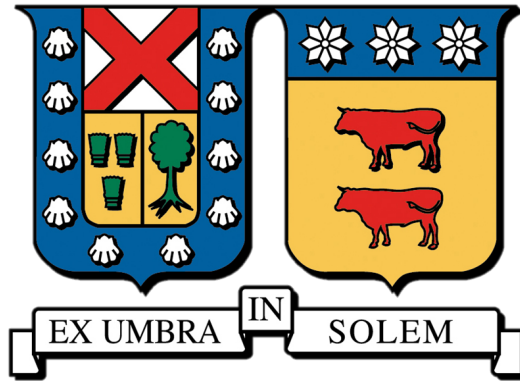


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE FÍSICA



Evento extremo de *Ram-Pressure Stripping* en el cúmulo
Abell 133

Justine Martina Anneke Haefele Garrido

TESINA PARA OPTAR AL GRADO DE LICENCIADA EN ASTROFÍSICA

Tutor: Dra. Yara Jaffé Ribbi

Co-Tutor: Dra. Amrutha Belwadi Manjunatha

23 de agosto de 2026



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): ☒ Memoria o trabajo de título ☐ Tesis de Postgrado

Título del trabajo: Evento extremo de Ram Pressure Stripping en el cúmulo Abell 133

Nombre del candidato(a): Justine Haefele Garrido

Carrera / Grado: Licenciatura en Astrofísica

Campus: Casa Central **Departamento:** Física

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Yara Jaffé Ribbi, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución.

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL (marcar una opción)

☒ El trabajo **NO contiene** información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

☐ El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (**embargo**) por (**marcar una opción**):

☐ 6 meses ☐ 12 meses ☐ 2 años ☐ 3 años ☐ 5 años ☐ 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 24/08/26 **Firma:** 

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 24/08/26 **Firma:** 

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.

Resumen

Los cúmulos de galaxias son las estructuras gravitacionalmente ligadas más grandes del Universo y constituyen un laboratorio ideal para estudiar los mecanismos ambientales que impulsan la evolución galáctica, transformando la morfología de las galaxias y desencadenando el cese de su formación estelar. En estos ambientes, el *ram-pressure stripping* (RPS) destaca como uno de los mecanismos hidrodinámicos más eficientes para remover el medio interestelar durante la primera caída de las galaxias hacia el centro del cúmulo en órbitas predominantemente radiales. En este trabajo reportamos el descubrimiento de una estructura filamentosa de color azul ubicada en el cúmulo Abell 133 ($z \sim 0.057$), denominada *blue stripes*, la cual alcanza una longitud proyectada de al menos ~ 230 kpc y un ancho de ~ 140 kpc. Con el objetivo de determinar si la estructura se encuentra asociada al cúmulo, identificar su mecanismo de ionización dominante y establecer su galaxia progenitora, obtuvimos observaciones espectroscópicas en el rango óptico utilizando el instrumento IMACS, ubicado en el telescopio de 6.5m *Magellan Baade*.

Nuestro análisis confirma que los *blue stripes* se encuentran ligados gravitacionalmente al cúmulo, presentando un redshift en el rango $z \sim [0.0566 - 0.0570]$. Mediante un diagrama de espacio de fase identificamos a la galaxia elíptica LEDA 821642, ubicada a $\sim 0.3 R_{\text{proj}}$ del centro del cúmulo, como la progenitora más probable del material. Aunque la velocidad relativa del sistema respecto al centro del cúmulo es cercana a cero, interpretamos este resultado como consecuencia de un fuerte efecto de proyección, consistente con un proceso de *stripping* que ocurre principalmente en el plano del cielo. El diagrama BPT indica que la ionización del gas está dominada por la formación estelar *in situ*. Además, la estructura a gran escala alrededor de Abell 133 sugiere que este sistema y otras tres galaxias medusa están siendo acretados por el cúmulo mientras siguen una trayectoria aproximadamente perpendicular al filamento principal.

Los *blue stripes* corresponden, por tanto, a una cola unilateral y extraplanar de gas ionizado, caracterizada por la emisión de $H\alpha$, $H\beta$, [OIII] y [NII], con una extensión de aproximadamente 63 veces el radio efectivo de su galaxia progenitora. Esta escala, junto con la ausencia de perturbaciones en la componente estelar, clasifica este sistema como un caso extremo de *ram-pressure stripping*. En consecuencia, los *blue stripes* constituyen una de las regiones de gas ionizado (*Extended Ionized Gas regions*; EIGs) más extensas reportadas alrededor de una galaxia individual y, además, presentan

un ancho excepcional de ~ 140 kpc, aparentemente sin precedentes en la literatura. Cabe destacar que, dado que las observaciones de banda ancha revelan principalmente el continuo estelar, la longitud reportada de los *blue stripes* debe considerarse como un límite inferior de la extensión real del material desprendido, la cual podría ser mayor al incorporar observaciones de banda angosta centradas en líneas de emisión de gas ionizado (como $H\alpha$).

Por otra parte, la naturaleza elíptica de la galaxia progenitora plantea interrogantes sobre el origen de su reserva de gas, capaz de generar una cola ionizada de estas dimensiones. Para abordar esta interrogante proponemos, como trabajo futuro, observaciones con el espectrógrafo de campo integral MUSE, con el fin de caracterizar la cinemática del sistema, buscar características típicas de un evento *post-merger*, el cual pudo haber suministrado el gas actualmente observado, y delimitar con mayor precisión la extensión de la componente difusa. Así, los *blue stripes* de Abell 133 se posicionan como uno de los ejemplos más extremos conocidos de una cola de gas ionizado producida por *ram-pressure stripping* y como uno de los pocos casos asociados a una galaxia elíptica.

Abstract

Galaxy clusters are the largest gravitationally bound structures in the Universe and provide a natural laboratory for studying the environmental mechanisms that drive galaxy evolution by transforming galaxy morphologies and quenching star formation. In these high-density cluster environments, ram-pressure stripping (RPS) is one of the most efficient hydrodynamical processes for removing the interstellar medium during a galaxy’s first infall toward the cluster center on predominantly radial orbits. In this work, we report the discovery of a blue filamentary structure in the galaxy cluster Abell 133 ($z \sim 0.057$), hereafter referred to as the blue stripes. This structure extends over a projected length of at least ~ 230 kpc and a width of ~ 140 kpc. To determine whether it is physically associated with the cluster, identify its dominant ionization mechanism, and establish its progenitor galaxy, we obtained optical spectroscopic observations using the IMACS instrument on the 6.5m Magellan Baade Telescope.

Our analysis confirms that the *blue stripes* are gravitationally bound to the cluster, exhibiting a redshift in the range $z \sim [0.0566 - 0.0570]$. Using a phase-space diagram, we identify the elliptical galaxy LEDA 821642, located at $\sim 0.3 R_{\text{proj}}$ from the cluster center, as the most probable progenitor of the material. Although the relative velocity of the system with respect to the cluster center is close to zero, we interpret this result as a consequence of a strong projection effect, consistent with a stripping process occurring primarily in the plane of the sky. The BPT diagram indicates that the gas ionization is dominated by *in situ* star formation. Furthermore, the large-scale structure around Abell 133 suggests that this system and three other jellyfish galaxies are being accreted by the cluster while following a trajectory approximately perpendicular to the main filament.

The *blue stripes* correspond, therefore, to a one-sided and extraplanar tail of ionized gas, characterized by $H\alpha$, $H\beta$, [OIII], and [NII] emission, with an extent of approximately 63 times the effective radius of its progenitor galaxy. This extraordinary scale, together with the absence of significant disturbances in the stellar component, classifies the system as an extreme case of ram-pressure stripping. Consequently, the blue stripes represent one of the largest Extended Ionized Gas regions (EIGs) reported around a single galaxy and exhibit an exceptional width of ~ 140 kpc, which appears to be unprecedented in the literature. Notably, since broadband observations primarily reveal the stellar continuum, the reported length of the *blue stripes* must be considered

a lower limit of the true extent of the stripped material, which could be larger when incorporating narrowband observations centered on ionized gas emission lines (such as $H\alpha$).

On the other hand, the elliptical nature of the progenitor galaxy raises questions regarding the origin of its gas reservoir, which is capable of generating an ionized tail of these dimensions. To address this question, we propose, as future work, observations with the MUSE integral field spectrograph in order to characterize the kinematics of the system, search for typical features of a *post-merger* event which could have supplied the currently observed gas, and more precisely constrain the extent of the diffuse component. Thus, the *blue stripes* of Abell 133 position themselves as one of the most extreme known examples of an ionized gas tail produced by ram-pressure stripping, and as one of the few cases associated with an elliptical galaxy.

Agradecimientos

En primer lugar, quiero agradecer a mis padres, Pamela y Eduardo, por su apoyo incondicional en cada uno de los aspectos de mi vida. Gracias por acompañarme en cada decisión y paso que doy con mucho amor, impulsándome siempre a hacer lo que me haga feliz. Les agradezco profundamente todos los esfuerzos que han hecho para que pueda convertirme en la primera profesional de nuestra familia. A mis amistades de la licenciatura, que sin duda fueron indispensables para llegar hasta aquí, gracias por su compañía en las buenas y en las malas, por todas las risas y ayuda en los estudios; espero que nuestros caminos se crucen muchas veces más en el futuro. A Martín, gracias por recorrer conmigo esta etapa, acompañándome con mucho amor, motivación y brindándome paz en tiempos caóticos; sigamos creciendo juntos. A mi estimado profesor del colegio, John Sepúlveda, gracias por transmitirme en cada clase su pasión por la física y por fomentar mi curiosidad por esta ciencia tan bonita que busca comprender la naturaleza. Al profesor Iván Szanto Narea, quiero expresar mi más profundo agradecimiento por haberme recibido en su clase con los brazos abiertos durante mi primer año en la universidad, tomándose el tiempo de enseñarme matemáticas con una paciencia y dedicación gigante. Su apoyo fue fundamental para que pudiera seguir avanzando en la carrera de mis sueños. Gracias a mi abuelo Alejandro, quien desde otro plano terrenal puso al profesor Iván en mi camino, siempre acompañándome en el corazón. A la profesora Odette Toloza, por darme la oportunidad de tener mi primera experiencia en la investigación.

A mi profesora guía, Yara Jaffé, a quien admiro enormemente, como persona y como científica. Gracias por alentarme durante todo este tiempo para perseguir mis objetivos, por creer en mí aún cuando dudaba de mi misma, y por alimentar mis ganas de seguir aprendiendo del Universo. Estoy muy feliz de haber tenido la oportunidad de poder aprender y trabajar con usted. A mi co-tutora, Amrutha Belwadi, quien desde el otro lado del mundo estuvo siempre pendiente para resolver mis dudas. Agradezco a Raúl y Franco por su gran disposición a ayudarme, y al profesor Diego Pallero por ser tan cercano y abierto a conversar de la vida. Y por último, a mí misma, por mantenerme curiosa acerca del Cosmos y por la resiliencia de continuar aún en los momentos difíciles.

Índice general

1. Introducción	1
1.1. Estructura a gran escala del Universo	1
1.2. Cúmulos de galaxias y la influencia del entorno en la evolución galáctica	2
1.2.1. Ram pressure stripping	2
1.2.2. Características observacionales	3
1.2.3. Extreme RPS	5
1.3. Reporte de colas azules extremas en el cúmulo A133	6
2. Metodología	7
2.1. Datos	7
2.2. Reducción primaria	8
2.2.1. Identificación de espectros en la <i>long-slit</i>	10
2.2.2. <i>Traceback process</i>	10
2.3. Reducción espectroscópica	11
2.3.1. Calibración de longitud de onda	12
2.3.2. Calibración de flujo	13
2.4. Redshift	15
2.5. Line-ratio diagnostic: diagrama BPT	17
3. Resultados	18
3.1. Pertenencia al cúmulo	18
3.2. Posible progenitor y fase orbital	18
3.3. Fuente de ionización	22
3.4. Ubicación a gran escala	22
3.5. Morfología de la galaxia progenitora y origen del gas despojado	23
4. Discusión y Conclusiones	25
4.1. Discusión	25

4.2. Conclusiones	27
<i>A. Data Reduction files.</i>	34
B. Parámetros del proceso de extracción.	35
C. Flujo y S/N de cada línea	37
D. Esquema del modelo de <i>fireballs</i>	38

Capítulo 1

Introducción

1.1. Estructura a gran escala del Universo

A escalas de entre 1 a 2 Megaparsec, podemos observar que las galaxias forman una estructura jerárquica, similar a una red, a lo largo de inmensas extensiones de espacio ([Bond et al. 1996](#)). Esto es lo que se conoce como la estructura a gran escala del Universo (LSS), la cual está constituida por cuatro componentes principales: cúmulos de galaxias, también llamados nodos, que contienen hasta miles de galaxias; filamentos, que actúan como puentes entre los cúmulos; paredes, que separan las distintas regiones; y vacíos ([Cautun et al. 2014](#)). Aunque los filamentos ocupan menos del 10 % del volumen total del Universo actual, contienen más de la mitad de la materia total ([Cautun et al. 2014](#); [Tempel et al. 2014](#)), y son los principales canales a través de los cuales se transporta materia oscura, gas intergaláctico y galaxias desde los vacíos y paredes hacia los nodos ([Knebe et al. 2004](#)), facilitando que los cúmulos, ubicados en las intersecciones de la telaraña crezcan jerárquicamente mediante fusiones y la acreción continua de material ([Kravtsov and Borgani, 2012](#)).

En este contexto, la evolución galáctica está determinada tanto por procesos internos (*nature*) como externos (*nurture*), donde estos últimos están asociados a la interacción de las galaxias con el medio que las rodea. En consecuencia, las propiedades observadas de las galaxias dependen fuertemente del entorno en el que evolucionan dentro de la telaraña cósmica. Desde el trabajo de [Dressler \(1980\)](#), se sabe que aquellas que residen en regiones de alta densidad siguen una evolución distinta a la de sus contrapartes de campo: estas últimas tienden a ser azules, de morfología tardía y más ricas en gas ([Rodríguez-Medrano et al. \(2023\)](#); [Argudo-Fernández et al. \(2024\)](#)). En contraste, la población de los cúmulos está dominada por galaxias rojas, de morfología temprana y con tasas de formación estelar significativamente menores que las observadas en el campo ([Dressler \(1980\)](#); [Goto et al. \(2003\)](#)). Estas diferencias ponen de manifiesto la importancia de los procesos ambientales en la evolución galáctica. En particular, los cúmulos de galaxias, las estructuras virializadas más masivas del Universo actual ([Morandi et al., 2013](#)), constituyen el entorno donde las transformaciones ambientales alcanzan su mayor eficiencia, debido a las altas densidades de galaxias y a la presencia de un medio intracúmulo caliente y denso.

1.2. Cúmulos de galaxias y la influencia del entorno en la evolución galáctica

Se han propuesto varios mecanismos perturbadores para explicar la diferente evolución de las galaxias en las regiones de alta densidad (Boselli and Gavazzi (2006); Boselli and Gavazzi (2014)). Estos procesos pueden dividirse en dos grandes familias: las perturbaciones gravitacionales y las interacciones hidrodinámicas.

Por un lado, se tienen los mecanismos gravitacionales, en donde tanto el medio interestelar (ISM) como las estrellas ligadas pueden ser removidas del disco galáctico por la atracción gravitacional que afecta a los satélites mientras orbitan en grupos y cúmulos (Boselli and Gavazzi, 2006). Dentro de esta categoría se distinguen las *tidal interactions* y los *mergers*, que surgen como resultado de encuentros gravitatorios entre galaxias, lo que da lugar a distorsiones morfológicas de la componente estelar y a la redistribución del gas (Cortese et al. 2021); originando en algunos casos colas de material despojado con una morfología irregular. Por otro lado, el acoso galáctico (*galaxy harassment*) se refiere al efecto acumulativo de repetidos encuentros a alta velocidad dentro de los cúmulos, lo cual es capaz de calentar los discos estelares y remover el material periférico que se encuentra débilmente ligado al pozo de potencial (p. ej. Moore et al. 1998).

Una forma más dramática de transformar la morfología de las galaxias es privarlas de gas mediante interacciones hidrodinámicas. Estos procesos involucran la interacción directa entre el ISM y el medio intracúmulo (ICM) caliente ($T_{\text{ICM}} \simeq 10^7 - 10^8$ K) y denso ($\rho_{\text{ICM}} \simeq 10^{-3} \text{ cm}^{-3}$) que impregna el interior de los cúmulos y grupos de galaxias (Boselli et al. 2022). Entre estos se incluyen el *ram pressure stripping* (a detallarse en la sección (1.2.1)), el *viscous stripping* (la remoción de las capas externas del ISM debido a la transferencia de momento por viscosidad con el ICM; Nulsen 1982), la evaporación térmica (el aumento de la temperatura y posterior evaporación del ISM frío en la interfaz con el ICM caliente; Cowie and Songaila 1977), y el *strangulation* que actúa de forma gradual al cortar el suministro de gas fresco procedente del halo galáctico, lo que provoca un declive lento en la formación estelar (Peng et al. 2015).

La principal diferencia entre estas dos familias de mecanismos es que, las perturbaciones gravitacionales actúan indiferentemente sobre todas las componentes de la galaxia (materia oscura, estrellas, gas, polvo). En contraparte, las interacciones hidrodinámicas sólo afectan al medio interestelar difuso, es decir, al polvo y al gas en todas sus fases, mientras que la componente estelar permanece inalterada (Boselli and Gavazzi, 2006). Estas pistas se vuelven fundamentales para identificar a qué mecanismo ambiental se están viendo afectadas las galaxias.

1.2.1. Ram pressure stripping

Dentro de las interacciones hidrodinámicas, el *Ram Pressure Stripping* (RPS) (Gunn and Gott, 1972) se considera uno de los mecanismos más eficaces para remover el gas y frenar rápidamente la formación estelar en las galaxias que caen hacia cúmulos, y se vuelve particularmente eficiente cerca del denso núcleo de la estructura (Jaffé et al. 2018). A medida que una galaxia ingresa en estas regiones de alta densidad a gran velocidad, experimenta una presión dada por

$$P_{\text{ram}} = \rho_{\text{ICM}} \Delta v_{\text{gal}(3D)}^2 \quad (1.1)$$

donde ρ_{ICM} es la densidad del medio intracúmulo, la cual decrece con la distancia al centro del cúmulo, y $\Delta v_{\text{gal}(3D)}^2$ es la velocidad 3D diferencial de la galaxia con respecto al centro del cúmulo. De acuerdo a [Gunn and Gott \(1972\)](#), esta presión ejercida por el ICM es capaz de remover el ISM cuando se cumple la relación:

$$P_{\text{ram}} > \Pi_{\text{gal}} = 2\pi G \Sigma_{\text{star}} \Sigma_{\text{gas}} \quad (1.2)$$

donde Π_{gal} representa la fuerza de restauración gravitacional, dependiente de los perfiles de densidad del disco estelar y gaseoso, que mantienen al gas y estrellas ligados a la galaxia. Al romperse este equilibrio, el gas es desprendido en la dirección opuesta al movimiento de la galaxia, comúnmente durante su primer paso por el pericentro ([Jaffé et al. 2018](#)), donde se desplaza con máxima velocidad orbital. Tras este primer pasaje, la galaxia continúa su trayectoria hacia las afueras del cúmulo para luego volver a caer en órbitas sucesivas, con lo cual pierde energía gradualmente debido a la fricción dinámica, permitiendo que la galaxia termine por asentarse e integrarse a la población virializada del cúmulo. Dado que la fuerza restauradora alcanza su valor máximo en la zona central de la galaxia, el *stripping* actúa de afuera hacia adentro (*outside-in*; [Jaffé et al. 2018](#)), barriendo primero el halo gaseoso y las regiones externas menos ligadas. Respecto al material despojado, los modelos demuestran que se deposita cerca del lugar donde fue desprendido del disco estelar ([Roediger and Brüggen, 2008](#)), sin embargo, el destino de este gas sigue sin estar claro. Las observaciones y simulaciones indican que el gas puede volver a caer sobre el disco una vez que la galaxia alcanza las afueras del cúmulo a lo largo de su órbita, o bien producir largas colas cometarias donde, en condiciones poco claras, puede o no tener lugar la formación estelar ([Cortese et al. 2021](#)).

1.2.2. Características observacionales

Desde una perspectiva observacional, el RPS se traduce en una variedad de firmas estructurales que alteran la morfología de las galaxias. En el estudio de [Poggianti et al. \(2025\)](#) se considera como galaxias en proceso de RPS activo a aquellas que exhiben gas ionizado extraplanar, es decir, fuera del disco galáctico, visible en el óptico/UV y preferentemente hacia un solo lado, mientras que la cinemática del disco estelar se mantiene simétrica e inalterada, siendo una de las características más singulares de la interacción generada por el material desprendido del ISM. Además, es posible notar una fuerte compresión del gas a lo largo del borde frontal del disco y la condensación de nudos formadores de estrellas en dichas colas ([Vulcani et al. 2022](#)).

A bajo redshift, el estudio del material despojado requiere un enfoque multifrecuencia, ya que en el medio interestelar de las galaxias coexisten diferentes fases del gas, las cuales se ven afectadas en distinta medida por el *ram-pressure stripping*, dependiendo de su densidad y ubicación dentro de la galaxia. Por un lado, el hidrógeno atómico (H I) se observa mediante la línea de 21 cm y presenta una distribución difusa que se extiende a lo largo de toda la galaxia hasta llegar a las afueras. En consecuencia, es la primera componente en ser removida por RPS, ya que está menos ligada gravitacionalmente ([Chung et al. 2007](#); [Scott et al. 2012](#)). En contraste, el hidrógeno molecular (H₂), trazado observacionalmente mediante la emisión de CO, se encuentra confinado en nubes

moleculares gigantes concentradas hacia el centro de la galaxia (Cortese et al. 2021). Debido a su alta densidad y a su ubicación profunda en el pozo de potencial gravitacional, esta componente requiere una P_{ram} significativamente mayor para ser despojado.

Una vez que el gas es expulsado al ICM, experimenta transiciones de fase dentro de la cola de material removido. El H I, al enfriarse y compactarse puede formar H₂, mientras que otra fracción puede ionizarse y pasar a la fase H II. Este último está constituido por protones y electrones libres que, al recombinarse, producen la emisión de la línea $H\alpha$ en $\lambda = 6563\text{\AA}$. En las colas producidas por RPS, esta emisión se detecta principalmente como consecuencia de la fotoionización por estrellas jóvenes (≤ 10 Myr) y masivas ($\geq 10M_{\odot}$) de tipo espectral O y B, formadas *in situ* dentro del material despojado (Poggianti et al. 2019). Por ello, el H II constituye un excelente trazador de la formación estelar (Kennicutt 1998; Boselli et al. 2009). La presencia de regiones compactas de H II asociadas a poblaciones estelares jóvenes puede interpretarse bajo el modelo de *fireballs* (Kenney et al. 2014), en el que el desacople entre el gas acelerado por el *ram-pressure stripping* y las estrellas recién formadas da origen a la morfología expuesta en la Fig. D.1 (Jáchym et al. 2019). Debido a que la aceleración ejercida por el RPS es mayor sobre el gas difuso que sobre las nubes densas, se originan filamentos estelares con un gradiente de edad, orientados hacia la galaxia progenitora, mientras que el gas difuso se extiende en la dirección opuesta. No obstante, la presencia de H II no implica necesariamente la existencia de formación estelar. En regiones donde esta está ausente, el gas puede ser ionizado por mecanismos no estelares, tales como choques con gas turbulento, conducción térmica y ondas magnetohidrodinámicas (Boselli et al. 2016; Fossati et al. 2016).

Para identificar estas distintas fases del gas, existe una variedad de técnicas observacionales que difieren principalmente en su cobertura espacial y resolución espectral. Por un lado, el *broad-band imaging* es la técnica más disponible. Utiliza filtros con un ancho de banda grande ($\Delta\lambda \sim 1000\text{ \AA}$), tales como los filtros ópticos estándar *u, g, r, i, z*, para capturar un amplio rango del espectro electromagnético. En galaxias bajo RPS, la banda ancha en el rango óptico y UV permite identificar la luz conjunta de poblaciones estelares distribuidas a lo largo de las colas y el disco de la galaxia. En contraparte, el *narrow-band imaging* emplea filtros extremadamente selectivos ($\Delta\lambda \sim 20 - 100\text{ \AA}$) diseñados para aislar líneas de emisión específicas, siendo el filtro de $H\alpha$ el más utilizado en estudios de ram-pressure stripping. Finalmente, el *Integral Field Spectroscopy* (IFS) representa la técnica más robusta y costosa al obtener simultáneamente un espectro para cada píxel espacial (*spaxel*) dentro de un cierto campo de visión (FoV); lo que permite analizar la cinemática de las estructuras y mapear gradientes de metalicidad.

La ocurrencia de galaxias que presentan estructuras difusas extendidas de gas ionizado llega al 50% en los sistemas de tipo tardío (Cortese et al. 2021). En algunos casos las colas son extremadamente largas y espectaculares, mientras que en otros la evidencia de material despojado es menos pronunciada. Las colas de gas ionizado más largas conocidas hasta la fecha incluyen los sistemas UGC 6697, con una longitud de ~ 150 kpc (Yagi et al. 2017), y CGCG 97079 con ~ 140 kpc (Yagi et al. 2017). A estos se suman JO206 (Poggianti et al. 2017b; véase la Fig. 1.1), con tentáculos de ~ 90 kpc en los cuales tiene lugar la formación estelar, y D100 (Yagi et al. 2007; Cramer et al. 2019), una estructura excepcionalmente lineal y delgada (60×1.5 kpc); todos ellos ejemplos emblemáticos del impacto del ram-pressure stripping en el universo local.

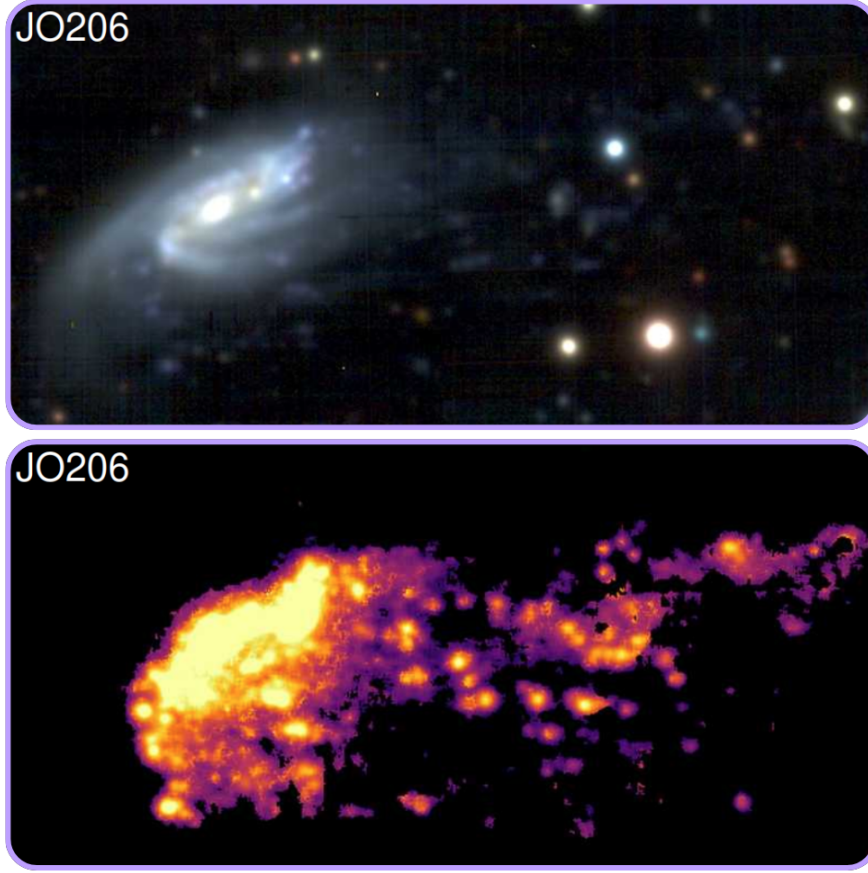


Figura 1.1: Galaxia medusa J0206, observada con *broad band* en el rango óptico (**panel superior**), versus la misma galaxia observada con IFS ($H\alpha$) por el instrumento MUSE (**panel inferior**), perteneciente al programa GASP (Poggianti et al. 2025), en donde se logran apreciar con claridad los tentáculos de formación estelar.

1.2.3. Extreme RPS

En la literatura son considerados como casos de *extreme ram-pressure stripping* aquellas galaxias que presentan largas colas de gas unilaterales, de tamaño comparable o mayor al diámetro del disco estelar (Poggianti et al. 2025 ; Jaffé et al. 2018), siendo conocidas como galaxias medusa dada su llamativa morfología. Las galaxias con las colas de gas ionizado más largas de GASP (*GAs Stripping Phenomena in galaxies*; Poggianti et al. 2025) experimentan RPS extremo, y tienden a ser las colas más luminosas con las mayores fracciones de emisión de $H\alpha$ en comparación con otros niveles de *stripping*. Por otro lado, Jaffé et al. (2018) descubre que aquellas galaxias tienden a ser de alta masa, y se ubican en la zona donde se estima que el RPS alcanza su mayor intensidad: cerca del pericentro del cúmulo, durante su primer paso, desplazándose a alta velocidad con órbitas radiales. La configuración observacional que facilita la detección de galaxias medusa con largas colas de gas es cuando la galaxia se desplaza a lo largo del plano del cielo, de forma perpendicular al observador. Los casos extremos de colas galácticas llaman la atención porque ponen a prueba

nuestra comprensión cuantitativa de estos fenómenos (Zaritsky et al. 2023).

1.3. Reporte de colas azules extremas en el cúmulo A133

Abell 133 (A133) es un cúmulo de galaxias masivo y relajado ubicado a un redshift promedio de $z \sim 0.057$ (Sifón et al. 2025) que cuenta con un mapeo extenso de la distribución de galaxias circundantes y de la estructura de filamentos de la red cósmica (Connor et al. 2018), así como con observaciones profundas en rayos X realizadas por Chandra (Morandi and Cui 2014).

Tabla 1.1: Propiedades del cúmulo de galaxias Abell 133.

(1) ID	(2) RA [deg]	(3) Dec [deg]	(4) Redshift	(5) M_{200} [$10^{14} M_{\odot}$]	(6) R_{200} [Mpc]	(7) θ_{200} [arcmin]	(8) σ_{cl} [km s $^{-1}$]
Abell 133	15.674167	-21.88200	0.057	4.1	1.54	22.45	810

En el marco de una investigación liderada por la Dra. Ana Lourenço para estudiar el RPS a gran escala en cúmulos relajados, se obtuvieron *deep DECam images* en las bandas u , g y r de A133, donde se percataron que cerca del núcleo del cúmulo, a ~ 293 kpc de la *Brightest Cluster Galaxy* (BCG), se encuentra una estructura compuesta de varias franjas azules colimadas (en adelante *blue stripes*), la cual fue notada a su vez por Starikova et al. (2020), descrita como una estructura filamentaria. Algunas de ellas miden $\geq 3.3'$ de longitud, lo que corresponde a aproximadamente 230 kpc al redshift del cúmulo. Su ancho de $2.02' \equiv 140$ kpc es aún más impresionante, lo cual sugiere que más de una galaxia podría haber caído al cúmulo a alta velocidad, experimentando RPS simultáneamente. Las franjas parecen ser estelas largas y anchas, con una morfología lineal de color azul, sugiriendo que presentan formación estelar. Biviano et al. (2017) identificó una subestructura en A133 que parece coincidir con las galaxias que lideran los *blue stripes*, indicadas en rojo en la Fig. (2.1). Además, en la misma figura se observan 3 galaxias medusa viajando en la misma dirección que los *blue stripes*.

Nuestro objetivo es confirmar que las franjas azules se encuentran ligadas gravitacionalmente al cúmulo. Para esto, se obtendrá su redshift mediante espectroscopía en el rango óptico, lo cual nos ayudará a verificar si esta estructura tan extendida es consecuencia de un evento extremo de *ram-pressure stripping*. Asimismo, buscamos identificar a la galaxia progenitora que les dio origen, y confirmar si el mecanismo de ionización principal de las franjas es la formación estelar activa, sugerida por su color azul, utilizando el diagrama BPT.

Capítulo 2

Metodología

2.1. Datos

Se obtuvieron datos espectroscópicos en el rango óptico durante el semestre 2023B utilizando el instrumento *Inamori-Magellan Areal Camera and Spectrograph* (IMACS), ubicado en el telescopio de 6.5m *Magellan Baade* del Observatorio Las Campanas (LCO; [Las Campanas Observatory \(2020\)](#)). Los telescopios de Magallanes se han usado en estudios previos para caracterizar el gas ionizado en estelas cerca de galaxias y para detectar formación estelar en nudos débiles en galaxias a redshifts similares.

La cámara $f/2$ de IMACS opera con un detector de tipo mosaico, compuesto por 8 CCDs, por lo que cada exposición genera un conjunto de 8 archivos de datos individuales, cuyo procesamiento se realiza con el software *Image Reduction and Analysis Facility* (IRAF; [Tody 1986](#)). Para las observaciones se utilizó la modalidad *long-slit*, utilizando la configuración instrumental especificada en la Tabla (2.1), situando dos rendijas: una a lo largo de la cola y otra perpendicular a la franja, para abarcar completamente la superficie de los blue stripes, tal como se observa en la Fig. (2.1). Es por esto que a lo largo de este documento le llamaremos a los archivos **blue stripe 1** y **blue stripe 2**, sin embargo hacen referencia al mismo objeto científico, con diferentes orientaciones del espectrógrafo. Estas dos componentes son necesarias para confirmar que todos los blue stripes tienen un redshift similar y que poseen la misma fuente de ionización.

En el caso del **blue stripe 1** la estrategia de observación consistió en la adquisición de dos sets de datos, cada uno compuesto por seis exposiciones para cada una de las 8 CCDs. El primer set se observó de manera consecutiva manteniendo el guiado del telescopio. Posteriormente, el guiado fue interrumpido temporalmente para obtener las imágenes de calibración instrumental correspondientes a los arcos y flats. Tras esto, se realizó una realineación del telescopio para recuperar exactamente la región del cielo observada previamente; proceso para el cual se utilizaron estrellas guía que permiten efectuar el seguimiento del telescopio, y estrellas de referencia para alinear con precisión la rendija a la región de interés. Debido a esta interrupción y reajuste en la adquisición de los datos, ambos conjuntos se procesan y reducen de manera independiente, para ser combinados únicamente en la etapa final de la reducción con el propósito de maximizar el *signal to noise ratio* (S/N). Por otro lado, la observación del **blue stripe 2** se completó en un único bloque continuo, compuesto por cinco exposiciones para cada CCD.

Tabla 2.1: Registro de las observaciones que incluye la configuración instrumental de IMACS junto con el tiempo de exposición y masa de aire de los objetos científicos y la estrella estándar.

Parámetro	Especificación
1. Parámetros del observatorio	
Nombre	<i>Las Campanas Observatory</i> (LCO)
Longitud	-70.69242°
Latitud	-29.01423°
Altitud	2405[m]
Zona Horaria	UT -4
2. Configuración instrumental	
Telescopio	Baade (Magellan I)
Instrumento	IMACS <i>Short-Camera</i> (f/2)
Dispersor / Ángulo	Grism-300 [líneas/mm] / 17.5°
Escala de placa	0.200 arcsec/pixel
Ganancia	0.56 e ⁻ /ADU
Ruido de lectura	3.31 e ⁻ /read
Dispersión	1.341 Å/pixel
3. Objetos Científicos	
blue stripe1 (EXPTIME / AIRMASS)	1200[s] / 1.607
blue stripe2 (EXPTIME / AIRMASS)	1200[s] / 1.086
4. Estrella estándar	
Nombre	LTT7987
EXPTIME	60[s]
AIRMASS	1.021

2.2. Reducción primaria

Los CCD (*Charged-Coupled Device*) son chips sensibles a la luz, y la transforman en carga eléctrica mediante el efecto fotoeléctrico: los fotones inciden sobre el detector, liberando electrones que son recolectados y confinados en pozos de potencial. Luego, la señal analógica es convertida en una representación digital en unidades de ADU (*Analog-to-Digital Unit*), que representan la cantidad de electrones acumulados en un píxel del sensor CCD. Para el proceso de calibración espectral deben considerarse dos tipos de imágenes fundamentales para limpiar los datos de ruido no deseado, relacionado a los sensores CCD. Los bias, también llamados *zero frames*, corresponden a imágenes de calibración adquiridas con el obturador de la cámara cerrado y un tiempo de exposición de cero segundos, cuya función es cuantificar el ruido asociado a las componentes electrónicas del detector. Por otro lado, los flats se obtienen tras apuntar el sensor CCD con una fuente homogénea de luz, y se utilizan para mapear las variaciones de sensibilidad de cada píxel a lo largo del arreglo. Este paso es fundamental para discriminar si un píxel registra un mayor número de cuentas debido a

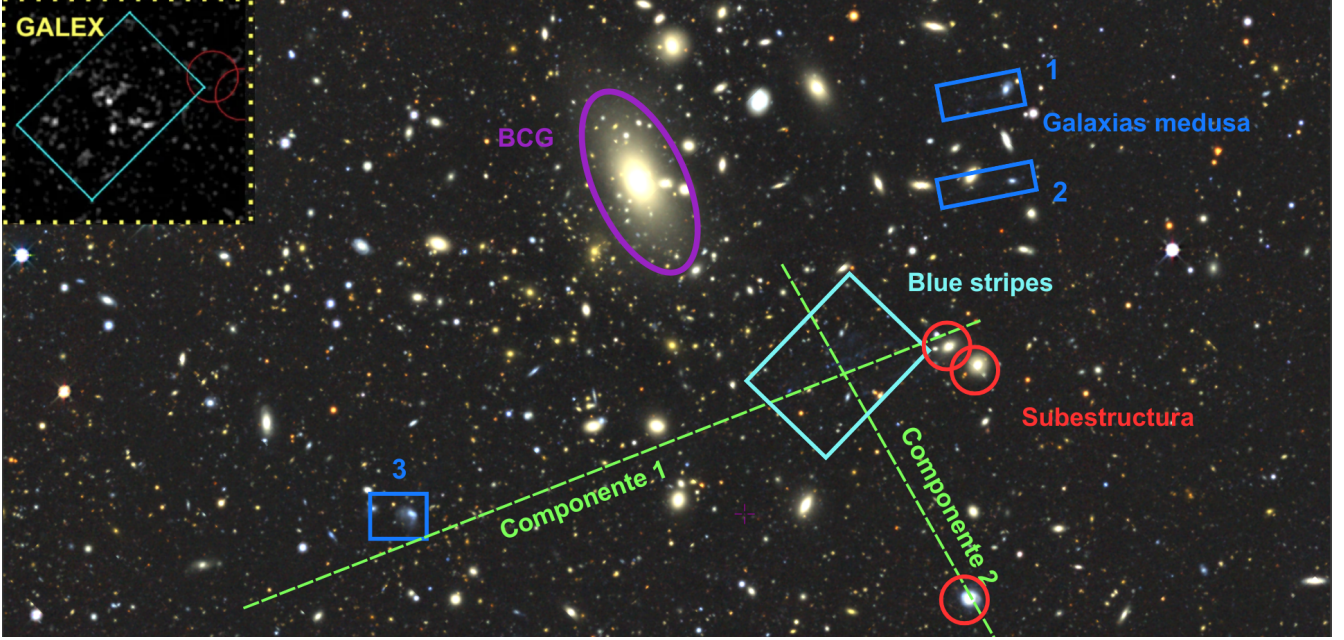


Figura 2.1: Cúmulo de galaxias Abell 133, en donde se aprecia que al sureste de la BCG (magenta) se encuentra la intrigante estructura compuesta por varias franjas azules colimadas (rectángulo cyan), junto con una imagen en *near-UV* de GALEX. Las líneas punteadas verdes hacen referencia a la orientación en que fueron colocadas las 2 rendijas del espectrógrafo, con el objetivo de cubrir toda la estructura. En los rectángulos azules se encuentran tres galaxias medusa, viajando en la misma dirección que los *blue stripes*. Además, el cúmulo presenta una subestructura identificada por Biviano et al. (2017), marcada en rojo, la cual coincide con las 2 galaxias candidatas iniciales a liderar los *blue stripes*: LEDA 821642 y LEDA 821552. La galaxia restante, ubicada al sur, no se considera como posible progenitora dada su lejanía espacial y su inconsistencia con el sentido del movimiento de la estructura.

una alta sensibilidad del detector, o bien porque el objeto astronómico observado es más luminoso. En esta investigación se contó con un set de calibración compuesto por 10 bias, 9 flats (complementados con flats individuales adquiridos después de cada exposición del objeto científico), 2 arcos de calibración para el *blue stripe 1* (uno para cada set de datos) y 1 arco de calibración para el *blue stripe 2*. Además, se observaron 3 estrellas estándar (LTT7987, G24-9 y G93-48) con 2 exposiciones cada una, las cuales fueron adquiridas antes de los *science targets*. A su vez, se cuenta con imágenes directas del campo de ambas componentes de los *blue stripes*.

Utilizando los 10 archivos correspondientes a bias, adquiridos bajo la configuración de lectura lenta (*slow readout*), se generó un masterbias independiente para cada uno de los 8 chips, usando el software IRAF, con el task *imcombine*. Teniendo el masterbias, se realiza el proceso de *bias subtraction* usando el task *imarith* con el operador “-” sobre todos los archivos de los flats, arcos de calibración, *blue stripes 1* y *2*, y las tres estrellas estándar. Una vez corregidos los archivos por el masterbias, se realiza el proceso de *flat fielding*, el cual consiste en dividir cada una de las *science exposure*, estrellas estándar y arcos correspondientes por el flat más cercano en tiempo a dicha exposición, de acuerdo al registro de observación, usando el task *imarith* con el operador

”/”.

2.2.1. Identificación de espectros en la *long-slit*

Una vez que se cuenta con los archivos de ciencia calibrados por el masterbias y flats, se identificó visualmente la región en la que se encontraban los espectros a lo largo de la *long-slit*, para cada uno de los chips, utilizando la herramienta de visualización DS9 (Fruscione et al., 2026), tal como se expone a modo de ejemplo en el panel derecho de la Fig.(2.2), teniendo en consideración el orden de cada CCD, el cual se muestra en el panel izquierdo de la misma figura (2.2). Aquí, los cuatro chips superiores registran la región azul del espectro, en donde pueden encontrarse líneas como $H\beta$ y [OIII], mientras que los cuatro chips inferiores cubren la región roja, donde se halla $H\alpha$ y [N II].

Al momento de definir el área que abarca cada uno de los espectros, se tuvo en consideración incluir al menos 300 píxeles en el eje horizontal, para llevar a cabo una buena definición del ruido del cielo. En este conjunto de datos el eje de dispersión es el eje vertical, por lo que la cobertura de los espectros se ve fragmentada a lo largo de los chips alineados siguiendo la configuración 1 – 6, 2 – 5, 3 – 8 y 4 – 7, tal como se observa en la Fig. (2.2). Por este motivo, el procedimiento consistió en identificar y extraer ambos segmentos por separado en sus respectivos chips, para posteriormente unirlos y reconstruir todo el rango espectral. A cada uno de los espectros extraídos se le asignó una identificación, expuesta en el apéndice (Tablas B.1 y B.2). Para este trabajo, se redujeron únicamente aquellos espectros que presentaron emisión al momento de su visualización en 2D, característica que se ve representada dentro del rectángulo de color cyan expuesto en el panel derecho de la Fig.(2.2).

Cabe destacar que inicialmente este proceso fue realizado identificando los espectros en un mosaico generado por la unión de todos los chips, tras usar el software COSMOS, sin embargo no se obtuvieron resultados satisfactorios al momento de la identificación de líneas de emisión, por lo cual se optó por efectuar el proceso de reducción de manera independiente en cada chip, garantizando una mayor precisión antes de acoplar cada una de las secciones, evitando las irregularidades asociadas a las intersecciones entre los distintos chips CCD.

2.2.2. *Traceback process*

Para asociar cada espectro con la posición que ocupan en el cielo, se transformaron las coordenadas de las *field-images* a coordenadas celestes. Luego de aplicar la transformación, se estimó el desplazamiento central en las coordenadas x e y para los archivos de los objetos; se identificaron los píxeles de los espectros y se estimaron las coordenadas celestes correspondientes. El proceso se repitió hasta que todos los espectros del archivo coincidieran con un objeto en el cielo, obteniendo las posiciones expuestas en la Tabla (3.1). De esta forma, se cuenta con 5 espectros presentes en los *blue stripes*, señalados en la Fig.(2.3) etiquetados consecutivamente como A, B, C, D y E.

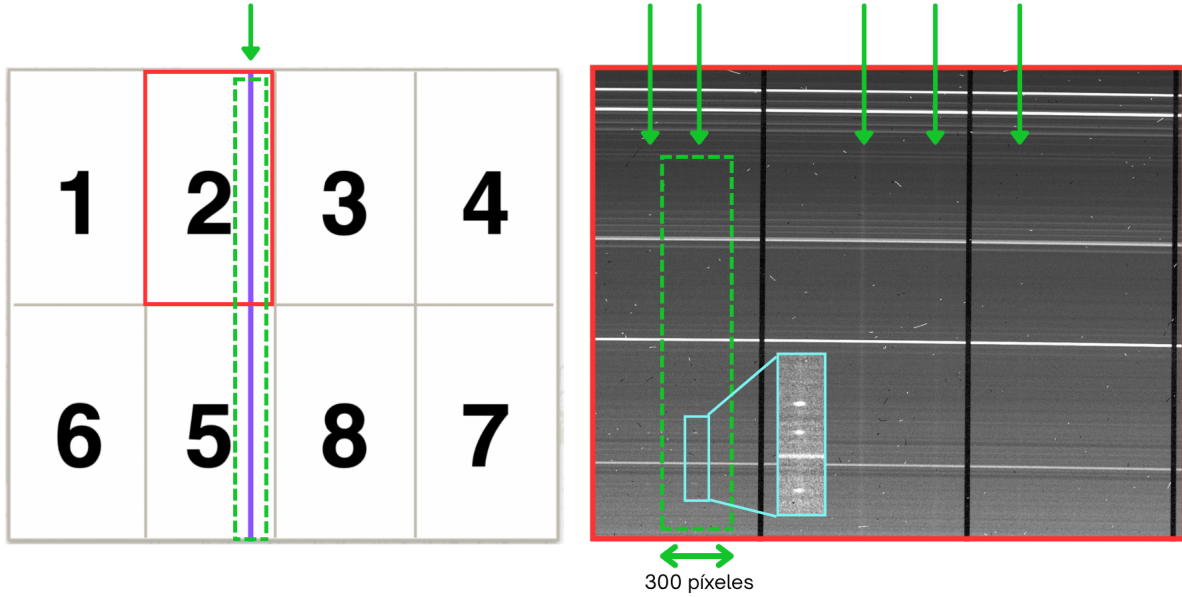


Figura 2.2: **Izquierda:** Configuración en que se ordenan los chips CCDs (del 1 al 8) de las observaciones efectuadas con IMACS. La línea morada vertical ejemplifica un espectro, el cual abarca los chips 2 y 5. **Derecha:** Zoom de un cierto chip, en donde se identificó de manera visual la presencia de espectros, señalados mediante flechas verdes. El rectángulo verde simboliza el área definida para realizar la posterior extracción del espectro, y el rectángulo cyan ejemplifica las características de emisión en un espectro 2D.

2.3. Reducción espectroscópica

Una vez definidas las áreas de los espectros de interés en cada chip, se dió paso a la etapa de extracción espectral usando el software IRAF, en el cual se transformaron los espectros originales en 2D, con ambos ejes en unidades de píxeles, a espectros unidimensionales en unidades físicas. En primer lugar, se utilizó el task `imcopy` para recortar cada uno de los archivos de ciencia y así contar con el área determinada de cada espectro. Previo a realizar la extracción, se añadió al header de los archivos de ciencia y de calibración del `blue stripe 1` (set 1, set 2) y `blue stripe 2` que el eje de dispersión, es decir, aquel en el cual se dispersan los fotones a lo largo de la CCD, es el eje vertical.

Posteriormente, se definió una apertura para extraer el flujo de la fuente de interés, para cada uno de los espectros, para lo cual se utiliza el task `apall`. Este proceso se realiza colapsando uno de los ejes de píxeles (perpendicular al eje de dispersión), lo cual genera una acumulación de ADUS en una distribución gaussiana, pasando de un espectro en 2D a 1D. Para asegurar que la apertura definida fue la correcta, se revisó en `DS9` el píxel en el cual se hallaba el centro de cada espectro, y se buscó definir la apertura centrada en aquel valor en la terminal de IRAF. Adicionalmente, el proceso requiere la selección de al menos dos regiones a ambos lados de la apertura definida, en donde no haya flujo, como se muestra en la Fig. (2.4). Estas zonas se ajustan mediante un polinomio que permite sustraer el nivel del cielo (*background*). Durante la ejecución de este proceso se utilizaron los parámetros presentados en la Tabla (2.2).

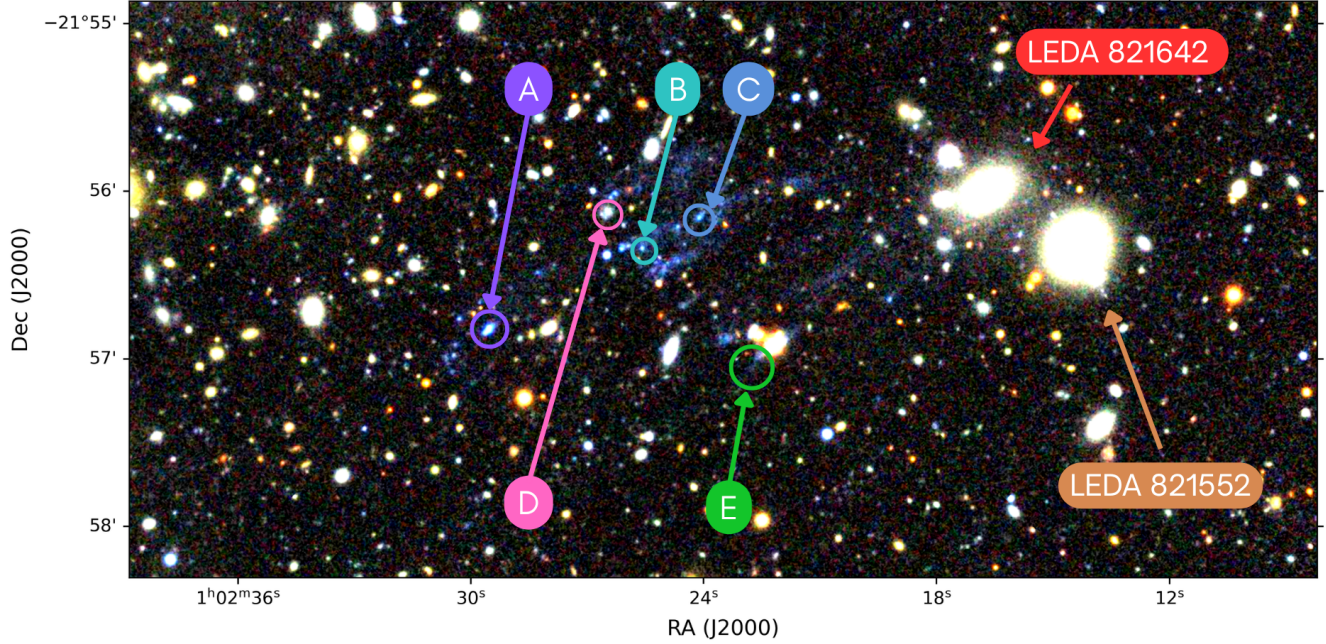


Figura 2.3: Regiones de los *blue stripes*, identificadas con las letras A, B, C, D y E, para las cuales se obtuvieron espectros tras el proceso de *traceback*. En rojo y naranja se muestran las galaxias candidatas a haber sido despojadas de su gas, dando origen a la gran cola de gas azul.

Tras la ejecución de `apall`, la interfaz de IRAF despliega una ventana interactiva que ilustra la traza del espectro extraído a lo largo del eje de dispersión, evidenciando la curvatura espacial producida por la óptica del instrumento. En esta etapa, los *outliers* se eliminan interactivamente mediante el comando `'d'`. Posteriormente, se ajusta un polinomio (típicamente de orden 2 o 3) para modelar la traza a lo largo del detector. Esta solución, conocida como la traza espectral, se almacena en la base de datos y posteriormente se utiliza para extraer la misma región del espectro en el archivo del arco de calibración, culminando con la conversión del espectro bidimensional original en un espectro en 1D. Este mismo proceso, se efectúa para los archivos de ciencia y arcos de calibración de la estrella estándar.

2.3.1. Calibración de longitud de onda

El arco corresponde a una imagen que se obtiene tras iluminar las cámaras CCD a través de un gas noble, lo que permite visualizar su espectro de emisión, el cual exhibe líneas espectrales en longitudes de onda previamente conocidas. Esto da paso a que se puedan asociar las longitudes de onda con los píxeles, logrando así la calibración espectral del set de datos. En este caso particular, los archivos de los arcos de calibración fueron tomados utilizando una lámpara de helio, neón y argón (HeNeAr).

La identificación de líneas de emisión se realizó con el task `identify` usando como referencia el GRISM300, proporcionado por el IMACS Spectral Atlas de LCO, expuesto en la Fig. (2.5).

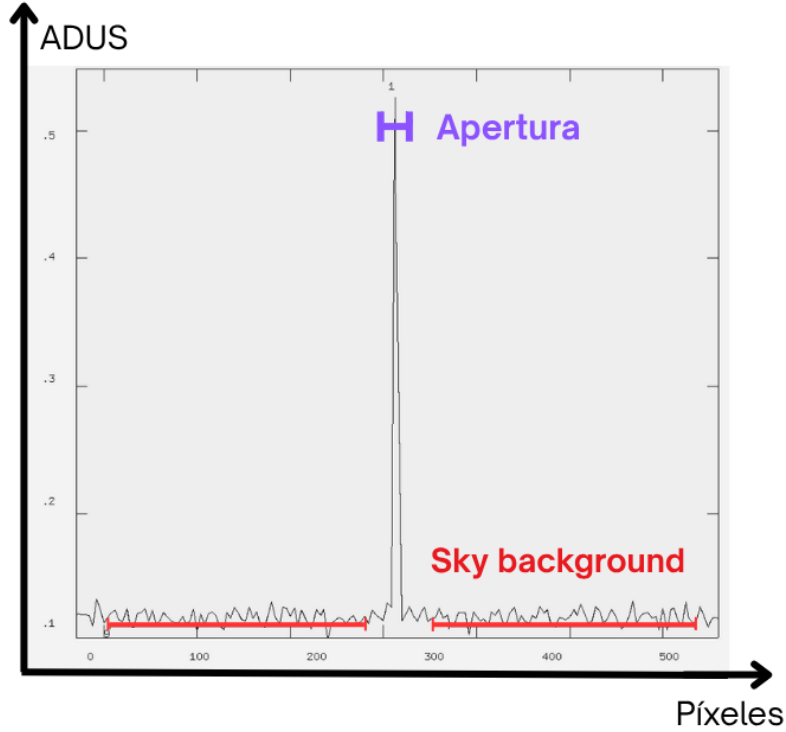


Figura 2.4: Procedimiento de definición de aperturas y nivel del cielo en el task `apall` de IRAF.

Inicialmente, se identificaron al menos 10 líneas de forma manual usando la tecla 'm' (mark). Luego se presionó 'f' (fit), en donde se eliminaron los outliers usando 'd'. Con 'q' se regresa al espectro, y luego con learn 'l' IRAF identifica automáticamente más líneas, basado en el ajuste manual. Presionando nuevamente fit 'f' el RMS mejora, al tener una mayor cantidad de líneas identificadas. Nuevamente, usando 'd' (delete) se eliminaron los *outliers*, hasta llegar a un RMS adecuado (≤ 0.5), ajustando los puntos usando un orden 2 – 3. Posteriormente, se configura IRAF para que relacione cada archivo de ciencia con su respectivo arco de calibración, utilizando el task `refspec`. Sabiendo esto, IRAF aplicará la *Dispersion Correction*, es decir, la solución de calibración en longitud de onda a cada uno de los espectros usando el task `dispcor`. Por lo tanto, se convierte el eje X desde píxeles a unidades físicas de longitud de onda ($\text{\AA}$). Los parámetros utilizados en este task se dejaron como `INDEF`, dado que IRAF recuerda cuál es la longitud de onda inicial y final a partir de su solución en el task `identify`, y con ello calcula la dispersión, la cual alcanza un valor de ~ 1.110 ($\text{\AA}/\text{pixel}$) para los chips del rango azul del espectro y ~ 1.325 ($\text{\AA}/\text{pixel}$) para los del rango rojo. Así, se generan como *output* espectros calibrados por longitud de onda.

2.3.2. Calibración de flujo

Para transformar la señal en una cantidad física, se realizó la calibración de flujo utilizando una estrella estándar, es decir, estrellas muy bien estudiadas, observadas bajo buenas condiciones, de las cuales se conoce su flujo con certeza. El procedimiento se lleva a cabo mediante la generación de una función de sensibilidad, que se construye muestreando el flujo del continuo espectral a través de pequeñas ventanas llamadas *bandpass*. Al comparar el espectro observado de la estrella

Tabla 2.2: Configuración comparativa de los parámetros de la tarea **apall** para la extracción de espectros de ciencia y arcos de calibración. Los valores utilizados fueron extraídos desde el header y el registro de observación.

Parámetro	Valor (Ciencia)	Valor (Arcos)
interactive	yes	no
find	yes	yes
recenter	yes	no
resize	no	no
edit	yes	no
trace	yes	no
fittrace	yes	no
extract	yes	yes
extras	yes	yes
line	INDEF	INDEF
nsum	100	100
t-nsum	50	50
t-step	10	10
background	fit	none
weights	variance	none
pfit	fit1d	fit1d
saturation	65000	65000
clean	yes	no
readnoise	3.31	3.31
gain	0.56	0.56

estándar con los flujos tabulados en la base de datos, internamente en IRAF mediante la ecuación (2.1), se obtiene la curva de respuesta instrumental. Así, al dividir el espectro científico por esta función, se realiza la conversión de ADUs a unidades de flujo ($\text{erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ \AA}^{-1}$). En este trabajo, se utilizaron las observaciones de la estrella estándar LTT7987, una enana blanca tipo espectral DA.

$$\text{sensitividad} = \frac{\text{cuentas en cada } \textit{bandpass}}{\text{flujo tabulado}} \quad (2.1)$$

En primer lugar, usando el task **observatory** y **telescope** se configuraron los parámetros de LCO, expuestos en el panel n°1 de la Tabla (2.1). Para calcular la masa de aire presente al momento de la observación, se utiliza el task **setairmass**, lo cual toma en consideración los parámetros RA, DEC, EPOCH, ST, UT-TIME, DATE-OBS, EXPTIME, presentes en el *header* de cada archivo. Una vez configurados aquellos datos, en el task **standard** se agrega la información acerca del tiempo de exposición, masa de aire y el nombre de la estrella estándar registrado en la base de datos de IRAF, señalados en el panel n°4 de la Tabla (2.1). Al ejecutar, se abre una nueva pestaña donde se definen *bandpasses* de flujo, con la tecla 'a' en la esquina inferior izquierda y la esquina superior derecha, teniendo la precaución de definir las en el continuo, sin incluir líneas de absorción ni emisión. De esta manera, está todo listo para generar la función de sensibilidad. Al ejecutar

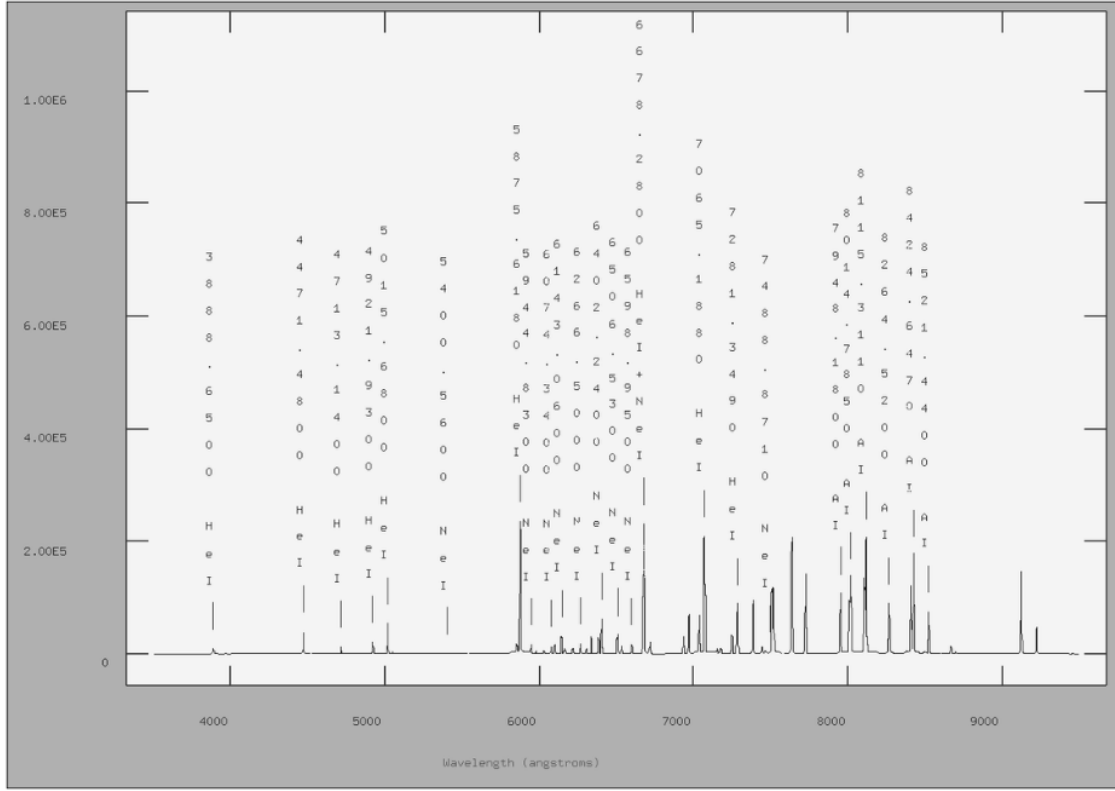


Figura 2.5: Diccionario espectral de He-Ne-Ar con grism de 300 líneas/mm observado con IMACS, utilizado como referencia para relacionar longitud de onda con píxeles.

el task **sensfunc**, se despliega la ventana gráfica de IRAF, en donde se ajusta un spline cúbico de orden 6, tal como se muestra en el panel superior de la Fig.(2.6). Finalmente, cada espectro se calibró utilizando la función de sensibilidad generada, a través del task **calibrate** con una masa de aire de 1.021 y un tiempo de exposición de 1200 [s] para los *blue stripes*. Como *input* se ingresan los espectros calibrados por longitud de onda, para obtener como resultado espectros listos para realizar ciencia, con el flujo correctamente calibrado. Luego, se procede a combinar todas las exposiciones de un mismo espectro usando el task **scombine** con el objetivo de mejorar el *signal to noise ratio* de los espectros. Para concluir el proceso, se utilizó nuevamente **scombine** para acoplar los segmentos de un mismo espectro que habían sido reducidos de forma independiente en cada chip CCD, obteniendo así espectros con el rango completo de longitudes de onda, entre 4000 – 8000 Å.

2.4. Redshift

Una vez que se cuenta con los espectros en 1D calibrados por longitud de onda y flujo, es necesario identificar el redshift de cada uno, para determinar si los *blue stripes* se encuentran ligados gravitacionalmente al cúmulo A133. Para esto, se comparan las longitudes de onda de las líneas de emisión medidas en el sistema de referencia del observador (λ_{obs}) con su respectiva emisión en reposo en el laboratorio (λ_{rest}), mediante la ecuación (2.2):

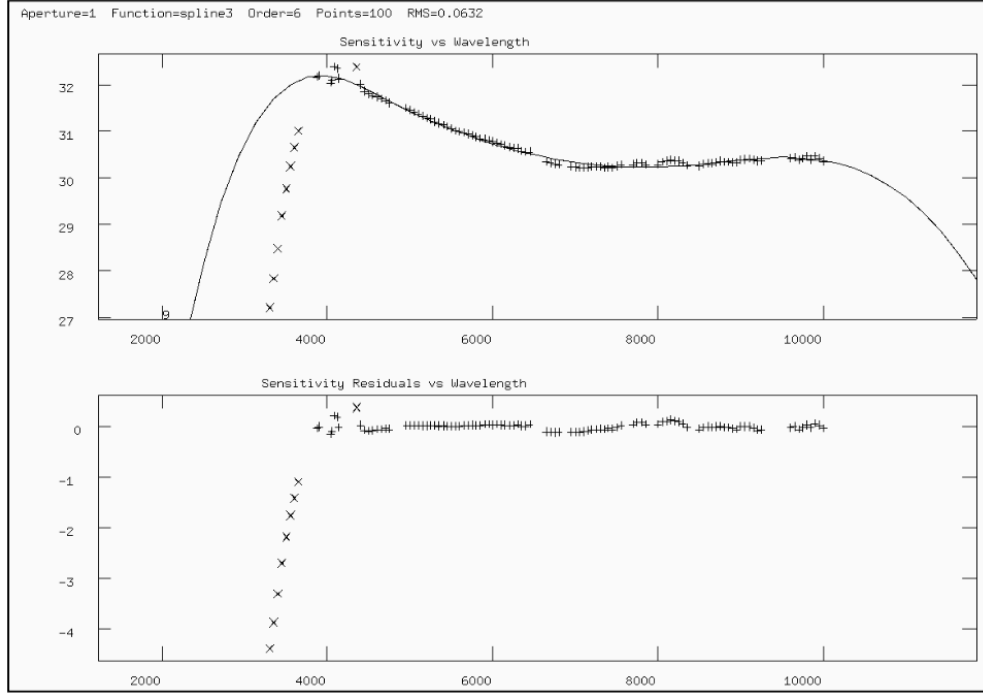


Figura 2.6: **Panel superior:** Función de sensibilidad generada con la estrella estándar LTT7987, junto a su respectivo ajuste, alcanzando un $\text{RMS} = 0.0632$. **Panel inferior:** Residuos del ajuste de la función de sensibilidad.

$$z = \frac{\lambda_{obs}}{\lambda_{rest}} - 1 \quad (2.2)$$

Este procedimiento se realizó en **python**, generando una plantilla que incluye líneas de emisión típicas de regiones de formación estelar activa, tales como las líneas prohibidas de [O II] $\lambda 3726$, $\lambda 3729$, [O III] $\lambda 4959$, $\lambda 5007$, [N II] $\lambda 6548$, $\lambda 6584$ y [S II] $\lambda 6717$, $\lambda 6731$, junto a la serie de Balmer ($H\beta$ $\lambda 4861$ y $H\alpha$ $\lambda 6563$), lo que permitió ajustar el redshift hasta hallar la mejor correspondencia entre las líneas espectrales observadas.

A partir del redshift espectroscópico obtenido para cada franja, se calcula su velocidad radial mediante la aproximación lineal $v = c \cdot z$. Posteriormente, con el fin de analizar la cinemática de las galaxias en el marco del cúmulo, se determina la velocidad peculiar relativa (Δv) de cada objeto respecto a la velocidad promedio del cúmulo (v_{cl}), utilizando la ecuación:

$$\Delta v = v_{obs} - v_{cl} = c \cdot \left(\frac{z_{obs} - z_{cl}}{1 + z_{cl}} \right) \quad (2.3)$$

considerando la velocidad de dispersión y redshift del cúmulo A133 expuestos en la Tabla (1.1). De esta forma, los valores de Δv contenidos dentro de los límites definidos por la caústica del cúmulo confirmarán que los *blue stripes* pertenecen al entorno de A133.

2.5. Line-ratio diagnostic: diagrama BPT

Para investigar el mecanismo físico responsable de la ionización del gas en los blue stripes, se utilizó el diagrama Baldwin–Phillips–Terlevich (BPT, [Baldwin et al. 1981](#)). Este considera la razón entre distintas líneas de emisión comunes observadas en el rango óptico, como $[\text{N II}]$, $\text{H}\alpha$, $[\text{O III}]$ y $\text{H}\beta$, para distinguir entre diferentes fuentes de ionización. El gas que emite en $\text{H}\alpha$ puede ionizarse mediante diferentes mecanismos: por fotones procedentes de estrellas jóvenes y calientes (*star-forming*), por el AGN central (AGN), por una combinación de ambos (*composite*) o por *low ionization nuclear emission-line regions* (LINERs) que podrían deberse a un AGN de baja luminosidad u otros mecanismos como *shocks* o estrellas viejas ([Poggianti et al. 2017a](#)).

Se suelen utilizar dos límites principales para distinguir las galaxias dominadas por AGN de las que están en fase de formación estelar: la demarcación teórica de [Kewley et al. \(2001\)](#), expresada en la ecuación (2.4), que define el límite superior para las galaxias en fase de formación estelar pura e indica el predominio de un AGN (es decir, $> 50\%$ de la radiación ionizante) ([Agostino 2019](#)).

$$\log([\text{O III}]/\text{H}\beta) = \frac{0.61}{(\log([\text{N II}]/\text{H}\alpha) - 0.47)} + 1.19 \quad (2.4)$$

y la separación empírica de [Kauffmann et al. \(2003\)](#), dada por la ecuación (2.5), basada en la distribución de las galaxias *star-forming* en SDSS. A las galaxias situadas entre estas dos curvas se les denomina galaxias *composite*.

$$\log([\text{O III}]/\text{H}\beta) = \frac{0.61}{(\log([\text{N II}]/\text{H}\alpha) - 0.05)} + 1.3 \quad (2.5)$$

Adicionalmente, es posible establecer una línea divisoria que separe los AGN en LINER y Seyfert utilizando el criterio propuesto por [Cid-Fernandes et al. \(2010\)](#), que se expresa en la ecuación (2.6).

$$\log([\text{O III}]/\text{H}\beta) = 1.01 \log([\text{N II}]/\text{H}\alpha) + 0.48 \quad (2.6)$$

En este trabajo, los flujos de cada línea de emisión se obtuvieron usando el task `splot` de IRAF. En cada caso, se delimitaron manualmente las alas de la línea a ambos lados del perfil para definir el nivel del continuo local, presionando la tecla 'd'. De esta manera, se realizó un ajuste gaussiano que permitió extraer el flujo integrado de cada línea, los cuales se presentan en la Tabla (C.1).

Con el objetivo de determinar si una línea espectral corresponde a un objeto astronómico o es realmente una fluctuación del ruido, se calculó el *signal to noise ratio* (S/N) de las líneas de emisión identificadas utilizando el task `splot` de IRAF. Se presionó 'm' para seleccionar una región del continuo libre de líneas de emisión, alejadas a cada lado de la línea de interés, de lo cual se obtiene el RMS del continuo. Luego, se emplea la ecuación:

$$S/N = \frac{\text{Flujo de la línea}}{\text{RMS del continuo} \cdot \sqrt{N}} \quad (2.7)$$

donde N es el número de píxeles que compone la línea. Los valores obtenidos se exponen en la Tabla (C.1).

Capítulo 3

Resultados

3.1. Pertenencia al cúmulo

El análisis espectroscópico de cinco espectros distribuidos a lo largo de la estructura, caracterizados mediante las letras de la Fig.(3.1), revela que el redshift de los *blue stripes* se encuentra en el rango $z = 0.0566\text{--}0.0570$. Este resultado se obtuvo al identificar las líneas de emisión H_α , H_β , $[N_{II}]$, $[O_{III}]$ y $[O_{II}]$, incluyendo $[S_{II}]$ en aquellos espectros que lo presentaron, lo cual resulta consistente con el redshift promedio del cúmulo A133 reportado por Sifón et al. (2025). El rango de redshift obtenido se traduce en una diferencia en velocidad relativa (Δv) de apenas $\sim 116 \text{ km s}^{-1}$ entre la estructura y el cúmulo, lo cual es significativamente menor que la dispersión de velocidades de A133 (véase la Tabla 1.1). Esto confirma que el gas ionizado de los *blue stripes* se encuentra gravitacionalmente ligado al cúmulo.

Los espectros correspondientes a las zonas D y E presentan un flujo significativamente tenue y un bajo *signal to noise ratio* (expuesto en el Apéndice B), mostrando además un ligero desplazamiento en la longitud de onda de sus componentes, por lo cual quedan sujetos a posterior evaluación con datos de mejor calidad.

3.2. Posible progenitor y fase orbital

Para evaluar la asociación espacial y cinemática de los *blue stripes* con las galaxias circundantes, se construyó un *phase-space diagram*. Este tipo de diagramas constituyen una herramienta estadística fundamental ya que permiten inferir el tiempo de caída (*infall time*) de las galaxias hacia el centro del potencial gravitacional. Su construcción se basa en relacionar la posición de las galaxias respecto al centro del cúmulo con sus respectivas velocidades peculiares relativas, las cuales provienen de catálogos fotométricos y espectroscópicos; por ende, sólo se pueden medir distancias proyectadas en el plano del cielo y velocidades a lo largo de la línea de visión, representando límites inferiores a los valores reales en 3D, con un factor promedio de $\sqrt{3}$ en la velocidad (Jaffé et al. 2018).

En el caso de Abell 133, el diagrama se construyó a partir del catálogo espectroscópico de Jones et al. (2009) y Smith et al. (2004), incluyendo todas las galaxias que contaran con mediciones de redshift espectroscópico, alcanzando un total de 135 objetos. Adicionalmente, se incorporaron las

Tabla 3.1: Coordenadas, morfología y redshift de los objetos de estudio asociados a los *blue stripes*.

Objeto	Espectro	Morfología	R_e	RA (deg)	Dec (deg)	Redshift (z)
1. Traceback de los blue stripes						
A	Fig. 3.1 A	—	—	$15.6242 \pm (1.12 \cdot 10^{-3})$	$-21.9471 \pm (1.26 \cdot 10^{-4})$	0.0570*
B	Fig. 3.1 B	—	—	$15.6076 \pm (8.40 \cdot 10^{-4})$	$-21.9395 \pm (6.01 \cdot 10^{-4})$	0.0567*
C	Fig. 3.1 C	—	—	$15.6021 \pm (8.53 \cdot 10^{-4})$	$-21.9365 \pm (6.89 \cdot 10^{-4})$	0.0568*
D	Fig. 3.1 D	—	—	$15.6103 \pm (1.37 \cdot 10^{-4})$	$-21.9338 \pm (1.60 \cdot 10^{-3})$	0.0566*
E	Fig. 3.1 E	—	—	$15.5942 \pm (7.53 \cdot 10^{-5})$	$-21.9501 \pm (6.17 \cdot 10^{-5})$	0.0567*
2. Galaxias presentes en la subestructura de Biviano et al. (2017)						
LEDA 821642	—	E [†]	3.60 kpc ^a	15.5693000	-21.9334000	0.056680 ^b
LEDA 821552	—	E [†]	4.25 kpc ^a	15.5599000	-21.9387000	0.060375 ^b
LEDA 820514	—	Sb [†]	4.85 kpc ^a	15.562620	-22.011393	0.051476 ^c
3. Galaxias medusa despojadas en la misma dirección						
Medusa 1	—	cD - E/S0 [†]	—	15.5506200	-21.8534230	—
Medusa 2	—	Sa [†]	—	15.5485170	-21.8820250	—
Medusa 3	—	Sb [†]	—	15.7498260	-21.9854430	—

* Referencia: este trabajo. La desviación estándar de la muestra es $2.76 \cdot 10^{-4}$.

^a D’Onofrio et al. (2014)

^b Smith et al. (2004)

^c Jones et al. (2009)

[†] Fasano et al. (2012)

Notas: Se considera como candidatas iniciales a progenitoras de los *blue stripes* las galaxias LEDA 821642 y LEDA 821552 (marcadas en negrita), dada su cercanía espacial y dirección de movimiento similar a la estructura, no así el caso de LEDA 820514.

posiciones de los *blue stripes* obtenidas tras el proceso de *traceback*, junto con sus velocidades radiales derivadas de los redshifts medidos en sus espectros. Los parámetros de cada objeto incluido se detallan en la Tabla (3.1). Para definir la membresía al cúmulo, se utilizó un filtro de cáustica basado en un halo de materia oscura modelado por el perfil de Navarro-Frenk-White (NFW; Navarro et al. 1997), para así tener una referencia de la velocidad de escape de A133. Este método permite discriminar miembros de intrusos, considerando simultáneamente la posición proyectada y la velocidad radial de cada galaxia; de esta manera, las galaxias que se encuentran dentro de la cáustica son aquellas que pertenecen al cúmulo. Finalmente, a modo de referencia, se agregaron las líneas delimitadoras de tiempo de caída al cúmulo de Pasquali et al. (2019), adoptando la nomenclatura conceptual de Rhee et al. (2017) para separar cada zona de acuerdo a su tiempo de caída al cúmulo entre *recent infallers* ($0 < t_{inf} < 3.63$), *intermediate infallers* ($3.63 < t_{inf} < 6.45$) y *ancient infallers* ($6.45 < t_{inf} < 13.7$) en escala de *Gyr*.

En la Fig. (3.2) se observa que los *blue stripes* se ubican muy cerca de la galaxia LEDA 821642 ($z = 0.05668$; círculo rojo) en el espacio de fases, a una distancia proyectada de $\sim 0.3R_{200}$ respecto al centro del cúmulo. Basada en su morfología y colores en el rango óptico, LEDA 821642 se clasifica visualmente como una galaxia de *early-type*, lo cual es respaldado por el estudio de Fasano et al. (2012). En contraste, la otra galaxia cercana LEDA 821552 ($z = 0.060375$; triángulo

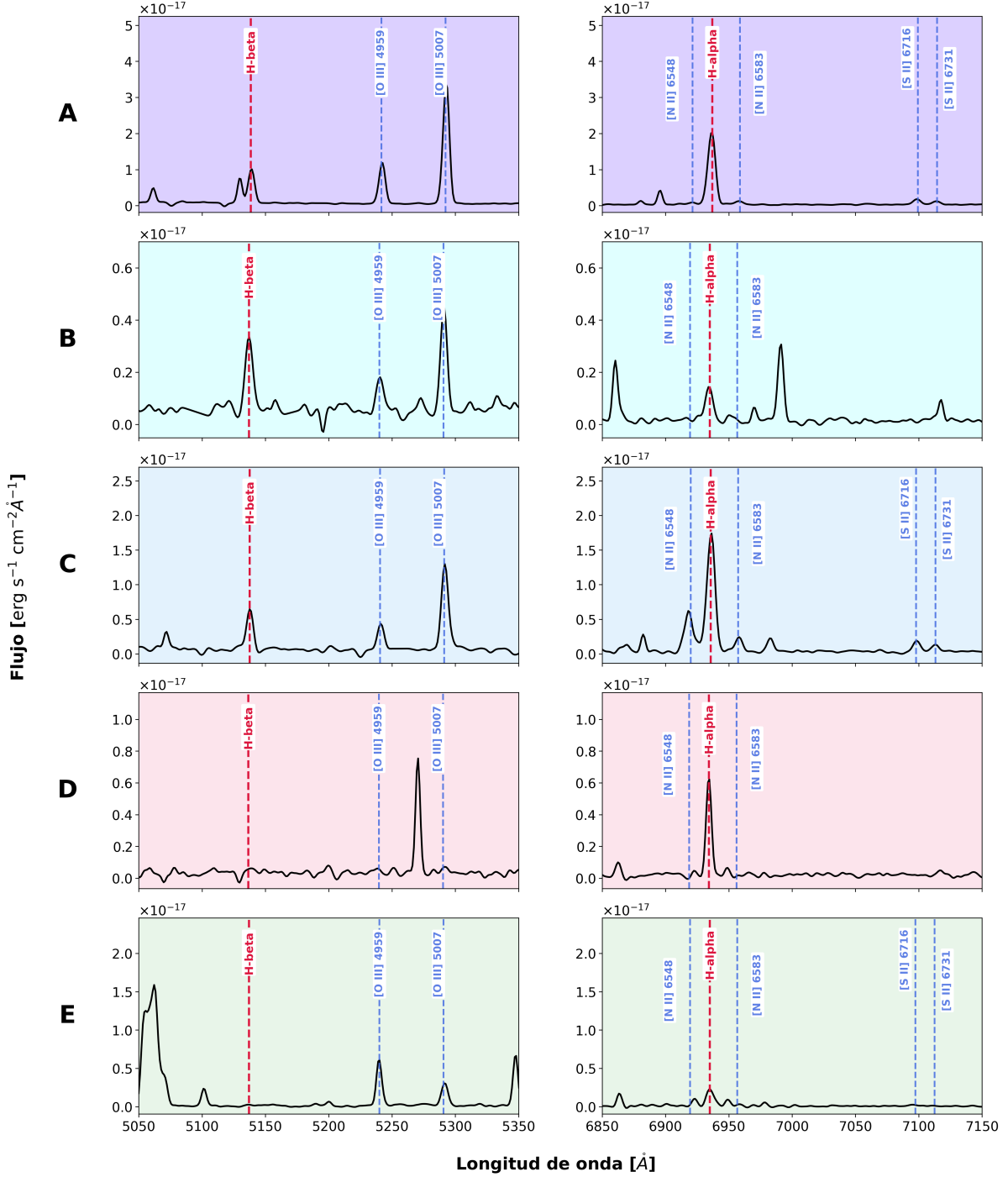


Figura 3.1: Espectros de las 5 regiones presentes en los blue stripes, de acuerdo a la Figura (2.3). Las líneas verticales segmentadas indican la presencia de líneas de emisión considerando los redshifts presentados en la Tabla (3.1) para cada región.

anaranjado) parece alejarse cinemáticamente de las franjas, por lo que **LEDA 821642** se posiciona como la progenitora más probable de los *blue stripes*. De esta manera, la cola de gas ionizado resulta aproximadamente 63 veces más grande que el radio efectivo de la galaxia elíptica.

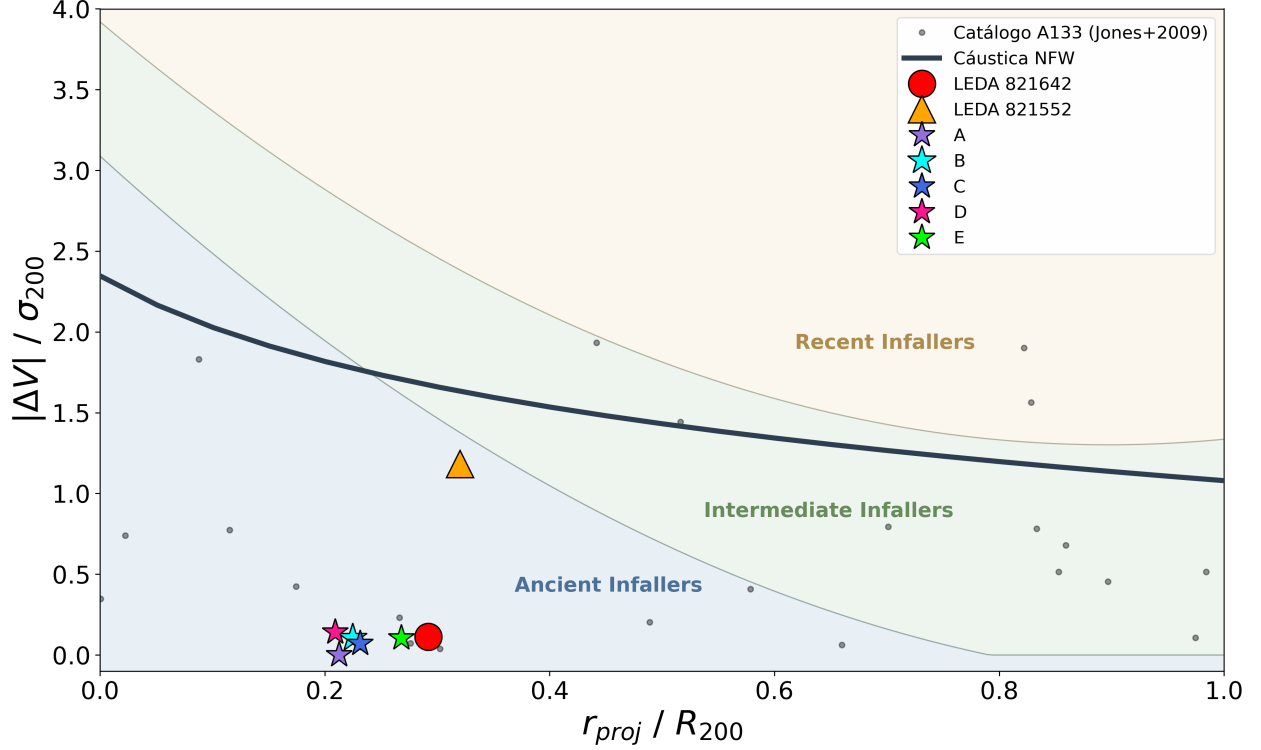


Figura 3.2: Diagrama de espacio de fase proyectado para las galaxias en el entorno del cúmulo Abell 133. En el eje vertical se muestra la velocidad peculiar relativa normalizada por la dispersión de la velocidad del cúmulo, y en el eje horizontal, la distancia proyectada al centro del cúmulo normalizada por el radio virial. Las líneas continuas representan las regiones delimitadas para diferentes poblaciones de galaxias según su tiempo de caída en el cúmulo. Se destacan con símbolos las posiciones de los blue stripes y las galaxias candidatas a liderarlos.

Por otra parte, la galaxia LEDA 820514, presente en la subestructura reportada por [Biviano et al. \(2017\)](#), no fue considerada como candidata a progenitora de las franjas azules debido a su lejanía espacial (ubicándose al sur de la estructura) y no concordancia con el sentido del movimiento, como se aprecia en la Fig. (2.1).

Adicionalmente, es posible notar que la velocidad relativa del sistema LEDA 821642 junto a los *blue stripes* es cercana a cero, lo que los sitúa formalmente en la zona de *ancient infallers* ([Rhee et al. \(2017\)](#) ; [Pasquali et al. \(2019\)](#)). Esto resulta inesperado para un evento de RPS típico, dado que suelen ocurrir con mayor frecuencia durante el primer paso de la galaxia a través del centro del cúmulo, en órbitas radiales, alcanzando una alta velocidad ([Jaffé et al. 2018](#)). Sin embargo, dado que esta estructura es mucho más alargada en el plano del cielo que a lo largo de la línea de visión, es probable que estemos presenciando un fuerte efecto de proyección y no un tiempo de caída realmente antiguo; bajo este escenario, la velocidad tridimensional real del sistema respecto al cúmulo debería ser significativamente mayor.

3.3. Fuente de ionización

Los *line-ratios* sitúan cuatro de los cinco espectros extraídos en la región de formación estelar del diagrama BPT (Fig. 3.3), por debajo de las líneas de demarcación tanto de Kauffmann et al. (2003) como de Kewley et al. (2001). El nudo restante, con la señal más débil de los cinco (Objeto E en la Fig. (2.3 y 3.1)), se posiciona en la región Seyfert; no obstante, dado que su espectro presenta un leve corrimiento y un bajo *signal to noise ratio*, no se puede descartar una identificación errónea de las líneas, por lo que no se consideró para este análisis, quedando a la espera de su confirmación con datos de mayor calidad. En general, la fotoionización por estrellas jóvenes y masivas es el mecanismo dominante a lo largo de las colas de galaxias medusa, por lo que la explicación más probable es que se estén formando nuevas estrellas *in situ* en los tentáculos de gas desprendido, cuya radiación UV ioniza el medio circundante.

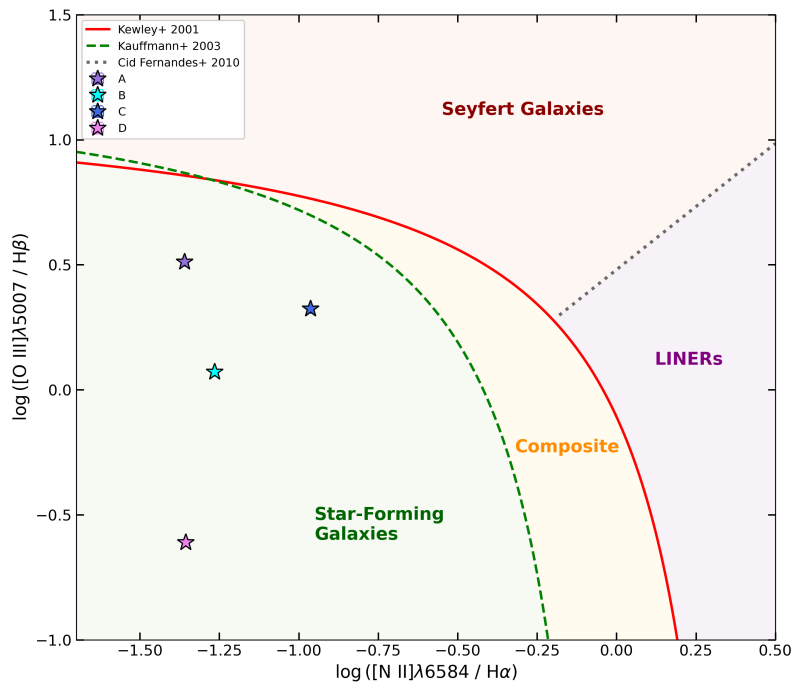


Figura 3.3: Diagrama BPT que considera 4 de los 5 espectros ubicado en los *blue stripes*. La característica E fue omitida dada su ambigua identificación de líneas espectrales y bajo *signal to noise ratio*.

De esta manera, la presencia de formación estelar *in-situ*, sumado con la detección de otras tres galaxias medusa que se desplazan en la misma dirección en el plano del cielo, respalda la hipótesis de que los *blue stripes* surgen tras un evento de ram-pressure stripping, ya que este fenómeno afecta únicamente al gas y no a la componente estelar.

3.4. Ubicación a gran escala

Con el objetivo de analizar el entorno a gran escala de A133, se graficaron los filamentos del cúmulo obtenidos con DisPerSE (Sousbie 2013; datos gentileza de Raúl Baier-Soto) sobre la imagen

óptica del cúmulo de Legacy Survey (véase la Fig. 3.4).

A diferencia de los escenarios típicos de acreción a través de filamentos, este sistema parece ingresar de forma perpendicular al filamento principal, alineado con la BCG. La dirección de movimiento de LEDA 821642 y sus colas de material despojado coincide con el desplazamiento de otras tres galaxias medusa observadas en el cúmulo, por lo tanto, esto sugiere que hay una dirección preferencial de caída, potenciando que los *blue stripes* surgen producto de la acción del ram-pressure stripping.

3.5. Morfología de la galaxia progenitora y origen del gas despojado

Aunque el estudio del RPS se asocia generalmente a galaxias espirales, la evidencia observacional indica que las galaxias elípticas en cúmulos también experimentan una pérdida de gas debido a la interacción con el ICM (Roediger et al. 2015). En los sistemas *early-type*, el RPS afecta principalmente a los halos de gas caliente, remodela el gas restante en colas y estelas, y puede acelerar el agotamiento del gas difuso (Sheen et al. 2017). Estudios que consideran observaciones en rayos X han revelado estructuras peculiares de halos de gas caliente desprendidos en galaxias como NGC 4552 (Machacek et al. 2006) en el cúmulo de Virgo. Aunque las galaxias elípticas están sometidas al mismo mecanismo físico que las galaxias *late-type*, en general, el RPS no afecta sustancialmente su evolución global debido a sus bajas tasas de formación estelar.

Hasta la fecha, uno de los pocos casos documentados de una galaxia elíptica que experimenta RPS generando colas de gas ionizado corresponde al trabajo de Sheen et al. (2017). Si bien la explicación del origen del gas en este sistema es incierta, los autores sugieren que la galaxia pudo haber experimentado una fusión rica en gas (*wet merger*).

En esta investigación no se cuenta con los datos necesarios que nos permitan esclarecer de dónde obtuvo el gas esta galaxia elíptica. Para aquello, debería analizarse a profundidad la morfología de LEDA 821642 en busca de características típicas de un evento de *post-merger* (tales como un halo perturbado, componentes rotacionales o *stellar streams*, entre otros), lo que podría ayudar a dilucidar el origen del gas en el sistema, previo al proceso de *stripping*.

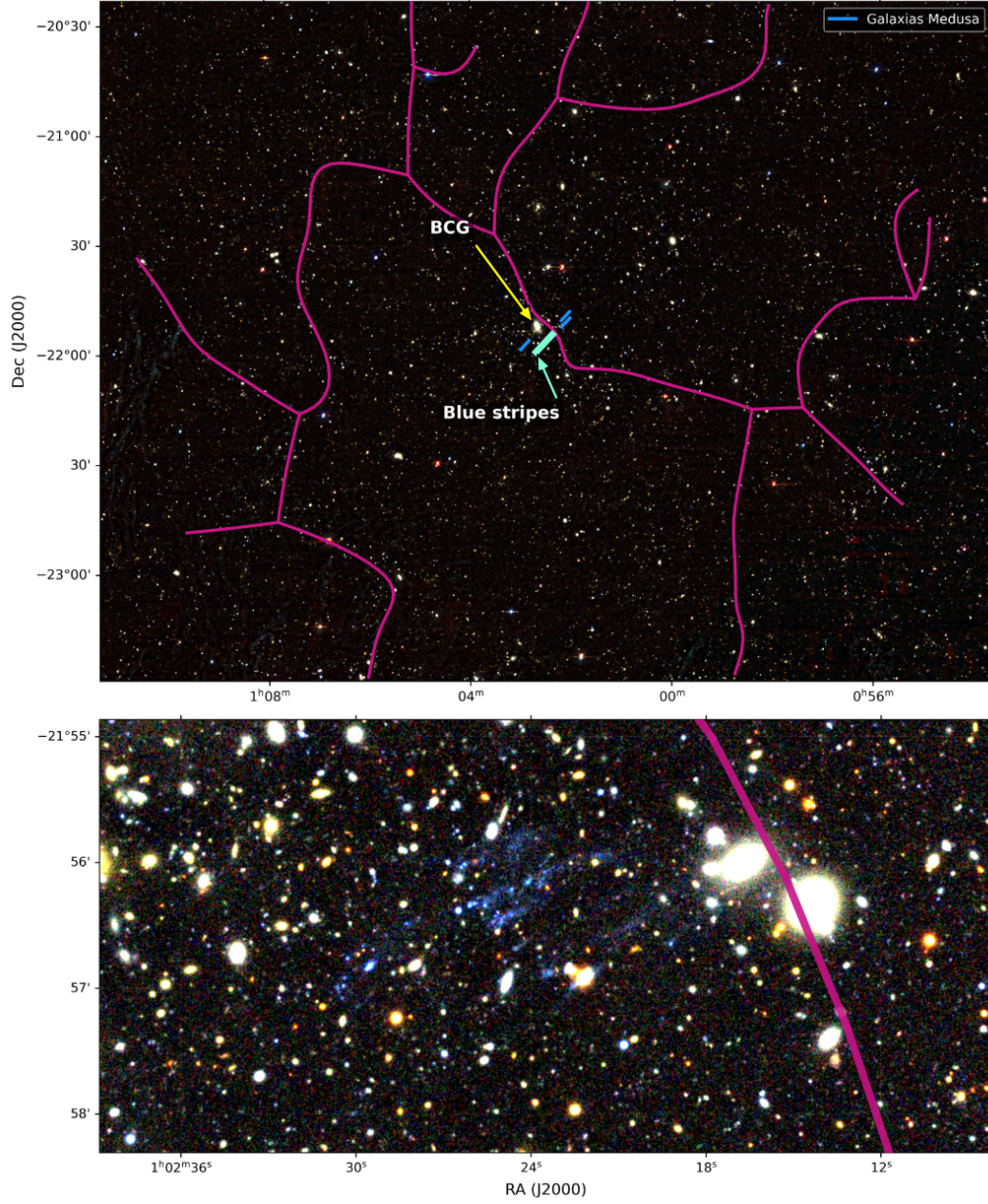


Figura 3.4: **Panel superior:** Zoom-out del Cúmulo A133, usando imagen de Legacy Survey, junto con los filamentos obtenidos de DisPerSE. Se aprecian las 3 galaxias medusa junto a los blue stripes, desplazándose en dirección perpendicular al filamento principal. **Panel inferior:** Zoom-in de los *blue stripes*, en donde se observa su trayectoria perpendicular al filamento principal.

Capítulo 4

Discusión y Conclusiones

En esta sección se discuten los principales hallazgos sobre la escala de los *blue stripes* en Abell 133, su origen y la morfología de su galaxia progenitora más probable. Al cierre, se proponen observaciones futuras para dar continuidad al estudio de este sistema y se sintetizan las conclusiones de esta investigación.

4.1. Discusión

En primer lugar, los cocientes de líneas en el diagrama BPT revelan que la fotoionización por estrellas jóvenes y masivas es el mecanismo dominante en los *blue stripes*, evidenciando formación estelar activa en el gas despojado. En particular, en las regiones A, B, C y D de la Fig. 2.3 parece observarse una especie de estructuras grumosas (*clumps*), las cuales podrían interpretarse tentativamente bajo el modelo de *fireballs* de Kenney et al. (2014). Este escenario considera que, producto del RPS, las estrellas formadas *in-situ* no sufren la presión hidrodinámica del ICM, por lo que se desacoplan del gas que les dio origen y quedan rezagadas, formando una estela con un gradiente de edad en dirección a la galaxia progenitora. Por el contrario, el gas despojado sigue siendo acelerado por el entorno; la componente difusa, al tener menor densidad, es arrastrada de forma más eficiente que las regiones densas, lo que genera además una cola de gas difuso extendida en sentido opuesto al movimiento de la galaxia. Bajo esta perspectiva, las regiones A, B, C y D corresponderían a la “cabeza” de estas *fireballs*; es decir, a los nudos más densos donde tiene lugar la formación estelar. Sin embargo, los datos de banda ancha actuales no permiten analizar en detalle la morfología de estas posibles estructuras.

Por otro lado, el análisis del *phase-space diagram* estableció que la galaxia elíptica LEDA 821642 es la progenitora más probable de los *blue stripes*, la cual sigue un movimiento mayormente perpendicular a la línea de visión. Esta configuración favorece la detección de colas de gas particularmente extensas, lo que se condice con la escala observada en los *blue stripes*, los cuales alcanzan una distancia proyectada de ~ 230 kpc, consolidándose como una de las regiones de gas ionizado (*Extended Ionized Gas regions*; EIGs) más extensas documentadas en entornos de cúmulos. La longitud de esta estructura supera a la de los sistemas de RPS más extensos detectados previamente en $H\alpha$, entre ellos UGC 6697 (~ 150 kpc; Yagi et al. 2017) y CGCG 97079 (~ 140 kpc; Yagi et al. 2017). Si bien en la literatura se ha reportado un filamento de gas ionizado de mayor extensión

(~ 330 kpc) en el cúmulo Abell 1367 (Yagi et al. 2017), dicha estructura se encuentra asociada a un grupo de galaxias en caída y no a la cola de una galaxia individual. De este modo, el sistema aquí presentado constituye una de las colas producidas por RPS más extensas reportadas hasta la fecha mediante fotometría de banda ancha con confirmación espectroscópica de gas ionizado, siendo comparable únicamente con la cola de ~ 230 kpc en NGC 4569, detectada en $H\alpha$ (Sun et al. 2026). Cabe destacar que los resultados de este trabajo se basan en imágenes ópticas de banda ancha, las cuales revelan principalmente la emisión del continuo estelar, y en espectros obtenidos en zonas puntuales de los *blue stripes*. Teniendo esto en consideración, es importante señalar que el gas difuso, al tener una menor densidad, se acelera con mayor facilidad por la *ram-pressure* del ICM, por lo que puede extenderse a distancias considerablemente mayores. Sin embargo, al carecer de una población estelar asociada, esta componente es muy tenue, lo que la vuelve indetectable en nuestros datos actuales. Particularmente, el caso de NGC 4569 constituye un ejemplo claro de este efecto, donde observaciones iniciales indicaban una cola de ~ 80 kpc (Boselli et al. 2016), mientras que datos más profundos revelaron posteriormente una extensión de hasta ~ 230 kpc (Sun et al. 2026). En consecuencia, la extensión reportada para los *blue stripes* debe interpretarse como un límite inferior al tamaño real del proceso de *stripping* en este sistema.

Más allá de su escala longitudinal, el ancho excepcional de los *blue stripes* (~ 140 kpc) representa una propiedad extrema sin precedentes en la literatura de EIGs. Además, la morfología colimada de la estructura sugiere la posible presencia de campos magnéticos orientados de manera paralela a la cola (Shin and Ruszkowski 2014; Müller et al. 2021), los cuales podrían contribuir a la preservación de su linealidad; sin embargo, el análisis detallado de este efecto escapa al alcance del presente trabajo.

Comúnmente, las galaxias elípticas en cúmulos se consideran sistemas pasivos y deficientes en gas frío. Por lo tanto, el hallazgo de esta extensa cola de gas ionizado posiciona a este sistema como un laboratorio de estudio poco convencional para investigar el ciclo del gas en entornos de alta densidad. La morfología elíptica de la galaxia progenitora (LEDA 821642) plantea una interrogante fundamental sobre la evolución de este sistema: ¿cuál fue el mecanismo que le permitió adquirir una reserva de gas lo suficientemente abundante como para desencadenar un evento de RPS de tal magnitud y eficiencia?. Con el objetivo de abordar esta interrogante, se propone como **trabajo futuro** la obtención de observaciones con el espectrógrafo de campo integral MUSE, cubriendo tanto la galaxia progenitora como la totalidad de la cola de gas. La alta resolución espacial y espectral de este instrumento permitirá estudiar la cinemática del sistema en búsqueda de alguna componente rotacional que pueda dar indicio de si este gas fue obtenido mediante un *merger* con una galaxia satélite rica en gas u otro mecanismo. Además, al contar con espectros por cada píxel de la estructura podremos extender el análisis del diagrama BPT de manera continua a lo largo de toda la extensión de los *blue stripes*, y caracterizar la extensión completa de la cola de gas ionizado, corroborando si su longitud total supera los 230 kpc reportados en este trabajo, tal como se espera si es que existe una componente difusa que no pudo ser detectada con los datos de banda ancha actualmente disponibles; además de definir el ancho de la estructura de manera precisa.

4.2. Conclusiones

A partir del análisis realizado en este trabajo, se desprenden las siguientes conclusiones acerca de la intrigante estructura presente en Abell 133:

1. Se confirma que los *blue stripes* **se encuentran ligados gravitacionalmente al cúmulo Abell 133**, con un redshift en el rango $z \sim [0.0566 - 0.0570]$; detectando la presencia de gas ionizado (H_α , H_β , $[N_{II}]$, $[O_{III}]$).
2. El análisis de cocientes de líneas de emisión en el diagrama BPT demuestra que el mecanismo de ionización dominante es la fotoionización por estrellas jóvenes y masivas, confirmando la existencia de **formación estelar *in-situ***.
3. El análisis del *phase-space diagram* apunta a la **galaxia elíptica LEDA 821642 como la progenitora más probable** de esta cola de gas. Al ubicarse a $\sim 0.3 R_{proj}$ del centro del cúmulo, el sistema se encuentra en la región de máxima eficiencia para los procesos de RPS. Asimismo, su velocidad relativa cercana a cero, se interpreta como un fuerte efecto de proyección por un **movimiento predominantemente en el plano del cielo**.
4. Su tamaño extraordinario, de al menos ~ 230 kpc de longitud lo posiciona como **una de las colas de gas ionizado, asociada a una galaxia individual, más extensas observadas hasta la fecha**, mientras que su ancho de ~ 140 kpc parece no tener precedentes entre los sistemas reportados en la literatura.
5. La naturaleza unilateral y extraplanar de esta cola, cuya extensión supera en ~ 63 veces el radio efectivo de la galaxia progenitora, combinada con una componente estelar imperturbada y la existencia de tres galaxias medusa con igual dirección de movimiento, permite clasificar este fenómeno como un **evento extremo de ram-pressure stripping**.

Así, los resultados obtenidos en esta investigación posicionan a este sistema como **uno de los pocos casos conocidos de colas de gas ionizado en galaxias elípticas**, producida por *ram-pressure stripping*, convirtiéndolo en un objeto excepcional para investigar los mecanismos ambientales que afectan a las galaxias en entornos densos.

Bibliografía

- Agostino, C. J. (2019). Crossing the line: Active galactic nuclei in the star-forming region of the bpt diagram. *The Astrophysical Journal*.
- Argudo-Fernández, M., Gómez Hernández, C., Verley, S., Zurita, A., Duarte Puertas, S., Blázquez Calero, G., Domínguez-Gómez, J., Espada, D., Florido, E., Pérez, I., and Sánchez-Menguiano, L. (2024). Morphologies of galaxies within voids. *Astronomy & Astrophysics*, 692:A258.
- Baldwin, J. A., Phillips, M. M., and Terlevich, R. (1981). Classification parameters for the emission-line spectra of extragalactic objects. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 93:5–19.
- Biviano, A., Moretti, A., Paccagnella, A., Poggianti, B. M., Bettoni, D., Gullieuszik, M., Vulcani, B., Fasano, G., D’Onofrio, M., Fritz, J., and Cava, A. (2017). The concentration-mass relation of clusters of galaxies from the OmegaWINGS survey. *Astronomy & Astrophysics*, 607:A81.
- Bond, J. R., Kofman, L., and Pogosyan, D. (1996). How filaments of galaxies are woven into the cosmic web. *Nature*, 380:603–606.
- Boselli, A., Boissier, S., Cortese, L., Buat, V., Hughes, T. M., and Gavazzi, G. (2009). High-mass star formation in normal late-type galaxies: Observational constraints to the initial mass function. *The Astrophysical Journal*, 706(2):1527–1544.
- Boselli, A., Cuillandre, J. C., Fossati, M., Boissier, S., Bomans, D., Consolandi, G., Anselmi, G., Cortese, L., Côté, P., Durrell, P., Ferrarese, L., Fumagalli, M., Gavazzi, G., Gwyn, S., Hensler, G., Sun, M., and Toloba, E. (2016). Spectacular tails of ionized gas in the virgo cluster galaxy ngc 4569. *Astronomy & Astrophysics*, 587:A68.
- Boselli, A., Fossati, M., and Sun, M. (2022). Ram pressure stripping in high-density environments. *The Astronomy and Astrophysics Review*, 30(1):3.
- Boselli, A. and Gavazzi, G. (2006). Environmental effects on late-type galaxies in nearby clusters. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 118(842):517–559.
- Boselli, A. and Gavazzi, G. (2014). On the origin of the faint-end of the red sequence in high-density environments. *Astronomy & Astrophysics*, 22:74.
- Cautun, M., van de Weygaert, R., Jones, B. J. T., and Frenk, C. S. (2014). Evolution of the cosmic web. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 441(4):2923–2973.

- Chung, A., Van Gorkom, J., Kenney, J. D., and Vollmer, B. (2007). Virgo galaxies with long one-sided hi tails. *The Astrophysical Journal Letters*, 659(2):L115–L119.
- Cid-Fernandes, R., Stasińska, A., Asari, N. V., Sodré, L., Mateus, G., Schlickmann, M., and Gomes, J. M. (2010). Alternative diagnostic diagrams and the “forgotten” population of weak line galaxies in the sdss. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 403:1036–1053.
- Connor, T., Kelson, D. D., Mulchaey, J., Vikhlinin, A., Patel, S. G., Balogh, M. L., Joshi, G., Kraft, R., Nagai, D., and Starikova, S. (2018). Wide-field optical spectroscopy of abell 133: A search for filaments reported in x-ray observations. *The Astrophysical Journal*, 867(1):25.
- Cortese, L., Catinella, B., and Smith, R. (2021). The dawes review 9: The role of cold gas stripping on the star formation quenching of satellite galaxies. *Publications of the Astronomical Society of Australia*, 38:e035.
- Cowie, L. L. and Songaila, A. (1977). Thermal evaporation of gas within galaxies by a hot intergalactic medium. *Nature*, 266(5602):501–503.
- Cramer, W. J., Kenney, J. D. P., Sun, M., Crawl, H., Yagi, M., Jáchym, P., Roediger, E., and Waldron, W. (2019). Spectacular hubble space telescope observations of the coma galaxy d100 and star formation in its ram pressure–stripped tail. *The Astrophysical Journal*, 870(2):63.
- Dressler, A. (1980). Galaxy morphology in rich clusters: implications for the formation and evolution of galaxies. *The Astrophysical Journal*, 236:351–365.
- D’Onofrio, M., Bindoni, D., Fasano, G., Bettoni, D., Cava, A., Fritz, J., Gullieuszik, M., Kjærgaard, P., Moretti, A., Moles, M., Omizzolo, A., Poggianti, B. M., Valentinuzzi, T., and Varela, J. (2014). Surface photometry of wings galaxies with gasphot. *Astronomy & Astrophysics*, 572:A87.
- Fasano, G., Vanzella, E., Dressler, A., Poggianti, B. M., Moles, M., Bettoni, D., Valentinuzzi, T., Moretti, A., D’Onofrio, M., Varela, J., Couch, W. J., Kjærgaard, P., Fritz, J., Omizzolo, A., and Cava, A. (2012). Morphology of galaxies in the WINGS clusters. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 420(2):926–948.
- Fossati, M., Fumagalli, M., Boselli, A., Gavazzi, G., Sun, M., and Wilman, D. J. (2016). Muse sneaks a peek at extreme ram-pressure stripping events – ii. the physical properties of the gas tail of eso137-001. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 455(2):2028–2041.
- Fruscione, A., Glotfelty, K., Joye, W., and McDowell, J. (2026). SAOImageDS9: An Essential Tool for Astronomical Exploration. , 172(2):116.
- Goto, T., Yamauchi, C., Fujita, Y., Okamura, S., Sekiguchi, M., Smail, I., Bernardi, M., and Gomez, P. L. (2003). The morphology-density relation in the sloan digital sky survey: Morphology-density relation in the sdss. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 346(2):601–614.
- Gunn, J. E. and Gott, III, J. R. (1972). On the Infall of Matter Into Clusters of Galaxies and Some Effects on Their Evolution. *The Astrophysical Journal*, 176:1–19.

- Jaffé, Y. L., Poggianti, B. M., Moretti, A., Gullieuszik, M., Smith, R., Vulcani, B., Fasano, G., Fritz, J., Hau, G., Bettoni, D., and D’Onofrio, M. (2018). GASP. IX. Jellyfish galaxies in phase-space: an orbital study of intense ram-pressure stripping in clusters. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 476(4):4753–4764.
- Jones, D. H., Read, M. A., Saunders, W., Colless, M., Jarrett, T., Parker, Q. A., Fairall, A. P., Mauch, T., Sadler, E. M., Watson, F. G., Burton, D., Campbell, L. A., Cass, P., Croom, S. M., Dawe, J., Fiegert, K., Frankcombe, L., Hartley, M., Huchra, J., James, D., Kirby, E., Lahav, O., Lucey, J., Mamon, G. A., Moore, L., Peterson, B. A., Prior, S., Proust, D., Russell, K., Safouris, V., Wakamatsu, K.-i., Westra, E., and Williams, M. (2009). The 6df galaxy survey: final redshift release (dr3) and southern large-scale structures. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 399(2):683–698.
- Jáchym, P., Kenney, J. D. P., Sun, M., Combes, F., Cortese, L., Scott, T. C., Sivanandam, S., Brinks, E., Roediger, E., Palouš, J., and Fumagalli, M. (2019). Alma unveils widespread molecular gas clumps in the ram pressure stripped tail of the norma jellyfish galaxy. *The Astrophysical Journal*, 883(2):145.
- Kauffmann, G., Heckman, T. M., Tremonti, C., Brinchmann, J., Charlot, S., White, S. D. M., Ridgway, S. E., and Brinkmann, J. (2003). The host galaxies of active galactic nuclei. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 346:1055–1077.
- Kenney, J. D. P., Geha, M., Jáchym, P., Cowl, H. H., Dague, W., Chung, A., van Gorkom, J., and Vollmer, B. (2014). Transformation of a Virgo Cluster Dwarf Irregular Galaxy by Ram Pressure Stripping: IC3418 and Its Fireballs. *The Astrophysical Journal*, 780(2):119.
- Kennicutt, R. C. (1998). Star formation in galaxies along the hubble sequence. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 36(1):189–231.
- Kewley, L. J., Dopita, M. A., Sutherland, R. S., Heisler, C. A., and Trevena, J. (2001). Theoretical modeling of starburst galaxies. *The Astrophysical Journal*, 556(1):121–140.
- Knebe, A., Gill, S. P. D., Gibson, B. K., Lewis, G. F., Ibata, R. A., and Dopita, M. A. (2004). Anisotropy in the Distribution of Satellite Galaxy Orbits. , 603(1):7–11.
- Kravtsov, A. V. and Borgani, S. (2012). Formation of Galaxy Clusters. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 50(1):353–409.
- Las Campanas Observatory (2020). Instrumentos magallanes. <https://www.lco.cl/es/instrumentos-magallanes/>.
- Machacek, M., Jones, C., Forman, W. R., and Nulsen, P. (2006). Chandra observations of gas stripping in the elliptical galaxy ngc 4552 in the virgo cluster. *The Astrophysical Journal*, 644(1):155–166.
- Moore, B., Lake, G., and Katz, N. (1998). Morphological Transformation from Galaxy Harassment. *The Astrophysical Journal*, 495(1):139–151.

- Morandi, A. and Cui, W. (2014). Measuring the gas clumping in Abell 133. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 437(2):1909–1917.
- Morandi, A., Nagai, D., and Cui, W. (2013). Non-parametric method for measuring gas inhomogeneities from X-ray observations of galaxy clusters. , 436(2):1123–1129.
- Müller, A., Ignesti, A., Poggianti, B., Moretti, A., Ramatsoku, M., and Dettmar, R.-J. (2021). Role of magnetic fields in ram pressure stripped galaxies. *Galaxies*, 9(4):116.
- Navarro, J. F., Frenk, C. S., and White, S. D. M. (1997). A universal density profile from hierarchical clustering. *The Astrophysical Journal*, 490(2):493–508.
- Nulsen, P. E. J. (1982). Transport processes and the stripping of cluster galaxies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 198(4):1007–1016.
- Pasquali, A., Smith, R., Gallazzi, A., De Lucia, G., Zibetti, S., Hirschmann, M., and Yi, S. K. (2019). Physical properties of sdss satellite galaxies in projected phase space. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 484(2):1702–1723.
- Peng, Y., Maiolino, R., and Cochrane, R. (2015). Strangulation as the primary mechanism for shutting down star formation in galaxies. *Nature*, 521(7551):192–195.
- Poggianti, B. M., Gullieuszik, M., Tonnesen, S., Moretti, A., Vulcani, B., Radovich, M., Jaffé, Y. L., Fritz, J., Bettoni, D., Franchetto, E., Fasano, G., Bellhouse, C., and McGee, S. (2019). GASP. XXIII. A Jellyfish Galaxy as an Astrophysical Laboratory of the Baryonic Cycle. *The Astrophysical Journal*, 883(1):46.
- Poggianti, B. M., Jaffé, Y. L., Moretti, A., Gullieuszik, M., Radovich, M., Tonnesen, S., Fritz, J., Bettoni, D., Vulcani, B., Fasano, G., Bellhouse, C., Hau, G., and Omizzolo, A. (2017a). Ram-pressure feeding of supermassive black holes. *Nature*, 548(7667):304–309.
- Poggianti, B. M., Moretti, A., Gullieuszik, M., Fritz, J., Jaffé, Y., Bettoni, D., Fasano, G., Bellhouse, C., Hau, G., Vulcani, B., Biviano, A., Omizzolo, A., Paccagnella, A., D’Onofrio, M., Cava, A., Sheen, Y.-K., Couch, W., and Owers, M. (2017b). Gasp. i. gas stripping phenomena in galaxies with muse. *The Astrophysical Journal*, 844(1):48.
- Poggianti, B. M., Vulcani, B., Tomicic, N., Moretti, A., Gullieuszik, M., Bacchini, C., Fritz, J., George, K., Gitti, M., Ignesti, A., Jaffé, Y., Lassen, A., Marasco, A., Radovich, M., Serra, P., Smith, R., Tonnesen, S., and Wolter, A. (2025). The MUSE view of ram pressure stripped galaxies in clusters: The GASP sample. , 699:A357.
- Rhee, J., Smith, R., Choi, H., Yi, S. K., Jaffé, Y., Candlish, G., and Sánchez-Jánsen, R. (2017). Phase-space Analysis in the Group and Cluster Environment: Time Since Infall and Tidal Mass Loss. *The Astrophysical Journal*, 843(2):128.
- Rodríguez-Medrano, A. M., Paz, D. J., Stasyszyn, F. A., Rodríguez, F., Ruiz, A. N., and Merchán, M. (2023). Local and large-scale effects on the astrophysics of void galaxies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 521(1):916–925.

- Roediger, E. and Brüggen, M. (2008). Ram-pressure stripping of disc galaxies orbiting in clusters – ii. galactic wakes. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 388(2):465–486.
- Roediger, E., Kraft, R. P., Nulsen, P. E. J., Forman, W. R., Machacek, M., Randall, S., Jones, C., Churazov, E., and Kokotanekova, R. (2015). Stripped Elliptical Galaxies as Probes of ICM Physics: II. Stirred, but Mixed? Viscous and Inviscid Gas Stripping of the Virgo Elliptical M89. *The Astrophysical Journal*, 806(1):104.
- Scott, T., Cortese, L., Brinks, E., Bravo-Alfaro, H., Auld, R., and Minchin, R. (2012). Two long hi tails in the outskirts of abell 1367. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters*, 419(1):L19–L23.
- Sheen, Y.-K., Smith, R., Jaffé, Y., Kim, M., Yi, S. K., Duc, P.-A., Nantais, J., Candlish, G., Demarco, R., and Treister, E. (2017). Discovery of ram-pressure stripped gas around an elliptical galaxy in abell 2670. *The Astrophysical Journal Letters*, 840(1):L7.
- Shin, M.-S. and Ruszkowski, M. (2014). Ram pressure stripping in elliptical galaxies – ii. magnetic field effects. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 445(2):1997–2014.
- Sifón, C., Finoguenov, A., Haines, C. P., Jaffé, Y., Amrutha, B. M., Demarco, R., Lima, E. V. R., Lima-Dias, C., Méndez-Hernández, H., Merluzzi, P., et al. (2025). CHANCES, the Chilean Cluster Galaxy Evolution Survey: Selection and initial characterisation of clusters and superclusters. *Astronomy & Astrophysics*, 697:1–16.
- Smith, R. J., Hudson, M. J., Nelán, J. E., Moore, S. A. W., Quinney, S. J., Wegner, G. A., Lucey, J. R., Davies, R. L., Malecki, J. J., and Schade, D. (2004). NOAO Fundamental Plane Survey. I. Survey Design, Redshifts, and Velocity Dispersion Data. *The Astronomical Journal*, 128(4):1558–1583.
- Sousbie, T. (2013). Disperse: robust structure identification in 2d and 3d.
- Starikova, S., Vikhlinin, A., Kravtsov, A., Kraft, R., Connor, T., Mulchaey, J. S., and Nagai, D. (2020). Stellar-mass measurements in a133 with magellan/imacs. *The Astrophysical Journal*, 892:34.
- Sun, M., Le, H., Epinat, B., Boselli, A., Luo, R., Hosogi, K., Pichette, N., Forman, W., Sarazin, C., Fossati, M., Chen, H., Hensler, G., Sarpa, E., Amram, P., Braine, J., Cuillandre, J. C., Gwyn, S., Martocchia, S., and Vollmer, B. (2026). A virgo environmental survey tracing ionised gas emission (vestige): Xix. the discovery of a spectacular 230 kpc h alpha tail following ngc 4569 in the virgo cluster. *Astronomy & Astrophysics*, 705:A139.
- Tempel, E., Stoica, R. S., Martínez, V. J., Liivamägi, L. J., Castellan, G., and Saar, E. (2014). Detecting filamentary pattern in the cosmic web: a catalogue of filaments for the sdss. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 438(4):3465–3482.
- Tody, D. (1986). The Iraf Data Reduction And Analysis System. In Crawford, D. L., editor, *Instrumentation in Astronomy VI*, volume 0627, pages 733 – 748. International Society for Optics and Photonics, SPIE.

- Vulcani, B., Poggianti, B. M., Smith, R., Moretti, A., Akerman, N., Gullieuszik, M., Tonnesen, S., Fritz, J., Jaffe, Y. L., et al. (2022). The relevance of ram pressure stripping for the evolution of blue cluster galaxies as seen at optical wavelengths. *The Astrophysical Journal*, 927(1):91.
- Yagi, M., Komiyama, Y., Yoshida, M., Furusawa, H., Kashikawa, N., Koyama, Y., and Okamura, S. (2007). The remarkable 60x2 kpc optical filament associated with a poststarburst galaxy in the coma cluster. *The Astrophysical Journal*, 660(2):1209–1214.
- Yagi, M., Yoshida, M., Gavazzi, G., Komiyama, Y., Kashikawa, N., and Okamura, S. (2017). Extended ionized gas clouds in the abell 1367 cluster. *The Astrophysical Journal*, 839(1):65.
- Zaritsky, D., Crossett, J. P., Jaffé, Y. L., Donnerstein, R., Karunakaran, A., Khim, D. J., Lourenço, A. C. C., Spekkens, K., Sun, M., and Vulcani, B. (2023). An enigmatic 380 kpc long linear collimated galactic tail. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 524(1):1431–1440.

Apéndice A

Data Reduction files.

Tabla A.1: Resumen de correcciones por *flat-fielding*, usando el flat más cercano a cada exposición, y asignación de las lámparas de arco. Todos los archivos utilizados en este paso fueron previamente corregidos con el proceso de *bias subtraction*, considerando cada uno de los 8 chips.

Dataset	Rango de archivos	Arco (HeNeAr)	Flat de Referencia
Ciencia (Blue Stripes)			
BS1 (Set 1)	ift0065 – ift0070	ift0071.fits	ift0072.fits
BS1 (Set 2)	ift0073 – ift0078	ift0081.fits	ift0080.fits
BS2	ift0084 – ift0088	ift0089.fits	ift0090.fits
Estrellas Estándar			
LTT7987	ift0048	ift0049.fits	ift0021.fits
g93-48	ift0060	ift0061.fits	ift0021.fits
g24-9	ift0055	ift0057.fits	ift0021.fits

Apéndice B

Parámetros del proceso de extracción.

Tabla B.1: Parámetros de extracción de los espectros que presentaron emisión del *Blue Stripe 1*. Los archivos del **blue stripe 1** cuentan con 2 sets de observaciones, por lo que se usaron las mismas coordenadas para ambos sets. Para el análisis en este trabajo se tomaron en cuenta aquellos espectros que presentaron emisión en su componente 2D; en este caso, sólo el espectro n°9 (marcado en negrita). Los otros dos espectros considerados en el análisis (características B y C en la Fig. 2.3) fueron reducidos por la Dra. Amrutha Belwadi.

Espectro	Tipo	Chip	Área DS9	Centro (píxel)	RMS
Spec 3	<i>Brighter</i>	C2	[550:950, 5:4096]	195	0.40
	<i>No Emission</i>	C5	[1100:1500, 500:4096]	200	0.22
Spec 4	<i>Fainter</i>	C2	[580:990, 5:4096]	230	0.24
	<i>No Emission</i>	C5	[1050:1500, 500:4096]	190	0.26
Spec 5	<i>Fainter</i>	C2	[860:1250, 5:4096]	175	0.38
	<i>No Emission</i>	C5	[770:1200, 500:4096]	240	0.26
Spec 9	<i>Brighter</i>	C2	[1860:2048, 10:4096]	122	0.39
	<i>Emission</i>	C5	[1:141, 500:4096]	60	0.24

Nota: Los espectros 1 y 3 del *Blue Stripe 1* (mencionados en el epígrafe como reducidos por la Dra. Amrutha Belwadi) corresponden a los Chips 3 y 8, cuyas coordenadas para los puntos centrales de emisión son:

Espectro 1: (152, 3159) en Chip 3 y (1889, 3787) en Chip 8.

Espectro 3: (270, 3157) en Chip 3 y (1771, 3786) en Chip 8.

Tabla B.2: Parámetros de extracción de los espectros que presentaron emisión del *Blue Stripe 2*. Los archivos del **blue stripe 2** tienen sólo 1 set de observaciones.

Espectro	Tipo	Chip	Área DS9	Centro (píxel)	RMS
Spec 1	<i>Fainter</i>	C3	[120:425, 5:4096]	188	0.3416
	<i>Emission</i>	C8	[1610:1900, 500:4096]	126	0.2395
Spec 2	<i>Slightly brighter</i>	C3	[460:950, 5:4096]	241	0.3911
	<i>Emission</i>	C8	[1200:1600, 5:4096]	142	0.2672

Apéndice C

Flujo y S/N de cada línea

Tabla C.1: Flujos y relación señal a ruido (S/N) de las líneas de emisión empleadas para la realización del diagrama BPT.

Espectro	<i>Feature</i>	Métrica	$H\beta$ ($\lambda 4861$)	[O III] ($\lambda 5007$)	$H\alpha$ ($\lambda 6563$)	[N II] ($\lambda 6583$)
BS1 Spec 1	B	Flujo	2.37	2.74	0.88	0.30
		S/N	19.46	26.21	62.01	20.31
BS1 Spec 3	C	Flujo	3.92	8.26	13.50	1.47
		S/N	31.24	51.87	202.26	18.37
BS1 Spec 9	A	Flujo	6.37	20.70	14.91	0.65
		S/N	145.41	493.41	249.62	12.33
BS2 Spec 1	D	Flujo	3.82	0.94	3.60	0.16
		S/N	35.37	11.60	60.60	3.31*
BS2 Spec 2	E	Flujo	0.26	2.04	1.85	0.67
		S/N	5.49*	46.91	43.83	22.18

Notas: Los flujos de las líneas están expresados en unidades de 10^{-17} erg s $^{-1}$ cm $^{-2}$.

* Casos con bajo S/N. En general, los espectros de las zonas D y E presentan un leve corrimiento en las líneas espectrales, por lo que no se tiene la certeza de si los flujos medidos corresponden a determinada línea.

Apéndice D

Esquema del modelo de *fireballs*

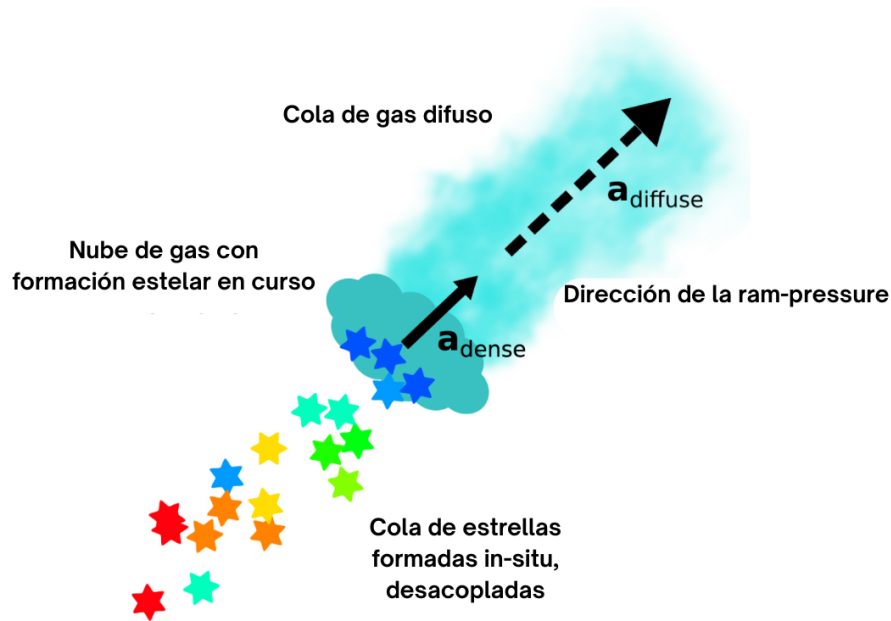


Figura D.1: Representación esquemática del modelo de *fireballs*, adaptado desde Jáchym et al. (2019). Considera una cola de estrellas formadas *in-situ* apuntando hacia la galaxia, desacopladas de la nube de gas que se acelera hacia el exterior, y otra cola de gas difuso, arrancada por la *ram-pressure* de la nube más densa, que se extiende en la dirección opuesta. El gas difuso, con una densidad superficial menor, se acelera más que el gas denso (tal y como indican las flechas). En este escenario sencillo, se formaría un gradiente de edad a lo largo de la cola estelar, pero la fragmentación adicional y el enfriamiento o colapso de los grumos densos de formación estelar desacoplados podrían complicarlo.