se analiza en este trabajo como de aquellas de donde provino.

2.1. WINGS y OmegaWINGS

WINGS es un sondeo espectrofotométrico de galaxias que se encuentran en 77 cúmulos cercanos cuyo redshift se encuentra entre 0.04 y 0.07 (Fasano, G. et al., 2006). Los cúmulos tomados en cuenta fueron seleccionados en rayos X de los catálogos de ROSAT (Ebeling et al., 1996). Se eligieron cúmulos en un rango de luminosidad completo, con valores en el rango de $0.2 - 5 \times 10^{44}$ erg s^{-1} en rayos X, lo cual se puede convertir a un rango de masas que va desde el límite de los grupos hasta los cúmulos más masivos: de $\sim 10^{13.7}$ a $10^{15.5}$ M_{\odot} (Fasano, G. et al., 2006). El amplio rango de masas de los cúmulos en WINGS, hace que sus valores de dispersión de velocidades se encuentren entre 500 y 1100 $km s^{-1}$. Además, para aminorar los efectos de la extinción de la Galaxia, se tomaron aquellos que se encuentran alejados del ecuador a una distancia del plano galáctico mayor o igual a 20° (Varela, J. et al., 2009).

Las imágenes de esta muestra tienen un campo de visión que cubre $34' \times 34'$ y fueron tomada en las bandas V, B (Fasano, G. et al., 2006); también se tomaron imágenes en la banda U (Omizzolo, A. et al., 2014) y en las bandas J y K para una submuestra de cúmulos (Valentinuzzi, T. et al., 2009). Finalmente, se hicieron observaciones en espectroscopía para una submuestra de 48 cúmulos (Cava, A. et al., 2009). Los datos de las imágenes se recopilaron con los instrumentos WFC@INT y WYFFOS@WHT en el hemisferio norte, y los datos espectroscópicos con el WFI@MPG y 2dF@AAT en el hemisferio sur. Se tiene una precisión fotométrica aproximada de 0.025 mag y, dependiendo del redshift y del seeing, el tamaño de campo está entre 1.6 y 2.7 Mpc mientras que la resolución se encuentra entre 0.7 y 1.7 kpc (Fasano, G. et al., 2006).

El objetivo principal por el cual se realizó este proyecto, fue estudiar una muestra de galaxias

en cúmulos que fuera estadísticamente significativa para conocer sus propiedades. En particular, se quiso estudiar la relación entre la mezcla morfológica de las galaxias y la masa total de los cúmulos, algo que se conocía muy bien a alto corrimiento al rojo, que pero en el universo cercano no se conocía de forma detallada, sino por estudios hechos utilizando muestras parcialmente completas (Poggianti et al., 2009). Ésto brinda la oportunidad de comprender mejor las galaxias y sus cúmulos en el universo cercano y estudiar cómo evolucionan en función de sus propiedades y de las del medio ambiente donde se encuentran (como por ejemplo la densidad local o la masa total del cúmulo Fasano, G. et al., 2006).

Además se llevó a cabo un seguimiento espectroscópico de 48 de los cúmulos observados fotométricamente (Cava, A. et al., 2009): 22 en el hemisferio sur y 26 en el norte. Esto permitió tener mejores medidas de dispersión de velocidad, pertenencias seguras, fracción de galaxias con formación estelar, masas estelar, historias de formación estelar de las galaxias, clasificaciones espectrales. También se analizó la distribución de galaxias en los cúmulos y su relación masa del cúmulo-morfología (Poggianti et al., 2009). Para estudiar la SFH en galaxias de cúmulos cercanos fue necesario analizar los espectros (Fritz et al., 2014).

OmegaWINGS se elaboró con el propósito de extender algunas de las observaciones de WINGS para que abarcaran las poblaciones de galaxias en las partes más externas de los cúmulos mediante observaciones con OmegaCAM@VLT Survey Telescope (VST) (los cúmulos que se tomaron en cuenta fueron los que tienen $\delta < 20^\circ$). Esa cámara del VST está hecha de un arreglo en mosaico de 32 CCDs, (Cariddi, S. et al., 2018), y abarca una área del cielo de 1° .

OmegaCAM puede hacer observaciones en 12 filtros de banda ancha (lo que permite observar objetos desde el ultravioleta hasta el infrarrojo cercano) y cuenta con un espejo primario compuesto de otros 108 espejos que hacen posible realizar procesos de óptica adaptativa para disminuir los efectos del *seeing* y obtener imágenes con mayor resolución. Así, tenemos que este *survey* es una extensión de WINGS para mejorar el aspecto del campo de visión. Para ello se tomaron 46 cúmulos y, se obtuvieron los datos en las bandas B y V (Gullieuszik et al., 2015) y se realizó un seguimiento espectroscópico en 33 cúmulos de galaxias con el instrumento AAOmega@AAT (Moretti et al., 2017).

2.2. PM2GC

La PM2GC (Padova Millennium Galaxy and Groups Catalog) es un catálogo de galaxias que abarcan un rango de redshift $0.03 \leq z \leq 0.11$ y que se encuentran aisladas o en grupos. Para identificar a las galaxias en grupos se utilizó un algoritmo Friends-of-Friends (FoF) a partir de del *Millennium Galaxy Catalogue* (Liske et al., 2003), de donde se tomó una muestra de 3210 galaxias cuyo brillo era mayor a $M_B = -18.7$ (Calvi et al., 2011). Mediante este método se detectaron 176 grupos donde cada uno tenía al menos tres galaxias. De este modo se obtuvieron 1057 galaxias, cantidad que representan el 43% del total que existe en el campo a ese redshift. El redshift medio para estas galaxias es $z = 0.0823$ y su dispersión de velocidad promedio es de 192 km s^{-1} . Por la forma de selección de las galaxias, esta muestra se puede utilizar para estudios tanto de galaxias aisladas como de medio ambientes menos densos con respecto a el de los cúmulos.

Las galaxias que no pertenecían a grupos fueron clasificadas como sistemas binarios o galaxias aisladas con el propósito de tener galaxias en diferentes condiciones y entornos físicos que se requieran estudiar posteriormente en otros trabajos (Calvi et al., 2011). De este modo se hicieron dos catálogos que tienen el rango de redshift ya mencionado, pero para las galaxias que se encuentran

en grupos se elaboró un catálogo general que abarca un redshift entre $0.04 \leq z \leq 0.1$. Estos tres inventarios realizados en PM2GC y las características son públicos.

2.3. GASP

GASP es un *Large ESO program* liderado por B. Poggianti, y está dedicado al estudio de la física y evolución de galaxias medusas. Este proyecto comenzó con la definición de una muestra de galaxias dada a conocer por Poggianti et al. (2016), en donde se buscaron, de forma visual, galaxias con evidencias de asimetrías morfológicas en imágenes en la banda B de las muestras que se acaban de describir. Dicho trabajo fue el primero en el que se buscó de manera sistemática un censo de galaxias medusas en el universo cercano.

GASP utilizó 120 horas de tiempo de observación con el espectrógrafo de campo integral MUSE@VLT para observar 114 galaxias que se encontraban tanto en cúmulos de galaxias como en halos de menor masa a un corrimiento al rojo entre 0.04 y 0.1. Dentro de esta muestra, las galaxias de OmegaWINGS se identifican con un nombre cuya letra inicial es “O”, para las galaxias de PM2GC la inicial es “P” y para WINGS es “W”. Posteriormente, para las galaxias de WINGS y OmegaWINGS que de la inspección visual fueron clasificadas como probables candidatos a ser galaxias medusas, se les agregó al inicio del nombre la letra “J”. Desde el principio se notó que también en el medio ambiente de los grupos, o sea entre las galaxias de la muestra PM2GC, también hay candidatos. Gracias a las observaciones en $H\alpha$ para estudiar la distribución de gas ionizado en las galaxias, se encontraron 64 galaxias de tipo medusa para la muestra GASP y las demás corresponden a galaxias normales.

El estudio de la muestra de GASP mediante las observaciones de MUSE ha permitido encontrar que hay formación estelar en las colas de estas galaxias medusas (Poggianti et al., 2019; Bellhouse et al., 2019) y esto se logra observando las líneas en emisión. En esta muestra de galaxias medusas hay evidencia del incremento en la tasa de formación estelar tanto en los discos como en las colas con RPS con respecto a galaxias en el mismo medio ambiente y de masa estelar parecida (Poggianti et al., 2016).

MUSE

El instrumento utilizado para realizar las observaciones de la muestra GASP fue MUSE@VLT (Bacon et al., 2006), el cual es un espectrómetro de campo integral, o Integral Field Unit (IFU) por sus siglas en inglés. El tamaño del campo observado es aproximadamente de $1' \times 1'$ y obtiene espectros almacenados en spaxels, es decir, obtiene datos asignando un espectro a cada pixel (Bacon et al., 2010).

Las observaciones echas por este instrumento devuelven un arreglo en 3 dimensiones, de $\sim 330 \times 330$ spaxels, en cada uno de los cuales es almacenado un espectro que cubre longitudes de onda en el rango entre 4600 y 9000 Å (de dimensión 3681). El tamaño angular de los pixeles es de 0.2, pero como al trabajar con las observaciones el seeing promedio era de 1, se hizo un promedio en 5 pixeles. El tiempo de exposición para cada observación de GASP fue de 45 minutos.

Con los datos de MUSE@VLT y en el contexto del programa GASP, se pretende estudiar la espectroscopía de las 114 galaxias de la muestra y poder determinar así las propiedades físicas de cada una de ellas, por ejemplo, las características de las poblaciones estelares, la metalicidad, la cinemática del gas y de las estrellas, etc., analizándolo a diferentes épocas cósmicas. Todos los estudios tienen la ventaja de que se pueden hacer de forma espacialmente resuelta.

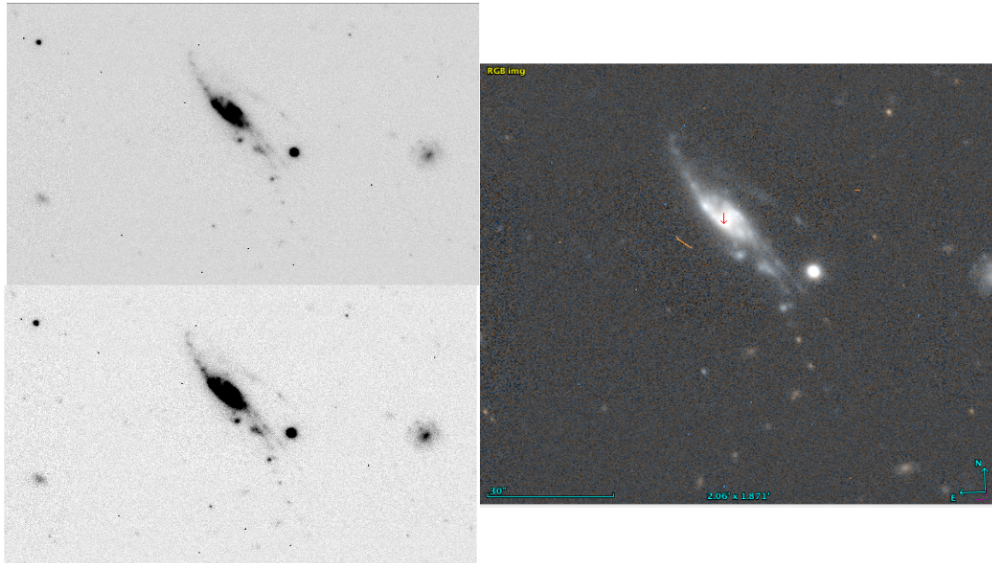


Figura 2.1: Galaxia de clase “J5” de las galaxias medusas de la muestra GASP (Poggianti et al., 2016). Las galaxias con mayor efecto de stripping corresponden al grupo “J5”.

2.3.1. Selección de galaxias medusas

La muestra inicial, de donde se eligieron las galaxias a observar en el marco de programa GASP, fue seleccionada por Poggianti et al. (2016) y allí presentada: se conformó por dos grupos: 344 galaxias de las muestras de WINGS y OmegaWings (galaxias encontradas en cúmulos) y 75 galaxias de la muestra PM2GC (galaxias del campo o que podían pertenecer a grupos). De este gran conjunto de 419 galaxias que conformaron la muestra inicial de GASP, se llevó a cabo una clasificación visual en la banda B, la cual consistía en tomar como referencia algunas características morfológicas a de las galaxias para determinar la posible presencia de efectos de la presión hidrodinámica, los cuales se pueden identificar como asimetrías unilaterales en las morfología de las galaxias observándolas en la banda B. Esto es una forma de detectar galaxias con evidencias típicas de fenómenos de RP, ya que éstas provocan el desprendimiento de gas en un lado específico de las galaxias, también generando formación estelar que es lo que se espera detectar de la inspección visual.

De esta manera, se construyó una muestra de galaxias que se encuentran bajo la posible presencia de efectos de presión hidrodinámica, los cuales pueden identificarse como asimetrías unilaterales en su morfología en la banda B.

Para las galaxias medusa de la muestra GASP se propuso una clasificación, con base en la “intensidad” o evidencias de las asimetrías, de 5 a 1, en donde en la clase “J5” se encuentran las galaxias con las evidencias mas claras de asimetrías unilaterales y “J1” son las galaxias con menores evidencias. Las figuras 2.1 y 2.2 muestran ejemplos de esta clasificación. Además, para garantizar que el efecto que genera las colas de gas es la presión hidrodinámica, se excluyeron aquellas galaxias con asimetrías que tenían compañeros cercanos, siendo ésta una posible causa del origen de las colas debido a interacciones de marea y no de RP.

2.3.2. Propiedades de la muestra

En Poggianti et al. (2016) se realizó también un estudio para comparar las propiedades entre las galaxias de los cúmulos (correspondientes a las muestras de WINGS y OmegaWINGS) y las

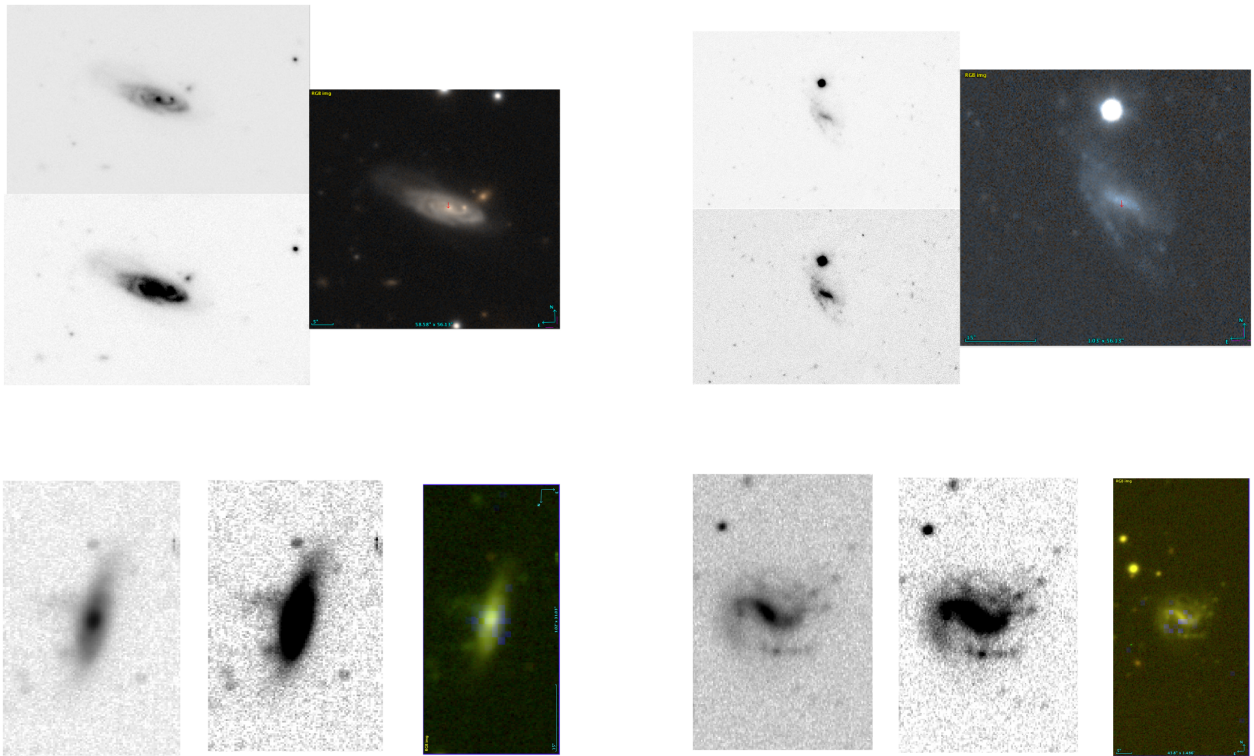


Figura 2.2: Galaxias de la muestra GASP de acuerdo a fase de desprendimiento de gas (*J-Class*): “J4” (arriba a la izquierda), “J3” (arriba a la derecha), “J2” (abajo a la izquierda), “J1” (abajo a la derecha). Las primeras dos galaxias pertenecen a la muestra WINGS y las otras a OmegaWINGS (Poggianti et al., 2016).

galaxias medusas de la muestra GASP. Por un lado se analizó el número de galaxias por cúmulo de acuerdo a la dispersión de velocidad, a la luminosidad en rayos X y al redshift, como se puede ver en la figura 2.3, donde los puntos negros y líneas continuas representan galaxias de OmegaWINGS y los círculos y líneas discontinuas son galaxias de WINGS. Con esto se encontró que el número de candidatos por cúmulo no depende del origen de la muestra.

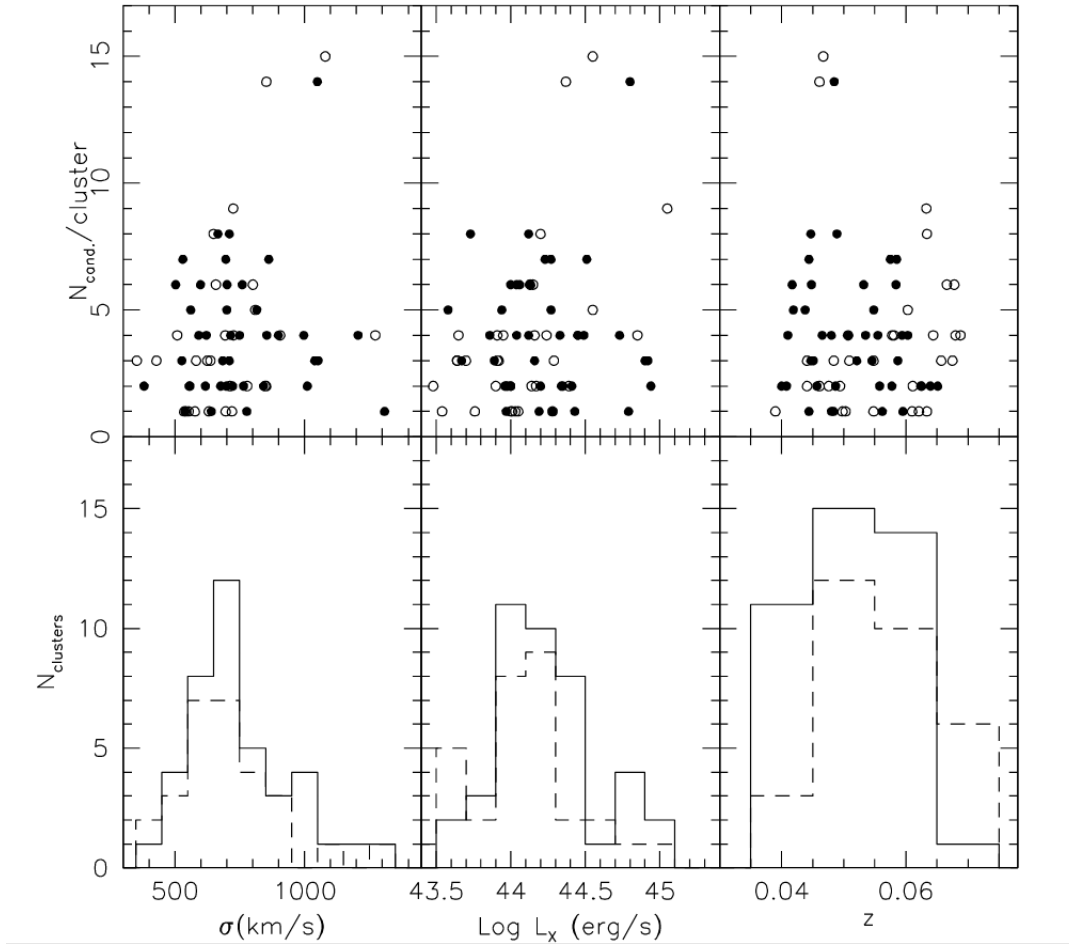


Figura 2.3: Comparaciones entre la muestra de galaxias medusa de GASP y las galaxias de cúmulos: las galaxias de cúmulos corresponden a la muestra de WINGS (figura tomada de Poggianti et al., 2016).

Las 114 galaxias de la muestra, fueron seleccionadas de manera tal para cubrir un rango de masas de 10^9 a $10^{11.5} M_{\odot}$. 94 galaxias (64 de cúmulo y 30 de grupos) se identificaron como candidatos posiblemente sujetos a efectos de tipo hidrodinámico. Las otras 20 galaxias fueron seleccionadas por no tener muestras de interacciones.

Entre los ejemplos más espectaculares de galaxias medusa que componen la muestra de GASP están las galaxias JO204, JW100 y JW206 (Fig. 2.4), las cuales se encuentran en diferentes cúmulos. Estas imágenes muestran la emisión de $H\alpha$ en color rojo, y pueden observarse las colas donde ocurre la actividad de formación estelar.



Figura 2.4: Las galaxias JO204, JW100 y JO206 en imágenes creadas a partir de los datos de MUSE. En blanco se tiene la suma del flujo a todas las longitudes de onda, mientras que en rojo se puede observar la emisión de la línea $H\alpha$. Créditos de imagen: ESO/GASP.

2.3.3. Estrategia para el estudio de la muestra

A partir de la presentación de la muestra GASP se propuso a una investigación más detallada de cada una de esas galaxias medusa para poder hacer un análisis más profundo sobre sus propiedades y los procesos físicos que están involucrados. Se prestó especial atención a que la disponibilidad del gas regula la SFH y que éste puede ser afectado por diversos factores. Por ejemplo, las perturbaciones en la densidad del gas incrementa la formación estelar pero al mismo tiempo la eliminación del gas de los discos galácticos provoca que la formación estelar se detenga. Así bien, con esto en mente se plantearon determinados objetivos para estudiar sistemáticamente las propiedades de las galaxias medusas. Para ello se pretendió examinar algunas cuestiones importantes como (Poggianti et al., 2017):

- Observar dónde, por qué y cómo se elimina el gas de estas galaxias;
- Investigar qué implicación tiene la extracción del gas para la activación y el frenado de la formación estelar;
- Interpretar cómo se relacionan las condiciones físicas del gas y los AGNs de las galaxias medusas;
- Estudiar la metalicidad y la SFH de las galaxias medusas antes y después de la supresión del gas.

Con estas metas se ha pretendido explorar de manera más profunda este tipo de galaxias y del medio ambiente en el que se encuentran, de modo que este programa GASP está consolidado como el primer estudio completo y sistemático de estos objetos y de los fenómenos de presión hidrodinámica en galaxias de cúmulos en el universo local.

2.4. Herramientas de análisis para el estudio de la muestra

En el marco del proyecto GASP se usaron 3 tipos de software de análisis para trabajar los cubos de datos de las galaxias:

- KUBEVIZ para detectar y ajustar las líneas de emisión. De aquí se obtiene el redshift y por consiguiente la velocidad del gas, su dispersión de velocidad y la intensidad de las líneas. Estos datos, a su vez, permiten estudiar la cinemática, la metalicidad y, en general, las propiedades del gas ionizado (Fossati et al., 2016).
- pPXF para analizar la cinemática de la componente estelar: prácticamente realiza un proceso parecido a el de KUBEVIZ pero con las líneas de absorción, es decir, con las poblaciones estelares (Cappellari and Emsellem, 2004).
- SINOPSIS para estudiar las propiedades de las galaxias mediante ajuste de espectros a modelos de poblaciones estelares simples (Fritz et al., 2007, 2017).

En seguida se mostrará una descripción de estos programas utilizados para manejar los datos de la muestra de GASP y obtener la información requerida.

2.4.1. KUBEVIZ

El código KUBEVIZ (Fossati et al., 2016) está escrito en IDL, es público, y está especializado para trabajar con cubos de datos de IFU en archivos `fits`: analiza las principales líneas de emisión ajustándoles perfiles gaussianos y obteniendo así las velocidades del gas con respecto a determinado redshift y los flujos de línea totales, por lo que software como este resultan ser una herramienta indispensable para el estudio del gas en las galaxias.

Dado que esta herramienta es capaz de efectuar ajustes tanto de una como de doble componentes, KUBEVIZ trabaja haciendo conjuntos de líneas (que el usuario puede modificar) y las ajusta de manera simultánea considerando a cada grupo como la combinación de varias funciones gaussianas que mantienen fijas la separación de la velocidad de las líneas del ajuste.

Este software necesita al inicio una suposición sobre la velocidad y el ancho de línea intrínseco para cada conjunto de líneas, el cual se fija para poder obtener el ajuste de cada línea. Durante el ajuste toma en cuenta el ruido de cada uno de los espectros del cubo de datos eliminando las

líneas del cielo, sin embargo, no toma en cuenta el ruido por el remuestreo y el suavizado, así que la variación que toma subestima el error real (Fossati et al., 2015).

Originalmente, KUBEVIZ fue diseñado para utilizarse con cubos de datos de VLT KMOS, pero actualmente trabaja también con cubos de datos de otros instrumentos como VLT MUSE, VLT SINFONI o AAT SAMI (Fumagalli et al., 2014).

2.4.2. pPXF

pPXF es un código de ajuste espectral que analiza la componente cinemática de los datos espectroscópicos de campo integral de las poblaciones estelares (Cappellari and Emsellem, 2004), (Cappellari, 2017), incluso puede ajustarlas juntas (Ge et al., 2018).

Además, este software permite también hacer una estimación del enrojecimiento que sufre el espectro observado debido al efecto Doppler, ya sea para las estrellas o para las líneas de emisión de Balmer. Por otra parte, cuando el espectro del cielo domina sobre la región observada, puede también incluirse en el ajuste.

Este código trabaja en el espacio de píxeles y a partir de los espectros de galaxias observados extrae la line of sight velocity distribution (LOSVD) para las estrellas, parametrizándola como una serie de Gauss-Hermite. El algoritmo no presenta problema alguno aún cuando los datos no contienen información suficiente para restringir la forma completa de la LOSVD (como cuando se tiene baja señal a ruido en los resultados o un mal muestreo de la dispersión de velocidades en la línea de visión). Esto se debe a que el método penaliza de manera automática las soluciones no gaussianas (Cappellari, 2016) (la penalización depende del problema que se estudia).

Los parámetros de entrada para pPXF son las plantillas, los espectros de las galaxias, un arreglo de las dimensiones de la galaxia que contenga los valores del error, la escala de velocidades del espectro en km/s en cada pixel y los valores iniciales para la LOSVD. Los parámetros de salida se guardan como atributos de la clase pPXF, y son: el polinomio aditivo con el mejor ajuste, el modelo que mejor ajusta al espectro de la galaxia, la χ^2 reducida, el ajuste para la componente del gas, el flujo integrado para los conjuntos de líneas, el peso de los polinomios de Legendre aditivos, el mejor valor del ajuste para el enrojecimiento, el vector (sol) con los parámetros de salida de la cinemática, el vector con las incertidumbres correspondientes a $1 \Sigma^2$ con respecto al vector sol (pPX).

2.4.3. SINOPSIS

SINOPSIS es un código de ajuste espectrofotométrico (Fritz et al., 2007, 2017) que trabaja utilizando modelos de poblaciones estelares simples ó Simple Stellar Populations (SSP), por sus siglas en inglés, para reproducir espectros ópticos en combinación con datos fotométricos. Como primer paso, el código mide los valores de las características principales de un espectro observado, o sea, el flujo promedio en varias bandas dominadas por emisión del continuo, y el ancho equivalente de las líneas espectrales ópticas más significativas, tanto en absorción como en emisión. Luego, utilizando combinaciones de espectros teóricos de distintas edades y a metalicidad homogénea, produce modelos espectrales teóricos de los cuales se miden los mismos observables que se midieron en el espectro observado, buscando la combinación de los parámetros que minimiza la diferencia que entre los dos espectros. SINOPSIS puede utilizar prescripciones tanto paramétricas como no-paramétricas para la historia de formación estelar, y trabaja asumiendo el caso más general posible de extinción selectiva (Calzetti et al., 1994), es decir, las poblaciones estelares de cada edad están afectada por el enrojecimiento por el polvo de manera dependiente de la edad. El modelo creado por SINOPSIS se puede expresar con la siguiente ecuación:

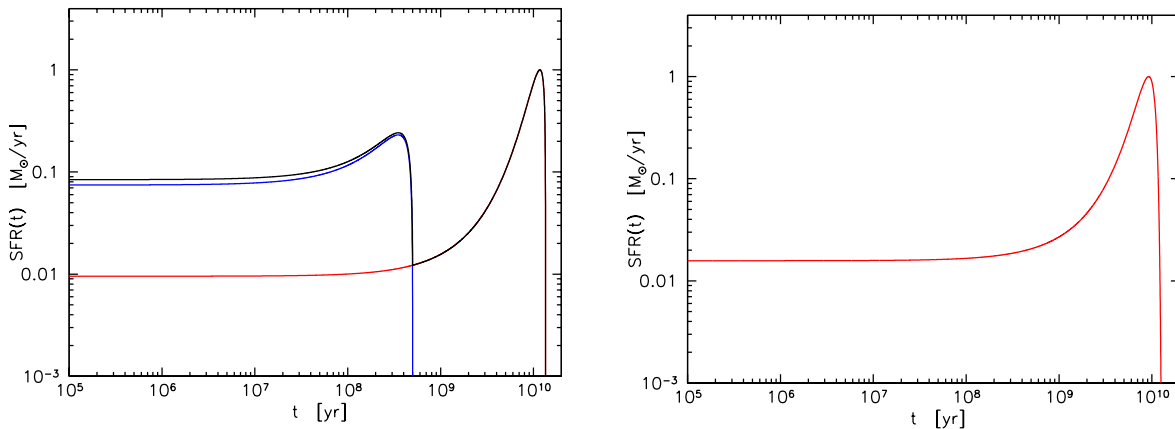


Figura 2.5: Función doble exponencial (izquierda) y lognormal (derecha) representantes unos posibles patrones de historia de formación estelar que SINOPSIS puede utilizar

$$F^{mod}(\lambda) = \frac{1}{4\pi D^2} \sum_{i=1}^{N_{SSP}} [L_i(\lambda) \times M_i \times 10^{-0.4 \cdot E(B-V)_i R_V A_\lambda / A_V}] \quad (2.1)$$

donde el índice de la sumatoria corre sobre la edad, y N_{SSP} es el número de SSP. $F^{mod}(\lambda)$ es el espectro del modelo final, D es la distancia a la galaxia, $L_i(\lambda)$ es el espectro de una población estelar simple emitido en unidades de luminosidad, M_i es la masa, y el término $-0.4 \cdot E(B-V)_i R_V A_\lambda / A_V$ está relacionado con la extinción que, como se ve, también depende de la edad.

SINOPSIS utiliza una malla inicial de espectros teóricos de 220 diferentes edades a partir de 10^4 hasta 15×10^9 años, para cada uno de los 13 valores de metalicidad disponibles. Los modelos de SSP que fueron utilizados para este trabajo son los de Charlot y Bruzual (en prep.). En el caso de utilizar una forma no paramétrica para la SFH, los 220 espectros se reducen a 12, promediando en bins de edad de forma parecida a como se explica en Fritz et al. (2007) (ver en particular la figura 1 de ese artículo). La edad máxima de las poblaciones estelares se calcula con respecto al redshift al cual se encuentra la galaxia.

Al elegir el tipo de SFH que se utilizará para calcular el modelo final (de eso depende cómo se calcula el valor de masa estelar de cada edad, la M_i en la ecuación de arriba), tenemos dos opciones: elegir una prescripción paramétrica o no paramétrica:

1. opción no paramétrica: se reduce en número de espectros teóricos utilizados de 220 a 12, con intervalos logarítmicos. Utilizando esta opción, por cada distinta edad hay un valor de masa y uno de extinción: por eso vamos a tener un total de 24 parámetros.
2. Caso paramétrico: en este caso se utiliza una ley “analítica” para determinar la SFR a cada edad de la galaxia. Esta puede ser una función doble exponencial (que requiere 9 parámetros libres y se ve en panel izquierdo de la figura 2.5) o una función lognormal (que utiliza 5 parámetros libres y se muestra en el panel derecho de la figura 2.5). Incluso se pueden actualizar incluyendo un cualquier tipo de función analítica.

Un ejemplo de lo que SINOPSIS puede realizar se ilustra en la figura 2.6. En la parte superior de esta imagen se muestra graficado en color negro es el espectro observado que se pretende ajustar y superpuesto en color rojo se encuentra el mejor ajuste al espectro creado por este código, el cual

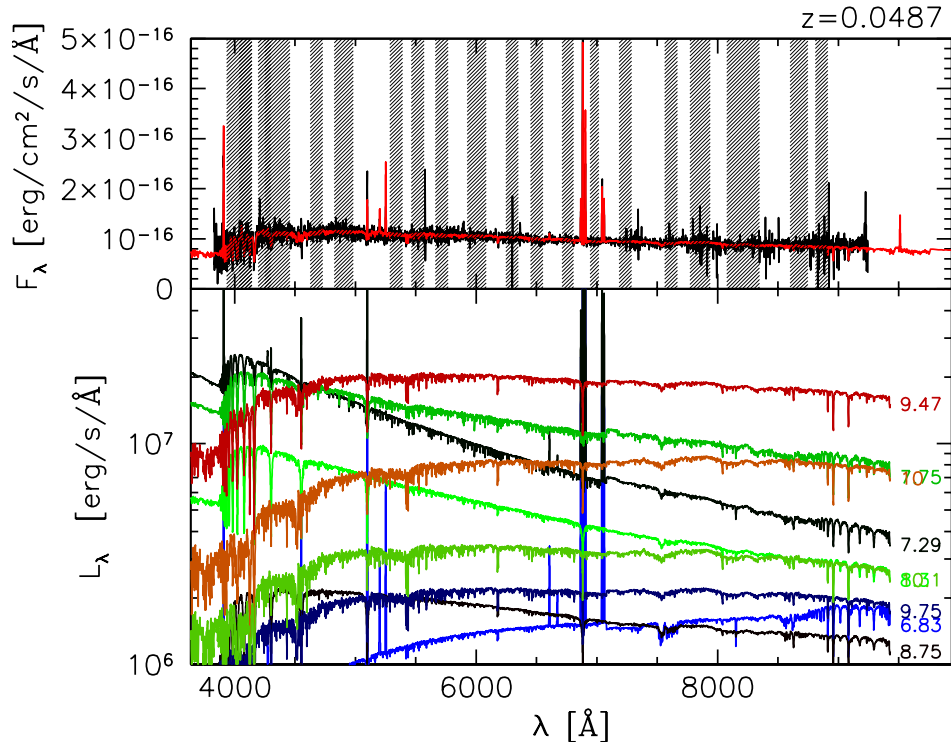


Figura 2.6: En el recuadro superior se encuentran el espectro original (en color negro) y superpuesto se encuentra el mejor ajuste realizado por SINOPSIS (en color rojo). Las bandas localizan las partes del espectro en donde se mide el continuo. La parte inferior muestra los espectros cuya suma corresponden al ajuste generado.

corresponde a la suma de los espectros de los modelos de SFH que se muestran en la gráfica inferior de la misma imagen.

Para esta tesis se obtuvieron los valores de la masa, SFH, etc., calculándolos a través de SINOPSIS cuando se le da un cubo de datos. Se utilizó la forma no-paramétrica para la historia de formación estelar; el efecto de la extinción por el polvo se modeló como una pantalla uniforme en frente de las fuentes, utilizando la ley de extinción de la Galaxia (Cardelli et al., 1989). Las SSP están caracterizada por una función inicial de masa de Chabrier (2003) con masas entre 0.1 y 100 M_{\odot} .

2.4.4. Obtención de los datos

En esta tesis se están trabajando con cubos de datos de MUSE previamente obtenidos por la colaboración GASP para calcular mediante los flujos de las líneas los mapas de tasa de formación estelar, extinción, densidad electrónica y diagramas diagnósticos de los procesos de ionización para cada galaxia.

A continuación se explica el proceso llevado a cabo por la colaboración GASP para obtener los datos analizados en el presente trabajo (que también se explica en la Fig. 2.7):

1. Se realiza la reducción de los datos de manera semi-automática a partir del primer cubo de datos.
2. Se realiza la corrección por extinción por la Galaxia y con esto se obtiene un segundo cubo

de datos.

3. Se obtienen una primera versión de las características de las líneas de emisión usando el código KUBEVITZ Fossati et al. (2015). A partir de la emisión en $H\alpha$, se identifican las regiones de formación estelar.
4. A partir del continuo se identifica el disco galáctico; para lo cual es necesario obtener la cinemática estelar, así que se corre el código pPXF (Cappellari and Emsellem, 2004), el cual se utilizó para conocer la cinemática de las estrellas (esto incluye redshift, o velocidad, y el ancho de las líneas, o sea, la dispersión de velocidades) a partir de las líneas en absorción. Así, usando KUBEVIZ y pPXF podemos saber cuál es el redshift, respectivamente, de la componente gaseosa y estelar.
5. Se utiliza el código synopsis para ajustar los espectros, usando los mapas de redshift del gas y de las estrellas. Esto nos da las propiedades de las poblaciones estelares y también un espectro modelo sin líneas de emisión para el gas (recordamos que están incluidas en los modelos utilizados)
6. El modelo puramente estelar así encontrado se resta al espectro observado. Así se obtiene un cubo en el cual los espectros son nada más los de las líneas en emisión y en donde los flujos de estas líneas estén corregidos por la componente en absorción debida a las fotosferas estelares
7. Se corre otra vez KUBEVIZ, en el cubo de pura emisión, para tener las medidas correctas de las propiedades de las líneas del gas, así ya tomando en cuenta por la presencia de una componente en absorción.
8. De las propiedades del gas así derivadas se pueden calcular mapas de SFR, extinción, metalicidad, etc.

Aunque estos datos estuviesen disponibles, para esta tesis se eligió hacer el cálculo de la SFR y de los diagramas diagnósticos de ionización del gas por cuenta propia, para tener control mejor sobre el proceso.

Definición del continuo

Para medir la amplitud de las líneas de emisión o de absorción los datos es necesario definir el continuo del espectro que determina dónde inicia la línea, por lo cual se tiene que tomar una región del espectro a la derecha y a la izquierda de la línea para promediar los valores de flujo en ambos lados y así definir el continuo, trazando una línea horizontal a ese valor de flujo. En este caso el continuo para el estudio de la muestra GASP se tomó entre 80 Å y 200 Å hacia el rojo y hacia el azul de cada línea (Poggianti et al., 2017) y no se tomaban partes de otras líneas de emisión.

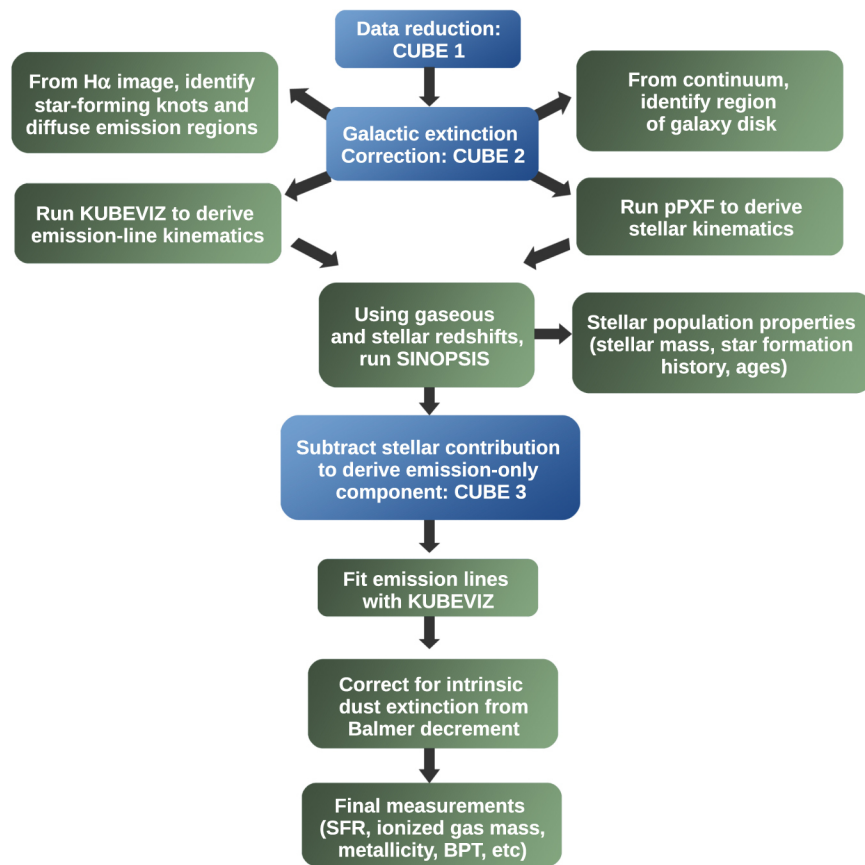


Figura 2.7: Proceso que se sigue con las mediciones de cada galaxia para obtener los datos con lo que se está trabajando.

Capítulo 3

Formación estelar en las galaxias de GASP

El principal objetivo de esta tesis intentar entender cómo, por qué, y qué tanto la RP le afecta a la formación estelar en galaxias que están acretaando a cúmulos. Para este trabajo nos enfocamos sobre todo en el proceso de inducción de formación estelar, pretendiendo estudiar cómo este mecanismo físico afecta a las poblaciones estelares de las galaxias a varias épocas. Se utiliza la SFH para poder comprenderlo y se usan resultados del código SINOPSIS para conocer las características de las galaxias a diferentes épocas cósmicas. Como ya se explicó en la sección 2.4.3, los espectros teóricos utilizados por SINOPSIS incluyen la emisión del gas ionizado por las estrellas más masivas, o sea por las poblaciones estelares más jóvenes. Por esto, entre los resultados proporcionados por SINOPSIS, está también la tasa de formación estelar reciente. Sin embargo, a menos de que no sea explícitamente necesario, preferimos calcular este valor directamente de la luminosidad de la línea de $H\alpha$, corregida por el efecto de extinción por el polvo. Esto por dos razones principales. La primera, es que SINOPSIS no tiene actualmente forma de distinguir entre mecanismos de ionización del gas que no provengan de la formación estelar. Así que todo el flujo de la línea $H\alpha$ es ajustado por completo con modelos de ionización por las estrellas. Esto lleva a una sobre estimación de la SFR si eso no es el proceso (o no es el único) que ioniza el gas. La segunda es que es la forma más utilizada para calcular la SFR, y podría permitir entonces una comparación más directa con datos de literatura. De hecho, hay una diferencia entre las asunciones de las dos formas de calcular la SFR, y es la duración de tiempo que se considera la formación estelar que, por el caso de SINOPSIS es de 20×10^6 años, mientras es algunos millones de años para el caso del cálculo con $H\alpha$ (Kennicutt, 1998b). Entonces, utilizamos para este fin los mapas de la intensidad de $H\alpha$ calculados por KUBEVIZ (ver la sección 2.4.1) en los espectros observados a los cuales se les restó la emisión del continuo para poder tomar en cuenta una posible componente en absorción de las líneas de $H\alpha$ y $H\beta$ (sobre todo en esta última).

Para realizar el presente estudio, la reducción de los datos y los resultados de SINOPSIS fueron previamente obtenidos por la colaboración GASP. Por otro lado, como ya se mencionó en el capítulo 2, los resultados de y y de pPXF están disponibles públicamente. El resto del análisis presentado aquí lo hice yo como parte de esta tesis y ésto incluye:

- Definición del disco galáctico.
- Cálculo de mapas de SFR.
- Cálculo de mapas de extinción.
- Cálculo de diagramas de diagnóstico espacialmente resueltos.

- Implementación del método de troncoso.
- Identificación y estudios de asimetrías.
- Estudio de la SFH.
- Comparación de las propiedades de las galaxias medusa de GASP con las galaxias de WINGS OmegaWINGS a lo largo del tiempo.

3.1. Definición del disco estelar

Como estamos interesados en analizar qué tanto la RPS influye sobre la SFR dentro de las galaxias, tenemos que restringir nuestro análisis al disco de las galaxias. Es ahora bien conocido que en las colas de las galaxias medusas hay formación estelar activa (Bellhouse et al., 2019; Poggianti et al., 2019), pero el fin de este estudio es ver el efecto de la interacción entre el medio intracumular y el medio interestelar de la galaxia, así que vamos a enfocar el estudio en los discos. De este modo fue necesario definir para cada galaxia la región en la que se realizan los cálculos (por ejemplo, para obtener la SFR, la masa, etc.). A continuación se describen los dos procedimientos distintos en que fueron elaboradas:

1. Algunas de las regiones fueron generadas en el estudio de Gullieuszik et al. (en preparación; pero también en Vulcani et al. 2020) para 64 galaxias que presentaban evidencias de desprendimiento del gas fuera del disco galáctico, es decir, se trata de las galaxias de medusa de GASP. De estas se tomó el centroide de la región más brillante en el mapa del continuo y se definió como el centro de la galaxia. Por el lado donde no hay colas de gas se consideró la isofota estelar más débil que se encuentra a 1σ arriba del fondo, por el otro lado se utilizó una elipse con el centro ya mencionado y los semiejes definidos por las isofotas;
2. El resto de las máscaras se hicieron en la presente tesis mediante inspección visual de dos maneras diferentes:
 - La primera fue seleccionando un elipse que delimite el disco galáctico para el caso de las galaxias que tienen una forma regular, y que entonces no presentan signos claros de interacciones, como por ejemplo las galaxias en la muestra de control. Para ello se tomó el mapa de densidad superficial de masa de cada galaxia, y se elaboró una elipse que cubre la región del disco galáctico.
 - La segunda manera fue tomar en cuenta contornos de densidad de masa estelar en el mapa de densidad superficial de masa y seleccionar cierto valor de densidad (para el caso de las galaxias que tienen una forma muy irregular), lo cual permite obtener una isofota que delimita el disco galáctico.

3.2. La SFR actual

Para calcular la tasa de formación estelar se utilizaron los mapas del flujo de $H\alpha$ y $H\beta$ (Figura 3.1), producidas con el software KUBEVITZ (ver sección 2.4.1). El mapa de $H\alpha$ fue elaborado corrigiendo el espectro por el continuo estelar (esta corrección incluye también la absorción de las líneas de Balmer, como se explicó en la sección 2.4.4). Posteriormente, en cada spaxel se realizó el cálculo del valor de extinción debida al polvo. Para eso se consideró la ley de extinción de la Galaxia (Cardelli et al., 1989) y se tomó un valor teórico para la razón entre los flujos de $H\alpha$ y $H\beta$ igual a

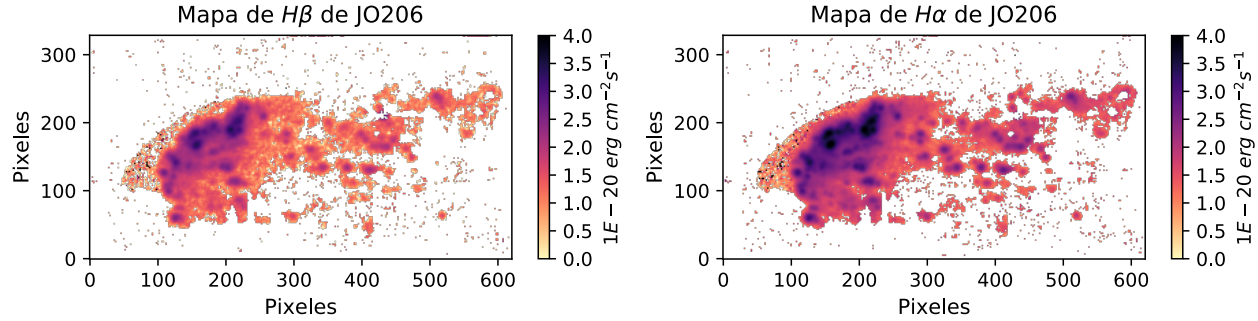


Figura 3.1: Galaxia JO206. Mapa de $H\alpha$ (derecha) y mapa de $H\beta$ (izquierda).

2.86, típico de las condiciones físicas de las regiones HII (Osterbrock, 1989). El valor de la extinción, A_V , en la banda V se calculó según la siguiente ecuación:

$$A_V = \frac{-2.5}{(A_\alpha - A_\beta) \times \left(\log_{10} \left(\frac{F(H\alpha)}{F(H\beta)} \right) - \log_{10}(2.86) \right)} \quad (3.1)$$

en donde $F(H\alpha)$ y $F(H\beta)$ son los flujos observados de $H\alpha$ y $H\beta$ y A_α y A_β son los valores de la curva de extinción normalizados a la banda V en la longitud de onda de las líneas de $H\alpha$ y $H\beta$, respectivamente. El flujo de $H\alpha$ corregido por extinción se calcula mediante la expresión:

$$F(H\alpha)_{int} = F(H\alpha)_{obs} \times 10^{0.4 \times A_\alpha \cdot A_V}. \quad (3.2)$$

En aquellos pixeles donde la línea de $H\beta$ no se observa, no se puede calcular un valor para la extinción, así que se utilizó un enfoque conservador poniendo $A_V = 0$. De la misma manera, cuando se encontraron pixeles para los cuales la razón medida $F(H\alpha)/F(H\beta) < 2.86$ (esto puede pasar en los pixeles de las partes mas externas de las galaxias en donde la señal a ruido es baja, y esto puede afectar sobre todo la medida de la línea de $H\beta$, la cual es mas débil), se tomó $A_V = 0$.

A partir de esos valores se calculó la luminosidad de $H\alpha$ y, aplicando la ecuación:

$$SFR(H\alpha) = 4.6 \cdot 10^{-42} \times L(H\alpha) \quad [M_\odot yr^{-1}] \quad (3.3)$$

se obtuvo finalmente la tasa de formación estelar en cada spaxel. El factor de conversión de luminosidad a SFR es el mismo dado por (Kennicutt, 1998a), pero reescalado a una Función de Masa Inicial (o IMF, por sus siglas en inglés) de Chabrier.

Para poder calcular el valor de la tasa de formación estelar total dentro del disco de las galaxias, se realizó la suma de la SFR en todos estos spaxels. Sin embargo, como ya se ha explicado anteriormente, y como vamos a ver con más detalle en la sección siguiente, hay que tomar en cuenta que no todo el flujo emitido por la línea de $H\alpha$ se debe al mecanismo de formación estelar.

Para poder hacer esto, en el presente estudio se elaboraron diagramas diagnósticos de los mecanismos de ionización del gas que se indican como diagramas BPT, por las iniciales de los autores del primer trabajo sobre esto (Baldwin et al., 1981). A través de estos diagnósticos podemos tener una idea de cuáles pixeles no están indicando emisión proveniente de regiones de formación estelar, AGNs, LINERS, o de una mezcla de procesos tales como choques, explosiones de supernova, etc.. Tal como lo explicaron los autores de este diagrama, se utilizan diversas líneas de emisión para poder determinar el proceso que las genera. En este caso utilizamos el logaritmo de los cocientes que aquí reportamos: $\log_{10} \left(\frac{[NII]}{H\alpha} \right)$ y de $\log_{10} \left(\frac{[OIII]}{H\beta} \right)$, para obtener los diagramas BPT en cada pixel de cada galaxia. Se utilizaron estas líneas porque son las más prominentes en las galaxias de GASP.

3.3. Diagramas diagnósticos

Un diagrama de diagnóstico o diagrama BPT (por las iniciales de los autores: Baldwin, Phillips y Terlevich), para las galaxias con líneas de emisión, se obtiene al graficar en los ejes horizontal y vertical algunas relaciones analíticas entre ciertas líneas de emisión de los gases. Hay zonas en el diagrama BPT que están dominadas por algunos mecanismos de emisión. Estas áreas están identificadas por líneas de separación expresada por funciones como las que se encuentran por ejemplo en los trabajos de Kewley et al. (2001); Kauffmann et al. (2003); Heckman (1980). En el diagrama BPT, en lugar de las líneas de [NII] podemos utilizar las del [OI] o las del [SII].

De acuerdo a dónde se ubique en este diagrama cierto spaxel dadas sus razones de las líneas de emisión, se puede identificar el mecanismo de emisión dominante que posee. Por ejemplo: los AGN de tipo 2 (galaxias Seyfert 2) poseen las líneas de emisión delgadas en su espectro y presentan bajos valores de la razón [NII]/H α con respecto los LINERs (regiones de gas débilmente ionizado); a su vez, los LINERs presentan razones de [NII] $_{\lambda 6583}$ /H α mayores a las que se obtienen de las regiones regiones HII.

Como ya se ha explicado en la sección anterior, el cálculo de la SFR fué realizado en cada spaxel. Sin embargo, para los cálculos de este trabajo sólo estamos interesados en aquellos que representan fuentes emisoras debido a la actividad de formación estelar. Es por esto que se tuvo que realizar un diagrama BPT para cada galaxia con el propósito de identificar esos pixeles.

Para el presente trabajo se graficó en el eje vertical la razón [OIII] $_{\lambda 5007}$ /H β y en el eje horizontal la razón [NII] $_{\lambda 6583}$ /H α y se usaron las relaciones de Kewley et al. (2001) y Kauffmann et al. (2003) para identificar los mecanismos de emisión por formación estelar. Un ejemplo de un diagrama BPT se enseña en la figura 3.2, que puede entenderse al apreciar el mapa de la figura 3.3 donde se identifica el mecanismo de emisión dentro del disco galáctico.

Así, podemos ver en la misma figura los puntos que se ubican debajo de la función de (Kauffmann et al., 2003) indicando que en dichos spaxels el mecanismo de producción de las líneas es por fotones ionizantes producidos por estrellas masivas, es decir, por formación estelar (Kauffmann et al., 2003). Por otro lado, los fotones que se encuentran localizados entre las funciones de Kauffmann et al. (2003) y Kewley et al. (2001) corresponden a fuentes con emisión compuesta por diferentes procesos, tales como formación estelar, choques, supernovas, y actividad nuclear (Kewley et al., 2001).

Los puntos arriba de la función de (Kewley et al., 2001) representan LINERS o AGNs, razón por la cual no los tomamos en cuenta para los cálculos de esta tesis, pues estamos interesados en estudiar las fuentes de ionización debidas a la formación estelar.

3.4. SFR en otros bins de edad (2, 3, 4)

Para cada galaxia se obtuvieron, con el código SINOPSIS, los valores de masa estelar por cada spaxel. La definición de masa estelar utilizada, según la notación utilizada en Longhetti and Saracco (2009), es la masa de las estrellas que todavía están sostenida por reacciones nucleares más la masa de los remanentes. De la misma forma, SINOPSIS proporciona también la tasa de formación estelar promedio en cuatro épocas cósmicas, es decir, se quiere estudiar la SFH en las galaxias.

En general, para este estudio y como ya se explicó al principio de este capítulo, solamente se utilizaron los mapas de SFR correspondientes a los bins de tiempo más viejos (2, 3 y 4) porque preferimos calcular la SFR más reciente utilizando la luminosidad de H α y con base a esto se elaboró el mapa de SFR1, lo cual permite una mejor comparación y también un uso directo de los diagramas de diagnóstico. Entonces, para hacer los mapas de SFR1 se corrigió por la extinción la luminosidad de H α para calcular la tasa de formación estelar y, por otra parte, los mapas de SFR2, SFR3 y SFR4

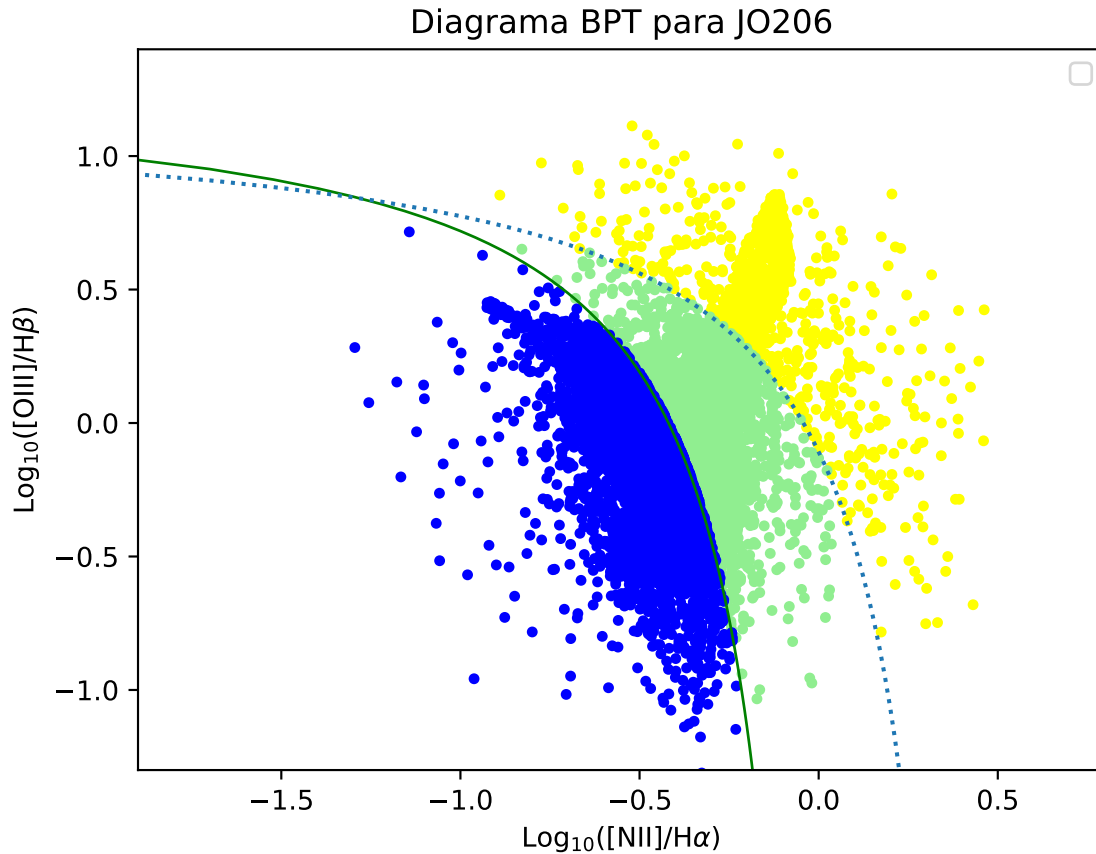


Figura 3.2: Ejemplo de diagrama BPT realizado para la galaxia JO206. La línea continua representa la función de (Kauffmann et al., 2003) y la línea punteada la función de (Kewley et al., 2001). Los puntos corresponde a spaxels dentro del disco galáctico y los colores indican las diferentes fuentes de emisión de a cuerdo al diagrama BPT: azul para formación estelar, verde para fuentes compuestas y amarillo para AGNs, como se clasificaron según su posición con respecto a las líneas mencionadas.

utilizados son los que se elaboraron a partir de análisis de poblaciones estelares simples realizados con sinopsis (obtenidos previamente por la colaboración GASP).

Los bins de edad en los que se calcula cada SFR corresponden a (Fritz et al., 2017):

SFR1 = [0 – 20] Myr

SFR2 = [20 – 570] Myr

SFR3 = [0.57 – 5.7] Gyr

SFR4 = [5.7 – 14] Gyr

En este trabajo se hizo un estudio de 4 bins de tiempo definidos a partir de los 12 que son proporcionados por SINOPSIS porque es difícil distinguir las diferencias entre las propiedades de las poblaciones estelares de edades viejas del orden de centenas de millones de años. No se trabajó con un mayor número de intervalos de tiempo debido a que a mayor número de bins tendremos más incertidumbre en las propiedades calculadas, ya que los datos de MUSE no cubren la parte UV del espectro que posee ciertos indicadores de la edad para las poblaciones estelares, tales como el

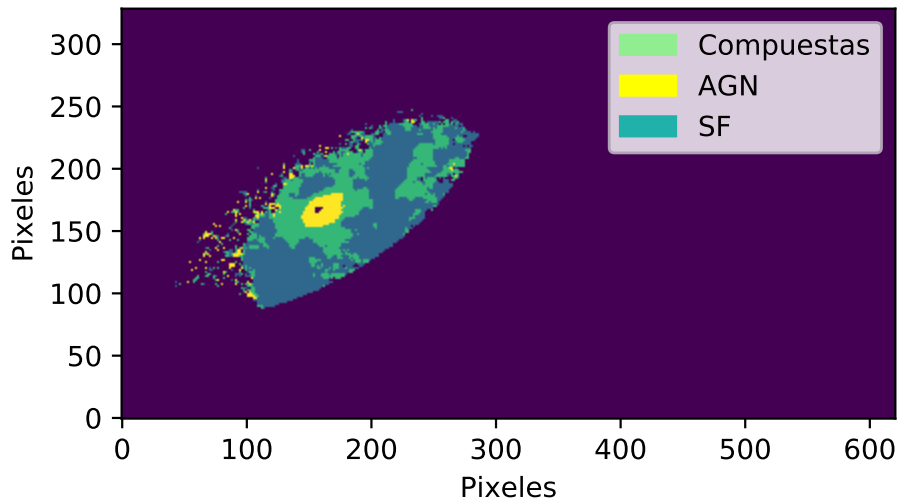


Figura 3.3: Mapa BPT espacialmente resuelto de JO206 en el disco galáctico que indica los mecanismos de emisión en cada spaxel. Aquí se señalan los spaxels que corresponden a las diferentes fuentes de emisión de acuerdo al diagrama BPT: azul para formación estelar (o SF, por sus siglas en inglés), verde para fuentes compuestas y amarillo para AGNs.

D4000, las líneas de calcio o la línea de $H\delta$.

3.5. Mapas de SFR y masa: análisis de las asimetrías

En esta sección se realiza un análisis de la distribución espacial de SFR en los cuatro bins de tiempo y se indaga sobre pistas del posible movimiento de las galaxias y de los choques entre los gases interestelar e intra-cumular.

Dado que la RP que el medio intra-cumular ejerce en el medio interestelar de las galaxias provoca la compresión del gas, el cual a su vez incrementa su densidad y con ello ocasiona episodios de formación estelar, los eventos de formación estelar provocados por este mecanismo deberían dejar una marca en la galaxia, la cual podría verse como una región con un incremento en la actividad de formación estelar en una parte del disco que se tendría que poder identificar con el frente del choque. Esto debería entonces generar diferencias en las distribuciones de las SFR dentro del disco de la galaxia, provocando así asimetrías notables en esos mapas.

La figura 3.4 es una representación esquemática de una galaxia cayendo a un cúmulo (marcada en color rosa) e interactuando con el medio intra-cumular. Es muy probable que las galaxias medusas sean galaxias observada durante una interacción con el cúmulo por primera vez (eso porque todavía tienen gas y, mas en general, medio interestelar), o sea que están “cayendo” hacia las partes mas internas de un cúmulo. En este caso el esquema está mostrando una galaxia cayendo hacia las regiones centrales del cúmulo, en donde generalmente se encuentra la galaxia más brillante del cúmulo (BCG) y que en este caso está simbolizado con un elipse amarillo. Cuando una galaxia está en movimiento a través del cúmulo, el gas intra-cumular choca con el medio interestelar del disco galáctico que se encuentra en la parte delantera de la galaxia y, debido a la presión hidrodinámica, incrementa la densidad de este gas y por eso también la actividad de formación estelar en esta región

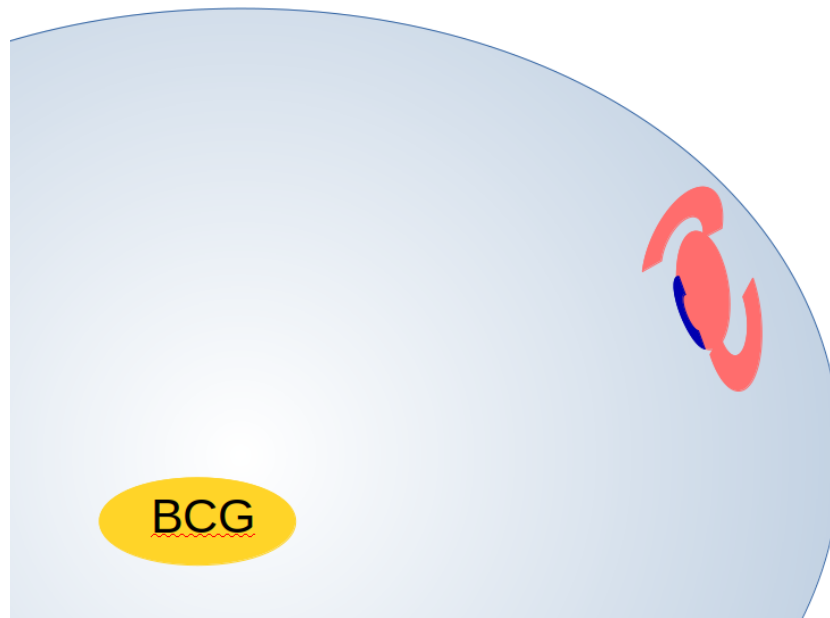


Figura 3.4: Representación esquemática de la primer interacción de una galaxia medusa con el cúmulo. Cuando la galaxia medusa (de color rosa) entra en contacto con gas que se encuentra en el cúmulo (de color azul claro), se crea un choque entre el gas interestelar del disco y el gas intra-cumular caliente y, debido a la presión hay un incremento en la actividad de formación estelar (simbolizado con color azul marino) en la parte del disco que está presentando el choque ya mencionado. La galaxia más brillante (BCG, por sus siglas en inglés) está representada con amarillo.

donde ocurre el choque.

De este modo, si en el disco de alguna galaxia encontramos una región con una actividad de formación estelar en promedio mas alta con respecto a otras partes del mismo, podemos suponer que estemos detectando de esta forma el lugar en donde se produjeron los choques entre los dos medios. Además, por lo visto arriba, podríamos inferir hacia dónde se está dirigiendo la galaxia. Más aún, es posible realizar esto a diferentes épocas cósmicas, ya que contamos con mapas de SFR calculada para diferentes tiempos. En esta tesis se buscan asimetrías en los mapas de masa y de SFR que se refieren a las cuatro épocas cósmicas definidas anteriormente. A continuación se explica la manera en que se realizó particularmente para las galaxias de la muestra de control y después para las demás galaxias de la muestra GASP.

La idea del siguiente cálculo es inferir los vectores de movimiento de las galaxias medusa (aunque este procedimiento se podría llevar a cabo para cualquier tipo de galaxia) de la muestra GASP a diferentes tiempos: así, por un lado podemos tener otro indicio por la presencia del efecto del choque y, por otro lado, podemos intentar definir el vector de velocidad de la galaxia en el plano del cielo. Esta metodología fue propuesta por primera vez por (Troncoso-Iribarren et al., 2020) en el análisis de simulaciones numéricas de EAGLE (Schaye et al., 2015) y en este caso por primera vez lo vamos a aplicar a datos “reales” (o sea, observaciones y no simulaciones). Creemos que nuestro trabajo pueda ayudar a validar esa metodología que se aplicó a los datos de las simulaciones que, por su propia naturaleza, no presentan el mismo nivel de complejidad que hay en la realidad. A continuación vamos a describir el procedimiento y su implementación a nivel técnico.

Para cada galaxia se tomó el mapa de masa estelar y se localizaron las coordenadas del spaxel

más masivo. Todo se hizo trabajando dentro de la región que definimos como el “disco galáctico”. En cada uno de los mapas de masa estelar y SFR se traza una línea recta que pase por el centro así definido. Cada recta divide al disco galáctico en dos partes, y el siguiente paso es calcular el valor de masa o de SFR en cada una de las mitades, sumando simplemente el valor de cada pixel que se encuentre dentro del disco por un lado y por el otro lado de la línea. Esta operación se repite de forma automática por inclinaciones distintas de la línea, a pasos de 1° , cubriendo valores de 0 a 180. Los ángulos se empiezan a contar en sentido antihorario y el ángulo de 0° corresponde a una línea horizontal que pasa por el centro de la galaxia (sistema cartesiano).

A cada inclinación calculamos la diferencia relativa de los valores (pueden ser de masa estelar o de SFR) entre las dos mitades del disco, como sigue:

$$\Delta P(\theta) = \frac{0.5 \times \text{val}_T - \text{val}_H(\theta)}{0.5 \times \text{val}_T} \times 100, \quad (3.4)$$

donde $\Delta P(\theta)$ es la diferencia relativa de la suma los valores en las dos mitades del disco, val_T es el valor total de masa o de SFR total contenido en el disco y $\text{val}_H(\theta)$ es el valor de masa o de SFR en una de las dos mitades por un cierto ángulo. Con esta definición, la diferencia relativa es una medida de qué tanto, en porcentaje, las dos mitades del disco galáctico difieren la una de la otra. Un valor de $\Delta P(\theta) = 0$, quiere decir que hay una simetría perfecta para un cierto valor de la inclinación de la recta, mientras que un valor de 100 nos indica el máximo grado de asimetría (es decir, toda la masa o la formación estelar están en un lado del disco).

Al cambiar el ángulo de inclinación de la recta y repetir el procedimiento se obtiene una relación entre ángulo y diferencia relativa. En la figura 3.5 se muestra un ejemplo de cómo se ve el cambio de las diferencias relativas en los mapas de masa, y SFR en los tres bins de edad más viejos para la galaxia A3376_B_0214, la cual es una galaxia de la submuestra de control de la muestra GASP. En las cuatro gráficas las dos líneas representan los valores de $\Delta P(\theta)$ de cada una de las dos mitades del disco, en función del coeficiente angular (o del ángulo de inclinación) de la recta. Estas gráficas nos permitieron también asegurar que la suma de las diferencias relativas de las dos parte estuviera en 0 a cada inclinación (como se puede apreciar, las dos curvas son simétricas con respecto a eje x).

Vamos a definir el “índice de asimetría”, que denotamos con la notación A_{idx} , como el valor máximo de las diferencias relativas:

$$A_{idx} = \text{Max}[\Delta P(\theta)] = \Delta P(\theta_{max}), \quad (3.5)$$

que se tienen para un cierto ángulo θ_{max} de inclinación de la recta. Así que por cada uno de los mapas tenemos un índice de asimetría, que corresponde al valor máximo de la diferencia relativa en ese mapa.

El problema de la búsqueda de la presencia de regiones de actividad de formación estelar, actual o a otras épocas, en el disco de una galaxia se convirtió entonces en el estudio del índice de asimetría y del ángulo al cual está definido. Por la geometría del problema, la dirección de la velocidad de la galaxia en el plano del cielo se debería encontrar a un ángulo de aproximadamente $\theta_{max} + 90^\circ$. En estas consideraciones hay que añadir que las galaxias, y especialmente las de tipo morfológico tardío, no son objetos perfectamente regulares y simétricos. Es entonces normal que haya una asimetría en la distribución de masa y de SFR. La pregunta es entonces: ¿cuándo podemos decir que un índice de asimetría mayor a cero nos indica un potencial incremento de formación estelar localizado en un frente de choque? Primero que todo notamos que, generalmente, en galaxias “regulares” y en las que no han sufrido fenómenos de interacción, la gran parte de la masa en estrellas está distribuida de forma relativamente “suave”. Notamos además que valores de A_{idx} mayores a cero pueden estar relacionados a algunos factores:

- Una elección no óptima del centro de la galaxia.
- Fluctuaciones en los valores de la masa estelar calculados por SINOPSIS debido a la degeneración y a las incertidumbres típicas de las técnicas de síntesis de población estelar.
- Máscaras en los mapas para tomar en cuenta la presencia de objetos que no tienen nada que ver con la galaxia objetivo, como por ejemplo, estrellas o galaxias del fondo.

Sin embargo, estas variaciones deberían ser mínimas para los mapas de masa, así que analizándolos con este método deberíamos encontrar los valores de los índices de asimetría más pequeños. Por esta razón, el valor de A_{idx} encontrado en el mapa de masa puede ser tomado como referencia: si se encontraran valores parecidos a éstos en los mapas de SFR, es probable que las asimetrías se deban a la distribución de masa en la galaxia y no sean provocadas por RP.

Hay que tomar en cuenta también que las interacciones hidrodinámicas en las galaxias medusa, por su naturaleza (es decir, por tener las colas de gas todavía visibles), tomaron lugar en épocas relativamente recientes. Eso se refleja entonces en los dos bins de SFR más recientes, mientras que no esperamos efectos notables en la tasa de formación estelar a épocas más antiguas. En la mayoría de los casos las curvas de las diferencias relativas en los mapas de masa, de SFR4 y , se ven muy parecidas (ver figura 3.5 para un buen ejemplo de esto). Por eso, en la sección siguiente, nos enfocaremos más en el análisis de las asimetrías en las dos épocas más recientes.

3.6. Búsqueda de evidencias de interacciones de presión hidrodinámica

Una vez que tengamos definidos, para cada galaxia y para cada mapa, cuáles son los valores de A_{idx} y de θ_{max} , el paso siguiente es decidir si el valor del índice de asimetría nos está sugiriendo la posible presencia del efecto de la interacción por la RP. Para esto decidimos utilizar las galaxias de la muestra de control, que fueron elegidas por no tener evidencias de ningún tipo de interacción, tanto de tipo hidrodinámico como de tipo gravitacional.

En esas galaxias esperamos entonces que las asimetrías que encontramos sean mínimas y que sean provocadas por inhomogeneidades intrínsecas. Comparando en un segundo momento los valores encontrados en las galaxias que presentan evidencias de RP con los valores promedio calculados para las galaxias de la muestra de control, será posible decir si son compatibles con las inhomogeneidades típicas que se pueden encontrar en galaxias “normales”, o si por otro lado pueden darnos indicaciones de otro tipo de fenómeno.

De estas galaxias calculamos el índice de asimetría en los cinco mapas, y obtuvimos sus valores promedio por cada mapa. Estos valores se compararon con los que se obtuvieron para las galaxias que se encuentran en alguna fase de interacción que, por simplicidad, vamos a llamar galaxias medusa (a pesar de que tengan colas o no). En las gráficas de las figuras 3.6 y 3.7 se muestran los índices de asimetría de las galaxias medusas como puntos de color negro y, con una línea continua verde el valor promedio de A_{idx} de las galaxias de la muestra de control. Las líneas punteadas marcan la medida del promedio $\pm 1\sigma$.

Al comparar los promedios de las diferencias relativas calculados para las galaxias medusas marcados como una línea color rojo y para la muestra de control en color verde, se observa una tendencia para los 5 mapas: algunas galaxias con asimetrías significativas tienen un índice de asimetría que están por encima del promedio de la submuestra de control y del promedio de las medusas, principalmente en el mapa de SFR1 y 2, pero dentro de la desviación estándar.

Entonces, podemos utilizar esto para decir cuáles galaxias presentan diferencias significativas en sus respectivos mapas. Los mapas de SFR1 son los que presentan más asimetrías (alcanzando más del 70 % de índice de asimetría).

En el mapa de SFR2 hay diferencias relativas que rondan el 50 % mientras que para los mapas de SFR3, 4 y masa alcanzan un 40 % (a continuación se analizan estas galaxias), pero el promedio es muy cerca del que se encontró para la muestra de control.

La tabla 3.1 resume los valores del promedio y de desviación estándar para la muestra de galaxias normales y galaxias medusas. Utilizando los resultados de este análisis, podemos entonces determinar cuáles galaxias parecen estar afectadas por RP, por tener valores de A_{idx} por arriba de 1σ con respecto a los valores promedios calculado en las galaxias de la muestra de control.

Como puede verse al comparar los resultados de ambas muestras, hay un incremento en el valor promedio del índice de asimetría en las galaxias medusas con respecto a las normales, incremento que es relevante nada mas en los bins 1 y 2 de los mapas de SFR.

Mapa	A_{idx}	σ	A_{idx}	σ
sfr1	21.79	11.51	28.26	15.68
sfr2	13.04	7.79	18.30	10.85
sfr3	12.15	9.00	14.02	8.90
sfr4	12.12	7.46	13.51	8.26
Masa	10.27	7.70	13.08	8.53

Cuadro 3.1: Valores promedios del índice de asimetría y desviación estándar para galaxias de la muestra de control (columnas 2 y 3) y de las galaxias bajo influencia de RP (columnas 4 y 5).

3.7. Análisis de la dirección del frente de choque

Con este análisis de los índices de asimetría queremos encontrar si existen huellas en los mapas de masa y de de formación estelar de las galaxias que puedan ser evidencia de que la galaxia sufrió efectos de RPS. Con esto podríamos también encontrar un posible frente de choque que nos puede hablar sobre la dirección de las galaxias dentro del cúmulo. Así, de las galaxias con asimetrías significativas (índice de asimetría por arriba de 1σ con respecto al promedio del de las galaxias normales) se tomaron sus mapas de SFR en las dos épocas más actuales. Entonces, tomando en cuenta la recta con la inclinación θ_{max} a la cual se mide el índice de asimetría, se traza un vector perpendicular a ella, el cual nos debería dar pistas sobre la dirección hacia la cual se está moviendo la galaxia dentro del cúmulo, tal y como se puede ver en las figuras 3.8.

En la figura 3.8 se muestra el ejemplo del análisis hecho para la galaxia JO206: el índice de asimetría se mide a un ángulo de inclinación de 45° en el mapa de SFR1 lo cual se traduce a un ángulo de dirección de la velocidad a 315.5° . Si analizamos el mapa de SFR2, el índice de asimetría se mide a un ángulo de 57.5° , significativamente diferente con respecto a el valor encontrado en el primer mapa, proporcionando un ángulo de 147.5° para la supuesta dirección de la velocidad.

En este caso particular, resulta que el centro de este cúmulo A3558, que coincide con la BCG, se encuentra a una dirección que coincide con la del vector calculado del mapa de SFR2. En la figura 3.9 se aprecia el campo donde se encuentra esta galaxia y su ubicación con respecto a la BCG (Poggianti et al., 2017), y en la figura ?? se compara el vector de movimiento de esta galaxia y el vector que indica la dirección de la BCG.

En la figura 3.11 se muestra la galaxia JO147 y se comparan dos vectores: en color azul está representada la dirección del cúmulo donde se encuentra la galaxia y en color negro tenemos al

vector perpendicular a la recta que nos dio el mayor índice de asimetría para este caso. Esto se hizo para cada una de las galaxias cuyo índice de asimetría es mayor al valor promedio de los índices de las galaxias normales.

En la tabla 3.2 se muestra una lista de las galaxias que presentaron diferencias significativas en las asimetrías de los mapas de formación estelar en las dos épocas más recientes. Para cada galaxia se aprecia: el ángulo de inclinación del vector que apunta hacia la BCG, el ángulo de inclinación que indica la dirección de la velocidad para el mapa de SFR1; el ángulo de inclinación para la velocidad en el mapa de SFR2, así como el valor del índice de asimetría que se tiene en ambos casos. Las galaxias que presentan asimetrías significativas en los mapas de SFR 1 y 2 no son las mismas, así que se escribe un * cuando el índice de asimetría no es significativo. Como se ve en la tabla, las únicas galaxias que presentan un índice de asimetría significativo en los dos mapas de formación estelar son: JO20, JO138, JO147 y JO153.

Galaxia	$\theta(\text{BCG})$	$\theta(\text{SFR1})$	$A_{idx}(\text{SFR1})$	$\theta(\text{SFR2})$	$A_{idx}(\text{SFR2})$	
JO20	346	249	48.64	90	47.42	
JO24	235	-	-	336.5	38.89	
JO27	326	250	48.52	3	29.60	
JO36	270	191	45.05	*	-	
JO95	146	307	51.40	*	-	
JO102	127	*	*	100	32.30	
JO112	149	-	-	14	33.42	
JO119	60	199	45.11	*	-	
JO134	218	71	67.44	*	-	
JO138	249	68	61.36	35	30.84	
JO144	281	*	-	74	32.50	
JO147	200	54	52.25	55	37.48	
JO149	279	*	-	182	42.42	
JO153	279	250	46.53	225	31.68	
JO157	164	*	-	102	40.80	
JO179	280	171	47.43	*	-	
JO181	278	*	-	30.51	16	30.51
JO206	112	45	44.59	16.33	*	-
JW100	194	359	49.68	*	-	
JW115	308	*	-	95	30.97	
JW36	114	113	72.41	323	32.26	

Cuadro 3.2: Comparación de los ángulos de inclinación para los vectores que apuntan a la BCG y para los que se obtiene el índice de asimetría en los mapas de SFR1 y 2. También se muestra el valor de los índices de asimetría, aunque se coloca un * en el caso de que las asimetrías no sean significativas.

Para comparar los ángulos que forman los vectores de velocidad y los ángulos hacia donde se encuentra el centro del cúmulo (la BCG), se graficó para cada galaxia el ángulo interno del vector de velocidad de las galaxias y el vector que apunta hacia la BCG en los mapas de SFR de los dos bins de tiempo más recientes, normalizándolo al valor del ángulo del vector de movimiento. En la figura 3.14 se muestra esta comparación para la SFR actual y en la figura 3.13 SFR del segundo intervalo de tiempo más reciente. Las galaxias cuyos vectores apuntan en una dirección parecida

(con un valor menor a 0.5 en la diferencia normalizada al ángulo del vector de velocidad) son: JO20, JO27, JO36, JO153, JO179 y JW36 en el mapa de SFR1 y JO24, JO102, JO149, JO153, JO157 en el mapa de SFR2.

Para el caso de la tasa de formación estelar más reciente, de la figura puede verse que hay dos galaxias con los dos vectores (tanto el que indica el mayor valor de SFR como el que apunta hacia el centro del cúmulo) apuntando hacia direcciones parecidas: corresponden a JW36 y JO153. El gas de JW36 ya ha sido despojado, probablemente debido a fuertes efectos de RPS y tal vez es por esto que de acuerdo a la inspección visual realizada fue clasificada como “J1”, es decir, casi no presenta colas de material. Por otro lado, JO153 es una galaxia “J2” cuya fase de desprendimiento de gas es desconocida, sin embargo, dada esta coincidencia de sus vectores, posiblemente se encuentre en etapas avanzadas del despojo de gas.

También es importante señalar que las máscaras de algunas galaxias son un poco irregulares, como es el caso de JO95, JO119, JO134 y JW36, así que esto también puede estar influyendo en las direcciones de los vectores (ninguna de estas galaxias presentan colas de gas evidentes). Particularmente, la galaxia JO138 fue enmascarada con una elipse retirando una parte del disco galáctico en uno de los lados debido a un objeto que se interponía en la línea de visión, de modo que es altamente probable que esto altere el resultado de sus vectores, haciendo que difieran bastante entre ellos.

Es interesante notar dos galaxias medusas: el caso de JO206, una galaxia medusa con largas colas de gas prominentes cuyo ángulo entre los vectores es menor a 90° . Como se aprecia en las figuras 3.14 y 3.13, dada la dirección de sus colas con respecto al centro del cúmulo, esta galaxia podría estar siguiendo cierta trayectoria en la cual, dadas las condiciones del medio intracumular, su disco pueda girar en dirección al vector de asimetría mientras se dirige al centro del cúmulo.

Por su parte, la galaxia medusa JW100 (figura 3.7) también tiene colas de gas prominentes en posición opuesta al centro del cúmulo y en esta parte del disco puede notarse una región a lo largo del disco donde inicia la zona de formación estelar y se extiende hacia atrás, hacia donde se despliegan las colas. Esto podría tratarse de un frente de choque entre el gas interestelar de la galaxia y el gas intracumular de la galaxia cayendo en modo “face-on” mientras la trayectoria es dirigida hacia el centro del cúmulo, generando un gradiente de formación estelar intensa en las partes más adentradas al disco galáctico y al inicio de las colas. Como el vector que indica el posiblemente movimiento de la galaxia puede estar influenciado por este gradiente de formación estelar en el disco, y dado que la máscara es irregular, puede ser por esto que el vector apunta en dirección casi opuesta al centro del cúmulo.

Ahora, para el análisis de la tasa de formación estelar en el segundo bin de tiempo, hay 4 galaxias que en la gráfica 3.13 muestran direcciones similares en sus vectores de movimiento y los vectores que indican el centro del cúmulo: JO153, JO149, JO102 y JO157. Las galaxias JO24, JO112, JO138, JO144, JO181 y JW115 tienen máscaras demasiado irregulares que pueden estar afectando los resultados (principalmente JO38, de la cual ya se explicó el hoyo que presenta la máscara en un lado del disco).

JO153, como se describió anteriormente, es una galaxia “J2” con fase de desprendimiento de gas desconocida, al igual que JO102 y JO157 (galaxias de clase “J1” y “J3”, respectivamente). JO149 es una galaxia medusa de clase “J1” que presenta evidencias de desprendimiento de gas.

El hecho de que en esta época haya más galaxias cuyos vectores de movimiento se asemejen más al vector que apunta hacia la BCG puede explicarnos por qué este tipo de galaxias presentan un intenso brote de formación estelar en este bin de tiempo, especialmente la galaxia JO153: en la figura 3.16 se aprecian los mapas de SFR y ambos vectores para dicha galaxia en los dos bins de tiempo diferentes, se observa que dado el comportamiento de sus vectores en ambas épocas cósmicas, parece que se ha ido desplazando hacia una dirección cercana al centro del cúmulo y luego ha desviado un

poco su trayectoria. Debido a ésto, JO153 podría tratarse de una galaxia que ya enfrentó el periodo más intenso de RPS y encontrarse en etapas posteriores al desprendimiento de gas.

3.8. Búsqueda de señales de RP en galaxias con formación estelar apagada

En el marco de un estudio que se hizo sobre 8 galaxias de GASP, pertenecientes a la muestra de control y todas miembros de cúmulos, con evidencias de apagado de formación estelar (es decir, galaxias que no presentaban líneas en emisión), se repitió el análisis explicado en las secciones anteriores. En este estudio, presentado en Vulcani et al. (2020), se intentó averiguar si las características de estas galaxias, en particular las de sus poblaciones estelares y su historia de formación estelar, son compatibles con apagado debido al efecto de RPS.

Para estas galaxias vamos a repetir el análisis hecho para las demás, aprovechando la experiencia ganada hasta ahora. Vamos entonces a analizar la historia de formación estelar buscando posibles evidencias de un aumento de la SFR en alguna época, que nos podría dar pista sobre una posible interacción con el medio intracúmulo, pero sobre todo vamos a analizar las características espacialmente resultas de la SFR, especialmente en el segundo bin de edad, intentando detectar las huellas de un frente de choque en el mapa de formación estelar. Es decir, nos interesa encontrar asimetrías en los mapas de formación estelar más recientes y, además, estas asimetrías tienen que ser significativas con respecto a las que se encuentran en los mapas de SFR3, SFR4 y masa, donde no esperamos ver aumentos de la formación estelar por efectos de choques.

Se utiliza entonces el mapa de masa estelar para verificar el grado de las asimetrías intrínsecas en la galaxias y cómo éstas se pueden eventualmente reflejar en la distribución de la SFR en el segundo bin de edad: si se encuentran variaciones en el mapa de masa, entonces es probable que las mismas asimetrías se encuentren también en los mapas SFR y que entonces no sean significativas.

Los valores del índice de asimetría de cada galaxia y por cada mapa también se reportan en la tabla 3.3. En ninguna de estas galaxias encontramos valores significativamente mayores en el mapa de SFR2, con respecto a los otros mapas. De hecho, estas galaxias muestran un grado de simetría bastante alto, así que pensamos se puedan excluirse posibles detecciones de frentes de choques identificados por incrementos locales en la formación estelar.

Aprovechando de que la muestra está compuesta de nada más 8 galaxias, mediante inspección visual se revisaron los mapas galaxia por galaxia, para validar los resultados encontrados de forma automática, que fueron así confirmados: no hay evidencia de frentes de choques trazados por formación estelar aumentada.

Asimismo, analizamos las historias de formación estelar integradas. En dos casos notamos un incremento de formación estelar, a nivel global de la galaxia, en el bin que abarca poblaciones estelares de 2×10^7 hasta $4 \sim 6 \times 10^8$ años. La razón entre el valor de SFR del bin 3 y 4 en estas galaxias, es mayor a la razón entre valores de SFR de los otros bins de tiempo contiguos, así que el incremento relativo entre la formación estelar de dos épocas de tiempo se da con mayor intensidad entre los bins 3 y 4, que es casi cuando se formaron las galaxias.

Una de las galaxias en las cuales se verifica éso es *A500_F_0152*. Aún así, no encontramos evidencia geométrica (o espacial/morfológica) clara de que sea desencadenada por presión hidrodinámica. La figura 3.17 muestra el mapa de SFR2 de esta galaxia y la gráfica de diferencias relativas del mismo, en las cuales se observan valores despreciables.

La otra galaxia es *A3376_B_0214*, en donde el incremento de formación estelar del segundo bin está ocurriendo en todo el disco. El índice de asimetría es alrededor del 20% y parece originarse por la presencia de una máscara en la parte norte-oeste de la galaxia, por lo que hay que tener cuidado

con la interpretación.

Si analizamos las gráficas de las diferencias relativas en función del ángulo, vemos que la distribución de masa estelar y de la SFR en los 3 bins analizados son bastante simétricas a excepción de algunas diferencias en determinadas partes de la galaxia.

Estos aumentos son una posible evidencia que sí hubo una interacción de tipo RP que en un principio aceleró la formación estelar, y después despojó la galaxia de su gas así apagando el proceso de formación estelar.

En resumen, estamos bastante seguros de que no hay señales claras de un incremento de formación estelar debido a choques producidos por presión hidrodinámica en ninguna de las galaxias desde el punto de vista de la distribución geométrica/espacial de la SFR. Sin embargo, en dos casos hay un incremento muy claro de SFR en el segundo bin de edad. Estas son las galaxias *A500_F_0152* y *A3376_B_0214*. De hecho estas son las galaxias que muestran la absorción de la línea de $H\beta$, más intensa. En la figura 3.18 se muestra la gráfica de SFH de *A500_F_0152*, donde se aprecia el incremento en el segundo bin de tiempo.

3.9. Mapas de densidad electrónica.

Los espectros de MUSE@VLT nos proporcionan también datos sobre las líneas del azufre una vez ionizado, que se encuentran a una longitud de onda de 6714 Å y a 6731 Å. Estas líneas corresponden a lo que se llama un “doblete”, o sea, una pareja de líneas colisionales que se forma por una transición originada a partir del mismo nivel electrónico excitado, hacia dos niveles con energía ligeramente distintas, tal como puede verse en el diagrama de la figura 3.19. La razón entre los flujos del doblete es una cantidad que depende de la densidad y de la temperatura electrónica, aun que la dependencia por la temperatura es mas débil. Así que, suponiendo que los electrones en el gas ionizado se encuentran a una temperatura de 10^4K , un valor que típicamente se encuentra en regiones HII (regiones de formación estelar; se vea por ejemplo Osterbrock, 1989), podemos utilizar esta razón entre flujos para obtener un mapa de densidad electrónica de las galaxias de la muestra.

Analizar la distribución de la densidad electrónica del gas nos podría dar pistas sobre la presencia de las regiones de gas ionizado más densas que el promedio, ayudándonos así posiblemente a identificar frentes de choque. Asimismo, se realizó un análisis para determinar la ubicación de las zonas en cada galaxia donde pueden encontrarse valores de densidad electrónica más altos que el promedio. La manera de realizarlo fue la siguiente: para cada galaxia se tomaron los datos de la emisión de azufre y se realizó el cálculo de la expresión 3.6 pixel por pixel. Esta fórmula representa la densidad electrónica como función de un cociente de flujos de las dos líneas, según la prescripción que encontramos en (Proxauf et al., 2014):

$$n_e = 0.0543 \times \tan(-3.0553 \times R + 2.8506) + 6.98 - 10.6905 \times R + 9.9186 \times R^2 - 3.5442 \times R^3, \quad (3.6)$$

en donde $R = F_{6714}/F_{6731}$.

Calculando el valor de densidad electrónica pixel por pixel, se generó el mapa de densidad electrónica para cada galaxia. Como primer intento de hacer un análisis automático de los mapas de densidad electrónica, se utilizó el mismo método usado para encontrar asimetrías en los mapas de tasa de formación estelar y masa. Así esperamos ver si es posible encontrar, de forma objetiva, un frente de choque caracterizado por una densidad electrónica mas alta y, posiblemente, averiguar

si con este tipo de análisis es posible la identificación de la dirección de la velocidad de la galaxia en el plano del cielo para cada intervalo de tiempo correspondiente a los bins de SFR.

Al igual que el análisis de los mapas de SFR, para estudiar las asimetrías se crearon gráficas que muestran las diferencias relativas de densidad electrónica en ambos lados de la galaxia como función del ángulo. El objetivo de esto es distinguir si las regiones con mayor densidad electrónica coincide con las zonas de mayor actividad de formación estelar, pues si tenemos un episodio de incremento de formación estelar en la época más reciente debido a RP debería notarse un aumento de la densidad del gas en esta zona. La figura 3.20 muestra la densidad electrónica (N_e) obtenida de la ecuación 3.6 contra la SFR1 para cada galaxia medusa. Puede observarse que la mayoría de las galaxias se encuentran por arriba de la función identidad, lo cual nos habla de que la densidad electrónica incrementa más rápidamente que la SFR1.

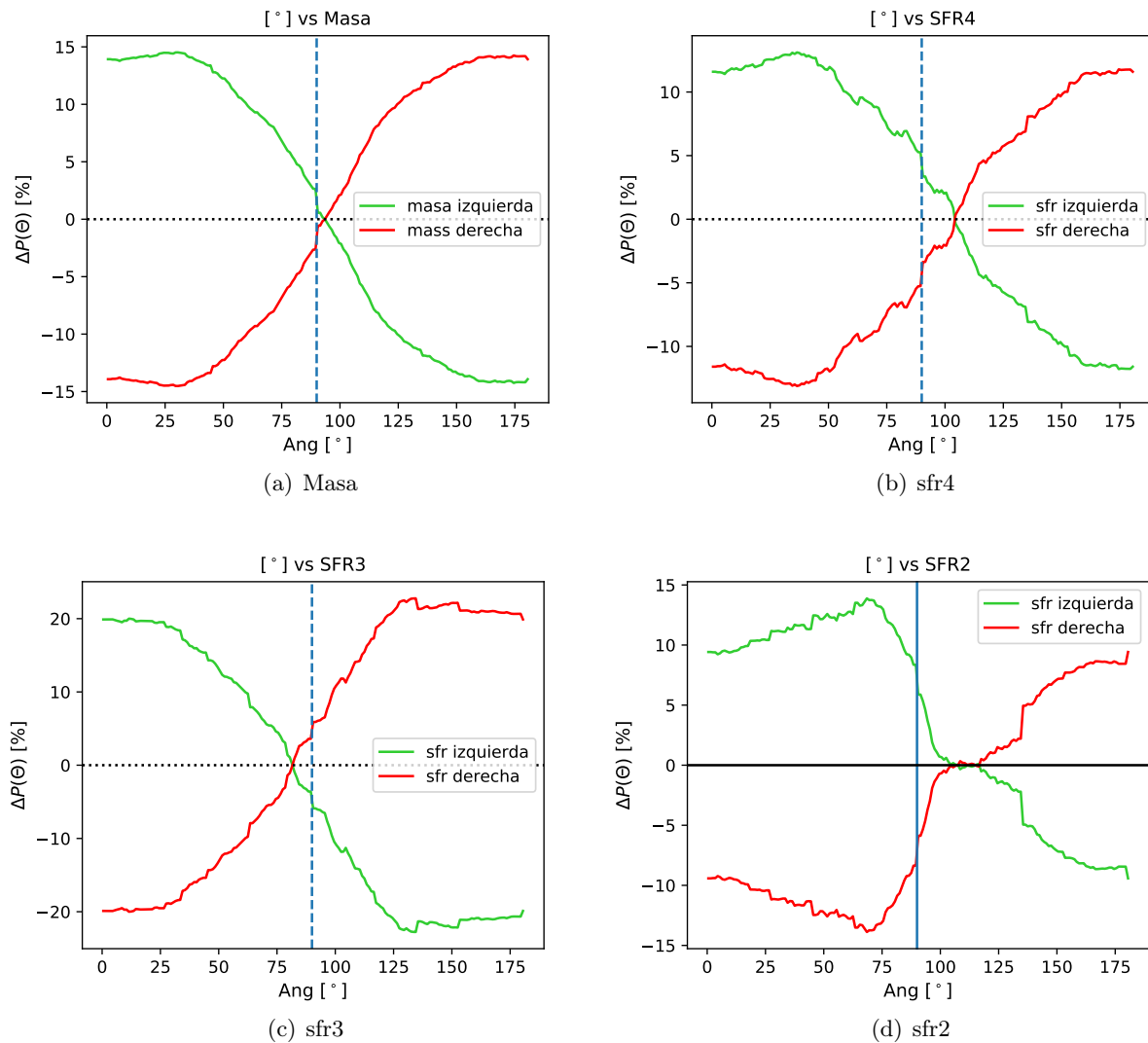


Figura 3.5: Gráficas que muestran la diferencia relativa entre los valores de (a) masa, (b-d) y de SFR2, 3 y 4 para el caso de la galaxia A3376_B_0214. La línea verde representa los valores de tasa de formación estelar en el lado izquierdo y la línea roja en el lado derecho.

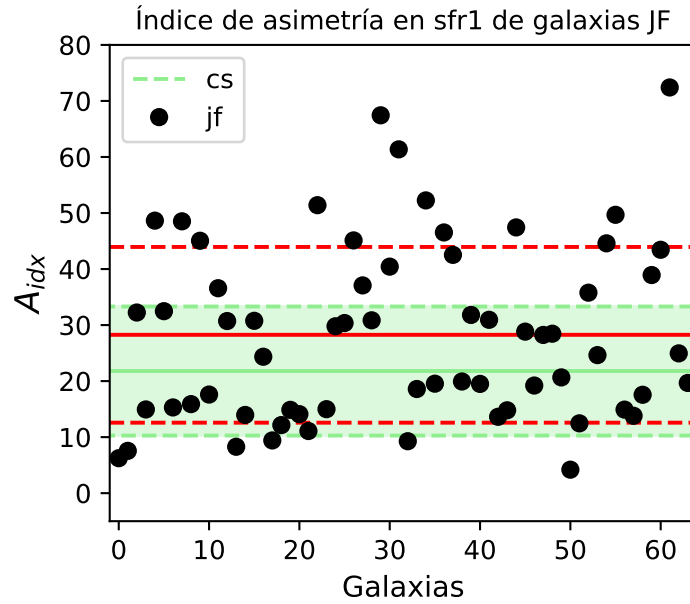


Figura 3.6: Índice de asimetría en los mapas de SFR1 para las galaxias medusa. Las líneas continuas roja y verde indican el valor promedio del índice de asimetría para las galaxias medusas y para la muestra de control, respectivamente. De igual forma, las líneas punteadas rojas y verdes representan los valores de desviación estándar para las galaxias medusas y las de la muestra de control.

Galaxia	SFR2 [$M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$]	A_{idx}	SFR3 [$M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$]	A_{idx}	SFR4 [$M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$]	A_{idx}	Masa [M_{\odot}]	A_{idx}
A1069_B_0103	0.930	16.63	2.841	15.35	2.627	23.68	2.1334e+10	19.91
A3128_B_0248	0.612	31.86	1.918	18.40	2.958	32.46	1.9855e+10	28.35
A3158_11_91	1.094	15.46	1.611	6.78	1.568	10.34	1.2748e+10	8.65
A3158_B_0223	0.486	14.12	1.788	2.27	3.158	7.13	2.0341e+10	5.34
A3158_B_0234	0.764	20.27	1.010	17.66	0.780	14.98	7.1143e+09	16.40
A3376_B_0214	1.146	13.78	0.530	1.30	0.727	11.59	5.4879e+09	8.63
A500_22_184	0.213	7.35	0.407	16.02	0.471	0.32	3.5360e+09	5.33
A500_F_0152	0.334	5.81	0.161	5.44	0.185	15.10	1.4994e+09	9.19

Cuadro 3.3: Propiedades de las poblaciones estelares en las galaxias con tasa de formación estelar apagada.

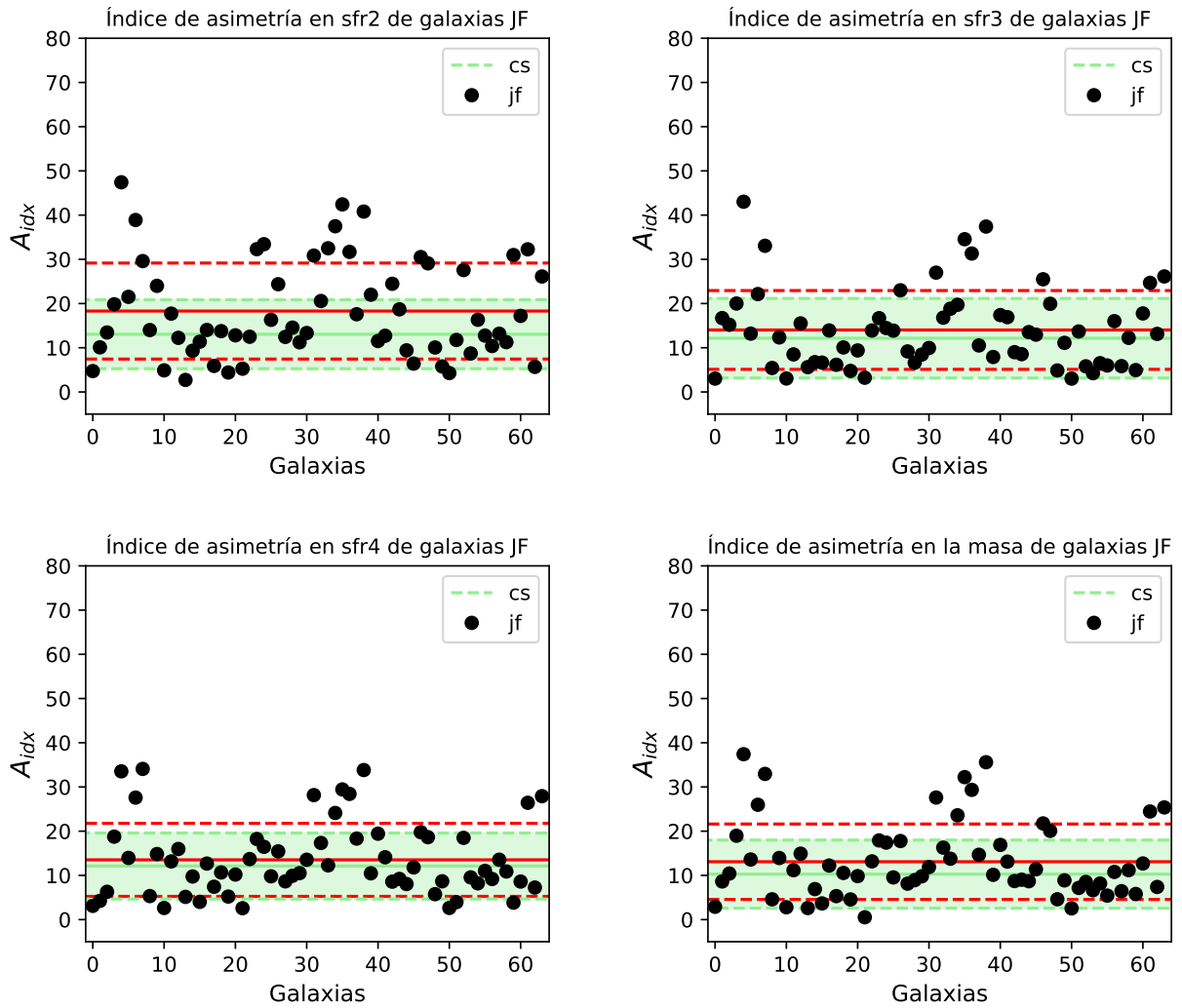


Figura 3.7: Aquí presentamos la comparación de los índices de asimetría de las galaxias medusa con el valor promedio obtenido en galaxias de la muestra de control, para los mapas de SFR2 (panel de arriba a la izquierda), SFR3 (panel de arriba a la derecha), SFR4 (abajo a la izquierda) y masa estelar (abajo a la derecha). Las líneas y símbolos son los mismos que en la figura 3.6.

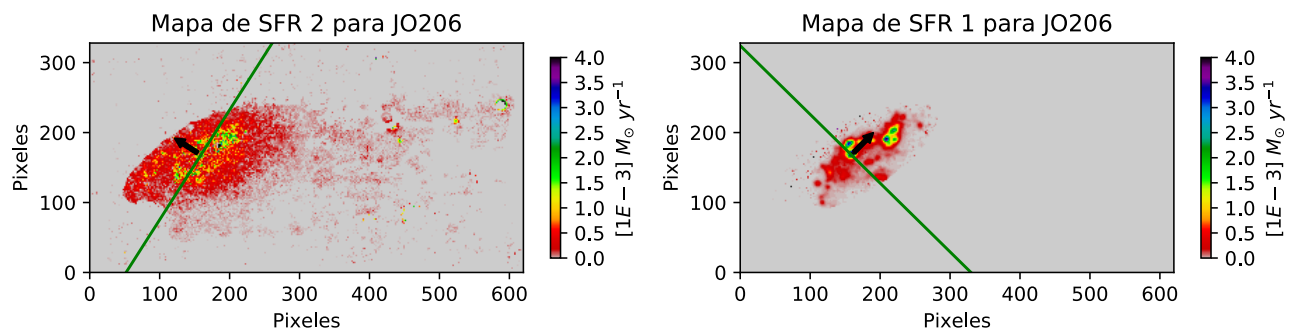


Figura 3.8: La figura de la izquierda muestra el vector de dirección encontrado para la galaxia JO206 al utilizar el mapa de SFR correspondiente al intervalo de tiempo en el cual la galaxia tuvo su primer interacción con el cúmulo (SFR2). La figura de la derecha muestra el resultado para el mapa de SFR1. En color verde se representan las rectas que dividen al disco galáctico en dos partes dependiendo del índice de asimetría.

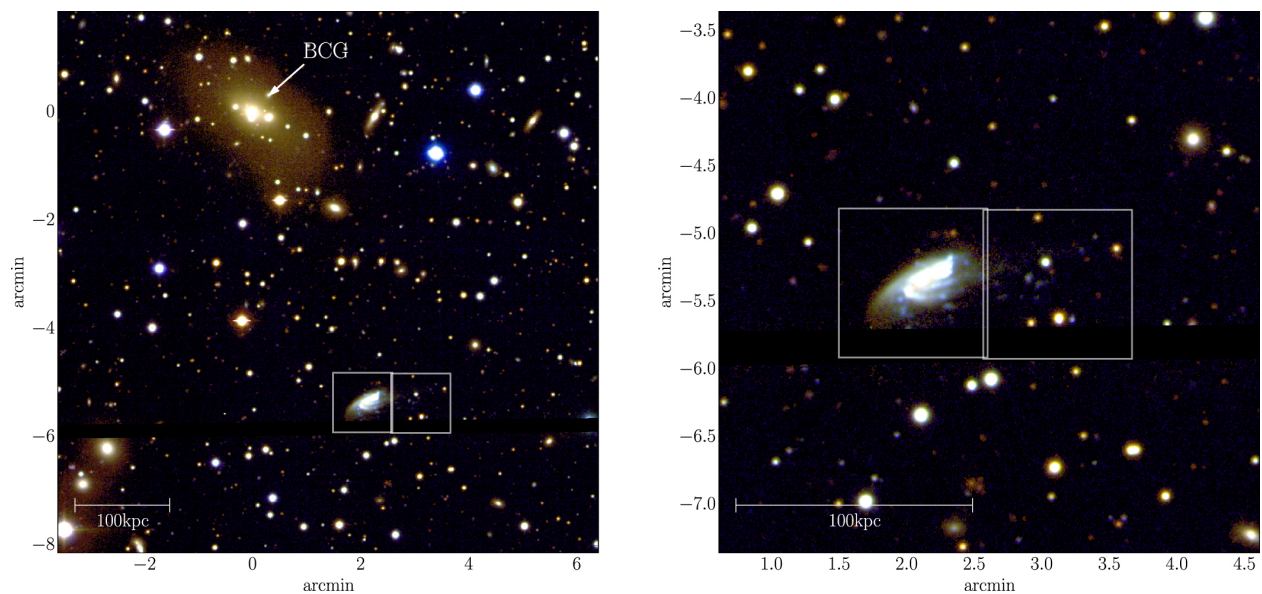


Figura 3.9: Ubicación de JO206 con respecto al centro del cúmulo A3558, que coincide con la BCG (figura tomada de Poggianti et al., 2017).

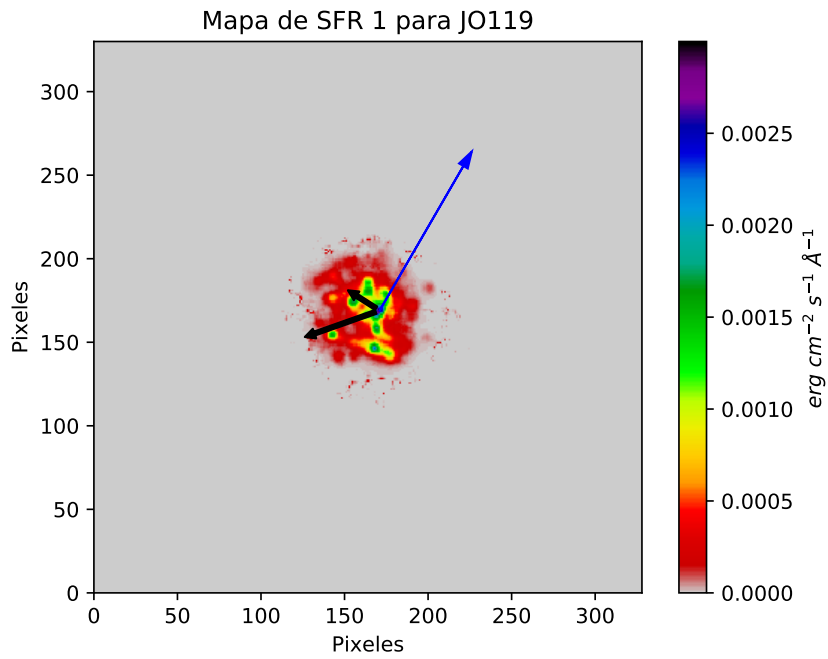


Figura 3.10: Vector de dirección encontrado para la galaxia JO119 al utilizar el mapa de SFR correspondiente a la época actual. Aquí mismo se observa en color azul la dirección de la BCG, así como también la dirección de velocidad de la galaxia para la SFR1 (vector rojo largo, que indica que el índice de asimetría es significativo) y para la SFR2 (vector rojo corto, que indica que el índice de asimetría no es significativo).

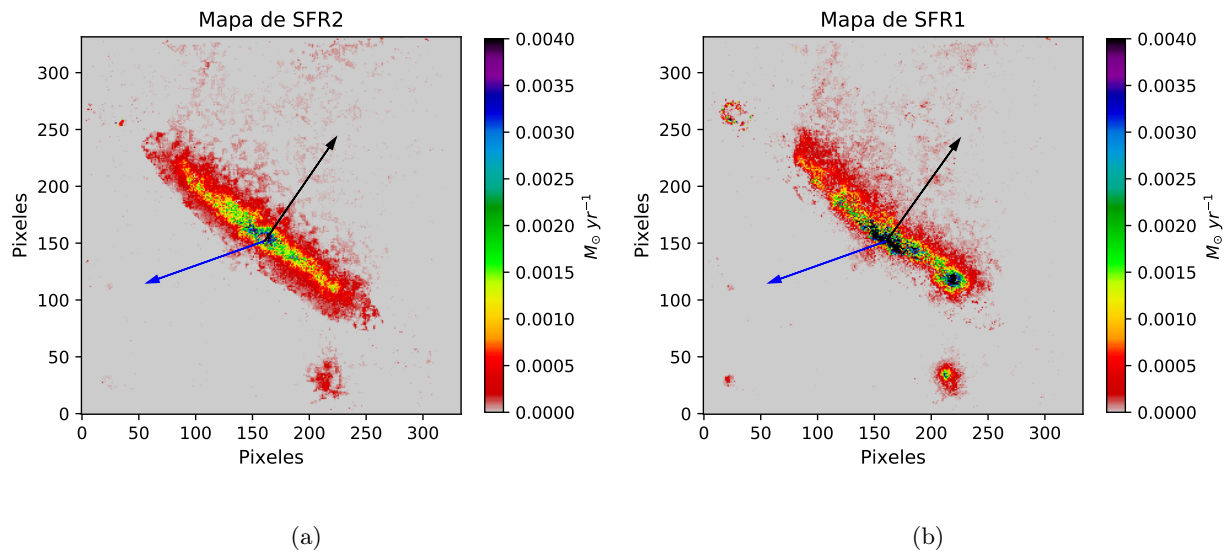


Figura 3.11: La figura (a) muestra el mapa de SFR en el segundo bin de tiempo y la figura (b) muestra el mapa de SFR de la época actual. El vector azul indica hacia dónde está el centro del cúmulo y el vector negro señala la dirección encontrado para la galaxia JO147.

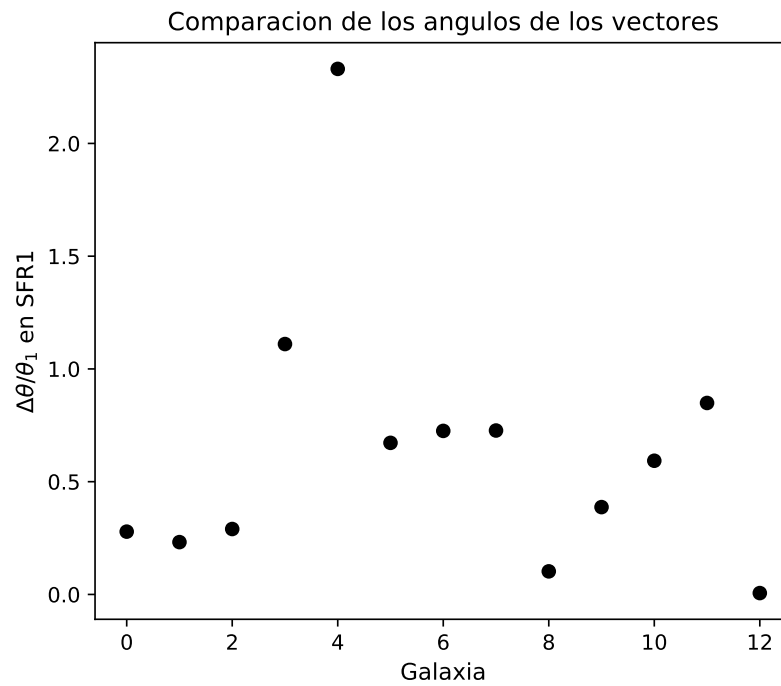


Figura 3.12: Comparación de los ángulos obtenidos con el índice de asimetría y de los ángulos a los cuales los vectores apuntan a la BCG en SFR1.

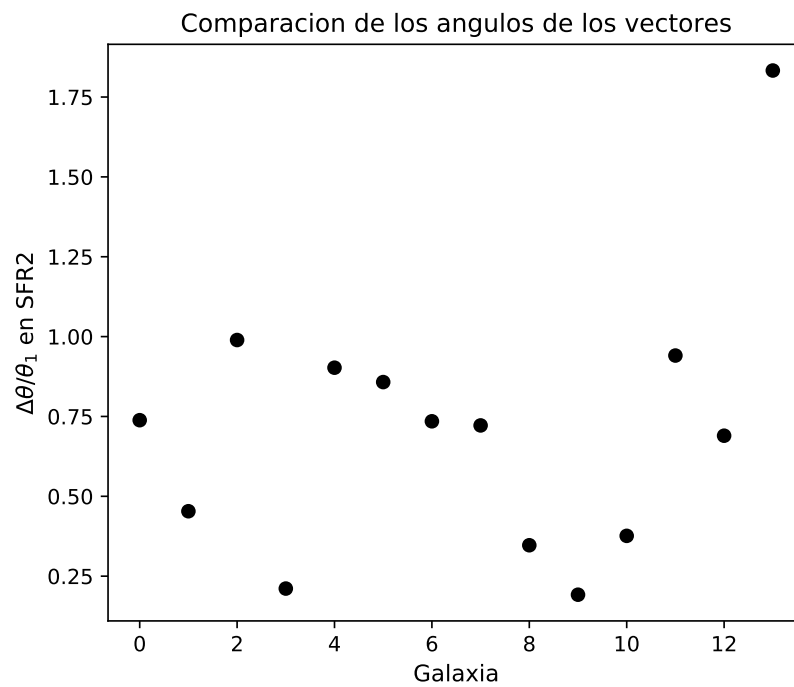


Figura 3.13: Comparación de los ángulos obtenidos con el índice de asimetría y de los ángulos a los cuales los vectores apuntan a la BCG en SFR2.

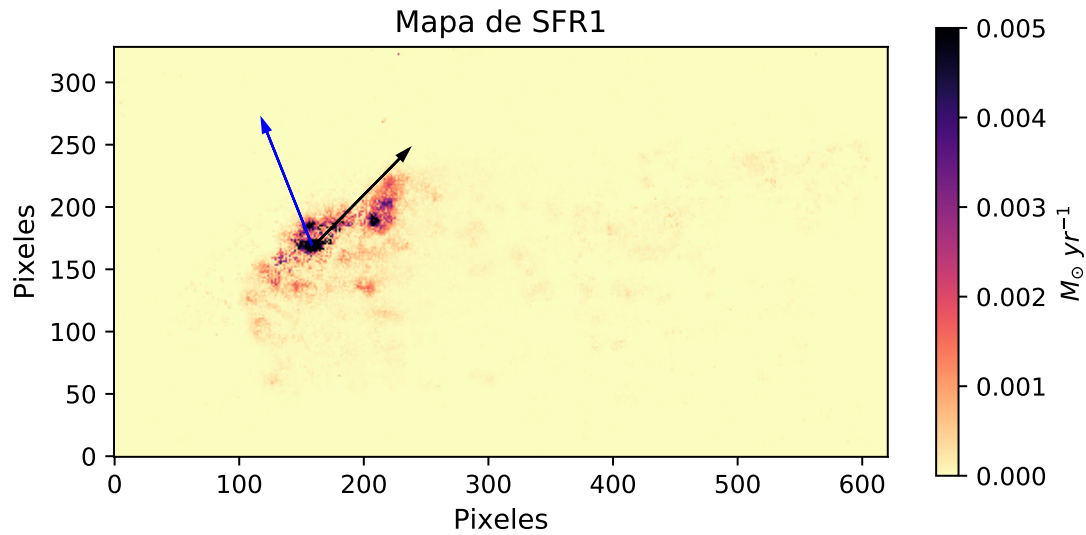


Figura 3.14: Mapa de SFR1 de JO206. Se aprecia el vector de movimiento (en color negro) dado el índice de asimetría y el vector que apunta a la BCG (en color azul).

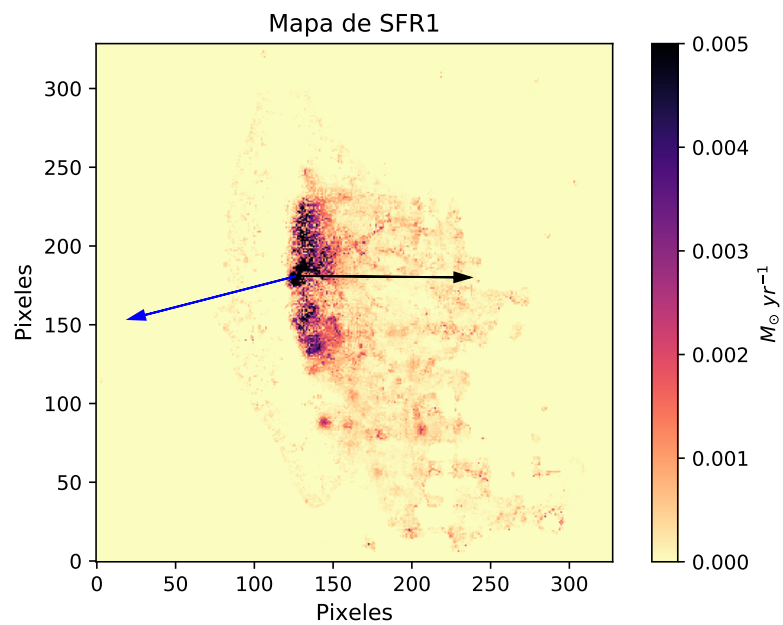


Figura 3.15: Mapa de SFR1 de JW100. Se aprecia el vector de movimiento (en color negro) dado el índice de asimetría y el vector que apunta a la BCG (en color azul).

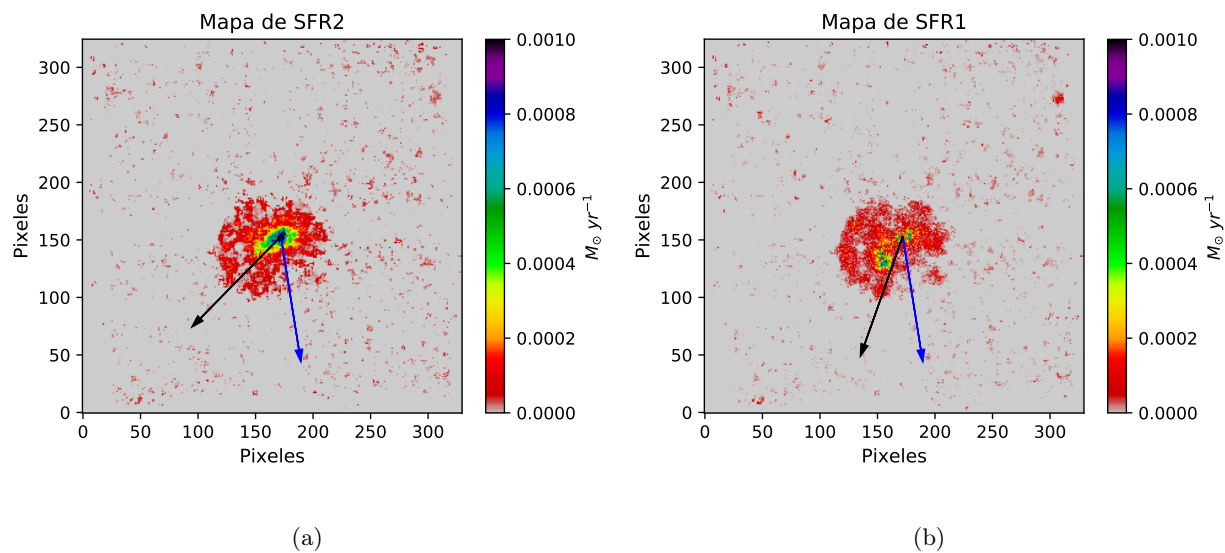


Figura 3.16: La figura (a) representa el mapa de SFR actual de JO153. La figura (b) muestra el mapa de SFR de la segunda época cósmica más reciente. El vector de movimiento está en color negro y el vector que apunta al centro del cúmulo aparece en color azul.

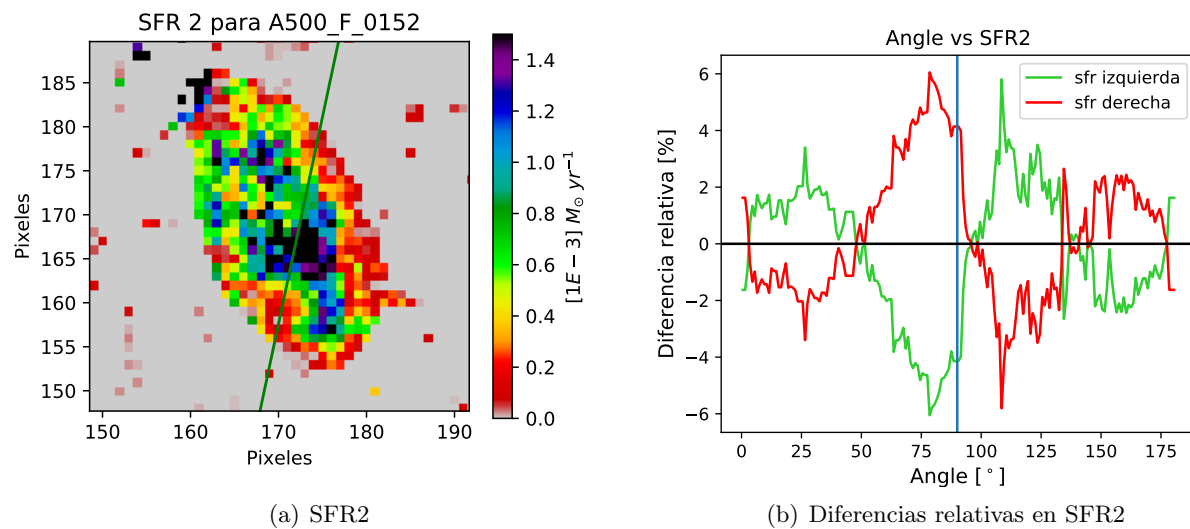


Figura 3.17: Mapa de SFR2 y gráfica de diferencias relativas para la galaxia A500_F_0152.

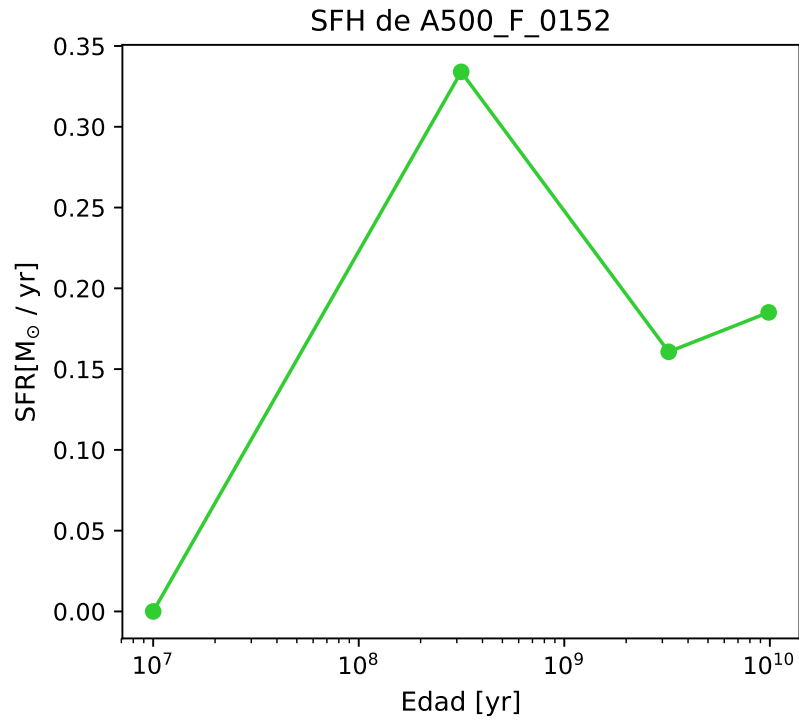


Figura 3.18: En esta gráfica se muestra la SFH de A500_F_0152 de derecha a izquierda se tienen los valores de SFR desde el bin de tiempo más viejo hasta el más reciente.

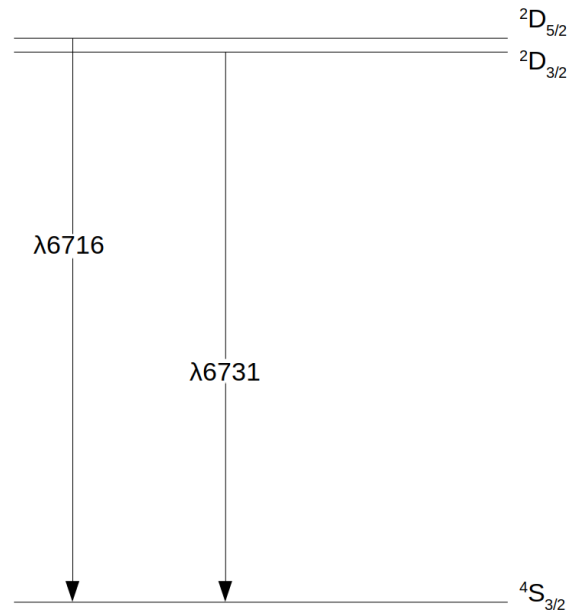


Figura 3.19: Representación de la generación del "doblete" de azufre.

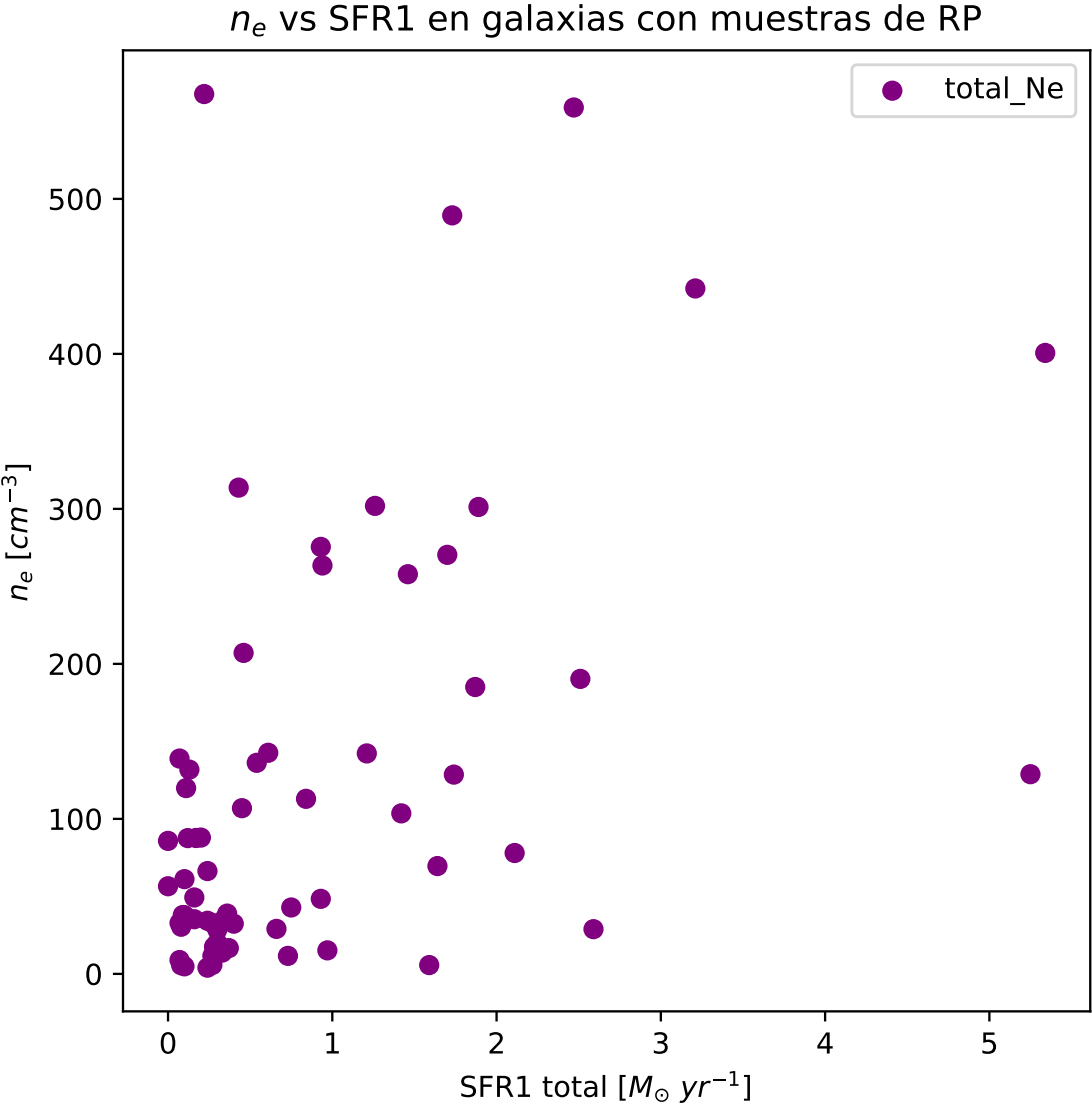


Figura 3.20: Densidad electrónica vs SFR1 para las galaxias medusas de la muestra GASP.

Capítulo 4

Comparación con las galaxias de cúmulo

En este capítulo vamos a intentar una comparación directa de las galaxias en la muestra de GASP y las galaxias de cúmulo. Previamente se han realizado comparaciones de este tipo entre algunas propiedades de éstas galaxias medusas contra algunas galaxias de cúmulos sin evidencias de interacción: principalmente la SFR vs Masa en las galaxias medusa y las galaxias de la muestra de control de GASP (objetos sin evidencias de interacciones). Con esta comparación hecha por Vulcani et al. (2018), se encontró que hay un incremento considerable de sSFR en las galaxias medusas en comparación con las galaxias “normales” y que este incremento es aún mayor en etapas intermedias del despojo de gas interestelar.

En trabajos como el que se acaba de mencionar, la comparación entre la tasa de formación estelar de los dos tipos de galaxias, se hizo exclusivamente dentro de la muestra de GASP. Esto tiene la ventaja de que se estuvieron comparando galaxias observadas con la misma técnica, el mismo instrumento y, además, los dos grupos de galaxias fueron precisamente seleccionados uno por tener evidencias de interacción por presión de barrido y el otro por no tener evidencia clara de algún tipo de interacción. Por el otro lado, aunque la muestra de control observada por el programa GASP es una colección de galaxias con parámetros físicos parecidos a la muestra de galaxias medusa, el número de galaxias a comparar es pequeño, más aún si consideramos que algunas de éstas no tienen formación estelar activa. Por esta razón se decidió intentar una comparación con todas las galaxias en las muestras de WINGS y OmegaWINGS. Al hacer ésto estamos conscientes de que hay algo importante que considerar: los espectros de las dos muestras son espectros de fibra (ver Capítulo 2), y entonces muestran solamente la parte central de esas galaxias. Por esa razón, todas las propiedades de las poblaciones estelares que se puedan derivar del análisis de estos espectros, nos van a decir algo nada más de una porción de las galaxias.

Los espectros de las dos muestras se han analizado con el código de ajuste espectral SINOPSIS (Fritz et al., 2007), para poder derivar masa estelar, historia de formación estelar, edades promedio y extinción por el polvo. Mientras que, por un lado, Fritz et al. (2007) demostraron que es posible derivar valores de masa estelar total confiables, aplicando unas correcciones por apertura a los resultados de los espectros de fibras, el asunto puede ser más complicado con respecto a la formación estelar reciente (ver por ejemplo Lin et al., 2017), ya que las correcciones por efectos de apertura pueden llevarnos a una comparación sesgada. Por eso se decidió llevar a cabo una comparación simulando espectros de fibra, a partir de los datos de MUSE, tomándolos en una apertura de posición y tamaño igual a las de los espectros de WINGS y OmegaWINGS.

De este modo, se realizó un estudio en el que se intentó tomar en cuenta los espectros de todas estas galaxias en un área de apertura localizada en el centro de la galaxia que cubre aproximadamente

1.3 arcsec. Para obtener las características de las poblaciones estelares de estos espectros se ha utilizado SINOPSIS en las galaxias de las tres muestras: GASP, WINGS y OmegaWINGS. De esta manera se puede hacer una comparación más fiable de las propiedades de estas galaxias de cúmulos y de las galaxias medusas de GASP a pesar de que las muestras fueron observadas de manera diferente.

Entonces, para poder realizar las comparaciones entre estas muestras se utiliza el espectro calculado de la región central de los datos de IFU de las galaxias medusa y por otro lado, el espectro de las galaxias de WINGS abarcado por la fibra óptica. El área tomada en cuenta para trabajar con los espectros de las galaxias observadas por MUSE@VLT fue de 6×6 spaxels y mediante el uso de SINOPSIS se derivaron las propiedades de las galaxias. Obteniendo estos datos puede llevarse a cabo una comparación lo más homogénea posible entre estas muestras de galaxias, que vamos a presentar en lo que sigue.

4.1. Comparación de la tasa de formación estelar específica

Primero vamos a comparar la relación entre tasa de formación estelar específica (sSFR, por sus siglas en inglés) y masa, las dos cantidades calculadas dentro de la apertura. En la figura 4.1, se puede ver esta relación para las galaxias de cúmulos en general (puntos verdes), y para las galaxias clasificadas como medusa de la muestra GASP (estrellas rojas). Sus ajustes lineares se grafican en colores negro y guinda, respectivamente. Las líneas de ajuste de ambas muestras de galaxias se cruzan a masas menores y se alejan a masas mayores. Para calcular los valores de SFR se aprovechó del hecho que los modelos de poblaciones estelares utilizado por SINOPSIS incluyen, para las poblaciones más jóvenes (edad 2×10^7 años), las líneas nebulares en emisión, calculadas para condiciones típicas de las regiones de formación estelar. Estas líneas en los espectros observados se ajustan con los modelos, proporcionando así los valores de la tasa de formación estelar y de la extinción por el polvo en las poblaciones más jóvenes (cabe resaltar aquí que una comparación de la SFR calculada por $H\alpha$ y por SINOPSIS dan resultados bastante parecidos). La resolución espectral de los datos WINGS y Omega/WINGS, no permite en general separar, por lo menos de forma automática, la emisión de las líneas del [NII] (a 6548 y 6584 Å) de la línea de $H\alpha$. Por eso en la medida de la línea de $H\alpha$ se aplicó una corrección de un factor de 0.3, para tomar en cuenta el flujo de las otras dos líneas. Sin embargo, este factor es un límite inferior a la contribución al flujo total por las líneas del nitrógeno, así que la tasa de formación estelar también es un límite superior al valor verdadero.

A pesar del gran número de galaxias de cúmulo para las cuales la tasa de formación estelar es más alta que la que se encontró en las galaxias medusa, se puede ver cómo en promedio éstas forman más estrellas con respecto a sus contrapartes no identificadas como JF. Esto es evidencia, como ya se ha analizado en otros trabajos de la serie de GASP (Poggianti et al., 2016; Vulcani et al., 2018), de que estas galaxias sí están formando estrellas a una tasa en promedio superior a la que se encuentra en las demás galaxias de cúmulos. También hay que notar que si estamos observando galaxias en las cuales se observen colas de gas ionizado, quiere decir que la interacción con el medio intra-cúmulo ya remonta a una época más remota con respecto a la que se refiere a la tasa de formación estelar reciente ($\sim 10^7$ años). Sobre todo para esas galaxias con colas más evidentes y largas es muy probable que estemos observando la fase subsecuente al pico del brote de formación estelar, que ya va disminuyendo debido al efecto de despojo de gas de la galaxia.

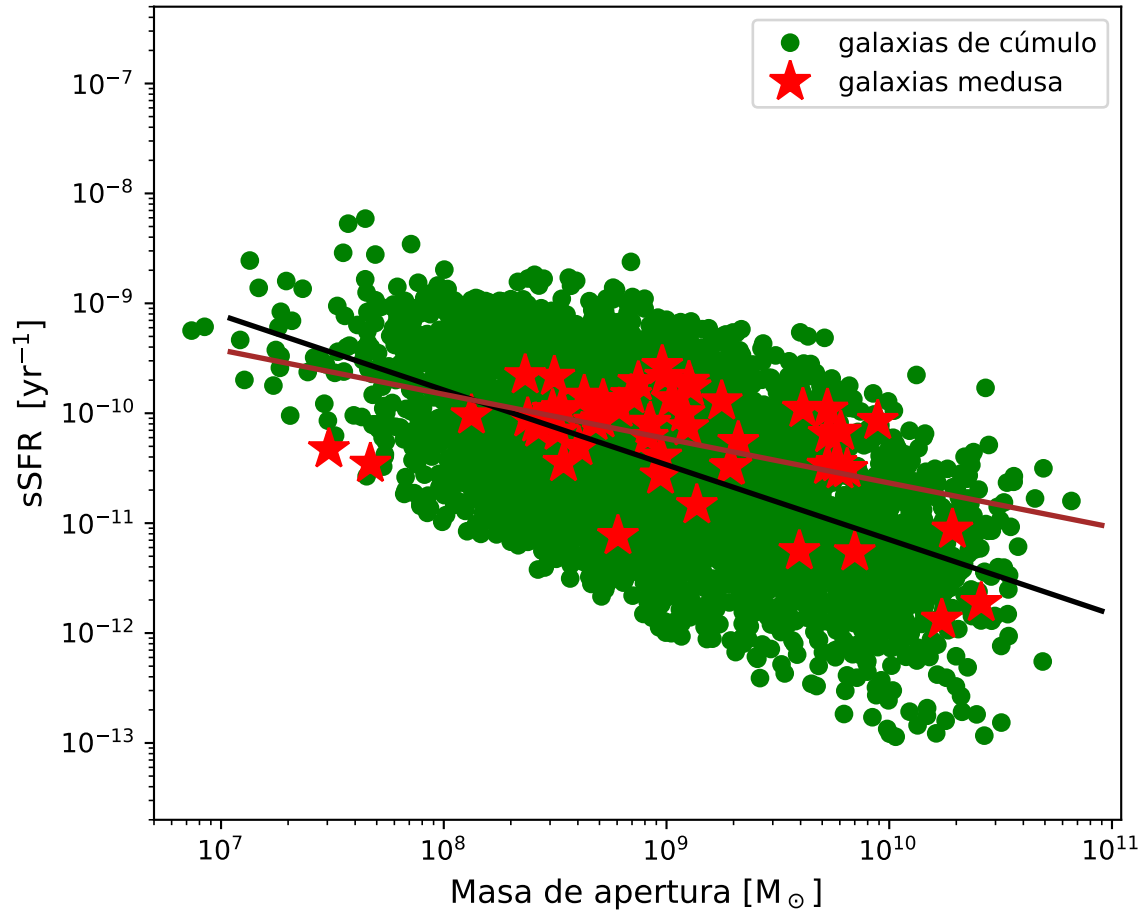


Figura 4.1: Relación entre sSFR y masa para las galaxias de WINGS y OmegaWINGS (puntos verdes) y las galaxias clasificadas en algún estadio de “stripping” (estrellas rojas). Para éstas últimas no se tomaron en cuenta galaxias con evidencias de AGN en su interior. Las dos líneas representan ajustes lineales a los dos conjuntos de puntos. Los valores que se están comparando se obtuvieron corriendo SINOPSIS tomando en cuenta regiones de apertura en el centro de cada galaxia para tener una mejor comparación entre las muestras.

4.2. Comparación de la historia de formación estelar

Como se hizo notar antes, el hecho de que en estas galaxias se estén observando colas de gas ionizado hace pensar que la interacción del gas intracúmulo con el gas de la galaxia haya empezado ya en épocas anteriores. Es decir, se espera que las primeras estrellas formadas por esta interacción tengan edades mayores a $10 - 20 \times 10^6$ años, que es el tiempo típico de vida para estrellas con un espectro tal que pueda ionizar el gas de forma considerable. Por esto es interesante analizar y comparar las historias de formación estelar de las galaxias de WINGS/OmegaWINGS con las de las galaxias de GASP que presentan señas de RP. Analizando los espectros calculados en las partes centrales de las galaxias, aunque de forma rápida y visual, se puede notar en las mayorías

de ellos una fuerte componente en absorción en la línea de $H\beta$, casi siempre acompañada por una componente en emisión también, como se ilustra en la figura 4.2. El hecho de observar una absorción tan evidente y fuerte en esta línea, se debe a la presencia consistente de una población de estrellas de tipo espectral “A”, en donde la intensidad de las líneas de absorción del hidrógeno de la serie de Balmer es la mas intensa. Esto ya nos da indicios de que sí hubo un brote de formación estelar hace 300 – 600 millones de años, que es el tiempo de vida típico de esta clase de estrellas.

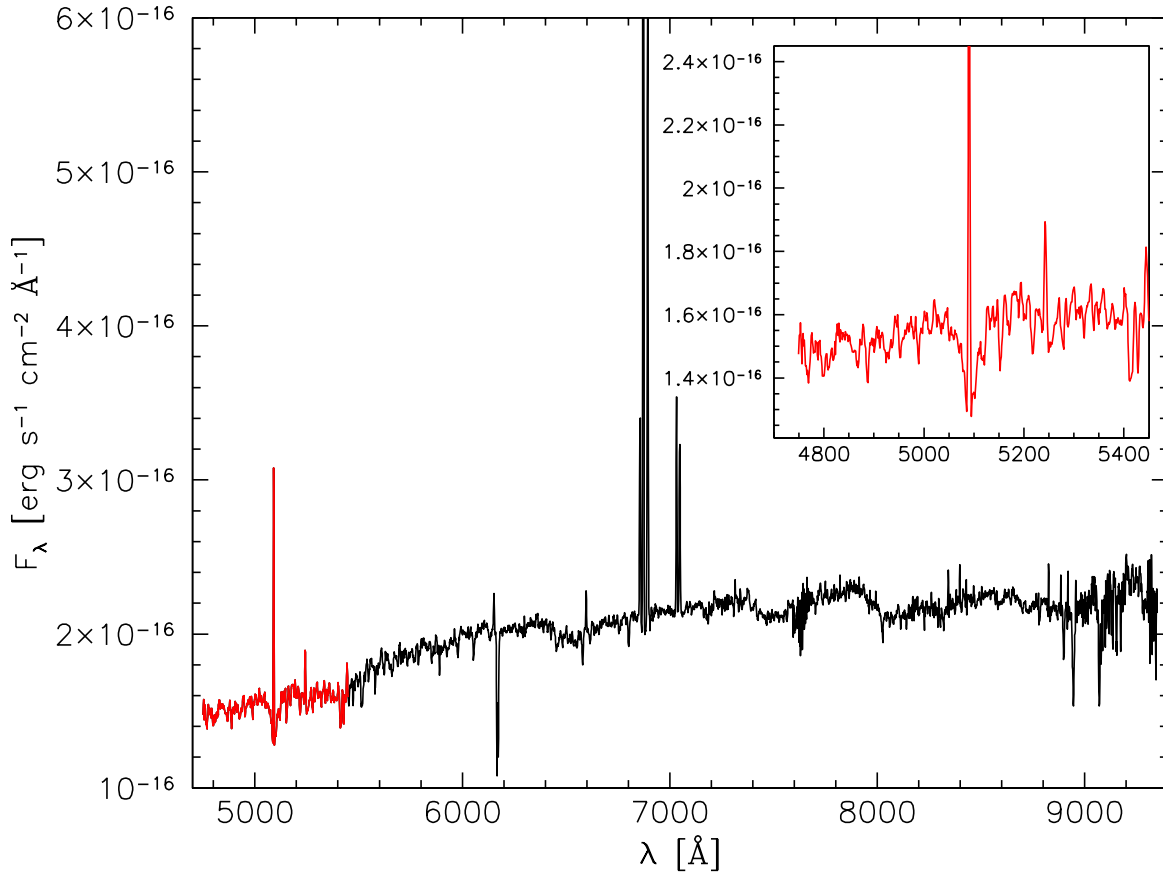


Figura 4.2: Espectro de la galaxia JO10. Se observa una fuerte componente en absorción en la línea de $H\beta$ debido a la presencia de estrellas de tipo espectral “A”.

Además de comparar la tasa de formación estelar reciente, hemos utilizado los resultados de SINOPSIS para comparar la historia de formación estelar en cuatro épocas cósmicas, tanto de las galaxias medusas como de las del cúmulo, comparación que se reporta en la figura 4.3. Las estrellas rojas representan galaxias de GASP que tienen muestras de desprendimiento de gas y los puntos de colores son galaxias de cúmulo pertenecientes a las muestras WINGS y OmegaWINGS. Las líneas guía son el ajuste lineal a los valores para las galaxias medusas y las otras líneas son los ajustes para los puntos de las galaxias de cúmulo.

El análisis de esta gráfica nos muestra que las galaxias medusa tienen, en promedio, un valor de SFR más alto con respecto a las galaxias del cúmulo y esto se aprecia en la separación de las líneas de ajuste de ambos tipos de galaxias, ya que el ajuste de las galaxias medusas está por arriba del ajuste de las galaxias de cúmulo. Esto ya se había notado en la relación entre sSFR y masa, como se vio en la figura 4.1. Las líneas de ajuste tienden a cruzarse a valores de masa más bajos pero se

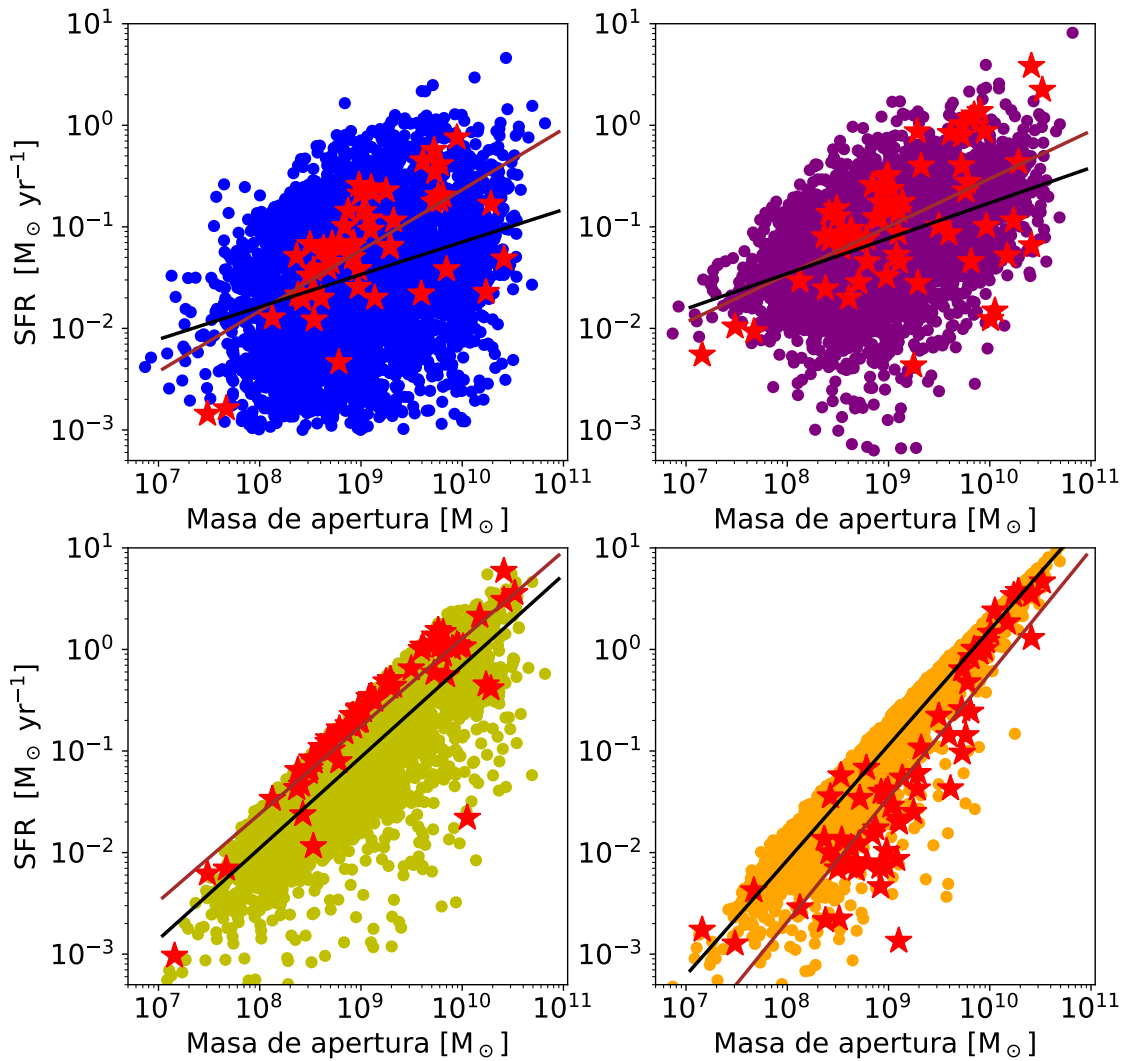


Figura 4.3: SFR como función de la masa en cuatro intervalos de tiempo. Los puntos de colores representan galaxias del cúmulo y los círculos negros simbolizan las galaxias medusas de la muestra GASP.

separan a valores altos de masa: esta dependencia de la diferencia con la masa estelar podría ser causada por la presencia de la masa de gas en la galaxia antes de que cayera al cúmulo.

Este efecto en el que la SFR de las galaxias medusa es mayor a la de las galaxias de cúmulo se aprecia también en la segunda gráfica, en donde se ve también algunas galaxias con valores extremos y otras por debajo de la relación promedia de las galaxias de cúmulo. Sin embargo hay varias galaxias de la muestra de GASP que tienen valores por arriba de las mayoría de las galaxias “normales”. Esto está en sintonía con el momento en el que las galaxias medusas tuvieron su primer interacción con el cúmulo, pues es en esta época donde se da el primer encuentro de las galaxias

medusas y los cúmulos, así que estos altos valores en la SFR son debidos a los efectos de la presión hidrodinámica entre el gas intra-cumular y el gas interestelar de las galaxias.

En la tercera gráfica se nota que la distribución de galaxias medusas se comienza a parecer a la de las galaxias de cúmulo. Sin embargo, la SFR de las primeras es notoriamente mayor, ya que la diferencia entre las dos muestras es prácticamente constante a lo largo de todo el rango de masas. La mayoría de las galaxias medusa se encuentra por encima del promedio de la muestra de galaxias de cúmulo y de la muestra de galaxias medusas en sí, es decir, por arriba de la línea de ajuste guinda.

Ahora, analizando la cuarta gráfica, se aprecia que los valores de SFR de las galaxias medusa es, en promedio, menor a los de las galaxias de cúmulo: la línea de ajuste de las galaxias de la muestra GASP está por debajo de la línea de ajuste de las galaxias de WINGS y OmegaWINGS. Esto puede deberse al efecto de degeneración entre las edades de las poblaciones estelares: las características de las poblaciones estelares varían según las edades, pero siguiendo una escala logarítmica. Así que, comparando espectros ópticos, resulta mas difícil distinguir entre dos poblaciones estelares "viejas" con respecto a dos, mas cercanas en edad, pero jóvenes. Creemos que estas diferencias son causada precisamente por un efecto de degeneración entre las dos poblaciones mas viejas. Además, las líneas de $H\beta$ tan intensa en absorción pueden ser las que determinan este resultado, pesando mas la importancia de esas poblaciones en el modelo final.

Ahora bien, estos efectos pueden notarse más analizando la distribución de los valores de SFR de las galaxias, como puede verse en las gráficas de la Fig. 4.4. Ahí se observan mediante histogramas las distribuciones de ambas muestras de galaxias: la muestra de galaxias de cúmulo, marcadas con una línea continua azul, y las galaxias medusas de la muestra GASP, marcadas con una línea continua roja. Se puede ver el número normalizado de galaxias con cierto valor de SFR a determinado intervalo de tiempo.

En el primer bin de edad los valores de los máximos en las distribuciones de ambas muestras corresponden a valores de $\log(\text{SFR})$ un poco similares (entre -1.5 y -0.5), aunque el número de cuentas entre ambas muestras está muy alejado entre sí. Por otro lado, en el segundo bin, cuyo intervalo de tiempo correspondiente para las edades de las galaxias va de 2×10^7 a 5.7×10^8 años, el número de cuentas entre las galaxias medusa y de cúmulo es muy parecida en los valores máximos de SFR, ubicados en el mismo rango de SFR. Por otro lado, las distribuciones se comportan de manera muy similar en el tercer bin de edad, coincidiendo los máximos de las muestras en el mismo rango de SFR y acercándose el número de cuentas de ambas distribuciones. Finalmente, las distribuciones de galaxias difieren significativamente en el bin de tiempo más viejo: hay diferencias no sólo cerca de los máximos, sino en toda la distribución en general.

Para que la comparación tenga un significado estadístico más correcto, hay que tomar en cuenta el hecho de que la muestra espectroscópica de las galaxias de cúmulo fue derivada a su vez de una muestra seleccionada fotométricamente. De esta muestra es más probable que se observen en espectroscopía las galaxias más brillantes y, al no tomar en cuenta este asunto podríamos derivar conclusiones equivocadas sobre las propiedades de las galaxias, aún utilizando una muestra limitada en flujo. Además, hay que notar que los espectros tanto de WINGS como de OmegaWINGS son espectros de fibra y que, al decidir cuales galaxias observar, se tuvo que limitar el número de éstas en las partes centrales de los cúmulos, las más densas en galaxias, por problemas técnicos al no poder poner físicamente demasiadas fibras en el mismo lugar. Ambos asuntos se pueden corregir de forma estadística tomando en cuenta la completitud. La definición de completitud como función de la magnitud es:

$$C(m) = \frac{N_z}{N_{ph}}(m), \quad (4.1)$$

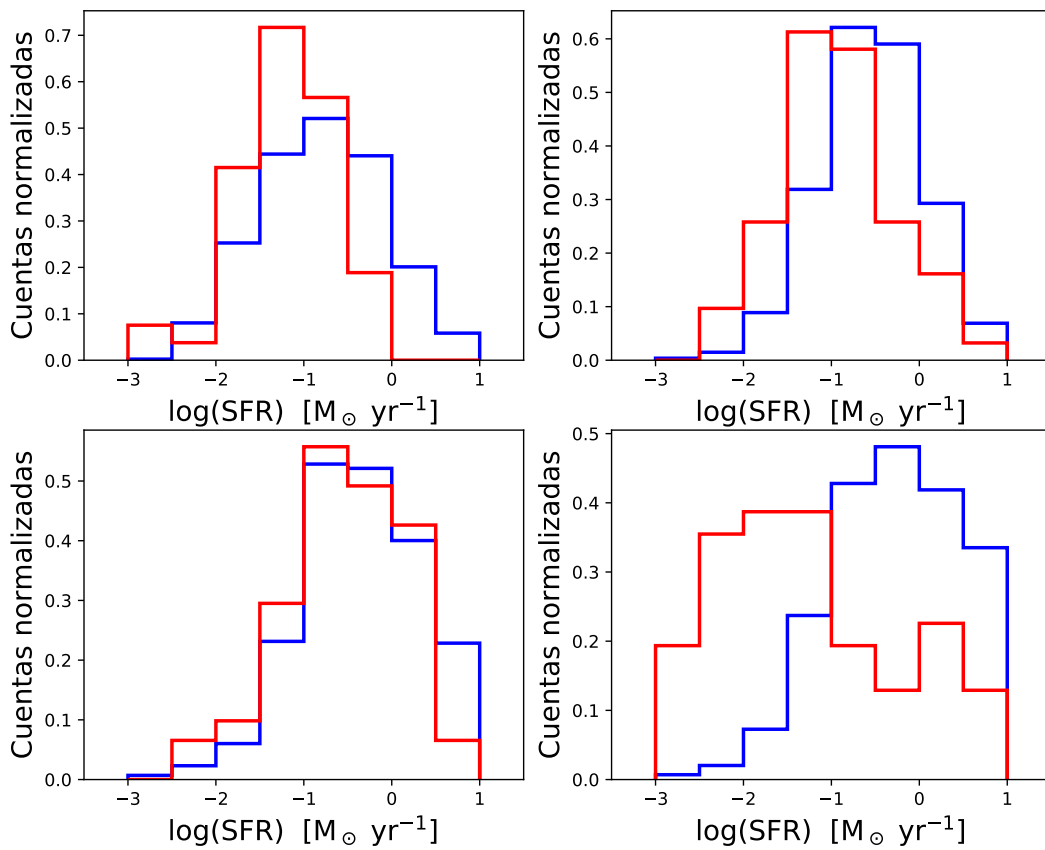


Figura 4.4: Comparación de las muestras WINGS y GASP respecto al número de galaxias con cierta SFR a un intervalo de tiempo determinado.

donde “ N_z ” es el número de galaxias con corrimiento al rojo medido (o sea galaxias de la muestra espectroscópica) y “ N_{ph} ” es el número de galaxias en el catálogo fotométrico principal tomando en cuenta los cortes en color y magnitud para cada bin de magnitud m dado (Cava, A. et al., 2009). La completitud en magnitud se refiere a que esta función decrece con al magnitud porque en las observaciones se les da prioridad a los objetos más brillantes, esto se debe a que algunas galaxias con ciertas distancias y magnitudes aparentes son más débiles y no se alcanzan a detectar, dependiendo del límite del flujo del instrumento; por su parte, la completitud geométrica está relacionada con la falta de detecciones de galaxias debido a la acumulación de las fibras. Para calcular la completitud de estas dos muestras de galaxias de cúmulos se tomaron de cada una las galaxias que son miembros de cúmulos, luego se hizo la multiplicación del peso geométrico (radial) por el peso de magnitud, así, este producto representa el peso total para cada galaxia.

La figura 4.5 muestra los histogramas con la distribución de SFR en los cuatro bins de tiempo comparando las galaxias medusa de la muestra GASP y las galaxias de cúmulo. Estos valores están pesados por completitud geométrica y magnitud, tomando en cuenta la masa total de cada galaxia dentro de cierta apertura cuya distribución es similar, por la misma construcción de la muestra de

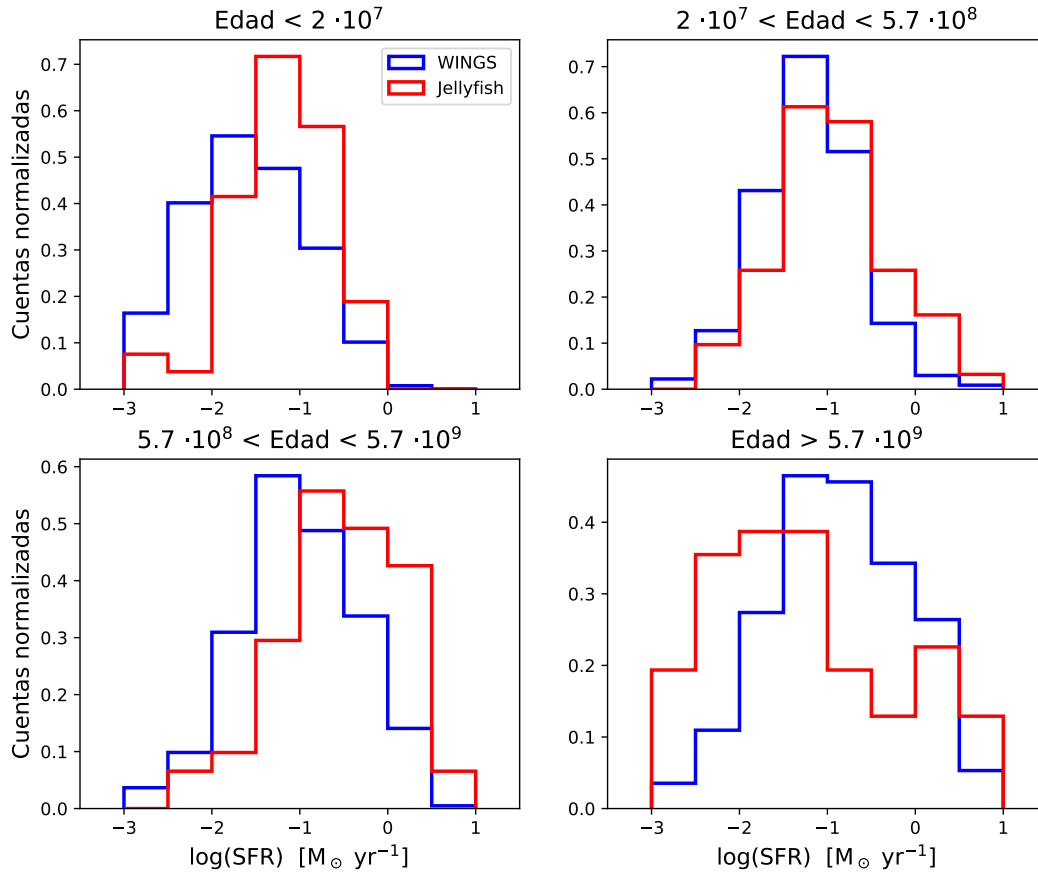


Figura 4.5: Comparación de las distribuciones de SFR en los cuatro bins de edad, para galaxias con RP y galaxias de cúmulo. Los valores en cada bin de SFR están pesados por completitud geométrica y en magnitud, y los histogramas están además normalizados al número de galaxias con cierta SFR a un intervalo de tiempo determinado.

GASP, para ambos tipos de galaxias. En el cuarto bin de edad, que representa la época más antigua, los máximos en las distribuciones de ambas muestras están muy separados entre sí. En cambio, las distribuciones se comportan de manera similar en los tres bins de edad más recientes.

Para las galaxias de WINGS y OmegaWINGS se extrapoló la masa de fibra de cada galaxia, reescalándola al flujo total en la banda V. A pesar de que ésto podría depender de gradientes de color (y, por lo tanto, de las poblaciones estelares), se han comparado las masas totales de una submuestra de galaxias de WINGS con una muestra coincidente de galaxias SLOAN (galaxias de WINGS observadas por SDSS), mostrando un muy buen acuerdo (Fritz et al., 2011).

Ahora las distribuciones del bin 1 y 2 son muy distintas, especialmente en el bin 2, mientras que en el bin 3 todavía se nota un poco la diferencia, pero en el bin 4 ambas distribuciones son prácticamente iguales.

En este caso puede verse que la distribución de las galaxias medusas tiende a desplazarse hacia

valores de SFR más altos que la distribución de galaxias de cúmulo en los tres bins de tiempo más jóvenes. Entonces, vemos que la completitud es importante y hay que tomarla en cuenta. Mas aún, se nota que la diferencia entre ambas distribuciones está más marcada en las dos épocas cósmicas más recientes y las distribuciones tienden a ser más parecidas entre sí en los bins de tiempo más viejos). Esto concuerda con el hecho de que el segundo bin representa al intervalo de tiempo en el cual cada galaxia medusa tuvo su primera interacción con el medio intracumular, y nos habla del momento en que las galaxias de la muestra GASP sufren los efectos debidos a la SFR a diferencia de las galaxias de las muestras WINGS y OmegaWINGS.

Capítulo 5

Interpretación de resultados

En el primer capítulo vimos cómo se utilizaron simulaciones hidrodinámicas de galaxias moviéndose con una cierta velocidad dentro de un medio de baja densidad, para entender los procesos físicos provocados por la presión de barrido y sus efectos en las propiedades del gas y en la formación estelar. Los resultados más importantes que hemos aprendido gracias a las simulaciones numéricas de galaxias medusa es la presencia de un doble efecto:

1. Por un lado la galaxia incrementa su tasa de formación estelar debido a la presión hidrodinámica que el gas intra-cumular caliente ejerce sobre el gas interestelar del disco galáctico: la densidad del gas incrementa en donde se da el choque entre estos gases provocando un aumento en la actividad de formación estelar en esta región.
2. Por otro lado, mientras la galaxia se aproxima al centro del cúmulo, va perdiendo su gas, pues es desprendido poco a poco por el mismo efecto de la presión hidrodinámica, dejando largas colas de escombros de material que pueden medir hasta 80 kpc y en donde puede haber formación estelar.

Además, se sabe que el efecto de la presión hidrodinámica depende de la fuerza de gravedad de la galaxia, de la velocidad que lleva y la densidad del medio y también se ha visto que la tasa de formación estelar también inducida es afectada por el ángulo de inclinación con el que la galaxia medusa está cayendo en el cúmulo. Cuando la galaxia se desplaza de canto, presenta una tasa de formación estelar más alta con respecto a cuando el "impacto" de la galaxia con el medio intra-cúmulo es de cara (Kronberger et al., 2008). Esto se debe a que si la galaxia se desplaza "de frente" la presión hidrodinámica actúa sobre todo el disco galáctico de igual manera y es más fácil arrancar el gas de éste. Pero si la galaxia se encuentra cayendo "de canto", el gas intra-cumular tiene que interactuar sobre una región más pequeña pero es más difícil que remueva el gas interestelar porque ahora será más gruesa la columna de gas involucrada en la interacción, es decir, se tendrán densidades más altas (Kronberger et al., 2008).

Hay otros resultados de simulaciones numéricas que nos muestran un incremento de SFR que corresponde un valor hasta dos veces más alto con respecto al que se tenía al momento del comienzo de la interacción (Fujita and Nagashima, 1999). En cambio, cuando la galaxia está más cerca del centro del cúmulo, la SFR decrece debido al otro efecto de la presión hidrodinámica, o sea al desprendimiento del gas que, por lo menos en algunas circunstancias, despoja totalmente el gas de la galaxia.

De acuerdo a los trabajos de Kapferer et al. (2009), el 95% de las estrellas nuevas formadas debido a los procesos de la presión hidrodinámica se forman en el disco galáctico, aunque también

pueden crearse en las colas de gas despojadas del disco y es común que las estrellas vuelvan a caer al disco estelar viejo formando una estructura parecida a un bulbo. Por su parte, Bekki (2013) muestra que la presión hidrodinámica puede aumentar la actividad de formación estelar en galaxias masivas ($10^{12} M_{\odot}$) pero frenarla en galaxias menos masivas ($10^{10} M_{\odot}$) en cúmulos de $10^{14} M_{\odot}$.

En este capítulo buscaremos dar una interpretación física al incremento en la tasa de formación estelar en galaxias que muestran evidencias de interacción hidrodinámica con el medio intra-cúmulo. Más en general, estudiaremos también la historia de formación estelar de estas galaxias, enfocándonos principalmente en la formación estelar relativamente reciente, intentando identificar posibles conexiones con propiedades de las galaxias o de los cúmulos. Estas se pueden identificar con características tales como la masa, la distancia al centro del cúmulo, la velocidad, la fase de desprendimiento del gas en la que se encuentran, el medio ambiente y la clasificación en base a la morfología de galaxias medusas. Como se describe a continuación, en ciertos bins de edad hay algunas dependencias de la SFR con las propiedades de las galaxias.

En todos los casos que se estudian a continuación, para la época cósmica más reciente se toma en cuenta la SFR1 total calculada con la emisión de $H\alpha$ (ver sección 3.2), mientras que para los otros intervalos de tiempo se utilizan los resultados de SINOPSIS (ver capítulo 3, sección 3.4). Esto nos permite tomar en cuenta nada más aquellos pixeles que contribuyen a la emisión de las líneas únicamente por procesos que sean de formación estelar y, además, también permite una comparación más homogénea con la literatura que utiliza esa metodología, muy común, para el cálculo de la SFR. Sin embargo, averiguamos que hay diferencias muy pequeñas entre los valores para la SFR1 obtenidos con con ambos métodos, así que los cambios que se obtendrían al utilizar los resultados de SINOPSIS para la SFR actual serían muy pocos (en esos casos en donde hay emisión de líneas por puros procesos de formación estelar). Cabe mencionar que todos los valores de SFR utilizados en este capítulo, se obtuvieron sumando los valores de cada pixel, dentro del disco definido como en el capítulo 3.

5.1. Dependencias en la masa estelar

Unas de las propiedades que más afecta la historia de formación estelar de una galaxia es su masa estelar. Esto se ha observado en varios trabajos (se vean por ejemplo Popesso et al., 2019; Elbaz et al., 2018) y es una relación que se conoce como secuencia principal de la formación estelar. A continuación se analizará la historia de formación estelar de galaxias con evidencias de interacciones, en función de la masa. Para hacer esto, dividimos la muestra en cinco bins de masa, y graficamos la tasa de formación estelar promedio en las cuatro épocas principales, como se puede observar en la figura 5.1.

En primer lugar, vamos a observar que las galaxias más masivas tienen el valor de SFR más alto a (casi) todas las épocas cósmicas. Esto es muy probablemente un efecto relacionado con la masa total de las galaxias, en donde vemos que, para tener la masa que tienen ahora las galaxias, las más masivas debieron obviamente formar estrellas con una tasa más alta. A parte de este efecto tan obvio, es posible ver que la relación entre las tasas de formación estelar en las cuatro épocas depende del bin de masa estelar en que se encuentre una galaxia. Es decir, hay una tendencia muy clara en la forma en que varían la tasa de formación estelar a distintos tiempos cósmicos, que se observa a distintas masas. Observamos que hay una disminución de la SFH del bin 4 al bin 3 en todos los intervalos de masa, con excepción de los dos menos masivos, para los cuales hay un comportamiento consistente con una SFR plana a estas épocas. Por otro lado, hay un incremento en la SFH del bin 3 al bin 2 en todos los intervalos de masas, con excepción del bin mas masivo, en donde se observa una disminución que prácticamente abarca toda la vida de la galaxia. La intensidad del incremento

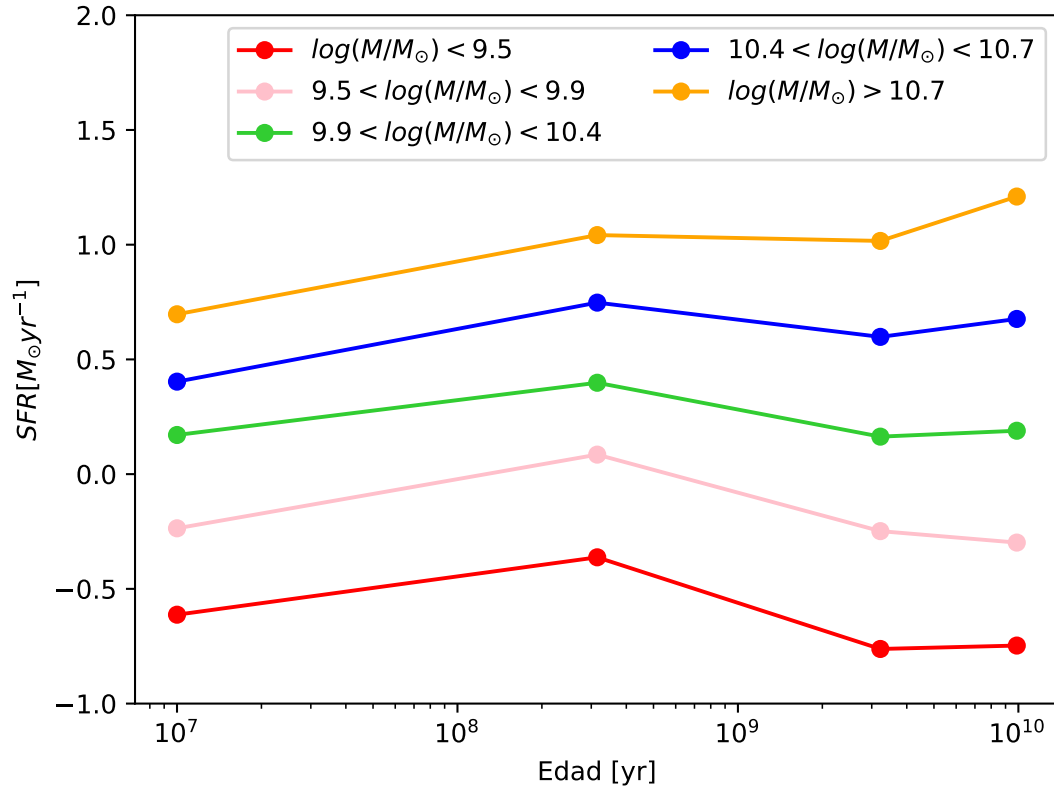


Figura 5.1: SFH de las galaxias de GASP dependiendo de la masa.

es inversamente proporcional a la masa estelar. Para todas las galaxias hay un decremento en la tasa de formación estelar más reciente. En la tabla 5.1 se muestran los valores promedio de los valores de SFR y de los cocientes de estos valores entre cada dos épocas diferentes contiguas.

Clase de galaxia de acuerdo a su masa	SFR1	SFR2	SFR3	SFR4	SFR2 / SFR1	SFR3 / SFR2	SFR4 / SFR3
$\log(M/M_\odot) \leq 9.5$	0.24	0.43	0.17	0.18	1.78	0.40	1.03
$9.5 \leq \log(M/M_\odot) \leq 10$	0.64	1.40	0.68	0.67	2.21	0.49	0.98
$10 \leq \log(M/M_\odot) \leq 10.5$	2.20	3.63	2.08	2.36	1.65	0.57	1.13
$10.5 \leq \log(M/M_\odot) \leq 11$	4.01	7.93	6.17	7.54	1.98	0.78	1.22
$\log(M/M_\odot) \geq 11$	3.64	12.34	14.89	27.49	3.39	1.21	1.84

Cuadro 5.1: SFR promedio para las galaxias en cada bin de masa estelar. También se muestran los cocientes de SFR entre cada dos épocas diferentes contiguas.

La primer clase de galaxias corresponde a las menos masivas y contiene 10 elementos. El número de galaxias para las siguientes clases (en orden ascendente en masa) es: 16, 16, 11 y 11.

Es posible apreciar este efecto aún más si normalizamos la SFH en los cinco rangos de masa al valor de la SFR de la edad mas vieja, tal como vemos en la figura 5.2. Claramente se ve que el mayor

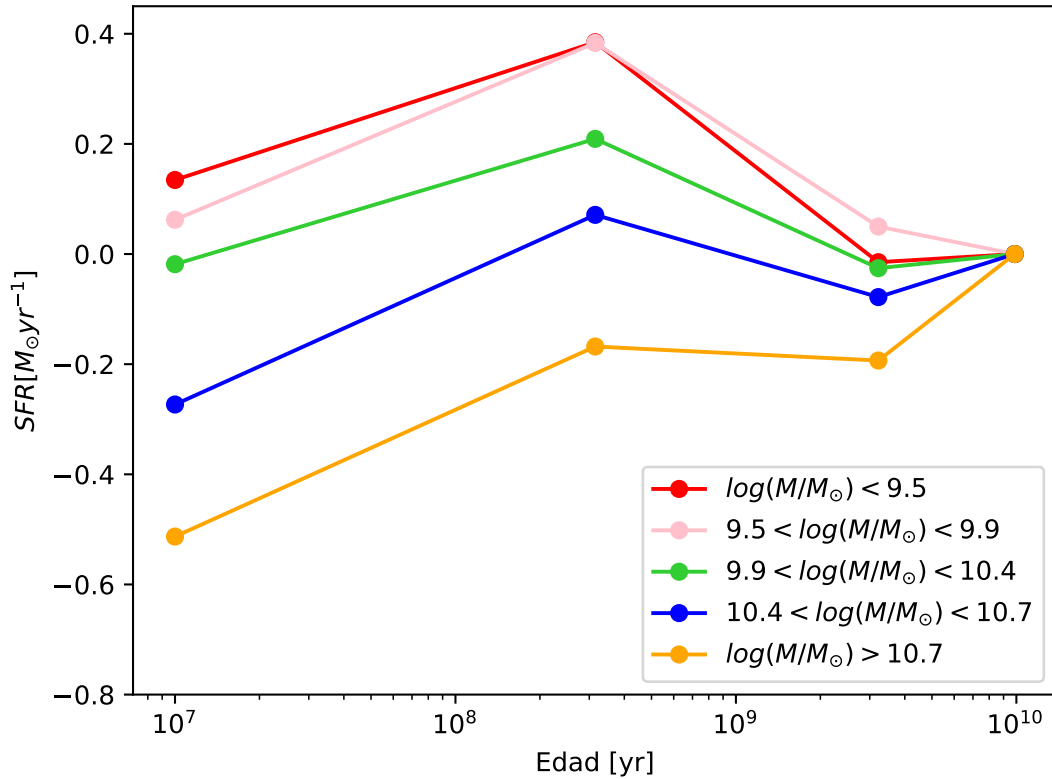


Figura 5.2: SFH normalizadas de las galaxias de GASP dependiendo de la masa.

incremento en la SFR se da en el segundo intervalo de tiempo para todos los rangos de masa, con excepción del grupo de galaxias más masivas en donde la pendiente entre bin3 y bin 2 es consistente con una tendencia plana (notamos también que en las galaxias más masivas esta tendencia es aún más extrema, con un decremento de SFR también entre el bin 3 y el bin 2).

Además de esto, queda en evidencia una secuencia muy clara con respecto a la masa, en la que podemos notar la gran intensidad del brote de formación estelar en el bin de edad 2. Mientras menor es la masa de la galaxia, mayor es la razón entre tasa de formación estelar de los bins 2 y 3. La interpretación que puede darse es que durante este intervalo de tiempo la galaxia medusa interactúa por primera vez con el medio intra-cumular que entonces coincidiría con el segundo bin de tiempo correspondiente a una época de entre 20 y ~ 600 millones de años, tal como se esquematiza en la figura 3.4.

Esto sugiere que la mayoría de las JF de la muestra de GASP se observan en un momento en que la formación estelar está evolucionando hacia una fase de apagado, después de haber tenido su primera interacción durante una época que va de 20 hasta 570 millones de años. En esta ocasión se pudo originar un evento de formación estelar, más o menos intenso, que se ve en nuestra reconstrucción de la SFH. Eso confirma lo que ya ha sido notado previamente por (Paccagnella et al., 2017): a bajo corrimiento al rojo, los brotes de formación estelar debidos a la presión hidrodinámica como consecuencia de la interacción de la galaxia con el medio intra-cumular se localiza mayormente en los sistemas de tipo tardío de baja masa, mientras que las galaxias más masivas son de tipo temprano y deficientes en gas (Mahajan, 2013).

5.2. Dependencias en la distancia proyectada del centro del cúmulo

Ahora se analizan las posibles dependencias de las SFH de las galaxias medusas distintos valores de la distancia al centro del cúmulo en la que se encuentran. Varios trabajos teóricos, utilizando simulaciones hidrodinámicas, han reportado una dependencia de la intensidad de la RP por la densidad del medio intracúmulo (Ramos-Martínez et al., 2018; Kronberger et al., 2008). Ésta aumenta hacia el centro de los cúmulos, así que es probable que galaxias que se encuentran en las partes mas interiores ya hayan experimentado el efecto de la RP durante una temporada más larga, y entonces la formación estelar se haya ido apagando.

En la gráfica de la izquierda de la figura 5.3 se puede observar la SFH de las galaxias medusa de la muestra GASP clasificándolas de acuerdo a la distancia proyectada al centro del cúmulo expresadas en unidades de radio virial de cada cúmulo, es decir, r/r_{200} . Se dividió la muestra en 4 bins de distancia proyectada, de tal manera que cada bin estuviera representado por el mismo número de galaxias (16 en cada bin). Así que tenemos subdivisiones a 0.48, 0.7 y 1.1. Los intervalos para tomar las clases de acuerdo a la distancia se hicieron tomando un número similar de objetos en cada una.

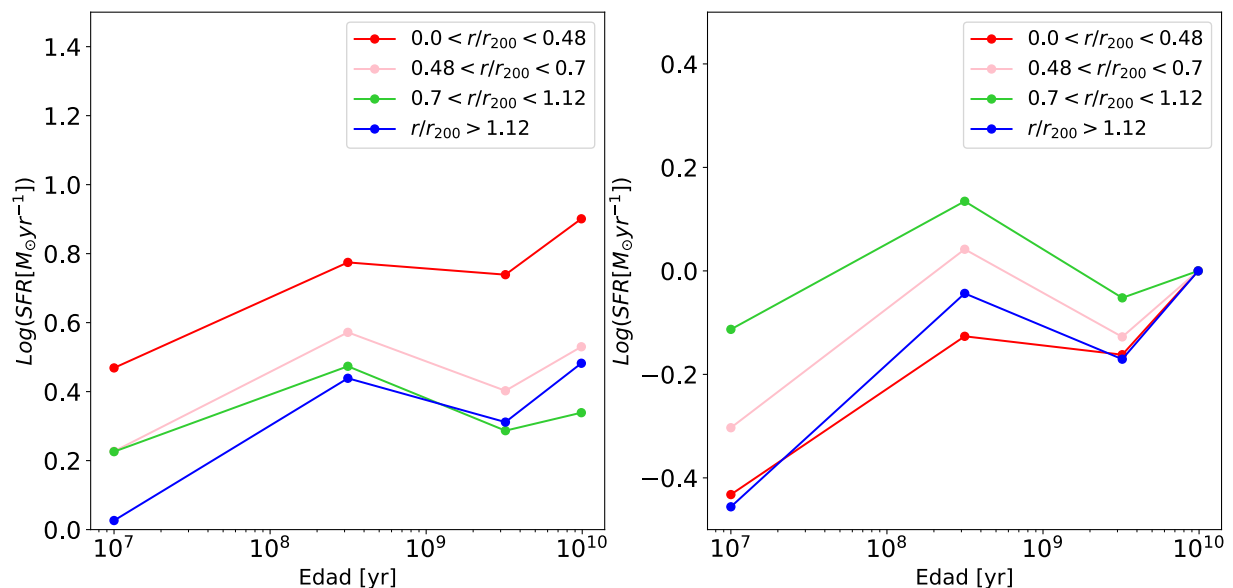


Figura 5.3: En la gráfica de la izquierda se muestran las SFHs de las galaxias de GASP que presentan señales de RPS, dependiendo de la distancia al centro del cúmulo. En la gráfica de la derecha las SFHs normalizadas al valor de SFR del cuarto bin de tiempo.

La interpretación de las relaciones que se pueden ver en la figura 5.3 tiene que ser cuidadosa, sobre todo en los bins de distancias mas pequeños, por la razón que pueden estar afectados por efectos de proyección, siendo cada una de las distancias medida al centro del cúmulo, un límite inferior a la distancia real. En este caso también podemos observar una secuencia en la SFH, aunque menos evidente que la observada con respecto a la masa estelar. Lo primero que notamos es que las galaxias en el bin más pequeño son también las más masivas, siendo su SFR promedio más alta en cada bin de edad. Nuestra interpretación tendrá entonces que tomar en cuenta también ese efecto que, como acabamos de ver en la sección anterior, resultó ser muy importante en determinar la intensidad del brote de formación estelar. La masa promedio en cada clase dependiendo de las distancias es de 5.67×10^{10} , 2.53×10^{10} , 1.74×10^{10} , 2.18×10^{10} en orden del bin con distancias menores a las mayores. Si nos enfocamos nada más en las galaxias de los tres bins de distancia más lejana, cuya

masa promedio tiene valores parecidos, vemos que la diferencia entre la tasa de formación estelar en los bins más recientes es prácticamente independiente de la distancia del cúmulo. Es decir, no encontramos efectos claros de que la densidad sea un parámetro determinante en el incremento de la formación estelar.

Como sabemos que la presión hidrodinámica aumenta en función de la densidad del medio, esperábamos también ver una tendencia en la historia de formación estelar con respecto a la distancia (a valores mas pequeños de la distancia del centro del cúmulo corresponden valores mas altos de la densidad del medio intra-cumular). Sin embargo, si no tomamos en cuenta las galaxias con la distancia proyectada más pequeña, que también resultan se las más masivas, vemos que no hay evidencias de que la densidad esté afectando a la tasa de formación estelar en los dos bins más recientes.

Este resultado puede ser dominado por efectos de proyección: en los bins de distancia proyectada más pequeña hay también galaxias que en la realidad están lejos, y como la estadística no es tan grande, las posibles tendencias pueden ser diluidas.

5.3. Dependencias en la velocidad

Dividiendo las galaxias medusas de GASP de acuerdo con la velocidad radial relativa que presentan dentro del cúmulo, se obtuvieron cuatro grupos, cuya SFH para cada uno puede verse en las figuras 5.4. De este modo, tomando la razón entre las velocidades propias de las galaxias (Δv) entre la dispersión de velocidades del cúmulo (σ_{cl}), se hizo la división de la muestra en cuatro bins con los valores de 0.35, 1.0 y 1.5 para estos cocientes, dando un total de 16 galaxias por clase.

Al contrario de los otros dos casos que acabamos de analizar, separando la muestra según la componente de velocidad a lo largo de la línea de visión, no es notable ningún efecto de masa significativo. Es decir, las galaxias en los cuatros bins en los que las separamos tienen un valor promedio de masa estelar parecido: 2.16×10^{10} , 3.96×10^{10} , 2.01×10^{10} y $3.98 \times 10^{10} M_{\odot}$ en orden de menor a mayor velocidad. Con respecto a las SFH, no se notan diferencias apreciables, por lo menos si nos enfocamos en la razón entre SFR2 y SFR3. Es decir, la intensidad del brote de formación estelar en la edad intermedia no parece tener una dependencia clara por la velocidad (aunque ésta se refiera nada más al valor radial, que se mide a lo largo de la línea de visión).

La diferencia más importante que encontramos es en la clase con menor velocidad promedio. Éstas son las que tienen el brote de formación estelar más fuerte, comparado con su masa total (ver el panel derecho de la figura 5.4). Ésto puede ser una consecuencia lógica si aplicamos la prescripción de Gunn and Gott (1972), según la cual la presión hidrodinámica depende de la densidad del medio y de la velocidad de la galaxia de acuerdo a la fórmula:

$$P_{RAM} = \rho v^2, \quad (5.1)$$

por eso se espera que galaxias que se mueven a baja velocidad sufran un efecto menor de presión, y su gas se tarde más en ser arrastrado, así que la formación estelar puede seguir por más tiempo y a una tasa mayor con respecto a otras galaxias que sufren un efecto más fuerte.

5.4. Dependencias en la “J class”

Como ya se explicó en el capítulo 1, la búsqueda y selección de galaxias con posibles efectos de presión hidrodinámica (o sea, candidatos a galaxias medusa), se hizo en imágenes en la banda B, donde el efecto de la presencia de gas ionizado es máximo. Los candidatos se dividieron en 5 clases, según la “intensidad” aparente de las asimetrías utilizadas para identificar galaxias medusas,

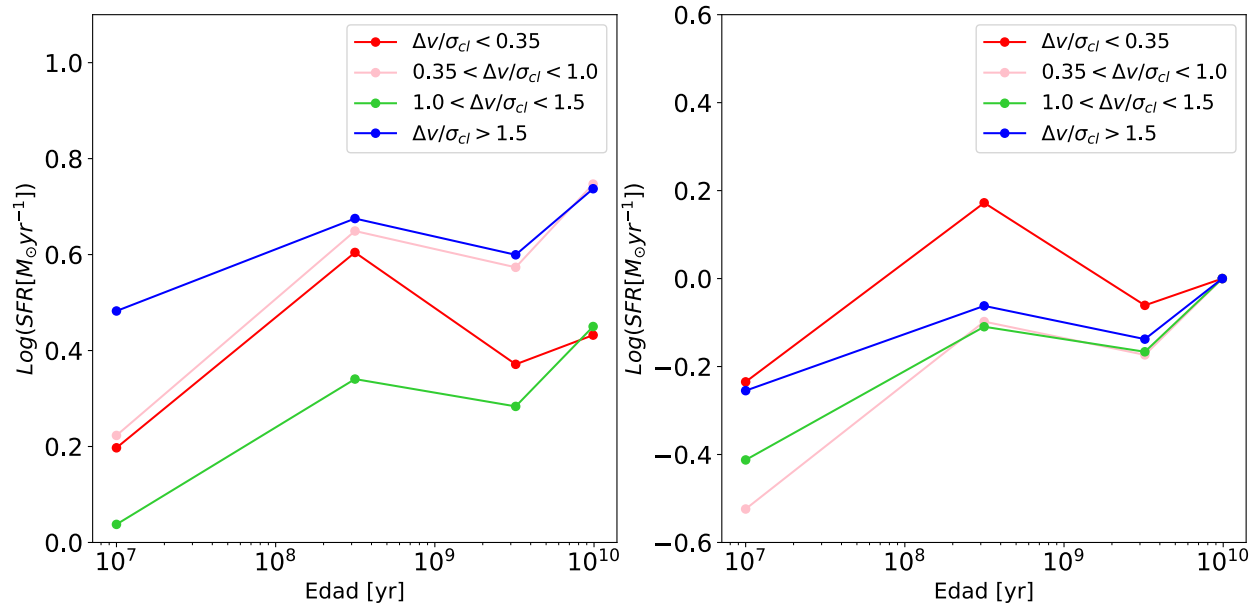


Figura 5.4: En la gráfica de la izquierda se muestran las SFHs de las galaxias de GASP que presentan señales de RPS, dependiendo de la velocidad relativa. En la gráfica de la derecha las SFHs normalizadas al valor de SFR del cuarto bin de tiempo.

en donde con la clase J5 se clasificaron objetos con evidencias muy fuertes por la presencia de colas intensas y largas, mientras que las otras clases, identificadas con numerosos mas bajos, hasta el 1, con evidencias de colas cada vez menos fuertes y evidentes.

Los dos paneles de la figura 5.5 muestran la SFH de cada una de estas cinco clases de galaxias y aquí notamos otra vez que hay, por lo menos en cierta forma, un efecto de segregación en masa. Las galaxias con las colas más evidentes (J5) son, en promedio, las más masivas, mientras que en la clase J2 tenemos las menos masivas. El número de galaxias por clase desde la J1 hasta la J5 es: 17, 11, 14, 13 y 9 y sus respectivos valores promedio de masa son 2.09×10^{10} , 7.1×10^9 , 2.36×10^{10} , 3.1×10^{10} y 8.57×10^{10} . Las galaxias en las clase J1, J3, y J4 tienen una diferencia despreciable entre ellas en las masas estelares.

Las diferencias apreciables en las historia de formación estelar en cada clase se pueden ver de forma más sencilla en la gráfica normalizada. Aquí también se puede observar una secuencia en intensidad del brote de formación estelar en función de la clase “J”, a pesar de que la secuencia no está definida tan claramente, y pensamos que puede ser determinada por un efecto de masa (ver sección 5.1). Las galaxias con el brote más intenso, son las menos masivas (la clase J2), mientras que las que tienen el brote menos intenso son las más masivas (la clase J5). Más en general, la anti-correlación entre la intensidad del brote de formación y la clase, puede ser causado por la correlación que vimos con la masa.

El hecho de que no se observe una tendencia tan clara entre la SFH y la clase de las galaxias se puede explicar con la incertidumbre intrínseca a este tipo de clasificación visual, ya que no siempre puede llegarse a apreciar la intensidad de las colas de gas ionizado que depende entre otras cosas de la intensidad de los fotones ionizantes producidos localmente.

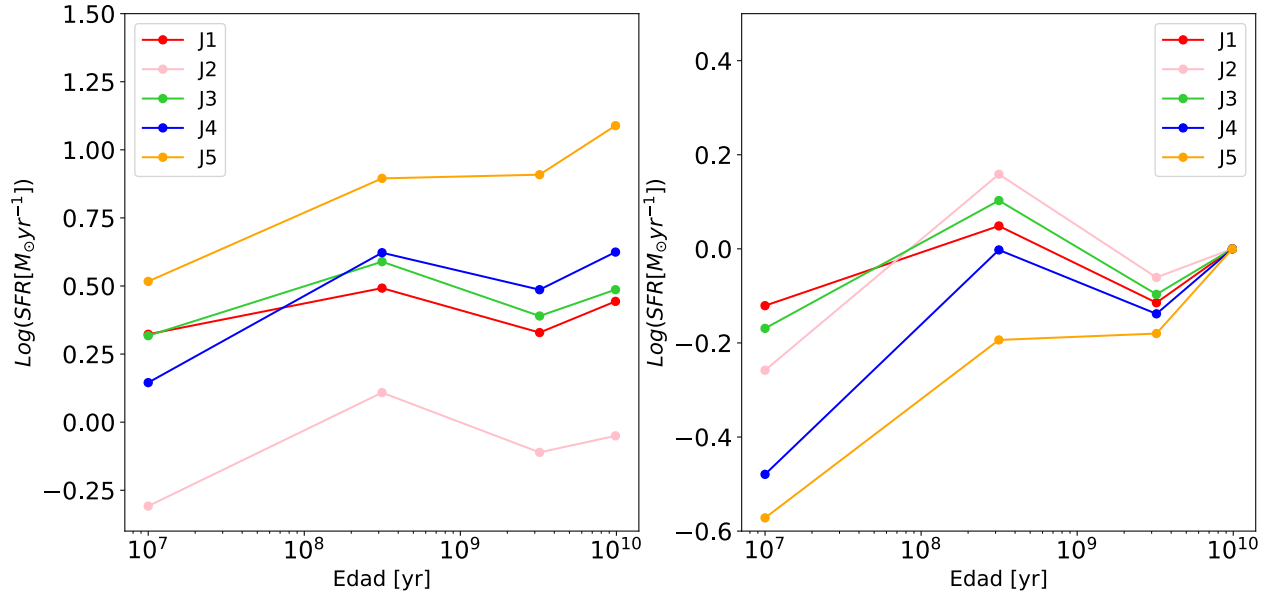


Figura 5.5: En la gráfica de la izquierda se muestran las SFHs de las galaxias de GASP que presentan señales de RPS, dependiendo de la JClass. En la gráfica de la derecha las SFHs normalizadas al valor de SFR del cuarto bin de tiempo.

5.5. Dependencias en la fase del desprendimiento del gas

¿Cómo afecta el fenómeno de la presión de barrido a las SFH? En las figuras 5.6 se muestran estos valores para 6 grupos de galaxias clasificadas de acuerdo a su fase de desprendimiento de gas. En el marco del proyecto GASP se intentó dar una clasificación con más sentido físico a las galaxias de esta muestra: mientras la “clase J”, está basada solamente en la morfología en la banda B, los datos de espectroscopía de campo integral nos proporcionan información mucho más rica y completa sobre las características físicas de estas galaxias. Por esto, se intentó clasificar las galaxias según la morfología y las características del gas ionizado, trazado por la línea $\text{H}\alpha$. Así, se tienen galaxias con las colas más largas y evidentes, clasificada como “jelly”, galaxias con colas de tamaño moderado y evidencias de arrastre del gas ionizado en la clase “stripped”, galaxias sin colas pero con disco de gas ionizado truncado en la clase “truncated”, y galaxias en una fase inicial de efecto de presión hidrodinámica. Además, se tiene una clase con las galaxias que se encuentran en una etapa que se interpretó como previa al desprendimiento del gas: “pre/initial stripping” (B. Poggianti, comunicación privada). En ese orden, el número de galaxias por clase es 18, 14, 4 y 23, cuyos respectivos valores promedio en masa son: 6.56×10^{10} , 2.05×10^{10} , 3.93×10^{10} y $8.59 \times 10^9 M_{\odot}$.

En todas las clases se nota un incremento en la SFR en la segunda época más reciente. Las galaxias en la clase “jelly”, o sea los ejemplos más extremos del efecto de la presión hidrodinámica, son también las galaxias más masivas, como se puede ver de la figura 5.6, por tener la tasa de formación estelar mayor, sobre todo en las épocas más remotas. Quizás por esta razón el brote de formación estelar esperado por la interacción temprana con el medio intracúmulo, no es tan intenso, comparado con la formación estelar en la época precedente. Sin embargo, estas son las galaxias que presentan las colas más largas, tal vez por el mismo hecho de tener más gas (aunque probablemente la masa específica de gas esté por debajo del promedio de este tipo de galaxias). Otra posibilidad es que en este tipo de galaxias el desprendimiento del gas sea particularmente eficiente: como se nota de la gráfica normalizada (lado derecho de la figura 5.6), estas galaxias son las que tienen menos

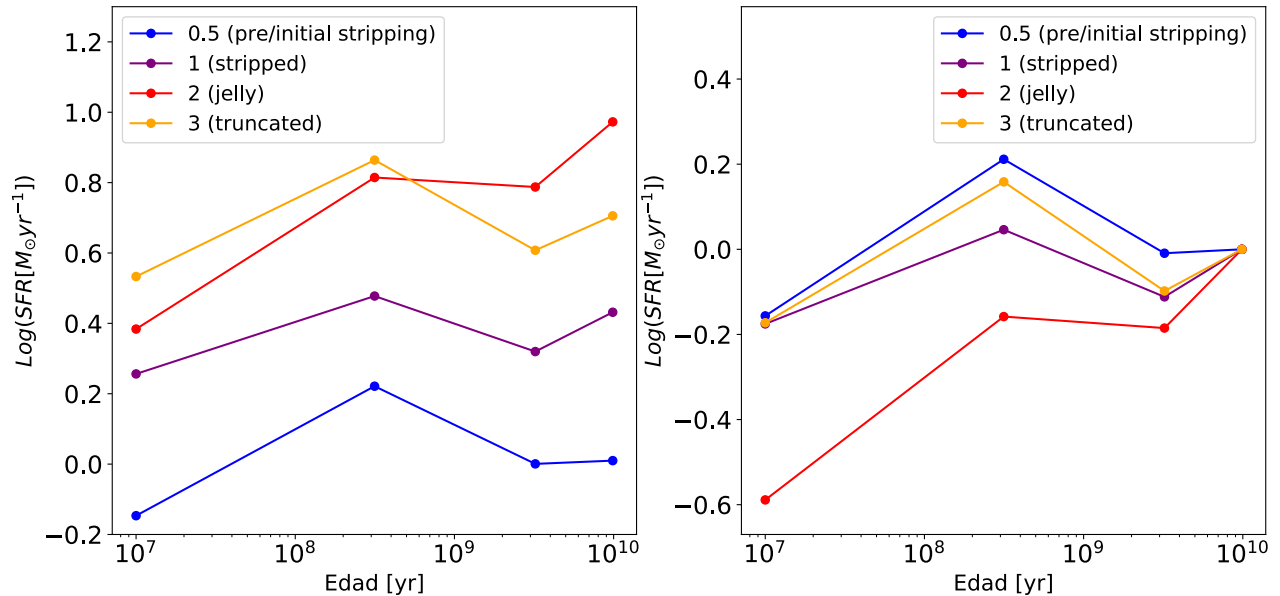


Figura 5.6: En la gráfica de la izquierda se muestran las SFHs de las galaxias de GASP que presentan señales de RPS, dependiendo de la JClass. En la gráfica de la derecha las SFHs normalizadas al valor de SFR del cuarto bin de tiempo.

formación estelar reciente comparada con su masa, quizás debido a que gran parte del gas se fue del disco a las colas de las galaxias. A pesar de que, en promedio, las galaxias con disco truncado sean la segunda clase más masiva, son las que presentan el brote de formación estelar más intenso (mientras que, si nos fijamos en la masa nada mas, no debería ser así, ver los resultados de la sección 5.1). Esto es consistente con una interpretación según la cual estas galaxias están en una fase avanzada de interacción, en la cual ya desaparecieron las colas y todo el gas que pudo ser arrastrado de la galaxias ya se salió. Así, el gas ionizado se encuentra nada mas en la parte central de la galaxia, donde se necesita una fuerza más intensa para que el gas salga del disco.

Mientras que las galaxias de la clase “stripped” tienen valores de las SFR que se encuentran entre los del los casos discutidos arriba, la clase para la cual es difícil dar una interpretación es la de “pre/initial stripping”. Esta clase tiene un brote muy fuerte en el segundo bin de edad, algo que no esperamos si interpretamos estas galaxias como si estuvieran en un momento inicial de su interacción. La única explicación es que en realidad estas galaxias se encuentren no en una fase temprana sino avanzada de interacción. Queremos también hacer notar que la SFH promedio de las galaxias espirales de la muestra de WINGS y OmegaWINGS no está caracterizada por este incremento de la SFR (Perez-Millan en preparación) que entonces parece ser algo peculiar y característico de las galaxias que están sufriendo interacción de tipo hidrodinámico.

Para analizar más a detalle la SFR dependiendo de la fase de stripping se muestra a continuación la relación entre masa y sSFR, en donde las galaxias han sido separadas tomando en cuenta estas fases. En el capítulo 4 se analizó la relación masa vs sSFR total, comparando las galaxias de cúmulo y las galaxias medusas de la muestra GASP. Se encontró que hay un incremento en la SFR de las galaxias medusa con respecto a las galaxias de cúmulo. Sin embargo, es interesante estudiar qué sucede con esta relación si ponemos atención a qué tanto han sufrido las galaxias medusas los efectos de la RPS, esto es, en qué etapa del desprendimiento del gas interestelar por el gas intra-cumular se encuentra cada galaxia.

Es por esto que (Vulcani et al., 2018) realizó el análisis mostrado en la gráfica 5.7, donde se

observa la misma relación Masa vs sSFR tomando en cuenta distintas clases de galaxias medusas de acuerdo qué tanta evidencia de pérdida de gas debido a RPS están sufriendo. Cada uno de los símbolos representa galaxias de una fase de stripping, dependiendo de qué tan intenso es el efecto que está sufriendo por la RPS. Sin embargo, esas comparaciones se hicieron con los valores totales de SFR en las galaxias medusas de GASP y la SFR en una región central de las galaxias de cúmulo.

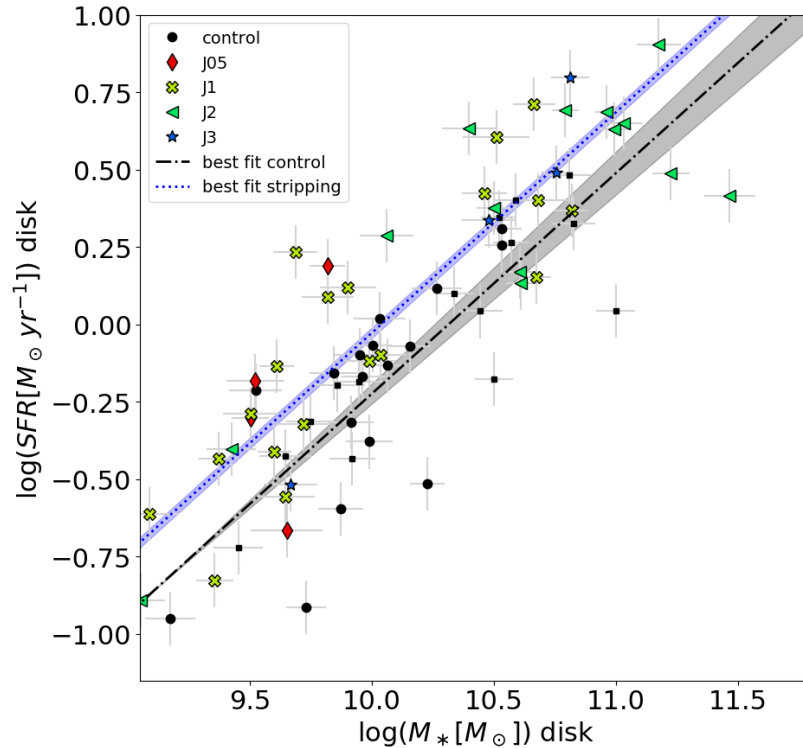


Figura 5.7: sSFR vs Masa en las galaxias medusas de GASP dependiendo de la fase del desprendimiento en el que se encuentra el gas del disco galáctico (figura tomada de Vulcani et al., 2018).

En esta gráfica podemos ver cómo influye la clase de galaxia medusa dentro de la relación de sSFR vs Masa. Aquí los rombos rojos representan a las galaxias con stripping inicial correspondiente a la clases “J0.5” (denominadas en esta tesis como “S0.5”), las cruces amarillas son galaxias de clase J1 (“S1” aquí), los triángulos azules son las J2 (aquí las “S2”) y las galaxias con disco truncado están representadas por estrellas azules (J3 en el artículo y “S3” en este trabajo). La línea punteada negra y el área gris sombreada muestran el mejor ajuste para la muestra de control con sus respectivas barras de error; la línea punteada azul y el área sombreada en azul son, respectivamente, el mejor ajuste para la muestra de galaxias medusas, utilizando la misma pendiente que la muestra de control. Aquí queda evidenciado el hecho de que las galaxias medusas que se encuentran en las fases de despojo de gas o etapas posteriores a éste presentan una alta sSFR que las ubica en general por encima del ajuste de la muestra de control, pues en este momento la sRPS está actuando sobre el gas interestelar de los discos galácticos.

En la gráfica de la figura 5.8 se compara la sSFR como función de la masa para las galaxias medusa de la muestra GASP (estrellas) y galaxias de WINGS y OmegaWINGS (galaxias de cúmulo, representadas por puntos verdes). Los cálculos se realizaron corriendo SINOPSIS dentro de un área de apertura en el centro de las galaxias para las tres muestras. La línea guinda es el ajuste a las

galaxias medusas y la línea negra es el ajuste a las galaxias de cúmulo. Aquí puede verse que las galaxias que se encuentran bajo los efectos de la presión hidrodinámica y las que están en etapas avanzadas de desprendimiento del gas (clases “S1”, “S2” y “S3”) presentan valores de sSFR más altos que las galaxias clasificadas como en etapas iniciales al despojo del gas (clase “S0.5”) y que el promedio de las galaxias de cúmulo de WINGS y OmegaWINGS.

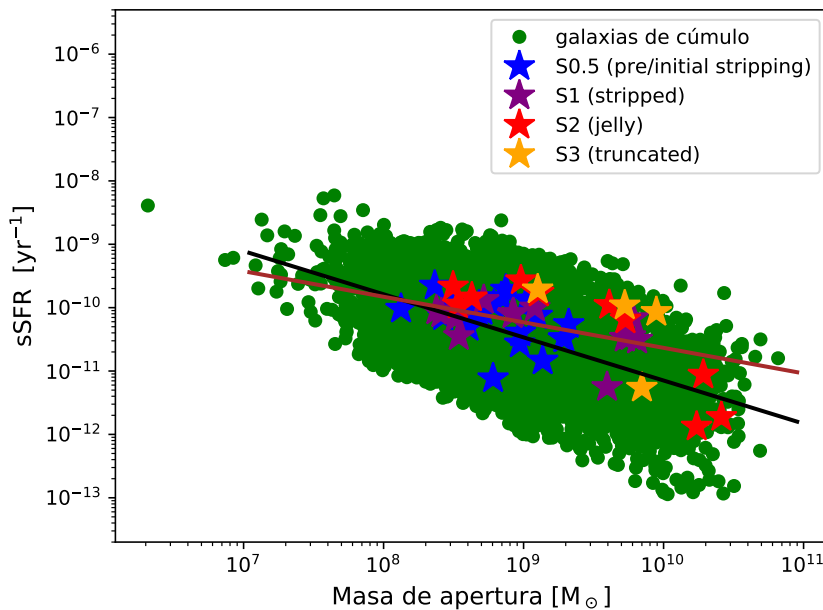


Figura 5.8: sSFR vs Masa en las galaxias medusas de GASP y galaxias de WINGS y OmegaWINGS dependiendo de la fase del desprendimiento en el que se encuentra el gas del disco galáctico. Los cálculos se realizaron corriendo SINOPSIS en espectros extraídos dentro de la misma área de apertura en el centro de todas las galaxias.

Si miramos la figura 5.8, el resultado mas evidente es la separación muy clara de las S3 con respecto a las demás galaxias: a excepción de una, todas están por arriba del promedio tanto de las medusas como de las de cúmulo. Sin embargo en esta clase solo hay cuatro galaxias, así que no es fácil traer conclusiones ciertas. Lo que se ve en este caso es que, a pesar de que supuestamente estas galaxias ya pasaron desde hace una temporada por la fase de aumento de SFR, ya están en la fase en la cual ya no hay colas, nada más evidencias de que sí hubo desprendimiento de gas por RP (o sea, el mismo disco truncado en gas ionizado). Hay algunas posibles interpretaciones que intentamos dar para explicar esto.

Una posibilidad es que las galaxias se encuentren en una condición particular en la cual el desprendimiento de gas es ineficiente: por eso la formación estelar sigue activa siendo el efecto del choque dominante sobre el desprendimiento así que las colas tampoco son muy evidentes. Esto es, con toda probabilidad, lo que esta pasando en el caso de la galaxia JO36 que se está moviendo dentro del medio intra-cumulo con una inclinación del disco “de canto” (pensamos esto por que la galaxias se presenta de canto en las imágenes y la componente de la velocidad en la línea de visión es muy alta, $\sim 1250 \text{ km s}^{-1}$). Las simulaciones (Kronberger et al., 2008; Book and Benson, 2010) precisamente nos dicen que el desprendimiento de gas, en estas condiciones (o sea, por galaxias que se muevan “de canto”) es ineficiente, mientras que el aumento de la tasa de formación estelar

es maximizado (ver por ejemplo la figura 1.8). En los otros 3 casos las velocidades medidas por el redshift de las galaxias tienen valores comparables con la dispersión de velocidad de sus respectivos cúmulos de pertenencia, así que en estos casos la magnitud y la dirección de la velocidad son muy inciertas, y no podemos decir si las galaxias se están cayendo de canto o con otra inclinación.

Con respecto a las galaxias medusa en el sentido literal de la definición (o sea esas que presentan colas evidentes y/o largas, las clases S2 y S1), están distribuidas en la secuencia principal de forma mas o menos homogénea, o sea, no parecen ocupar un lugar específico o mostrar algunas tendencias definidas. Las galaxias en fase de desprendimiento inicial, por otro lado, parecen encontrarse cerca de la secuencia principal de las galaxias de cúmulos, aunque con algo de dispersión.

Obviamente éste es un análisis incompleto y que, sobre todo en el caso de las S3, tiene poca estadística. Además estamos tomando en cuenta solamente las propiedades de las partes interiores de las galaxias, lo cual nos va a dar inevitablemente una idea parcial de lo que está pasando realmente.

5.6. Dependencias en la posición del espacio-fase

El efecto de la presión hidrodinámica sobre el gas de una galaxia debería ser función de su velocidad y de la densidad del medio intra-cumular. Mientras más alta es la velocidad y la presión, más intensa es la fuerza originada por la RP. En las secciones 5.2 y 5.3 hemos intentado buscar conexiones físicas entre estas dos cantidades y la historia de formación estelar, analizando cambios en la SFR con respecto a la distancia proyectada del centro del cúmulo (muestreando así cambios en la densidad) y con respecto a la velocidad radial. Este análisis no dio resultados evidentes. En esta sección vamos a juntar las dos propiedades, velocidad radial y distancias proyectadas, para estudiarlas en el diagrama de espacio-fase, y ver cómo ése afecta a sus características.

En general las galaxias que se encuentran a bajas distancias proyectadas, podrían también encontrarse lejos del centro, mientras que las que se encuentran a distancias altas, seguramente están lejos del centro. Por otro lado, lo que se espera es que, si una galaxia es acreta por un cúmulo, su velocidad será mas alta si esta acerca del centro. Estos efectos pueden combinarse en un diagrama espacio-fase, en el cual representamos dónde se encuentran las galaxias con respecto a su distancia proyectada y a su velocidad radial.

En las figuras 5.9 y 5.10, representamos el diagrama espacio-fase para toda la muestra de WINGS /OmegaWINGS. Como estamos considerando galaxias que se encuentran en cúmulos de distintas propiedades (masa, radio viral), para que ésta gráfica tenga sentido, hemos normalizado las velocidades peculiares a la dispersión de velocidad del cúmulo de pertenencia de las galaxias, y las distancias proyectadas al radio viral del mismo. En las dos figuras, el área está dividida en bins de forma de hexágonos y escala de colores que representan el número de las galaxias en la muestra WINGS/OmegaWINGS pesadas por completitud, así podemos comparar en qué posiciones de estos mismos diagramas se encuentran las galaxias de GASP que estamos analizando. De este modo, se representan con figuras de colores las galaxias identificadas con diferentes etapas del proceso del desprendimiento del gas del disco galáctico debido a la presión hidrodinámica. Aunque las galaxias de GASP clasificadas como “medusa” son 64, solamente se usaron 59 para realizar los diagramas espacio-fase: las galaxias JO190, JO134, JO24, JO20 y JO73 tenían valores demasiado altos de velocidad y fueron retiradas del mismo porque probablemente no se traten de galaxias de los cúmulos aquí analizados, pero quizás sean objetos que pertenecen a cúmulos más lejanos.

Analizando la figura 5.9, notamos cómo las galaxias con disco de gas ionizado truncado están entre las que tienen la menor velocidad y distancia proyectadas. Esto tiene sentido si pensamos que estas galaxias ya se encuentran en un estadio avanzado de su interacción con el medio intra-cúmulo, y ya terminó su acción de desprendimiento: el gas ionizado que se observa en el disco se va

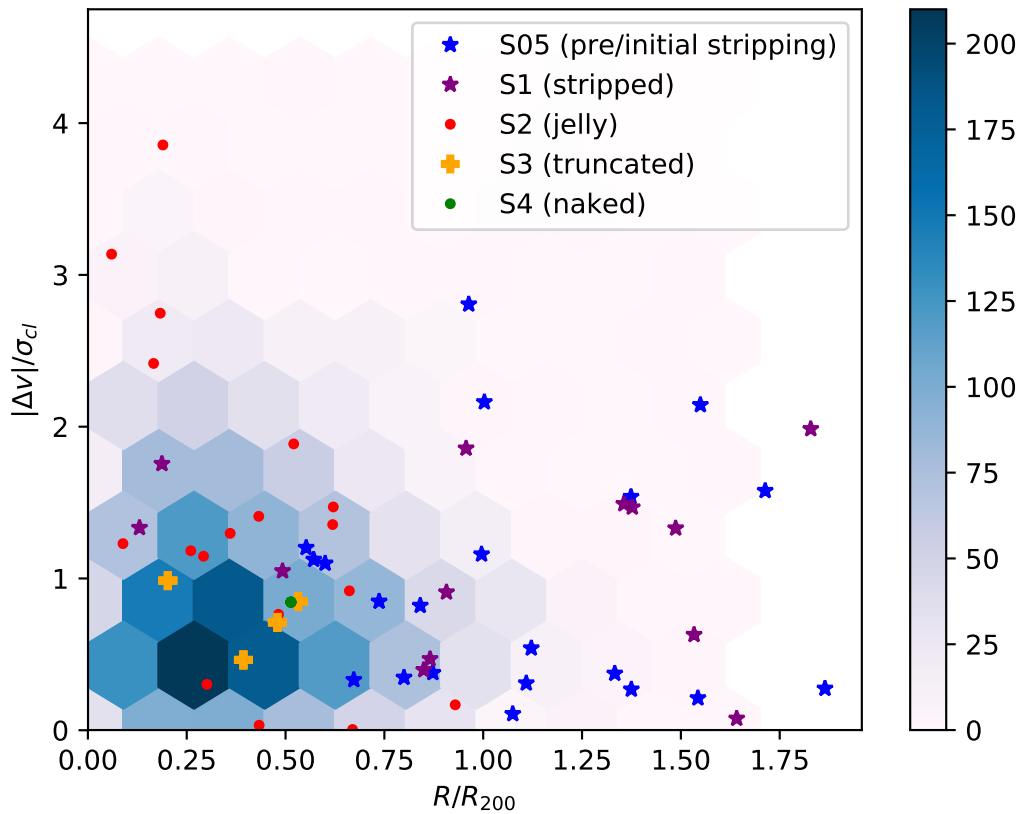


Figura 5.9: Espacio fase para las galaxias medusas de GASP en diferentes fases del desprendimiento de gas interestelar por la presión hidrodinámica.

muy probablemente a quedar en la galaxia, y las colas ya desaparecieron. También es posible que estas galaxias se encuentren en una posición de su órbita después del periastró, o sea ya alejados del centro del cúmulo. El hecho de que todavía haya gas en el centro de estas galaxias puede ser debido a que las condiciones físicas de la galaxia y del cúmulo no son suficientes como para vencer la gravedad de la galaxias, que actúa como una fuerza restauradora, en contra de la fuerza por presión hidrodinámica, impidiendo así que más gas se salga de la galaxia. Esta puede ser la razón por la cual son de las galaxias que, por lo menos en su centro, tienen mayor formación estelar en la muestra (ver figura 5.7).

Igualmente notamos que la mayoría de las galaxias clasificadas como “jelly” (clase “S2”), se encuentran a velocidades muy altas y están a distancias relativamente cercanas del centro. Estas dos condiciones (alta velocidad y alta densidad del gas intracúmulo) hacen que la presión hidrodinámica sea la más alta, y pueda actuar muy eficientemente en desprender el gas de la galaxia, creando así las colas más largas observadas en la muestra. Por otro lado, las galaxias clasificadas en fase de “pre/initial stripping” se encuentran en promedio a más bajas velocidades (pero todas tienen velocidades proyectadas cerca del promedio de las demás galaxias de WINGS/OmegaWINGS) y distancias proyectadas relativamente altas (7/10 se encuentran a $r > R_{200}$). Una vez más, es difícil dar una interpretación en términos de fase de desprendimiento a estas galaxias (ver sección 5.5).

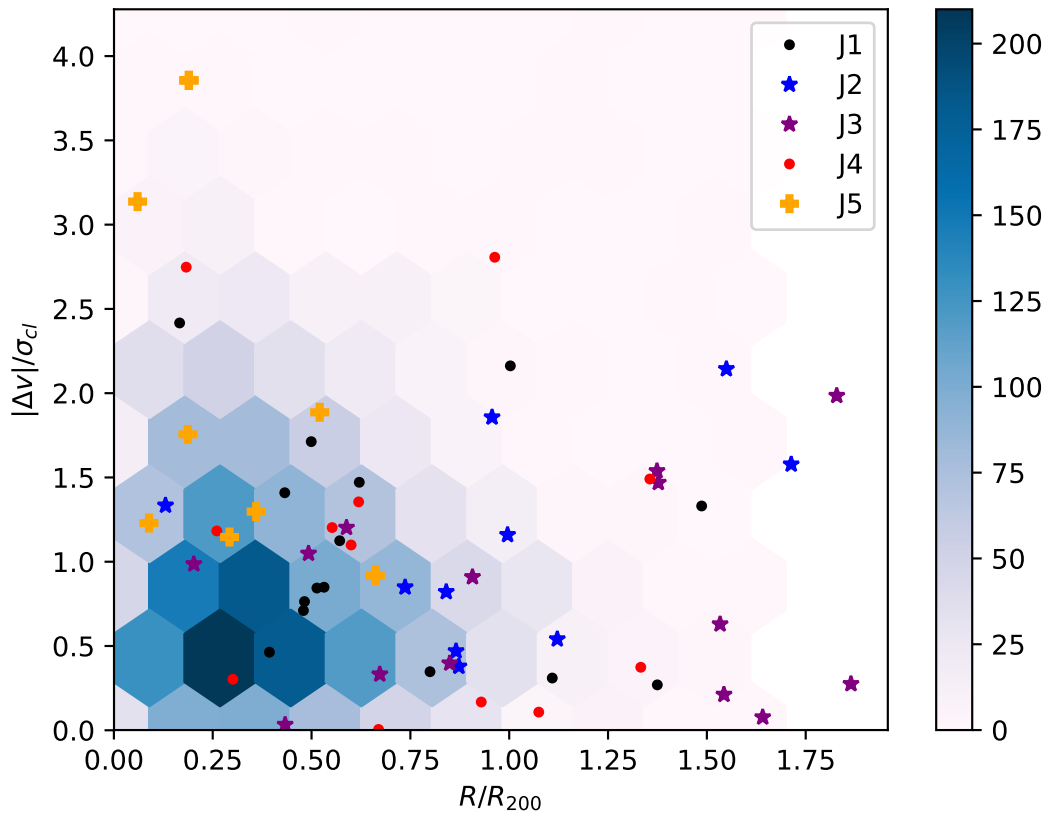


Figura 5.10: Espacio fase para las galaxias medusas de GASP de a cuerdo a la J-Class.

Las distancias a las cuales se encuentran no son compatibles con una interacción de las galaxias y medio intracúmulo, por lo menos una interacción que de lugar a un efecto visible en el gas de la galaxia.

Finalmente, las galaxias clasificadas como “stripped”, en promedio se encuentran en condiciones menos extremas con respecto a las “jelly”, o sea a distancias intermedias y velocidades mas bajas. Las condiciones de estas galaxias, son una probable concausa de la historia de formación estelar promedio, en donde hay un brote relativamente intenso y todavía se mide formación estelar activa. Notamos además que en promedio la masa de las galaxia en la clase “jelly” es la más alta y también puede tener un efecto sobre la SFH.

La distribución de las galaxias en el espacio fases según su apariencia en la banda B (la clase “J”) tiene una interpretación más complicada debido a que la verdadera naturaleza de las galaxias medusa se puede revelar principalmente a través de la emisión del gas, siendo este un fenómeno hidrodinámico, mientras que imágenes en bandas fotométricas son mas sensible a la emisión en el continuo. Sin embargo, se nota como los casos de desprendimiento más intenso, que las “J5” se encuentran bastante adentro de los cúmulos y con velocidades relativamente altas. Las demás clases tienen una distribución mas parecida, y es difícil concluir algo o encontrar una conexión clara entre su posición en este diagrama y su clasificación.

Con el propósito de estudiar más detalladamente la historia de formación estelar en función de

las características de las galaxias, en el futuro se pretende analizar posibles tendencias en función de la distancia del centro de las galaxias. También se quiere hacer una comparación entre lo que se observa a alto y a bajo corrimiento a rojo. Para ello pueden emplearse diversas técnicas de multifrecuencia (Madau et al., 1998; Madau and Dickinson, 2014) que permitan analizar la tasa de formación estelar en objetos débiles. Por otro lado, sería interesante utilizar modelos de transferencia radiativa como “observaciones simuladas” para verificar si podemos obtener un tiempo más preciso para cuando ocurre el evento del brote de formación estelar. Finalmente, la comparación de estos estudios con los resultados provenientes de observaciones de radio y sub-milimétricas que deberían permitirnos dar la explicación definitiva de por qué vemos un incremento en la formación estelar en galaxias con las masas más bajas.

Capítulo 6

Conclusiones y trabajo a futuro

Las llamadas galaxias medusas (Smith et al., 2010) son aquellas que se encuentran bajo los efectos de la presión hidrodinámica, también conocida como RP (Ram Pressure), debido a que están cayendo en cúmulos de galaxias: el gas intracumular empuja al gas interestelar del disco galáctico, causando que éste último sea extraído. Este fenómeno es conocido como desprendimiento de gas debido a la presión hidrodinámica, o RPS (Ram Pressure Stripping; Gunn and Gott, 1972) y ha sido estudiado de manera tanto observacional como teórica. Se han realizado simulaciones numéricas para estudiar estos procesos físicos, y gracias a ellas se ha encontrado que la presión hidrodinámica puede tener un doble efecto sobre la formación estelar: por un lado hay un incremento de la formación estelar en la región de choque entre ambos gases, por otro lado hay una pérdida del gas que es empujado por las fuerzas de presión fuera del disco de la galaxia (Fujita and Nagashima, 1999; Kronberger et al., 2008; Kapferer et al., 2009; Bekki, 2013; Book and Benson, 2010; Steinhauser et al., 2016; Köppen et al., 2018). Esto pasa en dos fases temporales distintas:

- Cuando el gas intracumular ejerce una presión sobre el gas interestelar de la galaxia se forma un choque de gases que origina el aumento de la densidad y a su vez genera un incremento de la actividad de formación estelar.
- A medida que la galaxia va avanzando a través del cúmulo, el gas que una vez estaba en el disco galáctico se va perdiendo debido a la presión hidrodinámica (se vea, por ejemplo, Fujita and Nagashima, 1999). Al irse desprendiendo el gas, se forman largas estructuras de escombros de material en forma de colas de gas ionizado que pueden medir hasta 80 Kpc (este es el valor mas alto que se encuentra en las galaxias de la muestra de GASP, pero se han observado hasta valores mayores) y donde puede haber formación estelar. Ésto le da a la galaxia la apariencia de tener tentáculos de medusa, y de ahí su nombre.

Las galaxias medusas han sido detectadas y observadas a corrimientos al rojo tanto altos (Ebeling et al., 2014a; McPartland et al., 2015) como bajos (Poggianti et al., 2016) y a diferentes longitudes de onda (Gavazzi et al., 1995; Deb et al., 2020; Ramatsoku et al., 2019; George et al., 2018; Fumagalli et al., 2014). En este contexto ha surgido el ESO large program GASP (GAs Stripping Phenomena in galaxies; Poggianti et al., 2017) dedicado al estudio de las galaxias medusas en el universo local utilizando observaciones del espectrógrafo de campo integral MUSE@VLT. Este proyecto se basa en el análisis de una muestra de 114 galaxias (entre las que se encuentran 64 galaxias que fueron seleccionadas por tener evidencias fotométricas de interacción hidrodinámica con el gas caliente del cúmulo) que fue creada a partir de las muestras WINGS y OmegaWINGS (las cuales contienen galaxias de cúmulos) y de la muestra PM2GC (que contiene galaxias de grupos y aisladas). Las galaxias se escogieron mediante una inspección visual de las imágenes de las tres muestras en la

banda B (Poggianti et al., 2016), por tener características que las hacen buenos candidatos a galaxias medusa. Otras galaxias, entre ellas la muestra de control, se eligieron por no tener evidencias (ópticas y de sus características fotométricas) de interacción de algún tipo, y por permitir cubrir el mismo rango en masas estelares con respecto a la distribución de las galaxias medusas.

Este trabajo de tesis consiste en un estudio donde se analizan las propiedades físicas de las galaxias de la muestra GASP en relación a las propiedades de las mismas galaxias y de los cúmulos en donde se encuentran, teniendo como objetivos el estudiar por qué se da el incremento de la SFR en las galaxias medusas y cómo está relacionado con estas propiedades.

6.1. Estudio de las poblaciones estelares

Como se quiso estudiar los efectos que la interacción entre el medio intracumular y el medio interestelar tienen tanto en sus poblaciones estelares como en su capacidad de formar estrellas, hemos analizado los espectros ópticos con el código de ajuste espectral SINOPSIS (Fritz et al., 2007, 2017). Éste código utiliza modelos de poblaciones estelares simples de distintas edades, desde muy jóvenes (con la capacidad de ionizar el gas y producir líneas en emisión) hasta las más viejas (o sea las que tienen edades compatibles con la edad del universo) y nos permite reconstruir su historia de formación estelar antes y durante su interacción con el cúmulo ajustando los espectros ópticos en cada spaxel de una galaxia: de este modo es posible buscar una interpretación física que pueda explicar las características que observamos en estos objetos.

La caracterización de las poblaciones estelares se realiza en cuatro épocas cósmicas diferentes: éstas representan nuestra resolución temporal. Además, como queremos enfocarnos en el análisis de los efectos dentro del disco galáctico, las propiedades de las poblaciones estelares han sido calculadas en regiones que incluyan únicamente a esta componente, no tomando en cuenta las colas de gas ionizado.

Como resultado del análisis espectral con los modelos de síntesis de poblaciones, SINOPSIS devuelve una estimación de la masa estelar y de la historia de formación estelar, o sea la tasa de formación estelar que tuvo la galaxia a lo largo de su vida, promediada en cuatro bins de edad. SINOPSIS utiliza modelos para los cuales se han calculado las intensidades de las líneas nebulares más prominentes en el óptico. Esto nos permite tener también una estimación de la tasa de formación estelar más reciente directamente de los ajustes espectrales. Sin embargo, los valores de SFR calculados por SINOPSIS sólo se utilizaron para comparar las propiedades de las galaxias de GASP con las de la muestra WINGS/OmegaWINGS. Para todos los demás análisis, se crearon mapas de SFR a partir de los flujos medidos de la línea $H\alpha$, corregidos por extinción por el polvo en cada spaxel. Los valores globales, tanto de masa como de tasa de formación estelar, se calculan entonces sumando los valores obtenidos en cada spaxel. Así, es posible tomar en cuenta en el cálculo de la SFR más reciente, probables fuentes de ionización que no sean debida a formación estelar (núcleos galácticos activos, choques, estrellas calientes evolucionadas), y no incluir esos spaxels en el cálculo de la SFR global. Esto se logró creando diagramas diagnóstico (Baldwin et al., 1981) espacialmente resueltos, y analizando sus resultados.

Para poder establecer cuál es el efecto de una interacción hidrodinámica sobre la capacidad y eficiencia en el formar estrellas de una galaxia, el primer paso fue comparar la SFR de las galaxias de GASP con evidencias de interacción hidrodinámica, y las galaxias que no presentan señales de interacciones hidrodinámicas, es decir, de la muestra de control.

6.2. Brotes de formación estelar

Uno de los principales resultados obtenidos en esta tesis es que hay un incremento en la SFR en épocas relativamente recientes, las cuales corresponden a poblaciones estelares de edades menores a $\sim 6 \times 10^8$ años (que se identifican en los dos bins de edades más recientes que consideramos en los resultados de la síntesis de población estelar), en comparación a la mayoría de las galaxias en cúmulo. Bajo la idea de que justamente en este periodo de tiempo es cuando las galaxias medusas tuvieron la primera interacción con el medio intra-cúmulo, proponemos que este incremento en la SFR puede estar causado por el aumento de densidad en la región del choque entre el gas intra-cumular y el gas interestelar del disco galáctico, lo cual aumentaría la eficiencia de la formación estelar. Este resultado ya se había encontrado tanto en estudios teóricos con simulaciones numéricas cuyos resultados se reportan en las figuras 1.5 y 1.6 por Kronberger et al. (2008) (ver también Ramos-Martínez et al., 2018) como en estudios observacionales de la misma muestra de GASP, por el trabajo de Vulcani et al. (2018). En este último trabajo se hizo una comparación entre galaxias que sufren efectos de presión hidrodinámica y otras galaxias del mismo programa GASP, pero sin evidencias de este tipo de interacción (muestra de control). Los resultados de esto indican que las galaxias clasificadas como “medusa” tienen en promedio una tasa de formación estelar reciente más alta con respecto a las galaxias de la muestra de control (ver figura 5.7). También en Poggianti et al. (2016), se hizo una comparación muy general entre la SFR de las galaxias que se habían identificado fotométricamente como candidatos a galaxias medusa, y las demás galaxias de cúmulo, reportando un incremento promedio de esa propiedad en las primeras. Sin embargo, es importante hacer notar que la muestra de control analizada es muy pequeña.

Para poder hacer una comparación con mejor sentido físico, intentamos comparar espectros de las galaxias de la muestra WINGS/OmegaWINGS con las de la muestra GASP, tomando en cuenta que los espectros de las primeras son espectros tomados con fibra, en las regiones centrales. Así que simulamos una situación parecida calculando, de los datos de MUSE, un espectro relativo nada más a las partes centrales de las galaxias, en una apertura igual a la de los datos de fibra. Las relaciones entre la tasa de formación estelar específica y la masa de las dos muestras de galaxias nos dice que, en promedio, sí las galaxias que sufren interacciones hidrodinámicas están formando estrellas a una tasa mayor. Eso sucede no solamente por lo que concierne las estrellas que se están formando a la época actual, si no también para las estrellas que se formaron a épocas más tempranas que, según la interpretación que se dio en este trabajo, corresponde a la primera interacción de la galaxia con el medio intra-cumular y al comienzo del brote de formación estelar.

Se notó también que el incremento de la formación estelar con respecto a las galaxias no perturbadas tiene una clara dependencia con la masa: a masas mayores el incremento es mayor, tanto en la tasa de formación estelar reciente como en la menos reciente (se vean la figura 4.3). Una posible interpretación a eso se basa justamente en un posible incremento de la eficiencia de la tasa de formación estelar. Es bien conocido que hay una relación de escala entre la masa de una galaxia y su contenido de gas (ver, por ejemplo, los trabajos de Saintonge et al., 2011; Catinella et al., 2010; Maddox et al., 2016; Parkash et al., 2018, y los demás trabajos allí mencionados) y entonces, al tener más gas, si la eficiencia de la formación estelar aumenta es normal ver un aumento de los valores de SFR. Esas mismas relaciones de escala podrían explicar la dependencia de la intensidad del primer brote estelar por la masa total de la galaxia (ver sección 6.4) (ver, por ej. Calette et al., 2018).

6.3. En búsqueda del frente de choque

Aprovechando del tipo de datos que tenemos, que nos permiten estudiar las propiedades físicas de las galaxias en diferentes regiones, hicimos un análisis de las características espaciales de los mapas de tasa de formación estelar y de masa, con el propósito de encontrar asimetrías evidentes. Esto porque cuando una galaxia medusa cae en un cúmulo, el medio intra-cúmulo ejerce una presión en el gas interestelar de la galaxia sobre la “parte delantera” del disco galáctico de manera que en esta región se genera un choque entre ambos gases y ocurre un aumento de la densidad que resulta en el incremento de SFR en esta parte de la galaxia. Este método ha sido utilizado por primera vez para analizar datos de las simulaciones de Troncoso-Iribarren et al. (2020) y lo usamos aquí para detectar asimetrías significativas en los mapas de masa y de SFR, en los cuatro bins de edad, que puedan darnos pistas sobre la mayor acumulación de SFR o masa en alguna región correspondiente al choque entre los gases intra-cúmulo e interestelar de cada galaxia.

Es por esta razón que este efecto se debería detectar en un mapa de SFR como una asimetría en la distribución de esta cantidad, en donde el lado hacia donde se mueve la galaxia debería tener una tasa de formación estelar mayor. Detectar estos tipos de asimetrías, no sólo en los mapas de tasa de formación estelar más reciente, si no también en los mapas de las épocas justo anteriores, nos puede proporcionar evidencias del hecho de que este choque efectivamente ocurrió y, además, nos puede sugerir la dirección hacia la cual se mueve la galaxia en el plano del cielo. Para poder detectar y caracterizar estas asimetrías, lo que se hizo fue trazar una recta que pasa por el centro de la galaxia, calcular la suma de los valores de tasa de formación estelar en cada pixel en las dos partes así definidas, cambiar el ángulo de inclinación de la recta y repetir la operación para así buscar la dirección de la recta a la cual se encuentran las diferencias más altas en los mapas. Definimos un índice de asimetría para poder cuantificar la intensidad de estas diferencias, y las estudiamos también para las galaxias de la muestra de control, seleccionadas por no tener evidencias de efectos de algún tipo de interacción.

De este modo, utilizamos los mapas de SFR en las galaxias medusas (en los dos bins más recientes) para detectar frentes de choques e intentar derivar las direcciones de los movimientos de las galaxias. Por supuesto las galaxias no son objetos perfectamente simétricos, así que detectar diferencias en las dos mitades de un mapa no significa necesariamente que sean provocadas por efecto de los choques entre los dos medios. Por eso primero analizamos los índices de asimetrías en galaxias supuestamente “normales”, para definir valores umbrales por arriba de los cuales podemos confiar que sí hay una asimetría significativa. Así encontramos que, en promedio, la mayoría de las galaxias en la muestra JF está caracterizadas por índices de asimetrías por arriba del promedio de las galaxias de la muestra de control, un claro indicador de que un proceso de interacción con consecuente incremento de la formación estelar ha de haber pasado en estas galaxias. El hecho de que el índice de asimetría en los mapas de SFR en los bins de edades más viejas y en el mapa de masa es compatible con los valores de las galaxias normales, se puede interpretar como una confirmación adicional de nuestra hipótesis.

En cuanto a la dirección de la velocidad de las galaxias, está indicada por el vector perpendicular a la línea que determina el máximo índice de asimetría, apuntando hacia el lado del disco galáctico que contiene la mayor valor de SFR total. Lo que se espera es que la dirección de la velocidad apunte más o menos en dirección del movimiento de la galaxia la cual, muchas veces, se encuentra hacia el centro del cúmulo.

Con éste índice de asimetría se pudo encontrar un vector que nos da indicios de la dirección hacia la cual una galaxia puede estar sufriendo más efectos de presión hidrodinámica. Ésto se hizo para las galaxias con asimetrías significativas en los mapas de formación estelar de las dos épocas cósmicas más recientes. Al comparar en cada una de esas galaxias el vector de movimiento con

el vector que apunta hacia el centro del cúmulo, se encontró que para la época más reciente, las galaxias en las que ambos vectores apuntaban a direcciones parecidas son JW36 y JO153. Por otra parte, para el segundo bin de tiempo, los vectores se asemejaban en un mayor número de galaxias: JO153, JO149, JO102 y JO157, haciendo pensar que el hecho de que en este periodo de tiempo se dirijan más hacia la BCG puede incrementar el brote de formación estelar en este bin de edad.

Todas estas galaxias en ambas épocas presentan colas de gas y están en etapas de despojo de gas o en fases posteriores. Se hizo especial énfasis en JO153, ya que a partir del estudio de la formación estelar en los dos bins de edad, se puede inferir que en la segunda época más reciente su dirección de movimiento apuntaba al centro del cúmulo más que ahora con un fuerte brote de SFR. Sin embargo, tanto las máscaras de cada galaxia como los efectos de rotación pueden haber influido en los resultados de estos vectores: las galaxias cuyo vector de movimiento coincidía más con la dirección al centro del cúmulo son las que tienen las máscaras para el disco galáctico más simétricas, es decir, sin irregularidades como pueden ser, por ejemplo, objetos que se interponen en la línea de visión cerca del disco galáctico (estrellas de la Vía Láctea o galaxias más lejanas).

Realizando el estudio de las asimetrías en los mapas de todas las galaxias, nos enfocamos en particular en el análisis de 8 galaxias pertenecientes a la muestra de control y sin formación estelar reciente (es decir, sin líneas en emisión). Estas galaxias son parte de un artículo (Vulcani et al., 2020) en el cual se estudian los posibles mecanismos de apagado de la formación estelar. Por esta razón se buscaron signos de la posible presencia de asimetrías en el mapa de tasa de formación estelar en la segunda época, que pudieran comprobar un posible efecto de la interacción hidrodinámica. Sin embargo, la búsqueda no dio resultados positivos.

El rango espectral de MUSE@VLT nos permite, a estos redshift, observar las líneas colisionales del doblete del azufre. Éstas se utilizan para obtener una estimación de la densidad electrónica del gas. Producimos mapas de densidad electrónica, y en ellos buscamos también evidencias de asimetrías o frentes de choques, aunque la búsqueda no dio resultados positivos.

6.4. ¿Qué parámetros influyen en la formación estelar?

Finalmente, intentamos entender cuáles son los parámetros físicos, tanto de las galaxias como de los cúmulos en donde se encuentran, que determinan la intensidad del brote de formación estelar antes de que el desprendimiento del gas por presión hidrodinámica sea efectivo y quite el gas de la galaxia, con un efecto destructivo sobre su capacidad de formar estrellas.

Para este fin, calculamos la tasa de formación estelar total en los cuatro bins de edad que consideramos significativos. Esto se obtuvo, para cada galaxia, sumando la tasa de formación estelar en cada bin de todos los píxeles que se encuentran dentro de los discos galácticos. Se utilizó la historia de formación estelar así calculada, para buscar correlaciones con las que se cree sean las características físicas que determinan el efecto de la presión hidrodinámica sobre el gas y la formación estelar.

El primer efecto que notamos es una dependencia de la historia de formación estelar por la masa total de las galaxias. Si nos enfocamos en la SFR en el segundo bin de edad (durante el cual muy probablemente hubo la primera interacción de la galaxias con el gas intra-cúmulo), notamos que la intensidad del brote de formación estelar es inversamente proporcional a la masa total de la galaxia: las galaxias más masivas tienen brote de formación más débiles, comparado con su masa total. Esto se puede explicar si las galaxias más masivas, al entrar al cúmulo, tienen proporcionalmente menos gas con respecto a las menos masivas, un efecto que se había ya propuesto por Mahajan (2013). Este efecto se refleja también en la relación entre la masa estelar y la tasa de formación estelar específica.

Catinella et al. (2010) presentan una relación entre la masa estelar de galaxias y la masa específica del gas atómico (o sea, la razón entre la masa de gas calculada por la emisión a 21 cm y la masa estelar, ver, por ejemplo, sus figuras 9 y 10). Esta relación tiene una pendiente negativa, es decir, a pesar de que las galaxias más masivas tienen más gas, la cantidad de gas por unidad de masa estelar disminuye. Este efecto puede explicar la razón por la cual las galaxias menos masivas tienen **proporcionalmente** un brote de formación estelar más intenso con respecto a las galaxias más masivas.

Esta relación que encontramos es de gran importancia porque parece tener un papel relevante también con respecto a otras propiedades físicas que analizamos. Esto podría decirnos que la mayoría de las galaxias medusa de la muestra de GASP se observan en un momento en el que parecen dirigirse hacia el término de la actividad de formación estelar, después de haber interactuado por primera vez durante una época que va desde hace 20 hasta 570 millones de años atrás.

De manera menos evidente, también se encuentra una secuencia en la SFH analizando las dependencias de acuerdo a la distancia proyectada. La SFH de las galaxias más cercanas al centro de los cúmulos, es muy parecida a la que encontramos para las galaxias más masivas. Y de hecho, estas mismas resultan ser las más masivas, entre las que se encuentran en las cuatro clases de distancias. Por esto pensamos que es difícil concluir algo al respecto. Si nos enfocamos en la SFR más reciente, por otro lado, notamos que las más lejanas tienen las evidencias de apagado más fuertes, teniendo el valor promedio más bajo, tanto el absoluto como el normalizado a la SFR4. Por esto pensamos que, si hay un efecto tanto sobre el apagado como sobre el incremento de la formación estelar debido a la densidad, este efecto está diluido por otros efectos más fuertes o, a lo mejor, por el número de galaxias de la muestra no suficientemente alto.

Analizando la velocidad relativa de las galaxias en el cúmulo se encontró que las de mayor velocidad tienen altos valores de SFR en la época más reciente y probablemente se deba a que en esta temporada las galaxias podrían estar todavía presentando efectos importantes de RPS y, ya que ésta depende de la densidad del medio y de la velocidad, altas velocidades que estas galaxias alcanzan al acercarse al cúmulo podrían generar un efecto mayor de RPS, y entonces facilitar la formación estelar.

También se estudiaron las SFH de las galaxias dependiendo de la clasificación fotométrica de acuerdo a la morfología, es decir, la “JClass”. Aquí se encontró que las galaxias “J2” son las menos masivas y las “J5” las más masivas. Es probablemente por esta razón que, al ver los incrementos de SFR entre los bins de tiempo, se encuentra la misma tendencia que en el estudio de las SFH dependiendo de la masa, de modo que las galaxias “J2” muestran un brote de formación estelar significativo en la segunda época de tiempo más reciente respecto a las otras clases de galaxias. El hecho de que no encontramos ningún tipo de correlación o tendencia se puede también explicar con el tipo de clasificación adoptada, que es de algún modo subjetivo y fuertemente dependiente de la intensidad que las colas tienen en la banda B.

Finalmente se analizaron las SFH de las galaxias dependiendo de la fase del desprendimiento del gas en la que se encuentran. Las galaxias que presentan los valores más altos de SFR corresponden a las que se encuentran en etapas avanzadas de este proceso de desprendimiento de gas, o sea, las galaxias en donde no se observa desprendimiento de gas de forma evidente, sino únicamente truncamiento del gas ionizado en el disco. Las galaxias medusa con las colas más evidentes son también las galaxias más masivas, de modo que el brote de formación estelar en el segundo bin de tiempo es relativamente poco intenso. Por otro lado, las galaxias con disco truncado son las segundas más masivas pero poseen un intenso brote de formación estelar en la segunda época cósmica, así que esto podría deberse a que dichas galaxias ya se encuentran en etapas posteriores al desprendimiento del gas y ya presentaron el máximo efecto de RPS en el segundo bin de tiempo. Al comparar la sSFR de las galaxias de cúmulo y las galaxias de GASP de acuerdo a su fase de despojo de gas, se

nota que las galaxias en etapas intermedias y avanzadas de RPS presentan valores mayores respecto al promedio de las demás.

Por otra parte, al clasificar a las galaxias en el espacio-fase (graficando su distancia proyectada y su velocidad radial) se encontró que las que poseen disco truncado se ubican a velocidades menores y cerca del cúmulo, así que probablemente estas galaxias ya han avanzado en el medio intra-cumular perdiendo gas, manteniendo sólo una porción de éste en su disco gracias a que la fuerzas de gravedad actúa como fuerza restauradora y podría ser incluso que se encuentren en un punto de su órbita alejado del periastro. Las galaxias medusa se ubican a velocidades altas y distancias proyectadas bajas, así que al encontrarse cerca del cúmulo a densidades altas el efecto de RPS bajo el que se encuentran es importante. Las galaxias en otras etapas de despojo de gas pueden presentarse a distancias intermedias y velocidades más bajas, lo cual puede hablarnos de que están en las primeras fases de interacción con el cúmulo.

Respecto a la “JClass”, puede notarse que las galaxias “J2” (la clase menos masiva) se encuentran intermedias y alejadas del cúmulo y a bajas velocidades, mientras que las galaxias que presentan las colas de gas más prominentes (“J5”) se ubican cerca del cúmulo y pueden tener velocidades altas, lo cual nos puede decir la manera en la que se han ido generando estas morfologías en las galaxias durante su trayecto en el cúmulo. La distribución de las otras clases es más homogénea, sin embargo, dado que esta clasificación se basa en el aspecto de las galaxias en la banda B, es difícil concluir resultados de acuerdo a ella.

6.5. Resultados principales

En resumen, consideramos que los resultados mas importantes de estas tesis fueron los siguientes:

1. El aumento de la SFR es evidente no sólo en el bin de edad más joven, sino aún más en las épocas más tempranas. Éso es algo que no se había considerado antes de este trabajo.
2. El efecto de la presión hidrostática se puede notar en la distribución asimétrica de las estrellas de distintas edades. Este es un efecto significativo por lo menos para la mitad de las JF.
3. La búsqueda del efecto de RP a través de la distribución espacial de la SFR en los discos de las galaxias, tal y como se ha intentado hacer en galaxias simulada, es algo que puede funcionar, aun que no siempre en galaxias “reales”. Además, deducir las características de la velocidad de las galaxias resulta ser una tarea compleja, y no siempre proporciona resultados consistentes.
4. Nuestros resultados indican que el incremento de la formación estelar se da sobre todo a edades mayores de 20 Myr (el tiempo típico de la formación estelar detectada por la presencia de líneas en emisión), indicando que las galaxias medusa se detectan después de un cierto tiempo del comienzo de la interacción. La propiedad física que parece dominar la intensidad de este aumento es la masa estelar, aun que pensamos esta pueda ser a su vez debido a la correlación de la masa estelar con la masa de gas.
5. De acuerdo con las simulaciones numéricas y la prescripción de Gunn and Gott (1972), creemos que se pueda notar un efecto de la velocidad de las galaxias con respecto a la tasa de formación estelar reciente: a menor velocidad (radial), mayor es la SFR, mientras que las galaxias que se mueven más rápidamente son las que tienen los valores promedios menores de SFR. Sin embargo es importante hacer considerar que la muestra analizada aquí es pequeña y no se ha tenido en cuenta el efecto cruzado de la morfología.

6.6. Trabajo a futuro

Como perspectiva y trabajo a futuro se pretende publicar un artículo científico con los resultados de esta tesis y continuar con el estudio de galaxias medusas a diferente corrimiento al rojo. Entre las varias cosas que se pueden investigar pensamos que las siguientes tengan la prioridad mas altas:

- Analizar de forma mas detallada la historia de formación estelar en función de las características de las galaxias, y analizando posibles tendencias en función de la distancia del centro de las galaxias.
- Llevar a cabo un estudio como éste pero explorando en un desplazamiento al rojo más alto y hacer una comparación con un desplazamiento al rojo más bajo, puesto que ya hay una muestra observada por MUSE@VLT para realizarlo.
- Usar modelos de transferencia radiativa como “observaciones simuladas” para verificar si podemos obtener un tiempo más preciso para cuando ocurre el evento del brote de formación estelar.
- Comparar estos estudios con los resultados provenientes de observaciones de radio y sub-milimétricas que deberían permitirnos dar la explicación definitiva de por qué vemos un incremento en la formación estelar en galaxias con las masas más bajas.
- Hacer un estudio con una muestra de comparación más adecuada y entender los efectos de la morfología.

Bibliografía

Hubble Space Telescope, URL: <http://chandra.harvard.edu/>.

ESO 137-001. *Créditos: NASA/CX-C/UAH/M.Sun et al./the Hubble Heritage Team (STScI/AURA)*, URL: <https://apod.nasa.gov/apod/ap180825.html>.

Hubble Space Telescope, URL: <https://www.spacetelescope.org/news/heic1404/>.

URL: <https://www.cosmos.esa.int/web/planck>.

pPXF: <https://pypi.org/project/ppxf/>.

Uta Alvensleben. *On the Origin of S0 Galaxies*, volume 319, pages 81–100. 01 2004. doi: 10.1007/978-1-4020-2862-5_6.

R. Bacon, S. Bauer, P. Boehm, D. Boudon, S. Brau-Nogu e, P. Caillier, L. Capoani, C. M. Carollo, N. Champavert, T. Contini, E. Dagu s e, D. Dall e, B. Delabre, J. Devriendt, S. Dreizler, J. Dubois, M. Dupieux, J. P. Dupin, E. Emsellem, P. Ferruit, M. Franx, G. Gallou, J. Gerssen, B. Guiderdoni, T. Hahn, D. Hofmann, A. Jarno, A. Kelz, C. Koehler, W. Kollatschny, J. Kosmalski, F. Laurent, S. J. Lilly, J. Lizon, M. Loup as, S. Lynn, A. Manescau, R. M. McDermid, C. Monstein, H. Nicklas, L. Par es, L. Pasquini, A. P econtal-Rousset, E. P econtal, R. Pello, C. Petit, J. P. Picat, E. Popow, A. Quirrenbach, R. Reiss, E. Renault, M. Roth, J. Schaye, G. Soucail, M. Steinmetz, S. Stroebele, R. Stuik, P. Weilbacher, H. Wozniak, and P. T. De Zeeuw. Probing unexplored territories with muse: a second generation instrument for the vlt. In *Ground-based and airborne instrumentation for astronomy*, volume 6269 I, pages 1–9, United States, 2006. SPIE. ISBN 0819463345. doi: 10.1117/12.669772.

R. Bacon, M. Accardo, L. Adjali, H. Anwand, S. Bauer, I. Biswas, J. Blaizot, D. Boudon, S. Brau-Nogue, J. Brinchmann, P. Caillier, L. Capoani, C. M. Carollo, T. Contini, P. Couderc, E. Dagu s e, S. Deiries, B. Delabre, S. Dreizler, J. Dubois, M. Dupieux, C. Dupuy, E. Emsellem, T. Fechner, A. Fleischmann, M. Fran ois, G. Gallou, T. Gharsa, A. Glindemann, D. Gojak, B. Guiderdoni, G. Hansali, T. Hahn, A. Jarno, A. Kelz, C. Koehler, J. Kosmalski, F. Laurent, M. Le Floch, S. J. Lilly, J.-L. Lizon, M. Loup as, A. Manescau, C. Monstein, H. Nicklas, J.-C. Olaya, L. Par es, L. Pasquini, A. P econtal-Rousset, R. Pell o, C. Petit, E. Popow, R. Reiss, A. Remillieux, E. Renault, M. Roth, G. Rupprecht, D. Serre, J. Schaye, G. Soucail, M. Steinmetz, O. Streicher, R. Stuik, Valentin H, J. Vernet, P. Weilbacher, L. Wisotzki, and N. Yerle. The MUSE second-generation VLT instrument. In Ian S. McLean, Suzanne K. Ramsay, and Hideki Takami, editors, *Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy III*, volume 7735, pages 131 – 139. International Society for Optics and Photonics, SPIE, 2010. doi: 10.1117/12.856027. URL <https://doi.org/10.1117/12.856027>.

J. A. Baldwin, M. M. Phillips, and R. Terlevich. Classification parameters for the emission-line spectra of extragalactic objects. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 93:5, feb 1981. doi: 10.1086/130766. URL <https://doi.org/10.1086/130766>.

Hernquist Lars Barnes, Joshua E. Formation of dwarf galaxies in tidal tails. *Nature*, 360:715–717, 01 1992. doi: 10.1038/360715a0. URL <https://doi.org/10.1038/360715a0>.

Kenji Bekki. Galactic star formation enhanced and quenched by ram pressure in groups and clusters. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 438(1):444–462, 12 2013. ISSN 0035-8711. doi: 10.1093/mnras/stt2216. URL <https://doi.org/10.1093/mnras/stt2216>.

- Callum Bellhouse, Y. L. Jaffé, S. L. McGee, B. M. Poggianti, R. Smith, S. Tonnesen, J. Fritz, G. K. T. Hau, M. Gullieuszik, B. Vulcani, G. Fasano, A. Moretti, K. George, D. Bettoni, M. D'Onofrio, A. Omizzolo, and Y. K. Sheen. GASP. XV. A MUSE view of extreme ram-pressure stripping along the line of sight: physical properties of the jellyfish galaxy JO201. , 485(1):1157–1170, May 2019. doi: 10.1093/mnras/stz460.
- Daniel Bialas, Thorsten Lisker, Christoph Olczak, Rainer Spurzem, and Ralf Kotulla. On the occurrence of galaxy harassment. *Astronomy Astrophysics*, 576, 03 2015. doi: 10.1051/0004-6361/201425235.
- Laura G. Book and Andrew J. Benson. The Role of Ram Pressure Stripping in the Quenching of Cluster Star Formation. , 716(1):810–818, June 2010. doi: 10.1088/0004-637X/716/1/810.
- Joel N. Bregman, Brian A. Snider, Laura Grego, and Caroline V. Cox. Far-infrared emission from e and $e/s0$ galaxies. *The Astrophysical Journal*, 499(2):670–676, jun 1998. doi: 10.1086/305653. URL <https://doi.org/10.1086/305653>.
- H. Butcher and Jr. Oemler, A. The evolution of galaxies in clusters. I. ISIT photometry of Cl 0024+1654 and 3C 295. , 219:18–30, January 1978. doi: 10.1086/155751.
- Gene Byrd and Mauri Valtonen. Tidal generation of active spirals and $s0$ galaxies by rich clusters. *The Astrophysical Journal*, 350:89–94, 01 1990. doi: 10.1086/168362.
- A. R. Calette, V. Avila-Reese, A. Rodríguez-Puebla, H. Hernández-Toledo, and E. Papastergis. The HI- and H₂-to-Stellar Mass Correlations of Late- and Early-Type Galaxies and their Consistency with the Observational Mass Functions. , 54:443–483, October 2018.
- Rosa Calvi, Bianca M. Poggianti, and Benedetta Vulcani. The Padova–Millennium Galaxy and Group Catalogue (PM2GC): the group-finding method and the PM2GC catalogues of group, binary and single field galaxies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 416(1):727–738, 08 2011. ISSN 0035-8711. doi: 10.1111/j.1365-2966.2011.19088.x. URL <https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2011.19088.x>.
- Daniela Calzetti, Anne L. Kinney, and Thaisa Storchi-Bergmann. Dust Extinction of the Stellar Continua in Starburst Galaxies: The Ultraviolet and Optical Extinction Law. , 429:582, July 1994. doi: 10.1086/174346.
- Michele Cappellari. Improving the full spectrum fitting method: accurate convolution with Gauss–Hermite functions. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 466(1):798–811, 11 2016. ISSN 0035-8711. doi: 10.1093/mnras/stw3020. URL <https://doi.org/10.1093/mnras/stw3020>.
- Michele Cappellari. Improving the full spectrum fitting method: accurate convolution with Gauss–Hermite functions. , 466(1):798–811, Apr 2017. doi: 10.1093/mnras/stw3020.
- Michele Cappellari and Eric Emsellem. Parametric recovery of line-of-sight velocity distributions from absorption-line spectra of galaxies via penalized likelihood. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 116(816):138–147, feb 2004. doi: 10.1086/381875. URL <https://doi.org/10.1086/381875>.
- Jason A. Cardelli, Geoffrey C. Clayton, and John S. Mathis. The Relationship between Infrared, Optical, and Ultraviolet Extinction. , 345:245, October 1989. doi: 10.1086/167900.

- Cariddi, S., D'Onofrio, M., Fasano, G., Poggianti, B. M., Moretti, A., Gullieuszik, M., Bettoni, D., and Sciaratta, M. Characterization of omega-wings galaxy clusters - i. stellar light and mass profiles. *A&A*, 609:A133, 2018. doi: 10.1051/0004-6361/201731605. URL <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201731605>.
- Analia V. Smith Castelli, Favio R. Faifer, Tom Richtler, and Lilia P. Bassino. Galaxy populations in the Antlia cluster. II. Compact elliptical galaxy candidates. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 391: 685, 2008. doi: 10.1111/j.1365-2966.2008.13866.x.
- Barbara Catinella, David Schiminovich, Guinevere Kauffmann, Silvia Fabello, Jing Wang, Cameron Hummels, Jenna Lemonias, Sean M. Moran, Ronin Wu, Riccardo Giovanelli, Martha P. Haynes, Timothy M. Heckman, Antara R. Basu-Zych, Michael R. Blanton, Jarle Brinchmann, Tamás Budavári, Thiago Gonçalves, Benjamin D. Johnson, Robert C. Kennicutt, Barry F. Madore, Christopher D. Martin, Michael R. Rich, Linda J. Tacconi, David A. Thilker, Vivienne Wild, and Ted K. Wyder. The GALEX Arecibo SDSS Survey - I. Gas fraction scaling relations of massive galaxies and first data release. , 403(2):683–708, April 2010. doi: 10.1111/j.1365-2966.2009.16180.x.
- Cava, A., Bettoni, D., Poggianti, B. M., Couch, W. J., Moles, M., Varela, J., Biviano, A., D'Onofrio, M., Dressler, A., Fasano, G., Fritz, J., Kjærgaard, P., Ramella, M., and Valentinuzzi, T. Wingspe spectroscopy in the wide-field nearby galaxy-cluster survey*. *A&A*, 495(3):707–719, 2009. doi: 10.1051/0004-6361:200810997. URL <https://doi.org/10.1051/0004-6361:200810997>.
- Gilles Chabrier. Galactic stellar and substellar initial mass function. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 115(809):763–795, jul 2003. doi: 10.1086/376392. URL <https://doi.org/10.1086/376392>.
- Ryan Chown, Cheng Li, E. Athanassoula, Niu Li, Christine D. Wilson, Lin Lin, Houjun Mo, Laura C. Parker, and Ting Xiao. Linking bar- and interaction-driven molecular gas concentration with centrally enhanced star formation in EDGE-CALIFA galaxies. , 484(4):5192–5211, April 2019. doi: 10.1093/mnras/stz349.
- Maela Collobert, Marc Sarzi, Roger L. Davies, Harald Kuntschner, and Matthew Colless. Central stellar populations of early-type galaxies in low-density environments. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 370(3):1213–1222, 07 2006. ISSN 0035-8711. doi: 10.1111/j.1365-2966.2006.10538.x. URL <https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2006.10538.x>.
- Lennox L. Cowie and A. Songaila. Thermal evaporation of gas within galaxies by a hot intergalactic medium. *Nature*, 266:501–503, 04 2007. ISSN 5602. doi: 10.1038/266501a0. URL <https://doi.org/10.1038/266501a0>.
- Ilse De Looze, Maarten Baes, Stefano Zibetti, Jacopo Fritz, L. Cortese, Jonathan Davies, Joris Verstappen, George Bendo, Simone Bianchi, M. Clemens, Dominik Bomans, A. Boselli, E. Corbelli, A. Dariush, Sperello Di Serego Alighieri, D. Fadda, Diego Garcia-Appadoo, G. Gavazzi, C. Giovanardi, and E. Xilouris. The herschel virgo cluster survey: Vii. dust in cluster dwarf elliptical galaxies. *Astronomy and Astrophysics*, 518, 05 2010. doi: 10.1051/0004-6361/201014647.
- Gerard de Vaucouleurs. Recherches sur les nebuleuses extragalactiques. *Annales Astrophys.*, 11: 247, 1948.

- Tirna Deb, Marc A. W. Verheijen, Marco Gullieuszik, Bianca M. Poggianti, Jacqueline H. van Gorkom, Mpati Ramatsoku, Paolo Serra, Alessia Moretti, Benedetta Vulcani, Daniela Bettoni, L. Yara Jaffé, Stephanie Tonnesen, and Jacopo Fritz. GASP XXV: neutral hydrogen gas in the striking jellyfish galaxy JO204. , 494(4):5029–5043, April 2020. doi: 10.1093/mnras/staa968.
- Alan Dressler, Jr. Augustus Oemler, Warrick J. Couch, Ian Smail, Richard S. Ellis, Amy Barger, Harvey Butcher, Bianca M. Poggianti, and Ray M. Sharples. Evolution since $z=0.5$ of the morphology-density relation for clusters of galaxies. *The Astrophysical Journal*, 490(2):577–591, dec 1997. doi: 10.1086/304890. URL <https://doi.org/10.1086/304890>.
- H. Ebeling, W. Voges, H. Bohringer, A. C. Edge, J. P. Huchra, and U. G. Briel. Properties of the X-ray-brightest Abell-type clusters of galaxies (XBACs) from ROSAT All-Sky Survey data - I. The sample. , 281(3):799–829, Aug 1996. doi: 10.1093/mnras/281.3.799.
- H. Ebeling, L. N. Stephenson, and A. C. Edge. JELLYFISH: EVIDENCE OF EXTREME RAM-PRESSURE STRIPPING IN MASSIVE GALAXY CLUSTERS. *The Astrophysical Journal*, 781(2):L40, jan 2014a. doi: 10.1088/2041-8205/781/2/L40. URL <https://doi.org/10.1088/2041-8205/781/2/L40>.
- Harald Ebeling, Lauren N. Stephenson, and Alastair C. Edge. Jellyfish: Evidence of extreme ram-pressure stripping in massive galaxy clusters. *Astrophys. J.*, 781(2):L40, 2014b. doi: 10.1088/2041-8205/781/2/L40.
- D. Elbaz, R. Leiton, N. Nagar, K. Okumura, M. Franco, C. Schreiber, M. Pannella, T. Wang, M. Dickinson, T. Díaz-Santos, L. Ciesla, E. Daddi, F. Bournaud, G. Magdis, L. Zhou, and W. Rujopakarn. Starbursts in and out of the star-formation main sequence. , 616:A110, August 2018. doi: 10.1051/0004-6361/201732370.
- Fasano, G., Marmo, C., Varela, J., D’Onofrio, M., Poggianti, B. M., Moles, M., Pignatelli, E., Bettoni, D., Kjærgaard, P., Rizzi, L., Couch, W. J., and Dressler, A. Wings: a wide-field nearby galaxy-cluster survey - i. optical imaging. *A&A*, 445(3):805–817, 2006. doi: 10.1051/0004-6361:20053816. URL <https://doi.org/10.1051/0004-6361:20053816>.
- Matteo Fossati, Michele Fumagalli, Alessandro Boselli, Giuseppe Gavazzi, Ming Sun, and David J. Wilman. MUSE sneaks a peek at extreme ram-pressure stripping events – II. The physical properties of the gas tail of ESO137001. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 455(2):2028–2041, 11 2015. ISSN 0035-8711. doi: 10.1093/mnras/stv2400. URL <https://doi.org/10.1093/mnras/stv2400>.
- Matteo Fossati, Michele Fumagalli, Alessandro Boselli, Giuseppe Gavazzi, Ming Sun, and David J. Wilman. MUSE sneaks a peek at extreme ram-pressure stripping events - II. The physical properties of the gas tail of ESO137-001. , 455(2):2028–2041, Jan 2016. doi: 10.1093/mnras/stv2400.
- J. Fritz, B. M. Poggianti, A. Cava, T. Valentinuzzi, A. Moretti, D. Bettoni, A. Bressan, W. J. Couch, M. D’Onofrio, A. Dressler, G. Fasano, P.ærgaard@, M. Moles, A. Omizzolo, and J. Varela. WINGS-SPE II: A catalog of stellar ages and star formation histories, stellar masses and dust extinction values for local clusters galaxies. , 526:A45, Feb 2011. doi: 10.1051/0004-6361/201015214.
- J. Fritz, B. M. Poggianti, A. Cava, A. Moretti, J. Varela, D. Bettoni, W. J. Couch, M. D’Onofrio, A. Dressler, G. Fasano, P.ærgaard@, P. Marziani, M. Moles, and A. Omizzolo. WINGS-SPE. III. Equivalent width measurements, spectral properties, and evolution of local cluster galaxies. , 566:A32, June 2014. doi: 10.1051/0004-6361/201323138.

- J. Fritz et al. A spectrophotometric model applied to cluster galaxies: the WINGS dataset. *Astron. Astrophys.*, 470:137, 2007. doi: 10.1051/0004-6361/20077097.
- Jacopo Fritz, Alessia Moretti, Marco Gullieuszik, Bianca Poggianti, Gustavo Bruzual, Benedetta Vulcani, Fabrizio Nicastro, Yara Jaffé, Bernardo Cervantes Sodi, Daniela Bettoni, Andrea Biviano, Giovanni Fasano, Stéphane Charlot, Callum Bellhouse, and George Hau. GASP. III. JO36: A case of multiple environmental effects at play? *The Astrophysical Journal*, 848(2):132, oct 2017. doi: 10.3847/1538-4357/aa8f51. URL <https://doi.org/10.3847/1538-4357/aa8f51>.
- Yutaka Fujita and Masahiro Nagashima. Effects of ram pressure from the intracluster medium on the star formation rate of disk galaxies in clusters of galaxies. *The Astrophysical Journal*, 516(2): 619–625, may 1999. doi: 10.1086/307139. URL <https://doi.org/10.1086/307139>.
- Michele Fumagalli, Matteo Fossati, George K. T. Hau, Giuseppe Gavazzi, Richard Bower, Ming Sun, and Alessandro Boselli. MUSE sneaks a peek at extreme ram-pressure stripping events - I. A kinematic study of the archetypal galaxy ESO137-001. , 445(4):4335–4344, Dec 2014. doi: 10.1093/mnras/stu2092.
- G. Gavazzi, A. Boselli, and L. Carrasco. A CCD survey of galaxies. IV. Observations with the 2.1 M telescope at San Pedro Martir. , 112:257, September 1995.
- Junqiang Ge, Renbin Yan, Michele Cappellari, Shude Mao, Hongyu Li, and Youjun Lu. Recovering stellar population parameters via two full-spectrum fitting algorithms in the absence of model uncertainties. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 478(2):2633–2649, 05 2018. ISSN 0035-8711. doi: 10.1093/mnras/sty1245. URL <https://doi.org/10.1093/mnras/sty1245>.
- K George, B M Poggianti, M Gullieuszik, G Fasano, C Bellhouse, J Postma, A Moretti, Y Jaffé, B Vulcani, D Bettoni, J Fritz, P Côté, S K Ghosh, J B Hutchings, R Mohan, P Sreekumar, C S Stalin, A Subramaniam, and S N Tandon. UVIT view of ram-pressure stripping in action: star formation in the stripped gas of the GASP jellyfish galaxy JO201 in Abell 85. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 479(3):4126–4135, 06 2018. ISSN 0035-8711. doi: 10.1093/mnras/sty1452. URL <https://doi.org/10.1093/mnras/sty1452>.
- Gerson Goldhaber. The acceleration of the expansion of the universe: A brief early history of the supernova cosmology project (scp). *AIP Conference Proceedings*, 1166(1):53–72, 2009. doi: 10.1063/1.3232196. URL <https://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.3232196>.
- M. Gullieuszik, B. Poggianti, G. Fasano, S. Zaggia, A. Paccagnella, A. Moretti, D. Bettoni, M. D’Onofrio, W. J. Couch, B. Vulcani, J. Fritz, A. Omizzolo, A. Baruffolo, P. Schipani, M. Cappaccioli, and J. Varela. OmegaWINGS: OmegaCAM-VST observations of WINGS galaxy clusters. , 581:A41, Sep 2015. doi: 10.1051/0004-6361/201526061.
- Marco Gullieuszik, Bianca M. Poggianti, Alessia Moretti, Jacopo Fritz, Yara L. Jaffé, George Hau, Jan C. Bischo, Callum Bellhouse, Daniela Bettoni, Giovanni Fasano, Benedetta Vulcani, Mauro D’Onofrio, and Andrea Biviano. GASP. IV. A Muse View of Extreme Ram-pressure-stripping in the Plane of the Sky: The Case of Jellyfish Galaxy JO204. , 846(1):27, September 2017. doi: 10.3847/1538-4357/aa8322.
- James E. Gunn and III Gott, J. Richard. On the Infall of Matter Into Clusters of Galaxies and Some Effects on Their Evolution. *The Astrophysical Journal*, 176:1, Aug 1972. doi: 10.1086/151605.

- Christopher C. Hayward and Philip F. Hopkins. How stellar feedback simultaneously regulates star formation and drives outflows. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 465(2): 1682–1698, 11 2016. ISSN 0035-8711. doi: 10.1093/mnras/stw2888. URL <https://doi.org/10.1093/mnras/stw2888>.
- T. M. Heckman. An optical and radio survey of the nuclei of bright galaxies. Activity in normal galactic nuclei. , 500:187–199, July 1980.
- Timothy M. Heckman and Philip N. Best. The coevolution of galaxies and supermassive black holes: Insights from surveys of the contemporary universe. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 52(1):589–660, 2014. doi: 10.1146/annurev-astro-081913-035722. URL <https://doi.org/10.1146/annurev-astro-081913-035722>.
- Philip F. Hopkins, Lars Hernquist, Thomas J. Cox, Dusan Keres, and Stijn Wuyts. Dissipation and Extra Light in Galactic Nuclei. IV. Evolution in the Scaling Relations of Spheroids. , 691(2): 1424–1458, February 2009. doi: 10.1088/0004-637X/691/2/1424.
- J.C. Iniesta, Emilio Alfaro, J.G. Gorgas, E. Salvador-Solé, and H. Butcher. *The Many Scales in the Universe: JENAM 2004 Astrophysics Reviews*. 01 2006. ISBN 978-1-4020-4351-2. doi: 10.1007/1-4020-4526-3.
- W. Kapferer, C. Sluka, S. Schindler, C. Ferrari, and B. Ziegler. The effect of ram pressure on the star formation, mass distribution and morphology of galaxies. , 499(1):87–102, May 2009. doi: 10.1051/0004-6361/200811551.
- Guinevere Kauffmann et al. The host galaxies of AGN. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 346:1055, 2003. doi: 10.1111/j.1365-2966.2003.07154.x.
- Jr. Kennicutt, Robert C. Star Formation in Galaxies Along the Hubble Sequence. , 36:189–232, January 1998a. doi: 10.1146/annurev.astro.36.1.189.
- Jr. Kennicutt, Robert C. Star Formation in Galaxies Along the Hubble Sequence. , 36:189–232, January 1998b. doi: 10.1146/annurev.astro.36.1.189.
- Lisa J. Kewley, Michael A. Dopita, R. S. Sutherland, C. A. Heisler, and J. Trevena. Theoretical modeling of starburst galaxies. *Astrophys. J.*, 556:121–140, 2001. doi: 10.1086/321545.
- D.W. Kim and S. Pellegrini. *Hot Interstellar Matter in Elliptical Galaxies*. Astrophysics and Space Science Library. Springer New York, 2011. ISBN 9781461405801. URL <https://books.google.com.mx/books?id=5zi3zlymFDcC>.
- J. Köppen, P. Jáchym, R. Taylor, and J. Palouš. Ram pressure stripping made easy: an analytical approach. , 479(4):4367–4390, October 2018. doi: 10.1093/mnras/sty1610.
- John Kormendy and Illingworth D. Rotation of the bulge components of disk galaxies. *The Astrophysical Journal*, 256:460–480, 04 1982. doi: 10.1086/159923.
- T. Kronberger, W. Kapferer, C. Ferrari, S. Unterguggenberger, and S. Schindler. On the influence of ram-pressure stripping on the star formation of simulated spiral galaxies. *Astron. Astrophys.*, 481:337, 2008. doi: 10.1051/0004-6361:20078904.
- R. B. Larson, B. M. Tinsley, and C. N. Caldwell. The evolution of disk galaxies and the origin of S0 galaxies. , 237:692–707, May 1980. doi: 10.1086/157917.

- Lihwai Lin, Francesco Belfiore, Hsi-An Pan, M. S. Bothwell, Pei-Ying Hsieh, Shan Huang, Ting Xiao, Sebastián F. Sánchez, Bau-Ching Hsieh, Karen Masters, S. Ramya, Jing-Hua Lin, Chin-Hao Hsu, Cheng Li, Roberto Maiolino, Kevin Bundy, Dmitry Bizyaev, Niv Drory, Héctor Ibarra-Medel, Ivan Lacerna, Tim Haines, Rebecca Smethurst, David V. Stark, and Daniel Thomas. SDSS-IV MaNGA-resolved Star Formation and Molecular Gas Properties of Green Valley Galaxies: A First Look with ALMA and MaNGA. , 851(1):18, December 2017. doi: 10.3847/1538-4357/aa96ae.
- J. Liske, D. J. Lemon, S. P. Driver, N. J. G. Cross, and W. J. Couch. The Millennium Galaxy Catalogue: 16 BMGC
lt; 24 galaxy counts and the calibration of the local galaxy luminosity function. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 344(1):307–324, 09 2003. ISSN 0035-8711. doi: 10.1046/j.1365-8711.2003.06826.x. URL <https://doi.org/10.1046/j.1365-8711.2003.06826.x>.
- M. Longhetti and P. Saracco. Stellar mass estimates in early-type galaxies: procedures, uncertainties and models dependence. , 394(2):774–794, April 2009. doi: 10.1111/j.1365-2966.2008.14375.x.
- P.M. Lugger and W. Liller. *Asteroids to Quasars: A Symposium Honoring William Liller*. Cambridge University Press, 2004. ISBN 9780521617048. URL <https://books.google.com.mx/books?id=i0UPY9ChjaQC>.
- Piero Madau and Mark Dickinson. Cosmic Star-Formation History. , 52:415–486, August 2014. doi: 10.1146/annurev-astro-081811-125615.
- Piero Madau, Lucia Pozzetti, and Mark Dickinson. The Star Formation History of Field Galaxies. , 498(1):106–116, May 1998. doi: 10.1086/305523.
- Natasha Maddox, M. J. Jarvis, and T. A. Oosterloo. Optimizing commensality of radio continuum and spectral line observations in the era of the SKA. , 460(4):3419–3431, August 2016. doi: 10.1093/mnras/stw1164.
- Smriti Mahajan. Evidence for galaxies being pre-processed before accreted into clusters. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters*, 431(1):L117–L121, 02 2013. ISSN 1745-3925. doi: 10.1093/mnrasl/slt021. URL <https://doi.org/10.1093/mnrasl/slt021>.
- Conor McPartland, Harald Ebeling, Elke Roediger, and Kelly Blumenthal. Jellyfish: the origin and distribution of extreme ram-pressure stripping events in massive galaxy clusters. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 455(3):2994–3008, 11 2015. ISSN 0035-8711. doi: 10.1093/mnras/stv2508. URL <https://doi.org/10.1093/mnras/stv2508>.
- I. Mirabel, Horacio Dottori, and D. Lutz. Genesis of a dwarf galaxy from the debris of the antennae. *Astronomy and Astrophysics*, 256:L19–L22, 02 1992.
- Ben Moore. Galaxy harassment and the evolution of clusters of galaxies. *Nature*, 379:613–616, 01 1996. doi: 10.1038/379613a0. URL <https://doi.org/10.1038/379613a0>.
- A. Moretti, M. Gullieuszik, B. Poggianti, A. Paccagnella, W. J. Couch, B. Vulcani, D. Bettoni, J. Fritz, A. Cava, G. Fasano, M. D’Onofrio, and A. Omizzolo. OmegaWINGS: spectroscopy in the outskirts of local clusters of galaxies. , 599:A81, Mar 2017. doi: 10.1051/0004-6361/201630030.
- A Moretti, R Paladino, B M Poggianti, M D’Onofrio, D Bettoni, M Gullieuszik, Y L Jaffé, B Vulcani, G Fasano, J Fritz, and K Torstensson. GASP – X. APEX observations of molecular gas in the discs and in the tails of ram-pressure stripped galaxies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical*

- Society*, 480(2):2508–2520, 07 2018. ISSN 0035-8711. doi: 10.1093/mnras/sty2021. URL <https://doi.org/10.1093/mnras/sty2021>.
- R. Morganti, P. T. De Zeeuw, T. A. Oosterloo, R. M. McDermid, D. Krajnović, M. Cappellari, F. Kenn, A. Weijmans, and M. Sarzi. Neutral hydrogen in nearby elliptical and lenticular galaxies: the continuing formation of early-type galaxies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 371(1):157–169, 08 2006. ISSN 0035-8711. doi: 10.1111/j.1365-2966.2006.10681.x. URL <https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2006.10681.x>.
- Carlo Nipoti and James Binney. The role of thermal evaporation in galaxy formation. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 382(4):1481–1493, 11 2007. ISSN 0035-8711. doi: 10.1111/j.1365-2966.2007.12505.x. URL <https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2007.12505.x>.
- NSO. <https://www.schoolsobservatory.org/learn/astro/gals/class>.
- Omizzolo, A., Fasano, G., Reverte Paya, D., De Santis, C., Grado, A., Bettoni, D., Poggianti, B., D’Onofrio, M., Moretti, A., Varela, J., Fritz, J., Gullieuszik, M., Cava, A., Grazian, A., and Moles, M. U-band photometry of 17 wings clusters. *A&A*, 561:A111, 2014. doi: 10.1051/0004-6361/201322924. URL <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201322924>.
- T. Oosterloo, R. Morganti, E. Sadler, T. Hulst, and Paolo Serra. Extended, regular hi structures around early-type galaxies. <http://dx.doi.org/10.1051/0004-6361:20066384>, 465, 01 2007. doi: 10.1051/0004-6361:20066384.
- D.E. Osterbrock. *Astrophysics of Gaseous Nebulae and Active Galactic Nuclei*. A Series of books in astronomy. University Science Books, 1989. ISBN 9780935702224. URL <https://books.google.com.mx/books?id=XobvAAAAMAAJ>.
- A. Paccagnella, B. Vulcani, B. M. Poggianti, J. Fritz, G. Fasano, A. Moretti, Yara L. Jaffé, A. Biviano, M. Gullieuszik, D. Bettoni, A. Cava, W. Couch, and M. D’Onofrio. OmegaWINGS: The First Complete Census of Post-starburst Galaxies in Clusters in the Local Universe. , 838(2):148, April 2017. doi: 10.3847/1538-4357/aa64d7.
- T Padmanabham. Theoretical astrophysics. *Cambridge University Press*, 2002.
- M. B. Pandge, S. S. Sonkamble, Viral Parekh, Pratik Dabhade, Avni Parmar, M. K. Patil, and Somak Raychaudhury. AGN Feedback in Galaxy Groups: A Detailed Study of X-Ray Features and Diffuse Radio Emission in IC 1262. , 870(2):62, January 2019. doi: 10.3847/1538-4357/aaf105.
- Vaishali Parkash, Michael J. I. Brown, T. H. Jarrett, and Nicolas J. Bonne. Relationships between HI Gas Mass, Stellar Mass, and the Star Formation Rate of HICAT+WISE (H I-WISE) Galaxies. , 864(1):40, September 2018. doi: 10.3847/1538-4357/aad3b9.
- Hugo Pfister, Massimo Dotti, Clotilde Laigle, Yohan Dubois, and Marta Volonteri. Real galaxy mergers from galaxy pair catalogues. , 493(1):922–929, March 2020. doi: 10.1093/mnras/staa227.
- L. S. Pilyugin, E. K. Grebel, and I. A. Zinchenko. On the radial abundance gradients in discs of irregular galaxies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 450(3):3254–3263, 05 2015. ISSN 0035-8711. doi: 10.1093/mnras/stv932. URL <https://doi.org/10.1093/mnras/stv932>.
- B. Poggianti, G. Fasano, A. Omizzolo, M. Gullieuszik, Daniela Bettoni, A. Moretti, Angela Paccagnella, Y. Jaffé, Benedetta Vulcani, Jacopo Fritz, Warrick Couch, and Mauro D’Onofrio.

- Jellyfish galaxy candidates at low redshift. *The Astronomical Journal*, 151:78, 02 2016. doi: 10.3847/0004-6256/151/3/78.
- Bianca M. Poggianti, Giovanni Fasano, Daniela Bettoni, Antonio Cava, A. Dressler, E. Vanzella, Jesus Varela, Warrick J. Couch, Mauro D'Onofrio, Jacopo Fritz, Per Kjaergaard, Mariano Moles, and T. Valentiniuzzi. THE EVOLUTION OF SPIRAL, s0, AND ELLIPTICAL GALAXIES IN CLUSTERS. *The Astrophysical Journal*, 697(2):L137–L140, may 2009. doi: 10.1088/0004-637x/697/2/1137. URL <https://doi.org/10.1088/0004-637x/697/2/1137>.
- Bianca M. Poggianti, Alessia Moretti, Marco Gullieuszik, Jacopo Fritz, Yara Jaffé, Daniela Bettoni, Giovanni Fasano, Callum Bellhouse, George Hau, Benedetta Vulcani, Andrea Biviano, Alessandro Omizzolo, Angela Paccagnella, Mauro D'Onofrio, Antonio Cava, Y.-K. Sheen, Warrick Couch, and Matt Owers. GASP. i. gas stripping phenomena in galaxies with MUSE. *The Astrophysical Journal*, 844(1):48, jul 2017. doi: 10.3847/1538-4357/aa78ed. URL <https://doi.org/10.3847/1538-4357/aa78ed>.
- Bianca M. Poggianti, Marco Gullieuszik, Stephanie Tonnesen, Alessia Moretti, Benedetta Vulcani, Mario Radovich, Yara Jaffé, Jacopo Fritz, Daniela Bettoni, Andrea Franchetto, Giovanni Fasano, Callum Bellhouse, and Alessandro Omizzolo. GASP XIII. Star formation in gas outside galaxies. , 482(4):4466–4502, February 2019. doi: 10.1093/mnras/sty2999.
- P. Popesso, A. Concas, L. Morselli, C. Schreiber, G. Rodighiero, G. Cresci, S. Belli, G. Erfanianfar, C. Mancini, H. Inami, M. Dickinson, O. Ilbert, M. Pannella, and D. Elbaz. The main sequence of star-forming galaxies - I. The local relation and its bending. , 483(3):3213–3226, March 2019. doi: 10.1093/mnras/sty3210.
- Bastian Proxauf, Silvia Oettl, and Stefan Kimeswenger. Upgrading electron temperature and electron density diagnostic diagrams of forbidden line emission. *Astronomy & Astrophysics*, 561:A10, 2014.
- M. Ramatsoku, P. Serra, B. M. Poggianti, A. Moretti, M. Gullieuszik, D. Bettoni, T. Deb, J. Fritz, J. H. van Gorkom, Y. L. Jaffé, S. Tonnesen, M. A. W. Verheijen, B. Vulcani, B. Hugo, G. I. G. Józsa, F. M. Maccagni, S. Makhathini, A. Ramaila, O. Smirnov, and K. Thorat. GASP - XVII. H I imaging of the jellyfish galaxy JO206: gas stripping and enhanced star formation. , 487(4): 4580–4591, August 2019. doi: 10.1093/mnras/stz1609.
- Mariana Ramos-Martínez, Gilberto C Gómez, and Ángeles Pérez-Villegas. Mhd simulations of ram pressure stripping of a disc galaxy. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 476: 3781–3792, 05 2018. doi: 10.1093/MNRAS/STY393.
- Leslie J. Sage, Gary A. Welch, and Lisa M. Young. The cool ISM in elliptical galaxies. i. a survey of molecular gas. *The Astrophysical Journal*, 657(1):232–240, mar 2007. doi: 10.1086/510577. URL <https://doi.org/10.1086/510577>.
- Amélie Saintonge, Guinevere Kauffmann, Carsten Kramer, Linda J. Tacconi, Christof Buchbender, Barbara Catinella, Silvia Fabello, Javier Graciá-Carpio, Jing Wang, Luca Cortese, Jian Fu, Reinhard Genzel, Riccardo Giovanelli, Qi Guo, Martha P. Haynes, Timothy M. Heckman, Mark R. Krumholz, Jenna Lemonias, Cheng Li, Sean Moran, Nemesio Rodriguez-Fernandez, David Schiminovich, Karl Schuster, and Albrecht Sievers. COLD GASS, an IRAM legacy survey of molecular gas in massive galaxies - I. Relations between H₂, H I, stellar content and structural properties. , 415(1):32–60, July 2011. doi: 10.1111/j.1365-2966.2011.18677.x.

- D. B. Sanders and I. F. Mirabel. Luminous Infrared Galaxies. , 34:749, January 1996. doi: 10.1146/annurev.astro.34.1.749.
- Marc Sarzi, Jesús Falcón-Barroso, Roger L. Davies, Roland Bacon, Martin Bureau, Michele Cappellari, P. Tim de Zeeuw, Eric Emsellem, Kambiz Fathi, Davor Krajinovic, Harald Kuntschner, Richard M. McDermid, and Reynier F. Peletier. The SAURON project—V. Integral-field emission-line kinematics of 48 elliptical and lenticular galaxies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 366(4):1151–1200, 03 2006. ISSN 0035-8711. doi: 10.1111/j.1365-2966.2005.09839.x. URL <https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2005.09839.x>.
- Joop Schaye, Robert A. Crain, Richard G. Bower, Michelle Furlong, Matthieu Schaller, Tom Theuns, Claudio Dalla Vecchia, Carlos S. Frenk, I. G. McCarthy, John C. Helly, Adrian Jenkins, Y. M. Rosas-Guevara, Simon D. M. White, Maarten Baes, C. M. Booth, Peter Camps, Julio F. Navarro, Yan Qu, Alireza Rahmati, Till Sawala, Peter A. Thomas, and James Trayford. The EAGLE project: simulating the evolution and assembly of galaxies and their environments. , 446(1): 521–554, January 2015. doi: 10.1093/mnras/stu2058.
- Isaac Shlosman, Mitchell Begelman, and Julian Frank. The fuelling of active galactic nuclei. *Nature*, 345, 07 1990. doi: 10.1038/345679a0.
- Joseph Silk and Gary A. Mamon. The current status of galaxy formation. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 12(8):917–946, August 2012. doi: 10.1088/1674-4527/12/8/004.
- Joseph Silk and Martin J. Rees. Quasars and galaxy formation. , 331:L1–L4, March 1998.
- R. Smith, J. I. Davies, and A. H. Nelson. How effective is harassment on infalling late-type dwarfs? *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 405(3):1723–1735, 06 2010. ISSN 0035-8711. doi: 10.1111/j.1365-2966.2010.16545.x. URL <https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2010.16545.x>.
- D. Steinhauser, M. Haider, W. Kapferer, and S. Schindler. Galaxies undergoing ram-pressure stripping: the influence of the bulge on morphology and star formation rate. *Astronomy and Astrophysics*, 544:A54, Aug 2012. doi: 10.1051/0004-6361/201118311.
- Dominik Steinhauser, Sabine Schindler, and Volker Springel. Simulations of ram-pressure stripping in galaxy-cluster interactions. *Astron. Astrophys.*, 591:A51, 2016. doi: 10.1051/0004-6361/201527705.
- A. Toomre and J. Toomre. Galactic bridges and tails. *Astrophys. J.*, 178:623–666, 1972. doi: 10.1086/151823.
- P Troncoso-Iribarren, N Padilla, C Santander, C D P Lagos, D García-Lambas, S Rodríguez, and S Contreras. The better half - Asymmetric star-formation due to ram pressure in the EAGLE simulations. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 02 2020. ISSN 0035-8711. doi: 10.1093/mnras/staa274. URL <https://doi.org/10.1093/mnras/staa274>. staa274.
- Valentinuzzi, T., Woods, D., Fasano, G., Riello, M., D’Onofrio, M., Varela, J., Bettoni, D., Cava, A., Couch, W. J., Dressler, A., Fritz, J., Moles, M., Omizzolo, A., Poggianti, B. M., and Kjærgaard, P. Wings: a wide-field nearby galaxy-cluster survey*** - iii. deep near-infrared photometry of 28 nearby clusters. *A&A*, 501(3):851–864, 2009. doi: 10.1051/0004-6361/200811051. URL <https://doi.org/10.1051/0004-6361/200811051>.

- Varela, J., D’Onofrio, M., Marmo, C., Fasano, G., Bettoni, D., Cava, A., Couch, W. J., Dressler, A., Kjærgaard, P., Moles, M., Pignatelli, E., Poggianti, B. M., and Valentinuzzi, T. Wings: A wide-field nearby galaxy-cluster survey***** - ii. deep optical photometry of 77 nearby clusters. *A&A*, 497(3):667–676, 2009. doi: 10.1051/0004-6361/200809876. URL <https://doi.org/10.1051/0004-6361/200809876>.
- Bernd Vollmer, Chantal Balkowski, and V. Cayatte. The effects of ram pressure stripping on cluster galaxies. *Astrophysics and Space Science*, 281:359–362, 07 2002. doi: 10.1023/A:1019575905669.
- Benedetta Vulcani, Bianca M. Poggianti, Marco Gullieuszik, Alessia Moretti, Stephanie Tonnesen, Yara L. Jaffé, Jacopo Fritz, Giovanni Fasano, and Daniela Bettoni. Enhanced star formation in both disks and ram-pressure-stripped tails of GASP jellyfish galaxies. *The Astrophysical Journal*, 866(2):L25, oct 2018. doi: 10.3847/2041-8213/aae68b. URL <https://doi.org/10.3847/2041-8213/aae68b>.
- Benedetta Vulcani, Jacopo Fritz, Bianca M. Poggianti, Daniela Bettoni, Andrea Franchetto, Alessia Moretti, Marco Gullieuszik, Yara Jaffé, Andrea Biviano, Mario Radovich, and Matilde Mingozzi. GASP XXIV. the history of abruptly quenched galaxies in clusters. *The Astrophysical Journal*, 892(2):146, apr 2020. doi: 10.3847/1538-4357/ab7bdd. URL <https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab7bdd>.
- Javier Zaragoza-Cardiel, Jacopo Fritz, Itziar Aretxaga, Divakara Mayya, Daniel Rosa-González, John E. Beckman, Gustavo Bruzual, Stephane Charlot, and Luis Lomelí-Núñez. Detection of the self-regulation of star formation in galaxy discs. , 487(1):L61–L66, July 2019. doi: 10.1093/mnras/slz093.

