

Curso 2012/13  
**CIENCIAS Y TECNOLOGÍAS/47**  
I.S.B.N.: 978-84-15939-23-8

**CARMEN PILAR PADILLA TORRES**

**Búsqueda de la Materia Bariónica  
en el Supercúmulo de Corona Borealis**

**Directores**  
**RAFAEL REBOLO LÓPEZ**  
**JORDI CEPÀ NOGUÉ**



**SOPORTES AUDIOVISUALES E INFORMÁTICOS**  
**Serie Tesis Doctorales**

A mis padres, Francisco y Pilar  
a mis hermanas, Guacimara y Sonia,  
a mis abuelos Carmen y José  
y a Dani por todo el amor recibido.

Yo digo que las estrellas  
le dan gracias a la noche,  
porque encima de otro coche  
no pueden lucir tan bellas.  
Y digo que es culpa de ella  
-de la noche- el universo,  
cual son culpables los versos  
de que haya noches y estrellas.

**Silvio Rodriguez (1973)**

## AGRADECIMIENTOS

El camino que recorre un estudiante hasta que concluye una tesis es largo y en ocasiones tedioso. El individuo espera que todas sus hipótesis sean ciertas y, aunque no sin dedicarle trabajo, se obtenga una respuesta a la primera. Normalmente, el plan de trabajo establecido en un principio se tuerce, se sale por todas las tangentes que encuentra, plantea nuevos problemas y nuevos retos, pero vuelve al camino trazado, suele ser la diferencia que hay entre la variable física de distancia y desplazamiento. Me gustaría agradecer a mis padres Pilar y Francisco por los valores, el espíritu de sacrificio que he visto en ellos y que me ha servido de apoyo. A mis abuelos Carmen y José que sin darse apenas cuenta me picaron con el gusanillo de la astronomía al comentarme todas las noticias que salían en los medios. Y a mis hermanas Guacimara y Sonia por el empuje y la paciencia que han tenido en todo momento, la ayuda y el cariño que me han dedicado. Les doy las gracias y dedico esta tesis a toda mi *Familia* porque han sabido inculcarme el espíritu de superación, de trabajo, la constancia, la paciencia para trazar mi carrera y en momentos difíciles he notado su apoyo en todo momento. A Dani, por el reimpulso, por la energía, la motivación que me ha transmitido para finalizar esta tesis y por los debates que hemos tenido a raíz de ella sobre el Universo y sus mecanismos.

Quisiera mencionar al principal motor económico de esta tesis que ha sido la beca FPI ESP2002-03716 del Plan Nacional del Espacio 2002 otorgada para el desarrollo de este proyecto.

Por supuesto, quiero hacer mención especial a Rafael Rebolo López y a Jordi Cepa Nogué, mis directores de Tesis, a los que les agradezco el tiempo que me han dedicado y las enseñanzas que dejan en mí, la admiración y el respeto que siento por ellos y la oportunidad que me han brindado al conocerlos y trabajar a su lado. Quiero agradecer a Carlos Gutierrez todas las horas que dedicó a enseñarme las herramientas más importantes con las que se ha desarrollado el trabajo de los datos de esta Tesis, por ejemplo, la reducción de espectros a la que le dedicó mucho tiempo pues prácticamente tuve que aprenderlo todo. De su despacho siempre salía motivada a aprender tanto como él y con una sonrisa ya que derrocha un humor especial.

Quisiera agradecer al IAC la oportunidad que me ha brindado para desarrollar mi trabajo entre ellos, sin olvidar que se trata de un grupo humano importante compuesto por astrofísicos, ingenieros, informáticos, personal de administración, recepción, mantenimiento entre otros y entre los que contemplo a grandes amigos y personas que admiro de una u otra forma.

Pero a lo largo de ese recorrido una tesis es algo más que estudiar y trabajar, se conocen personas y se trata con ellas día a día, convirtiéndose, en la mayoría de los casos en amigos cercanos debido a que pasamos la mayor parte del camino compartiendo despacho, risas y, porqué no decirlo, cafetería. Por esta razón y porque han sido muchos los compañeros que he tenido a lo largo de la tesis y no les haría justicia si no los nombro en este agradecimiento intento no olvidarme de ninguno nombrándolos a todos en general.

Me complace recordar a los compañeros del consorcio de VSA, de los que aprendí de todo un poco y mucho en especial. A todos mis compañeros del Telescopio Nazionale Galileo, institución que me acoge desde hace unos años, y a Emilio Molinari por la comprensión y el empuje para con esta tesis.

*Y a mi fiel amigo "Tahiche", por todos los paseos que no distes,  
y por las tardes de compañía mientras yo escribía.*

## Resumen

Uno de los parámetros más relevantes en la descripción del Universo es la densidad bariónica media. Esta ha sido estimada a través de las abundancias de los elementos primordiales y confirmada en estudios recientes del espectro de potencias del Fondo Cósmico de Microondas (FCM). Sin embargo, las observaciones de la materia bariónica en el universo actual sólo pueden dar cuenta de un contenido bariónico un factor dos más bajo. Esta fracción de bariones que faltan pueden estar distribuidos en las grandes estructuras del Universo a lo largo de filamentos que conectan a los cúmulos de galaxias, en forma de “gas difuso templado/caliente”, de temperatura  $10^5 K \leq T \leq 10^7 K$ , según sugieren simulaciones de la evolución de la estructura en el Universo. Una posible forma de identificar este tipo de bariones es mediante el efecto Compton inverso que un gas a esta elevada temperatura produciría en los fotones del FCM (el efecto Sunyaev-Zel’dovich, SZ).

El interferómetro VSA del Observatorio del Teide ha intervenido en la búsqueda de este tipo de materia. Ha producido mapas a  $\sim 33$  GHz, con un haz de  $11'$  y una sensibilidad de  $20$  mJy, para el Supercúmulo de Corona Borealis (CrB-SC). Se ha observado una región de  $\sim 36^\circ$  cuadrados detectando una zona dentro del Supercúmulo que podría estar asociada a un efecto SZ producido por el gas difuso a escalas más grandes que la de los cúmulos de galaxias, (Génova-Santos et al. 2005, 2008). En esta tesis se ha estudiado la población galáctica de dicha zona, denominada CrB-H, y verificado la existencia de alguna diferencia respecto a otras regiones, cumulares o intercumulares, del Supercúmulo. Se han utilizado, para ello, datos fotométricos y espectroscópicos de los distintos años del Sloan Digital Sky Survey. Asimismo, se ha realizado un estudio espectroscópico más profundo utilizando el instrumento AF2-WYFFOS del William Herschel Telescope del Observatorio del Roque de los Muchachos. Se trató de averiguar si las características de las galaxias que pueblan la zona de CrB-H tienen relación con las de las galaxias que habitan los cúmulos del CrB-SC o si, por el contrario, son similares a las de las galaxias que pueblan el medio intercumular. También se ha realizado un estudio morfológico de las galaxias que pueblan la zona de CrB-SC. Finalmente, se ha tratado de caracterizar las diferentes estructuras que hemos encontrado en CrB-H, y se ha parametrizado la contribución que cada una de éstas aportan al efecto SZ hallado en los mapas de VSA.

Los principales resultados obtenidos son:

- La región subtendida por el decremento de VSA tiene una sobredensidad de galaxias, en comparación con los valores medios en áreas seleccionadas al azar en todo el cielo.
- Se ha estudiado la distribución de desplazamientos al rojo de la región CrB-H. Se han encontrado notables sobredensidades de galaxias alrededor de  $z = 0.07$  (CrB-H- $lz$ ) y a mayor desplazamiento al rojo,  $z = 0.11$  (CrB-H- $hz$ ). Sin embargo, no encontramos la evidencia de una conexión entre estas dos regiones.
- La densidad radial de las galaxias para CrB-H- $lz$  muestra un comportamiento más plano que el que presentan cada uno de los cúmulos Abell 2065 y Abell 2069. Para CrB-H- $hz$  la distribución radial muestra una densidad ligeramente superior en el centro, indicativo de que CrB-H- $hz$  podría tener algún grado de virialización.

- CrB-H- $lz$  podría ser un filamento de unas decenas de Mpc que se extiende desde  $0.07 \leq z \leq 0.09$ . CrB-H- $hz$  es un candidato a cúmulo de galaxias que podría contribuir al decremento de temperatura del FCM detectado, pero que por sí solo no puede dar cuenta de la totalidad del efecto SZ registrado en CrB-H. La morfología y colores de las galaxias que pueblan CrB-H- $hz$  son similares a las que pueblan Abell 2069 en formas y colores. La opción que se considera más probable es que la señal SZ resulte de una combinación de efectos causados por estas dos estructuras.

# Índice

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. El problema de los bariones perdidos . . . . .	1
1.1.1. Ubicación de los bariones . . . . .	2
1.1.2. El Fondo Cósmico de Microondas y el efecto Sunyaev-Z'eldovich como trazador de los bariones . . . . .	3
1.1.3. Definición y descripción del Efecto SZ . . . . .	5
1.2. Los supercúmulos . . . . .	7
1.2.1. El supercúmulo de Corona Borealis . . . . .	11
1.2.2. Características de las galaxias de CrB-SC y de A2069-SC . . . . .	14
1.3. El efecto SZ en el supercúmulo de Corona Borealis . . . . .	15
1.3.1. Observaciones Interferométricas del efecto SZ en Corona Borealis y posibles interpretaciones . . . . .	15
1.4. Objetivos de la tesis . . . . .	22
<b>2. Distribución espacial de las galaxias de CrB-SC en SDSS</b>	<b>23</b>
2.1. Datos del SDSS . . . . .	23
2.1.1. La secuencia roja del diagrama color magnitud . . . . .	24
2.1.2. La secuencia roja de los cúmulos de CrB-SC . . . . .	25
2.1.3. La Secuencia Roja de CrB-H . . . . .	25
2.2. Análisis . . . . .	29
2.2.1. La mancha fría de VSA: CrB-H . . . . .	29
2.2.2. La distribución de galaxias dentro de CrB-H . . . . .	30
2.2.3. Comparación con los campos de control . . . . .	32
2.2.4. Comparación con las zonas intercumulares de CrB-SC . . . . .	34
2.2.5. Comparación con los cúmulos de CrB-SC . . . . .	37
2.3. Teselaciones de Voronoi . . . . .	42
2.3.1. Desplazamiento al rojo fotométrico aplicado a las teselaciones de Voronoi . . . . .	43
2.4. Discusión . . . . .	46
<b>3. Análisis espectroscópico de las galaxias en la zona de la mancha utilizando SDSS</b>	<b>49</b>
3.1. Construcción del catálogo espectroscópico. . . . .	49

3.1.1.	El catálogo SDSS-DR7 . . . . .	49
3.2.	Distribución de desplazamientos al rojo del CrB-SC en el SDSS . . . . .	50
3.2.1.	Población de Galaxias en CrB-H . . . . .	51
3.2.2.	Comparación en zonas cumulares . . . . .	54
3.2.3.	Comparación con zonas intercumulares . . . . .	54
3.3.	Distribución de las galaxias en CrB-H . . . . .	55
3.3.1.	Distribución radial de las galaxias en CrB-H . . . . .	56
3.4.	Morfología de las galaxias en CrB-H. . . . .	68
3.4.1.	Estudio cualitativo de la morfología de las galaxias . . . . .	68
3.4.2.	Estudio cuantitativo de las galaxias de CrB-H . . . . .	74
3.5.	Discusión . . . . .	82
<b>4.</b>	<b>Nuevas observaciones espectroscópicas de CrB-H</b>	<b>85</b>
4.1.	Observaciones con el espectrógrafo multiobjeto AF2-WYFFOS . . . . .	85
4.1.1.	Características del instrumento . . . . .	85
4.1.2.	Criterios previos a la selección de objetos . . . . .	86
4.1.3.	Procedimiento para configurar los campos de observación . . . . .	87
4.2.	Observaciones . . . . .	89
4.2.1.	Criterio de selección de la muestra de galaxias . . . . .	91
4.2.2.	Reducción de datos . . . . .	92
4.3.	Resultados . . . . .	96
4.3.1.	Primeros resultados . . . . .	96
4.4.	Comparación de los Resultados WYFFOS con el SDSS-DR7 . . . . .	99
4.5.	Análisis de la comparación de datos entre WYFFOS y SDSS-DR7 . . . . .	103
4.6.	El candidato CrB-H- <i>hz</i> . . . . .	104
4.6.1.	Galaxias más brillantes de CrB-H- <i>hz</i> . . . . .	105
<b>5.</b>	<b>Estimación del Efecto SZ y Emisión Rayos X en CrB-H</b>	<b>111</b>
5.1.	Efecto Sunyaev-Zel'dovich térmico . . . . .	111
5.2.	Efecto Sunyaev-Zel'dovich cinético . . . . .	114
5.3.	Estimación del Efecto SZ y Emisión Rayos X en CrB-H . . . . .	114
5.3.1.	Estimación del efecto SZ debido a CrB-H- <i>hz</i> . . . . .	115
5.3.2.	Estimación del flujo de Rayos X en CrB-H- <i>hz</i> . . . . .	116
5.4.	Discusión . . . . .	119
<b>6.</b>	<b>Conclusiones y Perspectivas</b>	<b>121</b>
6.1.	Conclusiones . . . . .	121
6.2.	Futuros trabajos . . . . .	123
<b>A.</b>	<b>Bibliografía</b>	<b>127</b>
	<b>Bibliografía</b>	<b>127</b>
<b>B.</b>	<b>Ficheros de configuración</b>	<b>131</b>
B.1.	Fichero de configuración: Entrada de valores . . . . .	131
B.2.	Fichero de configuración: Salida de valores . . . . .	132

---

<b>C. Galaxias del Grupo CrB-H-<math>lz</math></b>	<b>133</b>
<b>D. Galaxias del Grupo CrB-H-<math>hz</math></b>	<b>143</b>
<b>E. Galaxias del Cúmulo Abell 2065</b>	<b>153</b>
<b>F. Galaxias del Cúmulo Abell 2069</b>	<b>169</b>
<b>G. Zona Intercumular RA:232.06 Dec:30.51</b>	<b>187</b>
<b>H. Zona Intercumular RA:230.56 Dec:30.01</b>	<b>197</b>
<b>I. Zona Intercumular RA:230.56 Dec:28.51</b>	<b>205</b>
<b>J. Zona Intercumular RA:228.56 Dec:28.01</b>	<b>217</b>
J.1. A bajo desplazamiento al rojo $0.06 \leq z \leq 0.10$ . . . . .	217
J.2. A alto desplazamiento al rojo $0.10 \leq z \leq 0.12$ . . . . .	224

# Índice de figuras

1.1. Espectro de Potencias del FCM . . . . .	4
1.2. Esquema ilustrativo sobre el Efecto Sunyaev-Zeldovich . . . . .	6
1.3. Universo Local a Gran Escala . . . . .	9
1.4. Diapasón de Hubble, morfología de las galaxias . . . . .	10
1.5. Distribución espacial de los cúmulos de Abell y cúmulos de Zwicky en CrB-SC. . . . .	12
1.6. Función de Luminosidad de las galaxias del supercúmulo de Corona Boreales vs. Abell 2069 . . . . .	15
1.7. Very Small Array del Observatorio del Teide, configuración Extendida y Superextendida . . . . .	16
1.8. Mapa de la región de Corona Borealis obtenido mediante el interferómetro VSA. . . . .	17
1.9. Mapa de Rayos-X obtenido por el satélite ROSAT . . . . .	18
1.10. Anisotropía primaria y mapas de SZE obtenidas con el telescopio MITO . . . . .	19
1.11. Mapas del decremento CrB-H en el CrB-SC obtenido con el VSA en su configuración superextendida. . . . .	20
1.12. Mapas del quinto año de datos WMAP en correlación con los mapas de VSA con la configuración superextendida. . . . .	21
2.1. Errores fotométricos de las galaxias en SDSS en función de su magnitud en los filtros $r$ e $i$ de Sloan. . . . .	24
2.2. a) Diagrama color magnitud simulado $((V - I_C)_{AB}, (I_C)_{AB})$ para distintos tipos morfológicos de galaxias. b) Diagrama Color Magnitud observado para un cúmulo de Abell 2390. . . . .	26
2.3. Diagrama Color-Magnitud de los cúmulos Abell pertenecientes a CrB-SC. Datos del SDSS hasta un radio de $R=15'$ . . . . .	27
2.4. DCM de CrB-H (arriba) y de distintas zonas intercumulares de CrB-SC cuyas coordenadas se detallan en la tabla 2.2 (abajo). Datos del SDSS con $R=15'$ . . . . .	28
2.5. Contornos de la mancha fría CrB-H. . . . .	31
2.6. Mapa de densidad del CrB-SC, $15 \leq r \leq 22$ . . . . .	33
2.7. Densidad de galaxias en tres rangos de magnitud $r$ dentro de la región de CrB-H en comparación con 1000 campos de control escogidos aleatoriamente en todo el cielo. . . . .	35

2.8. Distribución de celdas hasta un radio de $R=3^\circ$ desde el centro del SC para la comparación entre zonas intercumulares. . . . .	36
2.9. Densidad de galaxias para distintos cortes en la magnitud $r$ en función del radio para la mancha de VSA CrB-H, cúmulos y regiones intercumulares. . . . .	39
2.10. Densidad de galaxias en rango de magnitud en la región de $R = 2.5^\circ$ centrada en la posición de CrB-H. . . . .	40
2.11. Densidad de galaxias en rango de color en la región de $R = 2.5^\circ$ centrados en la posición de CrB-H. . . . .	41
2.12. Método de las teselaciones de Voronoi. . . . .	44
2.13. Método de las teselaciones de Voronoi aplicado sobre la selección de galaxias del CrB-SC a diferentes $z$ . . . . .	45
3.1. Histograma de la distribución de desplazamientos al rojo de las galaxias en la región de CrB-SC. . . . .	51
3.2. Distribución espacial en capas de desplazamiento al rojo de profundidad $\Delta z = 0.02$ hasta $z = 0.18$ en la región de CrB-SC. . . . .	58
3.3. Distribución de los posibles candidatos a cúmulos ajenos a CrB-H que se localizan en la región del CrB-SC. . . . .	59
3.4. Histograma de la distribución del número de celdas de tamaño angular $30' \times 30'$ y $\Delta z = 0.01$ con respecto a la población de galaxias de CrB-SC. . . . .	60
3.5. Distribución con respecto al desplazamiento al rojo de las galaxias que pueblan los primeros $20'$ de la región del cúmulo Abell 2065 perteneciente a CrB-SC. . . . .	61
3.6. Distribución radial de la densidad de las galaxias que pueblan los primeros $20'$ centrales de la región del cúmulo Abell 2065 perteneciente a CrB-SC. . . . .	62
3.7. Distribución con respecto al desplazamiento al rojo de las galaxias que pueblan los primeros $20'$ centrales de la región del cúmulo Abell 2069 perteneciente al supercúmulo ligado al mismo Abell 2069-SC. . . . .	63
3.8. Distribución radial de las galaxias que pueblan los primeros $20'$ centrales de la región del cúmulo Abell 2069 perteneciente al supercúmulo ligado al mismo Abell 2069-SC. . . . .	64
3.9. Distribución con respecto al desplazamiento al rojo de las galaxias que pueblan los primeros $20'$ de la región de CrB-H . . . . .	65
3.10. Distribución radial y espacial de las galaxias que pueblan los $20'$ centrales de la región de CrB-H- $lz$ ( $0.06 < z < 0.10$ ) . . . . .	66
3.11. Distribución radial y espacial de la densidad de las galaxias que pueblan los primeros $20'$ de arco centrales de la región de CrB-H- $hz$ a ( $0.10 < z < 0.12$ ) . . . . .	67
3.12. Distribución en el diagrama Color-color(u-g,g-r) y Diagrama Color Magnitud (r, r-i) de las galaxias de los grupos CrB-H- $lz$ y CrB-H- $hz$ . . . . .	69
3.13. Distribución en el diagrama Color-color(u-g,g-r) y Diagrama Color Magnitud (r, r-i) de las galaxias del cúmulo Abell 2065 . . . . .	71
3.14. Distribución en el diagrama Color-color(u-g,g-r) y Diagrama Color Magnitud (r, r-i) de las galaxias del cúmulo Abell 2069 . . . . .	72
3.15. Relación $r_{50}$ de las galaxias de CrB-H- $lz$ , CrB-H- $hz$ con las de Abell 2065 y una zona intercumular de CrB-SC. . . . .	75

3.16. Relación $\mu_{50}$ de las galaxias de CrB-H- <i>lz</i> , CrB-H- <i>hz</i> con las de Abell 2065 y una zona intercumular de CrB-SC (F2). . . . .	77
3.17. Comparación de la concentración $C$ de las galaxias de CrB-H- <i>lz</i> , CrB-H- <i>hz</i> con Abell 2065 y una zona intercumular de CrB-SC. . . . .	78
3.18. Relación $eClass$ de las galaxias de CrB-H- <i>lz</i> , CrB-H- <i>hz</i> con las de Abell 2065 y una zona intercumular de CrB-SC (F2). . . . .	80
3.19. Relación $C_{model}$ de las galaxias de CrB-H- <i>lz</i> , CrB-H- <i>hz</i> con las de Abell 2065 y una zona intercumular de CrB-SC (F2). . . . .	81
3.20. Relación $C$ vs. u-r de las galaxias de CrB-H- <i>lz</i> y CrB-H- <i>hz</i> . . . . .	82
4.1. Selección de objetos candidatos a la observación con AF2-WYFFOS desde la aplicación <i>Gaia</i> . . . . .	87
4.2. Configuraciones de fibras utilizadas en uno de los campos con AF2-WYFFOS	89
4.3. Comparación entre la determinación de los desplazamiento al rojo espectroscópicos del SDSS-DR5 con AF2-WYFFOS . . . . .	92
4.4. Comparación de galaxias observadas con AF2-WYFFOS en el campo de CrB-H. . . . .	93
4.5. Representación espacial de las galaxias para las cuales se determinó el desplazamiento al rojo con espectroscopia de AF2-WYFFOS . . . . .	94
4.6. Imagen directa del telescopio de una de las configuraciones de objetos obtenidas con AF2-WYFFOS, <i>campo plano</i> . . . . .	95
4.7. Histograma del desplazamiento al rojo de las galaxias medidas en CrB-SC con AF2-WYFFOS . . . . .	96
4.8. Distribución espacial de las galaxias para las que se determinó el desplazamiento al rojo con espectroscopia de AF2-WYFFOS . . . . .	97
4.9. Ejemplos de espectros de galaxias a $z=0.07$ , $z=0.08$ y $z=0.11$ observados con AF2/WYFFOS. . . . .	98
4.10. Histograma de distintas zonas del CrB-SC. CrB-H, Abell 2069 y control. . .	100
4.11. Correlación de las medidas de desplazamiento al rojo realizadas con AF2-WYFFOS con respecto a las existentes en SDSS. . . . .	101
4.12. Distribución de desplazamientos al rojo de las galaxias de CrB-H en un radio de $20'$ arco. . . . .	102
4.13. Distribución radial y espacial de las galaxias situadas en el rango de desplazamientos al rojo $0.06 \leq z \leq 0.08$ según el histograma de desplazamientos al rojo para SDSS+WYFFOS. . . . .	103
4.14. Distribución radial y espacial de las galaxias situadas en el rango de desplazamientos al rojo $0.08 \leq z \leq 0.10$ según el histograma de desplazamientos al rojo para SDSS+WYFFOS. . . . .	104
4.15. (Arriba) Distribución radial y espacial de las galaxias situadas en el rango de desplazamientos al rojo $0.06 \leq z \leq 0.10$ según el histograma de desplazamientos al rojo para SDSS+WYFFOS. (Abajo) Distribución radial y espacial de las galaxias situadas en el rango de desplazamientos al rojo $0.10 \leq z \leq 0.12$ según el histograma de desplazamientos al rojo para SDSS+WYFFOS. . . .	105
4.16. (Izda) Distribución espacial de las galaxias de CrB-H- <i>hz</i> WYFFOS+SDSS. (Dcha.) $DCM(r, (r - i))$ de las galaxias de CrB-H- <i>hz</i> WYFFOS+SDSS . .	107

4.17. Galaxia n1: Galaxia más brillante de CrB-H- <i>hz</i> observada con A2F-WYFFOS de tipo elíptico. . . . .	108
4.18. Galaxia n2: Segunda galaxia más brillante de CrB-H- <i>hz</i> observada con A2F-WYFFOS de tipo elíptico. . . . .	109
4.19. Galaxia n3: Tercera galaxia más brillante de CrB-H- <i>hz</i> observada con A2F-WYFFOS de tipo elíptico. . . . .	109
5.1. Espectro del FCM distorsionado por la presencia del efecto SZ. . . . .	112
5.2. Distorsión espectral de la radiación del FCM debida al efecto SZ. . . . .	113
5.3. Flujo de rayos X predicho en los datos de ROSAT y el efecto SZ estimado en el mapa de VSA para la estructura CrB-H- <i>hz</i> para diferentes combinaciones del parámetro espacial $\beta - r_c$ . . . . .	118
C.1. Distribución espacial de las galaxias de CrB-H- <i>lz</i> en los primeros 20 minutos de arco desde el centro. . . . .	133
C.2. Galaxias de CrB-H- <i>lz</i> (de 1 a 5) . . . . .	135
C.3. Galaxias de CrB-H- <i>lz</i> (de 6 a 10) . . . . .	136
C.4. Galaxias de CrB-H- <i>lz</i> (de 11 a 15) . . . . .	137
C.5. Galaxias de CrB-H- <i>lz</i> (de 16 a 20) . . . . .	138
C.6. Galaxias de CrB-H- <i>lz</i> (de 21 a 25) . . . . .	139
C.7. Galaxias de CrB-H- <i>lz</i> (de 26 a 30) . . . . .	140
C.8. Galaxias de CrB-H- <i>lz</i> (de 31 a 35) . . . . .	141
D.1. Distribución espacial de las galaxias de CrB-H- <i>hz</i> en los primeros 20 minutos de arco desde el centro. . . . .	143
D.2. Galaxias de CrB-H- <i>hz</i> (de 1 a 5) . . . . .	145
D.3. Galaxias de CrB-H- <i>hz</i> (de 6 a 10) . . . . .	146
D.4. Galaxias de CrB-H- <i>hz</i> (de 11 a 15) . . . . .	147
D.5. Galaxias de CrB-H- <i>hz</i> (de 16 a 20) . . . . .	148
D.6. Galaxias de CrB-H- <i>hz</i> (de 21 a 25) . . . . .	149
D.7. Galaxias de CrB-H- <i>hz</i> (de 26 a 30) . . . . .	150
D.8. Galaxia de CrB-H- <i>hz</i> (31) . . . . .	151
E.1. Distribución espacial de las galaxias del cúmulo Abell 2065 en los primeros 10 minutos de arco desde el centro. . . . .	153
E.2. Galaxias de Abell 2065 (de 1 a 5) . . . . .	155
E.3. Galaxias de Abell 2065 (de 6 a 10) . . . . .	156
E.4. Galaxias de Abell 2065 (de 11 a 15) . . . . .	157
E.5. Galaxias de Abell 2065 (de 16 a 20) . . . . .	158
E.6. Galaxias de Abell 2065 (de 21 a 25) . . . . .	159
E.7. Galaxias de Abell 2065 (de 26 a 30) . . . . .	160
E.8. Galaxias de Abell 2065 (de 31 a 35) . . . . .	161
E.9. Galaxias de Abell 2065 (de 36 a 40) . . . . .	162
E.10. Galaxias de Abell 2065 (de 41 a 45) . . . . .	163
E.11. Galaxias de Abell 2065 (de 46 a 50) . . . . .	164
E.12. Galaxias de Abell 2065 (de 51 a 55) . . . . .	165

E.13. Galaxias de Abell 2065 (de 56 a 60) . . . . .	166
E.14. Galaxias de Abell 2065 (de 61 a 65) . . . . .	167
E.15. Galaxias de Abell 2065 (de 66 a 69) . . . . .	168
F.1. Distribución espacial de las galaxias del cúmulo Abell 2069 en los primeros 20 minutos de arco desde el centro. . . . .	169
F.2. Galaxias de Abell 2065 (de 1 a 5) . . . . .	171
F.3. Galaxias de Abell 2065 (de 6 a 10) . . . . .	172
F.4. Galaxias de Abell 2065 (de 11 a 15) . . . . .	173
F.5. Galaxias de Abell 2065 (de 16 a 20) . . . . .	174
F.6. Galaxias de Abell 2065 (de 21 a 25) . . . . .	175
F.7. Galaxias de Abell 2065 (de 26 a 30) . . . . .	176
F.8. Galaxias de Abell 2065 (de 31 a 35) . . . . .	177
F.9. Galaxias de Abell 2065 (de 36 a 40) . . . . .	178
F.10. Galaxias de Abell 2065 (de 41 a 45) . . . . .	179
F.11. Galaxias de Abell 2065 (de 46 a 50) . . . . .	180
F.12. Galaxias de Abell 2065 (de 51 a 55) . . . . .	181
F.13. Galaxias de Abell 2065 (de 56 a 60) . . . . .	182
F.14. Galaxias de Abell 2065 (de 61 a 65) . . . . .	183
F.15. Galaxias de Abell 2065 (de 66 a 70) . . . . .	184
F.16. Galaxias de Abell 2065 (de 71 a 75) . . . . .	185
F.17. Galaxias de Abell 2065 (de 76 a 78) . . . . .	186
G.1. Distribución espacial de las galaxias de la zona intercumular (RA:232.06 , Dec:30.51) en los primeros 20 minutos de arco desde el centro. . . . .	187
G.2. Galaxias de la zona intercumular RA:232.06 y Dec:30.51 (de 1 a 5) . . . . .	189
G.3. Galaxias de la zona intercumular RA:232.06 y Dec:30.51 (de 6 a 10) . . . . .	190
G.4. Galaxias de la zona intercumular RA:232.06 y Dec:30.51 (de 11 a 15) . . . . .	191
G.5. Galaxias de la zona intercumular RA:232.06 y Dec:30.51 (de 16 a 20) . . . . .	192
G.6. Galaxias de la zona intercumular RA:232.06 y Dec:30.51 (de 21 a 25) . . . . .	193
G.7. Galaxias de la zona intercumular RA:232.06 y Dec:30.51 (de 26 a 30) . . . . .	194
G.8. Galaxias de la zona intercumular RA:232.06 y Dec:30.51 (de 31 a 35) . . . . .	195
G.9. Galaxias de la zona intercumular RA:232.06 y Dec:30.51 (de 35 a 39) . . . . .	196
H.1. Distribución espacial de las galaxias de la zona intercumular (RA:230.56 , Dec:30.01) en los primeros 20 minutos de arco desde el centro. . . . .	197
H.2. Galaxias de la zona intercumular RA:230.56 y Dec:30.01 (de 1 a 5) . . . . .	199
H.3. Galaxias de la zona intercumular RA:230.56 y Dec:30.01 (de 6 a 10) . . . . .	200
H.4. Galaxias de la zona intercumular RA:230.56 y Dec:30.01 (de 11 a 15) . . . . .	201
H.5. Galaxias de la zona intercumular RA:230.56 y Dec:30.01 (de 16 a 20) . . . . .	202
H.6. Galaxia de la zona intercumular RA:230.56 y Dec:30.01 (21) . . . . .	203
I.1. Distribución espacial de las galaxias de la zona intercumular (RA:230.56 , Dec:28.51) en los primeros 20 minutos de arco desde el centro. . . . .	205
I.2. Galaxias de la zona intercumular RA:230.56 y Dec:28.51 (de 1 a 5) . . . . .	207
I.3. Galaxias de la zona intercumular RA:230.56 y Dec:28.51 (de 6 a 10) . . . . .	208

I.4.	Galaxias de la zona intercumular RA:230.56 y Dec:28.51 (de 11 a 15) . . . .	209
I.5.	Galaxias de la zona intercumular RA:230.56 y Dec:28.51 (de 16 a 20) . . . .	210
I.6.	Galaxias de la zona intercumular RA:230.56 y Dec:28.51 (de 21 a 25) . . . .	211
I.7.	Galaxias de la zona intercumular RA:230.56 y Dec:28.51 (de 26 a 30) . . . .	212
I.8.	Galaxias de la zona intercumular RA:230.56 y Dec:28.51 (de 31 a 35) . . . .	213
I.9.	Galaxias de la zona intercumular RA:230.56 y Dec:28.51 (de 36 a 40) . . . .	214
I.10.	Galaxias de la zona intercumular RA:230.56 y Dec:28.51 (de 41 a 45) . . . .	215
I.11.	Galaxias de la zona intercumular RA:230.56 y Dec:28.51 (de 46 a 48) . . . .	216
J.1.	Distribución espacial de las galaxias de la zona intercumular (RA:228.56 Dec:28.01)– $lz$ en los primeros 20 minutos de arco desde el centro. . . . .	217
J.2.	Galaxias de la zona intercumular RA:228.56 y Dec:28.01 – $lz$ (de 1 a 5) . .	219
J.3.	Galaxias de la zona intercumular RA:228.56 y Dec:28.01 – $lz$ (de 6 a 10) . .	220
J.4.	Galaxias de la zona intercumular RA:228.56 y Dec:28.01 – $lz$ (de 11 a 15) .	221
J.5.	Galaxias de la zona intercumular RA:228.56 y Dec:28.01 – $lz$ (de 16 a 20) .	222
J.6.	Galaxias de la zona intercumular RA:228.56 y Dec:28.01 – $lz$ (de 21 a 24) .	223
J.7.	Distribución espacial de las galaxias de la zona intercumular (RA:228.56 Dec:28.01)– $hz$ en los primeros 20 minutos de arco desde el centro. . . . .	224
J.8.	Galaxias de la zona intercumular RA:228.56 y Dec:28.01 – $hz$ (de 1 a 5) . .	226
J.9.	Galaxias de la zona intercumular RA:228.56 y Dec:28.01 – $hz$ (de 6 a 10) .	227
J.10.	Galaxias de la zona intercumular RA:228.56 y Dec:28.01 – $hz$ (de 11 a 15) .	228
J.11.	Galaxias de la zona intercumular RA:228.56 y Dec:28.01 – $hz$ (de 16 a 20) .	229
J.12.	Galaxias de la zona intercumular RA:228.56 y Dec:28.01 – $hz$ (de 21 a 25) .	230
J.13.	Galaxias de la zona intercumular RA:228.56 y Dec:28.01 – $hz$ (de 26 a 30) .	231
J.14.	Galaxia de la zona intercumular RA:228.56 y Dec:28.01 – $hz$ (31) . . . . .	232

# Índice de tablas

1.1.	Tabla resumen de los supercúmulos más conocidos en un radio de 300 Mpc.	8
1.2.	Tabla con los datos conocidos sobre los cúmulos Abell en la región de Corona Borealis . . . . .	13
2.1.	Relación numérica de la Secuencia Roja para los cúmulos Abell de CrB-SC en SDSS-DR6 . . . . .	25
2.2.	Relación numérica de la SR para zonas intercumulares de CrB-SC . . . . .	29
2.3.	Número de galaxias que pueblan la mancha fría CrB-H . . . . .	30
2.4.	Densidad de galaxias en los campos primordiales . . . . .	34
2.5.	Densidad de galaxias calculada utilizando 1000 regiones de control seleccionadas aleatoriamente en todo el cielo . . . . .	34
2.6.	Tabla resumen del estudio de las regiones intercumulares de CrB-SC. . . . .	37
2.7.	Densidad de galaxias respecto a los distintos cúmulos de CrB-SC. . . . .	38
3.2.	Medias y desviaciones estándar del desplazamiento al rojo y dispersión de velocidades para las galaxias en CrB-H, Abell 2065 y Abell 2069. . . . .	55
3.3.	Resultados del test estadístico $r^2$ para la distribución espacial de las regiones de CrB-H . . . . .	57
3.4.	Tabla resumen de la clasificación de las galaxias que pueblan CrB-H- $lz$ , CrB-H- $hz$ , Abell 2065 y regiones intercumulares de CrB-SC. . . . .	73
3.5.	Tabla resumen de la población de galaxias tempranas y tardías en CrB-H- $lz$ , CrB-H- $hz$ , Abell 2065 y una región intercumular de CrB-SC. . . . .	79
4.2.	Relación de galaxias con desplazamiento al rojo espectroscópico medido por SDSS-DR7 y por AF2-WYFFOS . . . . .	91
4.4.	Datos físicos de la galaxia número 1 . . . . .	106
4.5.	Datos físicos de la galaxia número 2 . . . . .	106
4.6.	Datos físicos de la galaxia número 3 . . . . .	108
C.1.	Tabla de las galaxias del grupo CrB-H- $lz$ ( $z=0.07$ ) . . . . .	134
D.1.	Tabla de las galaxias del grupo CrB-H- $hz$ ( $z=0.11$ ) . . . . .	144
E.1.	Tabla de las galaxias del cúmulo Abell 2065 ( $z=0.07$ ) . . . . .	154

F.1.	Tabla de las galaxias del Cúmulo Abell 2069 ( $z=0.11$ ) . . . . .	170
G.1.	Tabla de las galaxias de la región intercumular Ra:232.06 y Dec:30.51 . . . . .	188
H.1.	Tabla de las galaxias la zona intercumular situada a Ra:230.56 y Dec:30.01 ( $z=0.07$ ) . . . . .	198
I.1.	Tabla de la zona intercumular RA:230.56 Dec:28.51, ( $z=0.07$ ) . . . . .	206
J.1.	Tabla de la zona intercumular RA:228.56 Dec:28.01, ( $z=0.07$ ) . . . . .	218
J.2.	Tabla de la zona intercumular RA:228.56 Dec:28.01, ( $z=0.11$ ) . . . . .	225

# 1

---

## Introducción

La materia bariónica es la que conocemos como materia ordinaria, es la materia visible y el gas presente en el Universo. Ésta, junto con la materia oscura, conforman la composición material del Universo. La densidad media de materia bariónica y no bariónica es bien conocida gracias a las observaciones del Fondo Cósmico de Microondas (FCM). Pero la distribución actual de una gran parte de los bariones continúa siendo una incógnita. Es obvia la presencia de bariones en las galaxias y en el gas que conforma a un supercúmulo, pero ¿dónde están los bariones perdidos? Para intentar conocer su paradero se pueden utilizar simulaciones hidrodinámicas que describen a las estructuras que los contienen. Estas simulaciones indican que buena parte de los bariones podrían residir en el gas difuso intergaláctico y participar del proceso de formación de las galaxias. Una vía para detectar los bariones en los supercúmulos y cúmulos de galaxias es la observación del efecto Sunyaev-Zel'dovich (SZ) capaz de detectar grandes concentraciones de gas caliente. La detección de un decremento en la intensidad del Fondo Cósmico de Microondas (FCM) en la región central del Supercúmulo Corona Borealis (CrB-SC) posiblemente asociado al efecto Sunyaev-Zel'dovich (SZ), ha conducido al desarrollo del presente trabajo de investigación, que pretende investigar y contribuir a esclarecer el papel que representa la materia bariónica a escalas supercumulares.

### 1.1. El problema de los bariones perdidos

¿Qué es realmente lo que conocemos como problema de los bariones?

A partir del estudio del FCM es posible estimar la cantidad de materia bariónica presente en el Universo (véase por ejemplo, Rebolo et al. 2004, Spergel et al. 2005). También se puede deducir de la medida de abundancias primordiales de los elementos químicos de muy baja masa atómica (Tytler et al. 1996). Esta cantidad representa un 4% de la energía total del Universo, mientras que la materia no bariónica contribuye un 23% y la energía “oscura” aporta el restante 73%. Sin embargo, cuando se realiza la medida directa de la cantidad de materia bariónica presente en el Universo local sólo somos capaces de localizar la mitad de la esperada (véase Fukujita et al. 1998). Esto es lo que se conoce como el problema de los bariones perdidos.

### 1.1.1. Ubicación de los bariones

Los bariones pueblan el medio intergaláctico (IGM) fotoionizado y difuso a  $z \sim 2$ , como indican las observaciones de líneas de absorción del hidrógeno en el espectro de cuásares distantes. La densidad bariónica deducida de estas observaciones (Rauch et al. 1997) está de acuerdo con la obtenida a partir de la nucleosíntesis primordial, de la abundancia de deuterio (Tyler et al. 1996) y con la inferida de las fluctuaciones del FCM. Pero en el Universo local, a desplazamiento al rojo  $z \sim 0$ , la densidad bariónica total, deducida de la absorción de hidrógeno por el gas de las galaxias y de otros posibles repositorios que veremos a continuación, resulta muy inferior (Fukugita et al. 1998).

Si consideramos el Universo a  $z \sim 2$ , los resultados obtenidos de la utilización de telescopios como el Hubble Space Telescope (HST) hacen pensar que la masa localizada en los sistemas estelares es muy pequeña, ( $\Omega_* \approx 5.5 \times 10^{-4}$  para  $h = 0.7$ ; Madau, Pozzetti & Dickinson 1998) en comparación con la densidad cosmológica crítica. Pero la cantidad de hidrógeno y helio observado en las distintas líneas de absorción del bosque de  $Ly_\alpha$  es bastante mayor. Los análisis de Rauch et al. (1998) y de Weinberg et al. (1997) dan como valor

$$\Omega_{\text{bariónica}} \geq 0.017h^{-2} = 0.035 \quad (1.1)$$

a partir de las observaciones del bosque  $Ly_\alpha$  en  $z=2$ , donde  $\Omega_{\text{bariónica}}$  es la densidad en unidades de la densidad crítica ( $h = H/100 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$  y  $h=0.70$ ).

Las abundancias de elementos primordiales producidos en la nucleosíntesis estándar del Big Bang han permitido inferir la densidad cósmica de los bariones (Burles & Tyler 1998) obteniéndose:

$$\Omega_{\text{bariónica}} = (0.019 \pm 0.0001)h^{-2} = 0.039 \pm 0.002 \quad (1.2)$$

Estos dos métodos son complementarios e independientes entre sí y son consistentes en la estimación que realizan. Pero a  $z = 0$ , y después de sumar todas las contribuciones observadas, la densidad de bariones local está lejos de los valores dados en las ecuaciones 1.1 y 1.2:

$$\Omega_* + \Omega_{H_I} + \Omega_{H_2} + \Omega_{CRX} \simeq 0.0068 \leq 0.011 \quad (1.3)$$

para  $h=0.70$ , donde  $\Omega_*$  es la densidad de materia asociada a los sistemas estelares,  $\Omega_{H_I}$  es la densidad de materia asociada al gas atómico,  $\Omega_{H_2}$  es la densidad de materia asociada al gas molecular y  $\Omega_{CRX}$  define a la densidad de materia detectable en rayos X. Por consiguiente, una fracción de los bariones del Universo actual aún tienen que ser detectados. Ha habido muchas propuestas para establecer el paradero de estos bariones. En particular, se ha sugerido que una cantidad sustancial de los mismos se encuentra formando parte del gas intergaláctico a temperaturas comprendidas entre  $10^5 - 10^7 \text{ K}$ , conocido como “gas templado/caliente” y predicho por Cen & Ostriker (1999) y Davé et al. (1999). La detección de este gas templado/caliente es un desafío observacional que requiere detectores ultravioleta sensibles y satélites de rayos X. Cen & Ostriker (1999) estimaron que una cuarta parte de los rayos X débiles extragalácticos detectados (a 0.7 KeV) tienen su origen en el gas templado/caliente. De ellos, la mitad llega desde  $z < 0.65$  y tres cuartas partes desde  $z < 1.0$ .

En el Universo Local, la formación jerárquica de estructuras ha desplazado una parte significativa de bariones desde el IGM hacia las estrellas, galaxias, grupos de galaxias y cúmulos. Aproximadamente el 30 – 40% de los bariones existentes en el Universo actual se estima que se encuentran en la fase de *gas templado/caliente* del medio intergaláctico (WHIM). Esto tiene grandes repercusiones en cuanto al correcto censo de los mismos (Fukugita et al. 1998). La mayor parte de los bariones presentes en esta fase, viven en las grandes estructuras difusas o en objetos no virializados como podrían ser grupos de galaxias o halos de galaxias. Davé et al. (2001) han utilizado simulaciones hidrodinámicas en las cuales han variado un amplio rango de parámetros físicos, con el fin de estudiar la naturaleza y la evolución del gas en esta fase. Las simulaciones indican que los bariones se encuentran en cuatro fases diferentes, definidas por su sobredensidad  $\delta \equiv (\rho/\bar{\rho}) - 1$  donde  $\bar{\rho}$  es el valor medio de la densidad bariónica a cierta temperatura  $T$ , encontrando:

1. **La Componente Difusa** con sobredensidad  $\delta < 1000$  y temperatura  $T < 10^5 K$ , correspondiente al gas intergaláctico fotoionizado.
2. **La Componente Condensada** con sobredensidad  $\delta > 1000$  y temperatura  $T < 10^5 K$  que coincide con la componente de gas galáctico frío
3. **La Componente templada/caliente (WHIM)**: con temperaturas en el rango  $10^5 < T < 10^7 K$ . Gas en estado templado-caliente del medio intergaláctico.
4. **La Componente Caliente** que a temperaturas típicas de  $T > 10^7 K$  se le atribuye al gas en cúmulos y grupos amplios de galaxias.

La cantidad de bariones en cada una de estas fases no está bien establecida. Es por tanto, de gran interés identificar nuevas vías de observación para poner a prueba su distribución a grandes escalas. El Fondo Cósmico de Microondas ofrece una de ellas a través del efecto SZ.

### 1.1.2. El Fondo Cósmico de Microondas y el efecto Sunyaev-Z'eldovich como trazador de los bariones

El estudio en profundidad de la distribución espacial del FCM llevó al descubrimiento de la presencia de inhomogeneidades, las anisotropías del FCM, que fueron detectadas en primer lugar por el satélite **Cosmic Background Explorer** COBE<sup>1</sup>. En tierra se llevaron a cabo otra serie de experimentos que completaron el espectro de potencias del FCM, y de las anisotropías primarias y secundarias. Algunos de estos experimentos se realizaron con globos, por ejemplo, el experimento BOOMERanG, que junto con DASI y MAXIMA determinaron el primer pico acústico en el espectro de potencias del FCM con alta sensibilidad. Otros experimentos terrestres, como TENERIFE, COSMOSOMAS y VSA contribuyeron al mejor conocimiento de las anisotropías del FCM ( véase la figura 1.1).

Todas estas medidas sugieren que el Universo es de geometría plana y que la teoría más plausible para describir la formación de estructuras cósmicas es la inflación. Tanto VSA como el CBI ( Cosmic Background Imager ), reportaron en 2002 la medición de los rastros dejados por las ondas acústicas causadas en los primeros momentos de la formación del

<sup>1</sup><http://lambda.gsfc.nasa.gov/product/cobe/>

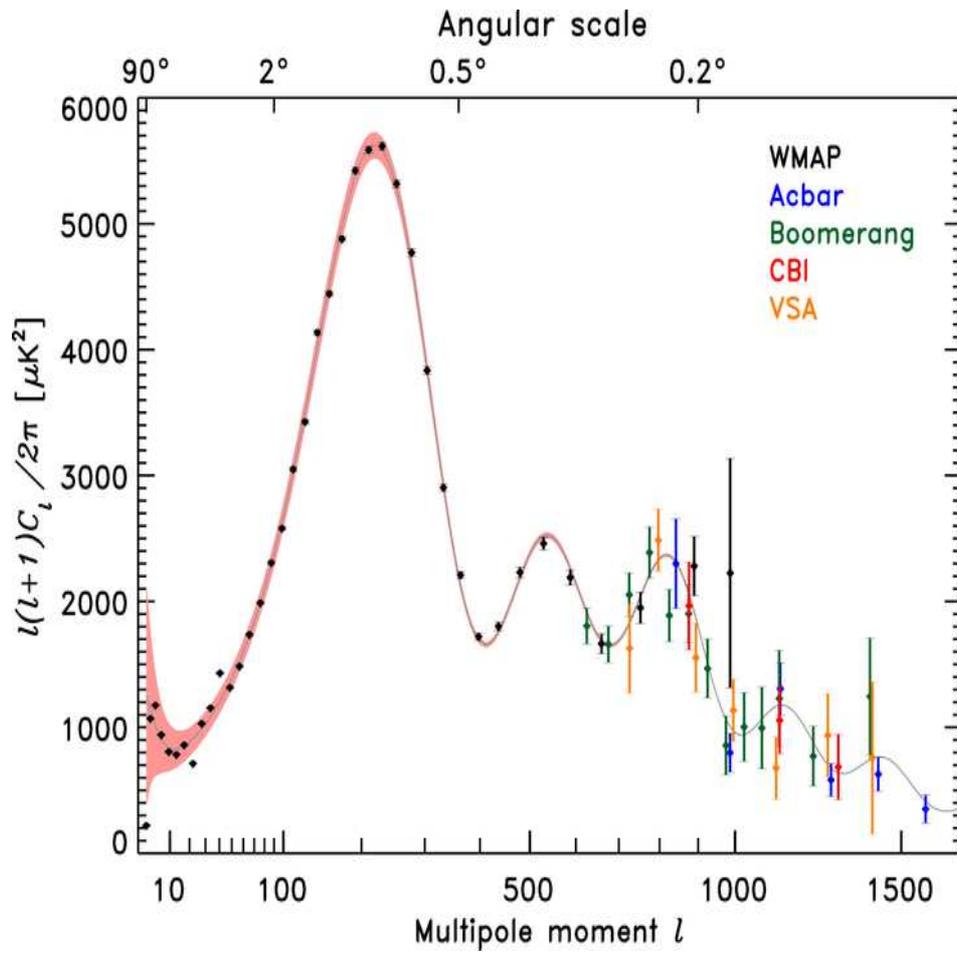


Figura 1.1: Espectro de potencias de anisotropías de la temperatura del FCM. Los diferentes datos de los experimentos dibujados en su respectivo color son de 2004.

Universo que serían confirmadas por DASI quien logra a su vez la primera detección de la polarización del FCM. El segundo y tercer pico del espectro de potencias y la polarización del FCM fueron detectados definitivamente por el satélite **Wilkinson Microwave Anisotropy Probe** (WMAP)<sup>2</sup>. Los mapas de alta resolución revelan las regiones a partir de las cuales se formaron los cúmulos de galaxias. Los resultados obtenidos por todos estos experimentos apoyan un modelo de formación de estructuras basado en la inestabilidad gravitacional y no en defectos topológicos como habían previsto trabajos previos.

El estudio de la polarización del FCM proporcionará más confirmaciones sobre la teoría de las perturbaciones cosmológicas, que describe la evolución de las pequeñas inhomogeneidades del Universo primigenio y dará mayor información sobre la inflación y las anisotropías secundarias. Los últimos experimentos que se han puesto en marcha, el Telescopio Cosmológico de Atacama<sup>3</sup> (ACT) o el Telescopio del Polo Sur<sup>4</sup> (SPT), están intentando medir con mayor precisión los parámetros cosmológicos conocidos y reescribiendo los límites para el modelo actual de Universo. El ACT, un telescopio de seis metros de diámetro que desde el 2008 ha comenzado a mapear el cielo austral, y el SPT, un radio telescopio de diez metros de diámetro que comenzó a operar en 2007, han medido el efecto SZ en cientos de cúmulos de galaxias con la finalidad de establecer con mayor precisión el modelo cosmológico actual y determinar superestructuras del Universo. Tanto el SPT en la Antártida como el ACT proporcionan datos adicionales, no disponibles en observaciones de satélite y centrados en el estudio de la polarización del FCM. Concretamente, en España, en el Observatorio del Teide ha comenzado a operar con éxito QUIJOTE<sup>5</sup>, su objetivo es caracterizar la polarización del FCM y procesos de emisión galáctica y extragaláctica a grandes escalas, serán las medidas más sensibles obtenidas hasta el momento para caracterizar la polarización de la emisión sincrotrón y anómala de nuestra Galaxia. Este instrumento está diseñado para detectar la impronta de una componente de ondas gravitacionales primordiales en el espectro de potencias de la polarización del FCM que se denominan “*modos B*” y que ayudarían a perfilar la física de la época de la inflación.

### 1.1.3. Definición y descripción del Efecto SZ

El Efecto Sunyaev-Zel’dovich (SZ) es el resultado de la interacción de electrones de alta energía con los fotones de FCM mediante el efecto Compton Inverso. Esta interacción provoca una distorsión en el espectro del FCM.

Hay dos componentes en el efecto SZ, una componente térmica y otra cinética. La primera es debida a la temperatura del plasma electrónico y cambia la temperatura de la radiación del FCM. La cinética es un efecto de segundo orden debido al movimiento propio de este plasma relativo al FCM. En la figura 1.2 puede verse un esquema básico de cómo se produce y se observa el efecto SZ.

La distorsión espectral del FCM expresada en forma de cambio de temperatura  $\Delta T_{SZE}$

<sup>2</sup><http://map.gsfc.nasa.gov/>

<sup>3</sup><http://www.princeton.edu/act/index.xml>

<sup>4</sup><http://pole.uchicago.edu/>

<sup>5</sup><http://www.iac.es/proyecto/cmb/pages/en/quijote-cmb-experiment.php>

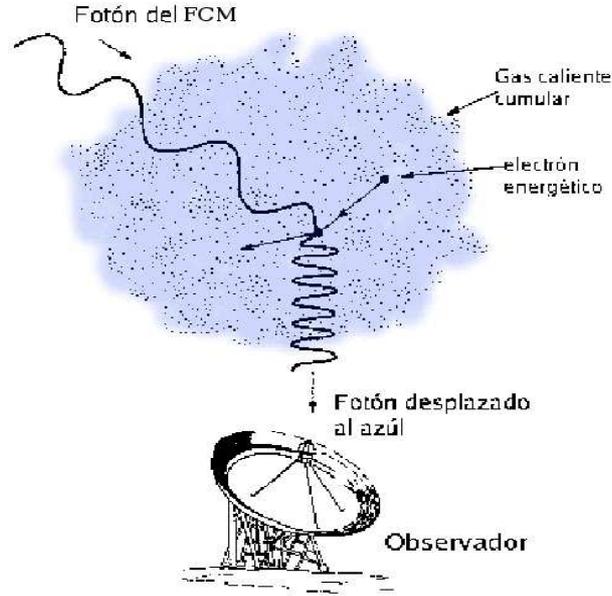


Figura 1.2: Esquema ilustrativo sobre el Efecto Sunyaev-Zeldovich que resulta en un incremento de la energía de los fotones del FCM cuando atraviesan el gas caliente presente en un cúmulo de galaxias.

viene dada por la siguiente expresión:

$$f(x)y_c = \frac{\Delta T_{SZE}}{T_{FCM}} \Rightarrow f(x) = x \frac{e^x + 1}{e^x - 1} - 4 \Rightarrow y_c = \int n_e \frac{K_B T_e}{m_e c^2} \sigma_T dl \quad (1.4)$$

donde:

- $x = \frac{h\nu}{K_B T_{FCM}}$ ,
- $y_c$  es el parámetro de Compton, que en cúmulos isotérmicos se relaciona con la profundidad óptica,  $\tau_e$ , la fracción de energía ganada por desparrame.
- $\sigma_T$  es la sección eficaz de Thompson.
- $T_e$  corresponde a la temperatura de los electrones.
- $n_e$  es la densidad electrónica.
- $K_B$  es la constante de Boltzman.
- $m_e c^2$  es la energía de los electrones.
- la integración  $\int$  se define a lo largo de la línea de visión.

El efecto SZ es un instrumento poderoso de observación para la cosmología que permite determinar parámetros cosmológicos cuando es combinado con otros métodos de observación, por ejemplo, con la emisión de rayos X del gas intracumular, resultando posible calcular distancias a cúmulos de galaxias y determinar la constante de Hubble. También puede poner de manifiesto la existencia de bariones de alta temperatura en la línea de visión de grandes estructuras, en particular en supercúmulos de galaxias.

## 1.2. Los supercúmulos

Hasta los años sesenta del siglo XX se suponía que las galaxias se distribuían al azar, y por tanto, de forma uniforme en el cielo. Sin embargo, existían excepciones en ciertas regiones del cielo donde se acumulaban muchas galaxias, los denominados cúmulos de galaxias. Hoy se conoce bien que éstos no se distribuyen de manera uniforme en el cielo. La mayoría de los grupos y cúmulos de galaxias están asociados a cadenas denominadas filamentos. Cuando varios de estos filamentos confluyen en una región del espacio, aparecen las asociaciones de cúmulos de galaxias denominadas Supercúmulos de galaxias.

Los primeros estudios sobre supercúmulos de galaxias fueron efectuados por Oort (1983) y Bahcall (1988). Los primeros catálogos de supercúmulos fueron construidos por Abell (1958), Abell et al. (1989), Zucca et al. (1993), Einasto et al. (1994, 1997, 2001) y Kalinkov & Kuneva (1995).

Exploraciones recientes como pueden ser “Las Campanas Redshift Survey (LCRS)”<sup>6</sup>, el “2dF Galaxy Redshift Survey (2dFGRS)”<sup>7</sup> y el “Sloan Digital Sky Survey (SDSS)”<sup>8</sup> cubren grandes regiones del cielo y son lo suficientemente profundas como para permitir la investigación de la distribución de galaxias y sistemas de galaxias situados a grandes distancias. Varios catálogos de supercúmulos se han construido a partir de estas exploraciones, por ejemplo Einasto et al. (2003), Basilakos (2003), Erdoğdu et al. (2004) y Porter & Raychaudhury (2005), entre otros. Estos estudios observacionales han sido complementados por varios análisis de la evolución de estructuras (Shandarin et al. 2004, Einasto et al. 2005, Wray et al. 2006). Los supercúmulos son interpretados como la etapa final del desarrollo de las fluctuaciones de la densidad primordial del Universo (Press & Schechter 1974).

Los modernos cartografiados permiten investigar desde galaxias situadas en grandes vacíos cósmicos “Voids”, a supercúmulos ricos. En la figura 1.3 podemos ver una representación de los supercúmulos más conocidos. Por ejemplo, La Vía Láctea se encuentra contenida en el supercúmulo de Virgo, es de tamaño medio existiendo supercúmulos de mayor tamaño, como pueden ser los de Shapley o Horologium (El reloj).

La tabla 1.1 muestra la lista de los supercúmulos conocidos en un radio de  $\sim 300$  Mpc. El supercúmulo de Virgo, presente en la tabla, es una excepción ya que tan sólo contiene un cúmulo lo suficientemente rico como para estar incluido en la misma, mientras que el resto de los supercúmulos contienen al menos tres cúmulos Abell.

Las propiedades de las galaxias varían de un cúmulo a otro. La galaxia promedio en un cúmulo como el de Coma dista mucho de la galaxia promedio que podemos encontrar en el cúmulo de Virgo. Por ejemplo, el primero de estos cúmulos está dominado por una evolución pasiva de galaxias de tipo temprano, mientras que el segundo contiene una gran población estelar contenida en galaxias espirales.

Hubble clasificó las galaxias en tres tipos principales: las elípticas, las espirales y las irregulares, que resumió en la figura 1.4. En las galaxias centrales de los cúmulos la formación estelar ha decaído intensamente, no encontrando evidencias de ella, como pudieran ser líneas de la serie de Balmer en emisión en sus espectros. Sin embargo, para galaxias que

<sup>6</sup><http://qold.astro.utoronto.ca/lin/lcrs.html>

<sup>7</sup><http://www2.aao.gov.au/2dFGRS/>

<sup>8</sup><http://www.sdss.org/>

Nombre Común	Coords Ecuat. AR Dec	Coords Supergal. L° B°	Despl. z	Dist. Mal	$D_R$ Mal	Con	Cúm. Abell del SC
Centaurus	13.0 -32	148 -7	0.014	194	150	Cen-Hya	1060,3526,3565,3574,3581.
Perseus-Pisces	02.5 +40	341 -8	0.016	222	100	Per-And	262,347,426.
Pavo-Indus	20.6 -37	230 +32	0.017	235	100	Ind-Mic	3656,3698,3742.
Coma	12.4 +24	91 -1	0.021	290	100	Com-Leo	1367,1656.
Phoenix	00.9 -48	249 -11	0.027	372	150	Phe-Scl	2731,2806,2836,2870,2877,2896.
<i>Hercules</i> <sup>a</sup>	16.4 +37	77 +50	0.030	413	100	Her-CBo	2162,2197,2199.
Leo	11.1 +23	85 -18	0.032	440	150	Leo-Uma	999,1016,1142,1177,1185,1228,1257,1267.
<i>Shapley</i> <sup>a</sup>	13.9 -32	151 +3	0.037	507	100	Cen-Hya	3570,3571,3575,3578.
<i>Hercules</i> <sup>b</sup>	15.8 +16	109 +45	0.037	507	150	Her-Ser	2052,2063,2107,2147,2148,2151,2152.
	06.0 -27	255 -73	0.038	521	200	Col-Lep	548,3341,3374,3381,3390.
	23.5 +15	306 +24	0.040	548	100	Peg	2572,2589,2593,2657.
	01.1 0	298 -3	0.043	588	100	Cet	76,119,147,168.
	01.4 +15	312 -2	0.044	601	150	Psc	160,193,195.
<i>Shapley</i> <sup>b</sup>	13.4 -30	147 -2	0.048	654	200	Cen-Hya	1631,1644,1709,1736,3528,3530,3532,3542, 3553,3554,3555,3556,3558,3559, 3560,3562,3564,3566,3572,3577.
Sculptor	23.7 -36	257 +5	0.049	668	100	Scl	2717,4008,4012,4013,4059.
	10.3 -5	110 -40	0.050	681	200	Sex	912,930,957,970,978,979,993.
	06.3 -53	215 -53	0.051	694	100	Pup-Car	3380,3391,3395.
	11.5 -4	115 -22	0.052	708	100	Leo-Vir	1216,1308,1334.
	15.2 +6	120 +34	0.052	708	150	Vir-Ser	2020,2023,2040,2055.
	21.9 -7	273 +40	0.055	747	100	Aqr	2366,2399,2415.
	02.3 -8	294 -22	0.057	774	150	Cet	303,326,358.
Ursa Major	11.8 +56	59 +4	0.058	787	200	UMa	1270,1291,1318,1324,1377,1383,1436,1452,1507.
	17.6 +78	31 +27	0.058	787	150	Dra-UMi	2248,2256,2271,2296,2309.
	20.2 -56	218 +16	0.058	787	100	Tel	3651,3667,3685.
	21.8 -18	260 +36	0.058	787	100	Cap	2361,2362,2372,2382,2383,2401.
<i>Pisces - Cetus</i> <sup>a</sup>	00.6 -21	275 -1	0.060	813	350	Scl-Cet	14,27,74,85,86,87,114,117,121,126,133,151, 2660,2683,2716,2734,2794,2800,2824,4049,4053.
	16.2 +52	59 +42	0.060	813	150	Dra-Her	2149,2168,2169,2184.
Bootes	13.9 +24	96 +20	0.061	826	150	Boo	1781,1795,1825,1827,1828,1831.
	01.1 -49	248 -13	0.063	852	100	Phe	2841,2854,2889.
<i>Pisces - Cetus</i> <sup>b</sup>	01.5 +17	315 -4	0.063	852	200	Psc-Ari	150,152,154,158,171,179,225,257,292,311.
	03.2 -24	278 -37	0.065	879	150	Eri-For	419,428,3094,3095.
	00.9 0	296 0	0.066	892	100	Cet	102,116,134.
Horologium	03.5 -48	247 -37	0.067	905	550	Hor-Eri	3004,3009,3074,3078,3089,3093,3098,3100, 3106,3107,3108,3109,3110,3111,3112,3116, 3122,3123,3125,3126,3128,3133,3135,3140, 3158,3164,3195,3202,3223,3225,3266,3301, 3104,3120,3145,3312.
	04.7 -21	282 -59	0.067	905	200	Eri-Lep	500,514,524,3260.
	23.6 +20	312 +23	0.068	918	100	Peg	2618,2630,2637.
	01.0 -66	231 -15	0.069	931	150	Tuc	2819,2859,2864.
	11.2 +4	105 -24	0.072	970	150	Leo	1149,1171,1205,1238.
<i>CrB - SC</i> <sup>c</sup>	15.4 +30	90 +40	0.072	970	250	CrB	2005,2019,2056,2061,2065,2067,2079,2089, 2092,2122,2124.
	22.7 -17	269 +25	0.072	970	100	Aqr	2456,2459,2462,2480,2492.
	10.6 +4	101 -32	0.073	983	100	Sex	1024,1032,1066.
	11.2 +41	70 -8	0.074	996	50	UMa	1173,1187,1190,1203.
	12.0 +32	82 -3	0.074	996	100	UMa-Com	1365,1423,1480.
	14.0 +27	93 +21	0.074	996	150	Boo	1775,1800,1873,1898.
	21.9 -55	230 +10	0.075	1008	200	Ind	3771,3785,3796,3806,3822,3825,3826,3886.

Tabla 1.1: Tabla resumen de los supercúmulos más conocidos dentro de un radio de 300 Mpc. Columna 1: Nombre común del supercúmulo. Columna 2: Ascensión recta a (J2000). Columna 3: Declinación a (J2000). Columna 4: Longitud Supergaláctica. Columna 5: Latitud Supergaláctica. Columna 6: Desplazamiento al rojo del supercúmulo. Columna 7: Distancia del supercúmulo en Millones de años luz, asumiendo una constante de Hubble de  $70 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ . Columna 8:  $D_R$ , tamaño del supercúmulo en Millones de años luz, obtenida de la distribución propia de los cúmulos Abell que integran cada supercúmulo. Columna 9: Constelación a la que se asocia el supercúmulo. Columna 10: cúmulos Abell que pertenecen al supercúmulo.

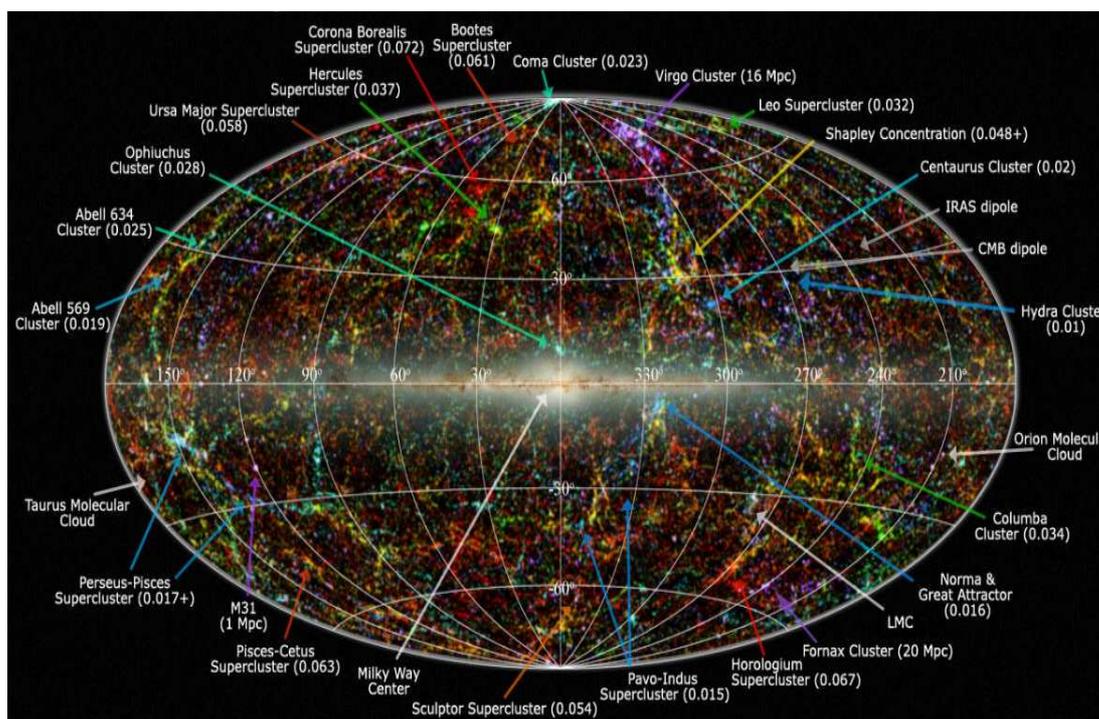


Figura 1.3: Universo Local a Gran Escala: Jarret (2004). Identificación de los supercúmulos más importantes. Las etiquetas muestran los cúmulos y supercúmulos más conocidos y los números entre paréntesis representan el desplazamiento al rojo de los mismos. Es una imagen obtenida del Catálogo de 2MASS de fuentes extensas (XSC) que contiene más de 1.5 millones de galaxias, y del Catálogo de fuentes puntuales (PSC) de casi 500 millones de estrellas de la Vía Láctea. Las galaxias se muestran en diferente color en relación al “desplazamiento al rojo” al que se encuentran. Han sido medidas fotométricamente en la banda K ( $2.2 \mu m$ ) y obtenidas de la base de datos Extragalácticas de la NASA (NED). En color azul se muestran las fuentes más cercanas ( $z \leq 0.01$ ); en color verde las galaxias situadas a distancias intermedias ( $0.01 \leq z \leq 0.04$ ) y en color rojo las fuentes más distantes ( $0.04 \leq z \leq 0.10$ ). El mapa ha sido proyectado en el sistema Galáctico (la Vía Láctea en el centro).

se encuentran en medios ricos en gas y que aún están en evolución, las líneas de emisión intensas son un rasgo característico que ayuda a conocer sus propiedades físicas.

A medida que observamos hacia desplazamientos al rojo más altos, la población de galaxias con líneas de emisión en cúmulos está cada vez más presente, y se observa un gran número de galaxias de tipo tardío con episodios de formación estelar recientes. En los trabajos de Poggianti et al. (1999, 2001, 2004), se describe la evolución de las galaxias con líneas de emisión en ambientes densos.

No todas las galaxias que habitan un supercúmulo se encuentran asociadas a cúmulos. Existe una gran cantidad de galaxias en el medio intercumular. Parece lógico pensar que las características físicas de las galaxias pueden depender del medio que habitan. No parecen poseer las mismas características, por ejemplo composición química o morfología, aquellas galaxias que se encuentran asociadas a cúmulos que las que no lo están. Repasamos brevemente alguna de esas características, principalmente en lo que respecta a la relación con la

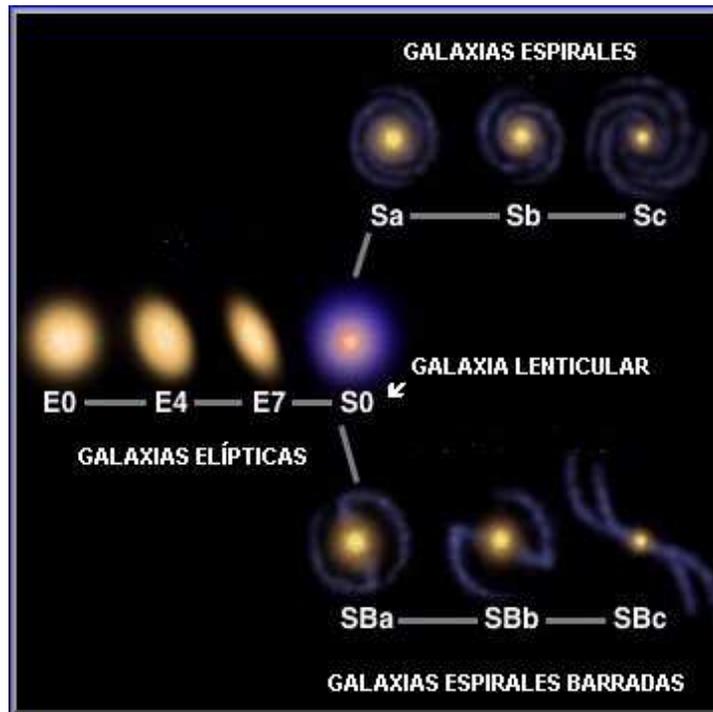


Figura 1.4: Diapasón de Hubble, morfología de las galaxias

densidad del gas.

Comparando la morfología y la espectroscopia se ha visto que la mayoría de las galaxias espirales en cúmulos lejanos presentan líneas de emisión (Dressler et al. 1999). Sin embargo, a la inversa no es siempre verdad, hay agrupaciones de galaxias espirales que no presentan líneas de emisión en sus espectros, de forma que la ausencia de este tipo de líneas indica la falta de actividad de formación estelar en la galaxia (Poggianti et al. 1999, Couch et al. 2001, Goto et al. 2003).

La relación “Morfología-Densidad” (MD) es la correlación observada entre los distintos tipos de Hubble y la densidad del medio. Las galaxias elípticas son frecuentes en regiones de alta densidad de galaxias mientras que la fracción de galaxias espirales aumenta en regiones de baja densidad (Dressler et al. 1980).

La relación que se observa entre la formación de estrellas en una galaxia y el ambiente que habita es señal de que el medio ambiente afecta a la actividad de la galaxia. La forma exacta de la correlación está influida por las transformaciones que sufren las galaxias cuando entran en un entorno diferente. Para comprender lo que le ocurre a las galaxias en los cúmulos con respecto al contenido en gas, habría que considerar:

- el contenido en gas del cúmulo de galaxias,
- la distribución espacial del gas y la actividad de formación estelar dentro de cada galaxia,

- la distribución espacial de la galaxia dentro del cúmulo.

Muchas galaxias espirales en cúmulos son deficientes en gas HI comparadas con galaxias del campo (van Gorkom 2004). La mayoría de estas galaxias espirales se encuentran cercanas al centro de los cúmulos. En las regiones centrales, los tamaños de los discos de HI son menores que el radio óptico, y se encuentra que existe desplazamiento entre el centro óptico y el centro del HI. La fracción de galaxias espirales deficientes en HI aumenta en dirección al centro y se observa una correlación entre esta deficiencia y los parámetros orbitales: las galaxias más deficientes tienden a estar en órbitas radiales menores (Solanes et al. 2001). La pérdida de presión de gas por choque es uno de los mecanismos que desempeña un papel importante en este fenómeno.

### 1.2.1. El supercúmulo de Corona Borealis

El CrB-SC es uno de los supercúmulos más prominentes del Hemisferio Norte. Shane et al. (1954) fueron los primeros en señalar la presencia de una importante nube de galaxias en la región de Corona Borealis. Abell (1961) lo incluyó en su catálogo de cúmulos de segundo orden. Dependiendo del autor que se cite, el número de cúmulos pertenecientes a este supercúmulo puede variar de seis a ocho (Postman, Geller, & Huchra 1988, Small et al. 1997). En este trabajo se adoptará la clasificación de Einasto et al. (2001) como referencia. Según ella el CrB-SC está formado por ocho cúmulos, con un centro de masas situado en  $AR = 15^h 25^m 16.2^s$ ,  $Dec = 29^\circ 31' 30''$  (J2000). Los cúmulos pertenecientes a CrB-SC muestran un desplazamiento al rojo medio de  $z \approx 0.07$ . Estos ocho cúmulos se describen en la tabla 1.2, junto con sus coordenadas, radios, desplazamiento al rojo, distancia desde el centro del SC y, en aquellos que tienen emisión de rayos-X medida, la luminosidad y la temperatura derivada de los rayos X. Además se muestra el flujo esperado para cada decremento al convolucionar el haz sintetizado y el obtenido en los mapas de VSA,  $\Delta S^{\text{pred}}$  y  $\Delta S$  respectivamente, para más referencias, véase, Génova-Santos et al. (2005).

Los cúmulos Abell 2069 y Abell 2073, se encuentran en la línea de visión de CrB-SC, pero presentan un desplazamiento al rojo más alto al atribuido a CrB-SC y, por consiguiente, no pertenecen al supercúmulo. Se considera que el núcleo del supercúmulo está formado por los cúmulos Abell 2061, Abell 2065, Abell 2067, Abell 2079, Abell 2089 y Abell 2092, que se encuentran localizados en un área de  $\approx 3 \times 3 \text{ grad}^2$ . Los dos restantes, Abell 2019 y Abell 2124, se encuentran a  $\approx 2.5^\circ$  del centro del supercúmulo.

En la región central del SC los cúmulos Abell 2056, Abell 2065, Abell 2089, Abell 2079, Abell 2061 y Abell 2067 presentan un desplazamiento al rojo medio de  $z \approx 0.07$ , y hay otros dos, Abell 2069 y Abell 2083 que se encuentran a  $z \approx 0.11$ . También existen en la región numerosos cúmulos de Zwicky, pero este estudio se limita al catálogo de cúmulos Abell. La distribución espacial de estos cúmulos se representa en la figura 1.5. Los cúmulos Abell 2061 y Abell 2065 tienen la mayor concentración de galaxias, con densidades respectivas de  $\rho_{galx} \approx 0.38$  y  $\rho_{galx} \approx 0.47 \text{ gal/arcmin}^2$ . Estos dos cúmulos son también los más luminosos en rayos X (tabla 1.2). En la región existente entre los cúmulos Abell 2061 y Abell 2067 hay una sobredensidad significativa de galaxias con respecto al fondo, al igual que hacia el norte de Abell 2065 y en la región alrededor de Abell 2069.

Postman, Geller, & Huchra (1998) realizaron el primer análisis de la dinámica del CrB-SC a través del estudio de 1555 galaxias de la vecindad de cúmulos Abell. Proporcionaron

el catálogo espectroscópico más completo hasta ese momento, compuesto por 182 galaxias. Estimaron la masa total de los cúmulos pertenecientes al núcleo del CrB-SC en el rango  $1.5\text{--}8.9\times 10^{14}M_{\odot}$ , y calcularon la masa total del supercúmulo en un valor de  $\approx 8.2\times 10^{15}M_{\odot}$ . Utilizando simulaciones N-cuerpos averiguaron que CrB-SC es un sistema ligado gravitatoriamente. Probaron también que las escalas de tiempo dinámicas son comparables al tiempo de Hubble, y por tanto es poco probable que el sistema esté virializado. Small et al. (1998) extendieron el estudio, incrementando el catálogo espectroscópico del supercúmulo en un total de 528 nuevas galaxias. Estimaron un valor de  $3\text{--}8\times 10^{16}h^{-1}M_{\odot}$  para la masa total del supercúmulo, superior al anterior. Encontraron que, aproximadamente, un tercio de las galaxias pertenecientes a CrB-SC se encuentran en regiones no asociadas a cúmulos, y subrayaron la enorme concentración de galaxias asociadas al cúmulo Abell 2069 ( $z=0.11$ ) sugiriendo que podría tratarse de un nuevo supercúmulo.

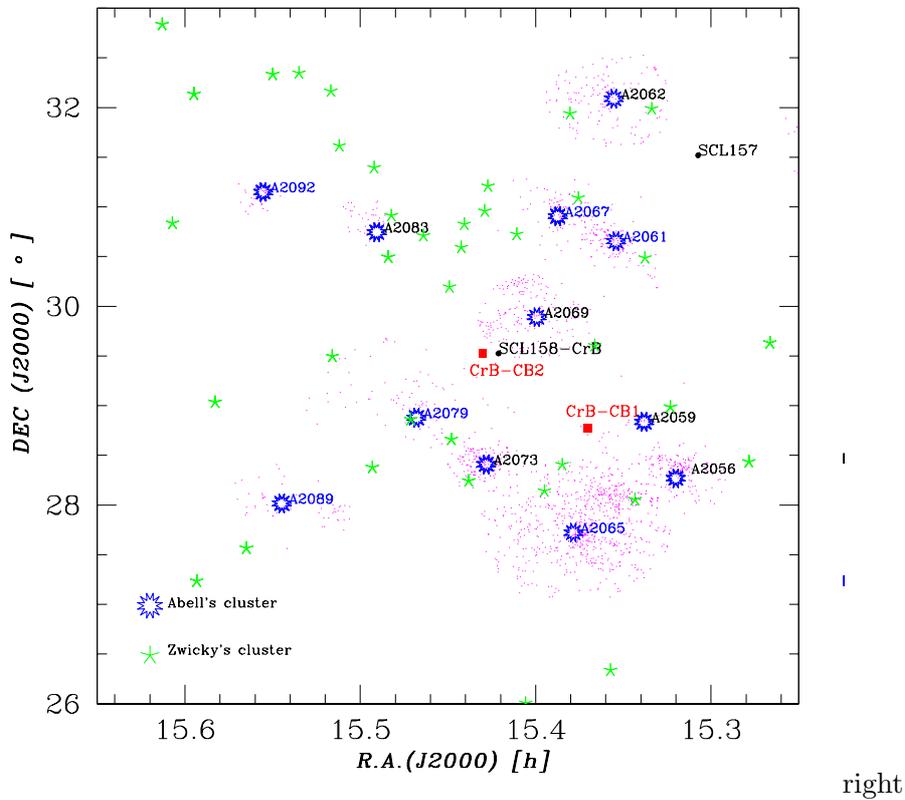


Figura 1.5: Distribución espacial de los cúmulos de Abell y cúmulos de Zwicky en CrB-SC. Los cúmulos Abell que pertenecen al Supercúmulo se han etiquetado en color azul. También se indican las posiciones de los centros de los supercúmulos SCL158 (CrB-SC) y SCL157 tal y como recoge Einasto et al. (2001). Los puntos rojos indican la posición de las galaxias a  $\delta z \pm 0.02$  del desplazamiento al rojo del supercúmulo, dentro del radio óptico de cada cúmulo Abell. (Los desplazamiento al rojos y los radios ópticos fueron tomados de *NASA Extragalactic Database*.)

Nombre	$AR^a$ (hh:mm:ss)	$Dec^a$ (o : ' : ")	$R_{opt}$ (min.de arco)	$z^b$	D (Mpc)	Riq
SCL158	15:25:16.2	+29:31:30	CrB			SC
SCL15	15:18:26.6	+31:31:07				SC
A2073	15:25:41.5	+28:24:32	10.0	0.17170	67.2	1
A2056	15:19:12.3	+28:16:10	12.0	0.08460	109.6	1
A2059	15:20:17.6	+28:50:13	15.0	0.13050	77.2	1
A2079	15:28:04.7	+28:52:40	25.0	0.06898	53.5	1
A2083	15:29:26.3	+30:44:45	15.0	0.11420	91.0	1
A2061	15:21:15.3	+30:39:17	20.0	0.07840	85.5	1
A2067	15:23:14.8	+30:54:23	15.0	0.07386	86.9	1
A2065	15:22:42.6	+27:43:21	22.0	0.07260	113.3	2
A2069	15:23:57.9	+29:53:26	13.0	0.11600	27.7	2
A2092	15:33:19.4	+31:08:58	15.0	0.06690	142.7	1
A2089	15:32:41.3	+28:00:56	20.0	0.07313	133.1	1
A2124	15:44:59.3	+36:03:40	–	0.06610		1

Nombre	$L_X(0.1-2.4 \text{ keV})$ ( $10^{44} h_{50}^{-2} \text{ erg s}^{-1}$ )	$T_e$ (keV)	$\Delta S^{\text{pred}}$ (mJy/haz)	$\Delta S$ (mJy/haz)
SCL158	*			
SCL15	*			
A2073	3.74 <sup>d</sup>	5.6 <sup>d</sup>	-29.9	-33.4±22.6
A2056	*			
A2059	*			
A2079	*			
A2083	*			
A2061	3.95 <sup>c</sup>	5.6 <sup>c</sup>	-54.7	-53.8±27.4
A2067	0.86 <sup>d</sup>	3.1 <sup>d</sup>	-27.7	-26.5±27.4
A2065	4.94 <sup>c</sup>	8.4 <sup>c</sup>	-61.7	-42.8±23.4
A2069	8.92 <sup>c</sup>	7.9 <sup>c</sup>	-57.1	-15.2±27.4
A2092	*			
A2089	*			
A2124	1.35 <sup>c</sup>	3.7 <sup>c</sup>	-44.3	-19.4±29.2

Tabla 1.2: Tabla con los datos conocidos sobre los cúmulos Abell que se encuentran en la zona del cielo que ocupa el supercúmulo de Corona Borealis.

<sup>a</sup> NASA Extragalactic Database.

<sup>b</sup> Struble & Rood (1999).

<sup>c</sup> Ebeling et al. (1998).

<sup>d</sup> Ebeling et al. (2000).

### 1.2.2. Características de las galaxias de CrB-SC y de A2069-SC

Las galaxias de CrB-SC han sido objeto de estudio por parte de varios grupos. El estudio más destacado fue realizado por Small et al. (1997, 1998), sobre la función de luminosidad (LF, por sus siglas en inglés), la dinámica y la estructura del supercúmulo. Estos autores calcularon la LF total del supercúmulo de Corona utilizando 419 galaxias con magnitudes comprendidas entre  $14.1 \leq r \leq 20.0$  mag y desplazamiento al rojo de  $z \approx 0.07$ . También calcularon la LF de Abell 2069-SC utilizando para ello un total de 318 galaxias con magnitudes entre  $15.1 \leq r \leq 20.0$  mag y desplazamiento al rojo  $z \approx 0.11$ . Ambos supercúmulos presentan un exceso de galaxias brillantes con respecto a la LF media de otros supercúmulos. La magnitud característica de la LF de CrB-SC es aproximadamente media magnitud más brillante que la magnitud de la LF de las galaxias del campo, existiendo un repunte en la LF para galaxias más débiles de  $M(B_{AB}) \sim -17 + 5 \log_{10} h$ , donde  $H_0 \sim 100 h \text{ Km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ .

En estos estudios previos existieron ligeras diferencias en la medida del color medio de las galaxias que hicieron plantearse un posible error en el cálculo de la LF para las galaxias de CrB-SC. Así pues, el color medio de las galaxias procedentes del catálogo del “Norris Survey”<sup>9</sup> es representativo de una galaxia Sb, mientras que el color medio de las galaxias medidas a partir del muestreo de “Las Campanas Redshift Survey”<sup>10</sup> (LCRS), coincide con el color medio típico para una galaxia tipo E.

A medida que se avanza hacia desplazamientos al rojo más altos existe un aumento de la luminosidad bolométrica de las galaxias de CrB-SC, una gran mayoría de éstas muestra formación estelar activa, presentando en sus espectros líneas de emisión, como por ejemplo, las de la serie de Balmer,  $H_\epsilon$ ,  $H_\gamma$ ,  $H_\beta$ ,  $H_\alpha$ , y entre otras como pueden ser, el doblete de SII a 6716.4 Å y 6730.8 Å y el doblete de NII a 6548.1 Å y 6583.4 Å. Este hecho limita la evolución del supercúmulo a la población de galaxias azules y no se encuentran evidencias de episodios de formación estelar de corto período de tiempo, véase Loveday et al. (1992).

La evolución de las galaxias que se observa en las bandas fotométricas  $g$  y  $r$  es consistente con los resultados de los estudios de Lilly et al. (1995), Ellis et al. (1996) y Lin et al. (1996) añadiendo que la forma de la LF sugiere una evolución de las galaxias en cada uno de los supercúmulos coherente entre sí, de modo que la LF de CrB-SC y Abell 2069-SC, a pesar de su similitud, muestran diferencias significativas debidas a la identidad propia de cada uno. La diferencia más apreciable es el exceso de galaxias brillantes para CrB-SC,  $M_{AB} \lesssim -21 + 5 \log_{10} h$  mag. Estas galaxias brillantes se encuentran en las regiones más densas del supercúmulo y sus espectros están dominados por una población estelar roja y vieja, mostrando una magnitud característica de  $M^* \sim 0.5$  mag más brillante que la magnitud de las galaxias de campo. En cambio la  $M^*$  para el supercúmulo de Abell 2069-SC está muy cerca del valor de las galaxias de campo existiendo un repunte de la LF a  $M(B_{AB}) \lesssim -17 + 5 \log_{10} h$  mag. Para mayor claridad, véase la figura 1.6.

Así pues, Small et al. (1998) llegaron a las siguientes conclusiones, primero que la distribución de galaxias dentro de CrB-SC parece estar agrupándose, siendo la población media de las galaxias de CrB-SC de tipo Sb a E, donde la evolución estelar se limita a la población joven, siendo la formación estelar de largo período de tiempo. Segundo, aproximadamente

<sup>9</sup><http://arxiv.org/abs/astro-ph/9705021>

<sup>10</sup><http://qold.astro.utoronto.ca/lin/lcrs.html>; LCRS

un tercio de las galaxias del SC se encuentran fuera de los cúmulos Abell conocidos en la región. Tercero, el Abell 2069-SC a  $z \sim 0.11$  contribuye de forma sustancial a la densidad superficial de las galaxias en el campo de visión de CrB-SC.

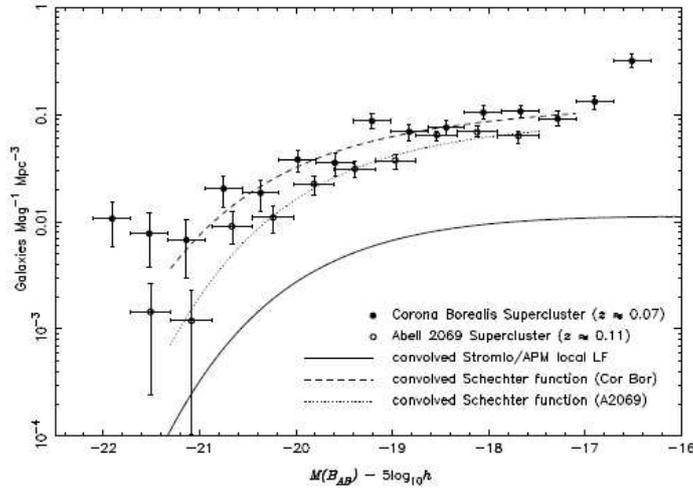


Figura 1.6: Función de Luminosidad para el CrB-SC (círculos llenos) y el supercúmulo de campo Abell 2069 (círculos vacíos). Se muestra también el ajuste de la función de Schechter para los dos supercúmulos, la línea discontinua corresponde a CrB-SC y la punteada es de Abell 2069. Los supercúmulos tienen un exceso relativo de galaxias más brillantes que  $M_{AB} \lesssim -21 + 5 \log_{10} h \text{ mag}$  en este perfil seleccionado. Y se observa un repunte en la LF para las galaxias más débiles de CrB-SC de  $M_{AB} \lesssim -17 + 5 \log_{10} h \text{ mag}$ .

### 1.3. El efecto SZ en el supercúmulo de Corona Borealis

El efecto SZ es una buena herramienta observacional que permite realizar un mapa de las estructuras a gran escala del Universo y se puede utilizar como trazador de la materia bariónica de los supercúmulos de galaxias.

#### 1.3.1. Observaciones Interferométricas del efecto SZ en Corona Borealis y posibles interpretaciones

A partir de 2003 nuestro grupo realizó observaciones de CrB-SC usando el interferómetro situado en el Observatorio del Teide “Very Small Array” (VSA). Este interferómetro estaba formado por catorce elementos heterodinos sintonizables entre 26 y 36 GHz, con un ancho de banda de 1.5 GHz. La frecuencia central de observación fue de 33 GHz. La figura 1.7 muestra la configuración de antenas utilizadas. El objetivo era llevar a cabo una búsqueda de evidencias del WHIM. Los resultados se recogen en el trabajo de Génova-Santos et al. (2005). El mosaico obtenido se basó en un total de 9 apuntados, y 583 horas de integración, que revelaron la presencia de dos decrementos negativos e intensos en el mapa de temperaturas del FCM cercanos al centro del supercúmulo, denominados B y H (véase la figura 1.8). Estos decrementos negativos tienen un flujo de  $-70 \pm 12 \text{ mJy haz}^{-1}$ , equivalente a  $-157 \pm 27 \mu\text{K}$  en unidades de temperatura para el primero, y  $-103 \pm 10 \text{ mJy haz}^{-1}$  que equivale a

$-230 \pm 23 \mu K$  para el segundo. Sus coordenadas son  $15^h 25^m 21.60^s + 29^\circ 32' 40.7''$ , para CrB-B y  $15^h 22^m 11.47^s + 28^\circ 54' 06.2''$ , para CrB-H. Es importante señalar que en estas posiciones no se encuentran cúmulos de galaxias conocidos. El primer decremento se encuentra situado cerca del centro del supercúmulo de Corona Borealis. Para establecer sus orígenes, se ha considerado: *a)* la posibilidad de que se trate de un efecto provocado por fluctuaciones primordiales del FCM; *b)* una señal SZ relacionada con cúmulos de galaxias desconocidos; *c)* el efecto generado por el gas templado/caliente presente en el medio intracumular del supercúmulo.



Figura 1.7: **Izqda:** Vista de las antenas del Very Small Array del Observatorio del Teide en configuración extendida. Tiene una separación mínima entre antenas de 0.5 m, y máxima de 2 m. El VSA comenzó sus observaciones con esta configuración en Octubre de 2001 y la mantuvo hasta finales de 2005. **Dcha:** Desde Enero de 2006 hasta finales de 2008, el VSA midió con la configuración Super-Extendida. Cada una de las antenas tenía una apertura de 608 mm de diámetro, un haz primario de  $1.0^\circ$  de FWHM y una resolución angular total de 6 minutos de arco.

El análisis de los decrementos obtenidos en CrB-B y CrB-H han arrojado resultados diferentes. Para CrB-B el análisis de las fluctuaciones, de acuerdo al tamaño y la intensidad del decremento, reveló que es consistente con estar producido por la anisotropía primordial del FCM. Sin embargo, en el caso del decremento CrB-H la probabilidad de que fuese producido por la anisotropía primordial del FCM resultó ser tan sólo de un 0.38 %. Por este motivo este trabajo se centrará en el estudio de CrB-H. El decremento CrB-H fue detectado también de manera marginal por la banda W del mapa del primer año de datos de “Wilkinson Microwave Anisotropy Probe” (WMAP)<sup>11</sup>, pero su sensibilidad no permitió distinguir el comportamiento espectral de CrB-H. Génova-Santos et al. (2005) mostraron que la probabilidad de producir estos rasgos para un número arbitrario de cúmulos masivos observados con el VSA era del 0.3 y 0.4, respectivamente para cada decremento CrB-B y CrB-H, usando los formalismos de Press-Schechter (1974). Esta probabilidad fue calculada suponiendo que el decremento completo es debido al efecto de SZ. Si se tiene en cuenta que

<sup>11</sup><http://map.gsfc.nasa.gov/>

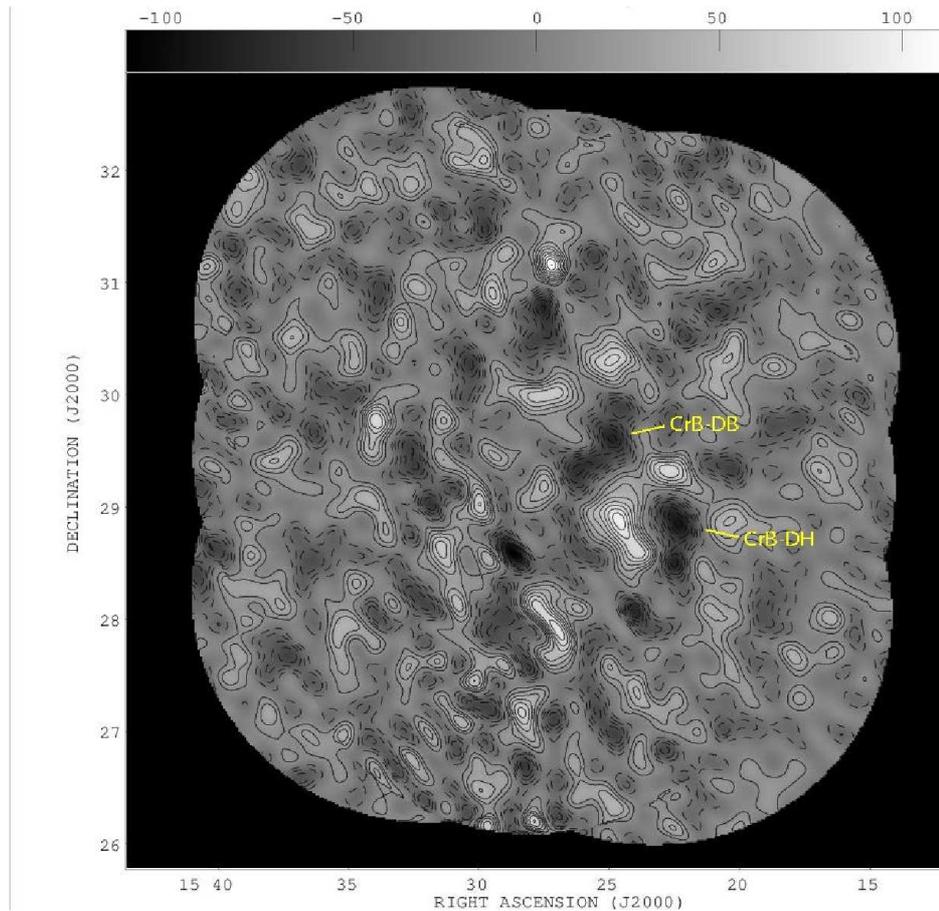


Figura 1.8: Mapa de la región de Corona Borealis obtenido mediante el interferómetro VSA. En la imagen se señalan dos zonas donde existen decrementos intensos en el FCM.

podría haber una contribución primordial del FCM, esta probabilidad se hace más alta.

En los datos del satélite ROSAT, véase la figura 1.9, no se encontró evidencia de un exceso de emisión de rayos X en la región del decremento CrB-H.

Este hecho impone restricciones sobre la densidad electrónica y la temperatura que tendría un hipotético cúmulo o región intercumular en la distribución del gas templado/caliente capaz de producir un decremento tan intenso como el CrB-H. Si éste estuviera contenido en un pequeño volumen, la densidad de electrones sería bastante alta como para producir una emisión de rayos X perceptible a las temperaturas típicas del WHIM (0.1-1 keV). De ahí, surge la posibilidad de que *CrB-H* podría ser causado por un gran filamento alineado en la dirección de la línea de visión Génova-Santos et al. (2005). Para explicar la no detección por ROSAT, se consideró que sólo una fracción del CrB-H fuese debida a un efecto SZ, y que el FCM primordial fuese responsable del resto. En este caso, un filamento con una longitud menor del tamaño del supercúmulo, p. ej.  $\leq 40$  Mpc, a una temperatura de 0.5-0.8 keV, y una densidad bariónica de entre 500 y 900 veces la densidad bariónica media en el Universo Local, produce un efecto SZ del orden de la mitad de la densidad de flujo central

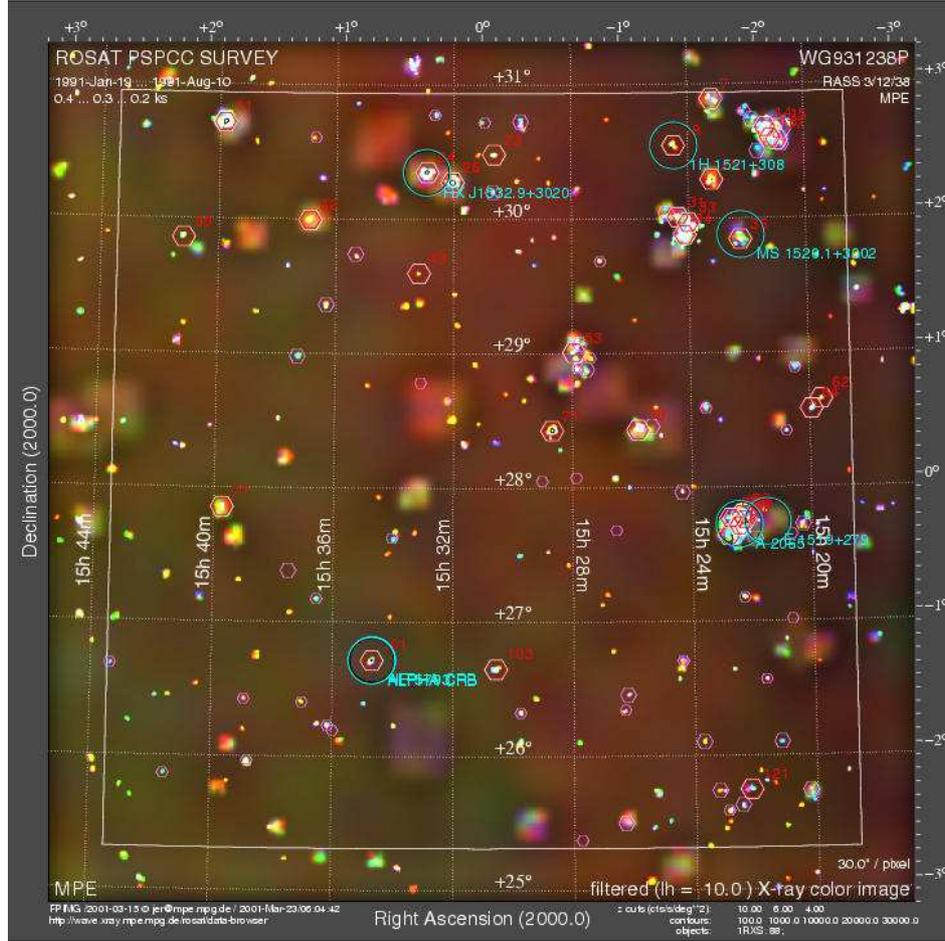


Figura 1.9: Mapa de Rayos-X obtenido por el satélite ROSAT. En él se puede apreciar la contribución en Rayos-X del cúmulo Abell 2065, pero de igual manera no se observa contribución en la zona ocupada por CrB-H. Se trata del mapa del “All Sky Survey data Release” (PSPC All Sky Survey (s) en la banda “1rxs”).

del decremento, y su emisión en rayos X sería baja, y comparable a la señal de fondo del mapa de ROSAT. Esta estructura contendría una masa de gas de  $5 \times 10^{14} M_{\odot}$  comparable con la masa bariónica contenida en los cúmulos de galaxias miembros de CrB-SC. En este caso, si se supone un valor para la masa total del supercúmulo de  $3 \times 10^{16} M_{\odot}$ , este filamento podría contener un 10 % del total de la masa bariónica esperada para el supercúmulo. La sobredensidad requerida para tal estructura es 10 veces más alta que las predichas por las simulaciones de N-cuerpos de formación de galaxias para estos filamentos a gran escala.

El trabajo de Genova-Santos et al. (2005) se completó con observaciones milimétricas con el telescopio italo-suizo MITO (Millimeter and Infrared Testa Grigia Observatory) realizadas por Battistelli et al. (2006) para confirmar una contribución de una señal SZ en la región de CrB-H. MITO posee cuatro canales de frecuencia a  $\sim 143$ , 214, 272 y 353 GHz. La cobertura de frecuencias de este experimento permitió diferenciar la anisotropía primordial del FCM del efecto SZ (véase la figura 1.10). En el análisis de los mapas se encontró una

fuerte contribución de la señal de la anisotropía primaria y una segunda contribución más débil de efecto SZ, presente en todos los canales con amplitud  $\sim -40 \mu K$  en el régimen de Rayleigh-Jeans (RJ), dando un valor para el parámetro de comptonización, mencionado en la ecuación 1.4 de  $y = (7,8_{-4,4}^{+5,3}) \times 10^{-6}$  (68 % de fiabilidad). La detección del SZ es débil y no parece estar resuelta en el haz de MITO. Los resultados de MITO descartan una no-gaussianidad intrínseca del FCM en favor de una presencia de gas intercumular en fase templado/caliente con un contenido en masa bariónica de  $\approx 3 \times 10^{14} M_{\odot}$  en la región de CrB-SC.

Con la configuración *superextendida* de VSA (véase la figura 1.7) se obtuvieron datos adicionales de mayor resolución angular,  $7'$  de arco de FWHM, en la dirección del decremento CrB-H. En Génova-Santos et al. (2008) se recogen los nuevos resultados que confirmaron claramente la presencia del gran decremento CrB-H, véase la figura 1.11, obteniéndose una densidad de flujo de  $-37 \pm 5 \text{ mJy haz}^{-1}$  ( $-229 \pm 32 \mu K$ ) y coordenadas (J2000) de  $15^h 22^m 13.76^s$  y  $+29^{\circ} 00' 06.2''$ . La mancha tiene un tamaño angular de  $30 \times 20 \text{ arcmin}^2$ . Se comprobó que el decremento del FCM también estaba presente en los datos del quinto año del satélite WMAP, pero debido al pequeño nivel de significación, la alta contribución del ruido y la resolución angular de las medidas, no se logró separar el SZ de la contribución de la anisotropía primordial asociada. La temperatura en la posición de CrB-H en la banda W del mapa está de acuerdo a  $0.3\sigma$  con el valor estimado por VSA. Ambas temperaturas son consistentes con un efecto SZ a un nivel de  $\sigma_n \sim 0.2$ , estos resultados pueden verse en la figura 1.12.

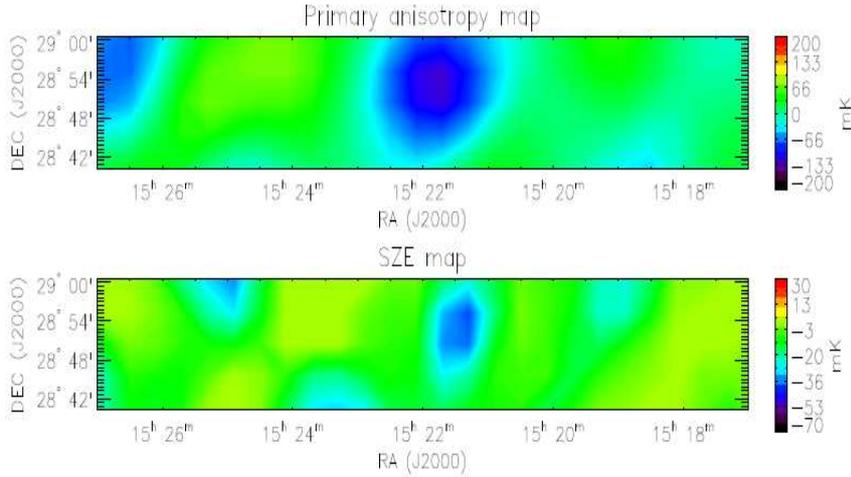


Figura 1.10: Anisotropía primaria y mapas de SZE obtenidos por el método de probabilidad máxima de las observaciones de Corona Borealis con el telescopio MITO. Existe una detección muy evidente en el mapa de SZ. Sin embargo, este parece estar resuelto en el haz de MITO aún cuando la S/N es baja pero no permite una descripción completa de ello.

Contrariamente a los resultados de MITO, de las nuevas simulaciones de las observaciones de VSA se ha confirmado la naturaleza no Gaussiana de CrB-H, revelando que se trata de una fluctuación de  $4.4\sigma$ , donde  $\sigma$  incluye la incertidumbre por ruido introducido por

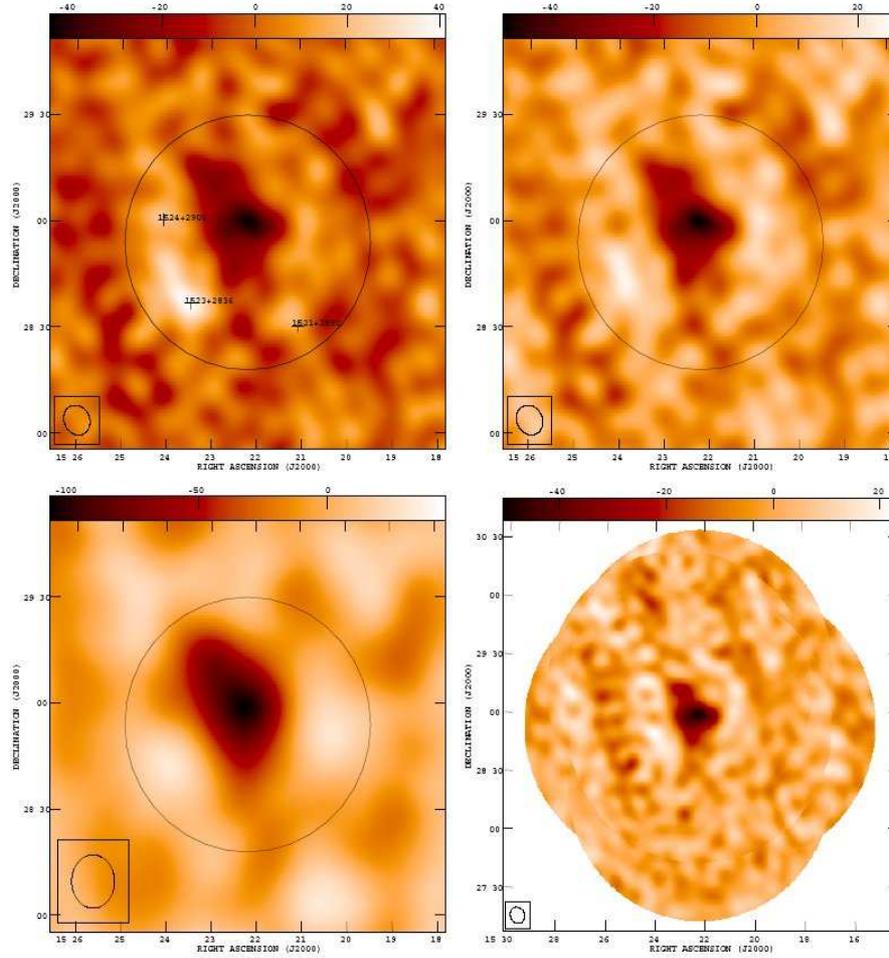


Figura 1.11: Mapas del decremento CrB-H en el CrB-SC obtenido con el VSA en su configuración superextendida. Paneles superiores: los mapas señalan CrB-H antes (izquierda) y después (derecha) de la substracción de fuentes. En el mapa no sustraído de fuentes, las cruces muestran las posiciones de las fuentes de radio presentes dentro del haz primario. Panel inferior izquierdo: mapa sustraído de fuentes para CrB-H, después de aplicar una Gaussiana de  $= 150 \lambda$  en el plano  $uv$ . El círculo indica el haz primario con FWHM de  $1.2^\circ$ . Panel inferior derecho: Mapa mosaico de VSA compuesto por seis apuntados diferentes en la zona de CrB-H. El nivel de ruido es prácticamente uniforme a lo largo de todo el mosaico a un nivel de  $\approx 5 \text{ mJy haz}^{-1}$ . Las unidades de la escala en color mostrada en la barra superior son  $\text{mJy haz}^{-1}$ . En la esquina inferior izquierda de cada mapa se muestra la FWHM del haz sintetizado.

la fluctuación primordial del FCM, el ruido térmico y el ruido debido a fuentes residuales. La probabilidad de que CrB-H esté provocado enteramente por estas tres componentes, es del 0.63 %.

La explicación más probable es que al menos parte del mismo sea debido a un efecto SZ. Si se tratase de un cúmulo de galaxias, rico y lo bastante cercano como para producir un decremento tan profundo, probablemente ya habría sido descubierto ópticamente o mediante detección de rayos X. Pero este efecto SZ podría ser producido en una estructura menos densa y caliente del WHIM.

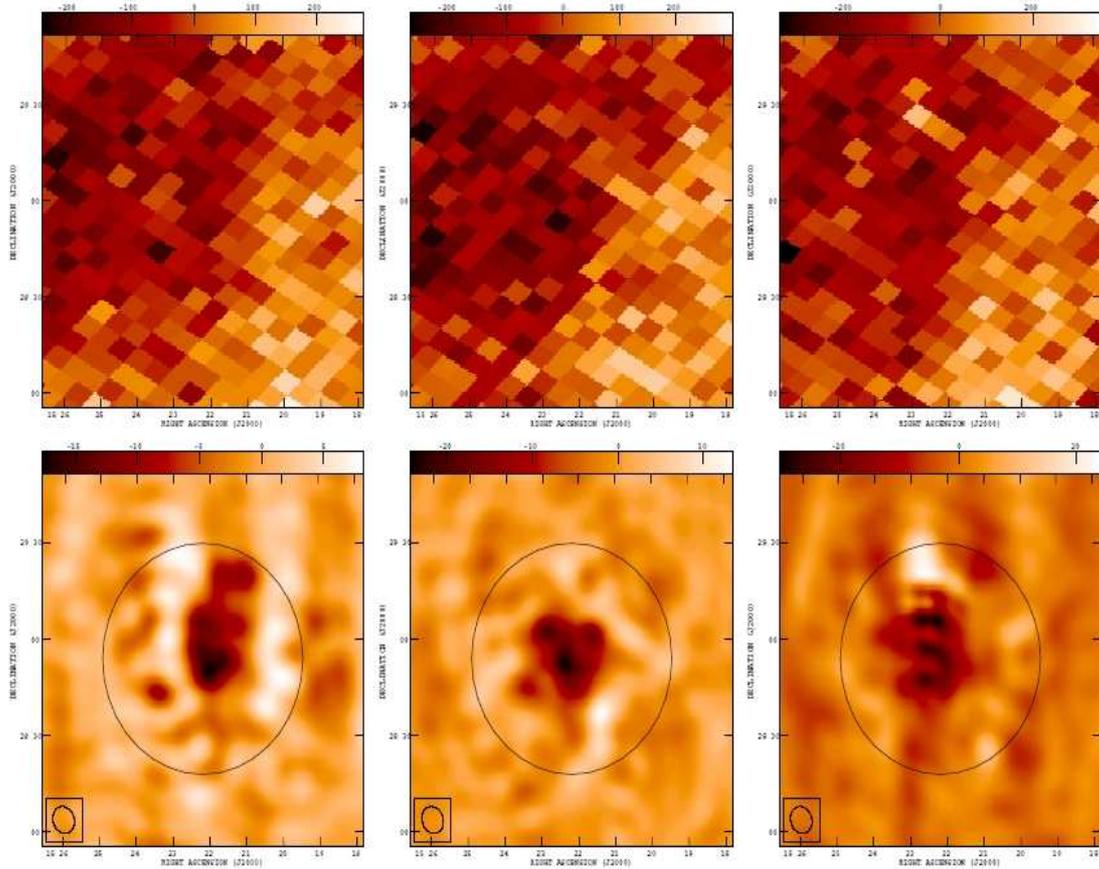


Figura 1.12: Mapas del quinto año de datos WMAP en la región de CrB-H. El panel superior muestra los mapas en las bandas Q, V y W (de izquierda a derecha). Los mapas del panel inferior han sido obtenidos por multiplicación y convolución de los mapas superiores con el haz primario sintetizado de VSA. Las unidades de la escala en color son  $\mu\text{K}$  en el panel superior y  $m\text{Jy haz}^{-1}$  en el panel inferior (Génova-Santos et al. 2008)

Sin embargo, la hipótesis de la existencia de un cúmulo de este estilo se ve desfavorecida por la ausencia de un exceso de Rayos-X. Por tanto, sería necesario que el cúmulo estuviese a una distancia mucho mayor que la de Corona Borealis. Pero, la extensión y amplitud del decremento descartan esta posibilidad debido al tamaño angular que tendría que tener el hipotético cúmulo. Por otra parte, como se mencionó en Génova-Santos et al. (2005), es posible que el decremento CrB-H sea debido a una estructura filamentosa donde esté contenido el gas difuso situado en nuestra línea de visión y a una temperatura entre los 0.6-0.8 keV. Con una sobredensidad bariónica de  $\sim 400$  y una longitud de 40 Mpc, podría representar el 50% del decremento total. En este caso se calculó que el filamento tendría una masa aproximada de  $5 \times 10^{14} M_{\odot}$ . La figura 1.9 muestra claramente como en la región de CrB-SC tan sólo existe una emisión clara de Rayos-X en el cúmulo de galaxias Abell 2065. En la zona de CrB-H no se midió aportación alguna en estas longitudes de onda.

Si el decremento CrB-H detectado por el VSA es causado por una señal SZ debida a

la presencia de gas “templado/caliente” en una estructura filamentosa que está situada a lo largo de nuestra línea de visión, ésta podría contener un número suficiente de galaxias en la dirección del filamento como para ser detectada. Por lo tanto, un estudio óptico de la distribución de la población de las galaxias en esta región será útil para desentrañar si este efecto SZ proviene de este tipo de estructuras filamentosas o es debida a un cúmulo de galaxias desconocido hasta el momento. Si este tipo de estructuras son encontradas, como responsables de la señal SZ detectada, podría indicar que una fracción significativa de los bariones ocultos en el Universo Local residen en filamentos.

#### 1.4. Objetivos de la tesis

Los objetivos más importantes que se desean alcanzar en esta tesis son:

1. Estudiar la distribución espacial de la población de galaxias en el supercúmulo CrB-SC, especialmente en la región del decremento de temperatura detectado en los mapas del FCM y en otras regiones intercumulares, identificando las galaxias presentes en ellas y comparándolas con las presentes en los cúmulos conocidos del supercúmulo.
2. Investigar la posible existencia de cúmulos en dichas regiones intercumulares que pudieran haber pasado inadvertidos. Determinar las propiedades del *agrupamiento* de galaxias a lo largo del supercúmulo, y especialmente en la zona del decremento del FCM. También se estudiarán tanto las propiedades básicas como la morfología de las galaxias presentes en estas regiones del supercúmulo.
3. Cuantificar el efecto SZ producido por gas asociado con los grupos de galaxias presentes en la región. Establecer restricciones y/o poner de manifiesto la distribución espacial de los bariones en regiones intercumulares del supercúmulo.

Para alcanzar estos objetivos se utilizará el catálogo fotométrico del SDSS (capítulo 2) y su espectroscopia (capítulo 3) y se realizarán nuevas observaciones espectroscópicas (capítulo 4) con el fin de determinar la distribución galáctica espacial en 3D. En el capítulo 5 se estudiará el efecto SZ producido a partir de las distribuciones de las galaxias y en el capítulo 6 se presentan las conclusiones y, a continuación, los anexos.

# 2

---

## Distribución espacial de las galaxias de CrB-SC en SDSS

En el presente capítulo se describe la distribución espacial y los colores de las galaxias en la región con un decremento intenso en la temperatura del FCM detectado por el interferómetro VSA (Génova-Santos et al. 2005, 2008) en el supercúmulo de Corona Borealis (CrB-SC). Se mostrará que esta mancha fría está en una zona donde la densidad de galaxias, excluyendo la contribución de los cúmulos, es  $\sim 2$  veces más alta que el valor medio en regiones intercumulares del propio Supercúmulo.

### 2.1. Datos del SDSS

Se ha utilizado el catálogo *SDSS-DR6 Catalogue Archive Server*<sup>1</sup>, Adelman-McCarthy et al. (2008), obtenido con la herramienta SQL (*Structure Query Language*) para seleccionar las galaxias. El catálogo fotométrico del SDSS cubre por completo la región del cielo en la que está situado CrB-SC, salvo en unas pequeñas bandas, que parecen estar asociadas a la presencia de dos estrellas muy brillantes de nuestra galaxia. De dicho catálogo hemos descargado las galaxias en la región de  $220^\circ \leq RA \leq 240^\circ$ ,  $22^\circ \leq DEC \leq 37^\circ$  utilizando las herramientas de la web de SDSS-CasJob<sup>2</sup>. El catálogo total contó con 5.692.792 objetos clasificados como galaxias dentro de este área. La extinción (Schlegel et al. 2002) en un área de  $\sim 1^\circ \times 1^\circ$  centrada en la mancha fría de VSA, CrB-H, es muy pequeña con valores comprendidos entre 0.06 y 0.08 magnitudes en el filtro de Sloan  $r$ . Estos valores se corresponden con un enrojecimiento de  $0.01 \leq (r - i) - (r - i)_0 \leq 0.04$  mag. En cualquier caso, los datos presentados en este capítulo se refieren a magnitudes corregidas de extinción.

Se ha limitado el análisis de las galaxias a  $r \leq 22.2$  mag ya que ésta es la magnitud límite de completitud para objetos puntuales del catálogo SDSS. En el desplazamiento al rojo medio ( $z = 0.07$ ) para CrB-SC,  $r = 22.2$  mag corresponde a una magnitud absoluta de  $M_r = -15.3$ <sup>3</sup>. Por lo tanto, nuestra selección incluye toda la gama de galaxias gigantes y

---

<sup>1</sup><http://www.sdss.org/dr6/access/index.html>CAS

<sup>2</sup><http://casjobs.sdss.org/CasJobs/>

<sup>3</sup>La cosmología usada es  $H_0 = 70 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}$ ,  $\Omega_M = 0.3$ ,  $\Omega_\Lambda = 0.7$

abarca  $\sim 2$  mags en el ámbito de galaxias enanas en el Supercúmulo. El catálogo contiene un total de 3.282.036 galaxias con  $r \leq 22.2$  mag.

Se ha adoptado el criterio de selección de objetos para nuestro catálogo que se muestra en la figura 2.1, donde los objetos escogidos son aquellos que se encuentran por debajo de la línea roja y los objetos desechados son los que se encuentran por encima de la misma, eliminados en función de la magnitud en los filtros  $r$  e  $i$  teniendo en cuenta que a magnitudes más profundas los errores son mayores. Véase Stoughton et al. (2002) donde se trata en detalle la fotometría de SDSS.

Esta restricción basada en errores fotométricos elimina un 5% de los objetos, y reduce el número final de galaxias a 3.110.085 en el filtro  $r$  de Sloan. Además, se aplica una restricción al color ( $r - i$ ) que será justificada y detallada a continuación.

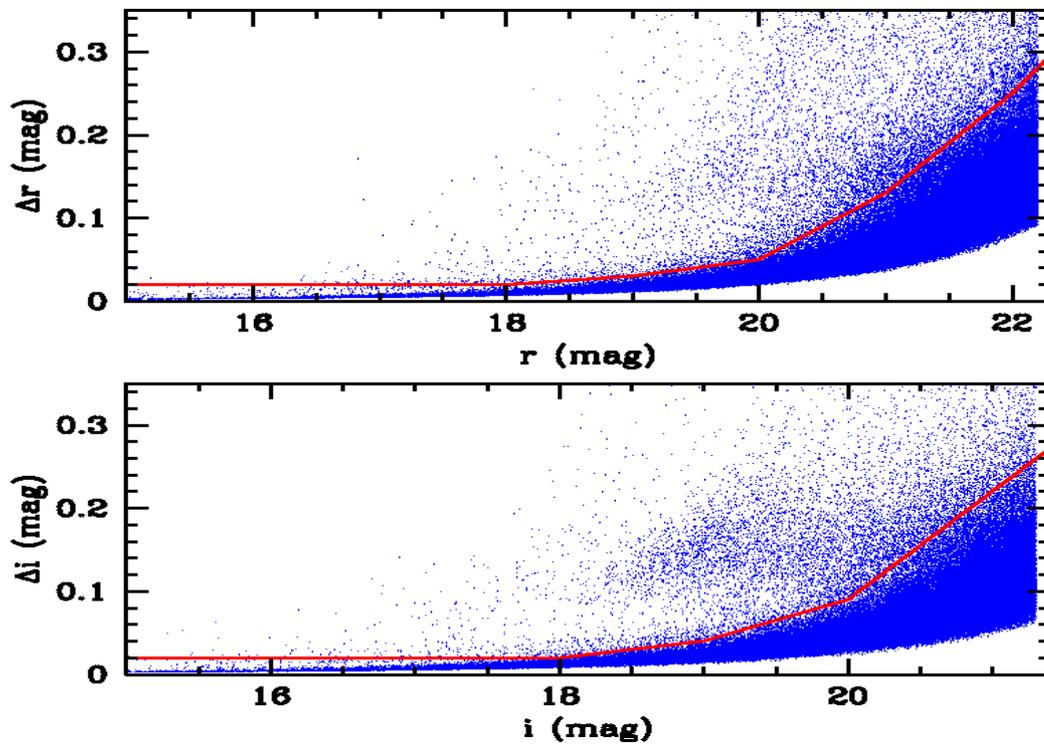


Figura 2.1: Errores fotométricos de las galaxias en SDSS en función de su magnitud en los filtros  $r$  e  $i$  de Sloan. Tan sólo los objetos que se encuentran por debajo de la línea roja han sido utilizados en el presente análisis de las galaxias de CrB-SC.

### 2.1.1. La secuencia roja del diagrama color magnitud

El método de la secuencia roja (SR) del diagrama color magnitud (DCM) ha sido desarrollado por Gladders & Yee (2000). Se basa en el hecho observacional de que las galaxias de tipo temprano de los cúmulos ricos trazan una secuencia característica en el DCM de

Tabla 2.1: Relación numérica de la SR para los cúmulos Abell de CrB-SC en SDSS-DR6. Los datos fueron obtenidos utilizando las galaxias localizadas en la componente roja de la secuencia principal de las galaxias de cada cúmulo, dentro de un radio de  $15'$  centrado en cada cúmulo. Los ajustes han sido determinados utilizando las galaxias en el rango  $14 \leq r \leq 20.5$

Nombre	Ajuste de mínimos cuadrados (mag)
A2065	$(r - i)_{SR} = 0.01*r + 0.26$
A2067	$(r - i)_{SR} = 0.01*r + 0.26$
A2089	$(r - i)_{SR} = 0.01*r + 0.25$
A2092	$(r - i)_{SR} = 0.01*r + 0.23$

los mismos. La existencia de la SR es atribuida a un efecto de edad y metalicidad, dada la habilidad de los sistemas esferoidales de retener los metales eyectados por las explosiones de supernovas. Basados en modelos de evolución de galaxias tempranas, la posición de la SR para cúmulos en el diagrama color-magnitud es un indicador del desplazamiento al rojo.

Uno de los rasgos más importantes del método SR es la claridad con la que muestra la población de galaxias de tipo temprano dentro del cúmulo en estudio (véase la figura 2.2). Además, esta técnica selecciona el cúmulo aislando la secuencia roja del DCM de la muestra tan sólo utilizando dos filtros, y funciona muy bien si uno de ellos contiene el salto de Balmer a  $4000 \text{ \AA}$ . Por otro lado, este método proporciona una estimación del desplazamiento al rojo a partir de la posición de la SR. Gladders & Yee (2000) encontraron que el método es aplicable en un rango de desplazamientos al rojo  $0 \leq z \leq 1.4$ , y comprobaron que el método es capaz de extraer la muestra completa para cúmulos Abell de riqueza  $\geq 1$ .

### 2.1.2. La secuencia roja de los cúmulos de CrB-SC

A diferencia de Gladders & Yee (2000), que presentan su DCM en los filtros “V” e “I” de Johnson, aquí se han escogido los filtros Sloan  $r$  e  $i$  para esta representación, dado que disponemos de los datos del SDSS-DR6. Se han elegido estos dos filtros porque definen la SR, de forma más precisa que la que nos proporciona la representación de los filtros  $g$  e  $i$ , a pesar de que estos podrían considerarse más parecidos a los filtros  $V$  e  $I$  de Johnson, utilizados en Gladders & Yee (2000).

Las figuras que se muestran a continuación presentan los DCM de los cúmulos Abell pertenecientes a CrB-SC. La Tabla 2.1 muestra los resultados de un ajuste lineal de distintas SR. Se observa que las pendientes de las SR de los cúmulos más importantes de CrB-SC son iguales entre sí, cambiando ligeramente el punto cero de los mismos.

### 2.1.3. La Secuencia Roja de CrB-H

Para determinar la naturaleza de las galaxias que pueblan la región de la mancha fría CrB-H del FCM en CrB-SC, se ha representado el DCM y se ha determinado la línea que segrega la SR de las galaxias de tipo temprano presentes en la zona. Para ello, se ha descargado el catálogo de galaxias del SDSS-DR6 con un radio de  $15'$  centrado en

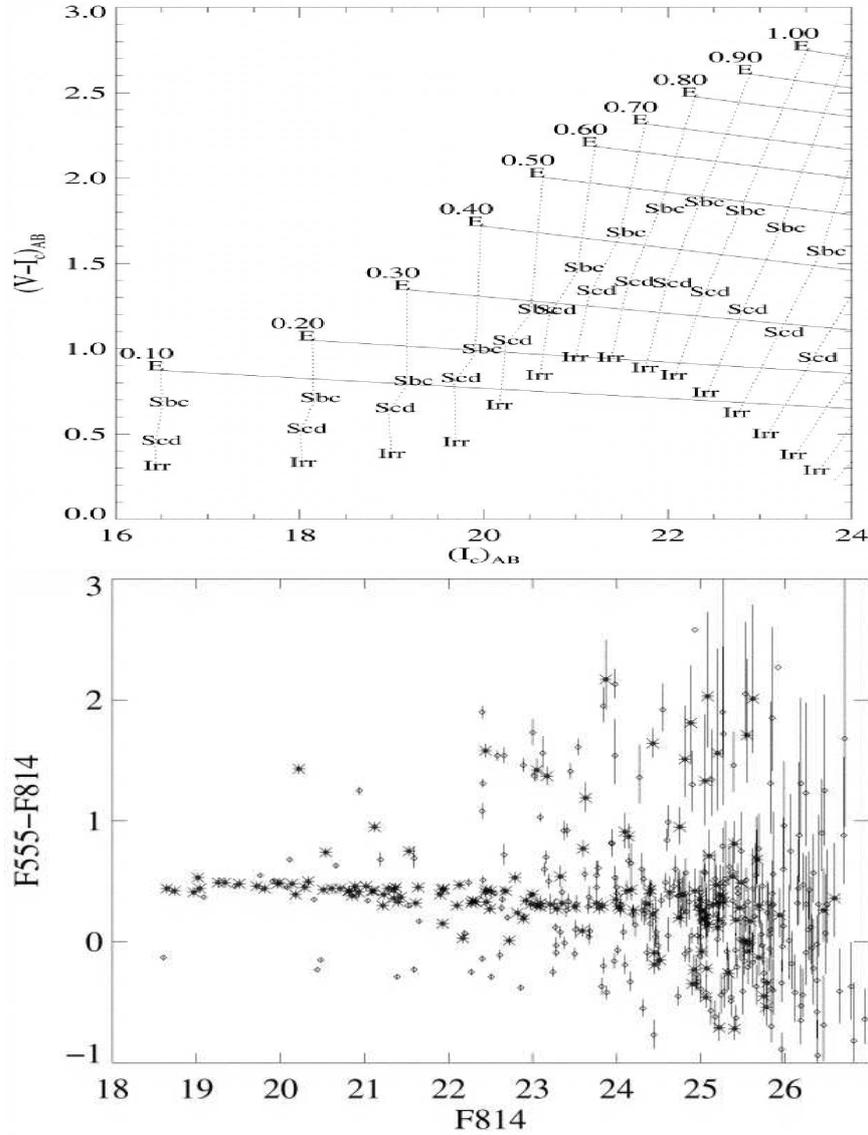


Figura 2.2: **Arriba:** Diagrama color magnitud simulado  $((V-I)_{AB}, (I-C)_{AB})$  para distintos tipos morfológicos de galaxias con  $M_I \leq -22$ . Las líneas punteadas conectan las galaxias que se encuentran a un mismo desplazamiento al rojo. Las líneas sólidas, casi horizontales, dibujan la forma esperada de la Secuencia Roja de un cúmulo a distintos desplazamientos al rojo. Tomada de Gladders & Yee (2000). **Abajo:** Diagrama Color Magnitud observado el cúmulo de Abell 2390. Los asteriscos señalan las galaxias morfológicamente seleccionadas como de tipo temprano, los diamantes indican otras galaxias de diferente tipo en la imagen. Tomadas de Gladders et al. (1998).

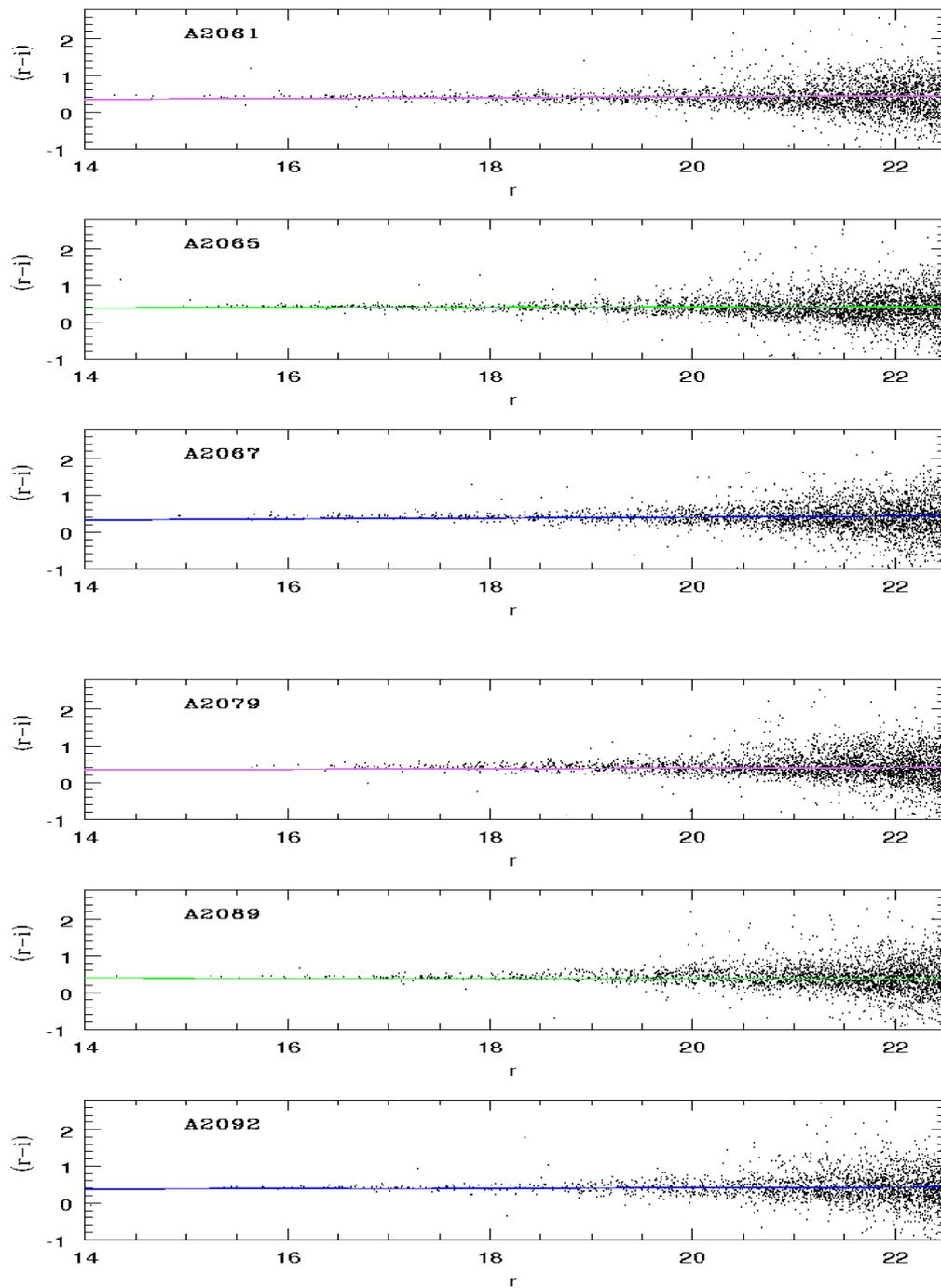


Figura 2.3: Diagrama Color-Magnitud observado ( $r, r-i$ ) de los cúmulos de CrB-SC, Abell 2061, 2065, 2067, 2079, 2082, 2092. En color se presenta el ajuste lineal a la SR de cada uno de los cúmulos, cuyas rectas presentan valores similares entre sí, que se detallan en la tabla 2.1

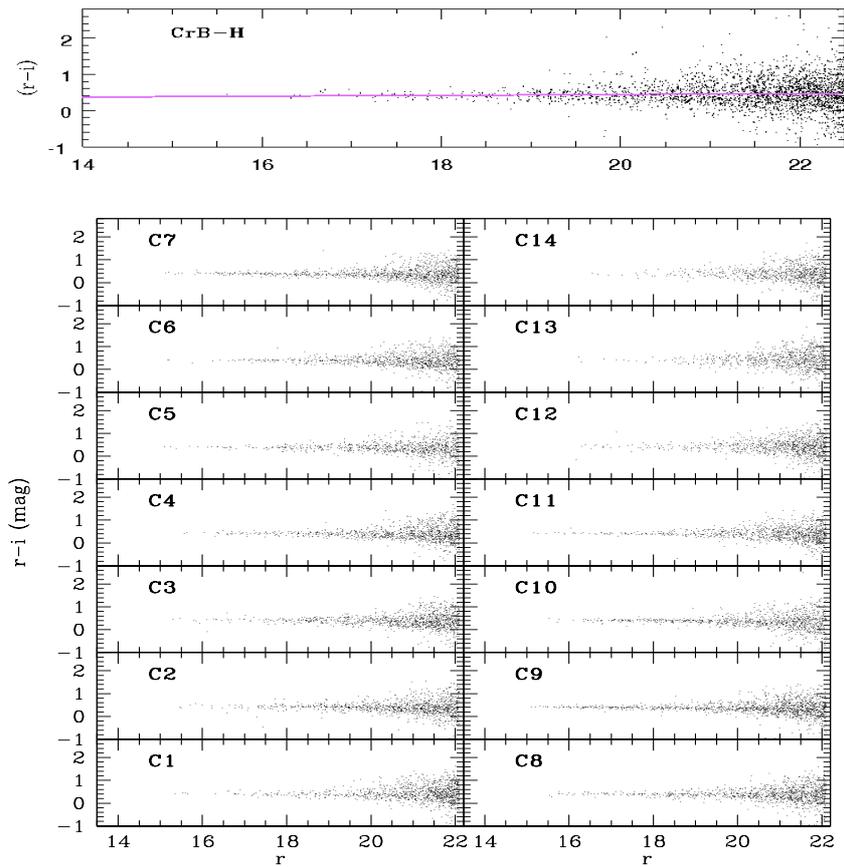


Figura 2.4: DCM de CrB-H (arriba) y de distintas zonas intercumulares de CrB-SC cuyas coordenadas se detallan en la tabla 2.2. Datos del SDSS hasta un radio de  $R=15'$

Tabla 2.2: Relación numérica de la SR para zonas intercumulares de CrB-SC. Los datos fueron calculados usando las galaxias localizadas en la componente roja de la secuencia principal de las galaxias de cada región. Los datos fueron obtenidos del SDSS-DR7, en regiones de radio  $15'$ .

Cielos	RA (J2000)	Dec (J2000)	Ajuste de mínimos cuadrados (mag)
C1	$15^h 26^m 19.92^s$	$30^\circ 29' 06.36''$	$(r-i)_{SR-c1} = 0.03*r - 0.08$
C2	$15^h 28^m 13.92^s$	$31^\circ 04' 14.52''$	$(r-i)_{SR-c2} = 0.04*r - 0.35$
C3	$15^h 20^m 22.08^s$	$30^\circ 06' 22.32''$	$(r-i)_{SR-c3} = 0.08*r - 1.21$
C4	$15^h 25^m 43.92^s$	$29^\circ 02' 24.36''$	$(r-i)_{SR-c4} = 0.02*r + 0.07$
C5	$15^h 28^m 33.12^s$	$28^\circ 17' 20.04''$	$(r-i)_{SR-c5} = 0.01*r + 0.39$
C6	$15^h 26^m 57.84^s$	$27^\circ 44' 26.16''$	$(r-i)_{SR-c6} = -0.01*r + 0.67$
C7	$15^h 32^m 02.64^s$	$27^\circ 45' 39.24''$	$(r-i)_{SR-c7} = 0.19*r - 3.31$
C8	$15^h 30^m 48.84^s$	$30^\circ 34' 25.16''$	$(r-i)_{SR-c8} = 0.11*r - 1.73$
C9	$15^h 30^m 13.92^s$	$31^\circ 14' 14.52''$	$(r-i)_{SR-c9} = -0.02*r + 0.77$
C10	$15^h 28^m 43.92^s$	$30^\circ 12' 24.36''$	$(r-i)_{SR-c10} = -0.00*r + 0.54$
C11	$15^h 33^m 49.92^s$	$30^\circ 30' 44.64''$	$(r-i)_{SR-c11} = 0.08*r - 1.19$
C12	$15^h 33^m 42.95^s$	$30^\circ 00' 16.92''$	$(r-i)_{SR-c12} = 0.03*r - 0.16$
C13	$15^h 30^m 28.07^s$	$29^\circ 56' 00.96''$	$(r-i)_{SR-c13} = 0.12*r - 2.01$
C14	$15^h 27^m 59.07^s$	$28^\circ 54' 24.12''$	$(r-i)_{SR-c14} = 0.01*r + 0.26$
CrB-H	$15^h 22^m 11.47^s$	$28^\circ 54' 06.20''$	$(r-i)_{SR-H} = 0.01*r + 0.24$

RA= $15^h 22^m 11.47^s$  y DEC= $+28^\circ 54' 06.2''$  y se ha seguido el criterio de selección que se describe en la figura 2.1.

Se presenta en el panel superior de la figura 2.4 el DCM de CrB-H, en el panel inferior se muestran los DCM de distintas zonas intercumulares de CrB-SC, donde podemos observar que los DCM son similares a los de los cúmulos representados en la figura 2.3 y al de la zona de CrB-H. La diferencia se encuentra en el número de galaxias que pueblan las respectivas SR. Todas las SR calculadas para estas figuras presentan rectas de colores muy parecidos entre sí, que se encuentran en torno a un valor medio de  $r - i = 0.20$ . En la figura 2.4 (abajo) podemos observar cómo la mayoría de las SR presentes en cada zona son muy similares entre sí y, son, en primera aproximación, una forma de establecer la pertenencia a CrB-SC de las galaxias situadas en cada una de estas zonas.

La tabla 2.2 presenta los ajustes lineales de las zonas intercumulares de la figura 2.4 (abajo). Como se observa en la tabla, la mayor parte de estas zonas muestran SR muy similares entre sí. Véase la columna *Ajuste de mínimos cuadrados*.

## 2.2. Análisis

### 2.2.1. La mancha fría de VSA: CrB-H

El interferómetro VSA observó CrB-SC en dos configuraciones diferentes, la configuración *extendida* con una resolución angular de  $11'$  y la configuración *superextendida* con

Tabla 2.3: Número de galaxias que pueblan la mancha fría CrB-H. Los valores corresponden a las galaxias con magnitudes comprendidas entre  $15 \leq r \leq 22$  mag dentro de los niveles de contorno de la mancha de 2 a 5  $\sigma$ . Para cada nivel de contorno, las columnas (2-5) muestran el área subtendida, el número, la densidad y la media del color  $r-i$ , respectivamente, de las galaxias que pueblan cada uno de ellos.

nivel $\sigma$	área (min. de arco <sup>2</sup> )	gal	$\rho$ (gal min. de arco <sup>-2</sup> )	$\overline{r-i}$
2	894	2565	$2.87 \pm 0.06$	0.428
3	548	1614	$2.95 \pm 0.08$	0.426
4	311	978	$3.14 \pm 0.10$	0.430
5	120	398	$3.32 \pm 0.17$	0.439

una resolución angular de  $7'$  tal y como se explicó en la sección 1.3. La mancha fría CrB-H ha sido detectada en ambas configuraciones. La figura 2.5 representa un mapa de contornos con niveles de 2, 3, 4 y 5  $\sigma$  obtenidos a partir del mapa de VSA después de sustraer fuentes puntuales y hacer un filtrado Gaussiano, véase la figura 1 del trabajo de Génova-Santos et al. (2008). La mancha está resuelta por VSA y presenta una forma elongada a lo largo de su eje mayor en la dirección NE-SW. El mínimo de temperaturas se encuentra en las coordenadas  $RA = 15^h 22^m 11.47^s$  y  $Dec = 29^\circ 00' 02.6''$ . El área subtendida por los niveles de 2, 3, 4 y 5  $\sigma$  es de 894, 548, 311 y 120 minutos de arco cuadrados respectivamente. La mancha está localizada a  $\sim 50'$  hacia el SW del centro del CrB-SC dado en NED<sup>4</sup>.

La densidad de galaxias existente dentro de los niveles de flujo medidos por VSA a 2, 3, 4 y 5  $\sigma$  que han sido, respectivamente, de 36.2, 54.3, 72.4, 90.5  $mJy haz^{-1}$  es de  $2.87 \pm 0.06$ ,  $2.95 \pm 0.08$ ,  $3.14 \pm 0.10$ ,  $3.32 \pm 0.17$  *galaxias min. de arco<sup>-2</sup>*. Los contornos de la mancha CrB-H de VSA se resumen en la tabla 2.3. Se ha aplicado la restricción en el error de los colores como se muestra en la figura 2.1, y además se ha aplicado un corte en magnitud a  $r \leq 22$ . La densidad de galaxias tiende a ser visiblemente mayor en la parte interna de la mancha, ésta se incrementa en un  $\sim 16\%$  entre los contornos de nivel de  $2\sigma$  hasta los  $5\sigma$ , sin embargo, la diferencia en densidad existente entre los contornos no es significativa, no hay un nivel que destaque frente a otro. El significado y las consecuencias de este incremento en la densidad se investigarán en las siguientes secciones. Las galaxias que pueblan cada uno de los contornos señalados presentan colores y magnitudes similares entre sí y compatibles con los que presentan las galaxias de los cúmulos de CrB-SC.

### 2.2.2. La distribución de galaxias dentro de CrB-H

Investigaremos la distribución de las galaxias dentro de la mancha CrB-H y construyendo mapas de densidad que permitan relacionar espacialmente las galaxias del campo e intentar localizar sobredensidades en el mismo. Este tipo de mapas dan información sobre tamaños, densidades relativas y localización de estructuras. La construcción de mapas de densidad permite conocer cuantitativamente el valor de la densidad galáctica de cada región del supercúmulo y la relación existente entre ellas.

La figura 2.6 muestra el mapa de densidad construido a partir de las galaxias del SDSS-DR6 en el CrB-SC tomando celdas de área  $5' \times 5'$ . Las regiones de mayor densidad en el

<sup>4</sup><http://nedwww.ipac.caltech.edu/>

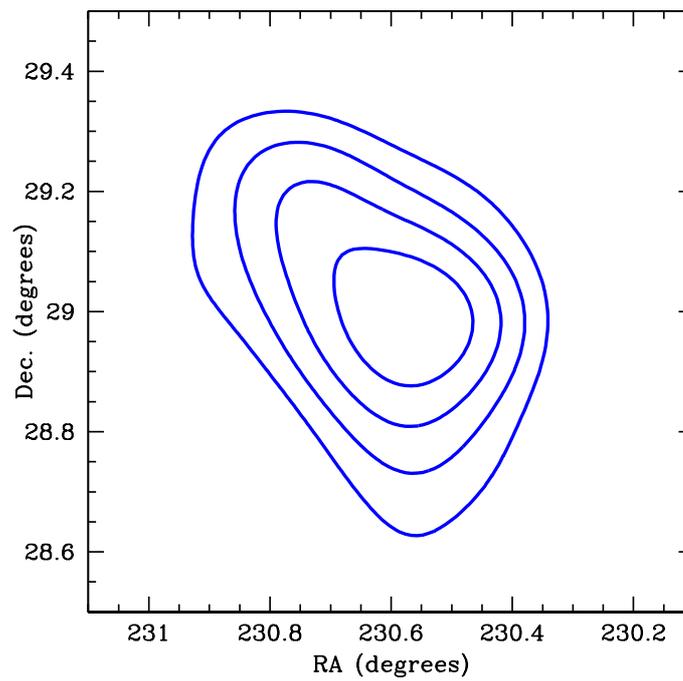


Figura 2.5: Contornos de la mancha fría CrB-H. Para más detalles véase Génova-Santos et al. (2008) y Padilla-Torres et al. (2009). Obtenida usando la configuración *superextendida* del VSA con una resolución efectiva de  $13'$ . Los contornos están a  $-36.2$ ,  $-54.3$ ,  $-72.4$ ,  $-90.5 \text{ mJy haz}^{-1}$ , que corresponden a los niveles de 2, 3, 4 y  $5 \sigma$ .

mapa corresponden, como es de esperar, a los cúmulos de Abell. No hay cúmulos de Abell presentes en la zona de la mancha fría CrB-H cubierta por VSA ( $\sim 540$  minutos de arco cuadrados que se encuentran por debajo de un nivel de significación de  $3\sigma$ ). El cúmulo más cercano a la mancha es Abell 2059 que se proyecta a una distancia de 26.2 minutos de arco, lo que corresponde a 3.6 Mpc al desplazamiento al rojo al cual se encuentra este cúmulo, que es  $z=0.1305$ . El cúmulo de Abell perteneciente al supercúmulo CrB-SC más cercano a la mancha CrB-H es el Abell 2056, a 58.6 minutos de arco. Esta distancia corresponde a 4.7 Mpc al desplazamiento al rojo calculado para el supercúmulo,  $z=0.07$ , (aproximadamente 3 radios de Abell). Es decir, en la zona de la mancha no parece haber contribución apreciable de galaxias pertenecientes a cúmulos. La mayor densidad de galaxias en la zona se encuentra en una región encerrada en un círculo de  $\sim 1^\circ$  y centrada a una distancia de  $\sim 40$  minutos de arco hacia el Sur de la mancha fría de VSA. Los límites de esta región están claramente definidos por los cúmulos Abell 2056, 2065, 2059 y 2073. Es posible apreciar también un filamento que se extiende desde la región ocupada por Abell 2065 a lo largo de una estrecha franja en dirección NE-SW que tiene una longitud de  $\sim 35$  minutos de arco, lo que equivale a unos  $\sim 3$  Mpc al desplazamiento al rojo de CrB-SC. Esta franja es la que muestra una más alta densidad de galaxias a pesar de que la región no está asociada a ningún cúmulo de Abell.

En las siguientes secciones se cuantificará la densidad y las propiedades de las galaxias dentro del área subtendida por la mancha fría del FCM, CrB-H, en comparación con las regiones cumulares e intercumulares, y a su vez con campos de control escogidos por todo el cielo de manera aleatoria y a los que se les ha aplicado el mismo criterio que a las regiones interiores del CrB-SC.

### 2.2.3. Comparación con los campos de control

Para conocer la amplitud de la sobredensidad de galaxias que muestra el CrB-SC y a su vez la mancha CrB-H, se han tomado 22 campos de control fuera del supercúmulo. Estos a su vez fueron medidos por VSA como campos de anisotropía primordial. La tabla 2.4 muestra un resumen de los valores de la densidad de galaxias obtenidos para estos campos de control. La tabla muestra el valor medio de la densidad de galaxias fuera del supercúmulo en estos campos de control frente al radio que subtienden y la densidad de galaxias en cada anillo por minuto de arco cuadrado.

Para profundizar en el estudio de la sobredensidad presente en CrB-SC y eliminar cualquier sesgo en la muestra escogida, se ha comparado la densidad de galaxias dentro de la mancha de VSA con 1000 regiones del cielo fuera del supercúmulo escogidas de forma aleatoria. Se ha elegido cada una de estas regiones con un radio de  $13.2'$ , lo que da un área equivalente al nivel de contorno subtendido por la mancha CrB-H a  $3\sigma$ . Los campos de fondo de cielo se han tomado del catálogo SDSS-DR6 y se encuentran lejos, al menos a una distancia de  $\geq 30'$  de cualquier cúmulo de Abell. La figura 2.7 representa la densidad de galaxias de cada uno de los campos de control elegidos fuera del CrB-SC para tres cortes en magnitud,  $16 \leq r \leq 17$ ,  $17 \leq r \leq 18$  y  $18 \leq r \leq 19$ . La densidad de galaxias dentro de la mancha CrB-H se representa en la figura como la línea verde sólida en cada uno de los paneles. La densidad de cada uno de los campos de control ha sido representada con un punto en cada uno de los paneles. La figura muestra para cada uno de los cortes realizados

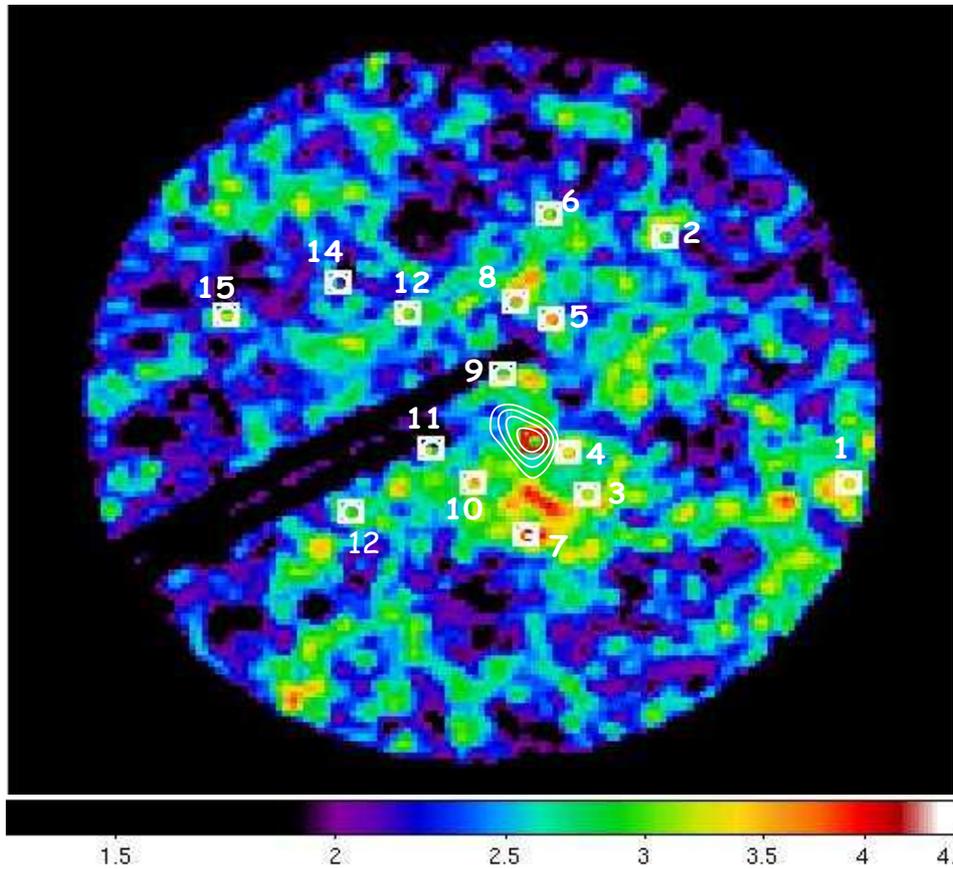


Figura 2.6: Mapa de densidad de galaxias en la región del CrB-SC. El mapa ha sido construido midiendo la densidad de galaxias del SDSS-DR6 presentes en cajas cuadradas de tamaño  $5' \times 5'$  con la restricción de magnitudes entre  $15 \leq r \leq 22$ . El Norte está hacia arriba y el este hacia la izquierda. El mapa presenta una región de  $5^\circ \times 5^\circ$  centrados en la posición  $RA = 15^h 25^m 16,2^s$  y  $Dec = +29^\circ 31' 30''$ . Las franjas negras presentes desde el SE hasta el centro corresponden a regiones no cubiertas por los catálogos del SDSS hasta el presente. Las curvas blancas, corresponden a los contornos de la Mancha CrB-H en el mapa de microondas creado a partir de VSA. Las etiquetas indican la posición de los cúmulos Abell conocidos en la región del CrB-SC. Estas tienen la siguiente correspondencia: 1) Abell 2022 2) Abell 2049 3) Abell 2056 4) Abell 2059 5) Abell 2061 6) Abell 2062 7) Abell 2065 8) Abell 2067 9) Abell 2069 10) Abell 2073 11) Abell 2079 12) Abell 2083 13) Abell 2089 14) Abell 2092 y 15) Abell 2110.

Tabla 2.4: Densidad de galaxias en los campos primordiales medidos por VSA y por SDSS, a diferentes radios ópticos y en diferentes magnitudes hasta la magnitud límite del SDSS.

Magnitud <(mag)	$\rho_{cielo}$ $n_{galaxias}/\text{min. de arco}^2$			
	R=20'	R=15'	R=10'	R=5'
18	$0.042^{+0,012}_{-0,008}$	$0.050^{+0,023}_{-0,014}$	$0.069^{+0,065}_{-0,029}$	$0.049^{+0,022}_{-0,012}$
20	$0.138^{+0,032}_{-0,020}$	$0.164^{+0,068}_{-0,037}$	$0.137^{+0,025}_{-0,027}$	$0.139^{+0,042}_{-0,042}$
22	$0.525^{+0,090}_{-0,069}$	$0.534^{+0,101}_{-0,093}$	$0.534^{+0,100}_{-0,134}$	$0.509^{+0,137}_{-0,167}$

Tabla 2.5: Densidad de galaxias calculada utilizando 1000 regiones de control seleccionadas aleatoriamente en todo el cielo en comparación con la densidad de galaxias que presenta CrB-H. Las columnas representan: (1) rango de magnitud en  $r$  analizado; (2-3) densidad de galaxias en CrB-H y la media del valor en el campo; (4) número de campos dentro de los 1000 analizados cuyo valor de densidad es mayor que la densidad que presenta la región CrB-H; (5) contraste en densidad entre CrB-H y el valor medio en el campo; (6) Significancia estadística de la sobredensidad observada en CrB-H respecto a los valores medios en las zonas de control.

$r$ (mag)	$\rho_{VSA}$ (gal min. de arco <sup>-2</sup> )	$\bar{\rho}_{campo}$ (gal min. de arco <sup>-2</sup> )	>VSA	$\Delta\rho/\rho$	$\sigma$
16-17	0.027	$0.011 \pm 0.006$	16	2.5	2.6
17-18	0.086	$0.029 \pm 0.012$	2	3.0	4.7
18-19	0.124	$0.077 \pm 0.022$	32	1.6	2.1

en magnitud que la mayoría de los campos de control estudiados presentan valores medios de densidad inferiores al valor de CrB-H. Los resultados generales se cuantifican en la tabla 2.5.

Según la tabla 2.5 solamente del 1% al 3% de los campos de control escogidos al azar presentan densidades comparables o mayores que el valor de la densidad que se obtiene para CrB-H en cada rango de magnitud. El contraste que se obtiene entre el valor de la densidad presentado por CrB-H y el cielo externo al propio Supercúmulo es  $\gtrsim 2$ . Esta sobredensidad es significativa a un nivel entre  $2\sigma$  y  $4\sigma$  dependiendo del corte en la magnitud  $r$  aplicado.

#### 2.2.4. Comparación con las zonas intercumulares de CrB-SC

Para estimar la densidad de galaxias en las regiones intercumulares se ha construido una red de celdas constituidas por círculos con un radio de 13.2 minutos de arco dentro del supercúmulo. Cada una de las celdas ha sido separada 20 minutos de arco en RA y en DEC, a fin de que no exista contaminación por proximidad para cada una de las medidas y a fin de cubrir uniformemente el campo de CrB-SC hasta  $3^\circ$  desde el centro del mismo. Se han excluido a su vez, aquellas celdas situadas a radios menores de 30 minutos de arco desde el centro de la mancha CrB-H. Además han sido objeto de exclusión las celdas que se encontraban a menos de 15 minutos de arco de cualquier cúmulo de Abell presente en la

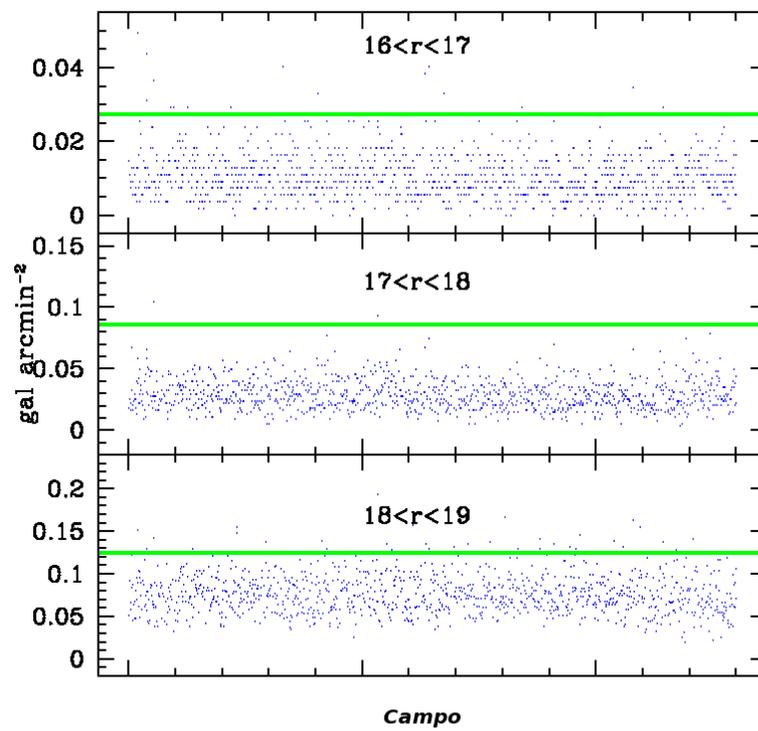


Figura 2.7: Densidad de galaxias en tres rangos de magnitud  $r$  dentro de la región de CrB-H en comparación con 1000 campos de control escogidos aleatoriamente en todo el cielo. La línea verde representa la densidad de galaxias presente en CrB-H en cada rango de magnitud y los puntos azules representan la densidad de galaxias de cada campo de control fuera del CrB-SC.

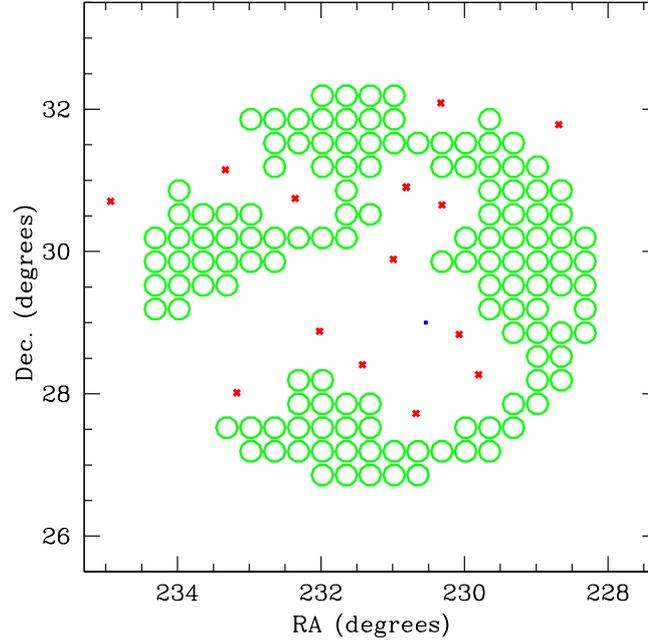


Figura 2.8: Círculo con un radio de  $R = 3^\circ$  centrado en el centro de CrB-SC  $RA = 15^h 25^m 16.2^s$  y  $Dec = +29^\circ 25' 16.2''$ . Los círculos verdes indican la posición de las regiones utilizadas para estimar la densidad de galaxias en las regiones intercumulares de CrB-SC. Los puntos rojos indican las posiciones de cada uno de los cúmulos Abell. El punto azul indica la posición de la mancha de VSA, CrB-H.

región del Supercúmulo o que hubiesen sido parcialmente cubiertas por el SDSS, como es el caso de dos franjas estrechas situadas desde el centro del supercúmulo hacia el SE según muestra la figura 2.6. Este tipo de restricciones excluyen implícitamente al núcleo interno de CrB-SC, donde la densidad de galaxias es más alta, según se puede observar en la figura 2.6. La posición de las 133 celdas restantes que se han considerado en el estudio puede verse en la figura 2.8. Contabilizando el área que ocupan las regiones intercumulares se obtiene un total de 20.2 grados cuadrados, es decir, un 70 % del área subtendida en los  $3^\circ$  desde el centro del supercúmulo. Los resultados de este estudio se encuentran resumidos en la tabla 2.6. Esta tabla presenta el valor medio del número de galaxias y el valor medio del color  $r - i$  de estas galaxias para las regiones intercumulares y para la mancha de VSA CrB-H. La región que subtiende la mancha de VSA es un factor  $\sim 2$  más densa en la mayoría de los cortes de magnitud realizados. Una vez más estos factores están dentro del rango de los  $3 - 4\sigma$  de nivel de significación y resultan ser robustos con respecto a las magnitudes o a la restricción en el color. La sobredensidad que se encuentra en esta región con respecto a las zonas intercumulares estudiadas indica que la densidad de galaxias típicas de las regiones intercumulares de CrB-SC es similar a la encontrada en el campo externo al supercúmulo. La media del valor del color  $r - i$  en las regiones intercumulares y dentro de CrB-H son compatibles cuando se tiene en cuenta la dispersión del ruido poissoniano de campo a campo.

Tabla 2.6: Tabla resumen del estudio de las regiones intercumulares de CrB-SC. Número de galaxias y valor medio del color  $r - i$  dentro del área subtendida por la mancha de VSA, CrB-H (columnas 1–2 y 5–6), y valores medios de las regiones intercumulares de CrB-SC (columnas 3–4 y 7–8). Estos valores han sido calculados sin restricción en color (columnas 1–4), y con la restricción en el color de  $0.2 \leq r - i \leq 0.6$  (columnas 5–8).

Rango en mag	galaxias (1)	$\overline{r - i}$ (2)	galaxias (3)	$\overline{r - i}$ (4)	galaxias (5)	$\overline{r - i}$ (6)	galaxias (7)	$\overline{r - i}$ (8)
$17 \leq r \leq 18$	43	0.385	$12.27 \pm 6.22$	$0.344 \pm 0.206$	42	0.390	$11.57 \pm 6.05$	$0.402 \pm 0.002$
$18 \leq r \leq 19$	74	0.380	$32.05 \pm 12.32$	$0.412 \pm 0.060$	67	0.389	$28.74 \pm 11.65$	$0.417 \pm 0.024$
$19 \leq r \leq 20$	151	0.424	$86.91 \pm 22.78$	$0.420 \pm 0.040$	129	0.391	$70.03 \pm 20.09$	$0.411 \pm 0.017$
$20 \leq r \leq 21$	380	0.435	$231.77 \pm 49.84$	$0.428 \pm 0.031$	243	0.385	$145.74 \pm 34.38$	$0.396 \pm 0.012$
$21 \leq r \leq 22$	897	0.429	$582.38 \pm 109.87$	$0.404 \pm 0.033$	417	0.388	$262.59 \pm 50.65$	$0.392 \pm 0.009$

### 2.2.5. Comparación con los cúmulos de CrB-SC

Se ha estudiado la densidad de galaxias de CrB-H en comparación con cada uno de los cúmulos en la región del supercúmulo. La tabla 2.7 muestra la densidad de galaxias presente en CrB-H y en los cúmulos Abell de CrB-SC que se localizan hasta  $3^\circ$  desde el centro de CrB-SC. Los cúmulos Abell 2069, Abell 2079 y 2092 han sido excluidos de la muestra ya que no han sido totalmente cubiertos por el catálogo fotométrico del SDSS. La tabla muestra la densidad de galaxias dentro de 5, 10, 15, 20 minutos de arco de radio respectivamente para distintos cortes de magnitud,  $15 \leq r \leq 19$  y  $15 \leq r \leq 22$ . La densidad de galaxias de los cúmulos Abell dentro de los  $R \leq 10$  primeros minutos de arco en el corte más profundo en magnitud, está en el rango de los 2.8 a 3.8 por minuto de arco cuadrado. El cúmulo con mayor densidad de galaxias es Abell 2065, tal y como se esperaba, ya que es uno de los cúmulos mayores de la región, y emisor de rayos X en los mapas de ROSAT junto con el Abell 2069, que no se ha tenido en cuenta en el estudio por las causas ya explicadas anteriormente.

La figura 2.9 presenta la dependencia radial de la densidad de los distintos campos del supercúmulo para varios rangos de magnitud. La sobredensidad asociada a la mancha fría CrB-H, en la región comprendida entre los 10 a 15 minutos de arco es similar al valor que presentan los cúmulos al desplazamiento al rojo de CrB-SC. El exceso de galaxias puede verse en el corte de magnitud de  $18 \leq r \leq 19$  y podría interpretarse como la existencia de una masa relativamente baja perteneciente a un cúmulo en la posición del CrB-H y al desplazamiento al rojo del CrB-SC. Sin embargo, la ausencia de sobredensidad en el corte de magnitud entre  $19 \leq r \leq 20$  sugiere que esta concentración de galaxias no puede ser responsable de la sobredensidad observada a magnitudes más débiles.

La Figura 2.10 muestra los mapas de densidad de galaxias en un área circular con un radio de  $2.5^\circ$  centrada en la posición de la mancha fría de VSA. Cada panel de la figura muestra una porción correspondiente a una selección de las galaxias en cortes de magnitud  $r$ . Como se indica en la figura 2.6, la mancha se encuentra en el núcleo interno del supercúmulo donde la densidad es mayor. Los cúmulos Abell son las estructuras dominantes en los mapas que representan la parte más brillante en magnitud. A medida que se avanza hacia cortes más débiles en magnitud, la presencia de estos cúmulos es menos evidente puesto que

Tabla 2.7: Densidad de galaxias en varios campos del supercúmulo de Corona Borealis: Las regiones están centradas en la mancha de VSA, CrB-H y en los cúmulos Abell, hasta una distancia de  $3^\circ$  desde CrB-H (los cúmulos Abell 2069, 2079 y 2092 no han sido considerados ya que no han sido totalmente cubiertos por el catálogo fotométrico del SDSS). Las galaxias se seleccionan bajo el criterio fotométrico de errores, tal como se explica en la sección 2.1 y se representa en la figura 2.1. Se muestra la densidad dentro de áreas de radio 5, 10, 15 y 20 min. de arco respectivamente, para los rangos de magnitud  $r \leq 19$  (columnas 4 - 7 de la tabla superior), y  $r \leq 22$  (columnas 4 - 7, de la tabla inferior).

Campo	RA (J2000) (hh mm ss.ss)	Dec. (J2000) ( $^\circ$ ' ")	z	mag $15 \leq r \leq 19$				$\rho$ (gal min. de arco $^{-2}$ )
				$R = 5'$	$R = 10'$	$R = 15'$	$R = 20'$	
CrB-H	15 22 11.5	+29 00 06		0.253	0.255	0.215	0.163	
A2073	15 25 41.5	+28 24 32	0.1717	0.594	0.335	0.260	0.200	
A2059	15 20 17.6	+28 50 13	0.1305	0.560	0.331	0.214	0.231	
A2061	15 21 15.3	+30 39 17	0.0784	0.904	0.450	0.190	0.150	
A2067	15 23 14.8	+30 54 23	0.0739	0.574	0.383	0.186	0.194	
A2083	15 29 26.3	+30 44 45	0.1142	0.361	0.309	0.162	0.140	
A2056	15 19 12.3	+28 16 10	0.0846	0.429	0.382	0.245	0.200	
A2065	15 22 42.6	+27 43 21	0.0726	1.021	0.541	0.303	0.255	
A2089	15 32 41.3	+28 00 56	0.0731	0.400	0.292	0.161	0.145	

Campo	RA (J2000) (hh mm ss.ss)	Dec. (J2000) ( $^\circ$ ' ")	z	mag $15 \leq r \leq 22$				$\rho$ (gal min. de arco $^{-2}$ )
				$R = 5'$	$R = 10'$	$R = 15'$	$R = 20'$	
CrB-H	15 22 11.5	+29 00 06		3.214	2.888	2.606	2.335	
A2073	15 25 41.5	+28 24 32	0.1717	3.727	3.050	2.593	2.652	
A2059	15 20 17.6	+28 50 13	0.1305	3.298	3.058	2.862	2.543	
A2061	15 21 15.3	+30 39 17	0.0784	4.598	2.986	2.392	2.266	
A2067	15 23 14.8	+30 54 23	0.0739	3.811	3.062	2.644	2.542	
A2083	15 29 26.3	+30 44 45	0.1142	3.232	2.869	2.582	2.347	
A2056	15 19 12.3	+28 16 10	0.0846	3.066	3.120	2.891	2.807	
A2065	15 22 42.6	+27 43 21	0.0726	4.449	3.771	2.878	2.991	
A2089	15 32 41.3	+28 00 56	0.0731	2.940	2.763	2.536	2.309	

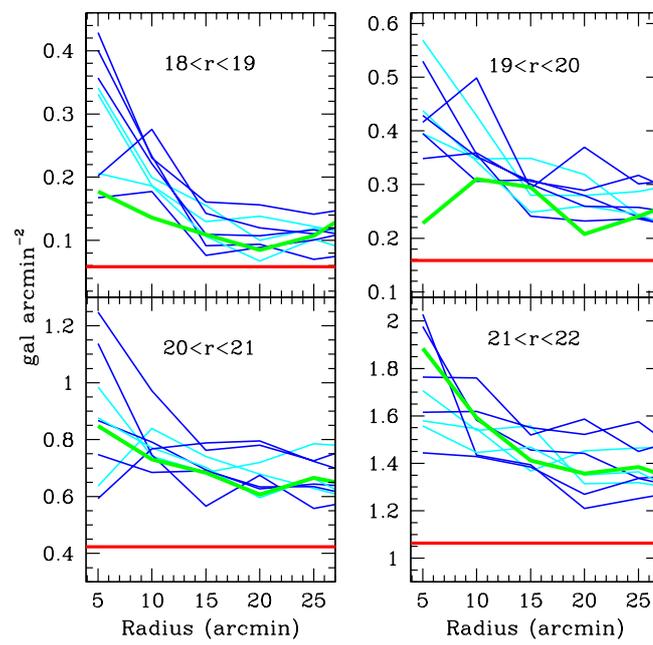


Figura 2.9: Densidad de galaxias para distintos cortes en la magnitud  $r$  como función del radio para la mancha de VSA CrB-H (línea verde), cúmulos de galaxias (líneas azules) y para la media del valor de las regiones intercumulares (línea roja horizontal).

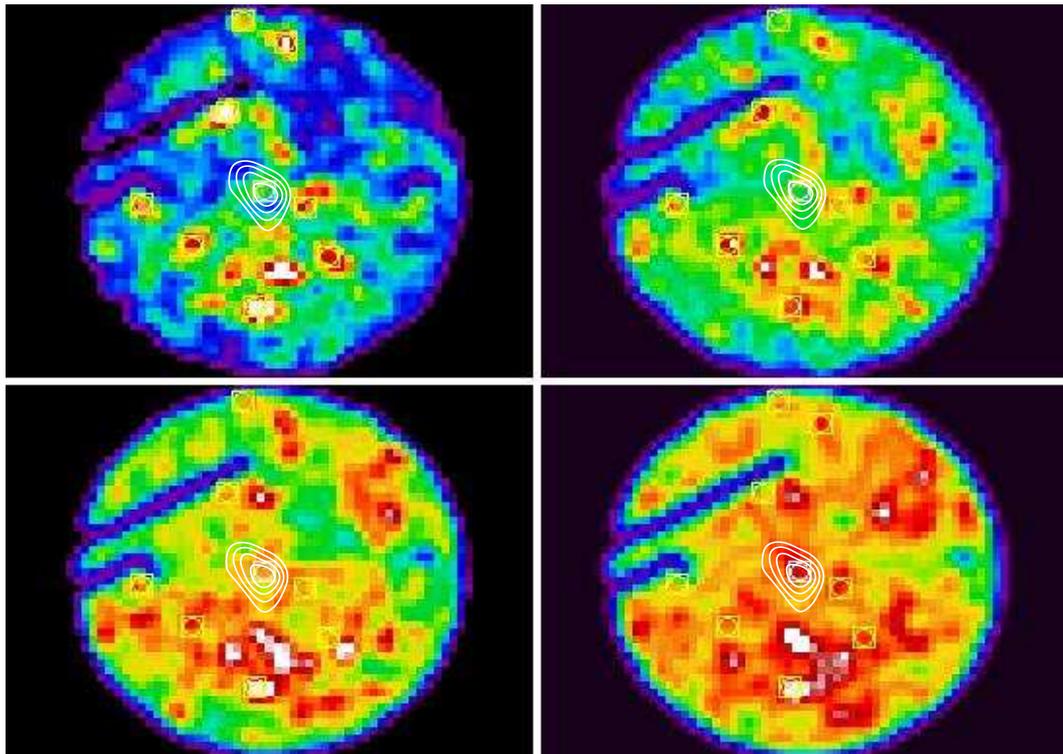


Figura 2.10: Densidad de galaxias en la región de  $R = 2.5^\circ$  centrada en la posición de CrB-H (ver figura 2.6 para más detalles). Cada panel muestra un corte de magnitud en  $r$ : arriba-izquierda  $18 \leq r \leq 19$ ; arriba-derecha  $19 \leq r \leq 20$ ; abajo-izquierda  $20 \leq r \leq 21$ , y abajo-derecha  $21 \leq r \leq 22$ . Escala de color como en figuras anteriores. Se señala con línea continua los contornos de CrB-H descritos en la figura 2.5

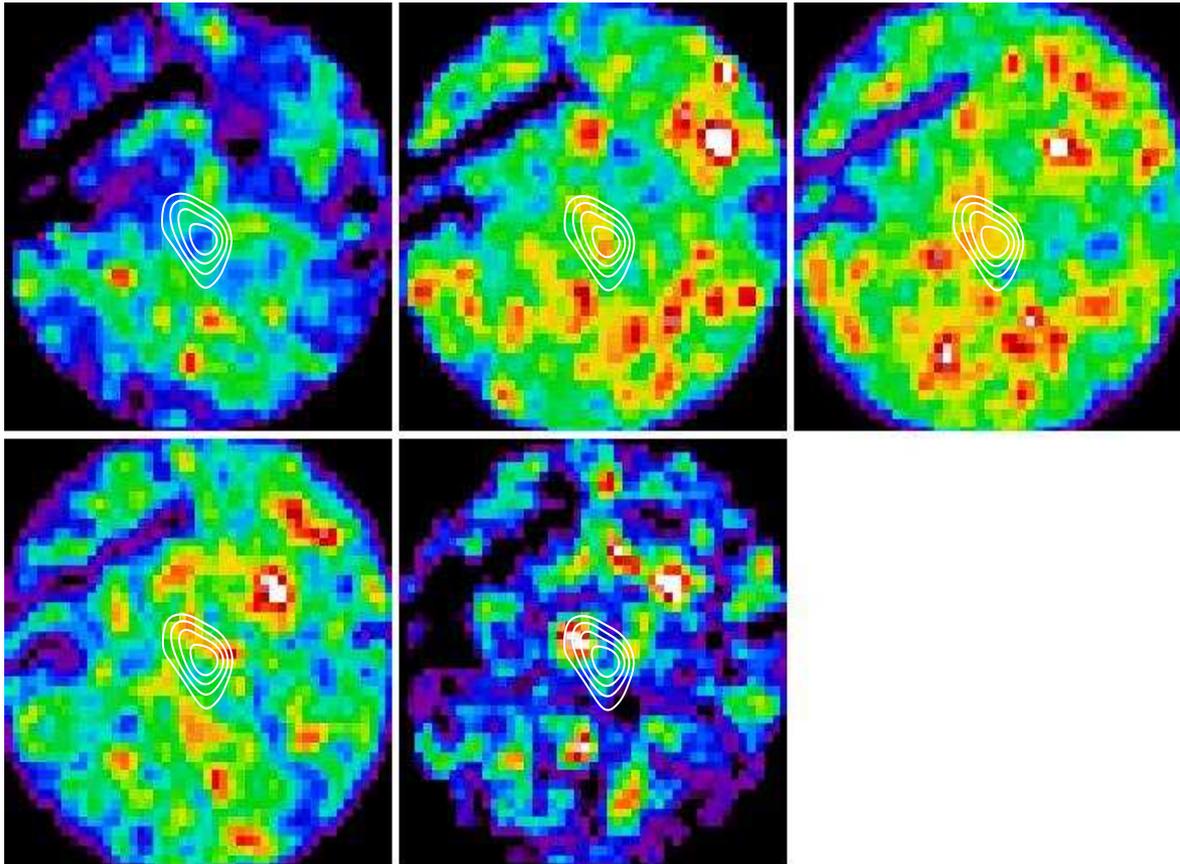


Figura 2.11: Densidad de galaxias en la región de  $R = 2.5^\circ$  centrados en la posición de CrB-H. (ver figura 2.6 para más detalles). Cada panel muestra un corte en el color  $r-i$  (desde arriba-izquierda hacia abajo-medio):  $0.3 \leq r-i \leq 0.5$ ,  $0.5 \leq r-i \leq 0.7$ ,  $0.7 \leq r-i \leq 0.9$ ,  $0.9 \leq r-i \leq 1.1$  y  $1.1 \leq r-i \leq 1.3$  respectivamente. Se señala con línea continua los contornos de CrB-H descritos en la figura 2.5

contribuyen cada vez más las galaxias de fondo.

En los tres primeros paneles de la figura 2.10 en la región subtendida por la mancha fría de VSA se encuentra un filamento que va de SE a NW y que es ligeramente más denso con respecto a las regiones más cercanas del medio. Sin embargo, el mapa correspondiente al corte de magnitud en el rango  $21 \leq r \leq 22$ , figura 2.10 (inferior derecha), muestra una clara sobredensidad con un radio de  $\sim 15$  min. de arco situado en la posición de CrB-H. La ausencia de sobredensidad para la misma región en el corte de magnitud de rango  $19 \leq r \leq 20$  podría estar indicando la presencia de un cúmulo en el CrB-SC con escasez de galaxias relativamente brillantes, o, alternativamente, que la concentración de galaxias se encuentra en las galaxias de fondo del CrB-SC. En la figura 2.11 se muestra la densidad de las galaxias hasta  $r = 22$  para distintos cortes de color  $r - i$ . En el mapa del panel abajo-centro es posible apreciar una clara sobredensidad que surge en la posición de la mancha fría CrB-H. Esto corresponde básicamente a lo que ha sido visto en la estructura de los cortes de magnitud en el rango  $21 \leq r \leq 22$  mag en la figura 2.10.

### 2.3. Teselaciones de Voronoi

Queremos determinar si el decremento que localizamos en el mapa de microondas de VSA en CrB-SC puede ser debido a la presencia de un cúmulo en la zona, no detectado en trabajos anteriores, que fuese responsable de la mayor parte de la señal SZ. Por esta razón se han utilizado las teselaciones de Voronoi como método de detección de cúmulos, o grupos de galaxias. Las teselaciones de Voronoi son una herramienta matemática de utilidad para detectar grupos de galaxias en búsquedas a través de imágenes. Se usan indistintamente en cortes en magnitud, color o incluso de desplazamiento al rojo fotométrico  $z_{photo}$ , como en este caso. La ventaja que aporta este tipo de estudios es que puede determinarse la forma de la sobredensidad de galaxias buscada. La técnica fue implementada por Ramella et al. (2001) que desarrollaron un procedimiento llamado “*Voronoi Galaxy Cluster Finder*” (VGCF) o “*Buscador de cúmulos de galaxias de Voronoi*”. Este código utiliza la posición y las magnitudes de las galaxias de un catálogo dado para encontrar sobredensidades y sus características principales: el tamaño, la riqueza y el contraste sobre el fondo. Esta técnica evalúa la densidad local e identifica los cúmulos como una significativa fluctuación de densidad por encima del fondo. El umbral de significancia tiene que ser seleccionado por el usuario ya que se trata de un parámetro libre.

Las teselaciones de Voronoi definen una red de celdas dentro del campo de medida, que contienen en su centro a una única galaxia de la selección de galaxias de entrada. Los bordes de las celdas son los puntos medios de las distancias que separan una galaxia con cada una de sus vecinas contiguas. Allí donde se concentre el mayor número de celdas en el espacio más reducido se encuentra una sobredensidad de galaxias. Así pues, el inverso del tamaño de la celda da la medida de la concentración de galaxias en la zona y es así cómo se determinan las sobredensidades del campo. Este método es aplicable a todos los objetos de un catálogo, así como a selecciones de objetos utilizando distintos criterios como puede ser color o desplazamiento al rojo de las galaxias.

En este caso se ha aplicado el método a distintos cortes en magnitud y color de las galaxias de los catálogos de CrB-SC como test de localización de las sobredensidades potenciales presentes en el supercúmulo, véanse las figuras 2.12 y 2.13.

### 2.3.1. Desplazamiento al rojo fotométrico aplicado a las teselaciones de Voronoi

Para encontrar sobredensidades en la distribución de las galaxias es preciso conocer la distancia a cada una de ellas. Un primer estimador no preciso de esta distancia es el color. Una mayor precisión la otorgan los métodos de medida del desplazamiento al rojo fotométrico. Estos métodos utilizan un modelo espectral de diferentes tipos de galaxias, empíricos o teóricos y los correlaciona hasta que ajusta la magnitud medida con el color observado y el desplazamiento al rojo al que se encuentra cada objeto.

El código fotométrico HYPERZ que se describe a continuación se aplicará al catálogo de las galaxias de CrB-SC con la finalidad de determinar en primera aproximación el desplazamiento al rojo de las galaxias seleccionadas y el tipo morfológico de las mismas.

HYPERZ fue implementado por Bolzonella et al. (2000), usa modelos sintéticos de galaxias, como son los modelos de Bruzual & Charlot (1993), extendidos al ultravioleta y al infrarrojo, y modelos empíricos de Coleman et al. (1980). Estima el desplazamiento al rojo fotométrico de los objetos de un catálogo utilizando fotometría de banda ancha/media para calcular sus espectros. La eficiencia de este método estriba en localizar e identificar las principales formas del espectro esperado para una galaxia, detectando sus principales propiedades espectrales como pueden ser el salto de Lyman a 912 Å y el salto de Balmer a 4000 Å. La precisión del código crece con la cantidad de filtros en los que esté medida la muestra.

Existen otros códigos fotométricos, como, por ejemplo, el desarrollado por Fernández-Soto et al. (1999). Este utiliza seis modelos espectrales para las galaxias, E, S0, Sbc, Scd y dos tipos de galaxias *Starburst*. Son modelos empíricos de Coleman et al. (1980) que se extrapolan al infrarrojo con los modelos de Bruzual & Charlot (1993) y al ultravioleta con los modelos espectrales de Kynney et al. (1993).

En la práctica se obtienen resultados similares si se aplica un código u otro, siempre y cuando se escojan las mismas muestras de tipos espectrales (SED) y criterios de búsqueda muy parecidos para los ficheros de entrada de los programas.

Los resultados obtenidos al aplicar las técnicas de las teselaciones de Voronoi en combinación con los desplazamiento al rojo fotométricos así determinados, indican claramente la existencia, en todos los cortes de magnitud, de una sobredensidad en la zona en la que está situado el decremento CrB-H. Es obvio que esta zona del supercúmulo posee un número de cúmulos Abell mayor que otras zonas del mismo pero la herramienta de las Teselaciones de Voronoi es capaz de recuperar todos y cada uno de los cúmulos tanto cuando se trabaja con los catálogos seleccionados por magnitud, por color o por desplazamiento al rojo. Sin embargo, en la posición calculada para CrB-H no se observa sobredensidad, esto puede ser debido a que las zonas circundantes tienen una sobredensidad mucho más alta y en promedio CrB-H no resalta sobre la región que lo circunda. En las figuras 2.12 y 2.13 se ve claramente que la zona del CrB-H es una zona muy importante en sobredensidad para el Supercúmulo, y se observa en todos los paneles. Aunque en la posición exacta para las coordenadas calculadas para CrB-H no se revele sobredensidad, esta zona está localizada y dividida por las teselaciones de Voronoi en dos grupos de galaxias, el primero con RA=230.2146° y DEC=29.13337°, subtiende un área de  $1.06 \times 10^{-2}$  grado<sup>2</sup>, es decir, 38.16 min<sup>2</sup> y densidad de  $1.77 \times 10^3$  gal/grado<sup>2</sup>, calculada con un nivel de confianza del 97.81%. El segundo grupo está situado a RA=231.0615° y DEC=29.8044° de área  $1.17 \times 10^{-3}$  grado<sup>2</sup>,

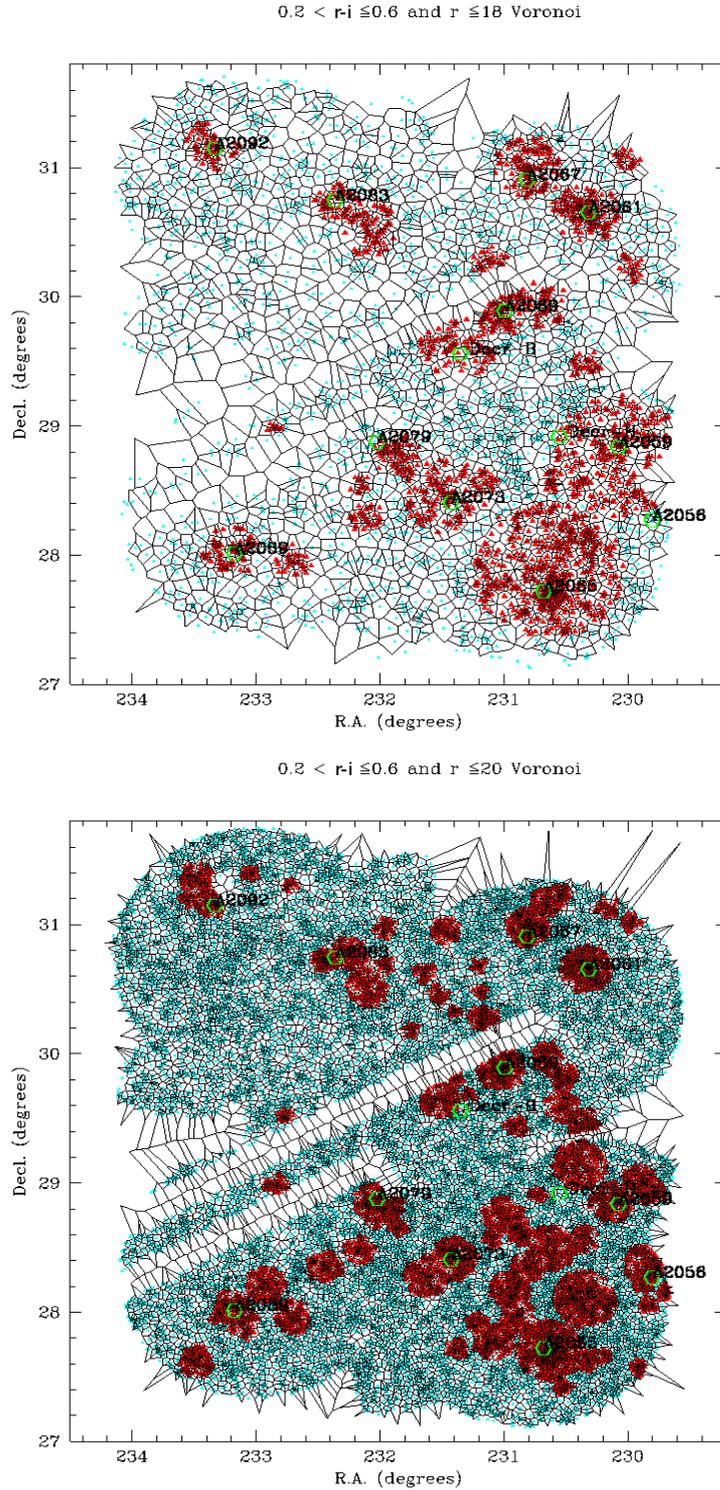


Figura 2.12: *Método de las teselaciones de Voronoi.*- Los puntos de los diagramas de Voronoi representan a cada una de las galaxias presentes en CrB-SC con el criterio de selección que muestra la etiqueta superior de cada figura. Los puntos azules representan las galaxias que no han sido asociadas a sobredensidad, los puntos rojos representan a las galaxias que han sido seleccionadas como pertenecientes a una sobredensidad. En el panel superior se muestran las teselaciones de Voronoi aplicadas sobre una selección de galaxias del CrB-SC hasta  $r \sim 18$  mag, y en el panel inferior se presenta la distribución de galaxias de CrB-SC utilizando las teselaciones de Voronoi hasta  $r \sim 20$  mag. Las etiquetas Decr-B y Decr-H se refieren respectivamente a CrB-B y a CrB-H.

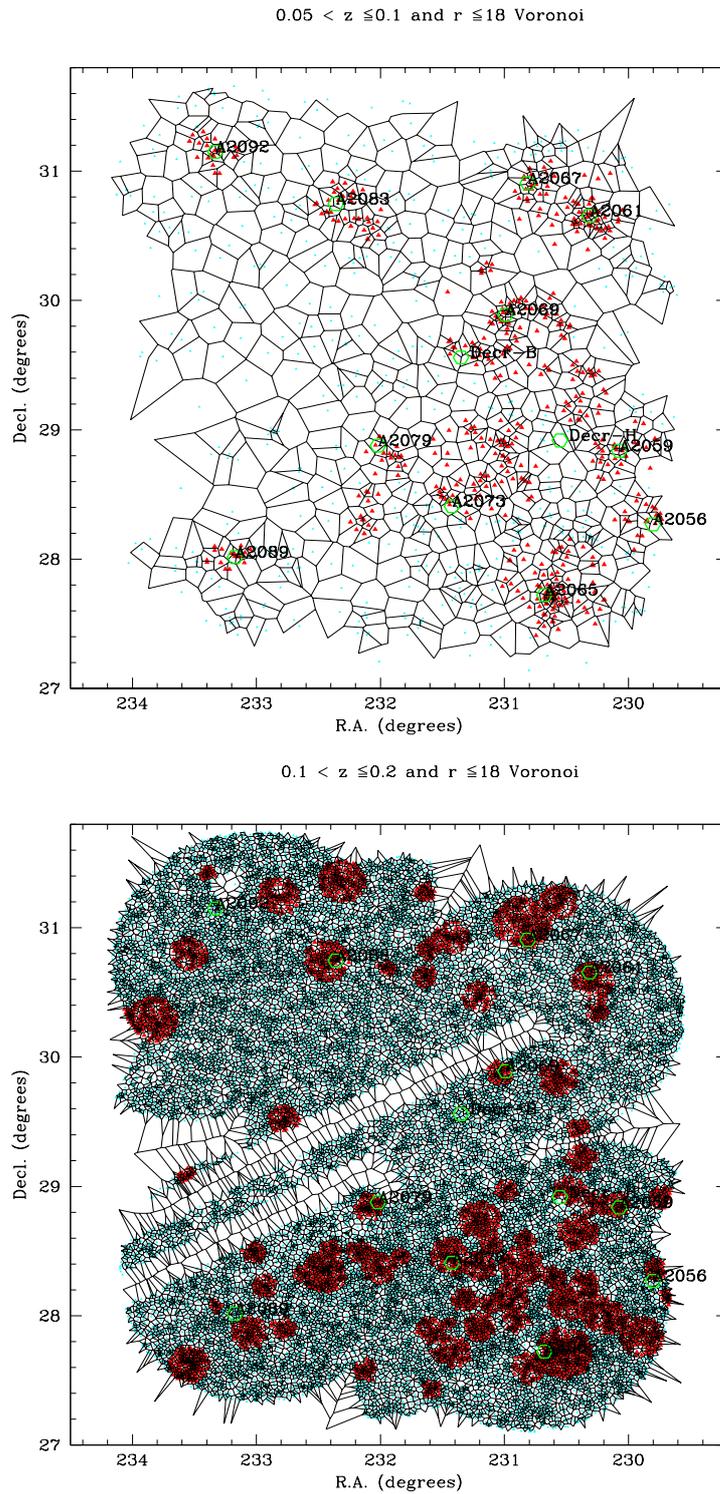


Figura 2.13: El panel superior muestra el método de las teselaciones de Voronoi aplicado sobre la selección de galaxias del CrB-SC hasta  $0.05 \leq z \leq 0.1$ . El panel inferior presenta el método de la teselaciones de Voronoi aplicado sobre la selección de galaxias del CrB-SC hasta  $0.1 \leq z \leq 0.2$ , como indicador de sobredensidades en el campo de CrB-SC. Las etiquetas Decr-B y Decr-H se refieren respectivamente a CrB-B y a CrB-H.

4.21 min<sup>2</sup>, con densidad  $2.42 \times 10^3$  gal/grado<sup>2</sup> y un nivel de confianza del 97.99 %. En la figura 2.13 abajo es significativo que resalte un grupo de galaxias en la posición de CrB-H en el tramo de desplazamientos al rojo de  $0.1 \leq z \leq 0.2$  formado por las galaxias más brillantes del supercúmulo. Sin embargo, en el tramo  $0.05 \leq z \leq 0.1$  para las galaxias  $r \leq 18$  no vemos reflejada en la figura la existencia de sobredensidad. Esto apunta a la posible existencia de un grupo de galaxias en el tramo de  $z$  relacionado con el cúmulo Abell 2069, y por tanto a desplazamiento al rojo mayor que el de CrB-SC.

## 2.4. Discusión

En este capítulo se ha presentado un estudio de la distribución espacial de las galaxias en el CrB-SC. Hemos utilizado los datos de SDSS para analizar la densidad y las propiedades fotométricas de las galaxias del decremento CrB-H y se han comparado con las propiedades fotométricas que presentan las galaxias de los cúmulos de Abell de la región del supercúmulo y con las galaxias que pueblan regiones intercumulares.

La mancha fría del FCM, CrB-H se sitúa al Norte, a 40 minutos de arco del centro del CrB-SC y en una región de 1° delimitada por los cúmulos Abell 2056, 2065, 2059 y 2073. La densidad de las galaxias en CrB-H es un factor  $\sim 2$  superior a la de las regiones intercumulares. Existe un exceso de  $\sim 8 \times 10^3$  galaxias hasta  $r = 22$  mag con respecto a los valores típicos de los campos de control.

CrB-H presenta una sobredensidad de galaxias en comparación con valores medios en áreas seleccionadas al azar en todo el cielo. Usando las galaxias hasta  $r = 19$  mag en  $\sim 1000$  regiones del cielo, se encuentra que la densidad dentro de CrB-H es de 1.6 a 3.0 veces mayor que el valor medio de los campos de control. Sólo en un  $\sim 1 - 3$  % de las regiones de control del cielo la densidad de las galaxias es mayor que en CrB-H. No se encuentran cúmulos Abell en la zona subtendida por el decremento CrB-H ( $\sim 540$  min.de arco<sup>2</sup> a un nivel de  $\leq 3\sigma$ ). El cúmulo de Abell más cercano a CrB-H es Abell 2059 a  $z = 0.1305$ , proyectándose a 26.2 min. de arco de CrB-H. El cúmulo más cercano miembro de CrB-SC es Abell 2056 se extiende 58.9 min. de arco<sup>2</sup>. La contribución de cualquier cúmulo de Abell a la población de las galaxias de CrB-H es pequeña.

El exceso de galaxias a ( $21 \leq r \leq 22$ ), y en el rojo ( $1.1 \leq r - i \leq 1.3$ ) en CrB-H, en comparación con los valores típicos en CrB-SC y en regiones intercumulares muestra una dependencia radial y se extiende hasta  $\sim 15$  min. de arco. Este exceso podría ser debido a varias causas. La primera estaría relacionada con la existencia de un cúmulo de galaxias no detectado en el propio CrB-H. La distribución de luminosidad muestra una falta de galaxias brillantes, lo que explicaría por qué ha pasado inadvertido en los catálogos ópticos construidos a partir de SDSS. Además sería lo suficientemente masivo como para provocar el decremento observado en el mapa de VSA. La segunda de las causas podría deberse a la existencia de un cúmulo lejano no detectado, con alto desplazamiento al rojo, del que se detectaría la parte más brillante de su función de luminosidad. La tercera causa podría estar relacionada con la contribución de las partes externas de varios cúmulos de la zona. Y por último se baraja la hipótesis de que el decremento del FCM detectado por VSA en CrB-SC sea una contribución de varios de estos efectos a lo largo de la línea de visión, caso más plausible según el estudio desarrollado. La confirmación y delimitación de estas estructuras requieren de imágenes de mayor profundidad y de estudios espectroscópicos.

De las teselaciones de Voronoi se desprende la idea de que la zona de CrB-H, y de forma directa, la parte SW de CrB-SC presenta una población de galaxias más importante que otras zonas intercumulares del supercúmulo. Se recuperan muy bien los cúmulos Abell de CrB-SC y se hace patente la importancia que tienen las regiones cercanas a CrB-H por la densidad de galaxias que muestran estos mapas cuando la selección se hace por colores, por magnitudes o por desplazamientos al rojo fotométricos.

# 3

---

## Análisis espectroscópico de las galaxias en la zona de la mancha utilizando SDSS

Este capítulo está dedicado al estudio espectroscópico de las galaxias en la región de la mancha fría del FCM detectada por el VSA, usando para ello el catálogo espectroscópico SDSS-DR7. Pretendemos dar una visión tridimensional, y por tanto más completa, de lo que pudo aportar el estudio de la distribución de galaxias con el catálogo fotométrico en el capítulo anterior. Para ello, determinaremos la distribución de las galaxias en la mancha y fuera de ella en relación al desplazamiento al rojo. Se trata del análisis de mayor profundidad con respecto a la magnitud realizado hasta la fecha en esta región.

### 3.1. Construcción del catálogo espectroscópico.

La medida del desplazamiento al rojo de las galaxias y cúmulos galácticos, da una idea de la distancia a la que se encuentran estos objetos de nosotros y entre sí. Utilizando este observable es posible conocer la existencia de agrupaciones y cúmulos de galaxias. El desplazamiento al rojo  $z$  para cualquier objeto del Universo se define como

$$1 + z = \frac{\lambda_{observada}}{\lambda_{reposo}} \quad (3.1)$$

#### 3.1.1. El catálogo SDSS-DR7

El SDSS-DR7 ha publicado la espectroscopia de objetos distribuidos en más de 9380 grados cuadrados. Hay más de 1.6 millones de espectros en total, incluidos 930.000 galaxias, 120000 quasares y 460000 estrellas (ver Abazajian et al. 2009). El catálogo completo para las galaxias de CrB-SC que poseen medidas espectroscópicas fue construido a partir del catálogo general de galaxias del SDSS en los diferentes “Data Release” desde DR4 hasta el DR7. Se descargaron los ficheros “*gals-DR4.fit*”<sup>1</sup>, “*gals-DR5.fit*”<sup>2</sup>, “*gals-DR6.fit*”<sup>3</sup> y “*gals-*

---

<sup>1</sup><http://www.sdss.org/dr4/products/spectra/getspectra.html>

<sup>2</sup><http://www.sdss.org/dr5/products/spectra/getspectra.html>

<sup>3</sup><http://www.sdss.org/dr6/products/spectra/getspectra.html>

*DR7.fit*<sup>4</sup>, los datos de estos ficheros no necesariamente se incluyen unos dentro de otros a medida que se aumenta el número del “Data Release”. Estos ficheros son cubos de datos que contienen un total de 209 columnas con distintos parámetros. Los objetos del catálogo Sloan disponen de un identificador único, pero como comprobación se realizó una correlación de los distintos catálogos desde DR4 hasta DR7 para evitar el posible solapamiento de galaxias entre las diferentes capas de datos. De estos sólo interesaron aquellos parámetros relacionados con las posiciones y el desplazamiento al rojo de las galaxias medidas en la región  $225.0^\circ \leq RA \leq 237.5^\circ$  y  $25.0^\circ \leq Dec \leq 33.5^\circ$ .

El catálogo espectroscópico definitivo de las galaxias en la región de CrB-SC contó con un total de 11842 galaxias, de las cuales hay una muestra en los distintos apéndices G, H, I y J de esta tesis. Está compuesto por las siguientes columnas: *id* que da cuenta del número de identificación de la galaxia en el SDSS, *RA* y *Dec* que son los valores de ascensión recta y declinación (J2000), *u*, *g*, *r*, *i*, *z<sub>f</sub>*, valores correspondientes a la fotometría de cada uno de los objetos en los filtros de Sloan, *z* desplazamiento al rojo y *z<sub>err</sub>* valor del error en la asignación de la medida del desplazamiento al rojo, para cada uno de los objetos catalogados como galaxias por el SDSS.

### 3.2. Distribución de desplazamientos al rojo del CrB-SC en el SDSS

La figura 3.1 representa la distribución de desplazamientos al rojo para las galaxias que pueblan la región del CrB-SC utilizando el catálogo SDSS-DR7. Como puede observarse en la figura, hay dos picos muy significativos dentro de la distribución. El primer pico se encuentra a  $z \approx 0.07$  y corresponde al desplazamiento al rojo de CrB-SC. Existe un segundo pico significativo en la distribución de desplazamientos al rojo que se encuentra  $z \approx 0.11$ . El cúmulo de galaxias Abell 2069 es responsable, en gran parte, de este segundo pico. Algunos autores como Postman et al. (1998) han sugerido la existencia de un segundo supercúmulo en la línea de visión del cielo de CrB-SC al que han designado como Supercúmulo de Abell 2069 (Abell 2069-SC).

La figura 3.2 muestra la distribución espacial de las galaxias en un área de  $5^\circ \times 5^\circ$  de cielo cubierta por el supercúmulo CrB-SC. Esta figura está subdividida en diferentes paneles, el desplazamiento al rojo varía en pasos de  $\Delta z = 0.02$  hasta un desplazamiento al rojo máximo de  $z = 0.18$ . El círculo que se dibuja en cada uno de los paneles representa el área que subtiende el decremento de temperaturas del FCM CrB-H, en el cielo, de radio  $20'$  de arco y centrado en las coordenadas calculadas para CrB-H en Génova-Santos et al. (2008). En el panel que corresponde al desplazamiento al rojo  $0.06 \leq z \leq 0.08$  se observan diferentes agrupaciones de galaxias que corresponden a los cúmulos de CrB-SC, Abell 2065, Abell 2073, Abell 2061 y Abell 2067. En el panel correspondiente al desplazamiento al rojo de  $0.10 \leq z \leq 0.12$  aparece el cúmulo Abell 2069. En este intervalo también se observa una importante contribución de otros cúmulos Abell. Estas otras estructuras también contribuyen significativamente al segundo pico centrado en  $z \approx 0.11$  de la figura 3.1.

En la posición de CrB-H, existe una clara sobredensidad de galaxias en varios de estos paneles, concretamente en los correspondientes a los cortes  $0.06 \leq z \leq 0.08$  y  $0.10 \leq z \leq 0.12$ . Sin embargo, esta sobredensidad no se detecta en el panel intermedio de  $0.08 \leq z$

<sup>4</sup><http://www.sdss.org/dr7/products/spectra/getspectra.html>

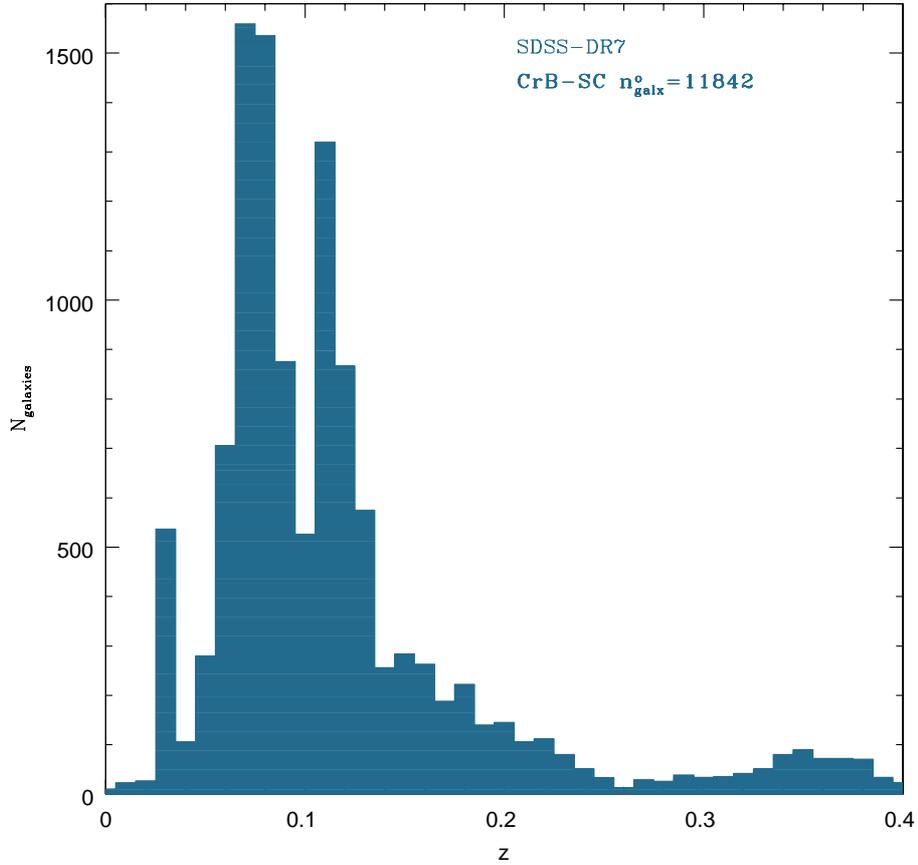


Figura 3.1: Histograma de la distribución de desplazamientos al rojo de las galaxias del SDSS-DR7 en la región de CrB-SC ( $225.3^\circ < RA < 237.3^\circ$  y  $25.3^\circ < Dec < 33.2^\circ$ ).

$\leq 0.10$ . La figura 3.2 no muestra evidencia de la existencia de una estructura filamentosa que se extienda conectando las galaxias que se encuentran a desplazamiento al rojo de  $z=0.07$  hasta  $z=0.11$  a lo largo de la línea de visión para la posición de CrB-H. La existencia de esta estructura filamentosa se considera una de las hipótesis plausibles para definir la naturaleza de la mancha fría del FCM de CrB-SC.

### 3.2.1. Población de Galaxias en CrB-H

Para evaluar la importancia de la sobredensidad en la posición de CrB-H, se dividió el campo subtendido por el supercúmulo ( $225.3^\circ < RA < 237.3^\circ$  y  $25.3^\circ < Dec < 33.2^\circ$ ) y de profundidad desde  $0.05 < z < 0.12$ , en celdas de tamaño  $\Delta_{RA} \times \Delta_{DEC} = 30' \times 30'$  y  $\Delta z = 0.01$ , resultando un total de 2702 celdas. Se ha elegido este tamaño de celda y profundidad porque representa el tamaño medio de un cúmulo a los desplazamientos al rojo presentes en la zona y muestrea el desplazamiento al rojo y la velocidad peculiar de cada galaxia

dentro de su cúmulo e incluye el error en la medida de los mismos. La tabla 3.1 muestra las primeras cuarenta celdas que contienen al mayor número de galaxias del catálogo SDSS-DR7 entre  $z = 0.05$  y  $z = 0.12$  y el número de galaxias en cada una de las siete divisiones en  $z$  correspondientes a cada celda. Los números que aparecen etiquetados con una 'c' indican que las galaxias contenidas en esta celda pueden estar asociadas a algún cúmulo Abell. Puede darse el caso de que un cúmulo esté contenido en dos o más celdas. La penúltima columna muestra la etiqueta del cúmulo Abell a la que pertenece cada una de las celdas anteriores. La última columna indica la existencia de un cúmulo Abell a una distancia menor de  $40'$  a las coordenadas de las celdas que podría, por tanto, contribuir a la sobredensidad.

La mayoría de las celdas con mayor contribución en el número de galaxias se encuentran alrededor de los desplazamientos al rojo  $z=0.075$  y  $z=0.115$ . Todas las celdas con mayor densidad de galaxias están asociados a cúmulos. Por ejemplo, la celda con el mayor número de galaxias en el rango  $0.05 < z < 0.12$ , de coordenadas centrales  $RA = 231.06^\circ$  y  $Dec = 30.01^\circ$ , tiene 73 galaxias, centrada en  $z = 0.115$  y pertenece al grupo de galaxias de Abell 2069.

La mancha fría del FCM, CrB-H, es la decimosexta contribución más importante en número de galaxias en el rango considerado de  $z$  dentro de CrB-SC y coincide con la celda que presenta una mayor densidad en varios rangos de desplazamiento al rojo fuera de las celdas que están relacionadas de algún modo con los cúmulos de Abell de la zona. Esta región presenta 18 galaxias en las celdas centradas en  $z=0.075$  y  $z=0.115$ . En estas posiciones Gal et al. (2003) y Koester et al. (2007) encontraron una sobredensidad de galaxias utilizando datos tomados en el *Second Palomar Observatory Sky Survey* y usando datos del SDSS, respectivamente. Ellos sugieren la presencia de dos candidatos a cúmulos de galaxias para los que han aplicado técnicas de desplazamiento al rojo fotométrico. Dicha densidad, de 18 de las galaxias por celda, es alta. De hecho, en la tabla 3.1 sólo es posible encontrar seis celdas con más de 18 galaxias fuera de un cúmulo Abell, pero sólo presentan alta densidad en un único tramo de desplazamiento al rojo.

De la tabla 3.1 se obtiene información adicional, nos ofrece una serie de candidatos a cúmulos de galaxia localizados a diferentes desplazamientos al rojo y no asociados, por distancia entre ellos, a la mancha de VSA. En el rango de desplazamientos al rojo de  $0.06 \leq z \leq 0.08$  se localizan dos posibles candidatos descritos en las celdas #27 y #29, ambas adyacentes, con un total de 22 y 28 galaxias, hacen un total de 50 galaxias en la misma región del cielo y da pie a pensar en la existencia de un hipotético cúmulo de galaxias aún por parametrizar. En el tramo de desplazamiento al rojo  $0.08 \leq z \leq 0.10$  se encuentran tres nuevos candidatos, ajenos a CrB-H, adscritos a las celdas número #10, #19 y #28, no son adyacentes entre sí ni a CrB-H, contienen un total de 33, 34 y 19 galaxias respectivamente. Por último, y en el rango comprendido entre  $0.10 \leq z \leq 0.12$  encontramos la celda #23 con un total de 22 galaxias que podría ser la semilla de un nuevo cúmulo de galaxias asociado a Abell 2069-SC. Este último candidato, desglosado en el apéndice J: se ha denominado zona intercumular  $RA=228.56^\circ$  y  $DEC=28.01^\circ$  muestra una característica única con respecto a los demás, que lo asemeja a CrB-H. Contiene galaxias en varios tramos de desplazamiento al rojo, no descartando la posibilidad de la presencia de un filamento en la línea de visión en esta posición. Ninguno de estos candidatos está relacionado directamente con la mancha del FCM de VSA, quedan fuera del estudio propuesto en esta tesis, pero no se descartan para continuar caracterizando la región subtendida en CrB-SC en trabajos futuros. La localización de cada una de estas regiones candidatas a contener un cúmulo de

Tabla 3.1: Se muestran las cuarenta regiones de mayor densidad de galaxias en el intervalo de desplazamientos al rojo de  $0.05 < z < 0.12$  en el área subtendida por CrB-SC. Cada una de las regiones está delimitada por una celda de tamaño  $30 \times 30$  min. de arco<sup>2</sup> y una profundidad de  $\Delta z = 0.01$ . Las coordenadas ecuatoriales de cada celda se muestran en las columnas segunda y tercera. Las columnas situadas desde la cuarta a la décima posición indican el número de galaxias contenidas en cada celda en los desplazamientos al rojo desde  $z = 0.055$  a  $z = 0.115$ . Los números que presentan el superíndice 'c' indican las galaxias que están en regiones que coinciden con cúmulos Abell. La siguiente columna indica los cúmulos Abell que tienen sus coordenadas en las celdas etiquetadas con 'c'. En la última, se muestran los cúmulos Abell que están a una distancia menor de 40' de arco a las coordenadas del centro de las celdas que se muestran, y la separación de las mismas entre paréntesis. Las dos últimas filas de la tabla indican la densidad media de galaxias por celda en cada intervalo de desplazamiento al rojo considerando todas las galaxias y la densidad media de las mismas eliminando la contribución de las celdas asociadas a los cúmulos.

Columnas: (1)  $0.05 \leq z \leq 0.06$ ; (2)  $0.06 \leq z \leq 0.07$ ; (3)  $0.07 \leq z \leq 0.08$ ; (4)  $0.08 \leq z \leq 0.09$ ; (5)  $0.09 \leq z \leq 0.10$ ; (6)  $0.10 \leq z \leq 0.11$ ; (7)  $0.11 \leq z \leq 0.12$ .

n	RA	Dec.	N <sub>gal</sub> en intervalo $\Delta z = 0.01$							
			(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	
1	231.06	30.01	0	3	7	3	0	13	73 <sup>c</sup>	A2069
2	230.56	27.51	0	23 <sup>c</sup>	55 <sup>c</sup>	2	0	1	6	A2065
3	230.56	28.01	0	14 <sup>c</sup>	39 <sup>c</sup>	3	0	5	10	A2065 (18')
4	230.06	30.51	0	5	43 <sup>c</sup>	14	0	0	6	A2061 (16')
5	232.06	29.01	0	47 <sup>c</sup>	1	10	1	0	3	A2079
6	230.56	31.01	0	0	31 <sup>c</sup>	7	1	2	17 <sup>c</sup>	A2061 (23'), A2067 (14')
7	230.56	30.51	0	0	42 <sup>c</sup>	10	2	0	4 <sup>c</sup>	A2061
8	231.56	29.51	7	4	3	16	0	8	20 <sup>c</sup>	A2069 (38')
9	226.06	28.51	37 <sup>c</sup>	13	1	2	0	1	1	A2022
10	232.56	29.01	1	13 <sup>c</sup>	1	33	1	0	5	A2079 (29')
11	231.56	30.01	2	5	1	13	0	4	25 <sup>c</sup>	A2069 (30')
12	230.56	32.01	0	1	2	0	5	8	33 <sup>c</sup>	A2062
13	233.56	31.51	1	21 <sup>c</sup>	2	6	1	12	6	A2092 (23')
14	233.06	28.01	0	6	41 <sup>c</sup>	1	0	0	1	A2089
15	233.56	31.01	4	32 <sup>c</sup>	0	1	7	2	2	A2092
16	230.56	29.01	4	1	18	5	0	1	18	CrB-H
17	231.06	31.01	0	2	31 <sup>c</sup>	2	0	1	10 <sup>c</sup>	A2067
18	232.06	30.51	2	10	7	12	7	5	3 <sup>c</sup>	A2083 (22')
19	229.56	27.01	5	1	3	34	2	0	1	
20	230.56	28.51	0	1	12	21	2	1	7	
21	232.06	29.51	4	14 <sup>c</sup>	0	9	1	0	15	A2079 (37')
22	231.56	28.51	0	33 <sup>c</sup>	4	0	3	1	2	A2079 (33')
23	228.56	28.01	2	1	6	6	6	0	22	
24	230.06	28.01	0	4	16 <sup>c</sup>	10 <sup>c</sup>	0	5	6	A2065 (37'), A2056 (21')
25	230.56	29.51	1	0	14	2	0	3	20 <sup>c</sup>	A2069 (32')
26	231.56	29.01	0	17 <sup>c</sup>	7 <sup>c</sup>	14	1	0	1	A2079 (25')
27	236.56	28.01	1	4	22	10	0	0	1	
28	230.06	33.01	0	4	8	19	0	0	6	
29	237.06	28.01	0	0	28	3	3	1	2	
30	231.06	27.51	0	21 <sup>c</sup>	13 <sup>c</sup>	0	0	1	2	A2065 (24')
31	230.56	31.51	0	2	7 <sup>c</sup>	0	0	9	18 <sup>c</sup>	A2067 (37'), A2062 (38')
32	230.56	30.01	0	2	12	0	0	2	20 <sup>c</sup>	A2069 (23')
33	231.06	28.51	1	5	8	15	4	1	2	
34	227.06	27.01	10	1	11	9	0	1	4	
35	230.06	31.01	0	3	19 <sup>c</sup>	0	2	1	10 <sup>c</sup>	A2061 (33'), A2067 (39')
36	232.06	28.51	0	23 <sup>c</sup>	10 <sup>c</sup>	1	1	0	0	A2079 (22')
37	234.56	31.01	9	4	0	3	16 <sup>c</sup>	1	1	A2110 (26')
38	231.06	29.01	1	1	15	13	0	0	4	
39	230.06	28.51	0	0	10	7 <sup>c</sup>	0	7	10	A2056 (20')
40	229.56	28.51	0	0	15	2 <sup>c</sup>	0	2	15	A2056
Media			1.37	2.49	3.72	3.01	1.57	1.55	3.28	
Media sin cúmulos			1.07	1.27	1.70	1.74	1.07	0.85	1.35	

galaxias no detectado se muestra detalladamente en la figura 3.3. Todo lo anterior se pone de manifiesto en la figura 3.4. La figura muestra la distribución del número de galaxias en cada celda. En los dos intervalos de desplazamiento al rojo de  $0.07 < z < 0.08$  y  $0.11 < z < 0.12$  sólo el 2.9 % y el 2.1 % de las celdas cuentan con más de 18 galaxias, respectivamente. Para  $0.07 < z < 0.08$ , la mayoría de las celdas que presentan un número de galaxias mayor que  $N_{gal} = 20$  están asociadas a cúmulos de galaxias de Abell, como son: Abell 2065, Abell 2061 y Abell 2067, mientras que para las celdas localizadas a  $0.11 < z < 0.12$  estos picos en el histograma están asociados a Abell 2069 y Abell 2062. Por tanto, CrB-H está localizado en celdas con un número alto de galaxias que no están asociadas a ninguno de los cúmulos conocidos.

### 3.2.2. Comparación en zonas cumulares

Para una comparación posterior de lo que ocurre físicamente dentro de la región de la mancha fría de FCM, CrB-H, se hace necesario conocer la distribución de las galaxias en los cúmulos galácticos a bajo y a alto desplazamiento al rojo. Por bajo desplazamiento al rojo entenderemos el rango  $0.06 < z < 0.10$  que contendría a todos los cúmulos Abell pertenecientes al CrB-SC. Por alto desplazamiento al rojo entenderemos el rango  $0.10 \leq z < 0.12$  que presentan el resto de cúmulos Abell asociados a Abell 2069-SC.

La figura 3.5 representa la distribución de las galaxias con respecto al desplazamiento al rojo que pueblan un radio de  $20'$  de arco alrededor del cúmulo Abell 2065. En esta figura puede verse un pico centrado en  $z = 0.0722 \pm 0.0043$  al que contribuyen un total de 139 galaxias. Este pico es único, estrecho y abarca un rango de desplazamiento al rojo comprendido entre  $z_{min} \approx 0.052$  y  $z_{max} \approx 0.092$ . En la figura se ve claramente que la distribución de galaxias de este cúmulo puede ser descrita por un perfil gaussiano representado por la línea discontinua.

La distribución radial de las galaxias que pueblan Abell 2065 se ha representado en la figura 3.6. Podemos observar que la densidad de galaxias tiene el máximo a  $r \leq 5'$  y decrece progresivamente a partir de este valor.

Se ha realizado el mismo estudio para el cúmulo Abell 2069, que se encuentra asociado a la superestructura a  $z \approx 0.11$ . La figura 3.7 representa la distribución de las galaxias que pueblan los primeros  $20'$  de arco de radio con respecto al desplazamiento al rojo en la región del cúmulo Abell 2069. En este tramo de valores el pico de distribución está localizado a  $z = 0.1124 \pm 0.0039$ , y en él se agrupan un total de 114 galaxias. De igual manera que para Abell 2065, el pico de la distribución es único y estrecho, abarca un rango de desplazamientos al rojo comprendidos entre  $z_{min} \approx 0.095$  y  $z_{max} \approx 0.125$  mostrando un perfil gaussiano que está representado en la figura por la línea discontinua.

La figura 3.8 representa la distribución radial de las galaxias de Abell 2069. En esta se puede observar que la densidad de galaxias tiene su máximo dentro de  $r = 5'$  de arco y decrece lentamente hacia las afueras del cúmulo, mostrando un comportamiento suave y monótono.

### 3.2.3. Comparación con zonas intercumulares

En los apéndices G, H, I y J están representadas algunas de las zonas intercumulares de CrB-SC con un número de galaxias similar a CrB-H. Estas zonas corresponden a las filas

Tabla 3.2: Medias y desviaciones estándar del desplazamiento al rojo y dispersión de velocidades para las galaxias a menos de 20' desde el centro de Abell 2065 y Abell 2069. También se muestran las masas y la temperatura electrónica estimada siguiendo las ecuaciones 3.4 y 3.5, respectivamente.

	$z_{\min} - z_{\max}$	$N_{\text{gal}}$	$\bar{z}$	$\sigma_z$	$\sigma_v$ (km s <sup>-1</sup> )	$M_{200}$ (10 <sup>15</sup> M <sub>⊙</sub> )	$k_B T_e$ (keV)
CrB-H- <i>lz</i>	0.06-0.10	33	0.0770	0.0054	1631	7.21	16.0
CrB-H- <i>hz</i>	0.10-0.12	30	0.1124	0.0022	667	0.48	2.7
Abell 2065	0.052-0.092	139	0.0722	0.0043	1286	3.53	9.9
Abell 2069	0.095-0.125	114	0.1140	0.0039	1182	2.69	8.4

18, 23, 32 y 38 de la tabla 3.1. Especialmente interesante es el caso de la fila 38, ya que presenta una población de galaxias importante en los mismos rangos de desplazamiento al rojo que CrB-H, es decir, entre  $0.06 < z < 0.10$  y  $0.10 \leq z < 0.12$ . Estas zonas intercumulares no están asociadas a ningún cúmulo cercano. Salvo esta celda no existe ninguna región intercumular en la que se encuentre un número similar de galaxias en ambos tramos de  $z$  a la vez. Es posible encontrar alternativamente casos en los que hay una presencia significativa de galaxias bien en  $0.06 < z < 0.10$  ó en  $0.10 \leq z < 0.12$ , pero no en ambas, y nunca tan numerosa salvo que la región intercumular sea adyacente a un cúmulo Abell. Sin embargo, la celda de la fila 38, de coordenadas  $RA = 228.56^\circ$   $Dec = +28.01^\circ$  se encuentra lejos de CrB-H y no es plausible plantear una posible asociación entre ambas regiones del supercúmulo.

Cada uno de los apéndices, G, H, I y J, cuenta con una tabla resumen de las coordenadas y distancias al centro de cada una de las galaxias en su celda correspondiente. Se proporciona también el valor del desplazamiento al rojo de cada una de las galaxias presentes dentro de los primeros 20' de arco de cada una de las celdas. También se facilita información sobre la morfología de la galaxia y el espectro asociado.

### 3.3. Distribución de las galaxias en CrB-H

La distribución de los desplazamientos al rojo de las galaxias situadas a distancias menores de 20' de arco del decremento CrB-H se muestra en la figura 3.9. Hay dos claros picos en esta distribución, a  $z \approx 0.07$  y  $z \approx 0.11$ , a los que nombraremos desde este momento como CrB-H-*lz* y CrB-H-*hz*, respectivamente.

El desplazamiento al rojo medio y las desviaciones estándar de todas las galaxias asociadas a los dos picos del histograma de CrB-H se muestran en la tabla 3.2. A partir de las dispersiones del desplazamiento al rojo de las galaxias se ha realizado el cálculo de la dispersión de velocidades. Se ha utilizado la siguiente expresión:  $\sigma_v = c\sqrt{\sigma_z^2 - z_{\text{error}}^2}$ , donde  $z_{\text{error}} \approx 0.0002$  es el error típico en las medidas de desplazamiento al rojo,  $\sigma_z$  es la dispersión de desplazamientos al rojo de las galaxias y  $\sigma_v$  es la dispersión de velocidades.

Siguiendo el método explicado en Díaz-Sánchez et al. (2007), si se supone que las estructuras están virializadas y en equilibrio termodinámico, las masas de cada uno de los grupos pueden ser calculadas de la siguiente forma:

$$M_{200} = 3\sigma_v^2 \frac{T_{200}}{G} \quad (3.2)$$

donde  $r_{200}$  es el radio dentro del cual la densidad es doscientas veces superior a la densidad crítica, dada por Finn et al. (2005):

$$r_{200} = 2.47 \frac{\sigma_v}{1000 \text{ km s}^{-1}} \frac{1}{\sqrt{\Omega_m(1+z)^3 + \Omega_\Lambda}} \text{ Mpc} . \quad (3.3)$$

Por lo tanto, la masa puede ser expresada como:

$$M_{200} = 1.71 \times 10^{15} \left( \frac{\sigma_v}{1000 \text{ km s}^{-1}} \right)^3 \frac{1}{\sqrt{\Omega_m(1+z)^3 + \Omega_\Lambda}} M_\odot , \quad (3.4)$$

Además, si el gas intercumular comparte la misma dinámica de los cúmulos de galaxias, su temperatura típica se puede estimar (Rosati et al. 2002):

$$k_B T_e \simeq \mu m_p \sigma_v^2 \simeq 6 \frac{\sigma_v^2}{10^6 (\text{km s}^{-1})^2} \text{ keV} . \quad (3.5)$$

Los resultados obtenidos al aplicar este método para las estructuras localizadas en la región de CrB-H a bajo y a alto desplazamiento al rojo, y para los cúmulos de galaxias Abell 2065 y Abell 2069 se muestran explícitamente en la tabla 3.2. Los valores calculados para Abell 2065 y Abell 2069 son consistentes con otros ya publicados. Struble et al. (1999) publican los siguientes valores:  $\sigma_v = 1203 \text{ km s}^{-1}$  y  $\sigma_v = 831 \text{ km s}^{-1}$  para Abell 2065 y Abell 2069, respectivamente. Reiprich & Böhringer (2002) y Brownstein & Moffat (2006) estimaron una masa para el cúmulo Abell 2065 de  $M_{200} = 23.37_{-9.42}^{+29.87} \times 10^{14} h_{50}^{-1} M_\odot$  y  $M_{250} = 8.01_{-2.99}^{+7.20} \times 10^{14} M_\odot$ , respectivamente. Small et al. (1998) encontraron un valor de  $\sigma_v = 1203_{-289}^{+371} \text{ km s}^{-1}$  y la masa  $M_{\text{vir}} = 18.5_{-8.2}^{+13.2} \times 10^{14} h^{-1} M_\odot$  para Abell 2065. Para el supercúmulo referido en Abell 2069 ellos calcularon  $\sigma_v = 1684_{-151}^{+145} \text{ km s}^{-1}$  y una masa de  $M = 6 \times 10^{16} h^{-1} M_\odot$ , pero en este caso consideraron un volumen mucho más amplio que en nuestro estudio, que incluía un total de 352 galaxias. Este hecho sólo debe de afectar a la incertidumbre en la determinación de la dispersión de velocidades, lo que puede ocurrir en la diferencia de valores obtenidos es que las muestras de galaxias no están escogidas bajo el mismo criterio de selección.

Los valores obtenidos para la dispersión de velocidades, masa y temperatura de CrB-H- $lz$  son tan elevados que la hipótesis de la existencia de un tipo de estructura ligada no parece realista. Para la estructura CrB-H- $hz$ , los valores calculados están dentro del rango de los valores típicos de los cúmulos. En la figura 3.9 es evidente que el pico que presenta CrB-H- $hz$  es más estrecho y alto, la distribución es similar a la que podría presentar un cúmulo. Según este análisis, la estructura de alto desplazamiento al rojo podría estar virializada.

### 3.3.1. Distribución radial de las galaxias en CrB-H

Se ha estudiado la distribución radial de las galaxias en la región del decremento del FCM, CrB-H, en el entorno de  $z \approx 0.07$  y  $z \approx 0.11$ . Para ello se ha calculado el centroide de las galaxias en un radio de 20' desde las coordenadas centrales calculadas para el decremento CrB-H, y con desplazamientos al rojo comprendidos en dos tramos,  $0.06 < z < 0.10$  y  $0.10 \leq z < 0.12$ . Los perfiles de densidad radial con respecto a estas posiciones se representan en las figuras 3.10 y 3.11. Las distribuciones en CrB-H son en primera aproximación planas, pero

Tabla 3.3: Resultados del test estadístico  $r^2$  para la distribución espacial de las regiones de CrB-H

Region	$\frac{\langle r^2 \rangle}{R^2}$	$\frac{\langle r^2 \rangle}{R^2} - \frac{1}{2}$	Significancia
CrB-H	0.431	-0.0688	-2.08
CrB-H- <i>lz</i>	0.418	-0.0820	-1.63
CrB-H- <i>hz</i>	0.336	-0.164	-3.12
A2065	0.329	-0.171	-6.99
A2069	0.339	-0.161	-5.97

la de CrB-H-*hz* es ligeramente más pronunciada que en CrB-H-*lz*. Dichas figuras también representan la distribución espacial con respecto al desplazamiento al rojo de cada uno de estos grupos de galaxias. Mientras que para CrB-H-*lz* la concentración de galaxias respecto al desplazamiento al rojo cae sobre el color azul, no se observa una especial concentración hacia el centro de la región. El centro de coordenadas de CrB-H está representado por un diamante azul. En la figura 3.11 derecha se observa una mayor concentración de galaxias hacia el centro, y un desplazamiento al rojo mayor hacia los extremos del campo.

En los apéndices C y D se encuentra disponible toda la información de las galaxias que pueblan cada uno de los grupos CrB-H-*lz* y CrB-H-*hz*. En ellos se encuentran representadas las galaxias y el espectro de las mismas medido por el SDSS. Además, las tablas C y D listan algunas propiedades físicas de cada una de las galaxias.

Con el fin de cuantificar el grado de homogeneidad de ambas muestras de galaxias, se ha implementado la prueba estadística comúnmente conocida como "*test-r<sup>2</sup>*". La idea es utilizar una estadística para probar la hipótesis nula, que en este caso sería que las dos dimensiones de la distribución de las galaxias en ambas regiones tengan una distribución uniforme. Con este fin, se calcula la distribución de los valores  $r^2$ , donde  $r$  se define como la distancia angular de cada galaxia al centro calculado para el centroide de las galaxias en una región de  $R = 20$  minutos de arco. En el caso de que el modelo de la distribución fuese uniforme, el valor medio  $\langle r^2 \rangle$  debería ser  $R^2/2$ , y la varianza de la misma  $R^4/12/N_{gal}$ , donde  $N_{gal}$  es el número de galaxias en la región. La tabla 3.3 muestra los resultados de este análisis cuando se aplica a los casos presentados en las figuras 3.10(Dcha.) y 3.11(Dcha.).

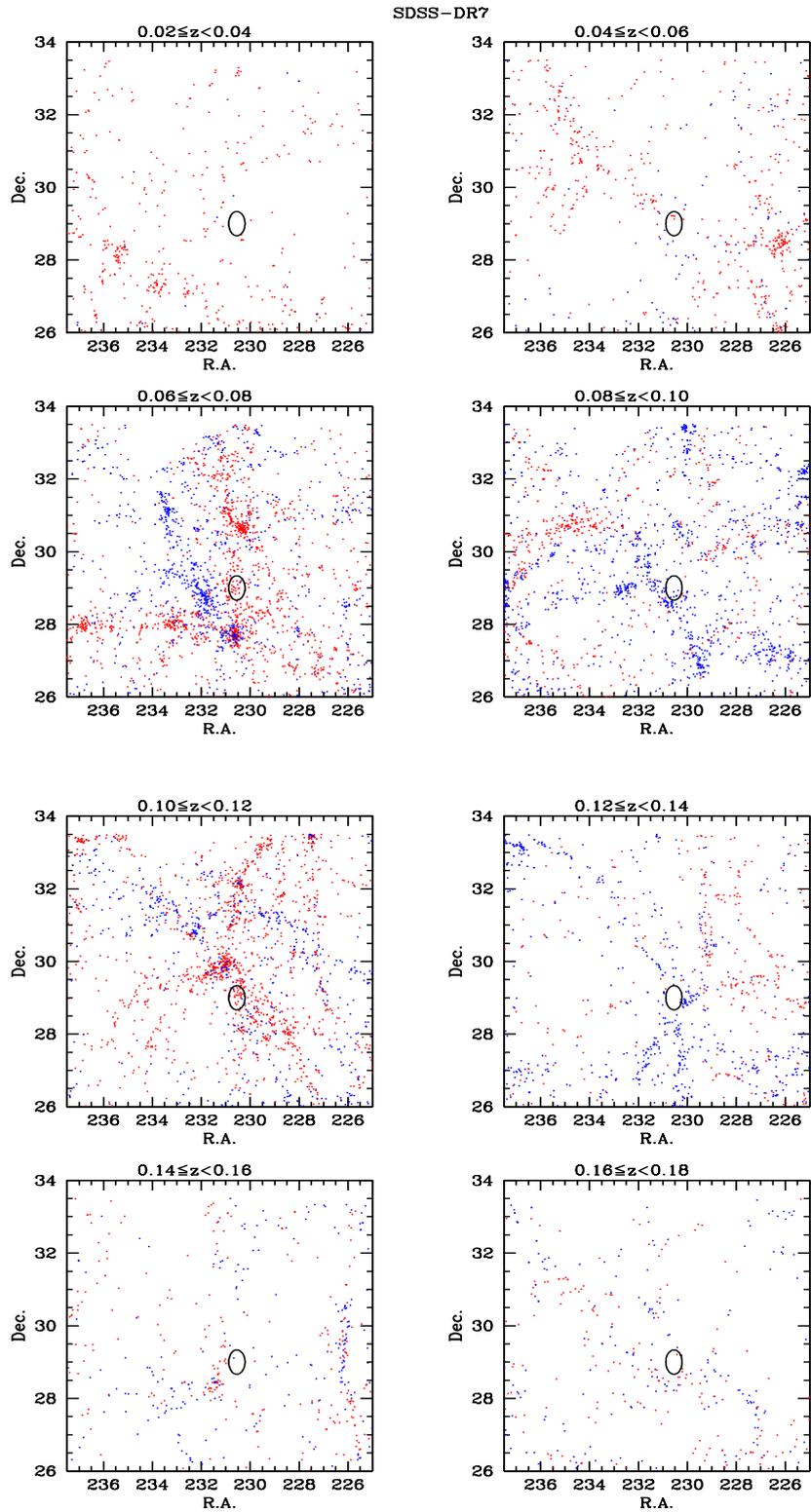


Figura 3.2: Distribución espacial de las galaxias que pueblan el CrB-SC en rangos de desplazamiento al rojo de paso  $\Delta z = 0.02$ . Los puntos azules representan las galaxias que tienen desplazamientos menores que la media del desplazamiento al rojo del intervalo escogido y los puntos rojos son los desplazamientos al rojo de las galaxias con desplazamiento al rojo mayores que la media del intervalo  $\Delta z$  representado. La elipse marca la posición de CrB-H.

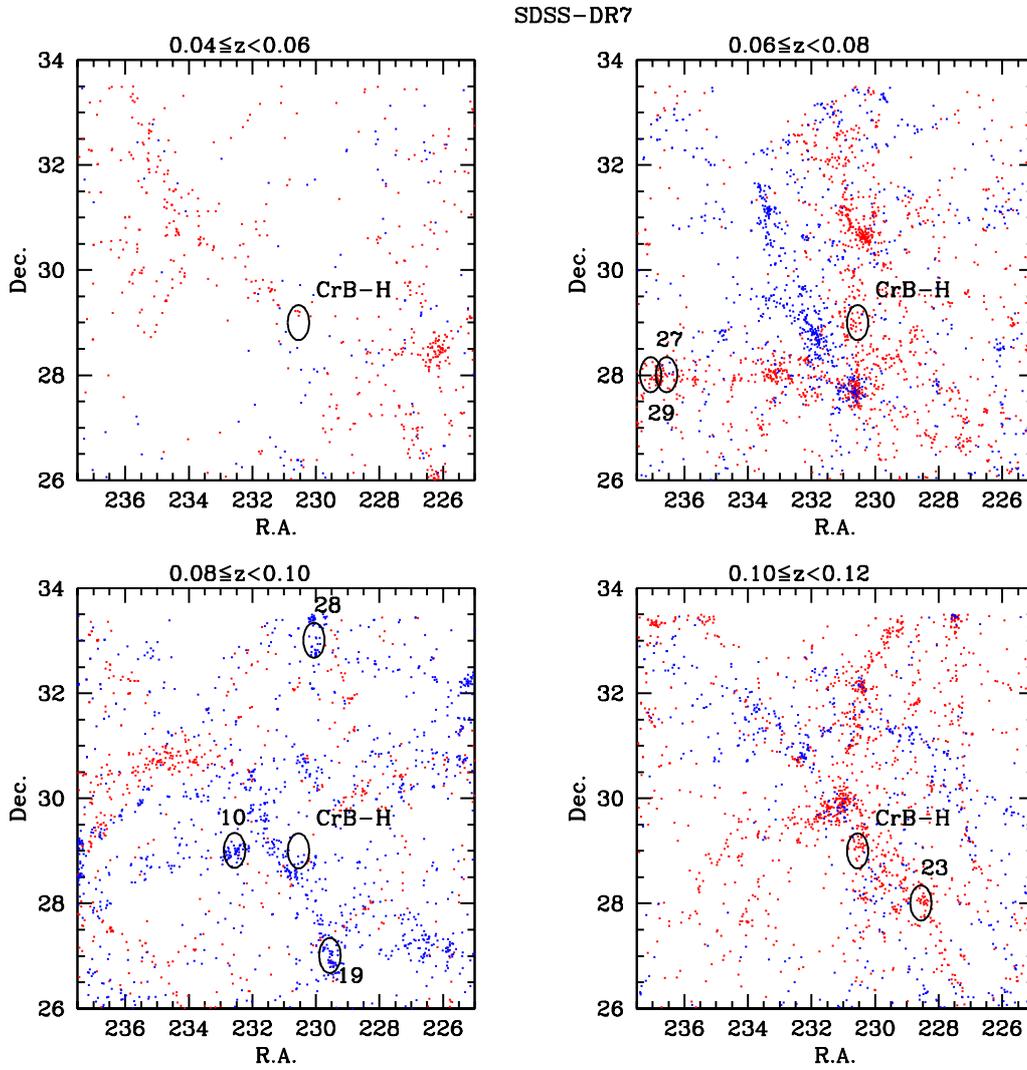


Figura 3.3: Distribución de los posibles candidatos a cúmulos ajenos a CrB-H que se localizan en la región del CrB-SC. Los números que se muestran en la figura están relacionados con la etiqueta que muestran estas regiones en la tabla 3.1.

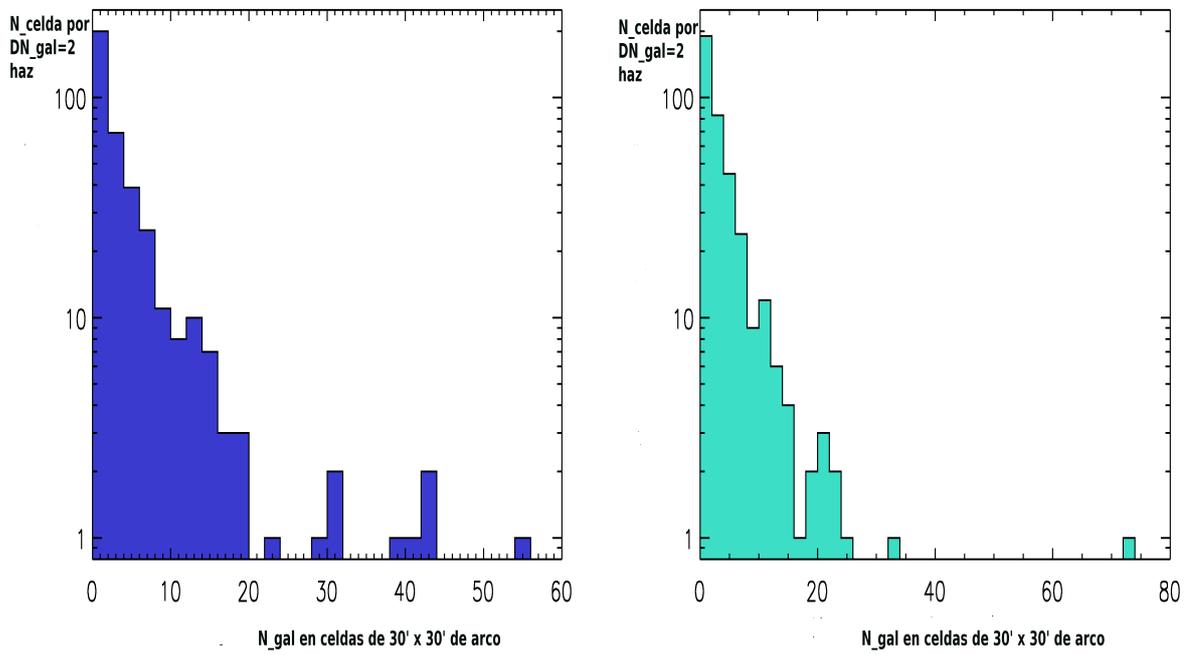


Figura 3.4: Histograma de la distribución del número de celdas de tamaño angular  $30' \times 30'$  y  $\Delta z=0.01$  con respecto a la población de galaxias presente dentro de cada celda, para los cortes de desplazamiento al rojo de  $0.07 < z < 0.08$  (Izqda.) y  $0.11 < z < 0.12$  (Dcha.). Los picos con  $N_{gal} \gtrsim 30$  corresponden a las celdas coincidentes con cúmulos de Abell.

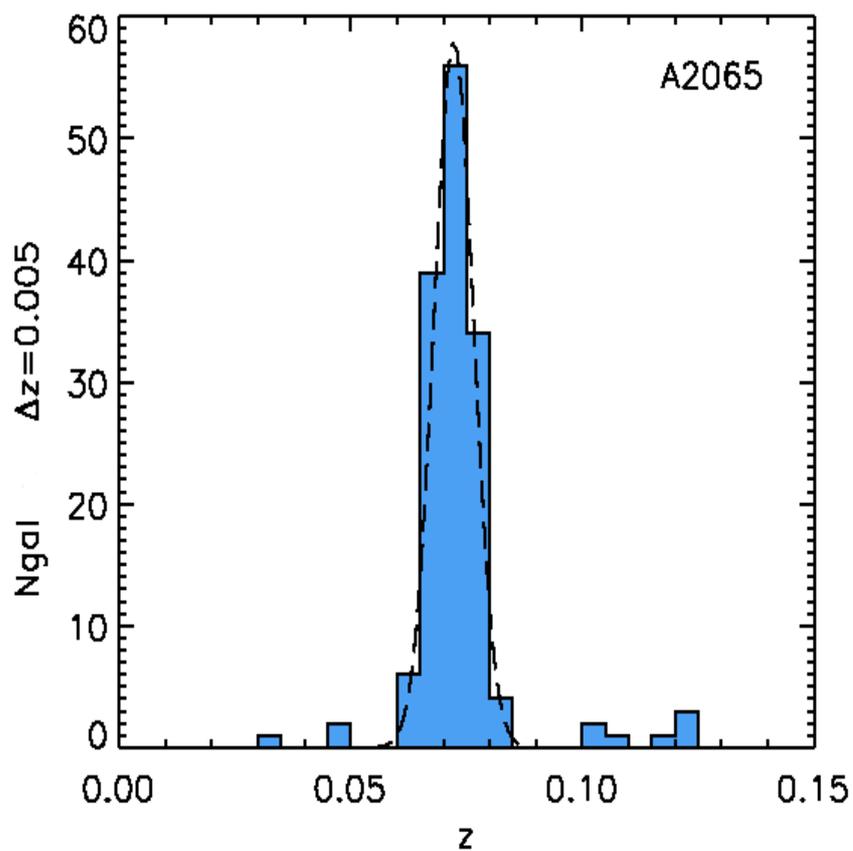


Figura 3.5: Distribución con respecto al desplazamiento al rojo de las galaxias que pueblan los primeros  $20'$  de la región del cúmulo Abell 2065 perteneciente a CrB-SC. La línea punteada muestra el ajuste de la gaussiana de esta distribución.

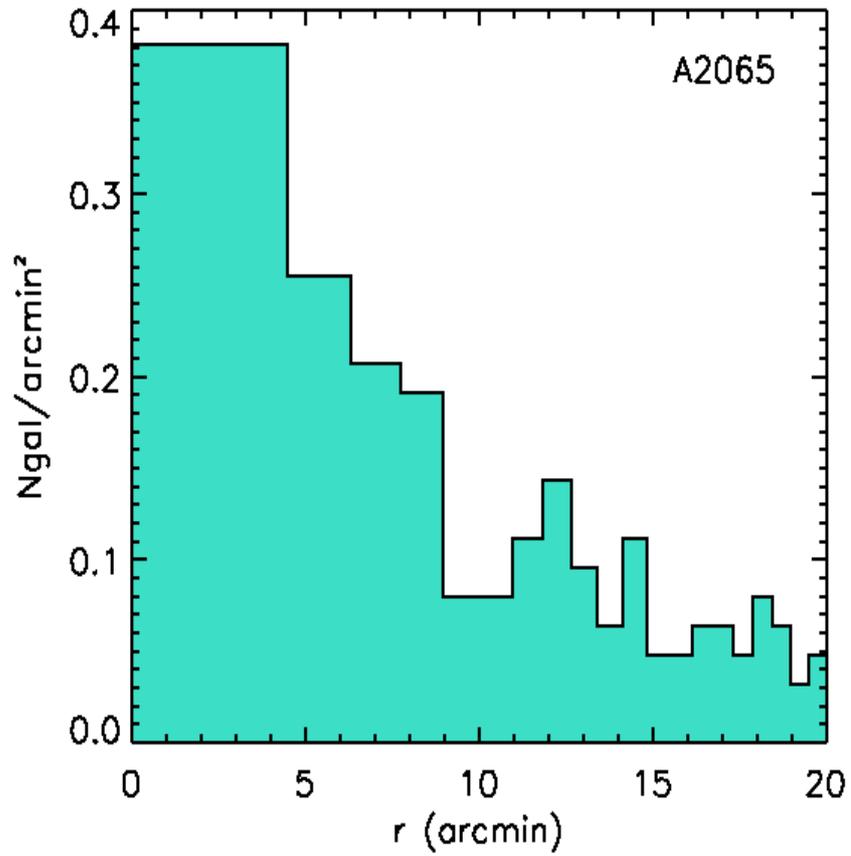


Figura 3.6: Distribución radial de la densidad de las galaxias que pueblan los primeros 20' centrales de la región del cúmulo Abell 2065 perteneciente a CrB-SC y un desplazamiento al rojo con valores comprendidos entre  $0.052 < z < 0.092$ .

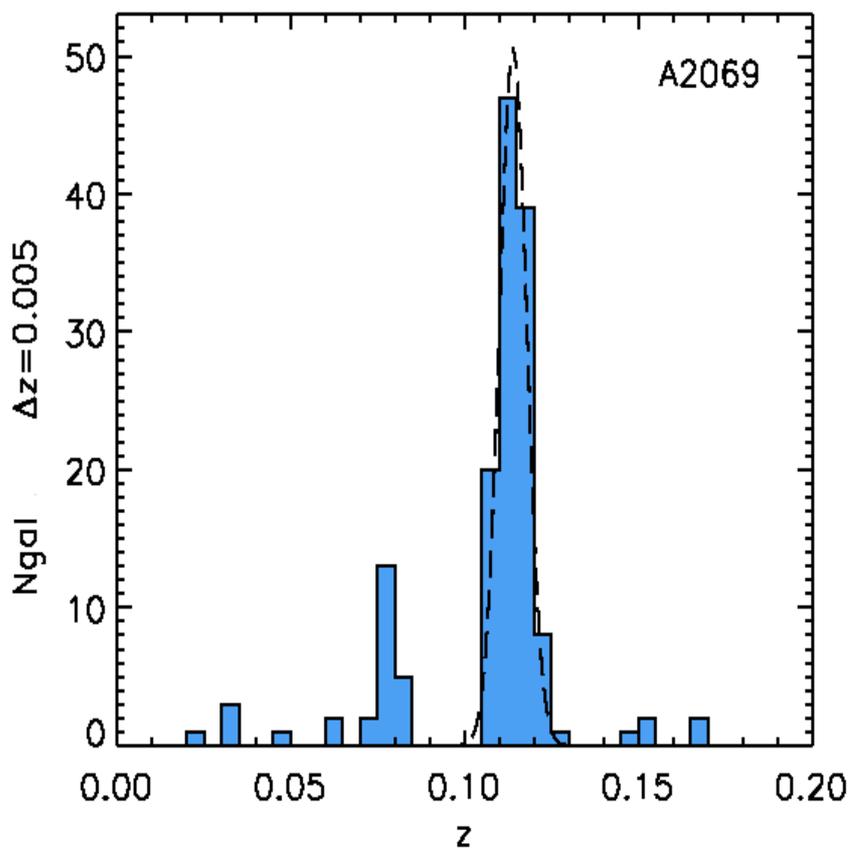


Figura 3.7: Distribución con respecto al desplazamiento al rojo de las galaxias que pueblan los primeros 20' centrales de la región del cúmulo Abell 2069 perteneciente al supercúmulo del mismo nombre. La línea punteada muestra el ajuste de la gaussiana de esta distribución.

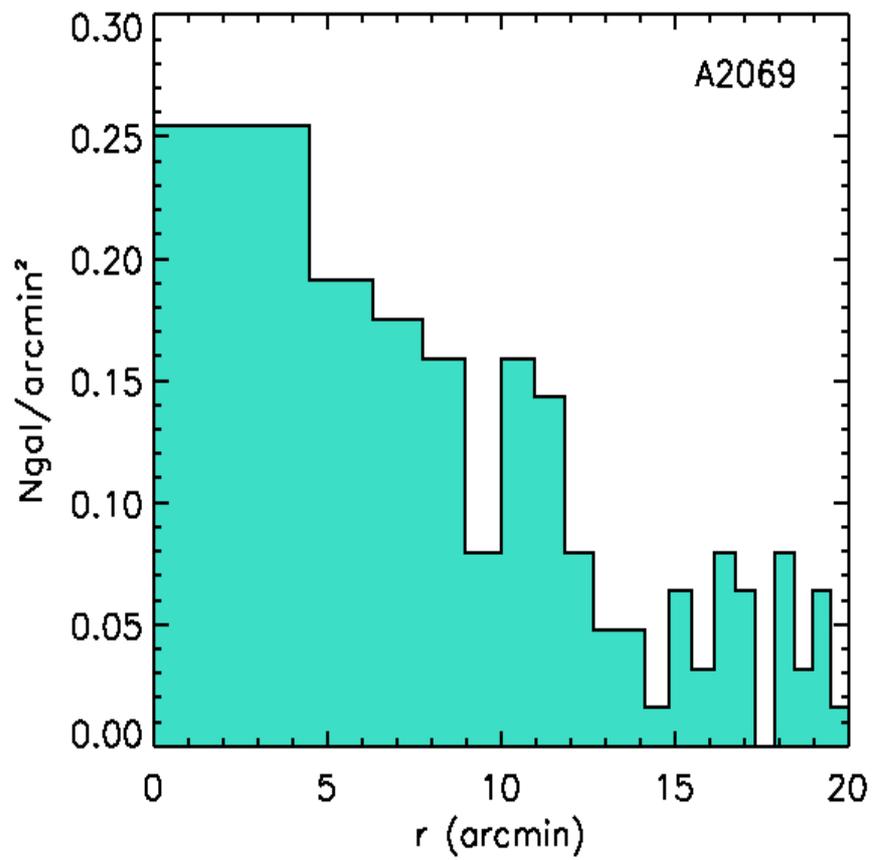


Figura 3.8: Distribución radial de las galaxias que pueblan los primeros 20' centrales de la región del cúmulo Abell 2069 y tienen un desplazamiento al rojo comprendido entre  $0.095 < z < 0.125$ .

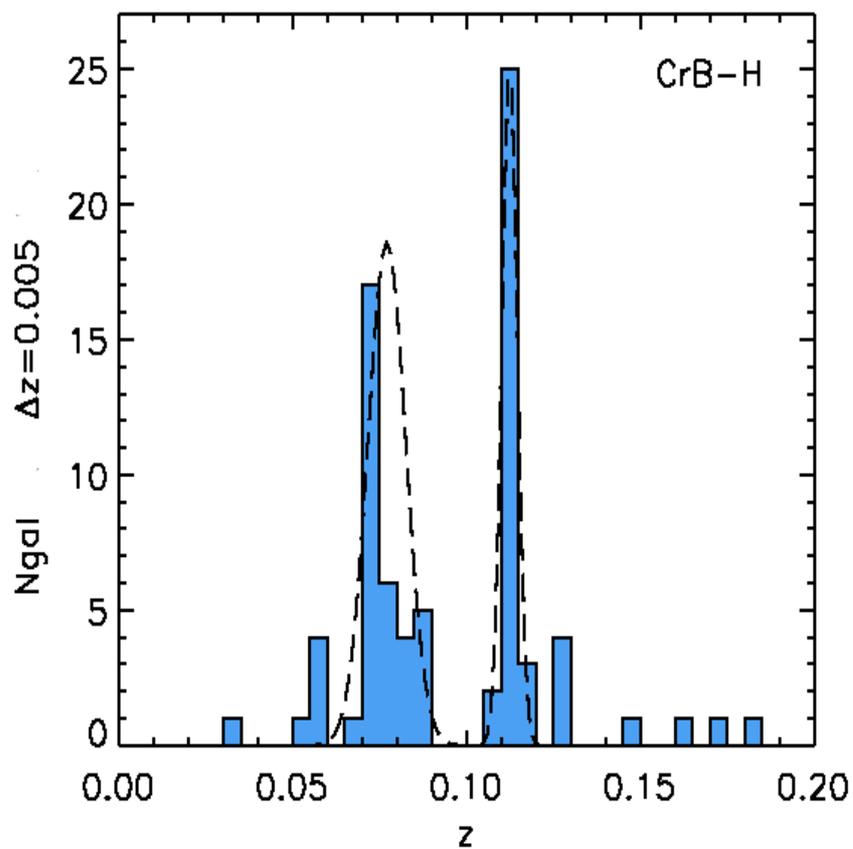


Figura 3.9: Distribución con respecto al desplazamiento al rojo de las galaxias que pueblan los primeros  $20'$  de la región de CrB-H. Las líneas punteadas muestran los ajustes de la gaussiana de cada una de las distribuciones.

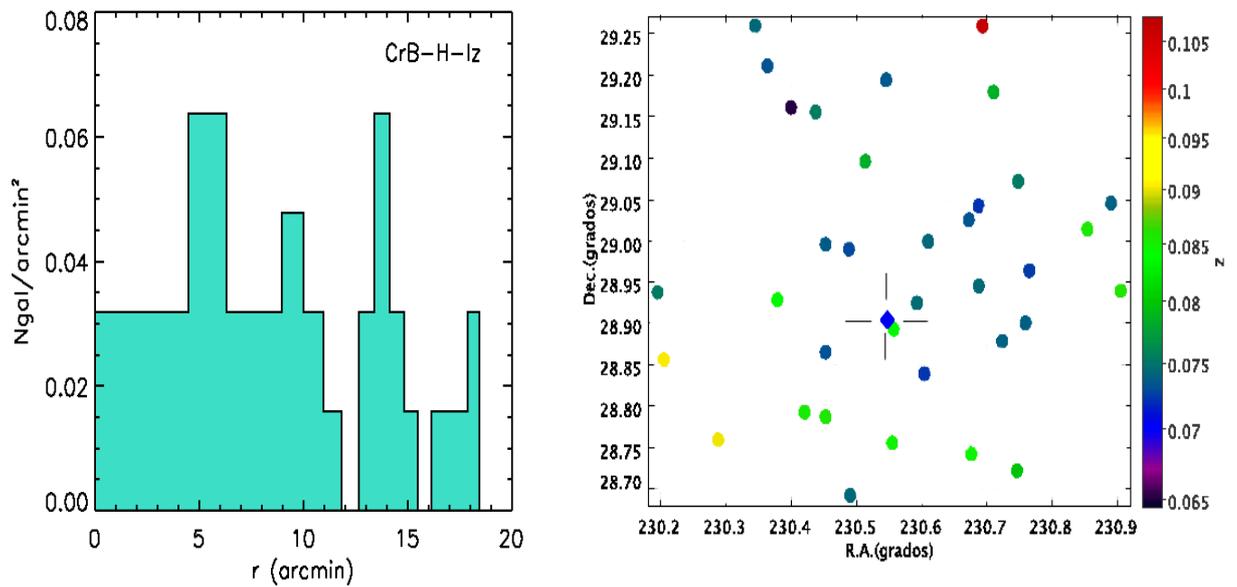


Figura 3.10: **Izqda:** Distribución radial de las galaxias que pueblan los 20' centrales de la región de CrB-H-lz ( $0.06 < z < 0.10$ ) seleccionadas a partir del primero de los picos presentes en la distribución de desplazamientos al rojo de la figura 3.9. Se han considerado las galaxias en el rango  $0.06 < z < 0.10$ . **Dcha:** Distribución espacial de las galaxias seleccionadas en el rango  $0.06 < z < 0.10$  en la zona de CrB-H, el rango de color está de acuerdo al desplazamiento al rojo respecto al valor central del pico. El punto representado con un diamante azul representa el centro de coordenadas calculado para CrB-H.

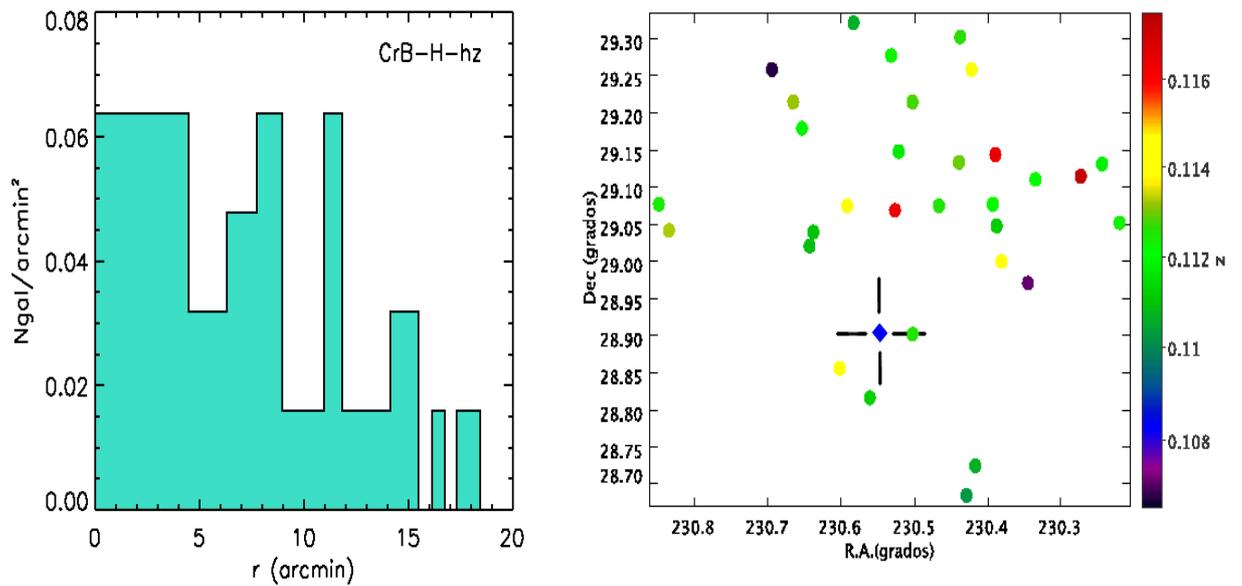


Figura 3.11: **Izqda:** Distribución radial de la densidad de las galaxias que pueblan los primeros 20' de arco centrales de la región de CrB-H-hz ( $0.10 < z < 0.12$ ) seleccionadas a partir del segundo de los picos presentes en la distribución de las galaxias respecto a su desplazamiento al rojo en la figura 3.9. Se han considerado las galaxias que se distribuyen en el rango de desplazamientos al rojo de entre  $0.10 < z < 0.12$ . **Dcha:** Distribución espacial de las galaxias seleccionadas en el rango  $0.10 < z < 0.12$  de desplazamiento al rojo en la zona de CrB-H, el rango de color está de acuerdo al desplazamiento al rojo respecto al valor central del pico. El punto representado con un diamante azul representa el centro de coordenadas calculado para CrB-H.

### 3.4. Morfología de las galaxias en CrB-H.

Las propiedades de las galaxias dependen del entorno en el que residen. En efecto Dressler (1980) encontró que la proporción de galaxias elípticas se incrementa a medida que nos acercamos al núcleo de un cúmulo. La morfología de las galaxias en cúmulos se ha basado, principalmente, en un esquema de clasificación visual. Pero la clasificación visual es sólo el primer paso en la caracterización y la descripción de la morfología de las galaxias. Es necesario hacer un análisis morfológico cuantitativo, por ejemplo, para responder a preguntas básicas sobre las propiedades de los discos de las galaxias espirales o su longitud de escala y si están afectadas por el medio que las envuelve. Este estudio requiere una detallada comparación con las predicciones teóricas que ya han sido desarrolladas por Moore et al. (1999) o Gnedin (2003). Existen trabajos cuantitativos a este respecto como por ejemplo Gutiérrez et al. (2004).

Las poblaciones galácticas de los cúmulos de galaxias están dominadas principalmente por los tipos morfológicos Elíptico (E), y Lenticular (S0), que presentan una relación en el diagrama color magnitud que habíamos descrito como SR en la sección 2.1.1.

En esta sección se analiza y se compara la morfología de las galaxias existentes en las distintas regiones de CrB-SC: cúmulos, zonas intercumulares y la región de CrB-H.

#### 3.4.1. Estudio cualitativo de la morfología de las galaxias

Se ha realizado la clasificación morfológica de un total de 377 galaxias extraídas del catálogo espectroscópico SDSS-DR7 en varias zonas del CrB-SC con magnitudes más brillantes que  $r \geq 20.5$  mag, mediante inspección visual de la imagen que ofrece la base de datos del SDSS. En concreto nos dedicamos a estudiar aquellas celdas más densas mostradas en la tabla 3.1 en los distintos rangos de desplazamiento al rojo. Estas zonas están descritas en los apéndices C, D, E, G, H, I y J. Los resultados se muestran en la tabla 3.4. Debido a que el desplazamiento al rojo de las galaxias en estudio no es más alto que  $z \approx 0.5$ , no tenemos que suponer condiciones especiales para el estudio morfológico de las mismas (Postman et al. 2005). De este modo, se han clasificado las galaxias en cuatro grandes grupos morfológicos: galaxias elípticas (E) correspondientes a las galaxias con grupos morfológicos desde E0 a E9 en el sistema tradicional de Hubble, galaxias lenticulares (S0), galaxias espirales (Sp) correspondientes a los tipos morfológicos Sa-Sd y SBa-SBd del mismo sistema y galaxias irregulares (Irr).

En la figura 3.12 se representan los diagramas Color-color (CC) y DCM para las galaxias miembros de los grupos CrB-H-*lz* y CrB-H-*hz*. El primero, CrB-H-*lz*, es representado por puntos sólidos, mientras que el segundo grupo, CrB-H-*hz*, es representado por puntos abiertos en cada uno de los diagramas. En el diagrama color-color de CrB-H-*lz* las galaxias no se encuentran agrupadas en torno a un mismo valor medio para cada color, aparecen dispersas en todo el rango de colores que va desde  $0.9 \leq (u - g) \leq 2.1$  y  $0.3 \leq (g - r) \leq 1.1$ .

En el cálculo de las magnitudes de cada una de las galaxias representadas en el diagrama CC no se han aplicado las denominadas correcciones  $K$ , Chilingarian et al. (2009), ya que esta es insignificante con respecto al desplazamiento al rojo al que se encuentran nuestras galaxias.

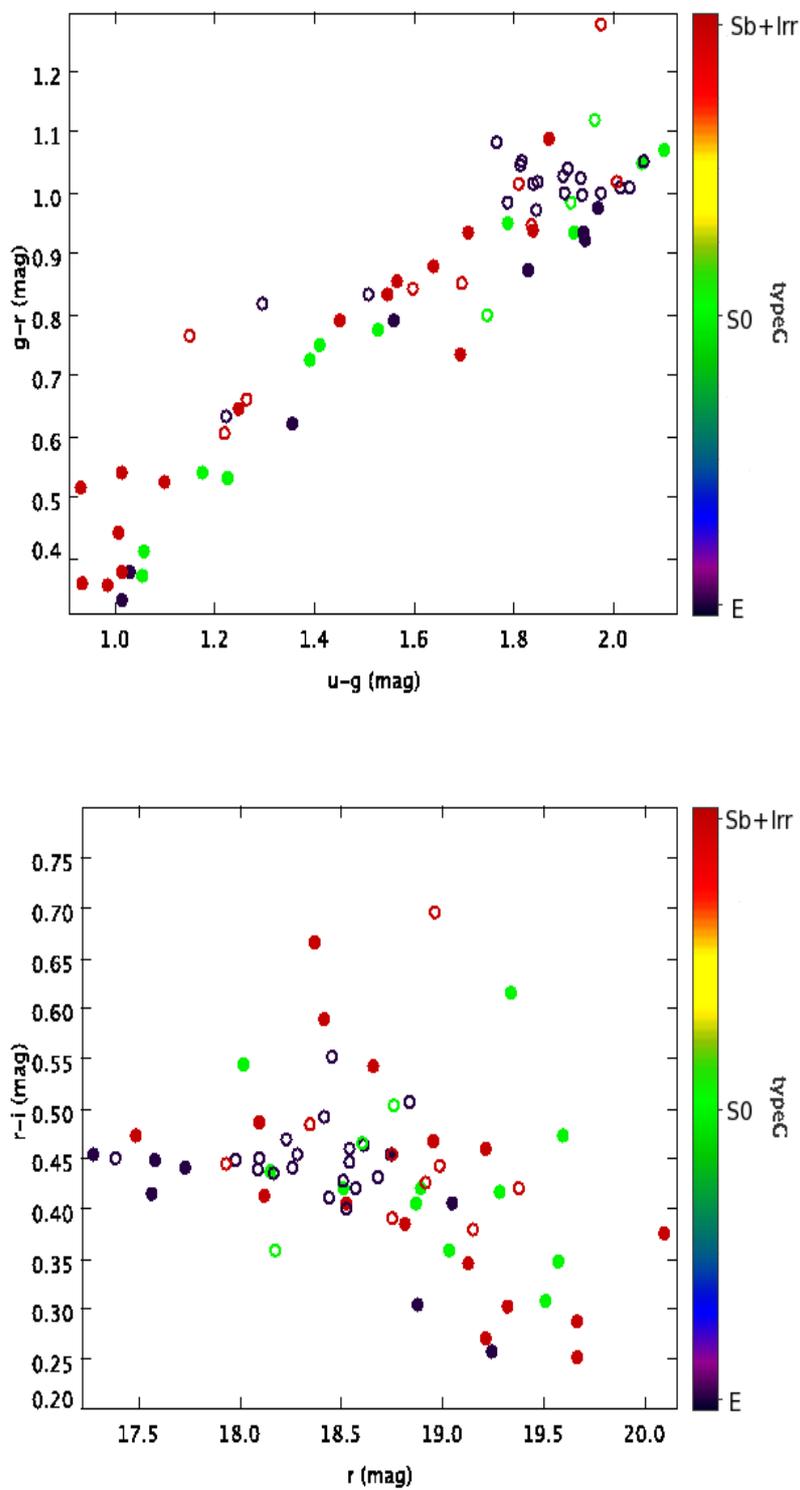


Figura 3.12: Distribución en el diagrama Color-color( $u-g, g-r$ ) (Arriba) y Diagrama Color Magnitud ( $r, r-i$ ) (Abajo) de las galaxias de los grupos CrB-H-lz (puntos sólidos) y CrB-H-hz (puntos abiertos).

Los valores calculados fueron:

$$\begin{aligned}
 Kr(z=0.07, g-r) &= -0.095+0.323(g-r)-0.289(g-r)^2+0.151(g-r)^3 \\
 Kg(z=0.07, g-r) &= -0.036+0.178(g-r)-0.165(g-r)^2-0.095(g-r)^3 \\
 Ku(z=0.07, u-r) &= -0.149+0.247(u-r)-0.013(g-r)^2+0.050(g-r)^3 \\
 Kr(z=0.11, g-r) &= -0.155+0.535(g-r)-0.449(g-r)^2+0.205(g-r)^3 \\
 Kg(z=0.11, g-r) &= -0.043+0.232(g-r)-0.280(g-r)^2-0.141(g-r)^3 \\
 Ku(z=0.11, u-r) &= -0.376+0.449(u-r)-0.038(g-r)^2+0.005(g-r)^3
 \end{aligned}$$

Para el grupo de galaxias CrB-H-*hz* existe concentración de galaxias en los colores  $0.9 \leq (u-g) \leq 1.1$  y  $1.7 \leq (g-r) \leq 2.1$ , a su vez los tipos morfológicos adjudicados para las galaxias que componen esta submuestra pertenecen a galaxias del tipo E. Podría indicar que las galaxias asociadas a este grupo se encuentran ligadas entre si, y sería la primera evidencia de la existencia de un potencial cúmulo de galaxias del cual sólo se conocen las más brillantes por simple sesgo de la muestra en la magnitud límite de la misma.

### Comparación con Abell 2065

Utilizando el mismo criterio de clasificación, se ha estudiado la distribución morfológica de las galaxias del cúmulo Abell 2065 contenidas en los primeros 20 minutos de arco de radio desde el centro del cúmulo. Se ha clasificado un total de 69 galaxias cuyos espectros han sido tomados del SDSS-DR7 y cuya descripción se encuentra de forma detallada en el apéndice E.

En el diagrama CC representado en la figura 3.13(Arriba) se observa que la mayor parte de las galaxias elípticas y las lenticulares se concentran en torno a  $1.8 \leq (u-g) \leq 2.1$  y  $0.9 \leq (g-r) \leq 1.0$ . Las galaxias espirales, por el contrario, presentan una mayor dispersión sobre el diagrama, lo que puede ser considerado como un comportamiento habitual para este tipo de galaxias. Esta tendencia indica la no vinculación de estas galaxias con el núcleo del cúmulo Abell 2065. Por otra parte, en el DCM(r,r-i) de la figura 3.13(Abajo) se observa que la mayor dispersión se encuentra sobre las galaxias espirales. Sin embargo, las galaxias elípticas y lenticulares trazan de forma evidente la SR. Los primeros 20 minutos de arco de radio del cúmulo están poblados por las galaxias de magnitudes  $17.0 \leq r \leq 19.2$  (mag) no encontrando galaxias menos brillantes que esta magnitud, quizás debido al sesgo que introduce la medida espectroscópica del SDSS-DR7.

### Comparación con Abell 2069

Usando el criterio de clasificación morfológica descrito anteriormente se ha realizado el estudio morfológico de las galaxias del cúmulo Abell 2069 encontradas en los primeros 20 minutos de arco de radio desde el centro del cúmulo, clasificando un total de 78 galaxias, cuyos espectros han sido obtenidos mediante el catálogo espectroscópico del SDSS-DR7.

En el diagrama CC representado en la figura 3.14(Arriba) la mayoría de las galaxias elípticas y las lenticulares se concentran en torno a los colores  $1.6 \leq (u-g) \leq 2.2$  y entre  $0.8 \leq (g-r) \leq 1.1$ . Al igual que en el caso anterior, las galaxias espirales que pueblan la

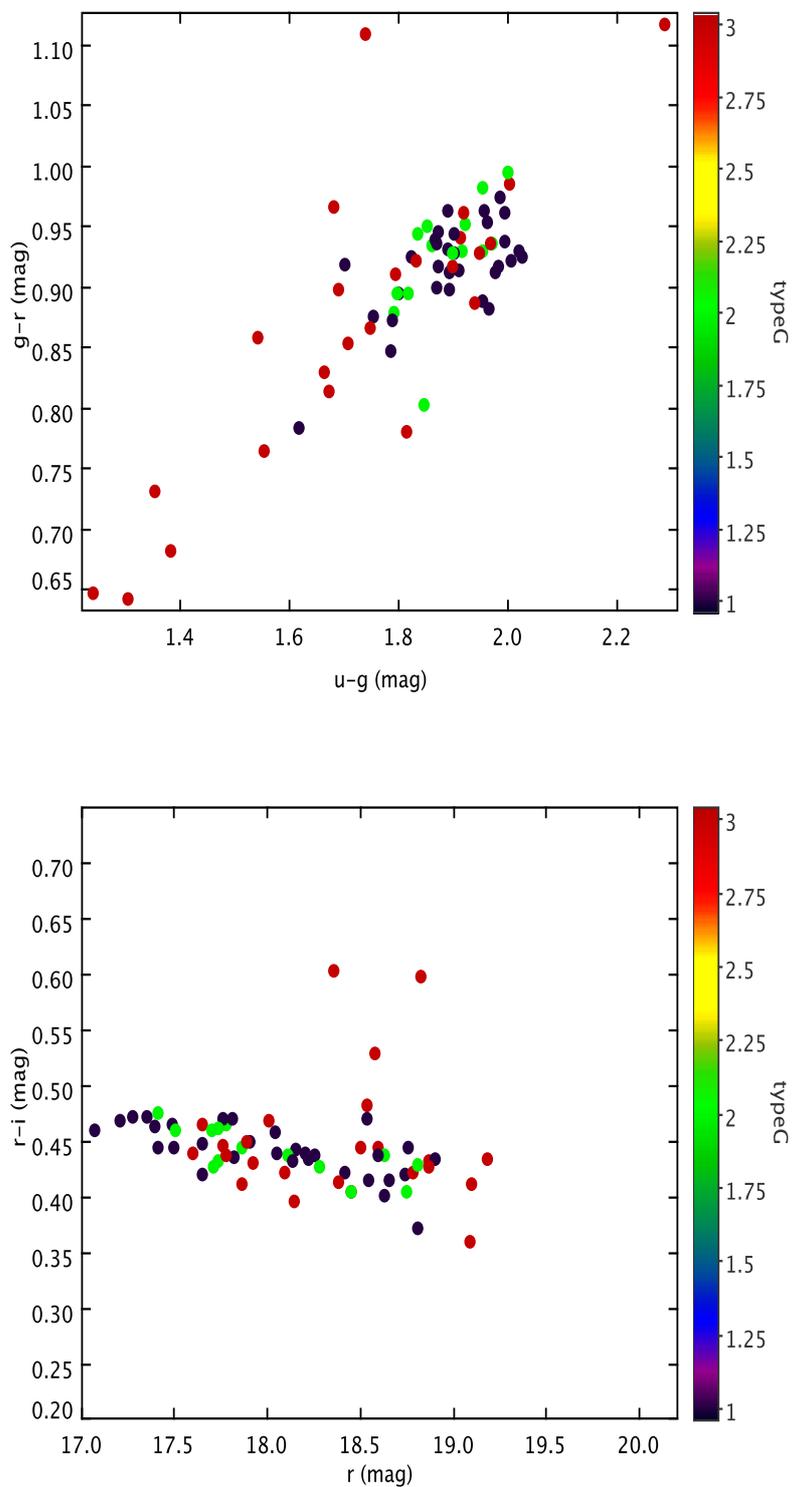


Figura 3.13: Distribución en el diagrama Color-color( $u-g, g-r$ ) (Arriba) y Diagrama Color Magnitud ( $r, r-i$ ) (Abajo) de las galaxias del cúmulo Abell 2065

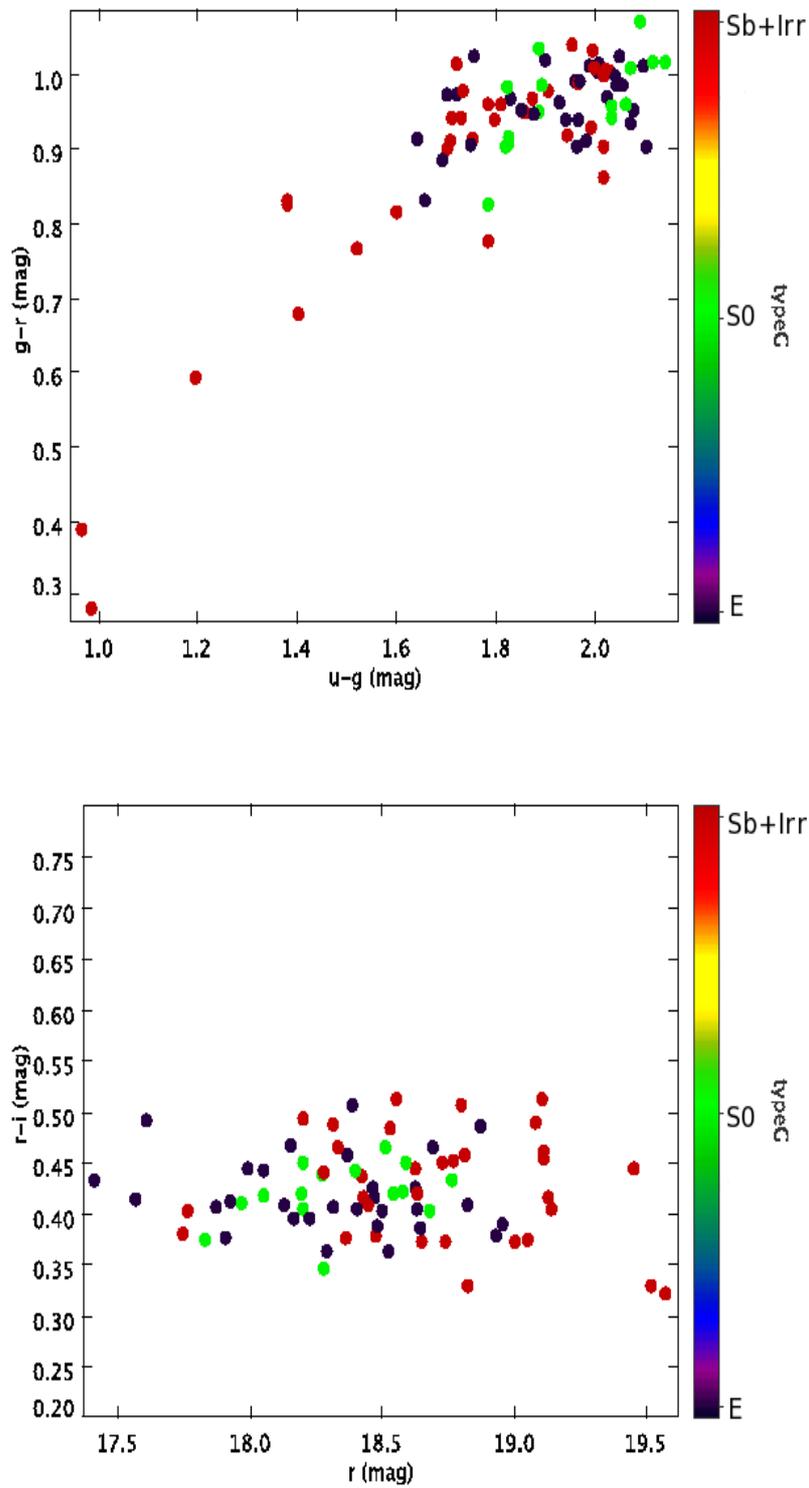


Figura 3.14: Distribución en el diagrama Color-color(u-g,g-r) (Arriba) y Diagrama Color Magnitud (r, r-i) (Abajo) de las galaxias del cúmulo Abell 2069

Tabla 3.4: Tabla resumen de la clasificación de las galaxias que pueblan CrB-H-*lz*, CrB-H-*hz*, Abell 2065 y regiones intercumulares de CrB-SC. La tabla muestra el número de galaxias de cada una de las muestras, así como el número de galaxias clasificadas como E, S0-S9 y Sa-Sc. Entre paréntesis se muestra el porcentaje de la clasificación. Se añaden dos columnas que representan las galaxias que muestran líneas de emisión en el espectro y la proporción E/S0.

Región	$N_{galx}$	Elípticas	Lenticulares	Espirales	Emisión	E/S0
		E	S0-S9	Sa-Sc		
		$N_{galx}(\%)$	$N_{galx}(\%)$	$N_{galx}(\%)$	$N_{galx}(\%)$	
CrB-H- <i>lz</i>	35	8 (22.8)	11 (31.4)	16 (45.7)	29 (82.9)	0.7273
CrB-H- <i>hz</i>	31	19 (61.3)	3 (9.7)	9 (29.0)	14 (45.2)	6.3333
Abell 2065	69	41 (59.4)	16 (23.2)	12 (17.4)	9 (13.0)	1.3333
Abell 2069	78	30 (38.5)	15 (19.2)	33 (42.3)	22 (28.2)	2.0000
RA:232.06 DEC:30.51	39	9 (23.1)	11 (28.2)	19 (48.7)	15 (38.5)	0.8182
RA:232.56 DEC:30.01	21	4 (19.1)	7 (33.3)	10 (47.6)	8 (38.1)	0.5714
RA:230.56 DEC:28.51	48	15 (31.3)	14 (29.2)	19 (39.5)	22 (45.8)	1.0714
RA:228.56 DEC:28.01 <i>lz</i>	24	0 (0.0)	4 (16.7)	20 (83.3)	20 (83.3)	0.000
RA:228.56 DEC:28.01 <i>hz</i>	31	7 (22.6)	11 (35.5)	13 (41.9)	13 (41.9)	0.6364

zona presentan mayor dispersión de colores en el diagrama, la tendencia indica que podrían no estar ligadas al cúmulo o en proceso de acreción al mismo. En la figura 3.14(Dcha.), se muestra de igual manera que la mayor dispersión se encuentra en el grupo de las galaxias espirales. Las galaxias elípticas y lenticulares trazan la SR más claramente. Los primeros 20 minutos de arco de radio del cúmulo están poblados por galaxias de magnitudes en el rango de  $17.4 \leq r \leq 19.6$  (mag) no encontrando galaxias menos brillantes que esta magnitud.

### Contenido galáctico y relación E/S0

La razón de tipos de galaxias E/S0 depende de la densidad local de galaxias (Dressler, 1980) y, por lo tanto, cambia radicalmente desde el núcleo del cúmulo a entornos menos densos o subgrupos que contengan muchas galaxias espirales. Es frecuente relacionar la fracción E/S0 con el medio ambiente de una galaxia, puesto que adopta valores más altos en cúmulos de galaxias, y especialmente en el núcleo de los mismos, que en regiones intercumulares o externas del cúmulo. Por esto, el valor E/S0 da una idea de la concentración de las galaxias de un grupo o si este grupo tiende a comportarse como un cúmulo de galaxias o, por el contrario, nos indica que las galaxias de una muestra se encuentran en el medio intercumular.

La tabla 3.4 presenta la distribución de tipos morfológicos para las galaxias de los cúmulos Abell 2065, Abell 2069, para las regiones CrB-H-*lz* y CrB-H-*hz* y para una serie de regiones intercumulares del CrB-SC catalogadas en la tabla 3.1 como densas. Se lista el número total de galaxias de cada una de las muestras, y el número de ellas clasificadas como E, S0-S9 y Sa-Sc. Entre paréntesis se muestra el porcentaje. Se añaden dos columnas que representan las galaxias que muestran líneas de emisión en el espectro y las que no y su correspondiente porcentaje en la muestra, y la proporción E/S0

Así pues, según observamos en la tabla 3.4, los valores de E/S0 para CrB-H-*hz*, Abell 2065 y Abell 2069, son significativamente mayores que los que se muestran para el resto de

regiones intercumulares de la tabla y para el propio CrB-H-*lz*. El valor de  $E/SO_{CrB-H-hz} = 6.33$  es incluso mayor que el mostrado por Abell 2065,  $E/SO_{Abell2065} = 1.33$  y que el mostrado por Abell 2069,  $E/SO_{Abell2069} = 2.00$ . Por tanto, es un nuevo candidato a cúmulo CrB-H-*hz*.

### 3.4.2. Estudio cuantitativo de las galaxias de CrB-H

El SDSS dispone de varios parámetros fotométricos y espectroscópicos que pueden ser utilizados para hacer una clasificación morfológica cuantitativa de las galaxias. En particular, nos centraremos en los parámetros de Sérsic obtenidos para las galaxias de SDSS de nuestro catálogo para CrB-SC.

Se han utilizado los siguientes parámetros para diferenciar entre galaxias de tipo tardío y temprano y discriminar entre tipos morfológicos:

- Parámetro espectroscópico  $eClass$ : El valor de  $eClass$  da idea de la clasificación del tipo espectral de una galaxia derivado de su espectro. El rango de  $-0.35 \leq eClass \leq 0.5$  correspondería desde las galaxias elípticas hasta las galaxias tipo tardío (desde los valores negativos a los positivos) cubriendo todo el rango desde galaxias tempranas a tardías, Yip et al. (2004).
- Brillo superficial en la banda  $r$  medido dentro del radio  $r_{50}$  que encierra el 50 % del flujo de Petrosian, es decir,  $\mu_{50,r} = m_r + 2.5 \log(2\pi r_{50}^2)$ .
- Brillo superficial total en la banda  $r$  que encierra el 90 % del flujo de la galaxia y tiene por ley,  $\mu_{90,r} = m_r + 2.5 \log(2\pi r_{90}^2)$ .
- Parámetro de concentración  $C = r_{90}/r_{50}$ .

Se incluye un parámetro más,  $C_{model}$ , que es una medida representativa de la contribución del perfil de Vaucouleurs a la magnitud en la banda  $r$  y es un indicador de morfología, este valor se describe con detalle más adelante.

Se ha representado la distribución de estos parámetros para CrB-H-*lz*, CrB-H-*hz* y se he hecho la comparación con el cúmulo Abell 2065. Por último se pondrá en relación a una zona intercumular dentro de CrB-SC que no esté relacionada ni con CrB-H ni con cúmulo Abell alguno, en este caso se ha elegido la región que denominamos F2 y que tiene por coordenadas centrales RA=232.151° y DEC=28.1304°.

#### Parámetro $r_{50}$

Observemos la relación existente entre las galaxias que forman parte de los grupos CrB-H-*lz* y CrB-H-*hz* con respecto a la población de galaxias de Abell 2065 y de F2 para ello véase la figura 3.15.

Como vemos en la figura, las galaxias pertenecientes a CrB-H-*lz* presentan una distribución bastante amplia en radios, no encontrando ninguna galaxia cuyo valor de  $r_{50}$  sea mayor que 4.5 Kpc. Si lo comparamos con el radio que presentan las galaxias en el cúmulo Abell 2065, la mayor parte de las mismas también tienen la mitad del flujo concentrado en un radio menor que 4.5 Kpc. Hay dos excepciones dentro de la muestra de galaxias pero no son significativas. Sin embargo, cuando comparamos la muestra con CrB-H-*hz* se puede ver que el 80.6 % de las galaxias tiene concentrada la mitad del flujo en los primeros 2.0 Kpc.

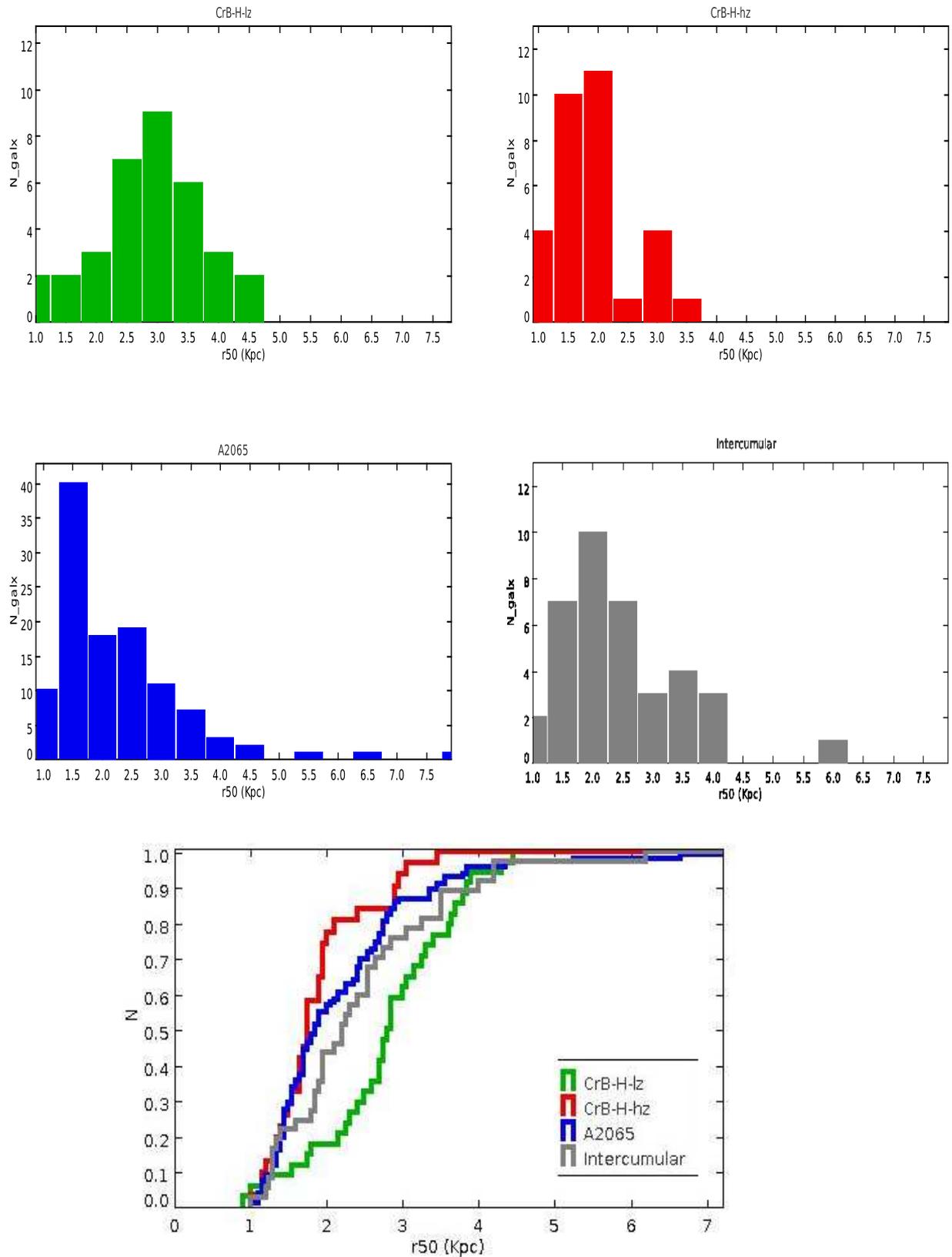


Figura 3.15: Relación  $r_{50}$  de las galaxias de CrB-H-lz, CrB-H-hz con las de Abell 2065 y una zona intercumular de CrB-SC. Distribución acumulada y normalizada de  $r_{50}$ .

El histograma de la distribución acumulada y normalizada para todos los campos elegidos muestra como CrB-H-*hz* tiene un crecimiento muy rápido y destaca sobre el crecimiento del resto de las regiones, siendo el más cercano el crecimiento que muestra el cúmulo Abell 2065. La región de CrB-H-*lz* muestra un crecimiento más lento de sus radios y difiere significativamente de las demás, incluso cuando se compara con una región intercumular del propio supercúmulo.

### Perfil de brillo $\mu_{50}$

Hemos representado en la figura 3.16 los valores obtenidos a partir de los datos del SDSS-DR7 de  $\mu_{50}$  que se encuentran en el catálogo público de las galaxias.

En la figura 3.16 podemos observar que la distribución de brillo superficial de las galaxias de CrB-H-*lz* y CrB-H-*hz* es diferente entre sí, para el primero el pico se encuentra en torno a  $\sim 23.0$  mag seg. de arco<sup>-2</sup> y para el segundo está en torno a  $\sim 21.5$  mag seg. de arco<sup>-2</sup>, por lo que las galaxias de CrB-H-*hz* presentan un brillo superficial mayor que las de CrB-H-*lz*. Curiosamente, en Abell 2065 el pico de concentración del brillo superficial coincide con  $\sim 21.5$  mag seg. de arco<sup>-2</sup> pero la distribución de brillo más ancha y abarca desde  $\sim 21.0$  mag seg. de arco<sup>-2</sup> hasta los  $\sim 23.0$  mag seg. de arco<sup>-2</sup>. La distribución en la zona intercumular es menos prominente aunque muestra los mismos picos que Abell 2065, pero la distribución es más homogénea a magnitudes mayores.

Si observamos el diagrama de la distribución acumulada y normalizada para todas las regiones de  $\mu_{50}$  se ve como CrB-H-*lz* muestra un perfil de brillo muy por debajo del que presentan zonas como Abell 2065 o la región intercumular elegida. Destaca que CrB-H-*hz* presente perfiles de brillo superiores en algunos tramos a Abell 2065, destacando la presencia de galaxias en el rango  $21.5 \leq \mu_{50} \leq 23.0$  mag seg. de arco<sup>-2</sup>.

### Parámetro de concentración $C$ , $eClass$ y $C_{model}$

El parámetro de concentración,  $C=r_{90}/r_{50}$ , es probablemente el mejor parámetro para clasificar morfológicamente las galaxias.

Típicamente, las galaxias de tipo temprano poseen cocientes  $C \geq 2.5$  mientras que las galaxias de tipo tardío presentan cocientes  $C \leq 2.5$  (Strateva et al. 2001).

Hemos representado en la figura 3.17 la distribución de la concentración  $C$ , de las galaxias para los diferentes campos CrB-H-*lz*, CrB-H-*hz*, para el cúmulo Abell 2065 y la región intercumular de CrB-SC, F2. En la figura podemos observar que las galaxias que componen los cuatro grupos son mayoritariamente de tipo temprano, especialmente para el Abell 2065 y CrB-H-*hz* donde se observa claramente la separación entre galaxias tempranas y tardías y la importancia en número de las primeras.

La distribución acumulada y normalizada del parámetro  $C$ , muestra que las similitudes existentes entre Abell 2065 y CrB-H-*hz* en el tipo de galaxias que lo componen que el que muestra la distribución de  $C$  para CrB-H-*lz*, donde destaca la presencia de galaxias de tipo tardío con respecto al resto de regiones.

El parámetro morfológico  $eClass$ , es uno de los cinco coeficientes usados por el algoritmo de “Análisis de Componentes Principales (PAC)” basado en la medida de las líneas espectrales de espectros sintéticos de las galaxias, y hace la correlación cruzada con los

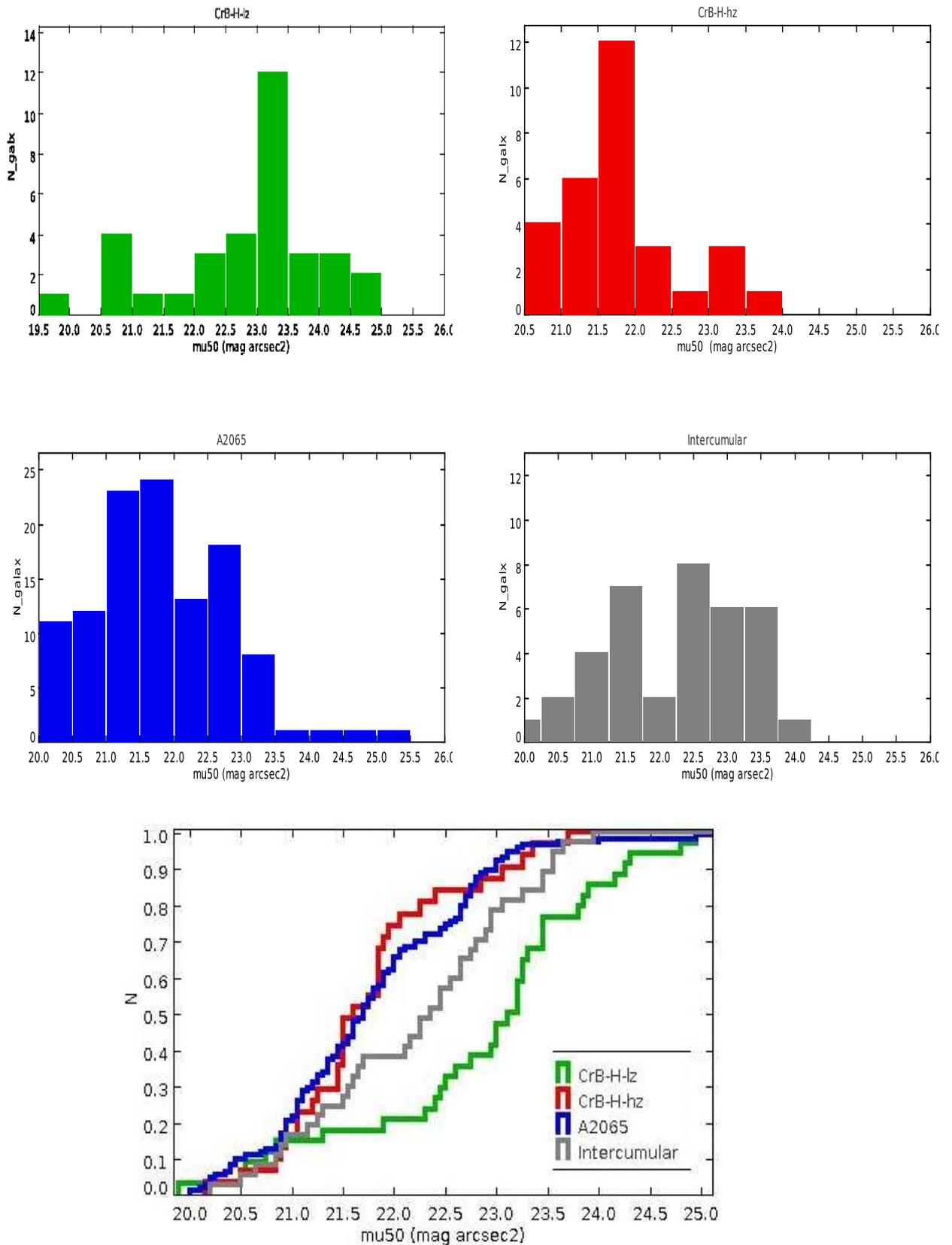


Figura 3.16: Relación  $\mu_{50}$  de las galaxias de CrB-H-lz, CrB-H-hz con las de Abell 2065 y una zona intercumular de CrB-SC (F2). Distribución acumulada y normalizada de  $\mu_{50}$ .

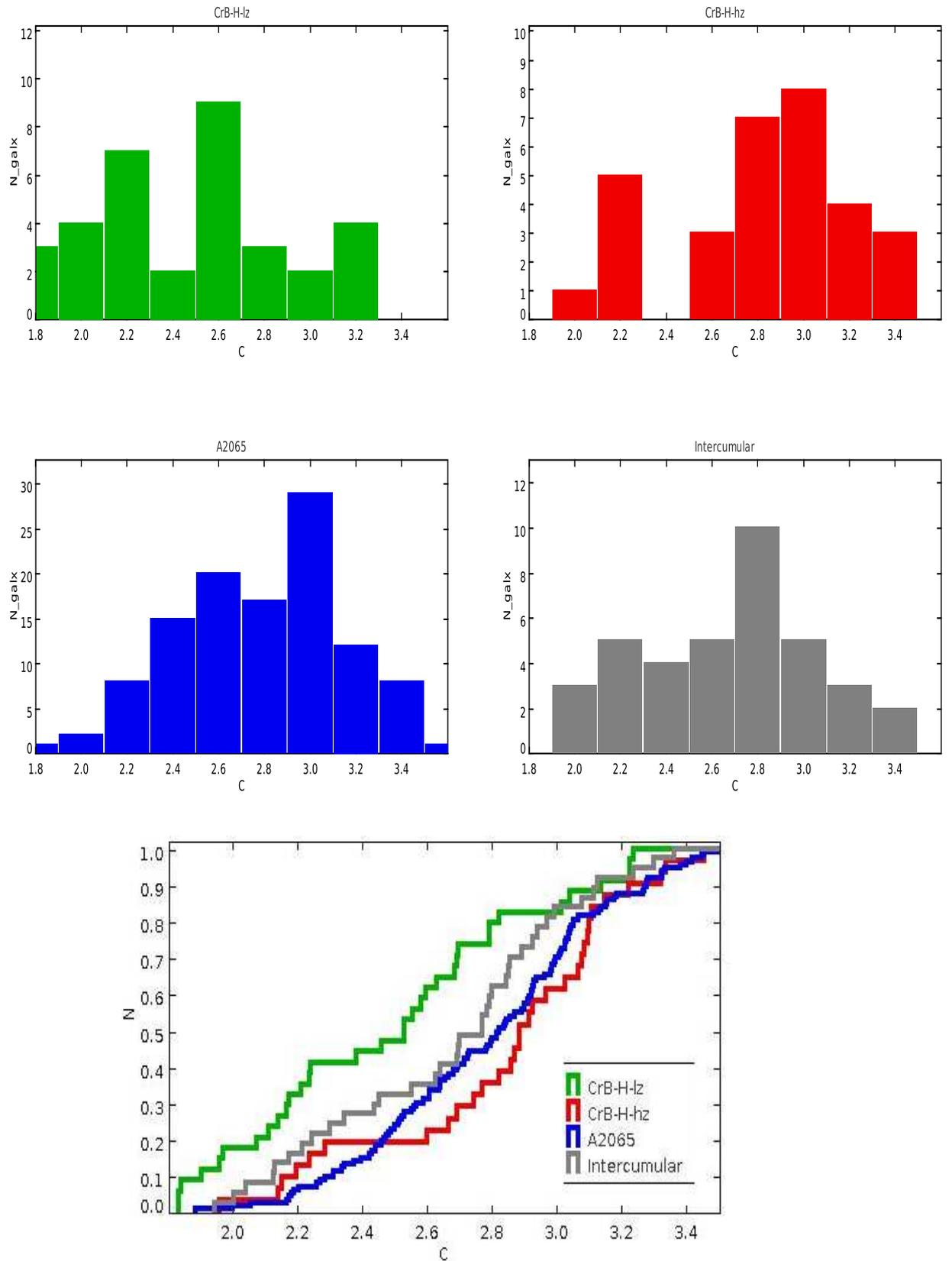


Figura 3.17: Comparación de la concentración  $C$  de las galaxias de CrB-H-lz, CrB-H-hz con Abell 2065 y la zona intercumular de CrB-SC (F2). Distribución acumulada y normalizada de la  $C$ .

Tabla 3.5: Tabla resumen de la población de galaxias tempranas y tardías en CrB-H-*lz*, CrB-H-*hz*, Abell 2065 y una región intercumular de CrB-SC.

Región	$N_{galaxias}$	eClass $\leq -0,1$ (%) tempranas	eClass $\geq -0,1$ (%) tardías
CrB-H- <i>lz</i>	34	67.7	32.3
CrB-H- <i>hz</i>	31	90.3	9.7
Abell 2065	113	94.7	5.3
Intercumular	37	85.3	13.5

espectros reales tal y como se explica en Connolly & Szalay (1999). Hace la diferenciación entre las galaxias de tipo espectral temprano con  $eClass \leq -0.1$ , y las galaxias de tipo tardío con  $eClass \geq -0.1$ , véase Connolly & Szalay (1999).

Como podemos ver en la representación de la figura 3.18, los tipos de galaxias dominantes en las cuatro zonas elegidas para el estudio son el tipo temprano, todas aquellas que tienen un  $eClass \leq -0.1$ . Según se resume en la tabla 3.5, los números indican que éstas zonas están pobladas por galaxias con características similares, salvo en CrB-H-*lz* que tiene un porcentaje significativamente mayor en galaxias de tipo tardío, corroborado en la distribución acumulada y normalizada de las cuatro regiones escogidas y de acuerdo con el resultado mostrado por el parámetro de concentración  $C$ .

Por último, el parámetro  $C_{model}$  es una cantidad medida para los objetos del SDSS que escoge el mejor ajuste entre el perfil de Vaucouleurs y un perfil exponencial, siendo  $C_{model}$  una relación lineal del tipo :

$$F_{compuesta} = \alpha F_{deV} + (1 - \alpha) F_{exp}$$

siendo  $F_{deV}$  y  $F_{exp}$  los flujos de Vaucouleurs y el flujo exponencial de cada objeto seleccionado, respectivamente. Las magnitudes derivadas de  $F_{compuesta}$  se denominarán en adelante como la magnitud  $C_{model}$ . Para los colores de las galaxias, se mide el flujo a través de aperturas equivalentes en todas las bandas. Elegimos el modelo (exponencial de Vaucouleurs) que esté en mejor acuerdo para el filtro r, y se aplica el modelo en cada banda y haciendo después la convolución con la correspondiente PSF. Las magnitudes resultantes se denominan  $modelMag$ . Así pues,  $C_{model}$  puede ser entendido como una estimación de la magnitud total (bulbo+halo).

Es por esta razón que existe un buen acuerdo entre  $C_{model}$  Petrosian y las magnitudes de las galaxias. Aunque no se esperan que sean idénticas las magnitudes  $C_{model}$  y Petrosian, véase Strauss et al. (2002) donde describen que la apertura Petrosian excluye a las partes exteriores del perfil de la galaxia, especialmente para las galaxias elípticas.

Podemos ver en la figura 3.19 la representación del parámetro  $C_{model}$  para las cuatro regiones escogidas en este estudio cuantitativo. Observando la distribución acumulada y normalizada de  $C_{model}$  para las cuatro regiones podemos ver que mientras Abell 2065 y la zona intercumular muestran el mismo comportamiento para sus galaxias, CrB-H-*lz* presenta niveles inferiores en el número de galaxias en torno a  $15.8 \leq C_{model} \leq 16.3$  mag y entre  $16.7 \leq C_{model} \leq 17.7$  mag, pero es más significativo el descenso que muestra CrB-H-*hz* en todo el trazado de la curva, siendo sus galaxias menos brillantes que las del resto de las regiones comparadas.

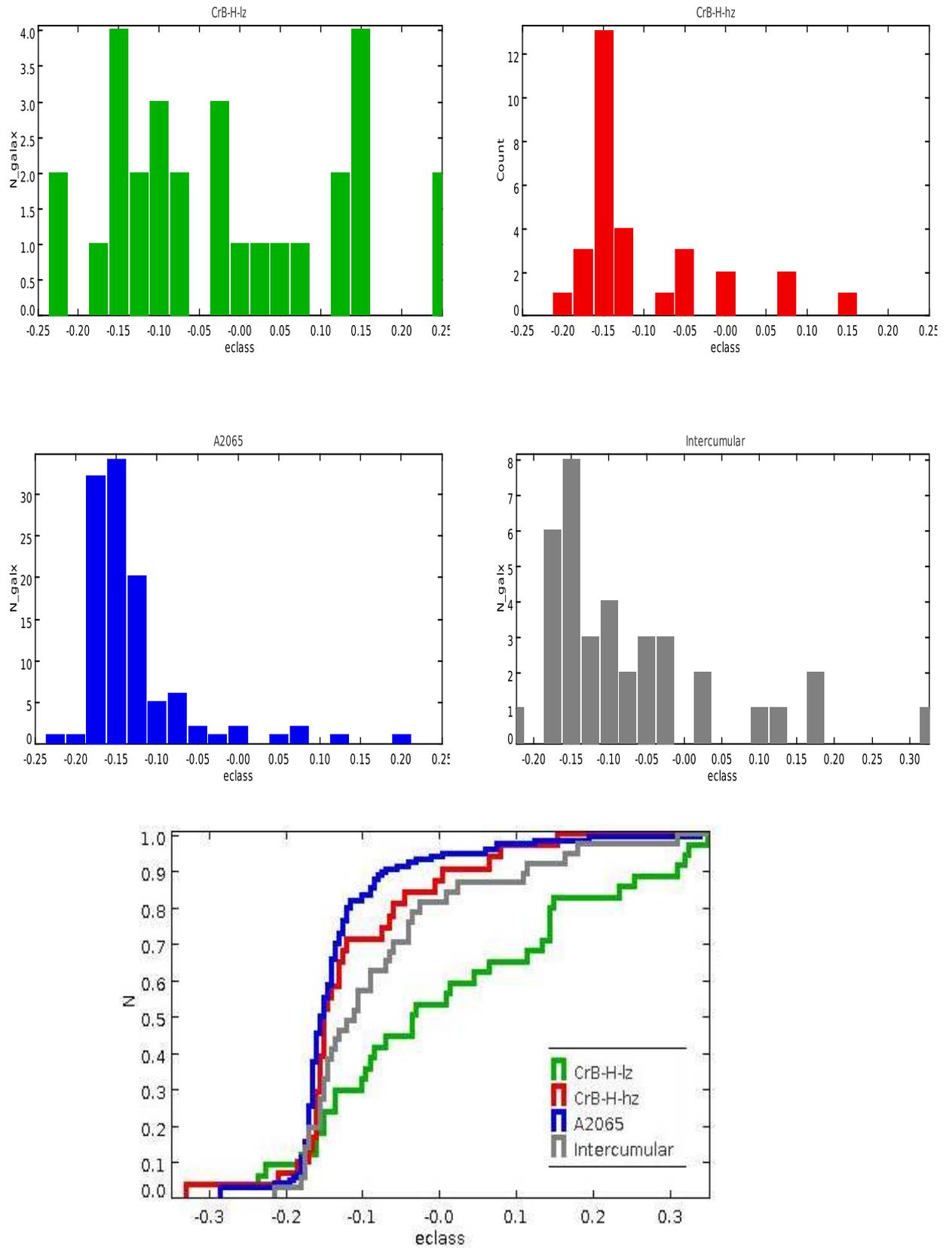


Figura 3.18: Relación  $eClass$  de las galaxias de CrB-H-lz, CrB-H-hz con las de Abell 2065 y una zona intercumular de CrB-SC (F2). Distribución acumulada y normalizada de  $eClass$ .

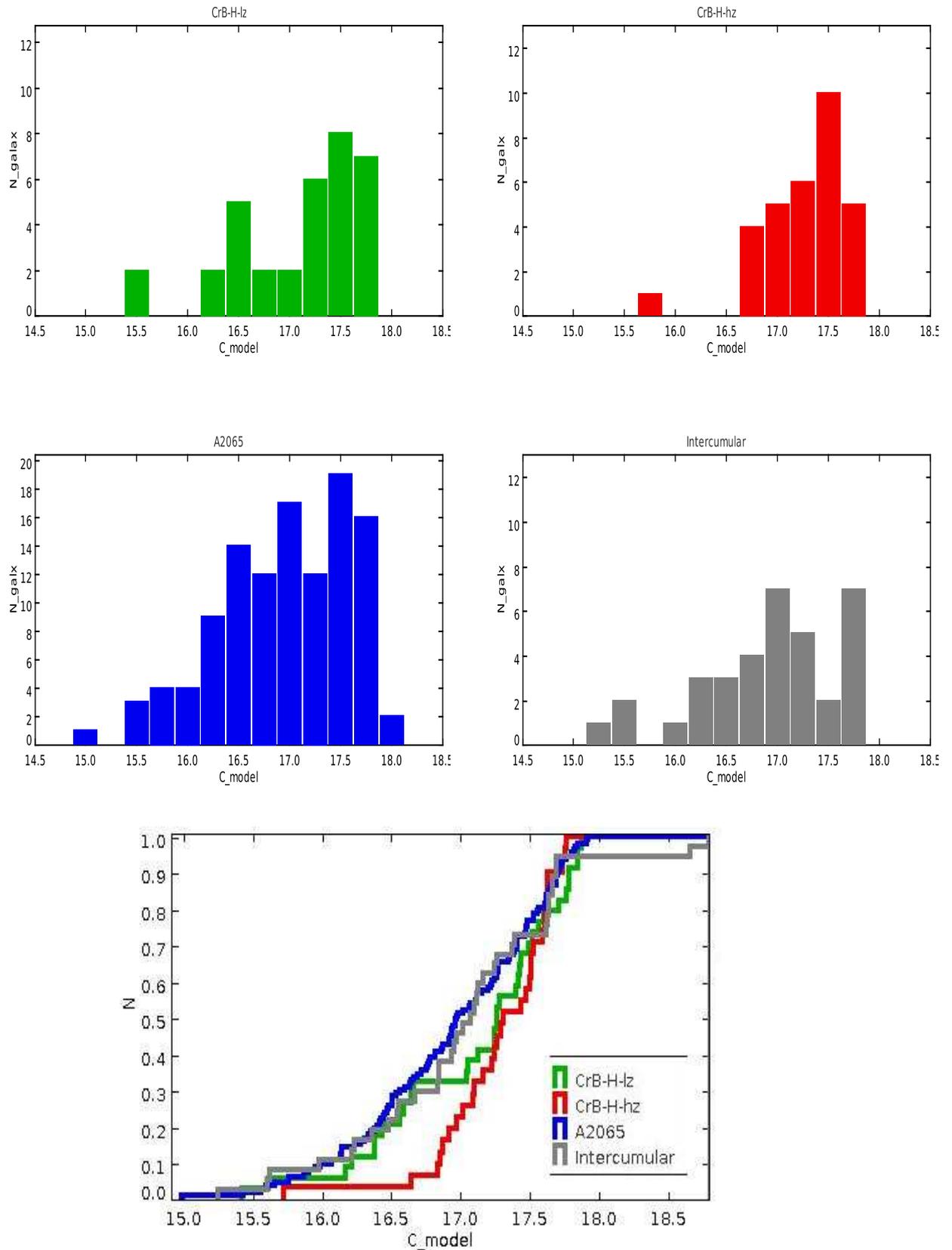


Figura 3.19: Relación  $C_{model}$  de las galaxias de CrB-H-lz, CrB-H-hz con las de Abell 2065 y una zona intercumular de CrB-SC (F2). Distribución acumulada y normalizada de  $C_{model}$ .

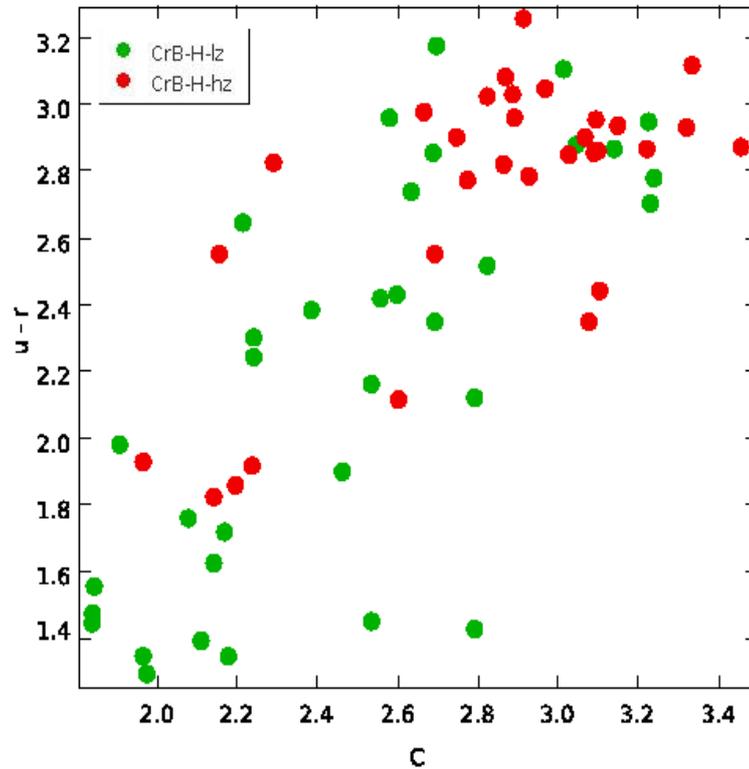


Figura 3.20: Relación  $C$  vs.  $u-r$  de las galaxias de CrB-H- $lz$  y CrB-H- $hz$

Poniendo en relación el parámetro de concentración de las galaxias con su color  $u-r$ , para los dos grupos situados en CrB-H, puede verse en la figura 3.20 que las galaxias de CrB-H- $lz$  están distribuidas en color en el rango  $1.4 \leq u-r \leq 3.2$  y con un parámetro de concentración amplio, que comprende desde  $1.8 \leq C \leq 3.2$  por lo que las galaxias de este grupo se distribuyen entre los grupos tardíos y tempranos indistintamente. Para el grupo CrB-H- $hz$  se encuentra una agrupación de galaxias que están concentradas en  $2.0 \leq u-r \leq 3.3$  y en  $C \geq 2.5$  que se atribuyen a galaxias de tipo tardío y que son el 80.6 % de las galaxias del grupo detectado a  $z=0.11$ .

### 3.5. Discusión

Se ha analizado la distribución de las galaxias con respecto al desplazamiento al rojo del decremento CrB-H, con el objetivo de explorar la posibilidad de que contenga una población de galaxias que tracen un filamento extendido a lo largo de la línea de visión o la presencia de un cúmulo de galaxias no detectado previamente en esta posición y que puedan aportar una contribución significativa a la disminución total observada de la temperatura del FCM a través del efecto SZ. Se han encontrado sobredensidades notables de galaxias alrededor de  $z=0.07$  y de  $z=0.11$  de CrB-H. Sin embargo, no encontramos evidencia que de pie a pensar en una conexión entre estas dos regiones. Por lo tanto, a partir de los datos

analizados debemos descartar la presencia de un filamento que pueda conectar estas dos regiones.

Con el fin de evaluar la importancia de las sobredensidades de galaxias detectadas en CrB-H-*lz* a bajo desplazamiento al rojo y en CrB-H-*hz* de alto desplazamiento al rojo, se ha realizado el estudio de la densidad de galaxias en regiones de 30 min. de arco<sup>2</sup> y  $\Delta z = 0.01$  en un volumen de  $94.8 \text{ grados}^2$  en la región de CrB-SC y entre  $z = 0.05$  y  $z = 0.12$ . Se encontraron, respectivamente, que sólo el 2.9% y el 2.1% de las celdas en el rango de desplazamientos al rojo de  $0.07 < z < 0.08$  y  $0.11 < z < 0.12$  son más densos que los correspondientes a CrB-H-*lz* y CrB-H-*hz*, respectivamente. Además, la mayoría de estas celdas están asociadas a cúmulos de galaxias Abell, lo que indica que, a su vez, CrB-H-*lz* y CrB-H-*hz* son unas de las regiones más densas de la región de CrB-SC.

La distribución de galaxias con respecto al desplazamiento al rojo para CrB-H-*lz* presenta una distribución ancha. La distribución de las galaxias para CrB-H-*hz* es más alta y estrecha, más parecida a la distribución de galaxias que presentan los cúmulos de galaxias Abell 2065 y Abell 2069. La distribución de la densidad radial para CrB-H-*lz* muestra un comportamiento más plano que el que presentan cada uno de los cúmulos Abell 2065 y Abell 2069 con los que se le ha comparado. Sin embargo, para CrB-H-*hz* esta distribución es más alta, con una densidad ligeramente superior en el centro. Esto indica que el CrB-H-*hz* podría tener algún grado de virialización, siendo este más bien discutible para CrB-H-*lz*.

Hemos tratado de evaluar las propiedades morfológicas de las galaxias que pueblan la zona de la mancha fría de VSA, CrB-H, comparando con zonas cumulares del propio supercúmulo, Abell 2065, y con zonas cumulares no ligadas a CrB-SC, como puede ser Abell 2069. A fin de caracterizar las propiedades morfológicas de las galaxias que habitan en las mismas, hemos relacionado también estas galaxias con las que pueblan zonas intercumulares de CrB-SC o zonas intercumulares situadas a desplazamientos al rojo de  $z = 0.11$ .

Pudimos comprobar cómo las zonas cumulares Abell 2065 y Abell 2069 están dominadas por galaxias de tipo temprano (E y S0-S9) en las zonas más internas. Lo mismo ocurre para CrB-H-*hz*, que tiene un comportamiento similar a estos cúmulos en cuanto a la fracción de galaxias E y S0-S9 que lo forman. Las zonas intercumulares y el propio CrB-H-*lz* están dominadas por población de galaxias de tipo tardío aunque en la mayor parte de los casos existe una presencia significativa de galaxias E y S0-S9, especialmente de este segundo tipo.

El estudio cualitativo y cuantitativo están en buen acuerdo en cuanto a estas pautas de comportamiento de la población galáctica si nos referimos, especialmente, a los cúmulos Abell 2065, Abell 2069 y el grupo CrB-H-*hz*. Con todo esto podemos decir, que el grupo de galaxias situado a  $z = 0.11$  en la mancha fría de VSA, CrB-H-*hz*, tiene comportamiento de cúmulo y las galaxias que lo pueblan son del tipo esperado en los núcleos de los cúmulos: de tipo temprano y con espectros que no muestran líneas de emisión.

En las zonas intercumulares y en CrB-H-*lz* una parte muy importante de las galaxias muestran espectros con líneas de emisión, que pueden ser indicativas de los episodios de formación estelar interna en las mismas, ya que las líneas más intensas son por lo general  $H_\alpha$  y de la serie de Balmer, junto con  $[NII] \lambda 6583 \text{ \AA}$  y  $[SII] \lambda 6717 \text{ \AA}$ . También se ven líneas de emisión  $[OII] \lambda 3727 \text{ \AA}$  y  $[OIII] \lambda 5007 \text{ \AA}$ .

No existe evidencia de que el grupo de galaxias CrB-H-*lz* situado a  $z \approx 0.07$  esté formado por un grupo de galaxias ligadas entre sí. Si bien las galaxias que pueblan la región presentan morfologías y colores similares a las que pueblan el cúmulo Abell 2065. En el caso del grupo

de galaxias CrB-H- $hz$  situado a  $z \approx 0.11$ , la relación entre las galaxias que pueblan la zona es más evidente, ya que se concentran en una misma región del diagrama color-color. El DCM que trazan estas galaxias es más estrecho en torno a la SR, existiendo, en ambos casos, mayor dispersión para las galaxias espirales de cada uno de los grupos.

Se observa que el grupo CrB-H- $lz$  no se comporta como un potencial cúmulo de galaxias, es poco probable que pueda provocar un decremento en el FCM de la amplitud que presenta CrB-H. CrB-H- $hz$  si que se trata de un potencial cúmulo, que podría contribuir al decremento observado. La morfología de las galaxias que pueblan este grupo son similares a las que pueblan Abell 2069.

# 4

---

## Nuevas observaciones espectroscópicas de CrB-H

Estas nuevas observaciones tuvieron como finalidad estudiar una población de galaxias más débiles que las presentes en el catálogo espectroscópico del SDSS aportando más profundidad y fiabilidad a la determinación de los desplazamientos al rojo derivados de la fotometría. Igualmente se realizó una exploración espectroscópica de la mancha, cubriendo zonas donde SDSS no ha tomado medidas por la imposibilidad de SDSS de colocar fibras en objetos muy próximos. Anteriormente, Small et al. (1997) habían realizado una exploración espectroscópica en una región de  $6^\circ \times 6^\circ$  centrada en CrB-SC usando el espectrógrafo multifibras Norris del Telescopio Hale de 5 m. Completaron un total de 23 campos, de ellos nueve estaban localizados entre los cúmulos de galaxias Abell 2061 y Abell 2067 midiendo un total de 1491 objetos que incluían estrellas y galaxias, 420 de ellos con una resolución de 8 Å y el resto con 4 Å. Determinaron que 1060 de las galaxias tenían desplazamientos al rojo mayores que el calculado para CrB-SC. Es preciso hacer un estudio profundo de la población de galaxias que pueblan la región de CrB-H, para ello se han considerado tres hipótesis. La primera es considerar que CrB-H es causado por la posible existencia de una estructura filamentosa que integrada en la línea de visión pueda ser capaz de provocar el decremento observado a 33 GHz. La segunda hipótesis considerada es la de encontrar en la misma línea de visión dos cúmulos de galaxias lo suficientemente masivos para dar esta señal SZ. Por último, se barajó la posibilidad de que la mancha de VSA pueda deberse a un efecto combinado entre una estructura filamentosa y un cúmulo no detectado aún por medios espectroscópicos y que se encuentre más alejado de CrB-SC.

### 4.1. Observaciones con el espectrógrafo multiobjeto AF2-WYFFOS

#### 4.1.1. Características del instrumento

AF2-WYFFOS<sup>1</sup> vio su primera luz en abril de 1995. Es un espectrógrafo multiobjeto de fibra óptica de gran campo que trabaja en el foco primario del 4.2 m WHT. El modo Echelle

---

<sup>1</sup><http://www.ing.iac.es/Astronomy/instruments/af2/>

se completó con éxito en agosto de 1998. La nueva cámara CCD de WYFFOS, de longitud focal 293mm de 4300 pixeles de  $13.5 \mu\text{mpix}^{-1}$ , fue instalada en julio de 2004, siendo más adecuada, que la configuración anterior del instrumento, para ofrecer un muestreo mayor. Se ofrece la posibilidad de utilizar las fibras de AutoFib2 en modo “*Small*”, es decir, que es posible colocar un número mayor de fibras en el campo, que repercute en un aumento significativo de la resolución espectral mediante la adopción de fibras con menor “resolución espacial”.

AF2/WYFFOS esta integrado por ciento cincuenta fibras útiles con un diámetro angular de 1.6 segundos de arco y diez fibras *de referencia*<sup>2</sup> que están destinadas a la observación de objetos de referencia que controlen la posición del campo observado en el cielo. El posicionamiento de las fibras de ciencia tiene sus limitaciones debido al tamaño del posicionador de las mismas. No pueden colocarse a menos de 25 segundos de arco entre sí y no se pueden cruzar para acceder a los objetos. Las fibras son colocadas minuciosamente dado el escaso margen de error que un diámetro tan pequeño permite.

El campo de visión puede llegar a ser de un grado de diámetro, pero existe viñeteo a partir de un radio de 20 minutos de arco desde el centro, y a partir de los 25 minutos de arco la calidad de las imágenes es pobre. Las fibras tardan en posicionarse unos 20 minutos de tiempo gracias al nuevo software AF2 PC y Linux.

#### 4.1.2. Criterios previos a la selección de objetos

El primero de los criterios que debemos adoptar está relacionado con la selección de los objetos, debido a restricciones impuestas por el sistema telescopio-espectrógrafo. La primera será la magnitud de los objetos. La magnitud límite del espectrógrafo es  $r_{lim} \approx 19.0$  para objetos puntuales con  $S/R \geq 10$  por pixel en exposiciones de 25 minutos para la red R300B, y  $r_{lim} \approx 19.5-20.0$  mag para el mismo tiempo y relación  $S/R$  para la red R158R. Las dos redes de difracción mencionadas serán las utilizadas en nuestras observaciones.

El segundo de los criterios está relacionado con la posición de los objetos en el cielo. Debido a que el área que ocupa la fibra subtendida en el cielo es pequeña, los objetos elegidos deben tener calculadas sus coordenadas con buena precisión, pues una vez construida la configuración que se requiere para cada campo de observación no se puede cambiar el apuntado de una única fibra, ya que implica o bien la pérdida de la misma para la observación o que el movimiento de la fibra pueda provocar un desplazamiento de las demás. Se eligieron en primer lugar las coordenadas del catálogo fotométrico del SDSS, que fueron correlacionadas con las que se publican en el catálogo astrométrico “*USNO-B1.0*”<sup>3</sup>. La precisión espacial de “*USNO-B1.0*” es de 0.2 segundos de arco para las posiciones medidas a J2000, mientras que para AF2-WYFFOS se necesitaba una precisión espacial de 0.4 segundos de arco según indica el manual del instrumento.

Una vez construido el catálogo de los objetos medibles en cada uno de los campos seleccionados, se procedió con el corte en magnitud y a hacer la correspondiente localización

---

<sup>2</sup>Fibras de referencia = fibras preferentes, destinadas a la adquisición de estrellas de campo con el objetivo de mantener el campo de observación centrado y en seguimiento durante el proceso de adquisición de imágenes del mismo.

<sup>3</sup>“*USNO Image and Catalogue Server*”, Monet et al. (2003). Este es el último catálogo del proyecto USNOFS PMM. Contiene más de  $10^9$  posiciones, magnitudes y movimientos propios de cada objeto. Los datos procedentes de este catálogo pueden obtenerse en <http://www.nofs.navy.mil/data/fchpix/>

visual con “*Gaia*”<sup>4</sup> o “*Skycat*”<sup>5</sup>. Otro parámetro a tener en cuenta en la elección de los objetos es la separación mínima entre ellos que, como ya se ha mencionado, en el caso de AF2-WYFFOS es de 25 segundos de arco. Véase la figura 4.1 como ejemplo de uno de los campos estudiados, y los objetos seleccionados en el mismo siguiendo los criterios previos.

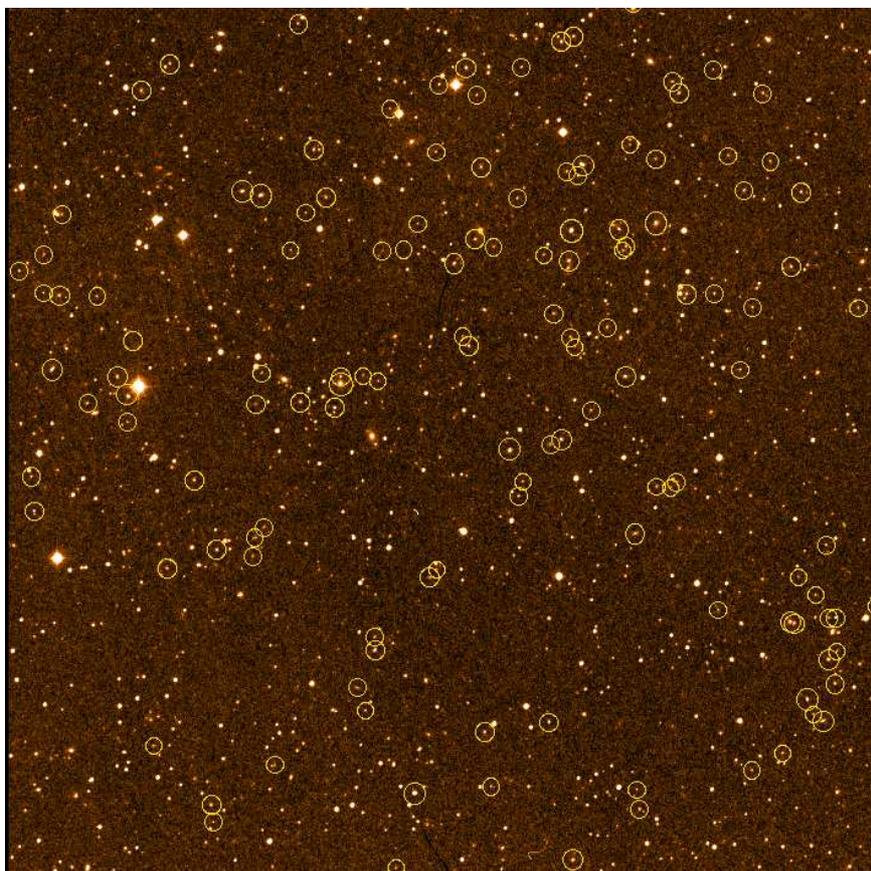


Figura 4.1: Selección de objetos candidatos a la observación con AF2-WYFFOS desde la aplicación *Gaia*. La imagen representa el campo de  $40' \times 40'$  centrado en CrB-H, los objetos rodeados con un círculo amarillo son aquellos que cumplen los criterios de color, de magnitud y proximidad requeridos.

### 4.1.3. Procedimiento para configurar los campos de observación

El proceso de obtención de la configuración de los objetos para cada campo es laborioso y debe ser preciso por las razones esgrimidas en la sección anterior. Además del criterio espacial y astrométrico adecuado, es necesario manejar las herramientas que permiten optimizar las configuraciones finales de objetos para ser observadas. El proceso general se describe a continuación:

<sup>4</sup><http://star-www.dur.ac.uk/~pdraper/gaia/gaia.html>

<sup>5</sup><http://archive.eso.org/cms/tools-documentation/skycat>

- Se seleccionan los objetos dentro de un radio de 20 minutos de arco para evitar viñeteos (véase la sección 4.1.1).
- Se crean tablas con el nombre de cada objeto y las coordenadas exactas del mismo, medidas con una precisión tal que su error sea menor de 0.5" de arco. La tabla debe contener la información de la magnitud y la información de si el objeto debe de caer en una fibra científica, o en una fibra de referencia. Por último, la tabla también debe poseer un orden de prioridad de observación para los objetos descritos en el fichero. Esta tabla contiene, por tanto, la información necesaria de todos los candidatos medibles en la zona, además de la información de los objetos de referencia que serán necesarios para el guiado del telescopio en la observación. Estos ficheros terminan con la extensión \* .fld y serán los ficheros de entrada del programa de configuración propio del AF2-WYFFOS.
- Una vez creadas las tablas de objetos para cada campo, damos la entrada al programa `af2_configure` diseñado para crear los ficheros que relacionan los objetos que se van a observar durante una exposición en AF2-WYFFOS y las fibras que transportan los fotones hasta el detector. Para hacerlo funcionar correctamente es necesario contar con los ficheros `small_fibres.dat` y `wht_prime.dat`. El primero es un fichero de información de las fibras y el segundo está relacionado con la información del telescopio. Ambos son proporcionados por la página web del instrumento.
- Ejecutando `af2_configure` se obtienen los ficheros de salida con el sufijo \*.cfg.i donde i se refiere al número de la configuración requerida, es decir, la primera, segunda o tercera, dependiendo del grado de satisfacción final del observador con la configuración de objetos obtenida. Como ejemplo del proceso interactivo que permite el programa `af2_configure` podemos ver los paneles de la figura 4.2.
- Una vez diseñada la configuración de la observación se genera el fichero definitivo que será la entrada del programa guía del instrumento en el telescopio. En concreto, para optimizar el número de fibras en juego con el número de objetos que se observan en el campo, se ha escogido un sistema de pesos máximos pivotando el ángulo de posición de grado en grado desde 0° hasta 360°. El fichero aporta toda la información necesaria del objeto que se observará y sobre qué fibra va a caer, así como el orden de prioridad, la magnitud y el nombre del mismo. Se puede encontrar un ejemplo en el apéndice B, sección B.2.
- En el fichero anterior las fibras precedidas de la palabra *PARKED* se refieren a las fibras que no van a tomar parte en la observación y por lo tanto están aparcadas. Las fibras con la etiqueta *DISABLE* localizan aquellas fibras que por una razón u otra no son válidas para observar. Las que presentan una etiqueta *PLACE\_XY* están señalando aquellas fibras puestas manualmente, es decir, no las ha elegido el programa sino que se han introducido a posteriori bien porque se destinen a medir el cielo circundante en el campo de observación, bien porque podrían caer sobre un objeto cercano que el programa no ha considerado dado el parámetro de prioridad que se le otorgó en el fichero de configuración inicial. Las fibras señaladas con una *F* en la línea de comandos son las destinadas a las estrellas de guiado. El fichero se reserva una serie de líneas para recordar objetos de referencia de reserva, numeradas desde 901 – 904.

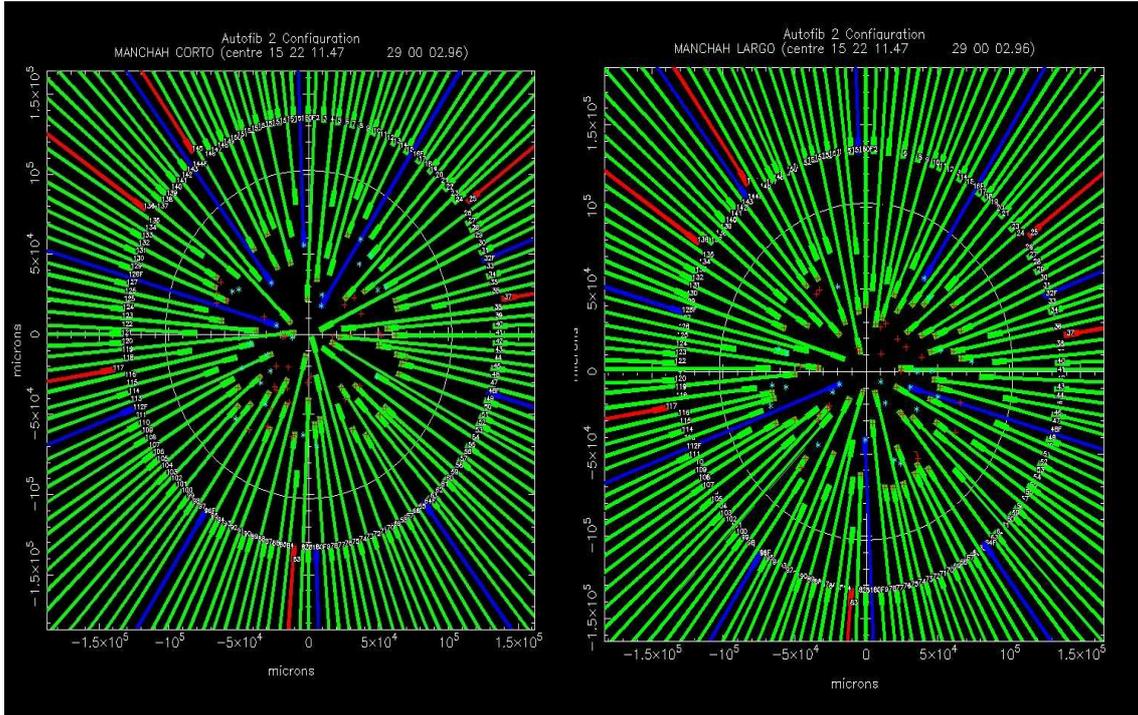


Figura 4.2: Configuraciones de fibras utilizadas en uno de los campos con AF2-WYFFOS. **Dcha:** Distribución de las fibras del espectrógrafo sobre la proyección de los objetos en el campo de visión del mismo para CrB-H para la configuración de prioridad máxima en el orden de observación. **Izqda:** Distribución de las fibras del espectrógrafo sobre la proyección de los objetos en el campo de visión del mismo para CrB-H para la configuración de segundo orden en la prioridad de observación. **Ambas:** Las fibras marcadas en color rojo representan las fibras que están fuera de servicio. Las fibras en color azul señalan objetos de referencia o estrellas de guía elegidas sobre el campo de observación. Las fibras señaladas en verde son las fibras de ciencia, es decir, las que van a tomar el espectro del objeto o cielo.

- Una vez establecida la configuración de los objetos del campo, el programa de configuración, `af2_configure`, permite la opción de utilizar un nuevo fichero catálogo de objetos obtenido a partir del original de sufijo `*.fld`, donde le cambia el orden de prioridad “P” a los objetos considerados en la configuración previa a “P 0” para evitarlos en una segunda configuración del campo de modo que no tengamos objetos doblemente medidos en configuraciones diferentes sobre una misma zona. Estos nuevos ficheros tienen como sufijo al nombre original `*_nff.fld`.

## 4.2. Observaciones

Las observaciones de CrB-H en el Telescopio William Herschel con el espectrógrafo multiobjeto AF2-WYFFOS tuvieron lugar en Junio de 2006, Mayo de 2007 y Mayo de 2008. Las tres campañas de observación se encuentran resumidas en la tabla 4.1.

En las observaciones de Junio de 2006, se utilizó la red de difracción  $R158R$  de baja resolución. Esta red proporciona un muestreo de  $\sim 5.8 \text{ \AA}/pix$ , ( $2.9 \text{ \AA}/pix \times 2$  ya que es usada

Tabla 4.1: Tabla resumen de las observaciones realizadas para CrB-SC con el espectrógrafo multifibra AF2-WYFFOS

Fecha	$N^\circ$ noches útiles	Red	rango espectral (Å)	Muestreo (Å)	$N^\circ$ objetos observados/medidos	seeing medio (arcsec)	$\tau_{exp}$ (seg)
Junio 2006	1	R158R	3500-9000	$\sim 5.8$	149/71 (48) %	1.0	1500 (on) 300 (off)
Mayo 2007	1	R300B	3000-9000	$\sim 3.2$	285/219 (77) %	0.9	1500 (on) 300 (off)
Mayo 2008	2	R300B	3000-9000	$\sim 3.2$	177/125 (71) %	0.9	1500 (on) 2400 (on)

en el modo de *bin*  $2 \times 2$  de la cámara CCD). La cobertura espectral proporcionó las líneas de Balmer en emisión y las líneas de [OII], [OIII], el doblete de [SII] y [NII] entre otras. Además proporcionó otra serie de líneas en absorción, siendo las más significativas,  $H_\beta$ ,  $H_\gamma$ ,  $MgI$ ,  $NaI$  y el salto de Balmer. Las galaxias más débiles de esta parte de las observaciones fueron de magnitud  $r \leq 18.5$ . Se midieron un total de 149 objetos, de los cuales sólo se pudo determinar el desplazamiento al rojo de 71, debido a que resultó difícil encontrar algunas de las características espectrales propias de las galaxias de Corona Borealis, en las que a  $z=0.07$  el  $MgI$  y el  $NaI$  coinciden en longitud de onda con las líneas de emisión del cielo, OI a  $5577\text{Å}$  y  $6300\text{Å}$ . En esta campaña contábamos con tres noches de las cuales sólo fue posible observar en una debido al mal tiempo meteorológico.

En la campaña de Mayo de 2007, se decidió utilizar la red de difracción *R300B* con el mismo espectrógrafo AF2-WYFFOS. Con esta nueva red, que proporciona una dispersión nominal de  $\sim 3.2 \text{ Å /pix}$  ( $1.6 \times 2 \text{ Å /pix}$ ), se usó un bin  $2 \times 2$  en el detector. Aunque ambas redes *R158R* y *R300B* cubren prácticamente el mismo rango espectral, la diferencia entre ellas viene determinada por una mayor sensibilidad en el azul por parte de la segunda. En este caso, la mayor sensibilidad alrededor de los  $4000 \text{ Å}$  permitió medir líneas de emisión de Balmer además de [OII] y [OIII], [NII] y [SII]. También fue posible tomar medidas de las líneas de absorción de CaII H y K,  $H_\beta$ ,  $H_\gamma$ ,  $H_\alpha$ ,  $MgI$ ,  $NaI$  y la banda *G*. En esta campaña se observó un total de 285 galaxias para las que se ha podido determinar el desplazamiento al rojo de 219. Solamente fue posible observar una noche debido a problemas técnicos del telescopio, por lo que el tiempo del programa se redujo al 50 % de lo previsto. El tiempo de exposición utilizado en este caso fue de  $\tau_{exp} = 1500$  segundos en la configuración en modo ON, es decir, medición de los objetos propiamente apuntados y de  $\tau_{exp} = 300$  segundos de la configuración en modo OFF, como método para la eliminación del cielo medio en cada fibra. El tiempo invertido en apuntados y configuración del campo se estimó en  $\tau_{offset} \approx 1500$  segundos. En total se requirió una hora por campo observado.

En campaña de observación de Mayo de 2008 se utilizó nuevamente la red *R300B*. La estrategia seguida en esta campaña se diferenció de las anteriores en que la magnitud límite de observación llegó hasta  $r < 21.0$ . Se tomaron configuraciones de objetos con tiempo de exposición corto,  $\tau_{exp} = 1500$  segundos, para objetos de magnitud  $r \leq 17.5$  y otras configuraciones con tiempo de exposición largo,  $\tau_{exp} = 2400 \text{ s} \times 4$ , para las galaxias en un rango de magnitudes de  $17.6 < r \leq 21.0$ . En esta campaña se observaron un total de 177 galaxias diferentes. En total se pudo determinar el desplazamiento al rojo de 125 de ellas. Para esta

Tabla 4.2: Relación de galaxias con desplazamiento al rojo espectroscópico medido por SDSS-DR7 y por AF2-WYFFOS

AR (grados)	DEC (grados)	$z_{SDSS}$	$z_{WYFFOS}$	$\Delta z$
230.747792	29.298181	0.0753	0.0762	-0.0009
231.084842	29.119192	0.0736	0.0733	0.0003
231.107125	29.201725	0.0781	0.0779	0.0002
231.170438	29.329322	0.0588	0.0595	-0.0007
231.034404	29.416697	0.1507	0.1506	0.0001
231.134883	29.576433	0.1106	0.1097	0.0009
231.106779	29.587208	0.0317	0.0316	0.0001
230.710900	29.588547	0.0739	0.0750	-0.0011
230.674038	29.493344	0.0741	0.0745	-0.0004
230.640508	29.466622	0.0748	0.0746	0.0002
231.496054	29.053431	0.1741	0.1741	0.0000
231.447608	28.996519	0.0691	0.0676	0.0015

campana se concedieron dos noches de telescopio que se aprovecharon en un 80% ya que la segunda noche sufrimos problemas técnicos que se resolvieron después de varias horas. Las observaciones se diseñaron de tal manera que la señal-ruido límite por pixel para las galaxias medidas fuese al menos del orden de  $S/R \sim 10$ .

#### 4.2.1. Criterio de selección de la muestra de galaxias

En ninguna de las tres campañas se han repetido objetos. Los objetos fueron seleccionados del catálogo fotométrico de las galaxias SDSS-DR5 para la primera campaña de observación y más tarde del SDSS-DR6 para la segunda y tercera campaña de observaciones. Sólo las regiones de declinación más alta del Supercúmulo de Corona Borealis habían sido cubiertas con espectroscopia por el SDSS en esa fecha. De hecho, algunas de las galaxias observadas por el SDSS se utilizaron como comprobación de la fiabilidad de nuestro método de determinación de desplazamientos al rojo. La comparación entre ambas determinaciones se muestra en la tabla 4.2 y en la figura 4.3.

Para construir el catálogo principal de las galaxias observables en la primera y segunda campaña de observaciones se decidió dividir el campo cercano a CrB-H en cinco zonas distintas. Se eligieron las galaxias que cumplieran con los criterios de  $r \leq 18.5$  y el criterio de color  $0.2 \leq r - i \leq 0.6$ , que determina la Secuencia Roja de las galaxias del DCM de CrB-SC. También se exigió que las galaxias cumplieran el criterio del error fotométrico permitido ya explicado en la sección 2.1 y representado en la figura 2.1.

Para la última campaña de observación, se eligieron todas las galaxias hasta magnitud  $r \leq 21.5$  para las que no se había podido determinar el desplazamiento al rojo en la zona de CrB-H en observaciones anteriores. En este caso, las galaxias fueron seleccionadas sin tener en cuenta el criterio de selección de color.

La figura 4.4 muestra la selección de galaxias escogidas para la última campaña. En color azul claro se han representado aquellas que tienen una determinación de desplazamiento al rojo espectroscópica medida en SDSS-RD6. En color naranja se dibujan las galaxias

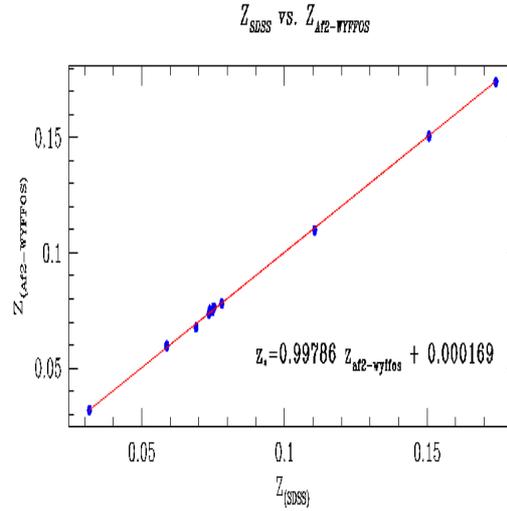


Figura 4.3: Comparación existente entre la determinación de los desplazamiento al rojo espectroscópicos de galaxias del CrB-SC en común entre SDSS-DR5 y AF2-WYFFOS durante las dos primeras campañas de observación.

medidas en las dos campañas anteriores aunque muchas otras galaxias se midieron fuera de la región representada. Por último, el color negro representa a las galaxias elegidas para la observación de esta última campaña.

En la figura 4.5 podemos observar el amplio número de galaxias para las cuales se determinó el desplazamiento al rojo en la zona del decremento del FCM, CrB-H. La figura muestra un total de 415 desplazamientos al rojo medidos con AF2-WYFFOS para CrB-H y 62 para el cúmulo Abell 2065, representados con un símbolo en forma de estrella en la figura. En la misma figura se representan, con un pentágono sólido como símbolo, los datos que el SDSS había medido y liberado en la zona de CrB-SC antes de Noviembre de 2008, fecha en la que se hizo pública la última liberación de datos, *SDSS-DR7*.

#### 4.2.2. Reducción de datos

La reducción de los datos obtenidos con AF2-WYFFOS en CrB-SC, se desarrolló utilizando las tareas de IRAF<sup>6</sup> asociadas para la reducción y extracción de los espectros de espectrógrafos multifibras. Debido a que AF2-WYFFOS no posee una cadena de reducción propia, después de comparar varias como *dofiber*, *xcsao*, *doargus*, o *dofoe*, se trabajó con *dohydra* por simplicidad y manejo. En concreto para este trabajo se ha utilizado el paquete IRAF *Dohydra*, que ha sido optimizada para el espectrógrafo multifibras *Hydra* y *Nessie* del *Kitt Peak National Observatory* (KPNO)<sup>7</sup>.

**Dohydra** es una tarea de reducción especializada en restar luz difusa, hacer la extracción del espectro, corregir de iluminación uniforme (“flat-field”), hacer la corrección de rendimiento de fibra o “*throughput*”, realizar la calibración en longitud de onda y la elimi-

<sup>6</sup><http://iraf.noao.edu/>

<sup>7</sup><http://www.noao.edu/kpno/>

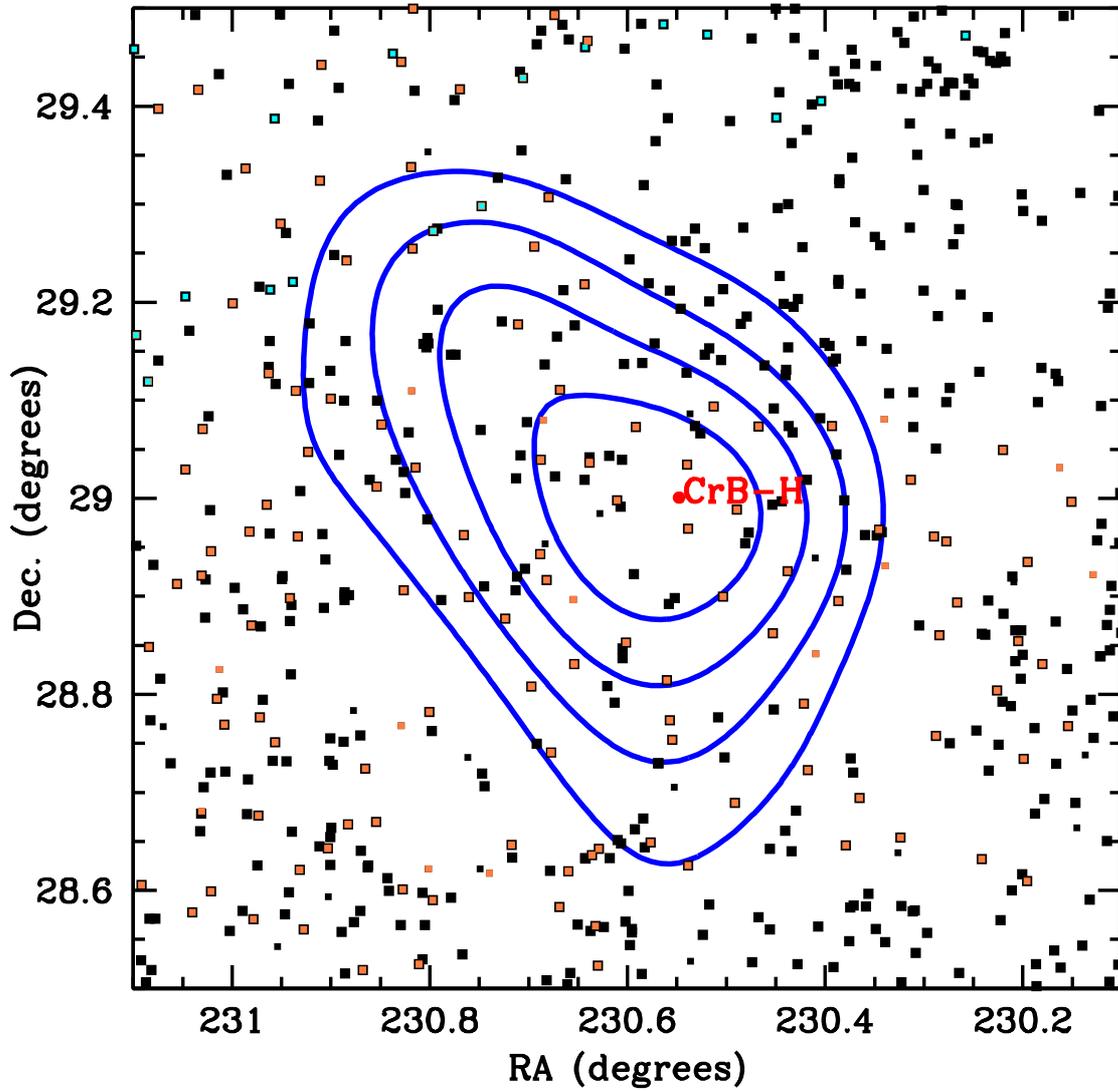


Figura 4.4: Comparación de galaxias observadas con AF2-WYFFOS en el campo de CrB-H. El color azul claro representa a galaxias con espectroscopia medida en SDSS-DR6. En color naranja se muestran las galaxias medidas en las campañas 2006 y 2007 de WYFFOS. Por último, en color negro se muestran las galaxias consideradas en la construcción de las configuraciones de la campaña 2008. Se han observado también otras galaxias en las campañas 2006 y 2007, pero se encuentran fuera de la zona de máxima probabilidad de la mancha H.

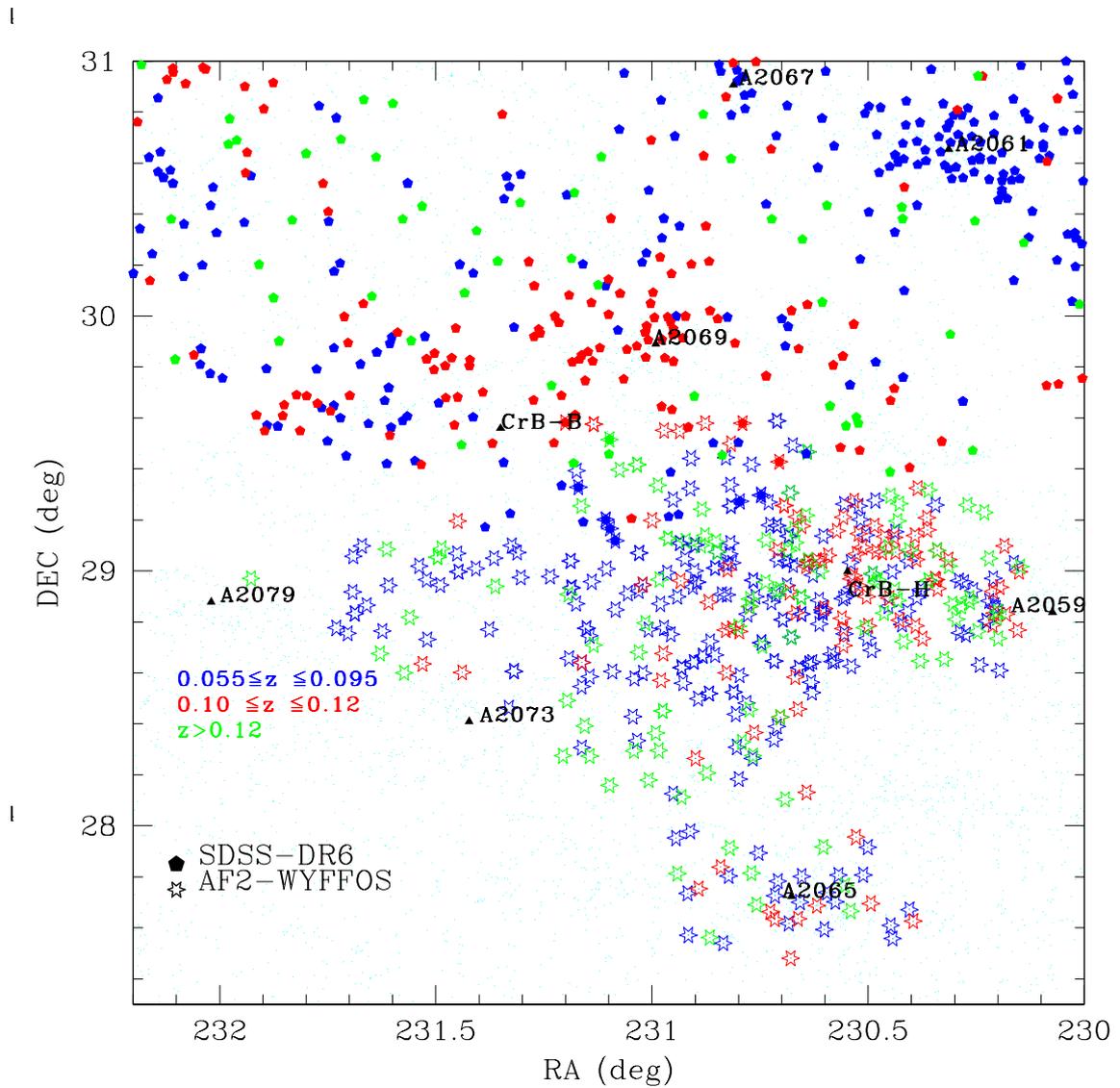


Figura 4.5: Representación espacial de las galaxias para las cuales se determinó el desplazamiento al rojo con espectroscopia de AF2-WYFFOS, con un símbolo en forma de estrella. Con el símbolo pentagonal se representan las galaxias que había medido espectroscópicamente SDSS-DR6, y con puntos de color azul claro se representan las galaxias que poseen medidas fotométricas en el catálogo del SDSS-DR6 y candidatas a estudio. En diferentes colores azul oscuro, rojo y verde se representa el rango de desplazamiento al rojo al que pertenece cada galaxia.

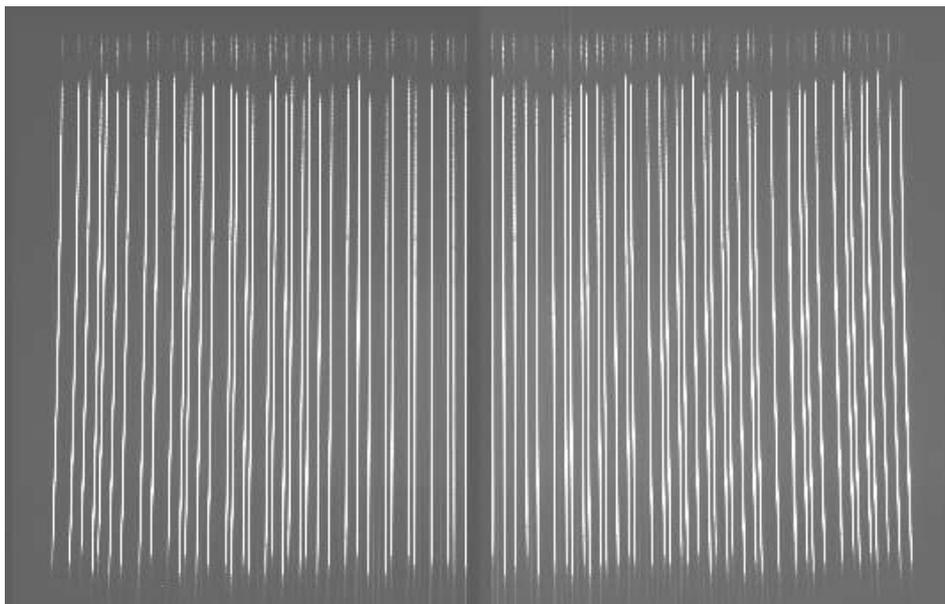


Figura 4.6: Imagen directa del telescopio de una de las configuraciones de objetos obtenidas con AF2-WYFFOS. Se trata de una imagen de *campo plano* utilizada como corrección para el campo y como medida de la transmisión.

nación del cielo del espectro. Es un lenguaje de comandos o “scripts” que reúne y combina las funciones y los parámetros de muchas funciones existentes previamente en IRAF, y que se han incluido en este paquete como parte de un todo. La tarea proporciona un grado de flexibilidad muy amplio para la automatización y el mantenimiento de registros, necesarios cuando se trata de la gran cantidad de datos generados por estos instrumentos multifibras.

Las imágenes obtenidas con el telescopio, véase la figura 4.6 como muestra, sufrieron un proceso previo de corrección de corriente de oscuridad (darks) y permitió eliminar muchos de los defectos de la cámara CCD, principalmente en el segundo de los chips. Se les aplicó además la corrección de cero electrónico (bias), de iluminación uniforme (flatfield), y se combinaron aquellas imágenes que lo requirieron, por ejemplo las imágenes tomadas para aquellos objetos que tenían magnitudes entre  $17.5 < r \leq 21.0$ . Posteriormente, se trataron con **dohydra** y se extrajo el espectro de cada uno de los objetos en una única imagen multiobjeto.

La eliminación del cielo de los objetos se realizó tomando un cielo medio del campo y haciendo la sustracción del mismo. Anteriormente a la utilización de esta técnica de corrección del cielo, se tomaron imágenes de OFF, es decir, la misma configuración usada para los objetos pero desplazada al menos  $10'$  de arco en el cielo, lo que nos ofrecía un cielo para cada objeto, pero el escalado y la sustracción del mismo incluía mucho ruido en la imagen resultante, por lo que se optó por utilizar las fibras que se habían dispuesto en cada configuración al cielo y se obtuvo un cielo promedio que se utilizó para corregir.

La calibración en longitud de onda se llevó a cabo objeto por objeto utilizando como referencia una imagen combinada de un espectro de la lámpara de Helio y otro de Neón

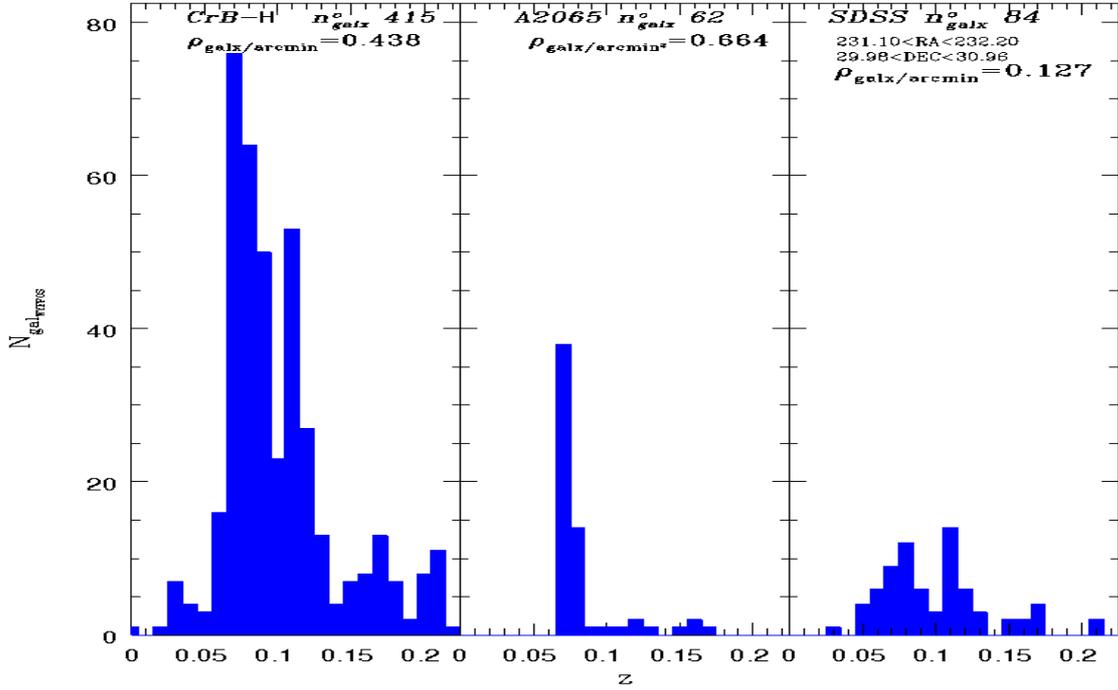


Figura 4.7: Histograma del desplazamiento al rojo de las galaxias medidas en CrB-SC con AF2-WYFFOS. **Izqda:** CrB-H ; **Centro:** Abell 2065, ambos medidos con AF2-WYFFOS y **Dcha:** zona intercumular medida con el SDSS-DR6.

tomada en cada configuración de campo para corregir apropiadamente. La combinación de ambas lámparas permitió calibrar cada uno de los espectros en un amplio rango espectral, desde los 3888 Å a los 8945 Å aproximadamente, la incertidumbre de la calibración varía entre los  $\sim 0.3\text{\AA}$  y los  $\sim 0.5\text{\AA}$  para las redes R300B y R158R respectivamente.

### 4.3. Resultados

#### 4.3.1. Primeros resultados

Los resultados obtenidos para la zona del supercúmulo de Corona Borealis medida con AF2-WYFFOS pueden verse en la figura 4.7. La figura muestra el histograma del desplazamiento al rojo que presentan las galaxias medidas en distintas zonas del supercúmulo. En el panel de la izquierda se presentan las 415 galaxias medidas con AF2-WYFFOS en la zona CrB-H. Se observa que existen dos máximos pronunciados en la distribución de las galaxias. Estos máximos están situados a  $z=0.07$  y a  $z=0.11$ . Se observa que el situado a  $z=0.07$  es ancho y se encuentra repartido a lo largo de 3 secciones o tramos, lo cual podría ser un indicador de que las galaxias que pueblan la zona se pudieran concentrar en una estructura extensa. El segundo de los máximos del histograma de la figura 4.7 (Izqda.) se encuentra situado en  $z=0.11$  y está directamente relacionado con la estructura que se encuentra a

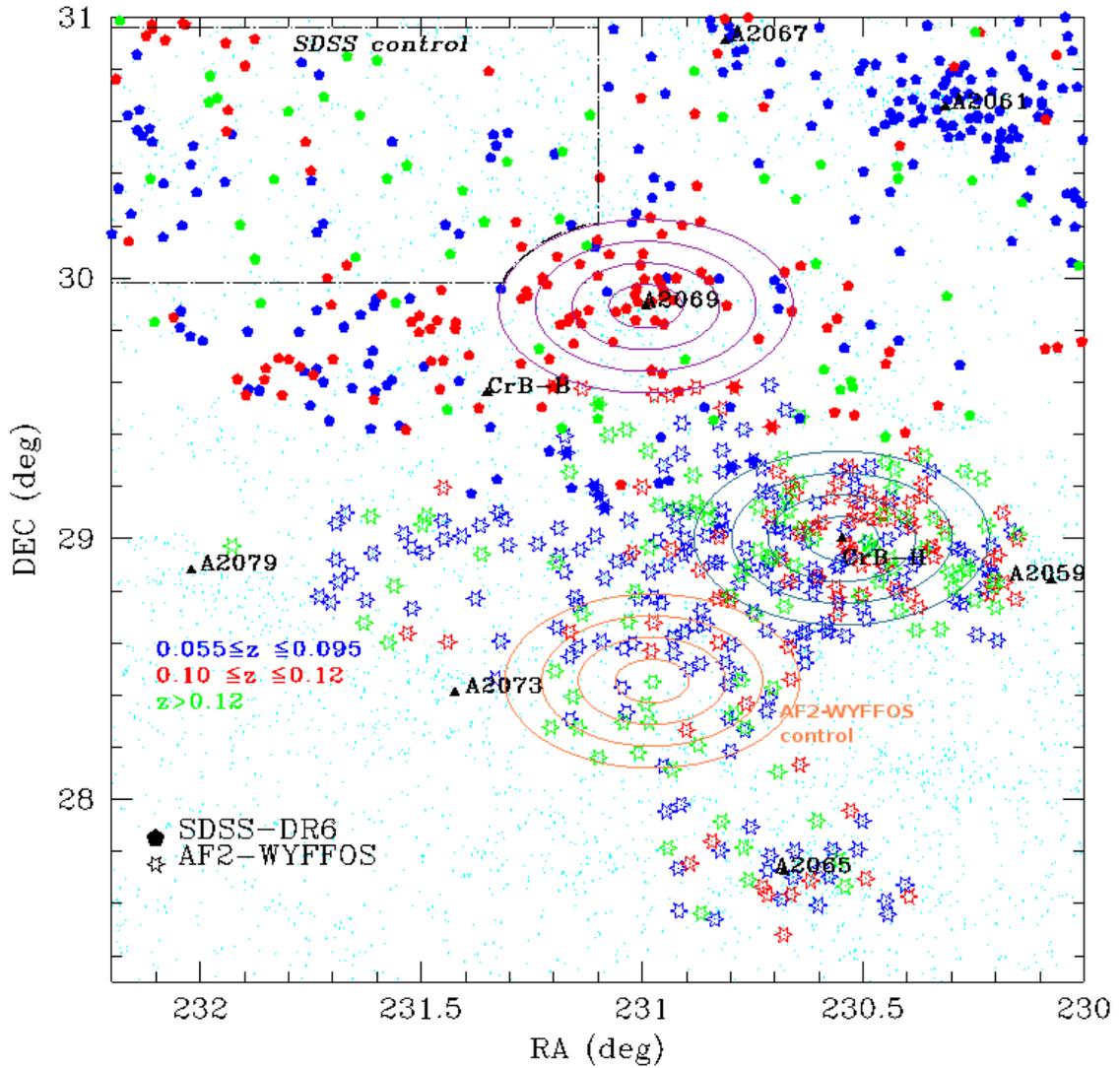


Figura 4.8: Distribución espacial de las galaxias para las que se determinó el desplazamiento al rojo con espectroscopia de AF2-WYFFOS, representados con el símbolo de estrella. Con pentágonos se representan las galaxias medidas espectroscópicamente por el SDSS-DR6. En los colores se aplican las mismas convenciones que las descritas para la figura 4.5. En la zona superior izquierda se aprecia el campo de control de SDSS utilizado en la figura 4.7. Se señalan las zonas centradas en CrB-H (azul), de control (naranja) y Abell 2069 (magenta oscuro).

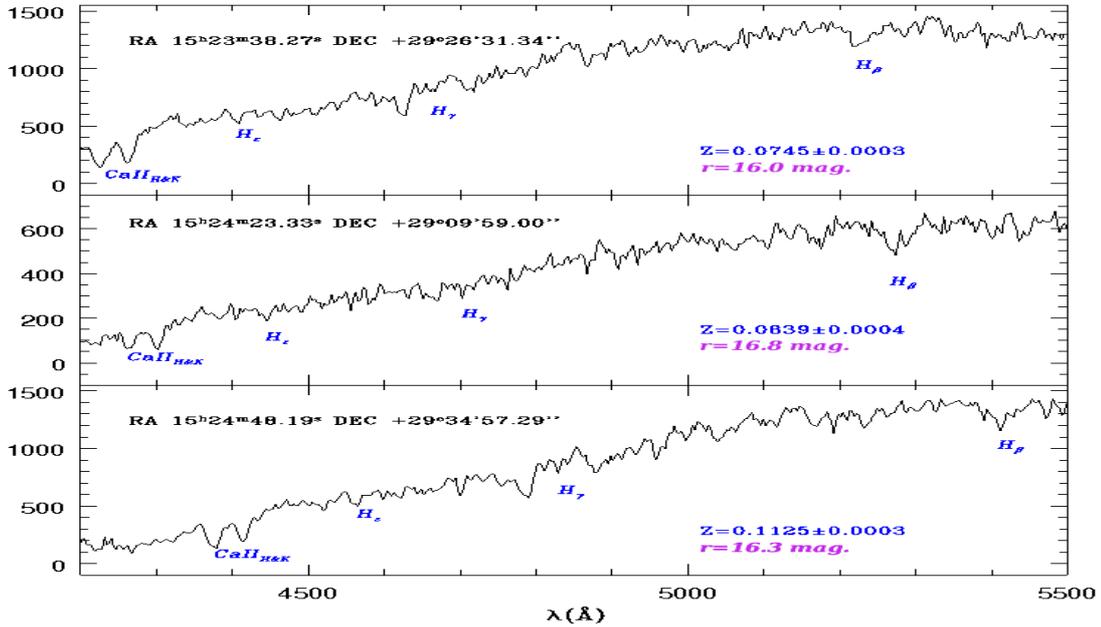


Figura 4.9: Ejemplos de espectros de galaxias a  $z=0.07$ ,  $z=0.08$  y  $z=0.11$  observados con AF2/WYFFOS. En todas son importantes la presencia de las líneas de Balmer,  $H_\epsilon$ ,  $H_\gamma$ ,  $H_\beta$  y de forma muy intensa las líneas del doblete de CaII H y K a  $\lambda_0 = 3933.68\text{\AA}$  y  $\lambda_0 = 3968.49\text{\AA}$

este desplazamiento al rojo y que se ha denominado anteriormente como Abell 2069-SC, véase 1.2.1. En el histograma se ve, sin embargo, que la estructura es menos ancha que la presente a  $z=0.07$  y tan sólo ocupa un tramo del mismo, lo que se compara bien con el histograma que se presenta para un cúmulo típico de la zona, Abell 2065, en el panel central. Ello sugiere la posible presencia de un cúmulo previamente no detectado en la zona. Por último, en el panel derecho de la figura 4.7 se ha representado una zona intercumular como control de las galaxias en la zona CrB-H, y que habían sido medidas por el SDSS-DR6. Se trata de comparar la distribución en tramos de  $z$ , con el fin de conocer la distribución de las galaxias presentes en las distintas zonas, las galaxias han sido elegidas bajo el mismo criterio de magnitud y colores que se utilizó para hacer la selección de galaxias observadas con AF2-WYFFOS. Concentramos el estudio en CrB-H en un radio de  $30'$  de arco, y en otra región utilizada a modo de control, también se ha representado la distribución de las galaxias del cúmulo Abell 2069. Estas regiones están representadas en la figura 4.8.

Como ejemplo del aspecto que presentan los distintos espectros de las galaxias medidas en CrB-H con AF2-WYFFOS podemos observar la figura 4.9 en la que se muestran espectros típicos para las galaxias de cada uno de los máximos más intensos presentados en la figura 4.7 (derecha). Los desplazamientos al rojo han sido medidos utilizando la posición relativa de algunas de las líneas tanto en emisión como en absorción presentes en el espectro de las galaxias con respecto a la posición que tendrían en el vacío. Se ha tomado como valor  $\lambda$  el pico gaussiano de la línea seleccionada, a partir ella, se asocia un desplazamiento al rojo  $z$

calculado mediante  $z = \frac{\lambda - \lambda_0}{c}$ . Se calcula el desplazamiento al rojo medio de la galaxia  $\bar{z}$ , midiendo para cada espectro del orden de 5 a 9 líneas diferentes y se calcula la dispersión del error. El primer espectro representado se encuentra a  $z \approx 0.07$ , el segundo a  $z \approx 0.08$ , y por último el espectro de una galaxia a  $z \approx 0.11$ . En todas ellas podemos ver la importancia de las líneas de Balmer,  $H_\epsilon$ ,  $H_\gamma$ ,  $H_\beta$  y de forma muy intensa el doblete de CaII  $H$  y  $K$  a  $\lambda_0 = 3933.68 \text{ \AA}$  y  $\lambda_0 = 3968.49 \text{ \AA}$ .

En la figura 4.10 se ha representado la distribución del desplazamiento al rojo de las galaxias que pueblan estas regiones. En el panel 4.10 (arriba izqda.) se encuentran representadas las galaxias que pueblan CrB-H, cada subpanel añade  $5'$  de arco de radio al anterior de manera que puede verse cómo la distribución incrementa con el radio. Como puede observarse, en los primeros  $15'$  de arco el máximo situado a  $z=0.11$  es más prominente que el máximo situado a  $z=0.07$ . Es significativo, que este máximo pierda importancia frente al máximo de la distribución que se muestra a  $z=0.07$  a medida que el radio sigue creciendo. La distribución apunta a la presencia de un cúmulo a  $z=0.11$  no localizado hasta el momento de forma espectroscópica. El máximo a  $z=0.07$  es más ancho que lo que cabría esperar para un cúmulo a este desplazamiento al rojo según muestra la figura. En el panel 4.10 (arriba dcha.) se representan las galaxias que pueblan una región intercumular que se ha escogido a modo de "control". El máximo más prominente se muestra a  $z=0.07$  y no hay una contribución importante de galaxias a  $z=0.11$ . Por último, en el panel 4.10 (abajo izqda.) se muestra el diagrama típico de un cúmulo Abell en la zona, en este caso Abell 2069, situado a  $z=0.11$ . Puede observarse que a pesar de que el cúmulo contiene un mayor número de galaxias que las presentes en el pico más prominente del panel de CrB-H la distribución del desplazamiento al rojo es similar. Ambas crecen rápidamente hasta los  $15'$  de arco con respecto a las coordenadas de cada centro, a partir de ahí siguen creciendo pero este crecimiento es más lento. La distribución que sigue Abell 2069, es comparable a su vez con la que se muestra para Abell 2065 en la figura 4.7 (centro), donde la aportación más importante de las galaxias a los cúmulos se hace en un único tramo del histograma. El tamaño del diámetro angular para un cúmulo situado a  $z=0.07$  y que se extienda 20 minutos de arco es, asumiendo  $H_0 = 70 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}$ ,  $\Sigma_M = 0,3$  y  $\Sigma_\Lambda = 0,7$ , de  $1.61 \text{ Mpc}$  ó  $1.21 \text{ h}^{-1} \text{ Mpc}$  y para un cúmulo a  $z=0.11$  el valor del diámetro angular es de  $2.42 \text{ Mpc}$  ó  $1.88 \text{ h}^{-1} \text{ Mpc}$ .

#### 4.4. Comparación de los Resultados WYFFOS con el SDSS-DR7

En Noviembre de 2008 el SDSS liberó el catálogo espectroscópico para el SDSS-DR7, en esta ocasión la zona de CrB-SC fue cubierta por completo. La gran mayoría de las galaxias observadas con AF2-WYFFOS, especialmente aquellas con magnitudes más brillantes, se solaparon con estos datos. Se construyó entonces un catálogo mixto de galaxias Sloan y WYFFOS. De las 415 galaxias con medidas espectroscópicas AF2-WYFFOS, un total de 249 galaxias no fueron cubiertas por el SDSS. Estas galaxias están localizadas especialmente sobre los primeros  $20'$  de arco centrados en la zona de la mancha donde la medida hecha por AF2-WYFFOS fue más profunda. La correlación entre ambas espectroscopias se resume en la figura 4.11 donde se muestran los resultados obtenidos para aquellas galaxias que se han medido en uno y otro catálogo, en este caso, para el catálogo AF2-WYFFOS y SDSS-DR7. Esta relación ya se obtuvo para la primera campaña de observaciones con AF2-WYFFOS

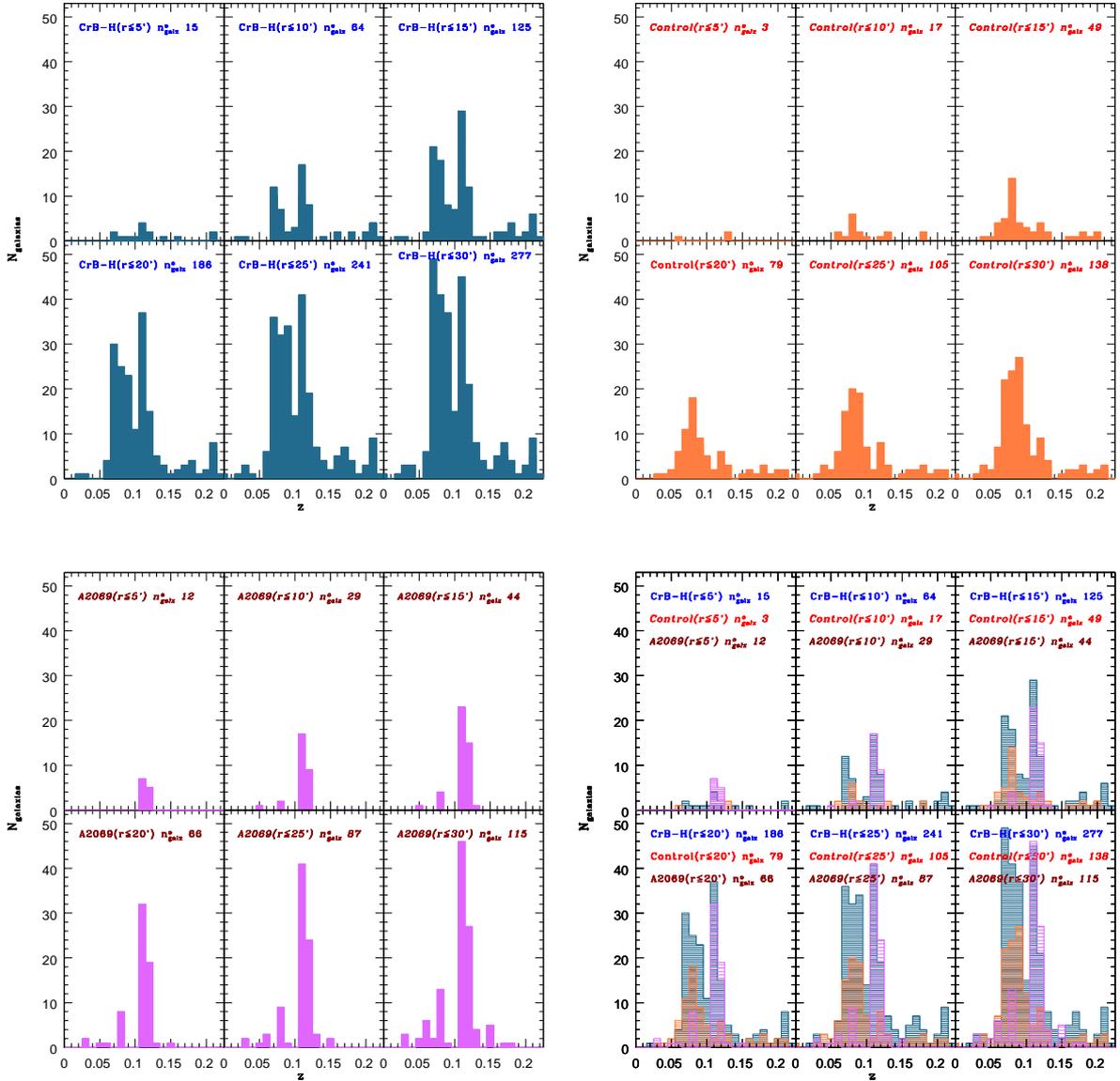


Figura 4.10: Distribución radial y de desplazamiento al rojo de las galaxias presentes en las zonas de CrB-H, de Abell 2069 y en una zona de control intercumular (zona de control de AF2-WYFFOS) del CrB-SC. **Arriba Izqda.:** Distribución de desplazamiento al rojo para las galaxias de la mancha fría del FCM CrB-H a distintos radios dentro de la zona. **Arriba Dcha.:** Distribución de desplazamiento al rojo para las galaxias de la zona intercumular de control señalada en color naranja en la figura 4.8 a distintos radios dentro de la zona. **Abajo Izqda.:** Distribución de desplazamiento al rojo para las galaxias del cúmulo Abell 2069 a distintos radios dentro de la zona. **Abajo Dcha:** Relación entre las diferentes distribuciones de galaxias en las distintas zonas presentadas en los otros paneles de la figura.

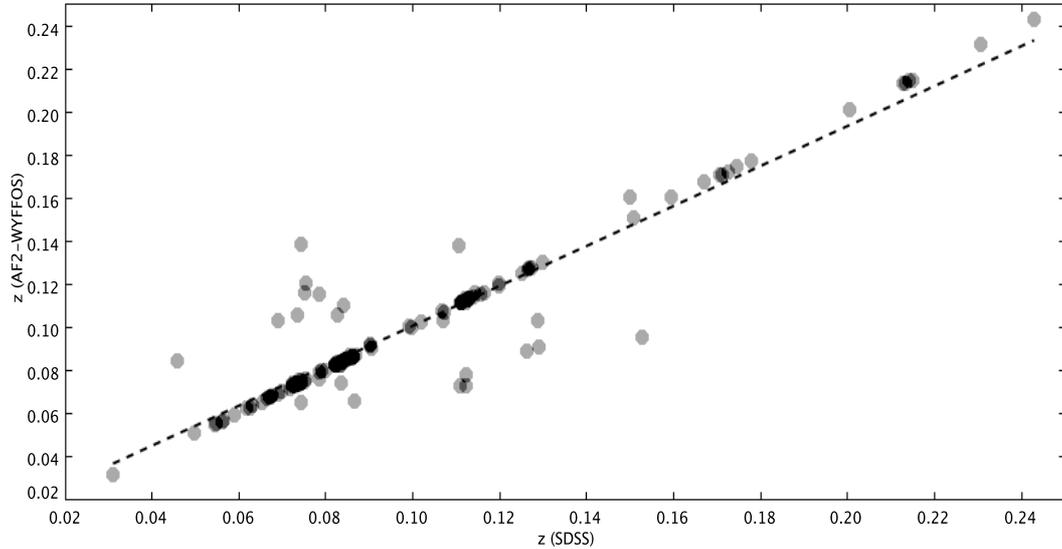


Figura 4.11: Correlación de las medidas de desplazamiento al rojo realizadas con AF2-WYFFOS con respecto a las existentes en SDSS. La línea de trazos representa a la recta de pendiente unidad.

y el SDSS-DR5, que se reflejó en la figura 4.3, pero que ahora se ve ampliada en el número de galaxias coincidentes en ambos catálogos.

El catálogo mixto aporta un total de 188 galaxias, es decir 125 galaxias más que en el histograma presentado en la figura 3.9, donde se mostraban únicamente los resultados del catálogo de SDSS para la zona de la mancha fría del FCM, CrB-H, en los primeros 20 minutos de arco desde el centro de la misma. Si observamos ahora la figura 4.12, análoga a la 3.9 podemos ver como el aumento del número de galaxias está localizado en torno a un máximo situado a  $z=0.08$ , lo cual implica que la estructura encontrada para CrB-H- $lz$  se extiende, al menos, en un rango de  $0.07 \leq z \leq 0.08$  sugiriendo que la estructura CrB-H- $lz$  pudiese corresponder a un filamento de decenas de Mpc, manteniendo la importancia de las estructuras encontradas a  $z=0.07$  y  $z=0.11$ . Los ajustes gaussianos de la figura están tomados para los intervalos  $0.06 \leq z \leq 0.10$  y  $0.10 < z \leq 0.12$  y presentan los siguientes valores medios para cada una de las distribuciones, para CrB-H- $lz$  el valor medio del desplazamiento al rojo es  $\bar{z}_{lz} \approx 0.0786$  y para CrB-H- $hz$  se obtiene  $\bar{z}_{hz} \approx 0.1120$ , con un tamaño esperado que varía entre  $15' \leq R \leq 25'$  y de  $13' \leq R \leq 15'$  de radio para CrB-H- $lz$  y CrB-H- $hz$  respectivamente.

La representación espacial y radial de los dos primeros máximos del histograma 4.12, en donde el primer máximo está situado en el rango  $0.06 \leq z \leq 0.08$  y el segundo de los máximos está en  $0.08 < z \leq 0.10$ , puede verse en las figuras 4.13 y 4.14. Claramente, el primer grupo de galaxias, según se observa en la figura 4.13, presenta una distribución espacial que decrece ligeramente cuando el radio aumenta desde el centro geométrico calculado con las galaxias

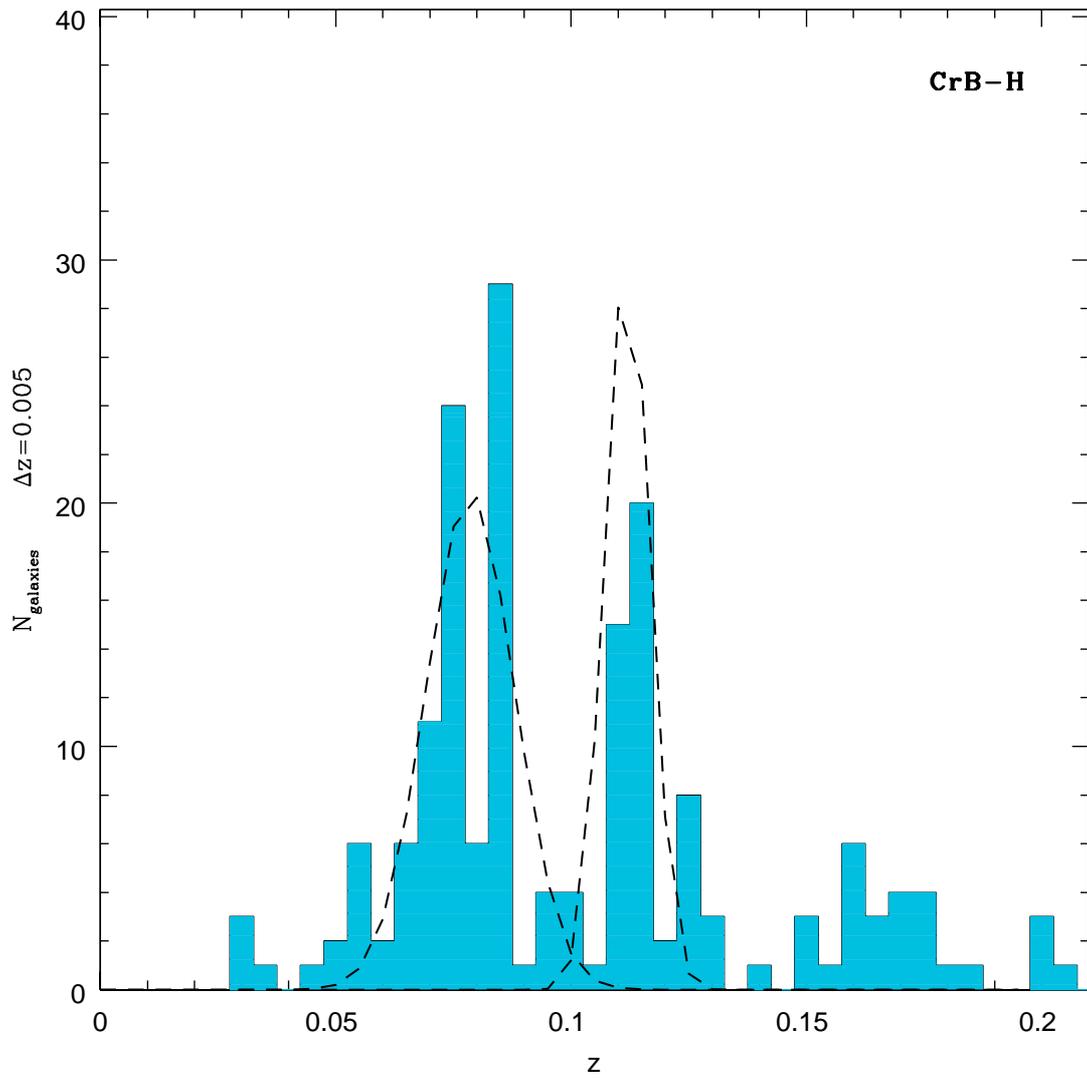


Figura 4.12: Distribución de desplazamientos al rojo de las galaxias de CrB-H en un radio de  $20'$  arco utilizando la muestra de AF2-WYFFOS. La línea de trazos representa el ajuste de las medidas a la curva Gaussiana, respectivamente, para el pico situado a  $z=0.07$  y a  $z=0.11$  de la distribución.

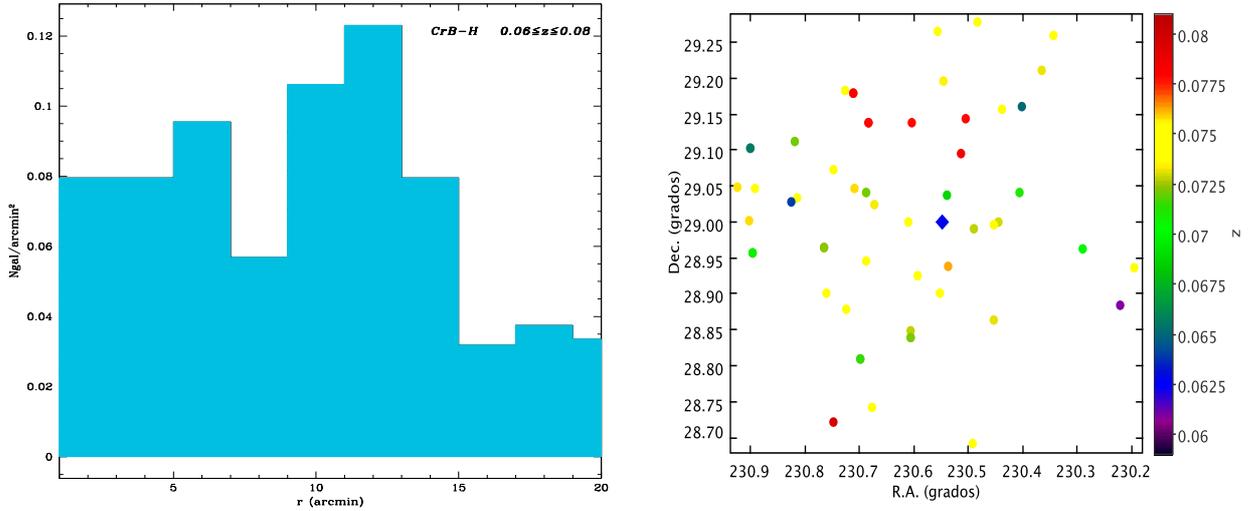


Figura 4.13: Distribución radial (Izqda) y espacial (Dcha.) de las galaxias situadas en el rango de desplazamiento al rojo  $0.06 \leq z \leq 0.08$  según las medidas de desplazamiento al rojo con SDSS+WYFFOS.

que pueblan este grupo. Sin embargo, la distribución radial que siguen las galaxias en este caso no presenta el perfil esperado si este grupo de galaxias perteneciese o fuese parte de un potencial cúmulo dado que su forma no decae rápidamente y es muy poco pronunciada con respecto al radio desde el centro del grupo. El segundo de los máximos presentes en la figura 4.12 situado a  $0.08 \leq z \leq 0.10$  y representado espacial y radialmente en la figura 4.14 no muestra evidencias de ser un cúmulo de galaxias ni apunta a ello.

Por último se han representado radial y espacialmente en la figura 4.15 los dos grandes tramos de desplazamiento al rojo que presentan las galaxias que pueblan CrB-H hasta los  $20'$  de radio. Un primer grupo que abarca  $0.06 \leq z < 0.10$  en desplazamiento al rojo, sin considerar el hueco mostrado en figuras anteriores en torno a  $z \sim 0.08$ . El segundo de los tramos de la figura considera el rango de desplazamientos al rojo de  $0.10 \leq z \leq 0.12$ .

Podemos observar como en lo que se refiere al primero de los grupos situado desde  $0.06 \leq z < 0.10$  se sigue una distribución espacial muy similar a la esperada para un cúmulo pero la distribución radial se aleja de lo esperado. No ocurre lo mismo para las galaxias situadas a  $0.10 \leq z \leq 0.12$  que sí parecen presentar una distribución radial indicativa de la asociación de las galaxias, al menos, en forma de grupo.

#### 4.5. Análisis de la comparación de datos entre WYFFOS y SDSS-DR7

Los datos obtenidos con AF2-WYFFOS complementan en profundidad el conocimiento previo sobre las galaxias que pueblan la mancha fría de VSA, CrB-H. Si bien se han tenido en cuenta los datos de SDSS conjuntamente con los de WYFFOS para obtener una muestra más completa y amplia de la zona, también se ratifican los resultados obtenidos en el capítulo 3, donde las galaxias se subdividían en dos grupos importantes a bajo y a alto

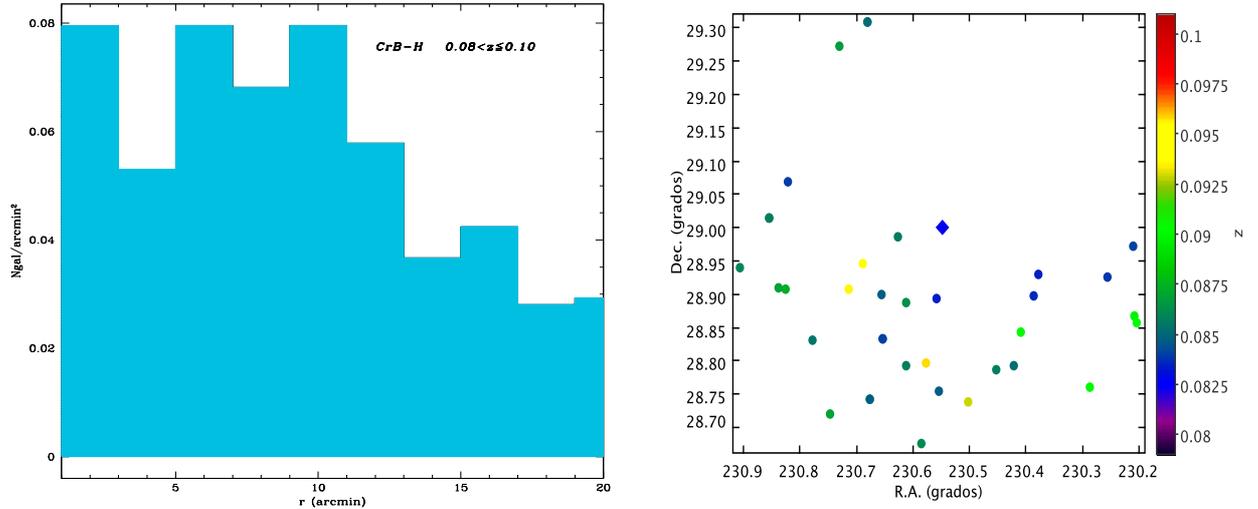


Figura 4.14: Distribución radial (Izqda) y espacial (Dcha.) de las galaxias situadas en el rango de desplazamiento al rojo  $0.08 \leq z \leq 0.10$  según las medidas de desplazamiento al rojo con SDSS+WYFFOS.

desplazamiento al rojo. En el estudio del desplazamiento al rojo de las galaxias medidas para el catálogo de SDSS-DR7 y AF2-WYFFOS aparece un nuevo máximo a un desplazamiento al rojo comprendido entre  $0.08 \leq z \leq 0.10$ , que se estudió exclusivamente, por separado, como posible indicativo de la asociación de galaxias en la zona. Sin embargo, no es posible decir que esta agrupación de galaxias apunte hacia la presencia de un cúmulo de galaxias.

Si se realiza localmente el estudio descrito en la sección 3.2.1 y presentado en la tabla 3.1, los datos de la posición de la mancha varían de forma que ahora la celda más importante pasa a ser la de CrB-H, pero esto ocurre simplemente porque el estudio realizado en la zona es más profundo. Como puede verse en la tabla 4.3, las celdas intermedias entre los dos grandes máximos presentan mayor población de galaxias que cuando se consideró solamente el catálogo del SDSS. Esto es debido a que la muestra presentada por WYFFOS es más profunda y por tanto las galaxias presentes en estos rangos son galaxias más débiles en magnitud. Sin embargo, siguen el patrón discutido en el capítulo previo.

#### 4.6. El candidato CrB-H-*hz*

Tal y como se ha descrito a lo largo del capítulo, tan sólo CrB-H-*hz* puede ser considerado como candidato firme a cúmulo, del que sólo estamos detectando las galaxias más brillantes ya que los instrumentos utilizados no nos han permitido estudiar la distribución de desplazamientos al rojo para galaxias más débiles de  $r \sim 21.0$  mag. Se pretende ver ahora si alguna de las galaxias pertenecientes a este grupo puede ser candidata como galaxia central del cúmulo. Para ello, habrá que centrarse en aquellas galaxias más brillantes del grupo y conocer su posición física en el cielo y en el DCM. Para hacer el cálculo de las distancias se han considerado los siguiente parámetros cosmológicos,  $H_0 = 70 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}$ ,  $\Omega_M = 0.3$  y

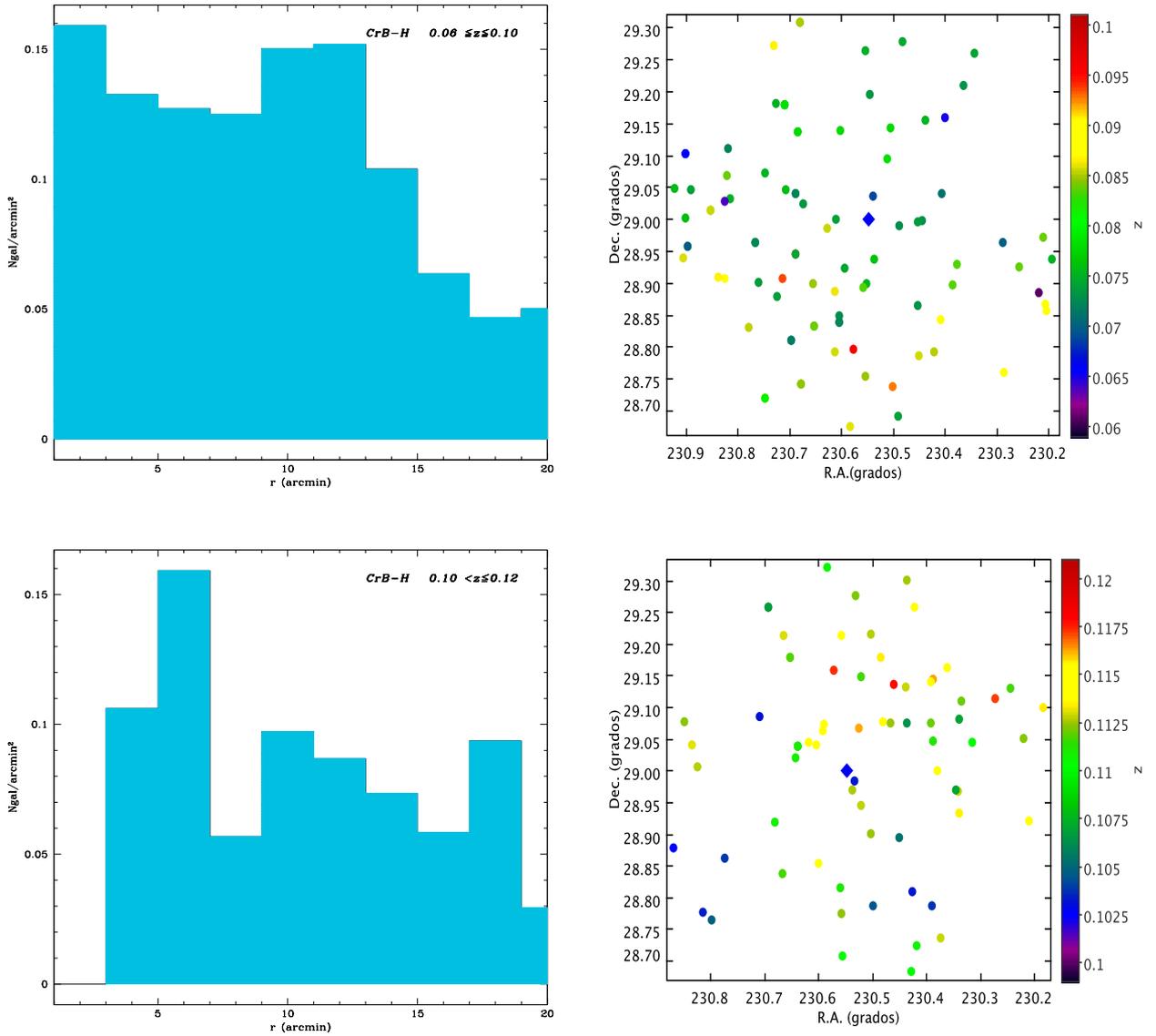


Figura 4.15: (Arriba) Distribución radial (Izqda) y espacial (Dcha.) de las galaxias situadas en el rango de desplazamientos al rojo  $0.06 \leq z \leq 0.10$ . (Abajo) Distribución radial (Izqda) y espacial (Dcha.) de las galaxias situadas en el rango de desplazamientos al rojo  $0.10 \leq z \leq 0.12$  según las medidas de desplazamientos al rojo con SDSS+WYFFOS.

$$\Omega_{\Lambda} = 0.7.$$

#### 4.6.1. Galaxias más brillantes de CrB-H-*hz*

En la figura 4.16 se puede observar la posición y la importancia de tres de las galaxias más brillantes del grupo. Las tres han sido numeradas según su magnitud y se presentan a

Tabla 4.3: Región CrB-H en el intervalo de desplazamientos al rojo de  $0.05 < z < 0.12$ . La región está delimitada por una celda de tamaño  $30 \times 30$  min. de arco<sup>2</sup> y en intervalos de profundidad de  $\Delta z = 0.01$ . Las columnas situadas desde la segunda a la octava posición indican, para cada pixel, el número de galaxias contenida en cada celda en los desplazamientos al rojo desde  $z=0.05$  a  $z=0.12$ . Columnas: (1)  $0.05 \leq z \leq 0.06$ ; (2)  $0.06 \leq z \leq 0.07$ ; (3)  $0.07 \leq z \leq 0.08$ ; (4)  $0.08 \leq z \leq 0.09$ ; (5)  $0.09 \leq z \leq 0.10$ ; (6)  $0.10 \leq z \leq 0.11$ ; (7)  $0.11 \leq z \leq 0.12$ .

Región	N <sub>gal</sub> en intervalo $\Delta z = 0.01$						
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
CrB-H*	4	1	18	5	0	1	18
CrB-H**	4	2	36	13	4	11	39

\* datos usando únicamente la base de datos del SDSS

\*\* datos usando las bases de datos SDSS y WYFFOS sin repetición de objetos.

Tabla 4.4: Datos físicos de la galaxia número 1

Galaxia 1	u	g	r	i	z	$D_L = 514.8$ Mpc
RA:15:22:33.25	18.94	16.78	15.72	15.29	14.95	$D_A = 416.6$ Mpc
DEC:+29:02:11.3	err <sub>u</sub>	err <sub>g</sub>	err <sub>r</sub>	err <sub>i</sub>	err <sub>z</sub>	$\Delta\tau = -1.4$ Ga
$z=0.1113$	0.04	0.00	0.00	0.00	0.01	$M_0 = -22.84$ mag

continuación.

#### ■ Galaxia número 1

Esta galaxia es la más brillante, y está situada en el extremo izquierdo del DCM[r,(r-i)], los datos físicos se recogen en la figura 4.17 y en la tabla 4.4. Como puede observarse, la galaxia, de tipo elíptico, podría ser una buena candidata como galaxia central del posible cúmulo. Se encuentra a 5.29' del centro de VSA.

#### ■ Galaxia número 2

Tabla 4.5: Datos físicos de la galaxia número 2

Galaxia 2	u	g	r	i	z	$D_L = 534.7$ Mpc
RA:15:21:27.13	19.18	17.27	16.21	15.76	15.41	$D_A = 430.0$ Mpc
DEC:+29:09:37.5	err <sub>u</sub>	err <sub>g</sub>	err <sub>r</sub>	err <sub>i</sub>	err <sub>z</sub>	$\Delta\tau = -1.5$ Ga
$z=0.1152$	0.04	0.01	0.00	0.00	0.01	$M_0 = -22.43$ mag

Para la galaxia número dos, podemos hacer referencia a la figura 4.18 y a la tabla 4.5. En ella se muestra el aspecto de dicha galaxia y los valores físicos respectivamente. Como puede observarse, esta galaxia también es de tipo elíptico, pero según la figura 4.16 (Izqda.) está situada a 13.74' del centroide calculado para el grupo en Génova-Santos et al. (2010). La situación espacial dentro del grupo no la hace candidata a ser la galaxia central del mismo, sino un miembro más.

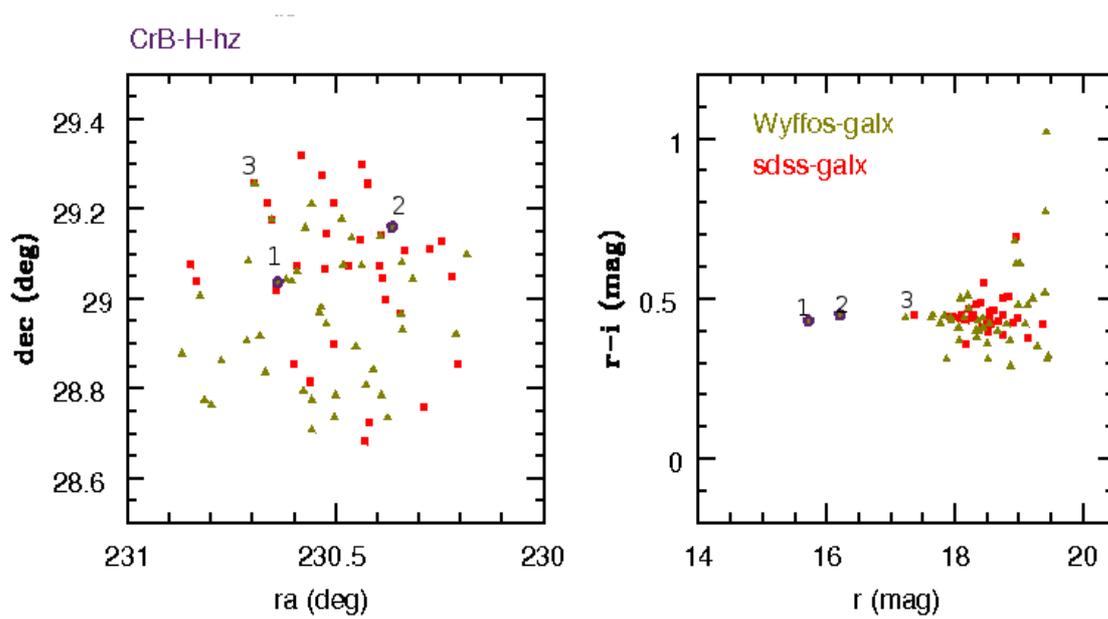


Figura 4.16: (Izda.) Distribución espacial de las galaxias de CrB-H-hz WYFFOS+SDSS. (Dcha.)  $DCM[r, (r-i)]$  de las galaxias de CrB-H-hz WYFFOS+SDSS. (Ambas) El color rojo representa las galaxias con medida de desplazamiento al rojo obtenida por SDSS-DR7, en color verde se muestran las galaxias que añade a la muestra el catálogo de A2F-WYFFOS, y en color violeta se presentan las tres galaxias más brillantes y su disposición en cada uno de los paneles.

Tabla 4.6: Datos físicos de la galaxia número 3

Galaxia 3	u	g	r	i	z	$D_L = 495.0$ Mpc
RA:15:22:46.66	20.25	18.25	17.23	16.79	16.42	$D_A = 403.7$ Mpc
DEC:+29:15:24.9	err <sub>u</sub>	err <sub>g</sub>	err <sub>r</sub>	err <sub>i</sub>	err <sub>z</sub>	$\Delta\tau = -1.4$ Ga
$z=0.1073$	0.09	0.01	0.01	0.01	0.01	$M_0 = -21.24$ mag

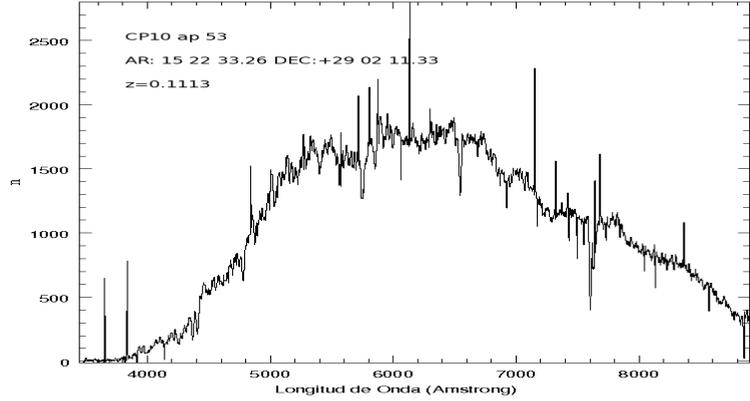
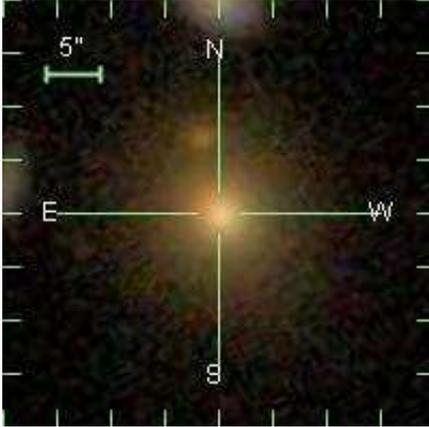


Figura 4.17: Galaxia n1: Galaxia más brillante de CrB-H- $hz$  observada con A2F-WYFFOS. Es de tipo elíptico y muy cercana,  $5.29'$  del centro geométrico recalculado en Génova-Santos et al. (2010), en el que sólo se tienen en cuenta las galaxias con desplazamiento al rojo medido por SDSS-DR7 en el momento de la publicación.

### ■ Galaxia número 3

Se muestran en la figura 4.19 y en la tabla 4.6 los resultados obtenidos para la tercera galaxia en magnitud del grupo CrB-H- $hz$ , que está situada a  $17.34'$  de arco del centro del grupo calculado en Génova-Santos et al. (2010), y se encuentra en el lado izquierdo de la figura 4.16 (Izqda.), señalada con el número tres. Esta galaxia, igual que las dos anteriores es de tipo elíptico, pero se encuentra situada muy hacia el borde del grupo por lo cual no parece candidata a galaxia central.

Si calculamos con los nuevos datos el centro del grupo de galaxias CrB-H- $hz$  utilizando simplemente la distancia media de las galaxias se obtiene como coordenadas del nuevo centro de masa, suponiendo masas iguales para las galaxias,  $AR = 230.5145 \pm 0.1629^\circ$  y  $DEC = 29.00628 \pm 0.1611^\circ$  o lo que es lo mismo  $AR = 15^\circ 31^m 15.23^s$  y  $DEC = +29^\circ 01' 15.70''$ . El desplazamiento al rojo medio calculado con esta muestra de galaxias es  $\bar{z} = 0.1112 \pm 0.0038$ . Los colores medios del grupo son para la banda  $r$ ,  $\bar{r} = 18.409 \pm 0.7126$ , y para la banda  $i$ ,  $\bar{i} = 17.9575 \pm 0.6989$ . Con todos estos datos es posible calcular la masa estimada para CrB-H- $hz$  utilizando la técnica descrita por Díaz-Sánchez et al. (2007) y aplicada anteriormente para la muestra única del SDSS-DR7 en la sección 3.3. El resultado es de  $M_{200} = 0.89 \times 10^{15} M_\odot$  y una dispersión de velocidades es de  $\Delta V_p = 1150 \text{ km s}^{-1}$  para la masa estimada de CrB-H- $hz$ .

Los resultados principales para este capítulo refuerzan los del capítulo anterior que plantea a los grupos de galaxias CrB-H- $lz$  y CrB-H- $hz$  como estructuras diferenciadas

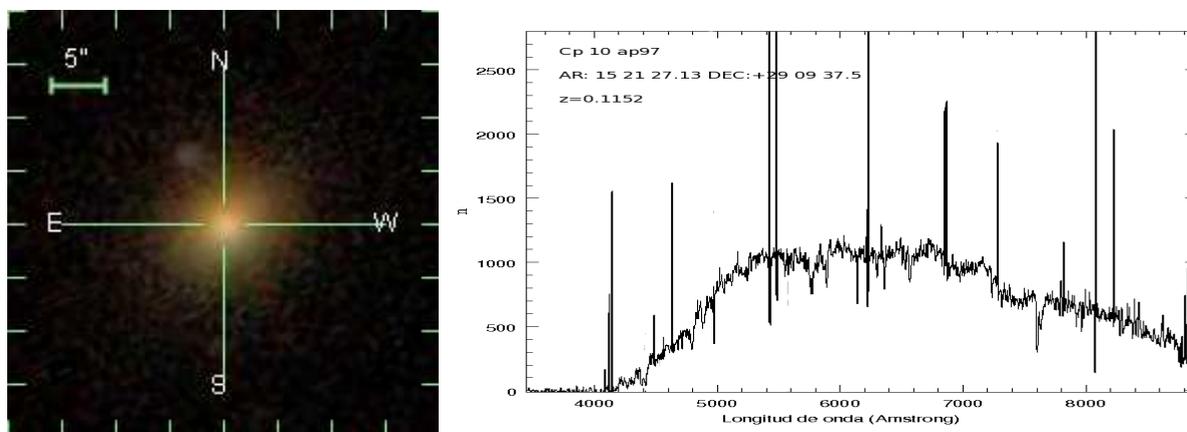


Figura 4.18: Galaxia n2: Segunda galaxia más brillante de CrB-H-hz observada con A2F-WYFFOS. Es de tipo elíptico y dista 13.74' de arco del centro geométrico recalculado en Génova-Santos et al.(2010).

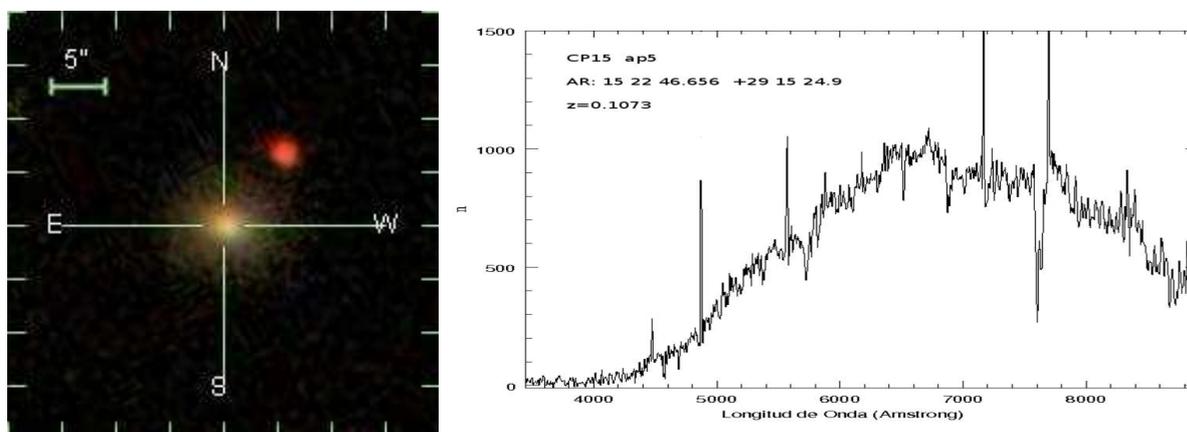


Figura 4.19: Galaxia n3: Tercera galaxia más brillante de CrB-H-hz observada con A2F-WYFFOS de tipo elíptico y se encuentra a 17.34' de arco del centro geométrico calculado en Génova-Santos et al.(2010).

---

dentro de una misma zona del cielo y que contribuyen potencialmente al decremento del FCM, CrB-H. El primero en forma de estructura filamentosa y el segundo en forma de protocúmulo podrían aportar a la señal. Cuando añadimos al catálogo de las galaxias medidas por SDSS-DR7 las observadas con AF2-WYFFOS, que dibujan de una forma más profunda y completa la región observada de CrB-H, resulta evidente la importancia que toma en la distribución de desplazamientos al rojo el máximo situado a  $z \sim 0.11$ .

# 5

---

## Estimación del Efecto SZ y Emisión Rayos X en CrB-H

Este capítulo conecta los resultados del capítulo anterior sobre la distribución espacial de galaxias con el estudio del Efecto Sunyaev-Zel'dovich y de la emisión de Rayos X en la zona de la mancha fría del VSA. Se introducirán brevemente las ecuaciones básicas del efecto SZ y se estudiará la relación existente entre la intensidad que presenta la mancha del VSA y la distribución de las galaxias dentro de ella.

### 5.1. Efecto Sunyaev-Zel'dovich térmico

Cuando los fotones del FCM atraviesan un gas caliente a elevada temperatura ( $T_e \sim 10 \text{ keV}$ ) como el que se encuentra en los pozos de potencial de los cúmulos de galaxias, pueden sufrir dispersión en cualquier dirección (Birknshaw, Gull & Northover, 1981). Como el número de fotones debe conservarse y los electrones le transfieren energía a los fotones (Efecto Compton inverso), la consecuencia es un traspaso sistemático de fotones desde la región de Rayleigh-Jeans hacia la región de Wien, y esto produce la distorsión espectral en el FCM que muestra la figura 5.1. Puede verse la diferencia de intensidad, negativa en la zona Rayleigh-Jeans y que a frecuencias mayores de 217 GHz es positiva. Esta distorsión espectral del FCM fue introducida en la sección 1.1.3.

La dependencia del efecto SZ con la frecuencia viene dada por la expresión:

$$f(x) = \left[ x \frac{e^x + 1}{e^x - 1} - 4 \right] (1 + \delta_{SZE}(x, T_e)) \quad (5.1)$$

donde  $x = \frac{h\nu}{K_B T_{FCM}}$  y  $\delta_{SZE}$  es la corrección relativista en la dependencia de la frecuencia. En el caso particular del CrB-H los términos relativistas tienen valores muy pequeños y no influyen en el resultado del cálculo final por lo que no se tienen en cuenta, pero que se describen para desarrollar el caso general. En el caso en que  $f(x) \Rightarrow -2$  estaríamos en el caso Rayleigh-Jeans no relativista. Este valor no implica que  $\frac{\Delta T_{SZE}}{T_{FCM}}$  sea independiente del desplazamiento al rojo, como se muestra en la ecuación (1.4). Si se expresan las ecuaciones

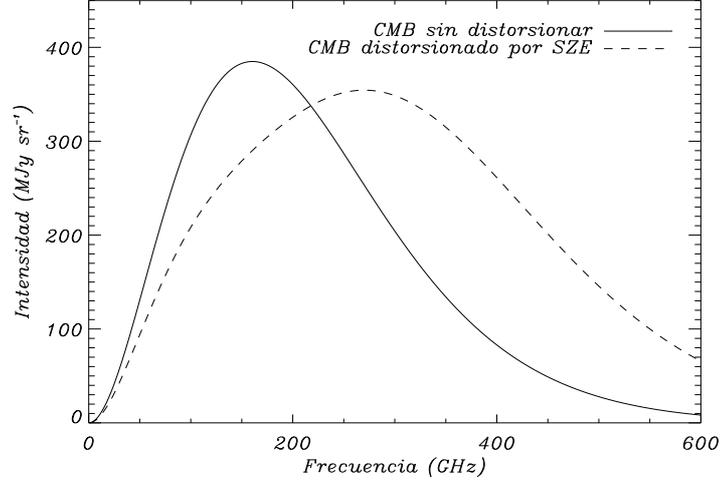


Figura 5.1: Espectro del FCM distorsionado por la presencia del efecto SZ. Para ver la distorsión del efecto en la figura se ha calculado para un cúmulo mil veces más masivo que un cúmulo típico  $y_c = 10^{-1}$ , mientras que típicamente  $y_c \sim 10^{-4}$ . El efecto SZ causa un decremento en la intensidad a frecuencias  $\nu \leq 218$  GHz y un incremento a frecuencias más altas.

en unidades de intensidad específica, usadas para observaciones del efecto SZ, se obtiene:

$$\Delta I_{SZE} = I_0 g(x) y_c \quad (5.2)$$

donde:

$$I_0 = 2 \frac{(K_B T_{FCM})^3}{(hc)^2} \quad (5.3)$$

La dependencia con la frecuencia viene dada por:

$$g(x) = \frac{x^4 e^x}{(e^x - 1)^2} \left[ x \frac{e^x + 1}{e^x - 1} - 4 \right] (1 + \delta_{SZE}(x, T_e)) \quad (5.4)$$

En el efecto SZ la variación de temperatura se calcula a través del producto de una función espectral del tipo  $f(x)$  y el parámetro de comptonización  $y_c$ , que es el producto de la variación experimentada por la energía de los fotones en una colisión típica  $\frac{k_B T_e}{m_e c^2}$  y la profundidad óptica del grupo o cúmulo,  $\tau_e = \int n_e \sigma_T dl$ . Por lo tanto,

$$\frac{\Delta T_{iSZ}}{T_{FCM}} = f(x) y_c = \left[ x \frac{e^x + 1}{e^x - 1} - 4 \right] \int n_e \frac{k_B T_e}{m_e c^2} \sigma_T dl \quad (5.5)$$

$\Delta T_{SZE}$  se ha obtenido mediante la derivación de la expresión del cuerpo negro con respecto a la temperatura  $|\frac{\partial B_\nu}{\partial T}|$ . La distorsión espectral de la temperatura de brillo del FCM debida al efecto SZ térmico se muestra en la figura 5.2 izquierda. Puede verse que el

efecto SZ térmico es fácilmente diferenciable de una fluctuación térmica del FCM, gracias a su característica dependencia espectral.

La temperatura del gas medido para los cúmulos masivos de galaxias es cercana a  $K_B T_e \sim 10 \text{ keV}$  [Mushotzky & Scharf(1997), Allen & Fabian(1998)]; y la masa esperada para el cúmulo se escala con la temperatura como  $M \propto T_e^{3/2}$ . A estas temperaturas las velocidades de los electrones se vuelven relativistas y requieren de pequeñas correcciones para describir la interpretación exacta del efecto SZ. Otros trabajos teóricos sobre este tema incluyen interpretaciones relativistas, pero todos ellos están de acuerdo en el valor de  $K_B T_e \sim 15 \text{ keV}$ , como apropiado para cúmulos de galaxias. Para un cúmulo masivo de galaxias con  $K_B T_e \sim 10 \text{ keV}$ ,  $\frac{K_B T_e}{m_e c^2} \sim 0.02$ , las correcciones relativistas son del orden de un pequeño porcentaje en la parte Rayleigh-Jeans del espectro, pero pueden ser sustanciales en la región de alta frecuencia.

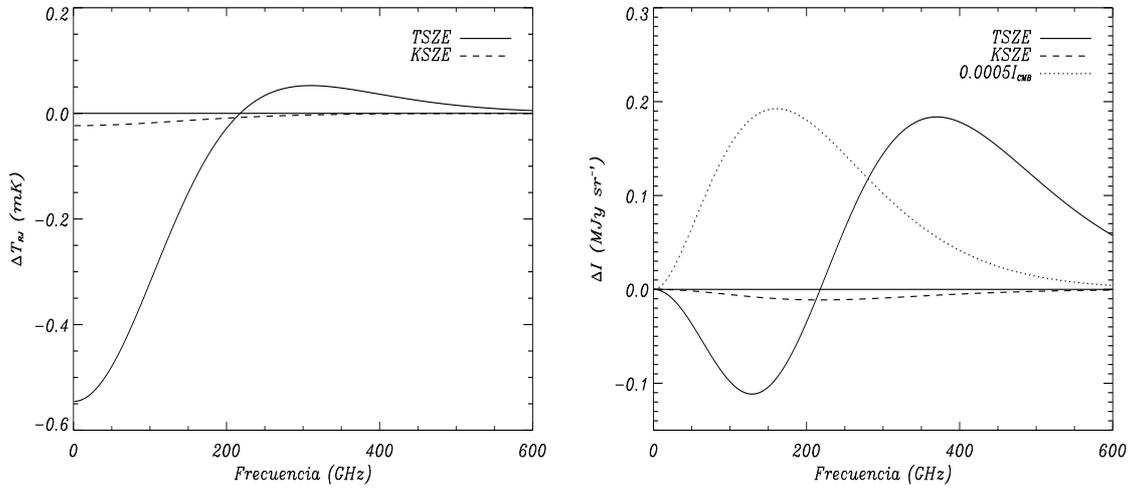


Figura 5.2: Distorsión espectral de la radiación del FCM debida al efecto SZ. La figura de la derecha muestra la relación de la intensidad con la frecuencia y la de la izquierda muestra la relación de la Temperatura de brillo con la frecuencia. La línea continua delgada representa el efecto SZ térmico y la línea de trazos el efecto SZ cinético. Para la Temperatura de referencia del espectro del FCM, 2.7 K, la intensidad se escaló a 0.0005 como puede verse en la línea punteada del panel derecho de la figura. Las propiedades cumuladas utilizadas para calcular el espectro han sido una temperatura electrónica de 10 keV, un parámetro de Comptonización de  $10^{-4}$ , y una velocidad peculiar de  $500 \text{ km s}^{-1}$ .

En la búsqueda de cúmulos utilizando la medida del efecto SZ es importante la integración de la señal a lo largo de la línea de visión y sobre el ángulo sólido del cúmulo. La expresión es dada como la suma de todos los  $e^-$  del cúmulo pesados con la temperatura. Se trata de una medida directa de la energía total térmica del cúmulo. Integrando el efecto SZ sobre el ángulo sólido del cúmulo,  $d\Omega = \frac{dA}{D_A^2}$  se obtiene:

$$\int_{SZE} d\Omega \propto \frac{N_e \langle T_e \rangle}{D_A^2} \quad (5.6)$$

- $N_e$  número total de electrones en el cúmulo.
- $\langle T_e \rangle$  Temperatura media de los electrones.
- $D_A$  Distancia angular.

El flujo integrado del efecto SZ es una simple relación entre la temperatura dividida por  $D_A$ , que es la distancia angular  $D_A(z)$ .

Las características más importantes a resaltar del efecto SZ térmico son que este efecto:

1. es una pequeña distorsión en el FCM del orden de  $100 \mu K$ , que es proporcional a la presión del cúmulo integrada a lo largo de la línea de visión.
2. Es independiente del desplazamiento al rojo.
3. Es la única marca espectral que responde a un decremento de la intensidad del FCM a frecuencias  $\leq 218 GHz$  y a un incremento a frecuencias mayores.
4. Se caracteriza porque el flujo integrado del efecto SZ es proporcional a la energía térmica total del cúmulo.

## 5.2. Efecto Sunyaev-Zel'dovich cinético

Si un cúmulo se mueve con respecto al FCM, existe una distorsión adicional debido a la velocidad de los electrones que causan la dispersión de los fotones del FCM. En el límite no relativista la marca espectral del efecto SZ cinético es puramente una distorsión térmica de magnitud

$$\frac{\Delta T_{SZE}}{T_{FCM}} = -\tau_e \left( \frac{v_{pec}}{c} \right) \quad (5.7)$$

$v_{pec}$  es la velocidad a lo largo de la línea de visión.

Las perturbaciones relativistas en el efecto SZ cinético son debidas al incremento de la fuerza de Lorentz proporcionado por el gran aumento de la velocidad de los electrones (Sazonov & Sunyaev 1998). Dominan términos del orden:  $(\frac{K_B T_e}{m_e c^2}) (\frac{v_{pec}}{c})$ . De esta manera, para un cúmulo que se mueve a  $1000 km s^{-1}$  a con una temperatura de  $10 keV$  el efecto representa una corrección de un 8% sobre el caso no relativista.

## 5.3. Estimación del Efecto SZ y Emisión Rayos X en CrB-H

El análisis presentado en capítulos previos puso de manifiesto una sobredensidad de galaxias a alto desplazamiento al rojo en la posición de CrB-H. En CrB-H-hz, podría existir un cierto grado de virialización. En este apartado se calculará el valor del efecto SZ y de la emisión de rayos X con los que podría estar contribuyendo esta estructura, con el fin de investigar la posibilidad de tener un efecto SZ importante sin existir previamente una detección de la emisión de rayos X en los datos de ROSAT.

### 5.3.1. Estimación del efecto SZ debido a CrB-H-hz

Si adoptamos un modelo  $\beta$  para el perfil de densidad (Cavaliere, Danese & de Zotti 1979),

$$n_e(r) = n_{e0} \left[ 1 + \left( \frac{r}{r_c} \right)^2 \right]^{-3\beta/2}, \quad (5.8)$$

donde  $n_{e0}$  es la densidad de electrones en el centro del cúmulo y  $r_c$  el radio del núcleo del cúmulo al realizar la integración a lo largo de la línea de visión, el mínimo decremento SZ se describe por medio de la siguiente ecuación:

$$\Delta T_0 = T_{\text{FCM}} f(x) \frac{2k_B}{m_e c^2} \sigma_T T_e n_{e0} r_c I_{\text{SZ}}(\beta), \quad (5.9)$$

donde

$$I_{\text{SZ}}(\beta) \equiv \int_0^\infty (1 + \xi^2)^{-3\beta/2} d\xi = \frac{\pi^{1/2} \Gamma(3\beta/2 - 1/2)}{2\Gamma(3\beta/2)}. \quad (5.10)$$

Considerando que el gas caliente en el cúmulo sigue una distribución esférica, la masa encerrada dentro de un radio  $r$  es

$$M_{\text{gas}}(< r) = f_{\text{gas}} M(< r) = \frac{4\pi}{3} r_c^3 \mu_e m_p n_{e0} I_{\text{gas}}(\beta, r/r_c), \quad (5.11)$$

donde

$$I_{\text{gas}}(\beta, r/r_c) \equiv 3 \int_0^{r/r_c} [1 + \xi^2]^{-3\beta/2} \xi^2 d\xi, \quad (5.12)$$

siendo  $\mu_e = 1.146$  Anders & Grevesse (1989) la masa bariónica promedio por electrón y  $f_{\text{gas}}$  la fracción de masa en forma de gas.

Combinando las ecuaciones 5.9 y 5.11 se deduce que la máxima amplitud del decremento SZ como función de la masa total dentro de un radio  $r_{200}$  es

$$\Delta T_0 = \frac{3}{2\pi} \frac{I_{\text{SZ}}(\beta)}{I_{\text{gas}}(\beta, r/r_{200})} T_{\text{FCM}} f(x) f_{\text{gas}} M_{200} \frac{k_B T_e \sigma_T}{r_c^2 \mu_e m_e m_p c^2}. \quad (5.13)$$

$r_{200}$  se define como el radio dentro del cual la densidad promedio es 200 veces la densidad crítica del Universo al desplazamiento al rojo del cúmulo. Así la masa que se calcula, es la masa  $M_{200}$  contenida dentro de este radio. Se utiliza  $r_{200}$  porque algunos cúmulos no están totalmente virializados, razón por la cual no se puede utilizar el radio gravitatorio  $r_G$ , que se usa para el cálculo de la masa virial  $M_{\text{vir}}$  siendo el radio virial  $r_{\text{vir}}$  el valor de distancia media de las galaxias del cúmulo al centro. Sin embargo, este cálculo trae consigo algunas dificultades (Carlberg et al. 1996) y es la razón por la que se usa  $r_{200}$  en lugar de  $r_G$ . (Carlberg et al. 1997).

Para dar una estimación del efecto SZ que puede generar una estructura como de CrB-H-hz se suponen como valores típicos los siguientes parámetros:  $r_c = 67 \text{ Kpc}$ ,  $\beta = 2/3$  (Sanderson et al. 2003) y  $f_{\text{gas}} = 0.095$  (Evrard 1997). La estimación de la masa y la temperatura electrónica de la estructura localizada en CrB-H-hz figura como resultado en la tabla 3.2. El radio  $r_{200}$  se puede calcular a partir de la ecuación 3.3, lo que da  $r_{200} = 1.60 \text{ Mpc}$ . A la frecuencia con la que ha medido VSA ( $\nu = 33 \text{ GHz}$ )  $f(x) = -1.94$ .

Introduciendo estos valores en la ecuación 5.13 se obtiene una temperatura mínima para el decremento SZ de  $\Delta T_0 = -158 \mu K$ .

Con el fin de comparar este valor con el de la temperatura,  $-229 \mu K$ , que se encuentra en la posición del decremento CrB-H del mapa de temperaturas generado a partir de los datos de VSA según Génova-Santos et al. (2008), tenemos que considerar la dilución provocada por la convolución con el haz sintetizado de VSA. Para tener en cuenta esto, se ha simulado el mapa de un cúmulo de galaxias usando un perfil determinado por los parámetros  $\beta$  y  $r_c$  supuestos previamente. Después de hacer la convolución de este mapa simulado con el haz sintetizado de VSA se obtuvo un mínimo para el decremento SZ de temperatura  $-26 \mu K$ . Por lo tanto, con las hipótesis adoptadas, el efecto SZ que se pudiese generar a partir de la estructura CrB-H- $hz$  contribuye tan sólo con el 10% del efecto SZ observado en el decremento CrB-H completo.

La previsión del efecto SZ a partir de la estructura CrB-H- $hz$  se puede comparar con la de un cúmulo de galaxias típico en la región, tal como Abell 2065. Brownstein & Moftat (2006) publican para este cúmulo un  $\beta = 1.162$ ,  $r_c = 485.9 kpc$ ,  $r_{250} = 1.302 Mpc$ ,  $k_B T_e = 5.50 keV$ ,  $m_{gas} = 0.49 \times 10^{14} M_\odot$  y  $m_{250} = 8.01 \times 10^{14} M_\odot$ . La introducción de estos valores en la ecuación 5.13 da como resultado  $\Delta T_0^{A2065} = -205 \mu K$ . En el mapa del decremento de VSA este valor sería de  $-107 \mu K$ , y por lo tanto, debería ser detectado a un nivel de señal a ruido más alto. En el estudio inicial de CrB-SC, con la configuración previa del VSA, configuración extendida, de menor resolución angular,  $11'/haz$ , fue detectado en  $-103 \pm 56 \mu K$  (Génova-Santos et al. 2005), este valor se encuentra en buen acuerdo con la anterior estimación, teniendo en cuenta la diferencia en las resoluciones angulares y el factor de dilución del haz entre la configuración extendida y la superextendida.

### 5.3.2. Estimación del flujo de Rayos X en CrB-H- $hz$

En Génova-Santos et al. (2005) se examinó la base de datos de ROSAT,  $0.73-1.56 keV$  (Snowden et al. 1997). No se encontró evidencia significativa de un exceso en el flujo de rayos X en la región del decremento CrB-H. En este apartado se calculará el flujo de rayos X que pudiese provocar la estructura CrB-H- $hz$ .

La luminosidad bolométrica de la emisión Bremsstrahlung producida por una concentración de gas de electrones y protones a una temperatura  $T_e$  viene dada por Rybicki & Lightman (1979) como:

$$L_X = W \int n_e n_p T_e^{1/2} \bar{g}(T_e) dV , \quad (5.14)$$

siendo

$$W = \left( \frac{2\pi k_B}{3m_e} \right)^{1/2} \frac{2^5 \pi e^6}{3hm_e c^3} , \quad (5.15)$$

y  $\bar{g}(T_e)$  el factor de Gaunt promedio. Considerando constante la proporción entre las densidades de protones y de electrones, el flujo bolométrico de un cúmulo de galaxias para un desplazamiento al rojo  $z$  es:

$$S_X = \frac{W n_p / n_e}{4\pi D_L^2(z)} \int n_e^2 T_e^{1/2} \bar{g}(T_e) dV , \quad (5.16)$$

siendo  $D_L = D_A(1+z)^2$  su distancia de luminosidad (Carroll, Press & Turner 1992), y  $D_A$  el diámetro angular.

Mediante la integración a lo largo de la línea de visión y usando la ecuación 5.8 para el perfil de la densidad de electrones tenemos el brillo superficial centrado en el cúmulo que se expresa como:

$$S_{X0} = \frac{WT_e^{1/2} \bar{g}(T_e) n_p r_c n_{e0}^2 I_X(\beta)}{2\pi(1+z)^4 n_e} \quad , \quad (5.17)$$

donde

$$I_X(\beta) \equiv \int_0^\infty (1+\xi^2)^{-3\beta} d\xi = \frac{\pi^{1/2} \Gamma(3\beta - 1/2)}{2\Gamma(3\beta)} \quad . \quad (5.18)$$

Combinando las ecuaciones 5.11 y 5.17 obtenemos la siguiente relación de escala:

$$S_{X0} \propto \frac{T_e^{1/2} (f_{\text{gas}} M_{200})^2}{(1+z)^4 r_c^5} \frac{I_X(\beta)}{I_{\text{gas}}(\beta, r/r_c)} \quad (5.19)$$

Utilizando esta ecuación y reescalando conforme al valor del flujo en la posición del cúmulo Abell 2065, se espera obtener la señal para CrB-H-hz. El pico de flujo hacia Abell 2065, en el mapa ROSAT es de  $6.4 \times 10^{-4}$  *cuentas s<sup>-1</sup> min. de arco<sup>-1</sup>*, siendo el nivel de fondo en esta región de  $\sim 10^{-4}$  *cuentas<sup>-1</sup> min. de arco<sup>-1</sup>*. Para dar consistencia al cálculo se toma, para Abell 2065,  $\beta = 1.162$ ,  $r_c = 485.9$  *kpc*,  $k_B T_e = 5.50$  *keV* y  $f_{\text{gas}} = 0.06$  de Brownstein & Moffat (2006), y se derivan  $r_{200}$  y  $m_{200}$  siguiendo el mismo procedimiento que se realizó para el CrB-H-hz. Combinando las ecuaciones 3.3, 3.4 y 3.5 se obtiene un  $r_{200} = 2.294$  *Mpc* y  $m_{200} = 1.455 \times 10^{15} M_\odot$ .

Usando estos parámetros para Abell 2065, los previstos para el CrB-H-hz y teniendo en cuenta los respectivos desplazamientos al rojo que presentan  $z=0.0726$  (Struble & Rood 1999) y  $z=0.112$ , la ecuación 5.19 da un flujo de rayos X para CrB-H-hz de  $3.8 \times 10^{-4}$  *cuentas s<sup>-1</sup> min. de arco<sup>-1</sup>*. Esto está por encima del nivel de fondo y, por tanto, esta hipotética estructura debería ser detectada en el mapa ROSAT.

Para investigar si podemos tener un flujo significativo SZ con poca emisión de rayos X, con una combinación razonable de los parámetros  $\beta$  y  $r_c$  se ha explorado el espacio de valores de estos parámetros, mientras que para el resto se han fijado en los valores previamente tomados. Las predicciones para el flujo de rayos X en ROSAT y el efecto SZ en el mapa de VSA de este parámetro se representan en la figura 5.3. Para radios de  $r_c = 0.2-0.4$  *Mpc* el efecto SZ máximo que puede provocar una estructura de este estilo, sin detectarse emisión de rayos X, es de  $\approx -25$   $\mu\text{K}$ .

Para radios  $r_c \gtrsim 1$  *Mpc*, es posible encontrar un efecto SZ inferior a  $-40$   $\mu\text{K}$  sin emisión detectable de rayos X. Sin embargo, no son posibles cúmulos con estos valores de radio del núcleo.

Se ha realizado el mismo tipo de análisis cuando  $f_{\text{gas}}$  se fija en valores distintos de 0.06, obteniendo resultados similares. Lo mismo ocurre cuando se considera un hipotético cúmulo de galaxias a una distancia mayor. En este caso, el flujo de rayos X baja significativamente, pero también lo hace el efecto SZ como consecuencia de la mayor dilución del haz. Téngase en cuenta que en la ecuación 5.13 el valor de  $\Delta T_0$  es independiente del desplazamiento al rojo. Sin embargo, para un mayor desplazamiento al rojo el tamaño angular del cúmulo es inferior y, a su vez, el efecto SZ medido con VSA también disminuye

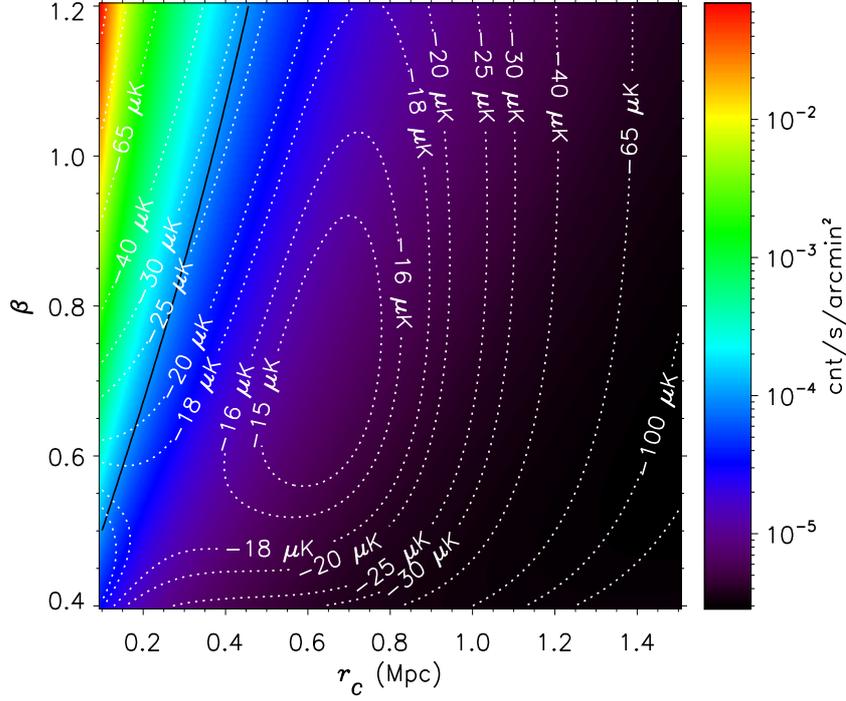


Figura 5.3: Flujo de rayos X predicho en los datos de ROSAT y el efecto SZ estimado en el mapa de VSA para la estructura CrB-H- $hz$  para diferentes combinaciones del espacio de parámetros  $\beta - r_c$ . La escala de color logarítmica muestra el flujo de rayos X en unidades de cuentas  $s^{-1}$  min. de arco $^{-2}$ . La línea sólida marca el valor del nivel de fondo de ROSAT en  $10^{-4}$  cuentas  $s^{-1}$  min. de arco $^{-2}$ . Los contornos discontinuos blancos indican el valor del efecto SZ predicho para esta estructura en los datos del mapa de VSA. *Figura tomada de Génova-Santos et al. (2010).*

al disminuir la extensión angular del cúmulo respecto al haz sintetizado del VSA. Podemos concluir, por tanto, que la máxima amplitud posible del efecto SZ para un cúmulo de galaxias, en cualquier desplazamiento al rojo, con una dispersión de velocidades como la que se estima para CrB-H- $hz$  y sin detectar emisiones de rayos X en ROSAT, es de  $\approx -30 \mu K$ , que es un 13% del decremento total observado en la dirección de CrB-H. Este resultado está de acuerdo también con los resultados de Battistelli et al. (2006), que se estimaron a partir de observaciones milimétricas MITO en esta región donde la contribución del efecto SZ es de  $\Delta T_{SZ} = -42^{+24}_{-29} \mu K$  para la temperatura termodinámica y de  $\Delta T_{Ani} = -128^{+21}_{-18} \mu K$  para la anisotropía primaria siendo la fracción de la señal debida al efecto SZ  $f \equiv \Delta T_{SZ}/(\Delta T_{SZ} + \Delta T_{Ani}) = -0,25^{+0,21}_{-0,18}$  incrementando la probabilidad de encontrar la mancha CrB-H calculada por Génova-Santos et al. (2005) en un 43%.

## 5.4. Discusión

Hemos estimado la masa bariónica de la estructura CrB-H-*hz* a desplazamiento al rojo de  $z \sim 0.11$ . Suponiendo valores típicos para la fracción de masa de gas y de los parámetros que definen el perfil de densidad de gas en los cúmulos de galaxias, se calculó el efecto SZ térmico y el flujo en rayos X para los mapas de VSA y ROSAT, respectivamente. Teniendo en cuenta las restricciones fijadas por la falta de emisión detectable de rayos-X en ROSAT en CrB-H, encontramos que el mínimo efecto térmico SZ sería de  $\approx -30 \mu\text{K}$ . Hemos considerado la posibilidad de la existencia de un grupo similar de galaxias a mayor desplazamiento al rojo, pero el resultado es parecido. No es verosímil que el hipotético filamento CrB-H-*lz* produzca un SZ apreciable, aunque como esta estructura parece estar no virializada, es difícil hacer una estimación de su masa y por tanto de su contenido de gas. Sin embargo, un efecto de amplitud similar a la presentada por CrB-H-*hz*, no se puede descartar. Nuestra estimación para la amplitud del efecto térmico SZ es del mismo orden del resultado obtenido con MITO,  $25^{+21}_{-18} \%$  y a los mostrados por Génova-Santos et al. (2005), en un análisis de sus tres canales de frecuencia. Sin embargo, restando los posibles  $-18 \mu\text{K}$  de la componente del efecto térmico SZ, el decremento total observado presenta una desviación significativa de la gaussianidad a nivel de  $4.1\sigma$ . Por lo tanto, la señal del efecto térmico del SZ para los grupos de galaxias encontrados en el estudio espectroscópico del SDSS-DR7 en la posición de CrB-H sólo puede ser una contribución menor en el decremento de la temperatura observado en el mapa VSA. Han de considerarse otros escenarios posibles. Una posibilidad interesante es considerar una anisotropía intrínseca primordial en el FCM, pero antes se debe estudiar otros mecanismos que conducen a las anisotropías secundarias del FCM. El efecto de lente gravitatoria para los fotones del FCM produce anisotropías con amplitudes de unos pocos microkelvins en escalas angulares menores del grado. El efecto Rees-Sciama (RS) (Rees & Sciama 1968), que se basa en que la energía perdida por un fotón al atravesar un cúmulo es menor que la que pierde si atraviesa un espacio vacío. En cúmulos cercanos, este efecto, puede generar decrementos de al menos  $\sim -20 \mu\text{K}$ , y para un grupo de galaxias como CrB-H-*hz* podría ser mucho más bajo. A distancias mayores y en cúmulos menos relajados, con una variación no lineal más rápida de sus potenciales gravitatorios, se podrían generar señales RS mucho mayores. Así pues, a pesar de no estar completamente identificados todavía los cúmulos o grupos ricos de galaxias en la región podrían construir una señal SZ grande como la que se muestra en CrB-H.

# 6

---

## Conclusiones y Perspectivas

Corona Borealis es uno de los Supercúmulos más prominentes del Hemisferio Norte celeste. Compuesto por ocho cúmulos Abell, ha sido el objeto de estudio de la presente tesis, debido a la presencia de un decremento muy significativo de la temperatura del Fondo Cósmico de Microondas a 33 GHz, en una zona intercumular. Se han barajado varias hipótesis a lo largo de la tesis. La primera es que este decremento, CrB-H, fuese debido a la presencia de un cúmulo lejano no detectado hasta el momento y que podría estar produciendo un efecto Sunyaev-Zel'dovich. La segunda de las hipótesis es que se trate de un filamento elongado a lo largo de la línea de visión de unos 100 Mpc de tamaño de forma que al integrar la señal producida, su resultado fuese el decremento CrB-H. La tercera de las hipótesis apunta a que en la zona del decremento exista una gran cantidad de gas “templado/caliente” que ha quedado atrapado en el pozo de potencial generado por las galaxias que pueblan la zona y que sería el responsable del mismo. Por último podría resultar que el decremento CrB-H sea debido a una combinación de las hipótesis anteriores.

### 6.1. Conclusiones

Se ha presentado un estudio de la distribución espacial de las galaxias en el CrB-SC. Hemos utilizado los datos de SDSS para analizar la densidad y las propiedades fotométricas de las galaxias dentro de la zona que abarca el decremento CrB-H y se compararon con las de galaxias de los cúmulos Abell, con las galaxias que habitan las zonas intercumulares del propio supercúmulo y con las galaxias de zonas externas al mismo a fin de encontrar similitudes en color y magnitud. Los principales resultados son los siguientes:

- La mancha fría, CrB-H, del CMB está situada en la parte norte (a 40 min. de arco del centro) de una región de 1 grado cuadrado delimitada por los cúmulos Abell 2056, 2065, 2059 y 2073, donde la densidad de las galaxias es un factor  $\sim 2$  superior con respecto a otras regiones intercumulares. Esto le da un exceso de  $\sim 8 \times 10^3$  galaxias hasta magnitud  $r = 22$  mag con respecto a valores típicos en los campos de control.
- La región subtendida por el decremento de VSA tiene una sobredensidad de galaxias, en comparación con los valores medios en áreas seleccionadas al azar en todo el cielo. Contando galaxias hasta  $r = 19$  mag en  $\sim 1000$  regiones escogidas al azar en el cielo,

se comprobó que la densidad de galaxias dentro de la mancha fría de VSA es  $\sim 1.6 - 3.0$  más alta que el valor medio en esos campos de control, con poca dependencia de las restricciones aplicadas en las magnitudes y/o colores. Sólo en  $\sim 1 - 3\%$  de dichas regiones de control la densidad de las galaxias es mayor que en CrB-H.

- No se encuentran cúmulos Abell en la zona subtendida por el decremento CrB-H ( $\sim 540$  minutos de arco cuadrados a un nivel de al menos  $3\sigma$ ). El cúmulo Abell más cercano al CrB-H es el Abell 2059 y tiene un desplazamiento al rojo de  $z=0.1305$ , cuyo centro se encuentra a 26.2 min. de arco (3.6 Mpc a dicho desplazamiento al rojo). El cúmulo más cercano miembro de CrB-SC es Abell 2056, que se encuentra a 58.9 min. de arco (4.7 Mpc). La contribución de cualquier cúmulo Abell a la población de las galaxias en el espacio subtendido por la mancha fría del FCM, CrB-H, es probablemente muy pequeña.
- El área subtendida por CrB-H muestra un exceso leve de galaxias en el rango  $21 < r < 22$  con color ( $1.1 < r - i < 1.3$ ), en comparación con los valores típicos en CrB-SC y en las regiones intercumulares. Esta sobredensidad de galaxias muestra una dependencia radial y se extiende hasta  $\sim 15$  min. de arco. Esto podría ser la evidencia de la existencia de un cúmulo dentro de CrB-SC en el que la distribución de luminosidad muestra una falta de galaxias brillantes, lo que explicaría por qué ha pasado inadvertido en los catálogos ópticos construidos a partir de cartografiados insuficientemente profundos como el DSS o SDSS. Alternativamente, la sobredensidad podría deberse a la parte más brillante de la función de luminosidad de un cúmulo con alto desplazamiento al rojo. La confirmación y delimitación de estas estructuras requiere de imágenes de mayor profundidad y de observaciones espectroscópicas para la determinación de los desplazamientos al rojo de las galaxias.
- Se ha estudiado la distribución de desplazamientos al rojo de la región CrB-H. Se han encontrado notables sobredensidades de galaxias alrededor de  $z = 0.07$  (CrB-H-*lz*) y a mayor desplazamiento al rojo,  $z = 0.11$  (CrB-H-*hz*). Sin embargo, no encontramos la evidencia de una conexión entre estas dos regiones. Por lo tanto, a partir de los datos analizados desde el SDSS debemos descartar la presencia de una estructura filamentosa que pueda conectar ambas.
- Sólo el 2.9% y el 2.1% de las celdas, en las que se dividió CrB-SC, estudiadas en los intervalos  $0.07 < z < 0.08$  y  $0.11 < z < 0.12$  eran más densas que las correspondientes a CrB-H-*lz* y CrB-H-*hz*. La mayoría de estas celdas están asociadas a cúmulos de galaxias Abell. Esto indica que CrB-H-*lz* y CrB-H-*hz* son unas de las regiones más densas, no asociadas a cúmulos de Abell, de CrB-SC.
- La densidad radial de las galaxias para CrB-H-*lz* muestra un comportamiento más plano que el que presentan cada uno de los cúmulos Abell 2065 y Abell 2069. Para CrB-H-*hz* la distribución radial muestra una densidad ligeramente superior en el centro, indicativo de que CrB-H-*hz* podría tener algún grado de virialización, siendo este más plausible que para CrB-H-*lz*.
- En relación a la morfología de las galaxias presentes en la región intercumular CrB-H para los dos grupos CrB-H-*lz* y CrB-H-*hz*, la conclusión es que no existe evidencia de que el grupo de galaxias situado a  $z \approx 0.07$  se encuentre ligado, ya que presenta

una dispersión de tipos morfológicos amplia y está compuesto mayoritariamente por galaxias de tipo tardío. Si bien, las galaxias que pueblan esta región presentan morfologías y colores similares a las que pueblan el cúmulo Abell 2065. En el caso del grupo de galaxias situado a  $z \approx 0.11$ , las galaxias que pueblan la zona se concentran en una misma región del diagrama  $CC(g-r, u-g)$ . El DCM que trazan estas galaxias es más estrecho en torno a la SR, lo que podría favorecer la hipótesis de la existencia de un grupo de galaxias ligado a  $z=0.11$ . El análisis de los parámetros morfológicos aportados por el SDSS demuestran que este grupo de galaxias está compuesto en su mayoría por galaxias de tipo temprano.

- El estudio SZ se ha concentrado en el candidato a cúmulo de galaxias CrB-H- $hz$ , encontrado a  $z=0.11$ . A partir de valores típicos de la fracción de masa de gas que permitió reproducir el perfil de densidad de gas en los cúmulos de galaxias fue posible hacer el cálculo de la intensidad esperable en rayos X y del posible efecto SZ que un cúmulo de este tipo pudiese provocar en los mapas de los que dispusimos en este estudio, ROSAT y VSA respectivamente. La falta de detección de emisión de Rayos X en el mapa de ROSAT impone el límite superior al efecto SZ que provoca una estructura como CrB-H- $hz$ . Este límite se estableció en  $-30 \mu\text{K}$ , que en comparación con los  $-230 \mu\text{K}$  de temperatura mínima en el mapa VSA es tan sólo un  $\sim 13\%$  de la señal detectada. Restando esta posible contribución de  $-30 \mu\text{K}$  al valor del decremento SZ, el total de decrementos observados permanecería como una desviación estadística de  $3.9 \sigma$  sobre el campo de fluctuaciones promedio del FCM.

En resumen, la estructura que denominamos

- CrB-H- $lz$  podría ser un filamento de unas decenas de Mpc que se extiende desde  $0.07 \leq z \leq 0.09$ .
- Se ha descubierto CrB-H- $hz$ , un candidato a cúmulo de galaxias que podría contribuir al decremento de temperatura del FCM detectado, pero que por sí solo no puede dar cuenta de la totalidad del efecto SZ registrado en CrB-H. La morfología y colores de las galaxias que pueblan CrB-H- $hz$  son similares a las que pueblan Abell 2069 en formas y colores.

## 6.2. Futuros trabajos

La continuación de este trabajo pasa por analizar los datos del satélite Planck. Además, podría utilizarse a su vez, el nuevo cartografiado SDSS-III, en particular el programa espectroscópico BOSS que se encuentra realizando espectroscopia de Galaxias Rojas Luminosas (LRG), de las cuales se sabe la existencia de al menos dos galaxias de este tipo en el campo de CrB-H. Estas galaxias se usan como trazadoras de cúmulos y podrían ayudar a la detección de grupos hasta  $z \sim 1$ . Los trabajos de Inés Flores-Cacho apuntan a la existencia de estructuras a desplazamientos al rojo próximos a  $z=0.17$  que podrían estar contribuyendo a la señal detectada por VSA en la región pero tampoco podrían explicar el decremento CrB-H en su totalidad. Sin embargo, no debemos descartar la posibilidad de que parte del efecto SZ detectado pueda ser causado, básicamente, por el WHIM o que alternativamente se trata de una no-gaussianidad en la mancha del VSA.

---

También es posible seguir profundizando en el estudio de la región CrB-H observando en modo imagen con GTC y haciendo multiespectroscopia con OSIRIS. Por ejemplo estudiando el resto de candidatos a cúmulo que muestra la tabla 3.1, y describiendo las características de las galaxias que los componen de igual manera que se ha hecho para CrB-H-*lz* y CrB-H-*hz*. Estos datos yabse han comenzado a obtener y están bajo análisis.

### Acrónimos

- **AF2-WYFFOS**: AutoFib 2 WYFFOS espectrómetro del WHT.
- **APM** : Automatic Photographic Measurement.
- **A2069-SC** : Supercúmulo asociado al cúmulo de Abell 2069.
- **BOSS** : The SDSS-III's Baryon Oscillation Spectroscopic Survey.
- **CC** : Diagrama Color-Color.
- **CrB-H** : Mancha fría del FCM detectada por VSA en la región de CrB-SC.
- **CrB-H- $hz$**  : CrB-H a bajo desplazamiento al rojo  $0.06 \leq z \leq 0.10$ .
- **CrB-H- $lz$**  : CrB-H a alto desplazamiento al rojo  $0.10 \leq z \leq 0.12$ .
- **CrB-SC** : Supercúmulo de Corona Borealis.
- **COBE** : Cosmic Background Explorer.
- **DCM** : Diagrama Color-Magnitud.
- **DD** : Diagrama de Diagnóstico.
- **DEC o Dec** : Coordenada de declinación.
- **FCM** : Fondo Cósmico de Microondas.
- **GTC** : Gran Telescopio de Canarias.
- **HST** : Hubble Space Telescope.
- **IGM** : Medio intergaláctico.
- **LCRS** : Las Campanas Redshift Survey.
- **LF** : Función de luminosidad.
- **LRG** : Catálogo de Luminosidad de las Galaxias Rojas.
- **Ly $_{\alpha}$**  : Serie espectral de Lyman  $\alpha$ .
- **MD** : Relación Morfología-densidad.
- **MITO** : Millimeter and infrared Testa Grigia observatory.
- **OSIRIS** : Optical System for Imaging and low Resolution Integrated Spectroscopy.
- **PSC** : Catálogo de fuentes puntuales.
- **RA o R.A.** : Coordenada de Ascensión Recta.
- **RJ** : Rayleigh-Jeans.
- **ROSAT** : Röntgen Satélite.
- **RS** : Rees-Sciama.
- **SDSS** : Sloan Digital Sky Survey.
- **SDSS-DR5** : Sloan Digital Sky Survey Data Release 5.
- **SDSS-DR6** : Sloan Digital Sky Survey Data Release 6.
- **SDSS-DR7** : Sloan Digital Sky Survey Data Release 7.
- **SED** : Distribución espectral de energía.

- **SFR** : Tasa de formación estelar.
- **SR** : Secuencia Roja.
- **SZ** : Sunyaev-Zel'dovich.
- **SZE** : Efecto Sunyaev-Zel'dovich.
- **USNO** : The United States Naval Observatory.
- **VSA** : Very Small Array.
- **WHIM** : Fase de gas templado/caliente del medio interestelar.
- **WHT** : Willian Herschel Telescope.
- **WMAP** : Wilkinson Microwave Probe.
- **2dFGRS** : 2dF Galaxy Redshift Survey.

# A

---

## Bibliografía

- Rahman, N., & Shandarin, S. F. 2001, *ApJ*, 550, L121
- Press, W. H., & Schechter, P. 1974, *ApJ*, 187, 425
- Abazajian, K. N., et al. 2009, *ApJS*, 182, 543
- Abell, G. O. 1958, *ApJS*, 3, 211
- Abell, G. O. 1961, *AJ*, 66, 607
- Abell, G. O., Corwin, H. G., Jr., & Olowin, R. P. 1989, *ApJS*, 70, 1
- Allen, S. W., & Fabian, A. C. 1998, *MNRAS*, 297, L63
- Anders, E. & Grevesse, N. 1989, *GeCoA*, 53, 197
- Bahcall, N. A., & Cen, R. 1993, *ApJ*, 407, L49
- Bahcall, N. A. 1988, *ARA&A*, 26, 631
- Baldwin, J. A., Phillips, M. M., & Terlevich, R. 1981, *PASP*, 93, 5
- Balogh, M., et al. 2004, *MNRAS*, 348, 1355
- Battistelli, E. S., et al. 2006, *ApJ*, 645, 826
- Basilakos, S. 2003, *MNRAS*, 344, 602
- Bekki, K. 1998, *A&A*, 334, 814
- Bekki, K., Forbes, D. A., Beasley, M. A., & Couch, W. J. 2002, *MNRAS*, 335, 1176
- Benson, A. J., Frenk, C. S., Baugh, C. M., Cole, S., & Lacey, C. G. 2001, *MNRAS*, 327, 1041
- Birkinshaw, M., Gull, S. F., & Northover, K. J. E. 1981, *MNRAS*, 197, 571
- Bolzonella, M., Miralles, J.-M., & Pelló, R. 2000, *A&A*, 363, 476
- Brownstein, J. R., & Moffat, J. W. 2006, *MNRAS*, 367, 527
- Bruzual A., G., & Charlot, S. 1993, *ApJ*, 405, 538
- Carlberg, R. G., Yee, H. K. C., Ellingson, E., Abraham, R., Gravel, P., Morris, S., & Pritchet, C. J. 1996, *ApJ*, 462, 32

- Carlberg, R. G., Yee, H. K. C., & Ellingson, E. 1997, *ApJ*, 478, 462
- Carlstrom, J. E., Holder, G. P., & Reese, E. D. 2002, *ARA&A*, 40, 643
- Carroll, S. M., Press, W. H., & Turner, E. L. 1992, *ARA&A*, 30, 499
- Cavaliere, A., Danese, L., & de Zotti, G. 1979, *A&A*, 75, 322
- Cen, R., Miralda-Escudé, J., Ostriker, J. P., & Rauch, M. 1994, *ApJ*, 437, L9
- Cen, R., & Ostriker, J. P. 1999, *ApJ*, 514, 1
- Connolly, A. J., & Szalay, A. S. 1999, *AJ*, 117, 2052
- Coleman, G. D., Wu, C.-C., & Weedman, D. W. 1980, *ApJS*, 43, 393
- Couch, W. J., Ellis, R. S., Sharples, R. M., & Smail, I. 1994, *ApJ*, 430, 121
- Couch, W. J., Balogh, M. L., Bower, R. G., et al. 2001, *ApJ*, 549, 820
- Davé, R., Hernquist, L., Katz, N., & Weinberg, D. H. 1999, *ApJ*, 511, 521
- Davé, R., et al. 2001, *ApJ*, 552, 473
- Díaz-Sánchez, A., Villo-Pérez, I., Pérez-Garrido, A., & Rebolo, R. 2007, *MNRAS*, 377, 516
- Dressler, A. 1980, *ApJ*, 236, 351
- Einasto, M., Einasto, J., Tago, E., Dalton, G. B., & Andernach, H. 1994, *MNRAS*, 269, 301
- Einasto, M., Tago, E., Jaaniste, J., Einasto, J., & Andernach, H. 1997, *A&AS*, 123, 119
- Einasto, M., Einasto, J., Tago, E., Müller, V., & Andernach, H. 2001, *AJ*, 122, 2222
- Einasto, J., Hütsi, G., Einasto, M., Saar, E., Tucker, D. L., Müller, V., Heinämäki, P., & Allam, S. S. 2003, *A&A*, 405, 425
- Einasto, J., Tago, E., Einasto, M., Saar, E., Suhhonenko, I., Heinämäki, P., Hütsi, G., & Tucker, D. L. 2005, *A&A*, 439, 45
- Ellis, R. S., Colless, M., Broadhurst, T., Heyl, J., & Glazebrook, K. 1996, *MNRAS*, 280, 235
- Erdoğdu, P., et al. 2004, *MNRAS*, 352, 939
- Evrard A. E. 1997, *MNRAS*, 292, 289
- Fujita, Y. 1998, *ApJ*, 509, 587
- Fujita, A., van Gorkom, J., & van Kampen, E. 1999, *American Astronomical Society Meeting Abstracts*, 194, #110.04
- Fukugita, M., Hogan, C. J., & Peebles, P. J. E. 1998, *ApJ*, 503, 518
- Gal, R. R., de Carvalho, R. R., Lopes, P. A. A., et al. 2003, *AJ*, 125, 2064
- Gladders, M. D., Lopez-Cruz, O., Yee, H. K. C., & Kodama, T. 1998, *ApJ*, 501, 571
- Gladders, M. D., & Yee, H. K. C. 2000, *AJ*, 120, 2148
- Génova-Santos, R., et al. 2005, *MNRAS*, 363, 79
- Génova-Santos, R., et al. 2008, *MNRAS*, 391, 1127

- Génova-Santos, R., Padilla-Torres, C. P., Rubiño Martín, J. A., Gutiérrez, C. M., & Rebolo, R. 2010, *MNRAS*, 403, 1531
- Gnedin, N. Y., Baker, E. J., Bethell, T. J., et al. 2003, *ApJ*, 583, 525
- Gómez, P. L., et al. 2003, *ApJ*, 584, 210
- Goto, T., et al. 2003, *PASJ*, 55, 757
- Gutiérrez, C. M., Trujillo, I., Aguerri, J. A. L., Graham, A. W., & Caon, N. 2004, *ApJ*, 602, 664
- Heavens, A., Panter, B., Jimenez, R., & Dunlop, J. 2004, *Nature*, 428, 625
- Kalinkov, M., & Kuneva, I. 1995, *A&AS*, 113, 451
- Kauffmann, G. 1995, *MNRAS*, 274, 153
- Kinney, A. L., Bohlin, R. C., Calzetti, D., Panagia, N., & Wyse, R. F. G. 1993, *ApJS*, 86, 5
- Kodama, T., & Arimoto, N. 1997, *A&A*, 320, 41
- Koester, B. P., McKay, T. A., Annis, J., et al. 2007, *ApJ*, 660, 239
- Lilly, S. J., Tresse, L., Hammer, F., Crampton, D., & Le Fevre, O. 1995, *ApJ*, 455, 108
- Lin, H., Kirshner, R. P., Shectman, S. A., Landy, S. D., Oemler, A., Tucker, D. L., & Schechter, P. L. 1996, *ApJ*, 464, 60
- Loveday, J., Peterson, B. A., Efstathiou, G., & Maddox, S. J. 1992, *ApJ*, 390, 338
- Moore, B., Lake, G., & Katz, N. 1998, *ApJ*, 495, 139
- Mushotzky, R. F., & Scharf, C. A. 1997, *ApJ*, 482, L13
- Oort, J. H. 1983, *ARA&A*, 21, 373
- Padilla-Torres, C. P., Rebolo, R., Gutiérrez, C. M., Watson, R., Génova-Santos, R., & Juncosa, R. 2007, *IAU Symposium*, 235, 232
- Poggianti, B. M., Smail, I., Dressler, A., Couch, W. J., Barger, A. J., Butcher, H., Ellis, R. S., & Oemler, A. J. 1999, *ApJ*, 518, 576
- Poggianti, B. M., Bressan, A., & Franceschini, A. 2001, *ApJ*, 550, 195
- Poggianti, B. M., Bridges, T. J., Komiyama, Y., Yagi, M., Carter, D., Mobasher, B., Okamura, S., & Kashikawa, N. 2004, *ApJ*, 601, 197
- Porter, S. C., & Raychaudhury, S. 2005, *MNRAS*, 364, 1387
- Postman, M., Geller, M. J., & Huchra, J. P. 1988, *AJ*, 95, 267
- Postman, M., Lubin, L. M., & Oke, J. B. 1998, *AJ*, 116, 560
- Press, W. H., & Schechter, P. 1974, *ApJ*, 187, 425
- Quilis, V., Ibáñez, J. M., & Sáez, D. 2000, *A&A*, 353, 435
- Rahman, N., & Shandarin, S. F. 2001, *Bulletin of the American Astronomical Society*, 33, 864
- Rauch, M., et al. 1997, *ApJ*, 489, 7

- Ramella, M., Boschin, W., Fadda, D., & Nonino, M. 2001, *A&A*, 368, 776
- Rebolo, R., et al. 2004, *MNRAS*, 353, 747
- Rees, M. J., & Sciama, D. W. 1968, *Nature*, 217, 511
- Reiprich, T. H., Böhringer, H. 2002, *ApJ*, 567, 716
- Rosati, P., Borgani, S., & Norman, C. 2002, *ARA&A*, 40, 539
- Rybicki, G. B., & Lightman, A. P. 1979, *Radiative Processes in Astrophysics*, Wiley-Interscience, New York
- Sanchis, T., Mamon, G. A., Salvador-Solé, E., & Solanes, J. M. 2004, *A&A*, 418, 393
- Sanderson, A. J. R., Ponman, T. J., Finoguenov, A., Lloyd-Davies, E. J., & Markevitch, M. 2003, *MNRAS*, 340, 989
- Shandarin, S. F., Sheth, J. V., & Sahni, V. 2004, *MNRAS*, 353, 162
- Shane, C. D., & Wirtanen, C. A. 1954, *AJ*, 59, 285
- Sazonov, S. Y., & Sunyaev, R. A. 1998, Abstracts of the 19th Texas Symposium on Relativistic Astrophysics and Cosmology, held in Paris, France, Dec. 14-18, 1998. Eds.: J. Paul, T. Montmerle, and E. Aubourg (CEA Saclay), meeting abstract.
- Sazonov, S. Y., & Sunyaev, R. A. 1999, *MNRAS*, 310, 765
- Small, T. A., Sargent, W. L. W., & Hamilton, D. 1997, *ApJS*, 111, 1
- Small, T. A., Sargent, W. L. W., & Hamilton, D. 1997, *ApJ*, 487, 512
- Small, T. A., Ma, C.-P., Sargent, W. L. W., & Hamilton, D. 1998, *ApJ*, 492, 45
- Snowden, S. L., Egger, R., Freyberg, M. J., et al. 1997, *ApJ*, 485, 125
- Struble, M. F., & Rood, H. J. 1999, *ApJS*, 125, 35
- Solanes, J. M., Manrique, A., García-Gómez, C., González-Casado, G., Giovanelli, R., & Haynes, M. P. 2001, *ApJ*, 548, 97
- Spergel, D. N. 2005, *ASP Conf. Ser.* 344: *The Cool Universe: Observing Cosmic Dawn*, 344, 29
- Stoughton, C., et al. 2002, *AJ*, 123, 485
- Strateva, I., Ivezić, Ž., Knapp, G. R., et al. 2001, *AJ*, 122, 1861
- Sunyaev, R. A., & Zeldovich, Y. B. 1972, *Comments on Astrophysics and Space Physics*, 4, 173
- Tytler, D., Fan, X.-M., & Burles, S. 1996, *Nature*, 381, 207
- Valluri, M. 1993, *ApJ*, 408, 57
- van Gorkom, J. H. 2004, *Clusters of Galaxies: Probes of Cosmological Structure and Galaxy Evolution*, 305
- Veilleux, S., & Osterbrock, D. E. 1987, *ApJS*, 63, 295
- Wray, J. J., Bahcall, N. A., Bode, P., Boettiger, C., & Hopkins, P. F. 2006, *ApJ*, 652, 907
- Yip, C. W., Connolly, A. J., Szalay, A. S., et al. 2004, *AJ*, 128, 585
- Zucca, E., Zamorani, G., Scaramella, R., & Vettolani, G. 1993, *ApJ*, 407, 470

# B

---

## Ficheros de configuración

### B.1. Fichero de configuración: Entrada de valores

```
TARGET mancha H corteUTDATE 2008.5
EQUINOX 2000.0
SKYPA 172.48
FIBRES SMALL
CENTRE 15 22 11.47 29 00 02.96
HA 0
GSC0203100645 15 21 03.828 28 50 11.47 F 5 14.22 *
GSC0203101317 15 21 42.086 28 57 30.17 F 5 14.24 *
GSC0203100263 15 21 31.337 29 05 40.60 F 5 14.25 *
GSC0203100449 15 21 55.286 29 17 59.71 F 5 14.35 *
...
idnrip6373 15 22 59.270 28 43 08.44 P 8 17.517 *
idn42084 15 22 33.257 29 02 11.33 P 5 15.725 *
id3800 15 21 44.995 29 09 14.42 P 4 16.165 *
id2547 15 21 27.131 29 09 37.59 P 4 16.211 *
idn43628 15 22 50.582 29 10 38.42 P 4 16.216 *
idad6 15 21 57.600 28 59 21.00 P 8 16.380 *
idn32274 15 23 34.025 29 02 39.08 P 4 16.644 *
idn37175 15 20 54.262 28 48 14.18 P 4 16.767 *
...
idn33072 15 23 20.275 29 02 22.06 P 3 17.024 *
idn38058 15 20 58.027 28 51 42.70 P 3 17.044 *
id3995 15 22 07.622 29 16 31.14 P 3 17.088 *
idn37163 15 21 43.128 28 40 52.79 P 3 17.096 *
id1742 15 21 45.009 29 17 59.54 P 3 17.166 *
...
idn39394 15 21 30.840 28 55 36.91 P 3 17.432 *
id818 15 21 22.616 29 15 30.06 P 3 17.435 *
idn56993 15 23 16.145 29 15 16.49 P 3 17.458 *
id4539 15 22 04.195 29 12 02.94 P 3 17.484 *
idn33808 15 23 17.182 29 04 01.24 P 3 17.492 *
idn32791 15 22 58.778 28 54 37.55 P 3 17.495 *
id2779 15 20 58.593 29 07 43.86 P 3 17.505 *
...
idn38803 15 22 01.978 28 46 35.72 P 3 17.667 *
idn156 15 22 55.504 29 19 37.55 P 3 17.684 *
idn42137 15 22 33.271 29 02 31.45 P 3 17.708 *
idn42137 15 22 33.271 29 02 31.45 P 3 17.708 *
idn41673 15 21 48.506 29 05 29.83 P 3 17.709 *
idn40539 15 21 48.876 28 59 36.13 P 3 17.712 *
...
idn33361 15 22 51.226 28 54 21.74 P 3 17.869 *
idn33208 15 23 41.299 29 07 03.65 P 3 17.889 *
idn3725 15 23 41.300 29 07 03.63 P 3 17.889 *
idn33854 15 22 48.936 28 55 41.45 P 3 17.892 *
id790 15 21 24.000 29 16 00.71 P 3 17.900 *
id2948 15 21 46.101 29 11 53.96 P 3 17.912 *
idn39754 15 21 22.229 28 57 56.81 P 3 17.940 *
idn38945 15 20 50.614 28 55 12.29 P 3 17.945 *
idn34991 15 22 51.034 29 01 13.73 P 3 17.947 *
...
```

## B.2. Fichero de configuración: Salida de valores

```
* Telescope info from wht_prime.dat* Field diameter (mm) 205.00
* Telescope scales as follows: 17.643 337.70 2.0000
TARGET mancha H corto
UTDATE 2008.5
EQUINOX 2000.0
SKYPA 172.48
FIBRES SMALL
CENTRE 15 22 11.47 29 00 02.96
HA 0
1 PARKED
2 idn40206 15 22 13.930 28 53 31.52 P 3 17.568 *
3 PARKED
4 idn34977 15 22 25.246 28 50 12.88 P 3 17.261 *
5 PARKED
6 PLACE_XY 15 22 47.597 +28 37 18.997 16942 81459
7 PARKED
8 PLACE_XY 15 22 37.509 +28 46 13.818 13204 49419 ...
15 PARKED
16 GSC0203100621 15 22 26.844 28 55 08.36 F 5 14.73 *
17 PARKED
18 PLACE_XY 15 23 22.059 +28 44 10.190 45779 61167
19 PARKED
20 PLACE_XY 15 23 18.806 +28 47 37.275 44711 48885
21 idn33361 15 22 51.226 28 54 21.74 P 3 17.869 * ...
82 id4539 15 22 04.195 29 12 02.94 P 3 17.484 *
83 DISABLED ...
91 id2578 15 21 42.623 29 12 11.95 P 4 16.951 *
92 id790 15 21 24.000 29 16 00.71 P 3 17.900 * ...
128 GSC0203101317 15 21 42.086 28 57 30.17 F 5 14.24 *
129 PARKED
130 idn38039 15 20 57.178 28 51 39.02 P 3 17.302 *
131 PARKED
132 idn37347 15 20 48.475 28 48 57.38 P 3 17.583 *
133 PARKED
134 idn36927 15 20 50.904 28 47 16.15 P 4 16.771 * ...
144 GSC0203101273 15 21 41.861 28 49 44.08 F 5 14.37 *
145 DISABLED 146 idn36863 15 21 29.266 28 43 12.11 P 3 17.833 *
147 PARKED
148 idn38288 15 21 48.506 28 47 03.70 P 3 17.604 * ...
160 GSC0203100472 15 22 16.562 28 43 47.03 F 5 14.42 *
901 GSC0203100645 15 21 03.828 28 50 11.47 F 5 14.22 *
902 GSC0203101317 15 21 42.086 28 57 30.17 F 5 14.24 *
```

# C

## Galaxias del Grupo CrB-H- $lz$

Relación de galaxias y morfología

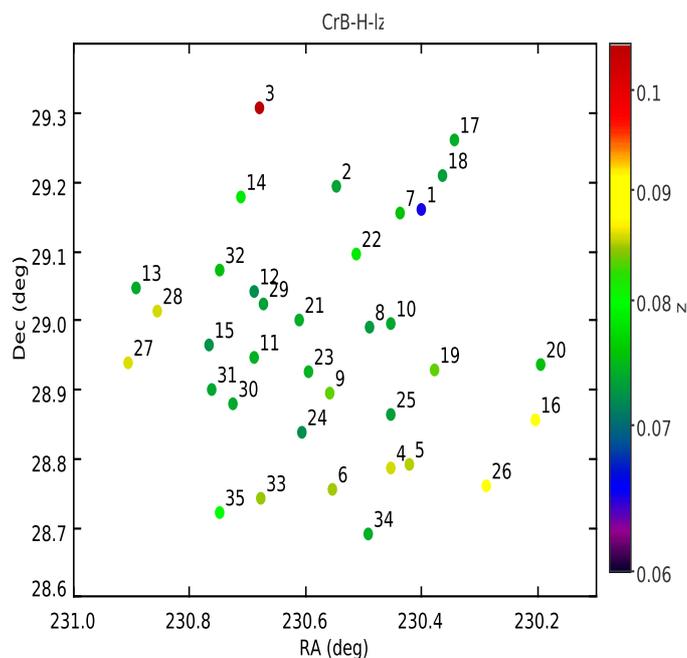


Figura C.1: Distribución espacial de las galaxias de CrB-H- $lz$  en los primeros 20 minutos de arco desde el centro. Las etiquetas muestran el número de la galaxia en la tabla C y en las sucesivas figuras este apéndice.

En este apéndice se presentan las galaxias que pueblan la mancha fría de CMB, CrB-H y que se encuentran a un desplazamiento al rojo de  $z \approx 0,07$  en un radio de 20 minutos de arco desde el centro de la mancha. Se trata de las galaxias que se agrupan en el primer pico del histograma de la figura 3.8 de la sección 3.3 y que corresponden al denominado grupo

CrB-H-lz. Las imágenes de las galaxias que se presentan en las distintas figuras tienen un tamaño de  $0.3''/pix$  de la cámara usada por el SDSS. Las coordenadas y la distancia al centro de la mancha la clasificación morfológica de las galaxias se representan en la siguiente tabla:

N	RA (J2000) (deg)	Dec (J2000) (deg)	rad (' arco)	z	$z_{err}$	tipo (a)	Emisión (b)
1	230.400680	29.158420	12.333556	0.0651292	1.60682E-4	3	5
2	230.545990	29.193400	11.722580	0.0735722	8.1019E-5	2	5
3	230.679998	29.306816	19.779983	0.106745	1.5836E-4	1	5
4	230.452111	28.784362	13.770167	0.0857741	8.32987E-5	2	5
5	230.421423	28.790709	14.099650	0.085274	8.00018E-5	3	5
6	230.554540	28.753488	14.676805	0.0848082	1.33596E-4	1	5
7	230.437478	29.154006	11.002009	0.0755258	1.4232E-4	3	5
8	230.489250	28.988384	3.126256	0.0728764	3.91858E-5	1	5
9	230.558039	28.892088	6.379257	0.0834955	1.47766E-4	2	5
10	230.453652	28.993367	4.948218	0.0737133	8.65216E-5	3	5
11	230.688088	28.943251	8.064676	0.0744098	1.63448E-4	2	5
12	230.688024	29.039244	7.762186	0.0722213	1.63369E-4	3	5
13	230.891774	29.044190	18.258892	0.0739304	1.7289E-4	3	5
14	230.710765	29.177344	13.739469	0.0783764	1.55644E-4	3	5
15	230.765660	28.962755	11.629585	0.0724607	8.01525E-5	1	5
16	230.204658	28.854568	19.969776	0.0902523	1.0356E-4	3	5
17	230.344235	29.258350	18.915088	0.0742979	9.06221E-5	2	5
18	230.364030	29.208710	15.893233	0.0733183	7.94703E-5	3	5
19	230.378505	28.926921	9.857939	0.0835059	1.61182E-4	2	6
20	230.195308	28.935344	18.881609	0.0753376	7.87317E-5	2	5
21	230.610340	28.997732	3.282564	0.0741982	1.89372E-4	1	6
22	230.512947	29.093603	6.018590	0.0784871	1.82831E-4	2	5
23	230.593468	28.922675	5.117853	0.0745088	9.48563E-5	3	5
24	230.605194	28.836906	10.126619	0.0723124	7.82264E-5	2	5
25	230.453066	28.862461	9.534509	0.0732227	1.81026E-4	1	5
26	230.287899	28.757725	19.857750	0.0901475	1.52887E-4	2	6
27	230.905721	28.937579	19.135933	0.0859846	1.48423E-4	2	6
28	230.853951	29.011905	16.087245	0.0857599	1.66073E-4	3	5
29	230.673322	29.022522	6.748843	0.0733905	7.88265E-5	3	5
30	230.723685	28.877158	11.743106	0.0739221	1.67796E-4	1	6
31	230.760676	28.899031	12.657525	0.0738144	1.61868E-4	1	6
32	230.748712	29.069901	11.388353	0.0753176	7.6278E-5	3	5
33	230.677341	28.740509	16.884231	0.0847309	1.61257E-4	3	5
34	230.491367	28.689409	18.753197	0.0742308	9.24818E-5	3	5
35	230.746979	28.719011	19.744027	0.0797528	0.00112351	3	5

Tabla C.1: Tabla de las galaxias del grupo CrB-H-lz ( $z=0.07$ ). Notas: (a) En esta columna se representa el tipo morfológico de las galaxias, 1 para las E, 2 para las S0-S6 y 3 para las galaxias Espirales (b) Esta columna representa la presencia de líneas de emisión en el espectro de las galaxias, 5 para aquellas que presentan líneas de emisión y 6 para las que no presentan líneas de emisión.

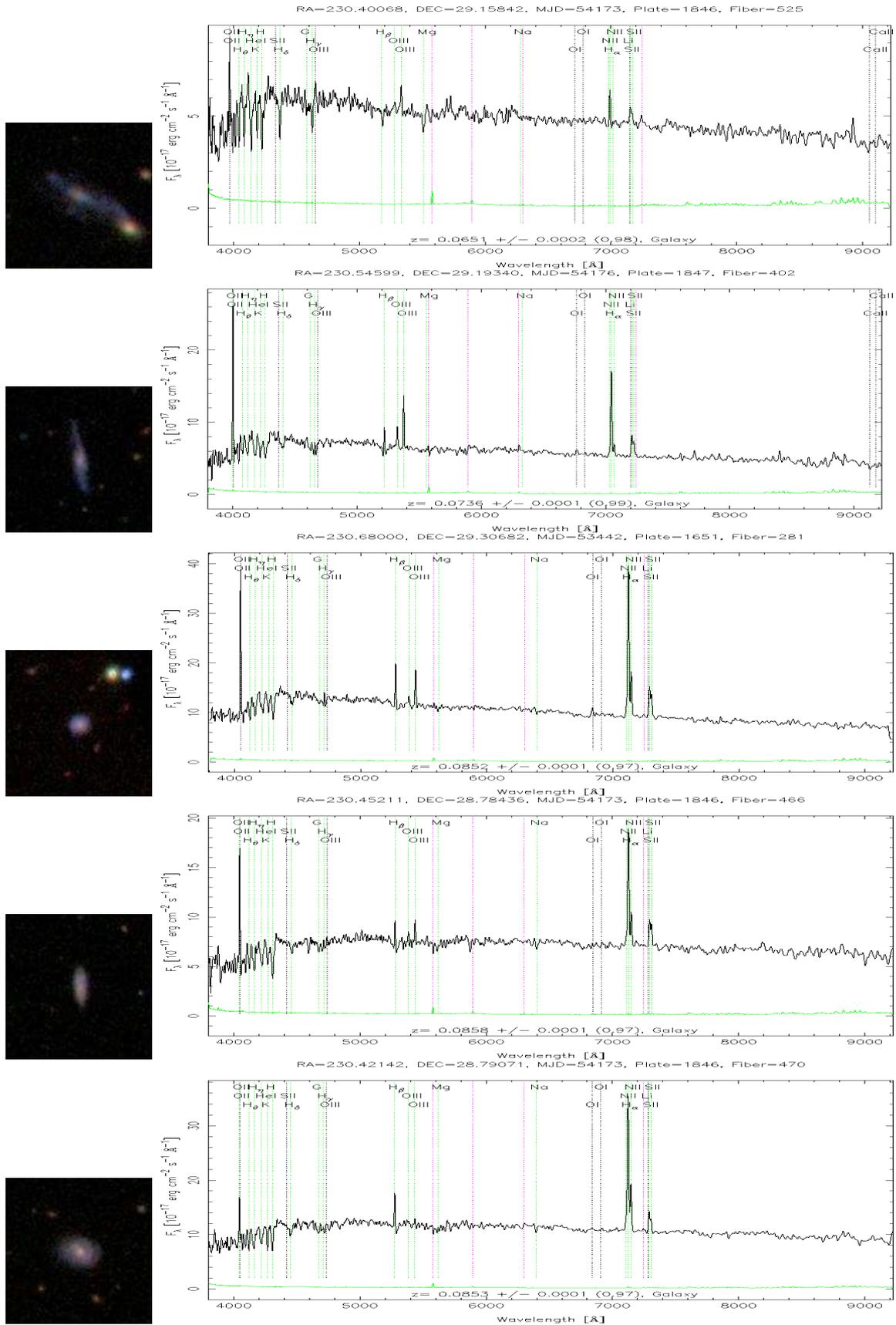


Figura C.2: Galaxias de CrB-H-*lz* (de 1 a 5)

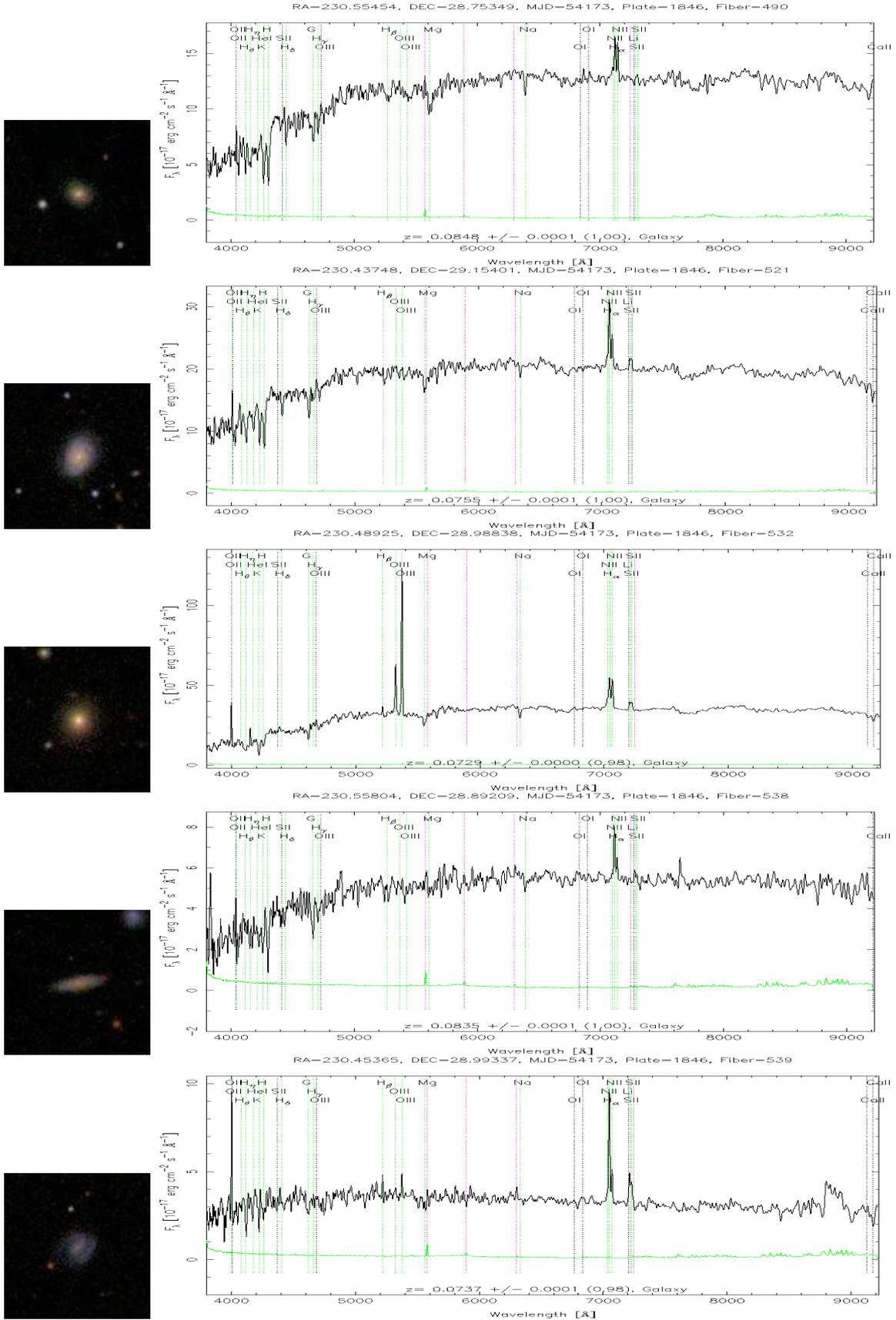


Figura C.3: Galaxias de CrB-H-lz (de 6 a 10)

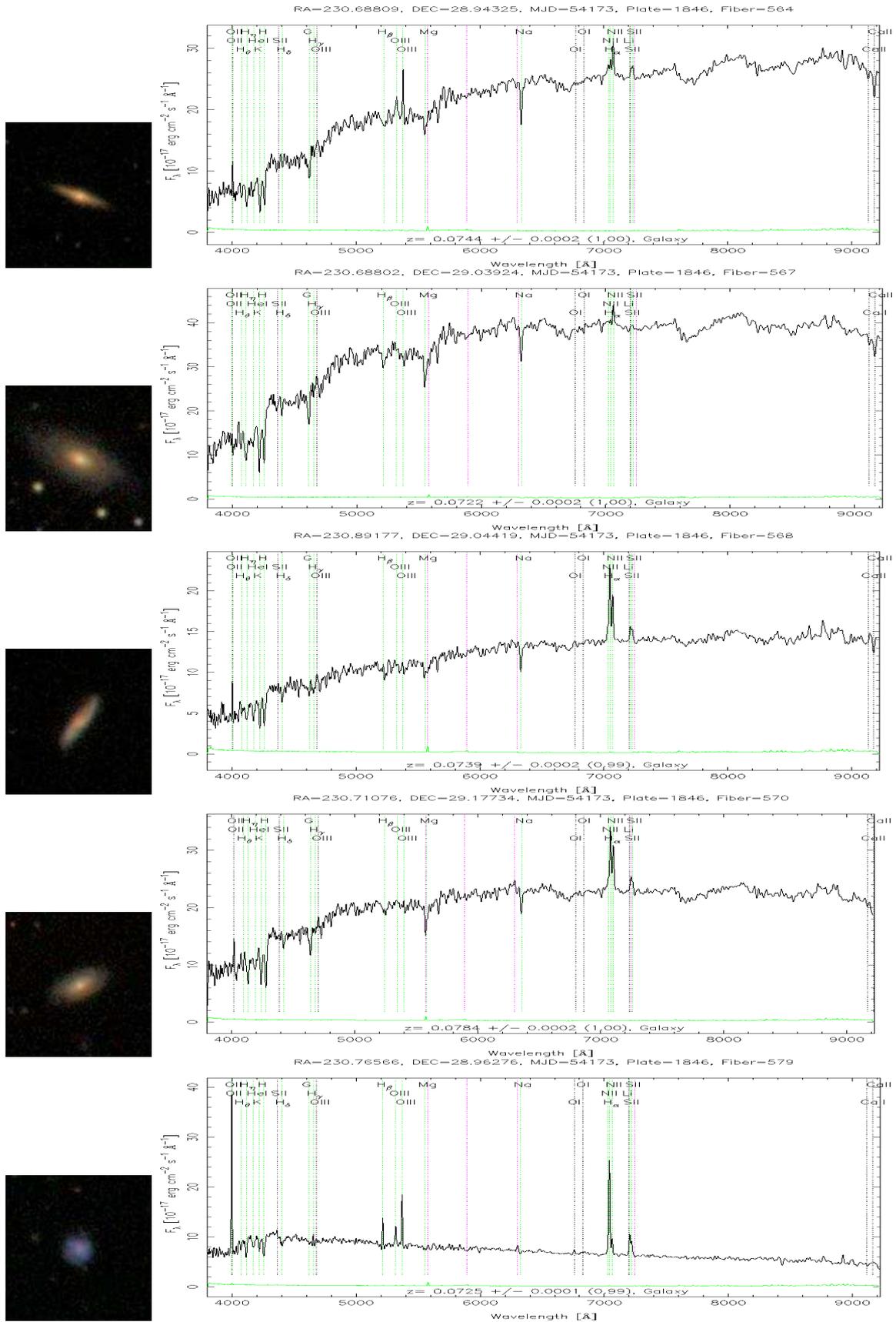


Figura C.4: Galaxias de CrB-H-*lz* (de 11 a 15)



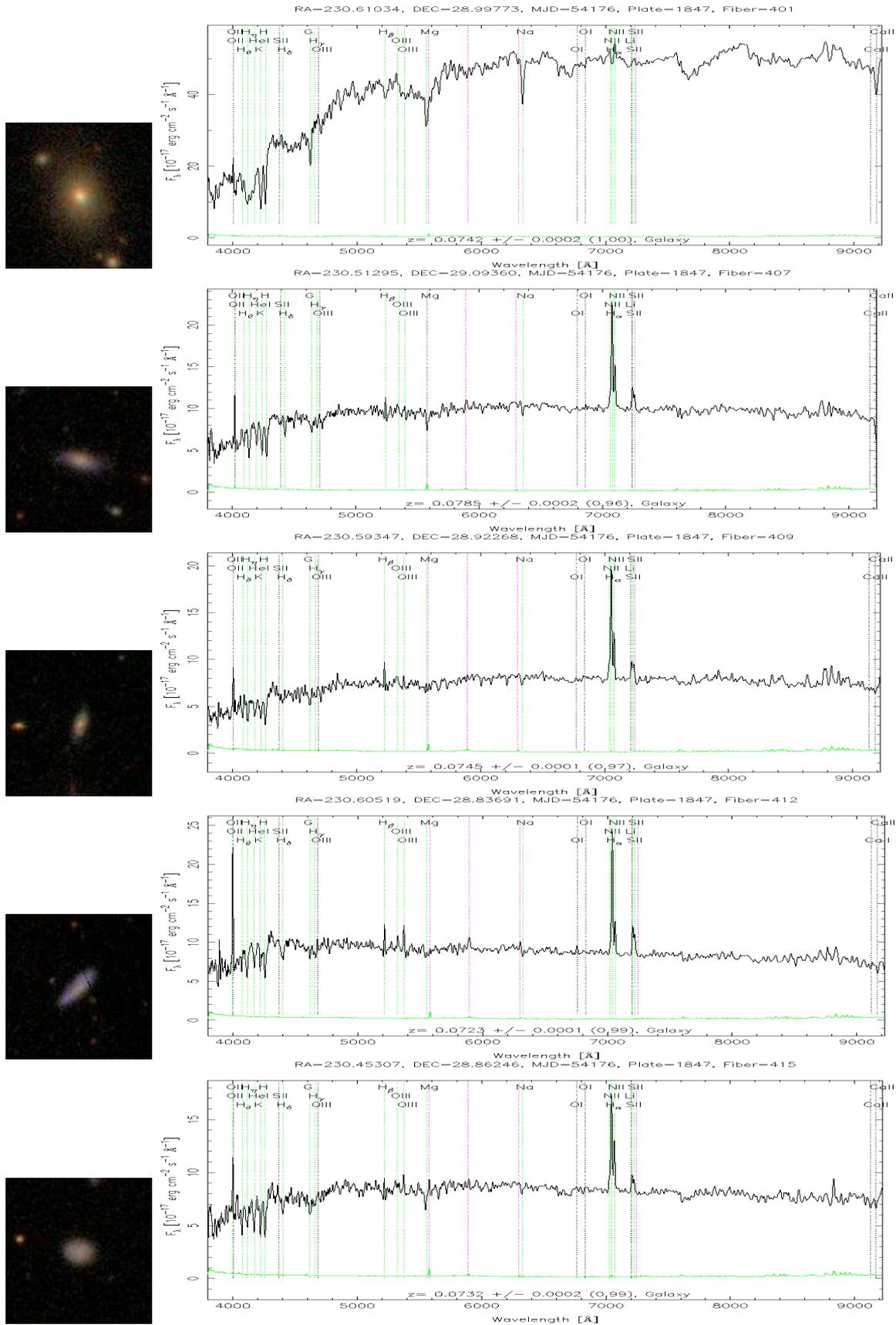


Figura C.6: Galaxias de CrB-H- $l_z$  (de 21 a 25)

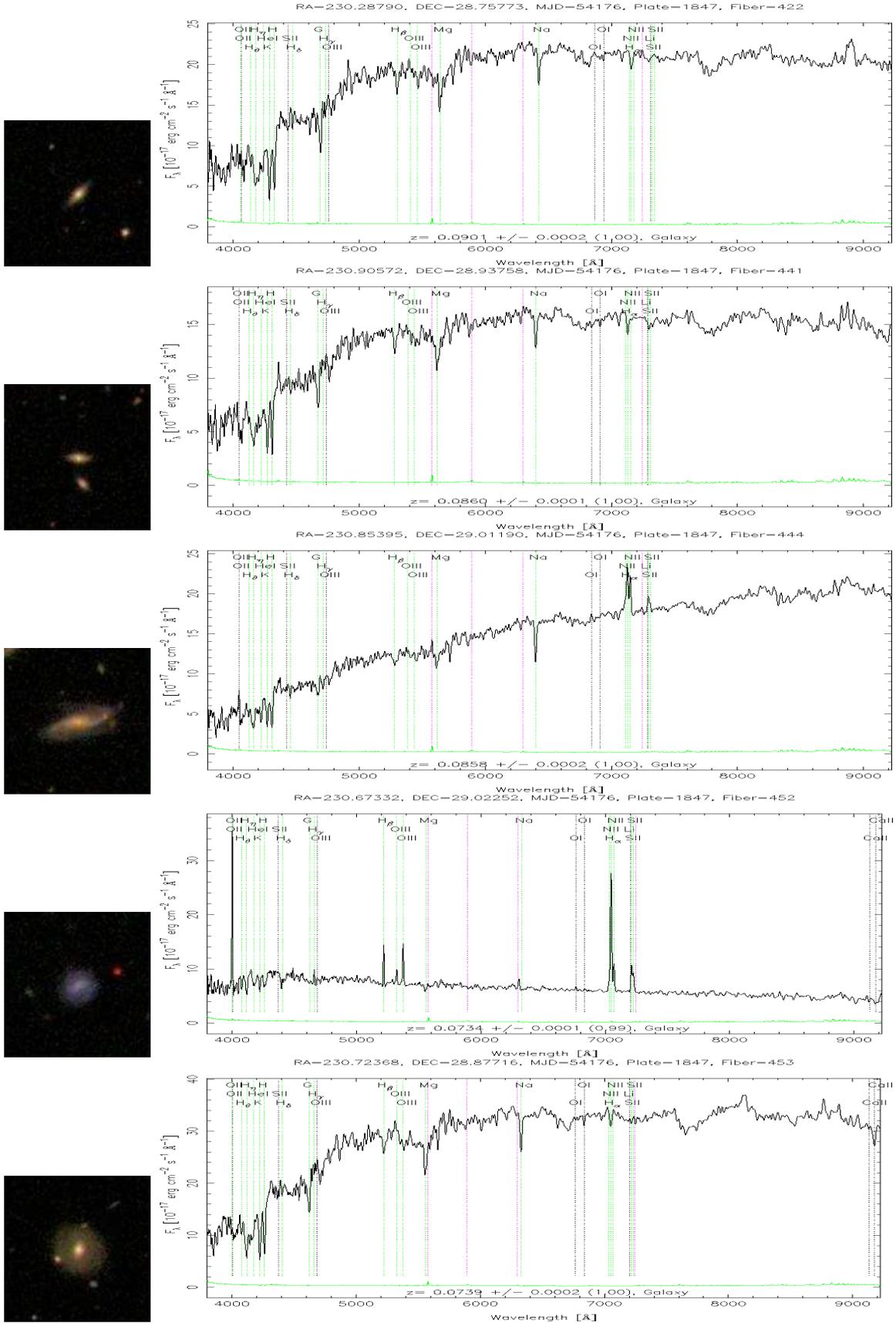


Figura C.7: Galaxias de CrB-H-lz (de 26 a 30)

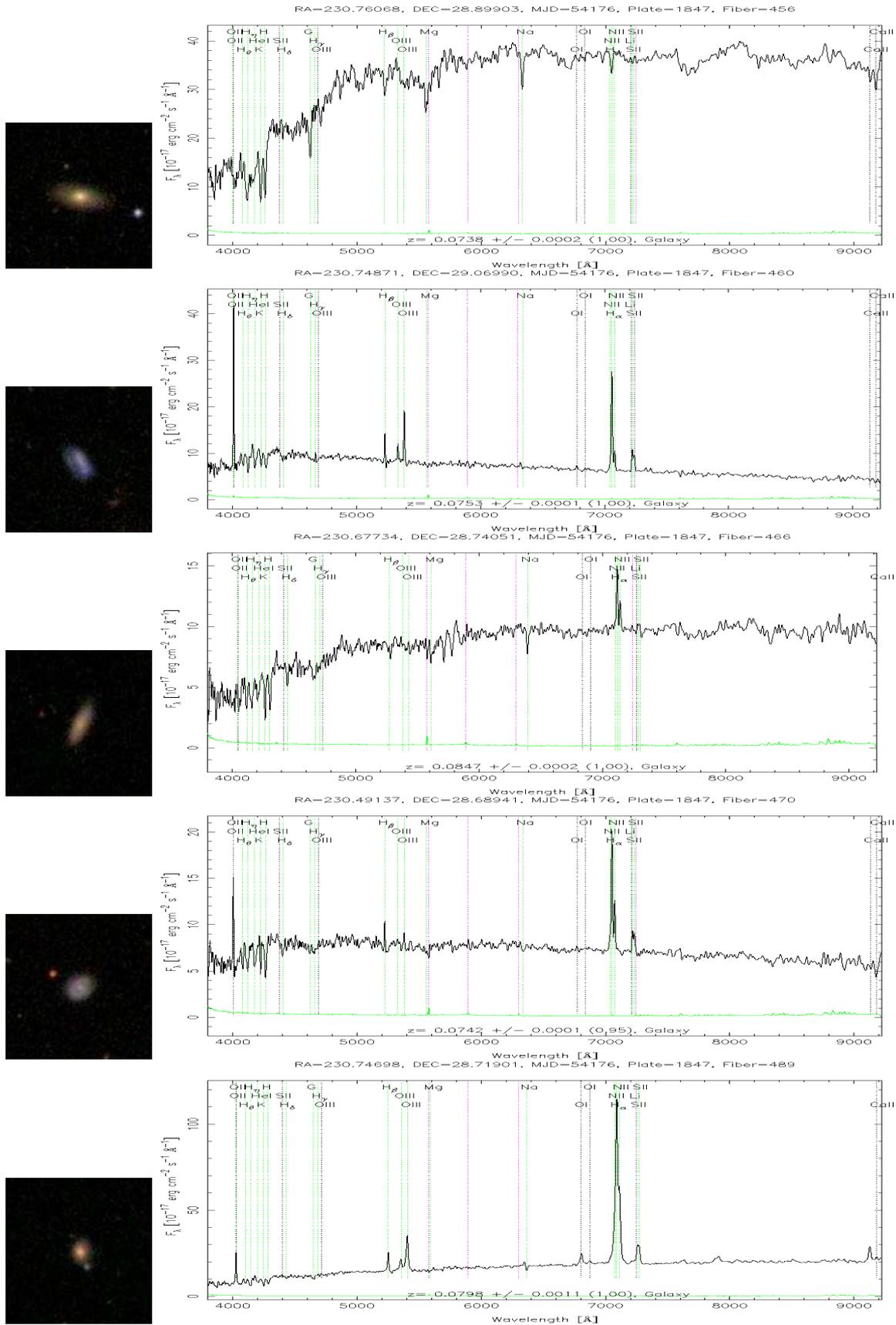


Figura C.8: Galaxias de CrB-H-*lz* (de 31 a 35)

# D

## Galaxias del Grupo CrB-H- $hz$

Relación de galaxias y morfología

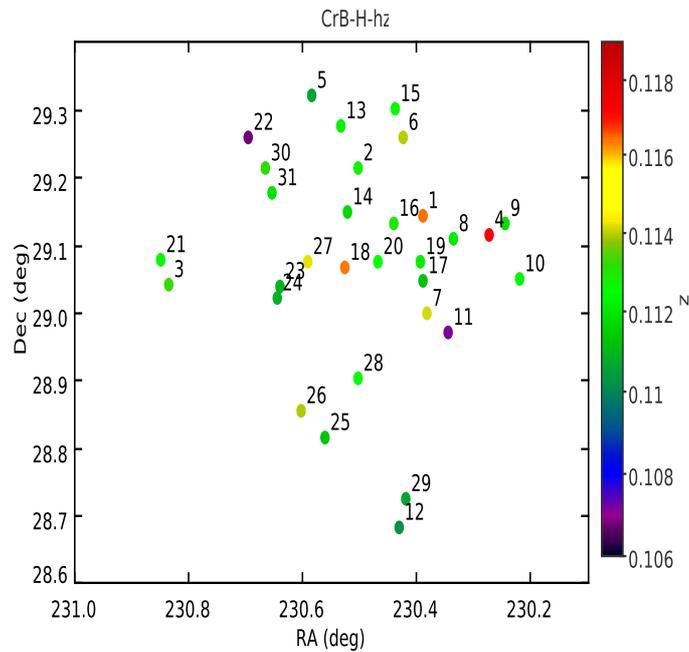


Figura D.1: Distribución espacial de las galaxias de CrB-H- $hz$  en los primeros 20 minutos de arco desde el centro. Las etiquetas muestran el número de la galaxia en la tabla D y en las sucesivas figuras este apéndice.

En este apéndice se recogen las galaxias que pueblan la mancha fría de CMB, CrB-H y presentan un desplazamiento al rojo de  $z \approx 0,11$  en un radio de 20 minutos de arco desde el centro de la misma. Se trata de las galaxias que se agrupan en el segundo pico del histograma de la figura 3.8 de la sección 3.3. Las imágenes de las galaxias que se presentan

en las distintas figuras tienen un tamaño de  $0.3''/pix$  de la cámara usada por el SDSS. Las coordenadas, la distancia al centro y la clasificación morfológica se representan en la siguiente tabla:

N	RA (J2000) (deg)	Dec (J2000) (deg)	rad (' arco)	<i>z</i>	<i>z<sub>err</sub></i>	tipo (a)	Emisión (b)
1	230.38924	29.14263	12.016876	0.116425	1.67501E-4	1	6
2	230.50324	29.2131	13.113839	0.112797	1.46344E-4	2	6
3	230.83448	29.03946	15.245965	0.113251	1.1785E-4	1	5
4	230.27379	29.11241	15.925613	0.117298	1.39897E-4	2	6
5	230.58371	29.31967	19.389957	0.110592	1.55532E-4	3	5
6	230.42287	29.25638	16.827028	0.113964	1.40303E-4	1	5
7	230.38079	28.99793	8.763862	0.114118	1.12715E-4	2	6
8	230.33551	29.107333	12.922053	0.112086	1.77862E-4	1	5
9	230.244137	29.12885	17.754359	0.111811	1.39845E-4	1	6
10	230.219979	29.049315	17.471751	0.112348	1.45255E-4	3	5
11	230.34553	28.967834	10.769279	0.10709	1.9853E-4	1	5
12	230.429701	28.681328	19.990043	0.110232	1.63245E-4	1	6
13	230.531759	29.275317	16.658419	0.112256	1.56933E-4	1	6
14	230.521803	29.146622	9.019071	0.111673	1.44084E-4	1	6
15	230.437539	29.299871	19.009626	0.112656	9.75078E-4	1	5
16	230.439404	29.131283	9.80986	0.112947	1.53154E-4	1	6
17	230.388635	29.044826	8.809686	0.111163	1.52294E-4	1	6
18	230.526267	29.066376	4.253367	0.116376	5.55824E-5	3	5
19	230.393027	29.073732	9.302914	0.112154	1.39919E-4	1	6
20	230.46725	29.073419	6.189641	0.112548	1.35464E-4	1	6
21	230.848753	29.075134	16.451927	0.112381	1.73639E-4	3	5
22	230.694442	29.256942	17.332272	0.106745	1.5836E-4	1	6
23	230.638569	29.036476	5.292221	0.110978	1.70901E-4	1	6
24	230.643427	29.01875	5.170049	0.110881	1.49591E-4	1	6
25	230.560356	28.814701	11.019524	0.111204	1.69658E-4	1	6
26	230.601454	28.852729	9.162239	0.113939	1.84809E-4	1	5
27	230.59154	29.072563	5.026535	0.114265	1.56574E-4	3	5
28	230.503566	28.899777	6.335957	0.11255	1.4001E-4	3	5
29	230.417792	28.722693	17.87685	0.110625	1.39E-4	3	5
30	230.664669	29.21222	14.237323	0.113187	1.54856E-4	3	5
31	230.653601	29.176524	12.061355	0.111864	1.45038E-4	3	6

Tabla D.1: Tabla de las galaxias del grupo CrB-H-*hz* ( $z=0.11$ ). Notas: (a) En esta columna se representa el tipo morfológico de las galaxias, 1 para las E, 2 para las S0-S6 y 3 para las galaxias Espirales (b) Esta columna representa la presencia de líneas de emisión en el espectro de las galaxias, 5 para aquellas que presentan líneas de emisión y 6 para las que no presentan líneas de emisión.

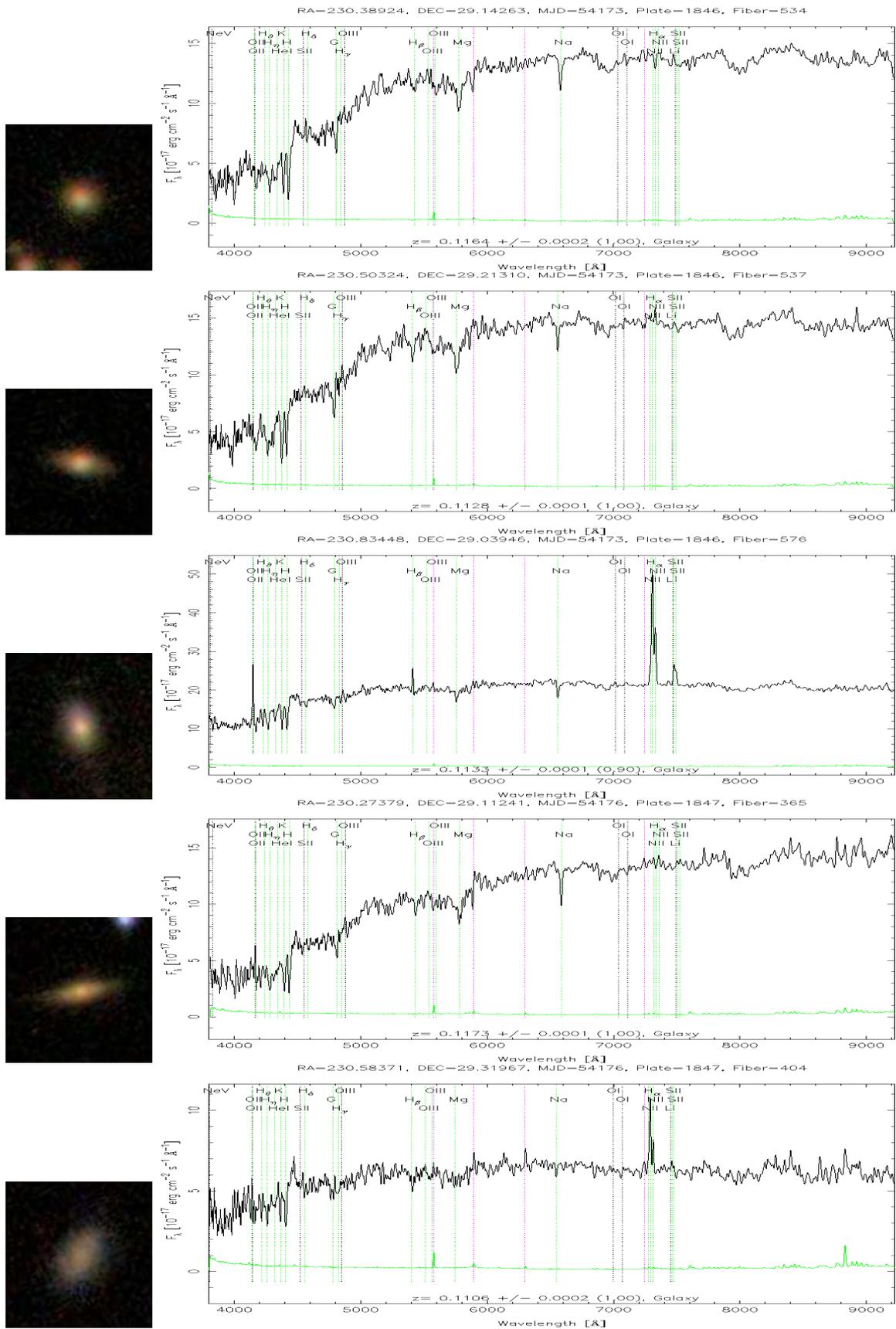


Figura D.2: Galaxias de CrB-H- $hz$  (de 1 a 5)

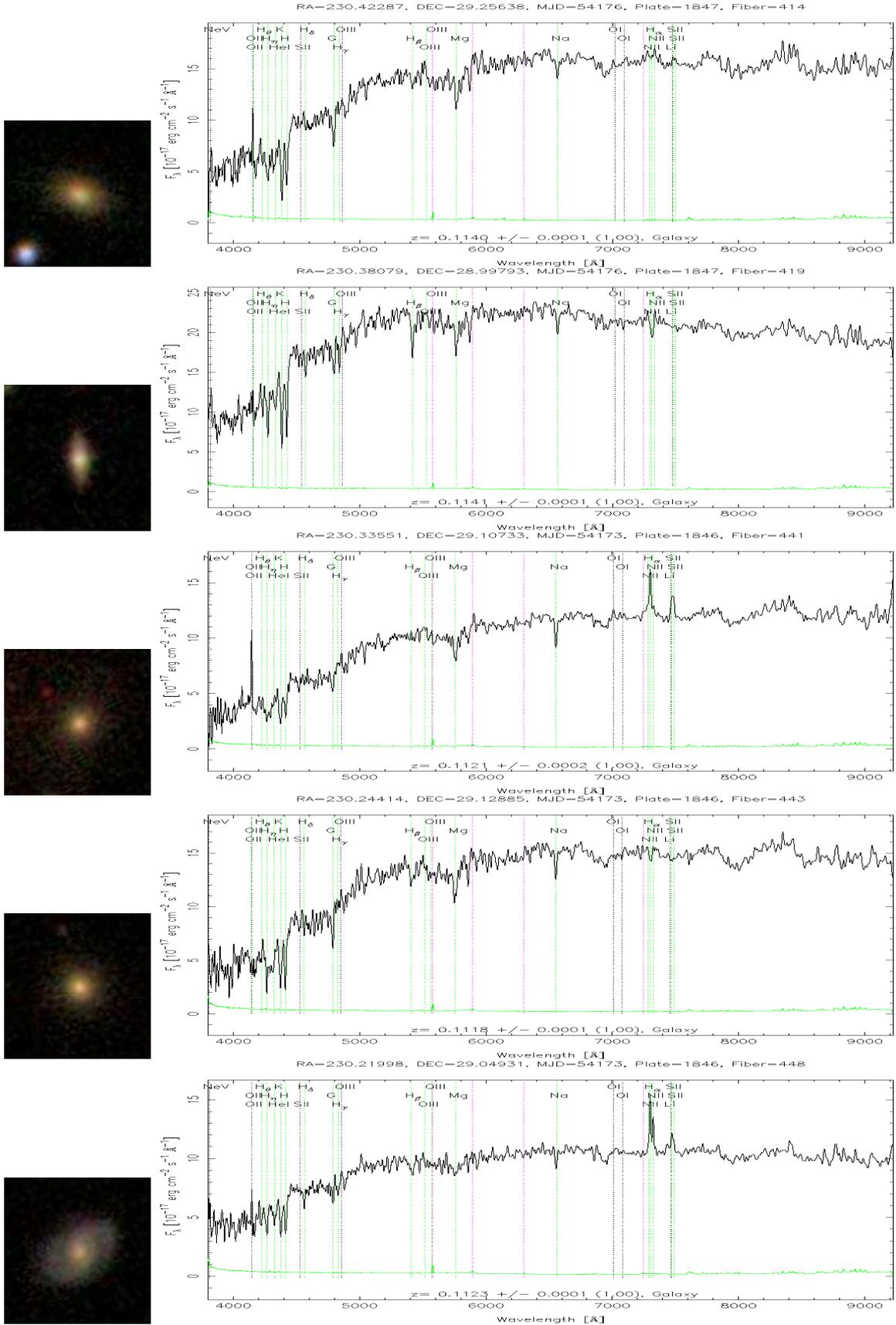


Figura D.3: Galaxias de CrB-H-hz (de 6 a 10)

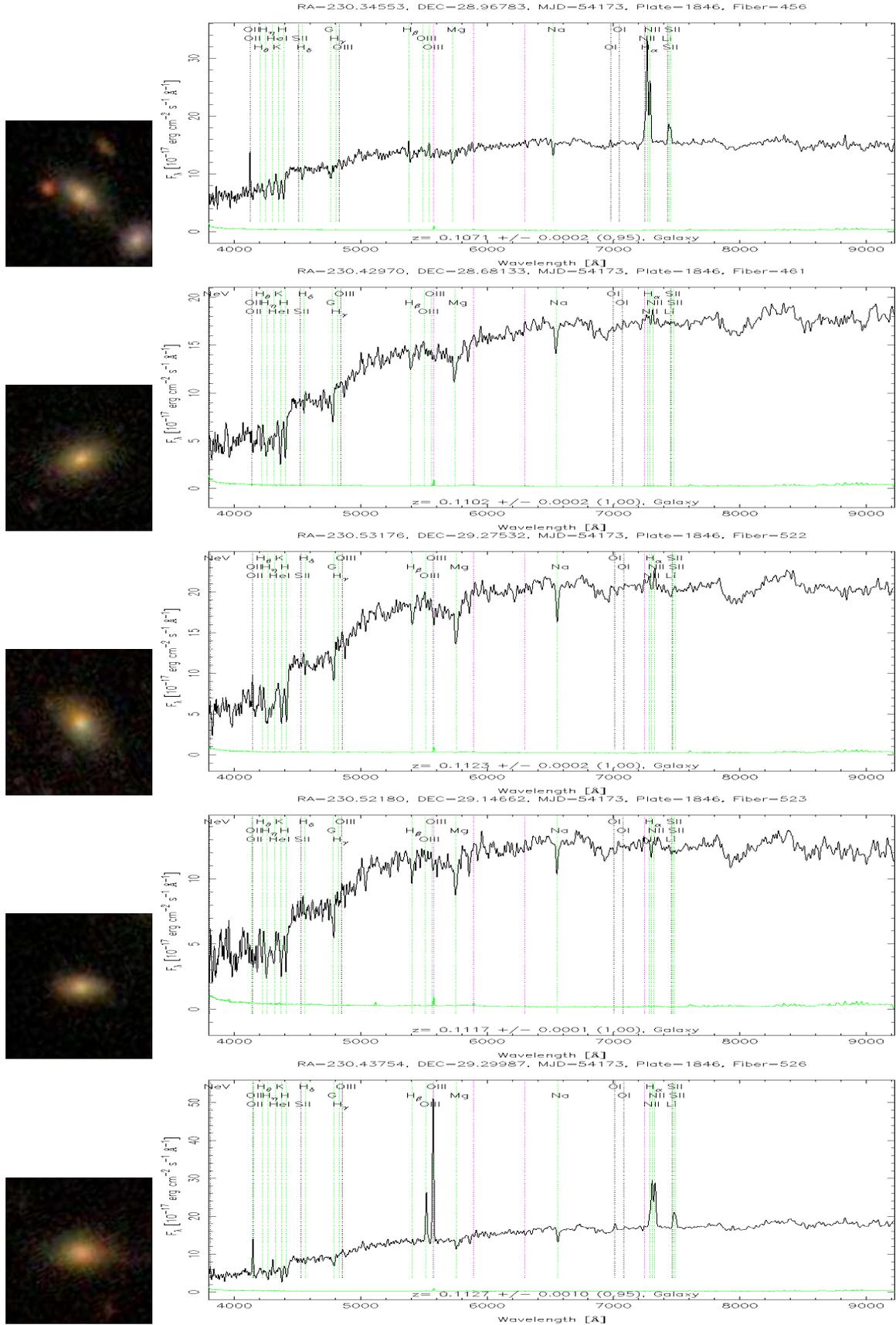


Figura D.4: Galaxias de CrB-H-hz (de 11 a 15)

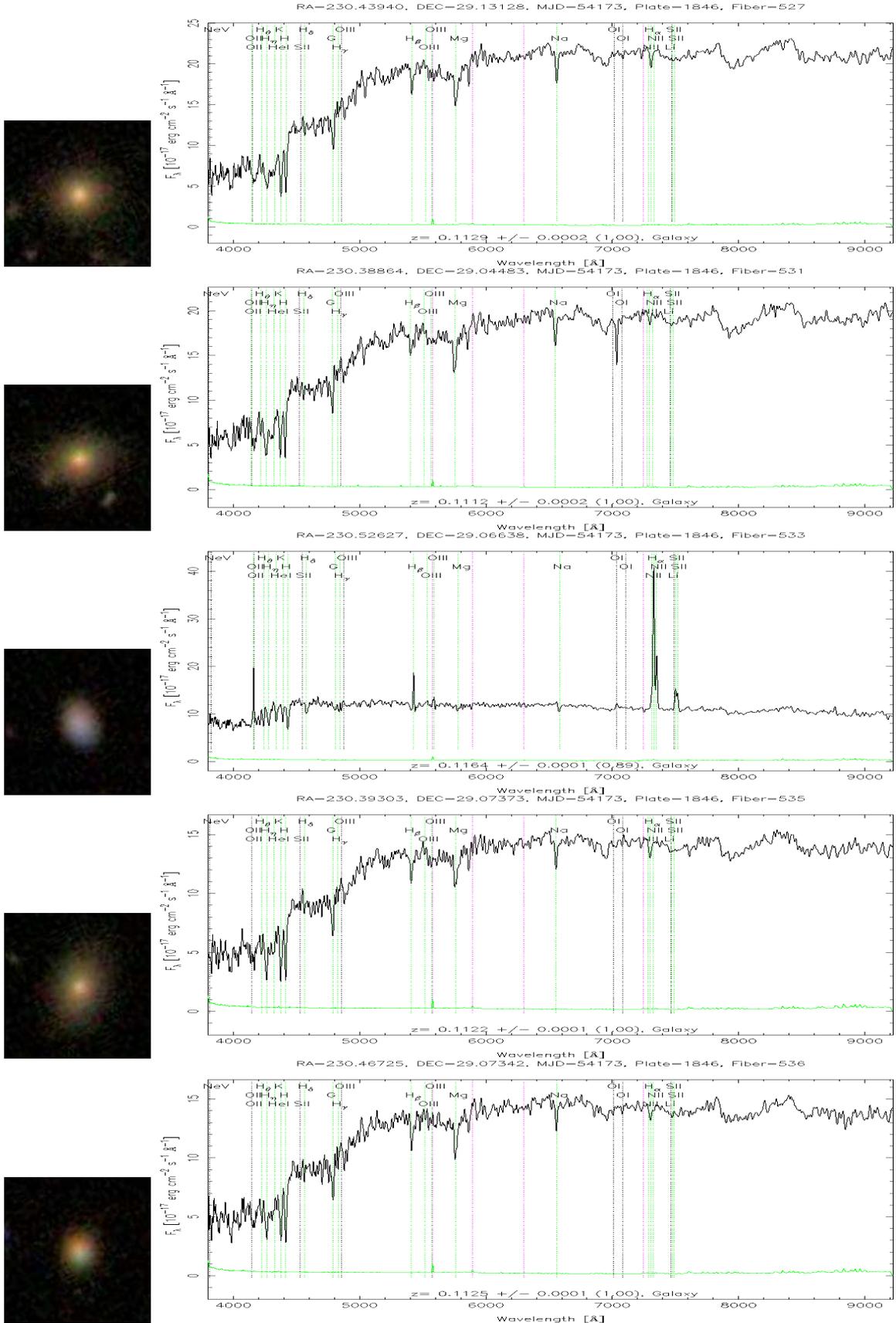


Figura D.5: Galaxias de CrB-H-hz (de 16 a 20)

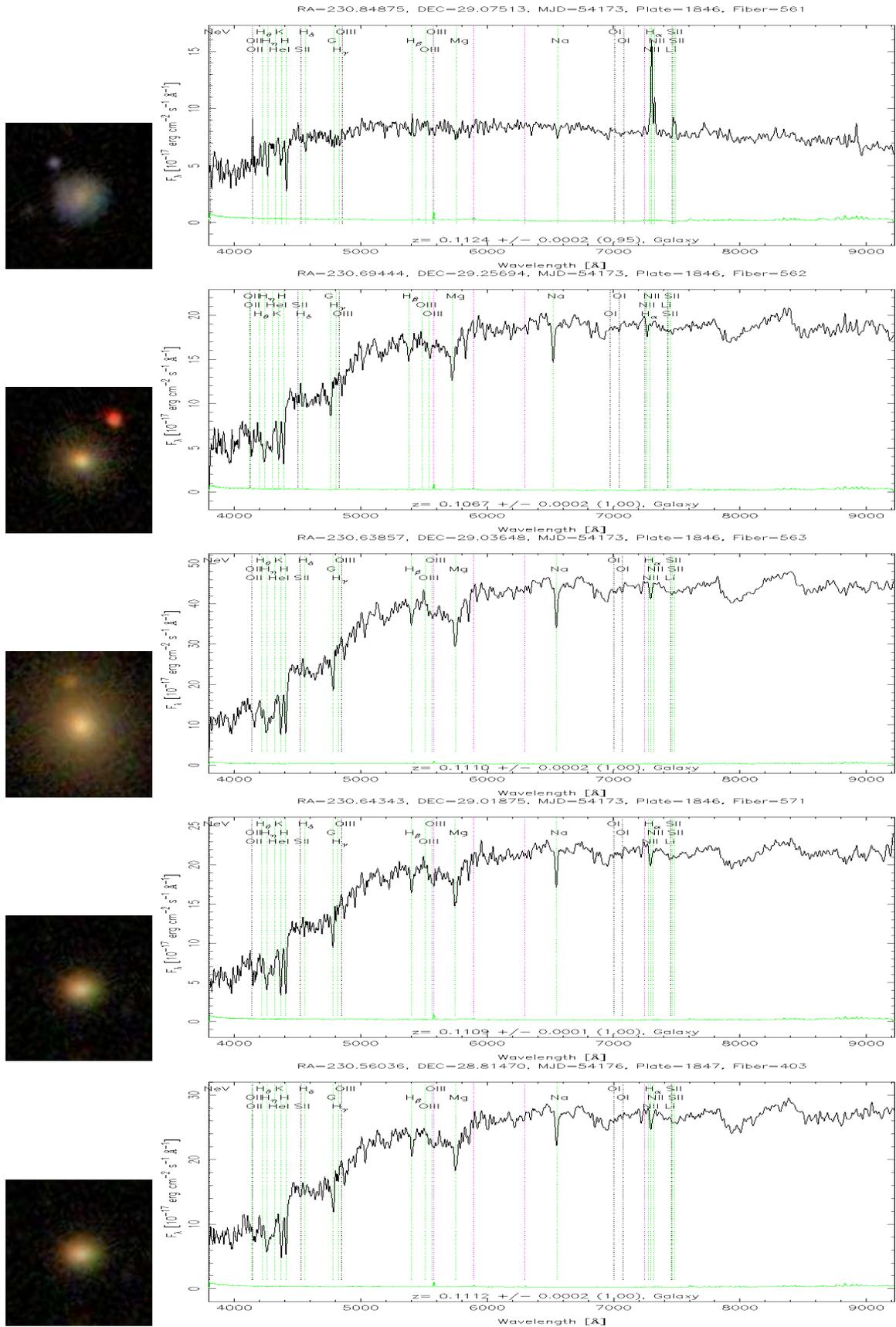


Figura D.6: Galaxias de CrB-H-hz (de 21 a 25)

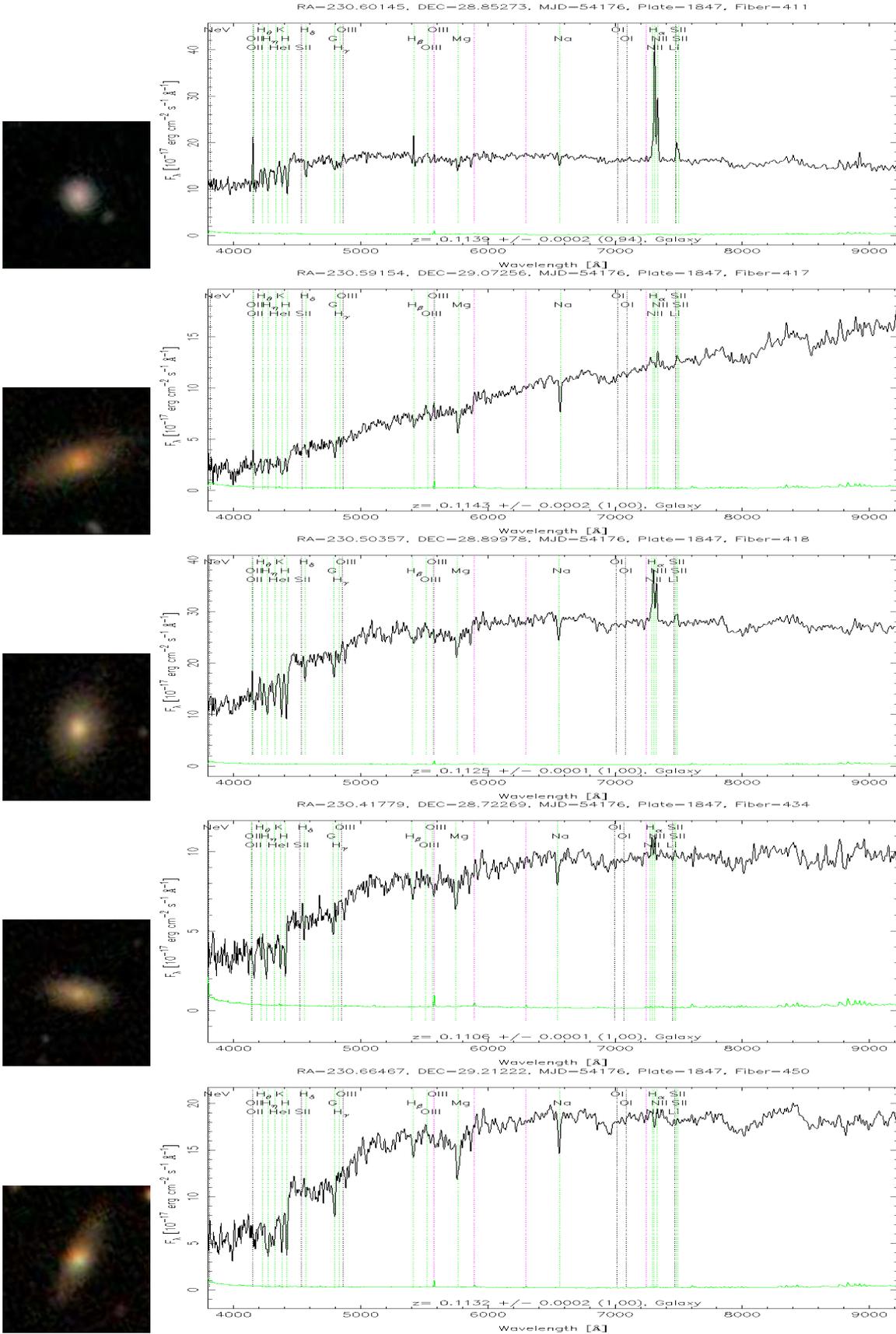


Figura D.7: Galaxias de CrB-H-hz (de 26 a 30)

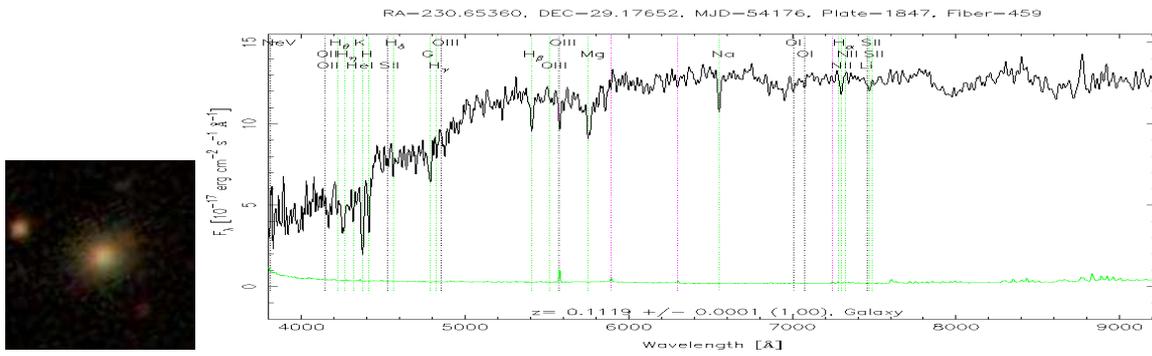


Figura D.8: Galaxia de CrB-H-hz (31)

# E

## Galaxias del Cúmulo Abell 2065

Relación de galaxias y morfología

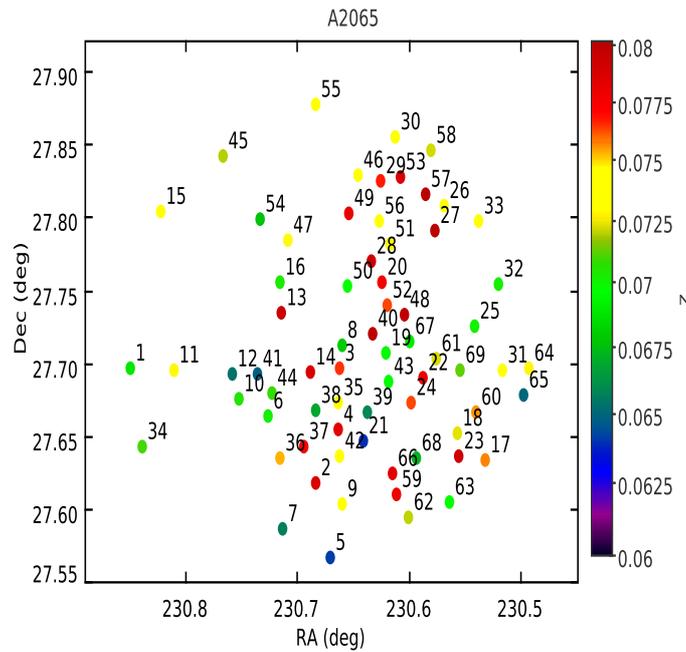


Figura E.1: Distribución espacial de las galaxias del cúmulo Abell 2065 en los primeros 10 minutos de arco desde el centro. Las etiquetas muestran el número de la galaxia en la tabla E.1 y en las sucesivas figuras este apéndice.

Este apéndice presenta un resumen de las propiedades de las galaxias de Abell 2065 a  $z \approx 0,07$ , desde el centro hasta 10 minutos de arco de radio. Pertenecen al primer pico del histograma de la figura 3.4. véase la tabla E.1:

N	RA (J2000) (deg)	Dec (J2000) (deg)	rad (' arco)	z	$z_{err}$	tipo (a)	Emisión (b)
1	230.84909	27.69631	9.244943	0.06888	1.72419E-4	2	6
2	230.68353	27.61748	6.315067	0.07884	1.89968E-4	1	6
3	230.66264	27.69535	1.817888	0.07649	1.40518E-4	1	6
4	230.66375	27.6537	4.198978	0.0784	1.85368E-4	1	6
5	230.6708	27.56684	9.352586	0.06408	1.67837E-4	2	6
6	230.72653	27.66246	4.44725	0.0702	1.67033E-4	2	6
7	230.713	27.58611	8.402725	0.06567	1.86782E-4	1	6
8	230.6599	27.71136	1.157014	0.06796	1.60522E-4	1	6
9	230.66031	27.60348	7.206018	0.07302	1.60209E-4	1	6
10	230.7521	27.67501	4.880278	0.07063	1.55554E-4	1	6
11	230.81046	27.69463	7.254233	0.07477	1.69212E-4	1	6
12	230.75835	27.69127	4.68328	0.06526	1.71624E-4	1	6
13	230.71479	27.73339	2.078554	0.07934	1.89341E-4	3	5
14	230.68856	27.69304	1.86671	0.07882	1.5089E-4	1	6
15	230.82245	27.80328	9.087206	0.07363	1.45276E-4	1	6
16	230.71565	27.75457	2.786121	0.07037	2.00282E-4	3	5
17	230.53267	27.63275	9.400259	0.07579	1.01164E-4	3	5
18	230.55705	27.65146	7.696808	0.07238	1.64085E-4	1	6
19	230.62119	27.70604	3.156757	0.06989	1.8073E-4	1	6
20	230.62499	27.75511	3.407399	0.07767	1.70409E-4	1	6
21	230.64109	27.6456	5.010721	0.06388	1.535E-4	1	6
22	230.58739	27.68931	5.191634	0.07799	1.46997E-4	2	6
23	230.5559	27.6351	8.329272	0.07929	1.57674E-4	2	6
24	230.59814	27.67281	5.171446	0.07631	1.38714E-4	1	6
25	230.5413	27.72504	7.240648	0.07013	1.44037E-4	1	6
26	230.56856	27.80722	7.700143	0.07379	1.62229E-4	3	6
27	230.57701	27.78937	6.676488	0.08136	1.62965E-4	1	6
28	230.6343	27.76902	3.611656	0.07939	1.3916E-4	1	6
29	230.62543	27.82329	6.645993	0.07672	1.41903E-4	1	6
30	230.61216	27.85435	8.634513	0.07314	1.5624E-4	1	6
31	230.51739	27.69398	8.681807	0.07461	1.36563E-4	1	6
32	230.52034	27.75311	8.549599	0.07022	1.59903E-4	1	6
33	230.53813	27.79649	8.630793	0.07428	1.84057E-4	2	6
34	230.83903	27.64253	9.830931	0.07098	1.53232E-4	3	5
35	230.66344	27.67247	3.100441	0.07469	1.7148E-4	2	6
36	230.71577	27.63421	5.677971	0.07535	1.65555E-4	1	6
37	230.69442	27.64204	4.915522	0.07764	1.48779E-4	1	6
38	230.68341	27.66682	3.361003	0.06676	1.85219E-4	1	6
39	230.63786	27.66582	4.007947	0.06587	1.57786E-4	3	6
40	230.63317	27.71929	2.368171	0.0801	1.79061E-4	1	6
41	230.73516	27.69213	3.562466	0.06478	1.57378E-4	1	6
42	230.66229	27.63511	5.312057	0.0731	1.56847E-4	1	6
43	230.61855	27.68693	3.797374	0.06958	1.88034E-4	1	6
44	230.72213	27.67865	3.542562	0.07087	1.54183E-4	1	6
45	230.76654	27.84121	8.540276	0.07197	1.03693E-4	3	5
46	230.64555	27.82831	6.566845	0.07318	1.42089E-4	1	6
47	230.70902	27.78298	3.988486	0.07292	1.50391E-4	2	6
48	230.60389	27.73195	3.954755	0.08003	1.51557E-4	1	6
49	230.6537	27.80219	4.941116	0.07803	1.76235E-4	1	6
50	230.65536	27.75233	2.139358	0.06965	1.44126E-4	2	5
51	230.61784	27.78101	4.727701	0.07321	1.70025E-4	2	6
52	230.62008	27.73925	3.214005	0.07631	1.67607E-4	1	6
53	230.60772	27.82663	7.261006	0.07881	1.71453E-4	3	5
54	230.73272	27.79746	5.360898	0.06763	1.89942E-4	3	5
55	230.684	27.87622	9.223457	0.07439	1.54267E-4	1	6
56	230.62724	27.79673	5.189639	0.07388	1.50985E-4	1	6
57	230.58492	27.81528	7.425137	0.08069	1.61331E-4	2	6
58	230.58016	27.84419	8.942964	0.07226	1.7302E-4	1	6
59	230.61099	27.60885	7.688297	0.07796	1.69288E-4	2	6
60	230.54033	27.66576	8.050703	0.07559	1.41806E-4	2	6
61	230.57569	27.70224	5.549339	0.07228	1.84737E-4	1	6
62	230.6009	27.59361	8.747185	0.07206	1.8086E-4	2	6
63	230.56383	27.60467	9.306969	0.06967	1.54396E-4	3	6
64	230.49367	27.69541	9.905486	0.07284	1.58393E-4	2	6
65	230.49818	27.6776	9.90647	0.065	1.64999E-4	1	6
66	230.61446	27.62403	6.799565	0.07849	1.67979E-4	2	6
67	230.60009	27.71437	4.146422	0.06901	1.94219E-4	1	6
68	230.59331	27.63418	6.942887	0.06723	1.63832E-4	3	6
69	230.55481	27.69474	6.733324	0.07123	9.35932E-5	3	5

Tabla E.1: Tabla de las galaxias del cúmulo Abell 2065. Notas: (a) tipo morfológico de las galaxias, 1 para las E , 2 para las S0-S6 y 3 para las galaxias Espirales (b) presencia de líneas de emisión en el espectro de las galaxias, 5 para las que presentan líneas de emisión y 6 para las que no presentan líneas de emisión.

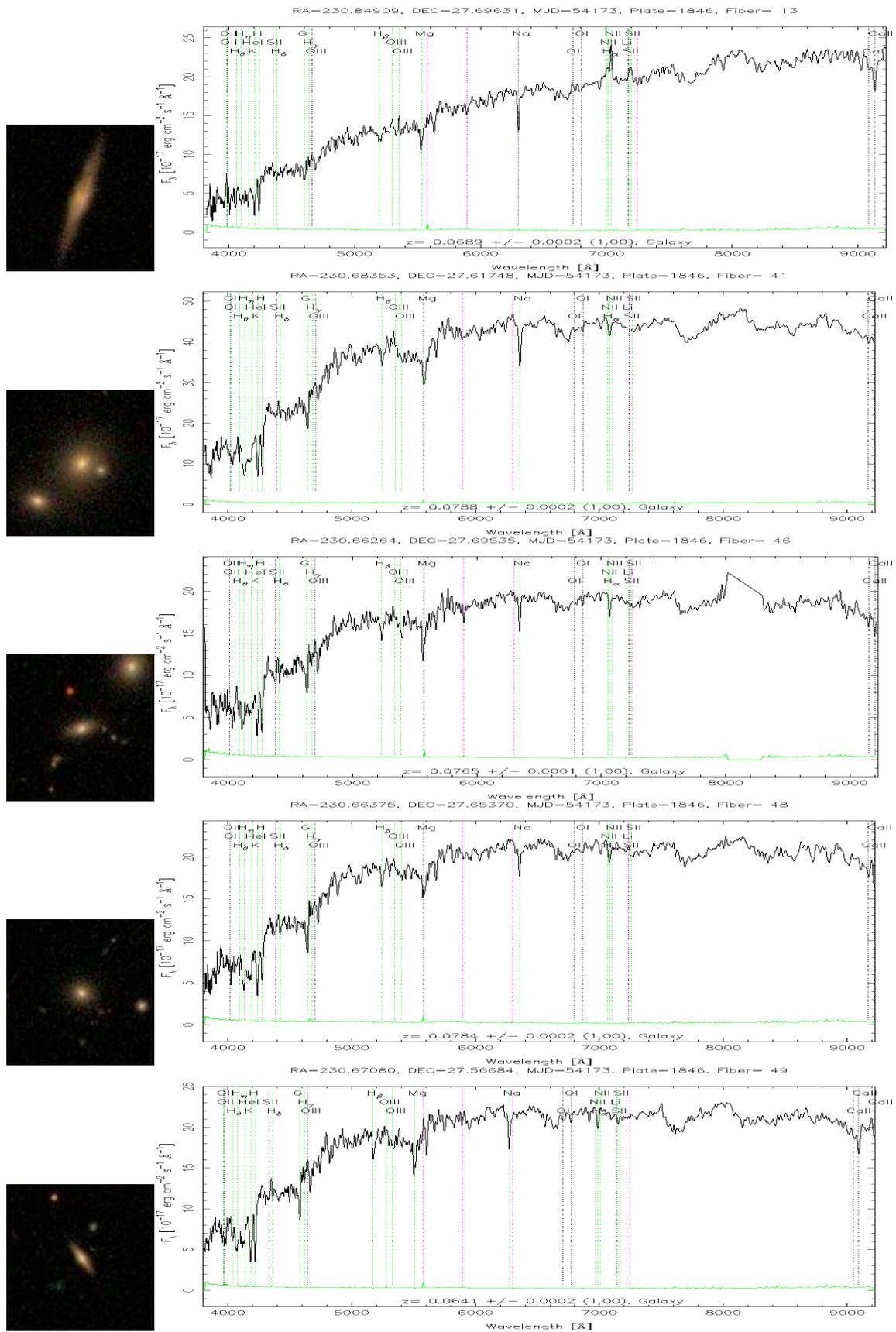


Figura E.2: Galaxias de Abell 2065 (de 1 a 5)

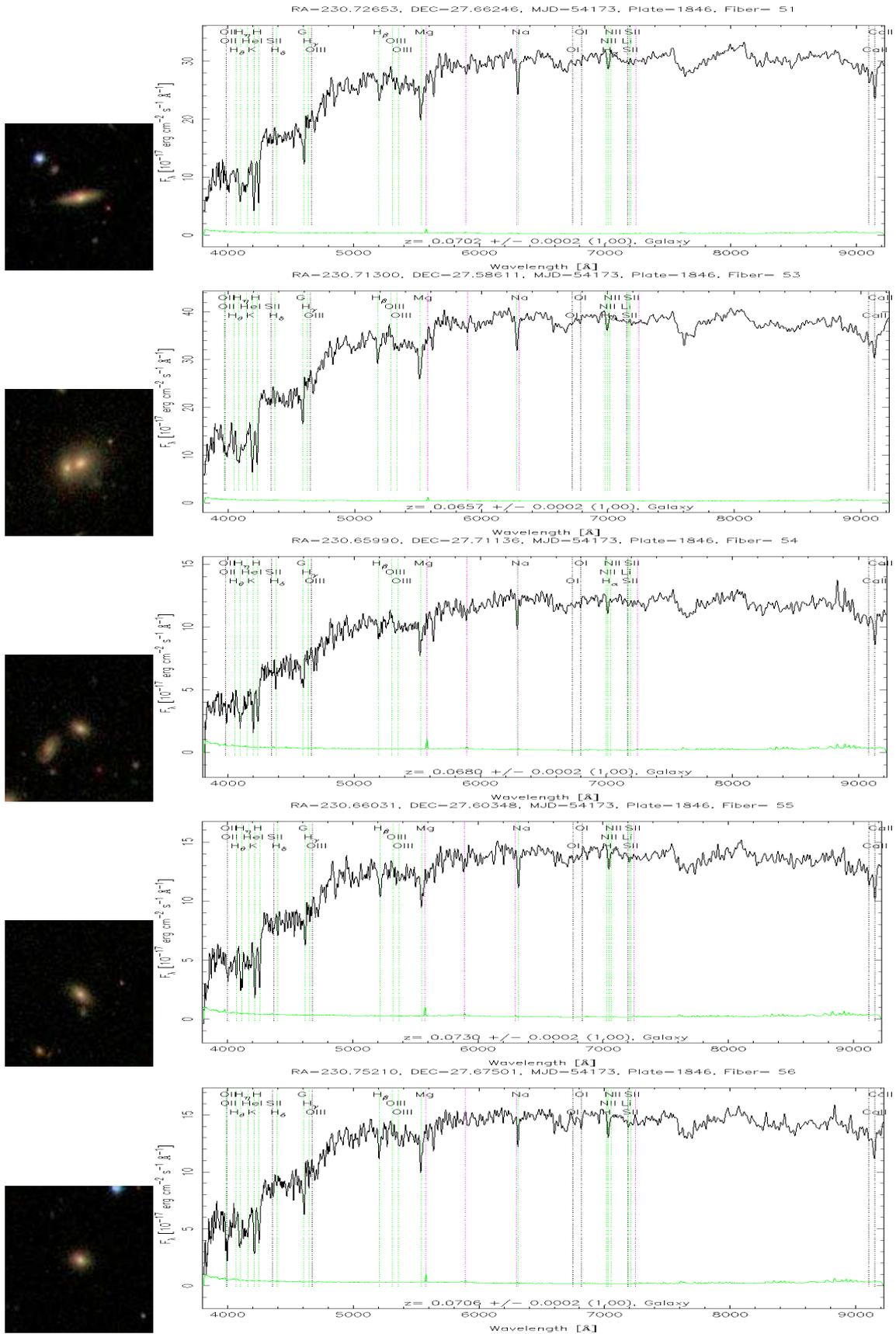


Figura E.3: Galaxias de Abell 2065 (de 6 a 10)

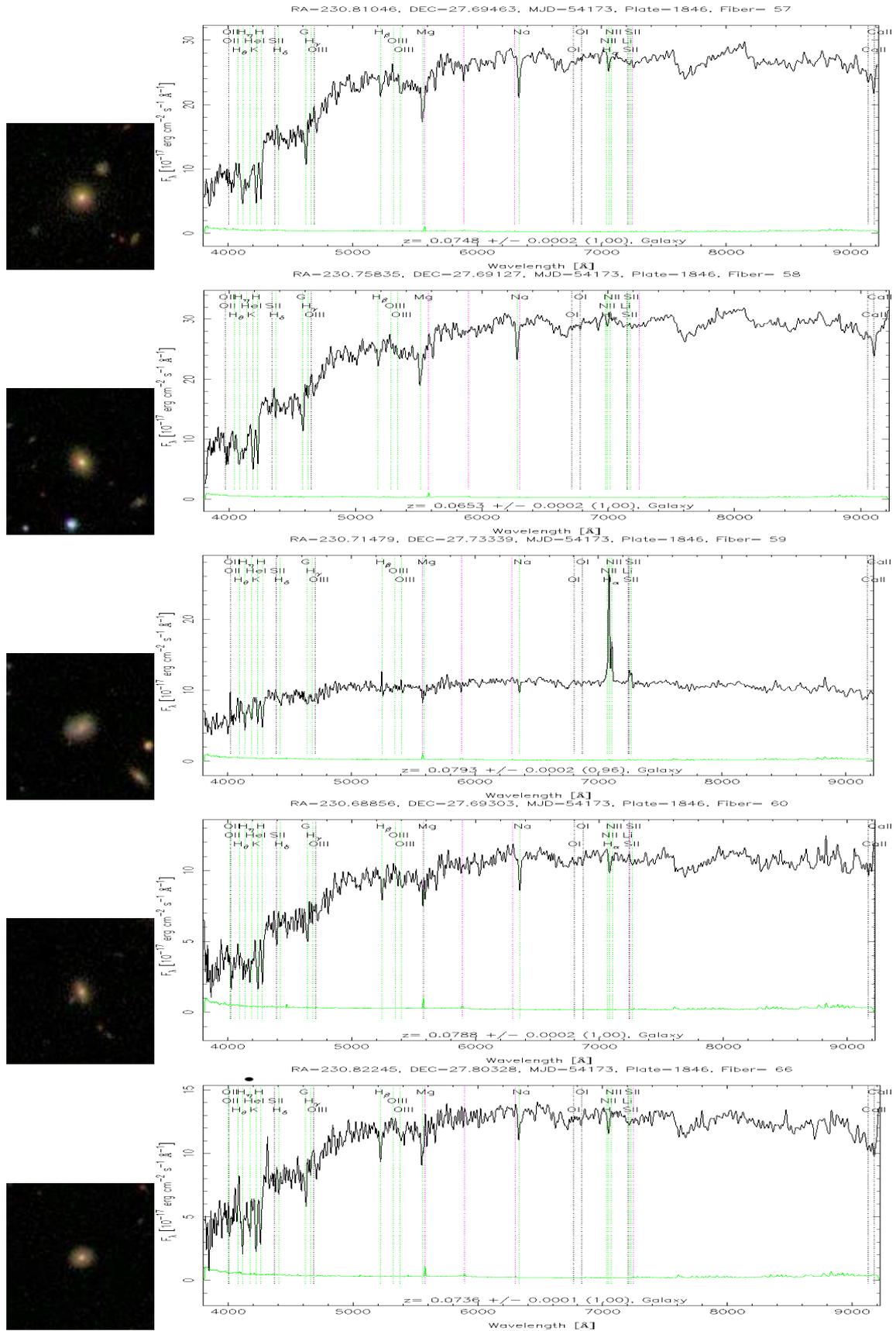


Figura E.4: Galaxias de Abell 2065 (de 11 a 15)

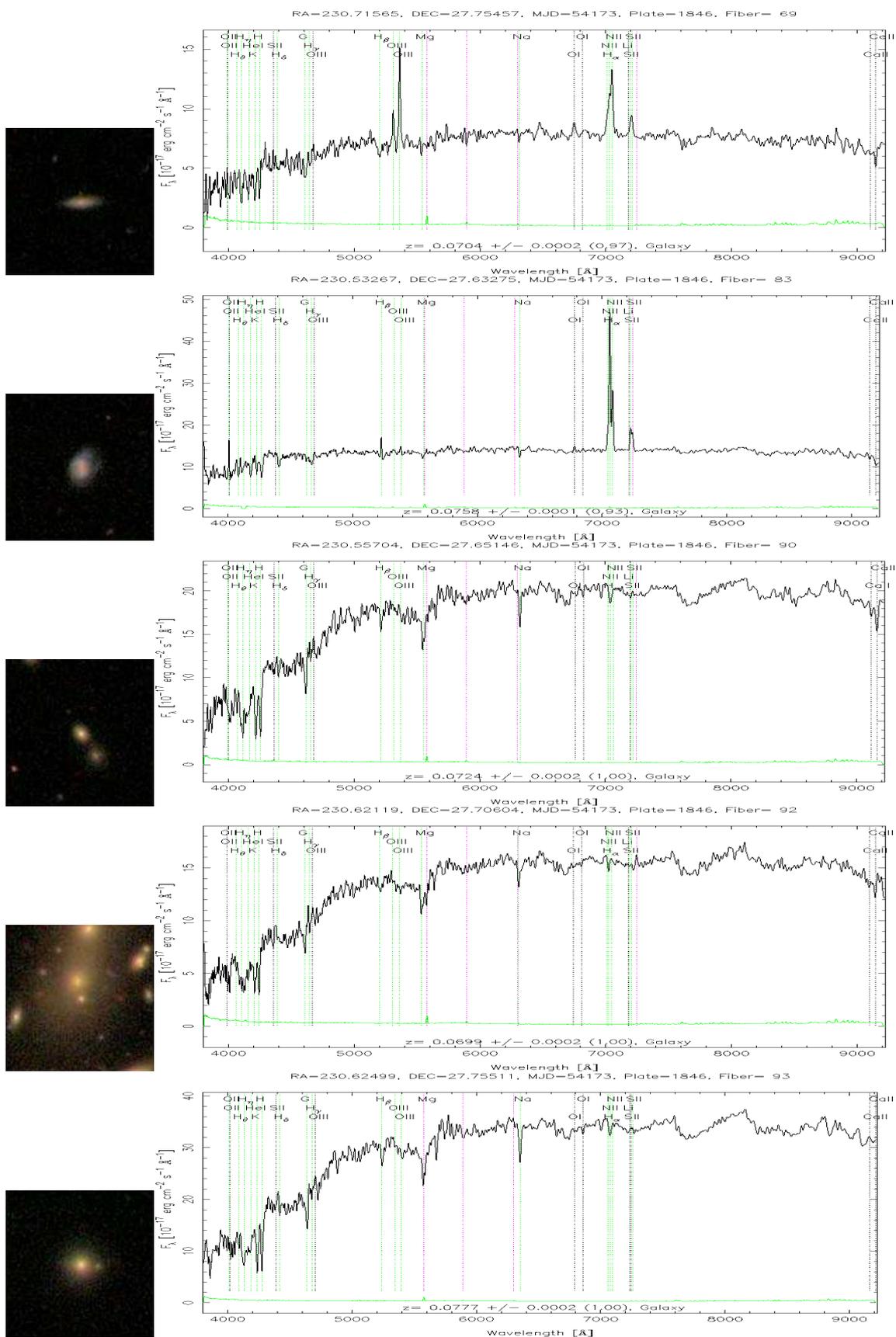


Figura E.5: Galaxias de Abell 2065 (de 16 a 20)

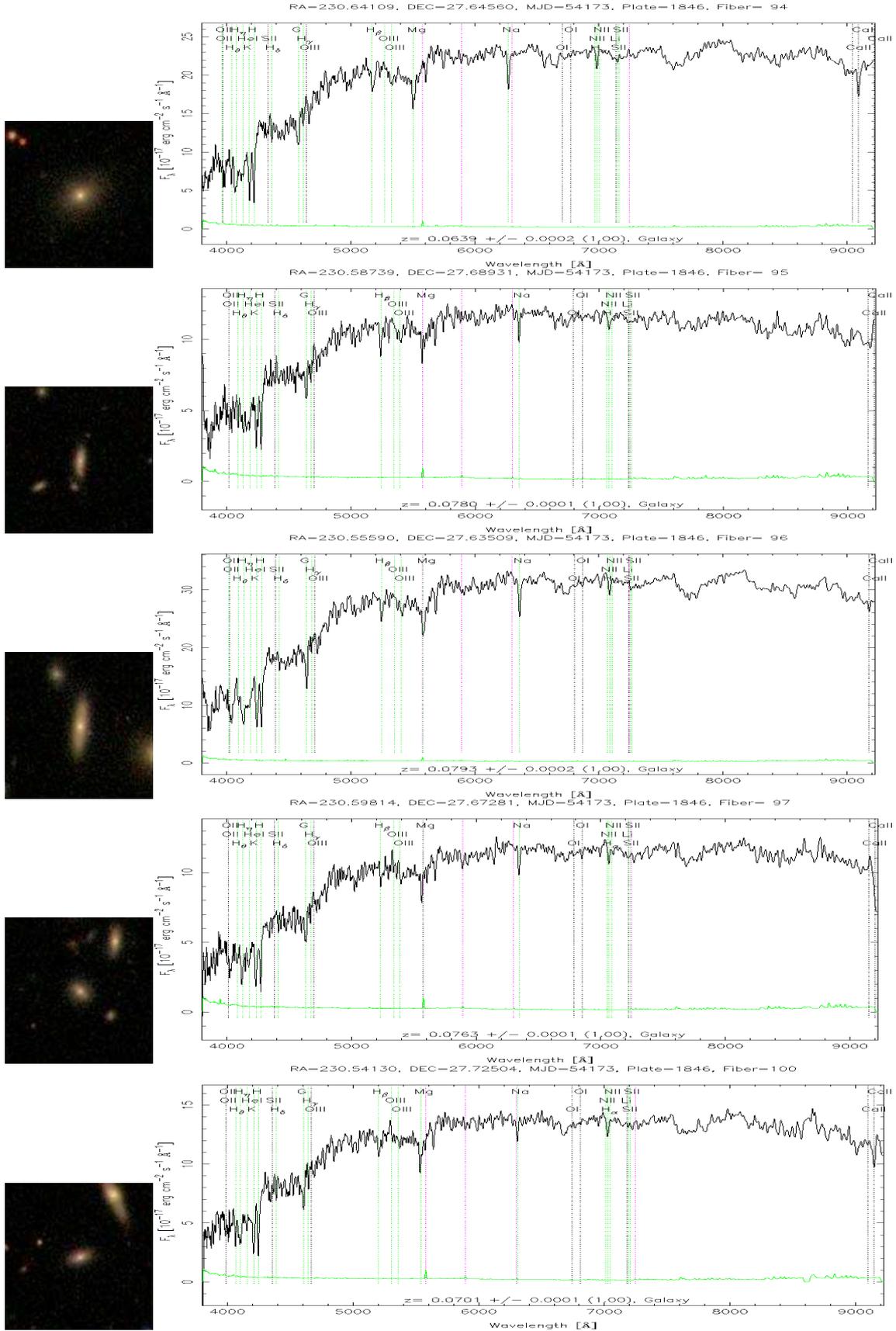


Figura E.6: Galaxias de Abell 2065 (de 21 a 25)

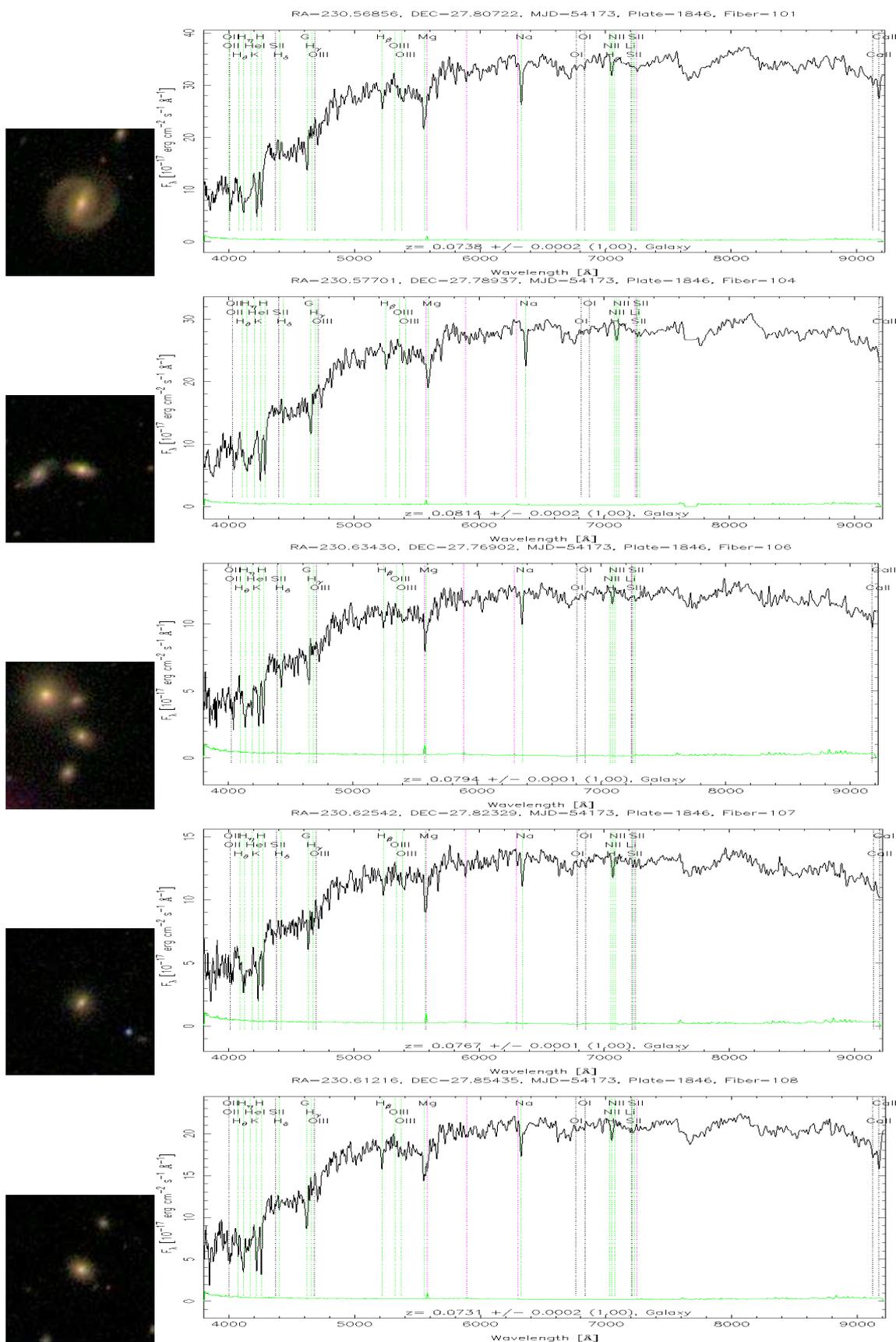


Figura E.7: Galaxias de Abell 2065 (de 26 a 30)

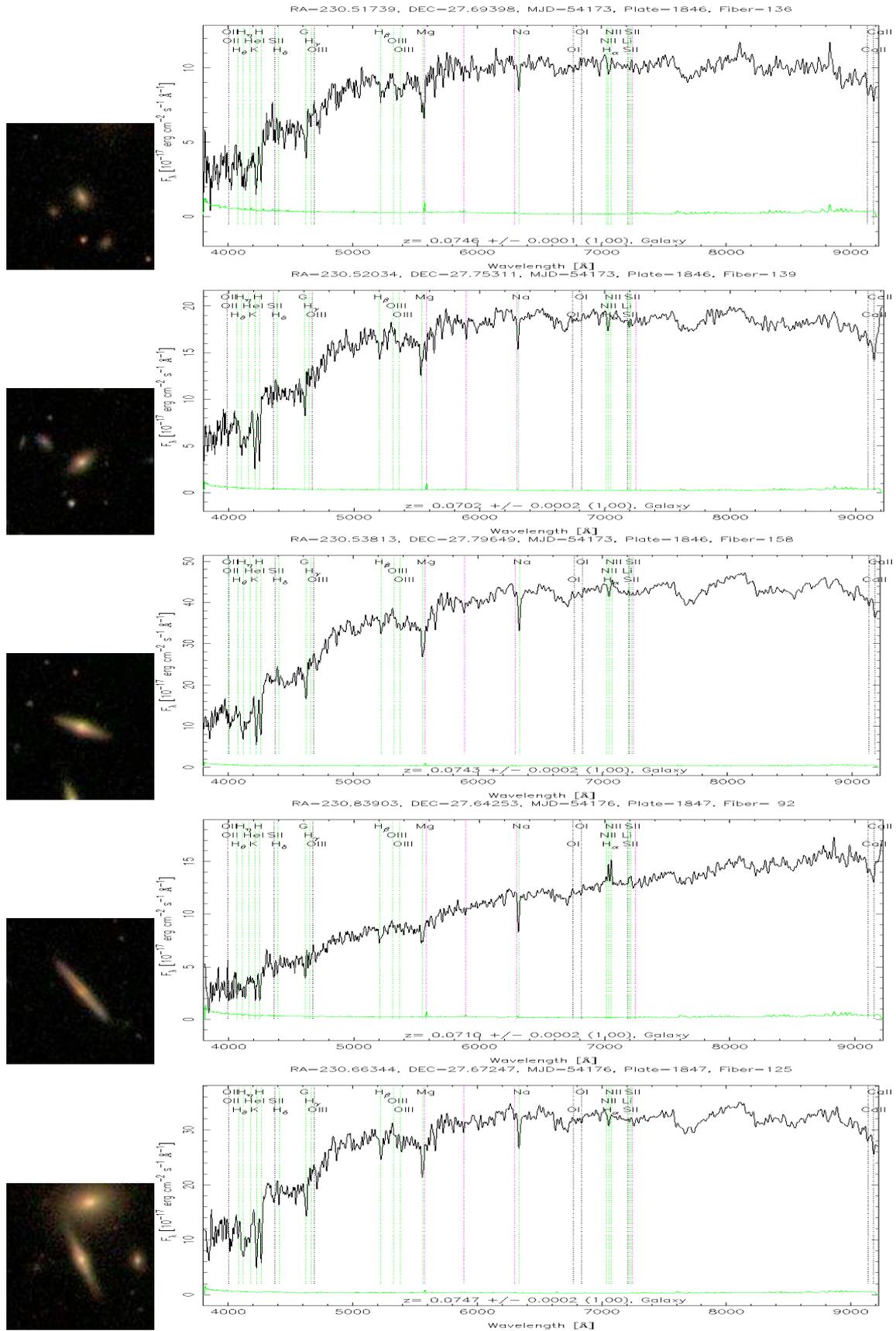


Figura E.8: Galaxias de Abell 2065 (de 31 a 35)

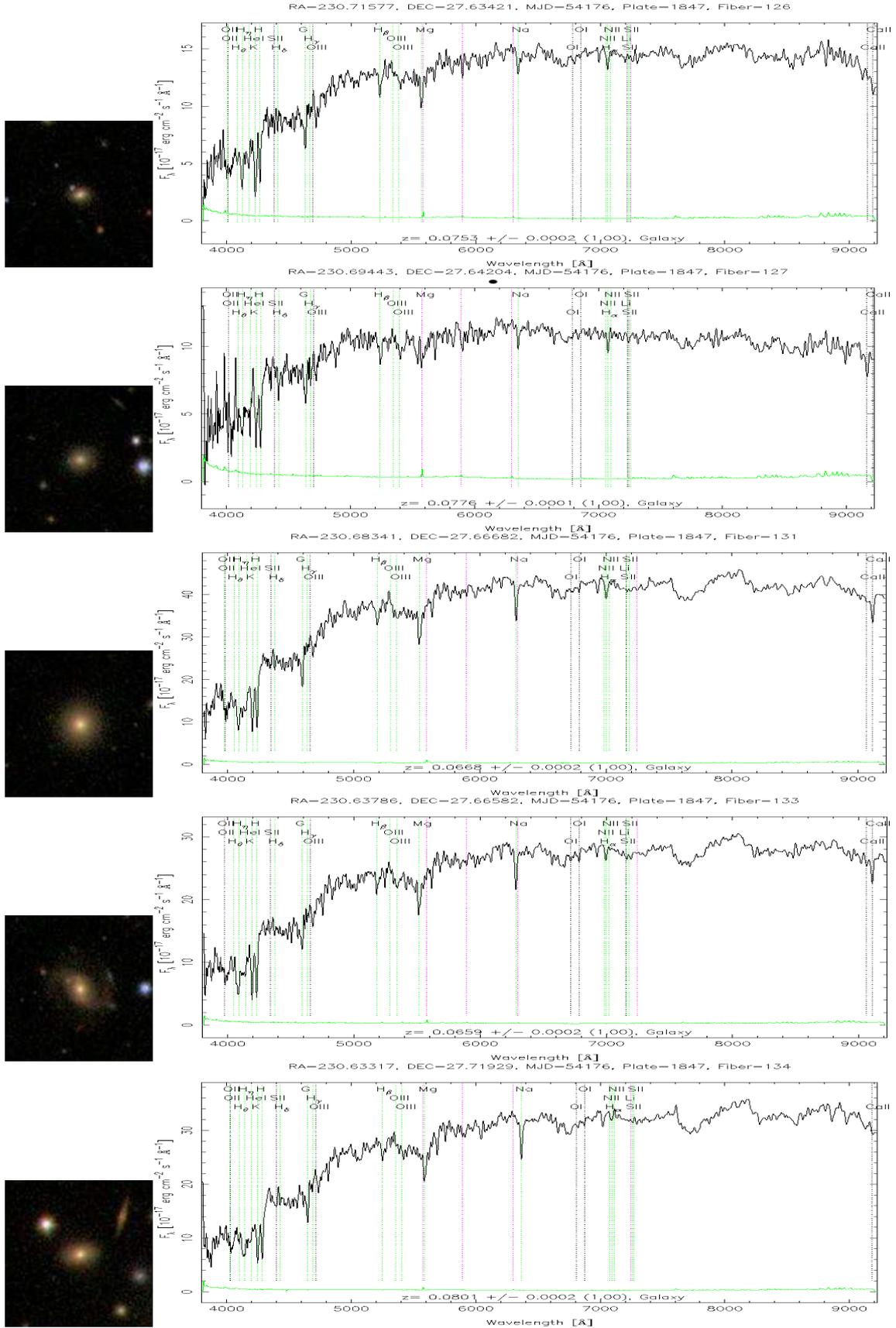


Figura E.9: Galaxias de Abell 2065 (de 36 a 40)

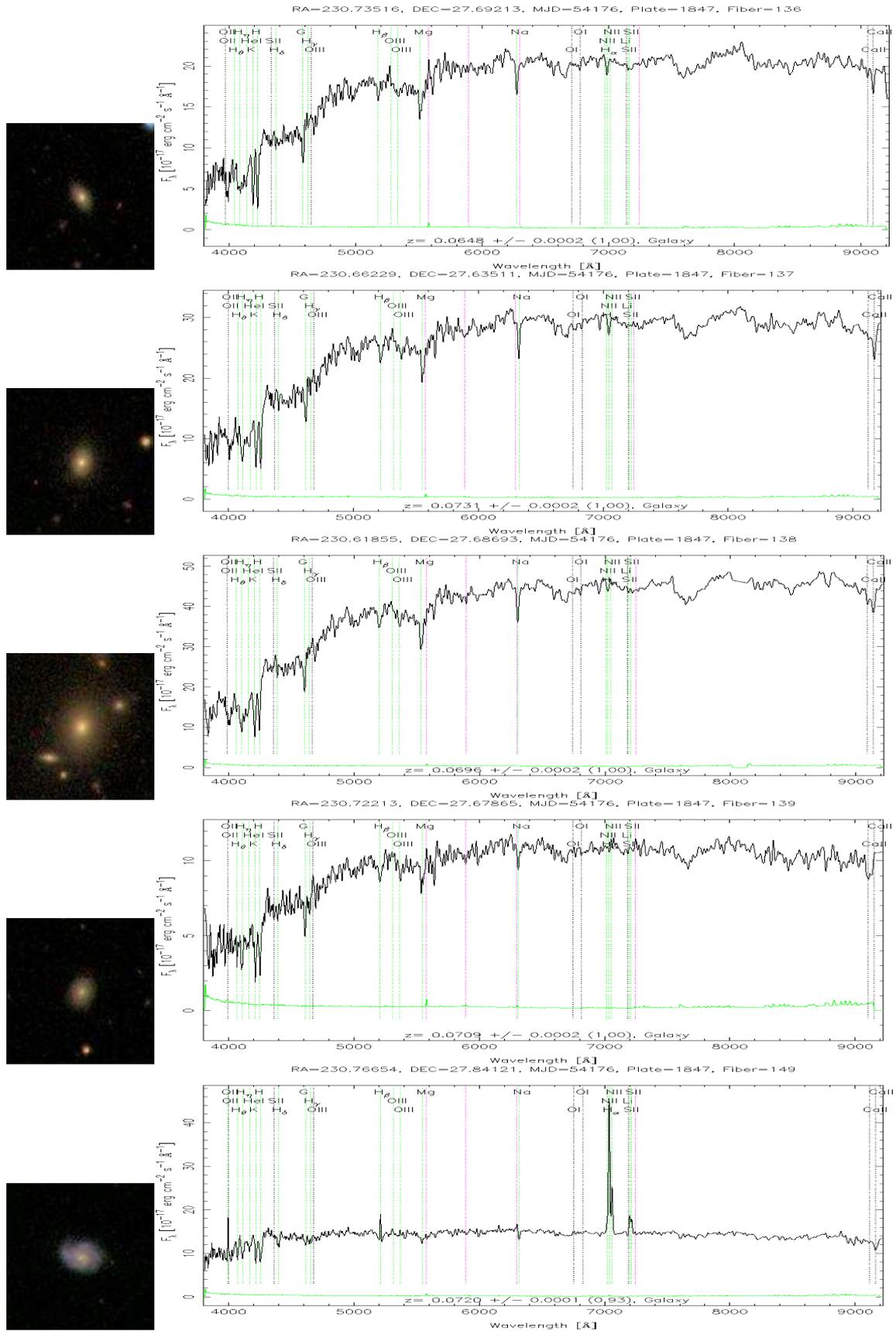


Figura E.10: Galaxias de Abell 2065 (de 41 a 45)

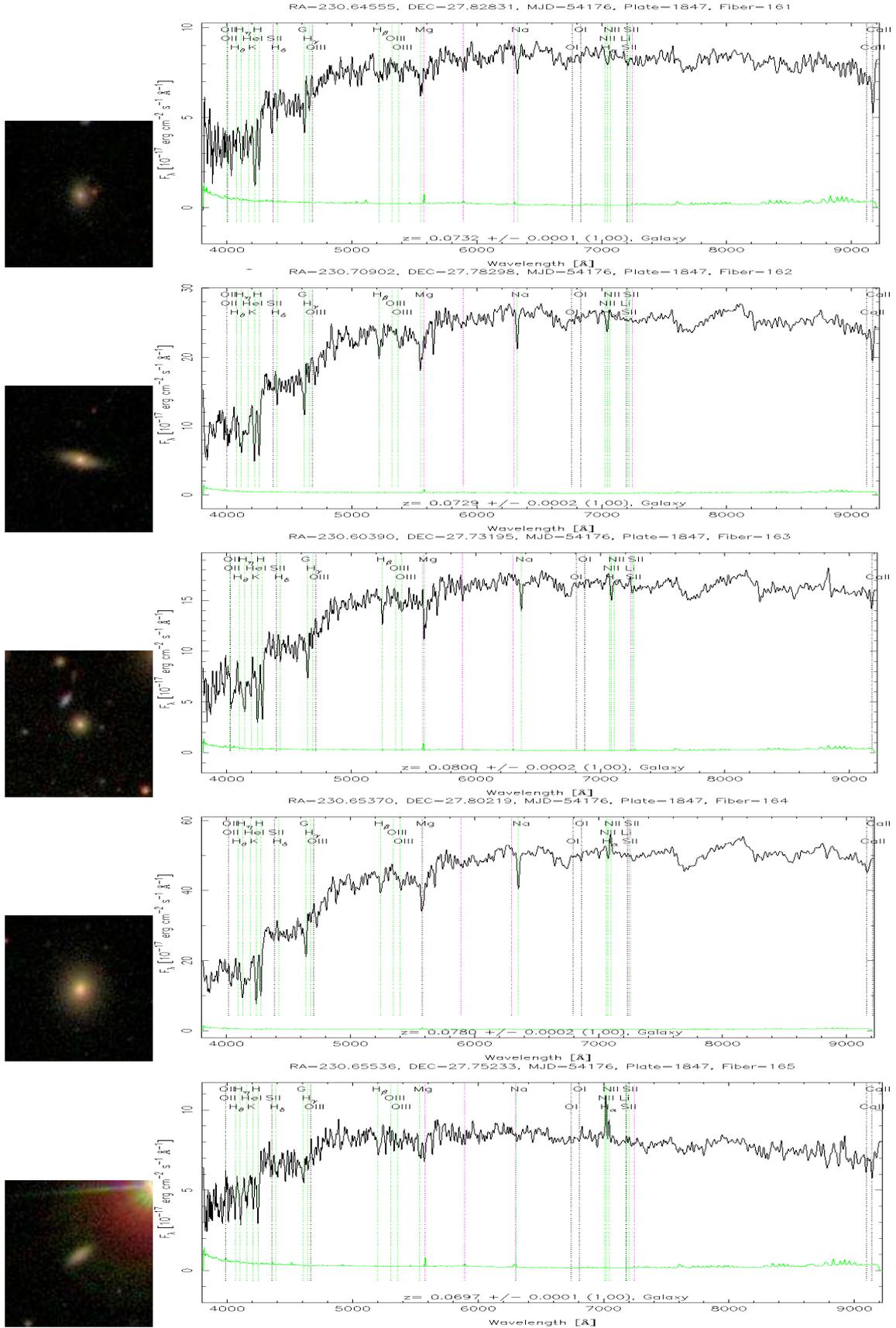


Figura E.11: Galaxias de Abell 2065 (de 46 a 50)

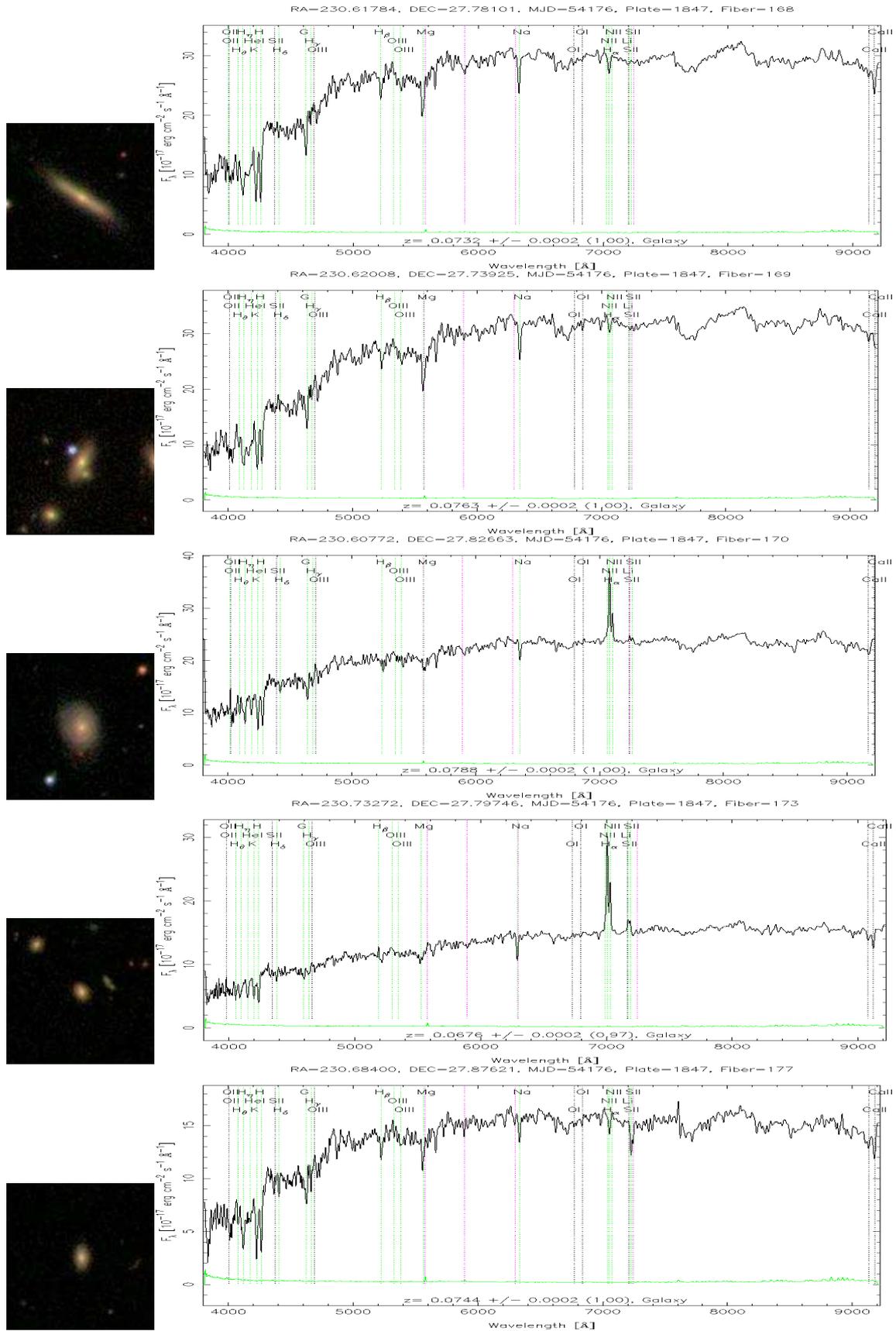


Figura E.12: Galaxias de Abell 2065 (de 51 a 55)

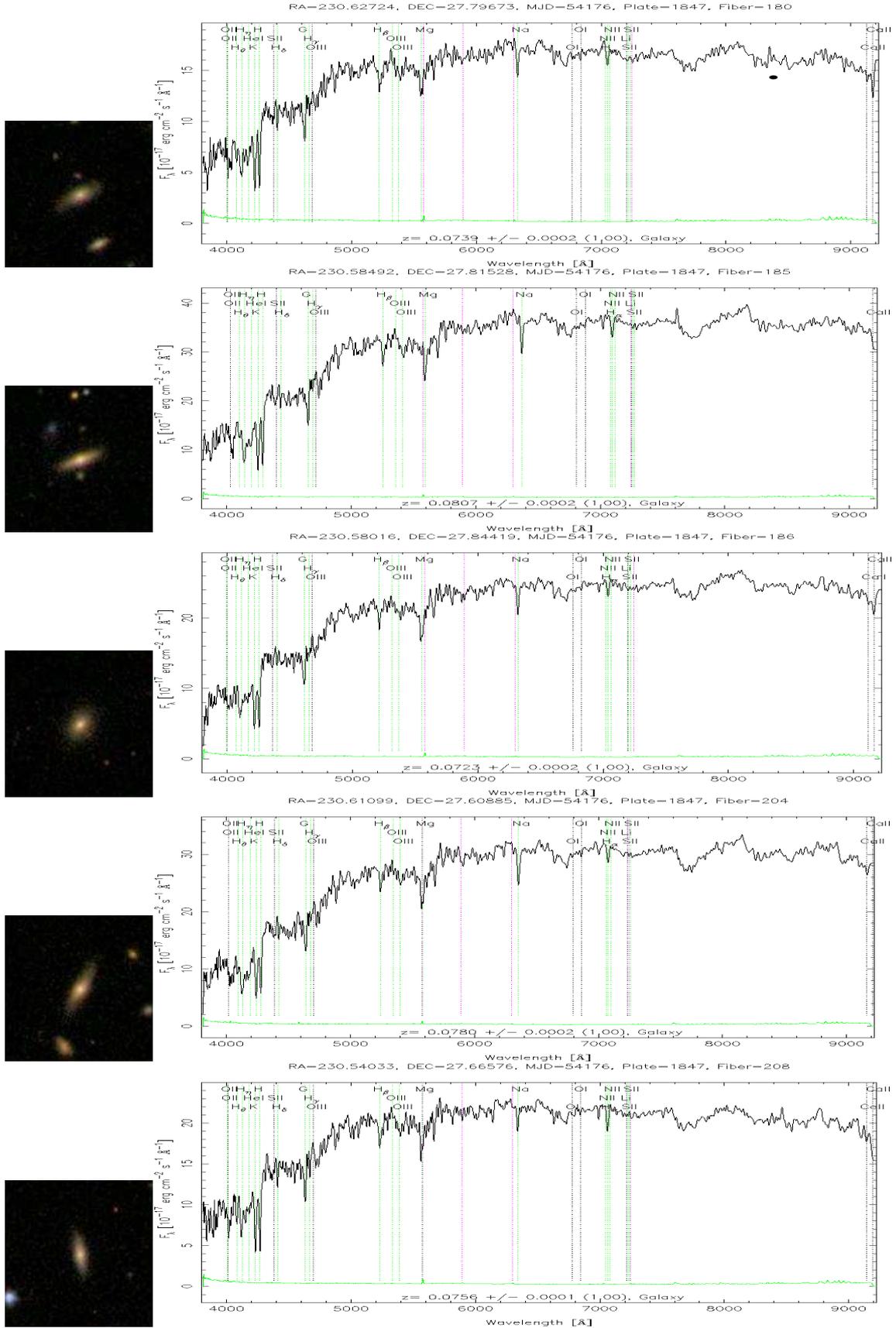


Figura E.13: Galaxias de Abell 2065 (de 56 a 60)

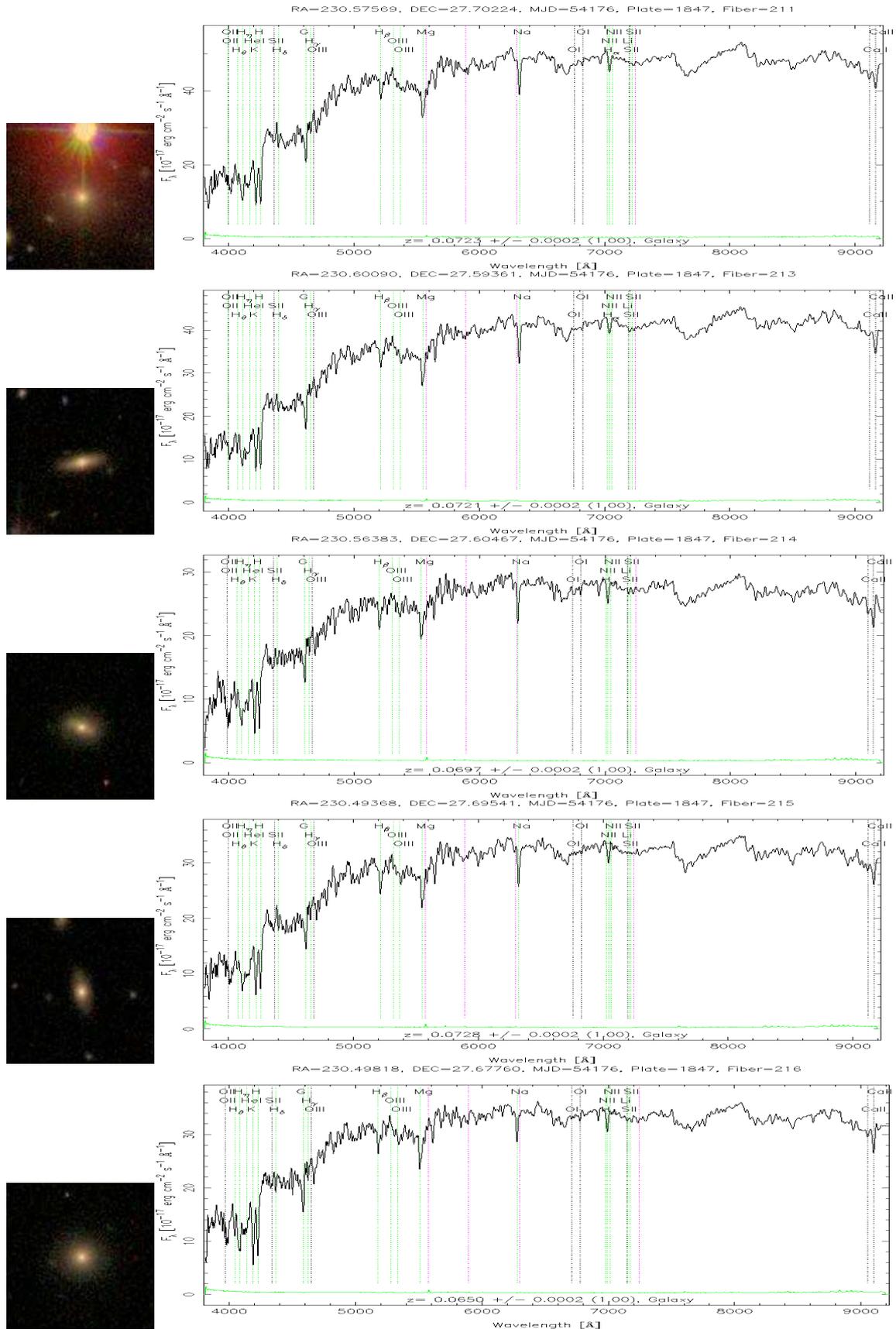


Figura E.14: Galaxias de Abell 2065 (de 61 a 65)

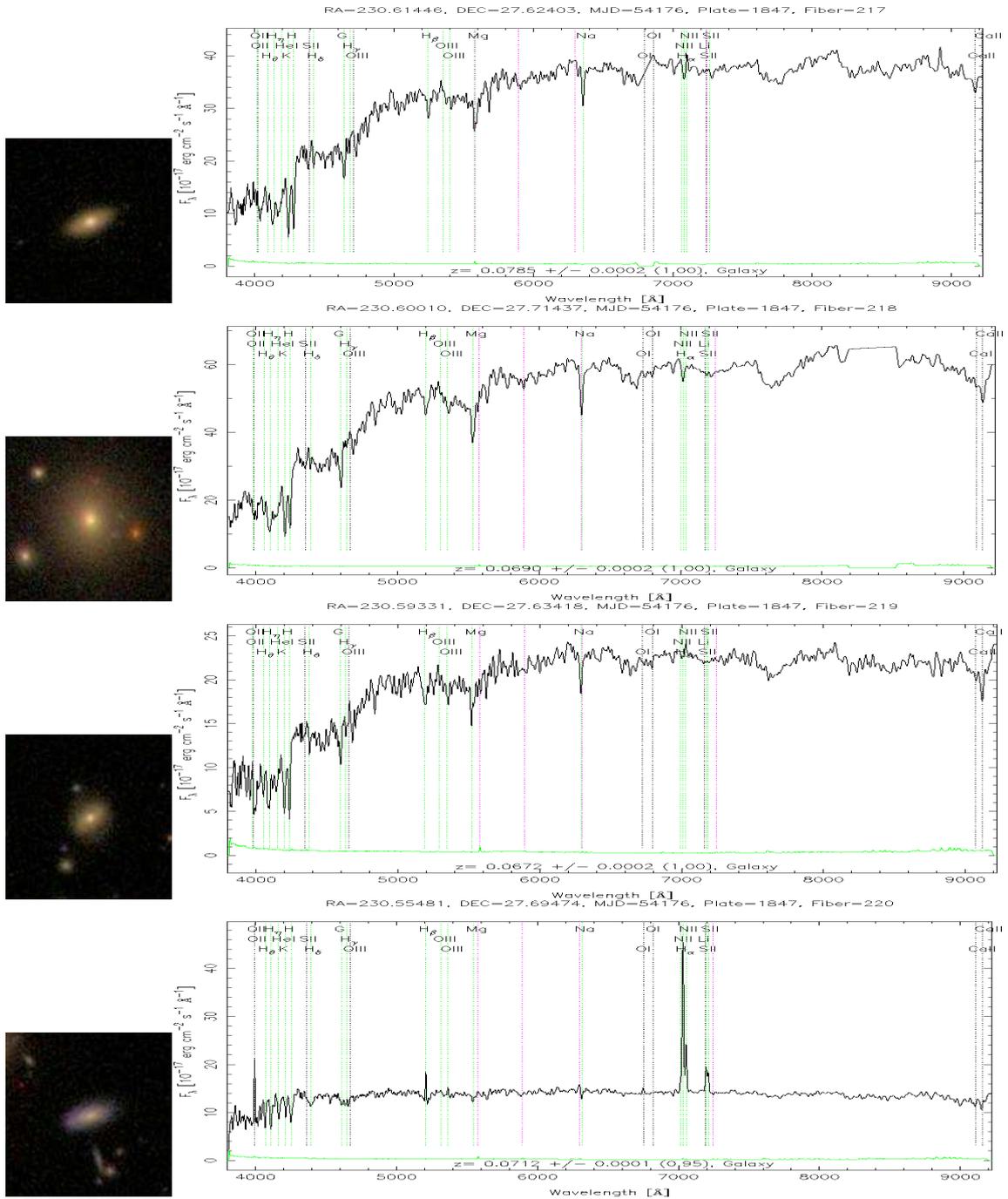


Figura E.15: Galaxias de Abell 2065 (de 66 a 69)

# F

## Galaxias del Cúmulo Abell 2069

Relación de galaxias y morfología

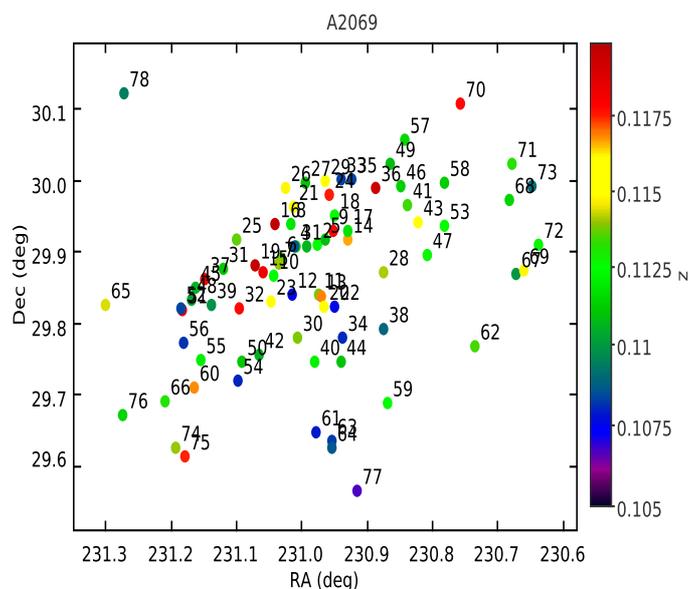


Figura F.1: Distribución espacial de las galaxias del cúmulo Abell 2069 en los primeros 20 minutos de arco desde el centro. Las etiquetas muestran el número de la galaxia en la tabla F y en las sucesivas figuras este apéndice.

En este apéndice van a estar representadas aquellas galaxias que pueblan los primeros 20 minutos de arco del cúmulo Abell 2069 y se encuentran a un desplazamiento al rojo de  $z \approx 0,11$ . Las imágenes de las galaxias que se presentan en las distintas figuras tienen un tamaño de  $0.3''/pix$  de la cámara usada por el SDSS. Las coordenadas, la distancia al centro del cúmulo y su clasificación morfológica se representan en la siguiente tabla:

N	RA (J2000) (deg)	Dec (J2000) (deg)	rad (' arco)	z	$z_{err}$	tipo (a)	Emisión (b)
1	230.99285	29.90578	0.91725	0.11065	1.68E-4	3	5
2	230.97648	29.90784	1.290626	0.11242	1.67E-4	1	6
3	231.00887	29.9061	1.307607	0.11309	1.37E-4	3	6
4	231.0108	29.90645	1.394107	0.10862	1.68E-4	1	6
5	230.96497	29.91545	2.024699	0.11081	1.58E-4	1	6
6	231.03093	29.88898	2.066283	0.11353	1.88E-4	1	6
7	231.03514	29.88208	2.339146	0.11397	1.94E-4	1	6
8	231.01574	29.93571	2.993712	0.11186	1.7E-4	1	6
9	230.95188	29.92725	3.00666	0.11784	1.51E-4	1	6
10	231.04362	29.86364	3.167238	0.11237	1.5E-4	1	6
11	230.97386	29.83872	3.239084	0.11377	1.39E-4	3	5
12	231.0144	29.83787	3.382855	0.10748	1.34E-4	3	6
13	230.97019	29.83547	3.482057	0.11692	1.32E-4	3	6
14	230.92895	29.9139	3.530153	0.11665	1.46E-4	3	6
15	231.05825	29.86918	3.714095	0.11836	1.3E-4	3	6
16	231.04126	29.93632	3.782096	0.11977	1.57E-4	1	6
17	230.93052	29.92686	3.83681	0.11178	1.48E-4	3	5
18	230.95078	29.94917	4.098488	0.11254	1.41E-4	3	6
19	231.07073	29.87797	4.2031	0.11967	1.33E-4	3	6
20	230.96509	29.82212	4.325899	0.11499	1.52E-4	1	6
21	231.01225	29.9606	4.342222	0.11508	1.7E-4	1	6
22	230.95019	29.82232	4.618124	0.10753	1.19E-4	3	5
23	231.04718	29.82753	4.771792	0.11604	1.5E-4	3	5
24	230.95718	29.97664	5.460418	0.11755	1.34E-4	1	6
25	231.09898	29.91425	5.780851	0.11366	1.53E-4	1	6
26	231.02541	29.98696	6.050807	0.11476	1.35E-4	1	6
27	230.99413	29.99342	6.173683	0.11106	5.4E-5	3	5
28	230.87468	29.86848	6.207454	0.11409	1.41E-4	3	5
29	230.96364	29.9959	6.481622	0.11529	1.4E-4	3	5
30	231.00719	29.77859	6.768969	0.11384	1.43E-4	2	6
31	231.12071	29.8749	6.800064	0.11112	1.52E-4	2	6
32	231.09559	29.81863	6.935725	0.11782	1.61E-4	1	6
33	230.94014	29.99786	6.965072	0.10827	1.31E-4	2	6
34	230.93858	29.778	7.288527	0.10801	1.37E-4	3	5
35	230.9225	29.99911	7.429572	0.10834	1.38E-4	1	6
36	230.88632	29.98784	7.989716	0.11951	1.4E-4	2	6
37	231.14807	29.85931	8.371472	0.11828	1.35E-4	3	5
38	230.8747	29.78931	8.584697	0.10894	1.52E-4	2	6
39	231.13729	29.82273	8.620438	0.10981	1.76E-4	3	5
40	230.98088	29.74478	8.763176	0.1121	1.6E-4	2	6
41	230.83789	29.96336	9.092701	0.11342	1.2E-4	1	6
42	231.0654	29.75296	9.113482	0.11051	1.51E-4	1	6
43	230.82284	29.93786	9.206803	0.11571	1.58E-4	1	6
44	230.94037	29.74314	9.233	0.11092	1.43E-4	2	6
45	231.16256	29.8466	9.295284	0.11066	8.9E-5	3	5
46	230.84782	29.98873	9.503154	0.11129	1.6E-4	1	6
47	230.80819	29.8935	9.524047	0.11264	1.44E-4	3	5
48	231.16781	29.83023	9.874499	0.11022	1.47E-4	1	6
49	230.86557	30.02067	10.18003	0.11084	1.52E-4	3	5
50	231.09116	29.74424	10.203924	0.11103	1.43E-4	1	6
51	231.18204	29.81528	10.907435	0.11858	1.4E-4	2	6
52	231.1844	29.81979	10.911011	0.10835	1.6E-4	3	5
53	230.78103	29.93378	11.236399	0.11243	1.39E-4	2	6
54	231.09734	29.71782	11.744089	0.10798	1.17E-4	1	6
55	231.15466	29.7465	12.127158	0.11203	1.48E-4	3	5
56	231.17987	29.7716	12.13784	0.1081	1.3E-4	1	6
57	230.84337	30.05541	12.526537	0.1115	1.6E-4	2	6
58	230.78122	29.99405	12.561938	0.11122	1.3E-4	1	6
59	230.8697	29.68654	13.780453	0.11233	1.57E-4	3	6
60	231.16457	29.70836	14.175236	0.11685	1.35E-4	3	6
61	230.97768	29.64475	14.765258	0.10785	1.4E-4	3	5
62	230.73596	29.7651	15.272102	0.11348	1.4E-4	2	6
63	230.95347	29.63262	15.600736	0.10823	1.45E-4	3	5
64	230.95313	29.62497	16.058363	0.10865	1.38E-4	1	6
65	231.30016	29.82471	16.552788	0.11443	1.51E-4	1	6
66	231.20948	29.6882	16.629553	0.11317	1.49E-4	3	6
67	230.67143	29.8666	16.700592	0.10995	1.33E-4	2	6
68	230.68267	29.96895	16.720835	0.11141	1.43E-4	1	6
69	230.66066	29.87156	17.236229	0.11617	1.59E-4	3	5
70	230.75786	30.10368	17.623815	0.11782	1.24E-4	3	6
71	230.67755	30.02116	18.092642	0.11323	1.28E-4	2	6
72	230.63859	29.90786	18.372687	0.11272	1.32E-4	3	5
73	230.6478	29.99021	18.831357	0.10895	1.77E-4	1	6
74	231.19371	29.62352	19.181294	0.11399	1.26E-4	2	6
75	231.17783	29.61194	19.336963	0.11749	1.43E-4	2	6
76	231.27387	29.67012	19.787434	0.11142	1.83E-4	1	6
77	230.91607	29.56373	19.996947	0.10665	8.9E-5	3	5
78	231.27226	30.11833	19.999061	0.10941	1.73E-4	3	5

Tabla F.1: Tabla de las galaxias del Cúmulo Abell 2069 ( $z=0.11$ ). Notas: (a) En esta columna se representa el tipo morfológico de las galaxias, 1 para las E, 2 para las SO-S6 y 3 para las galaxias Espirales (b) Esta columna representa la presencia de líneas de emisión en el espectro de las galaxias, 5 para aquellas que presentan líneas de emisión y 6 para las que no presentan líneas de emisión.

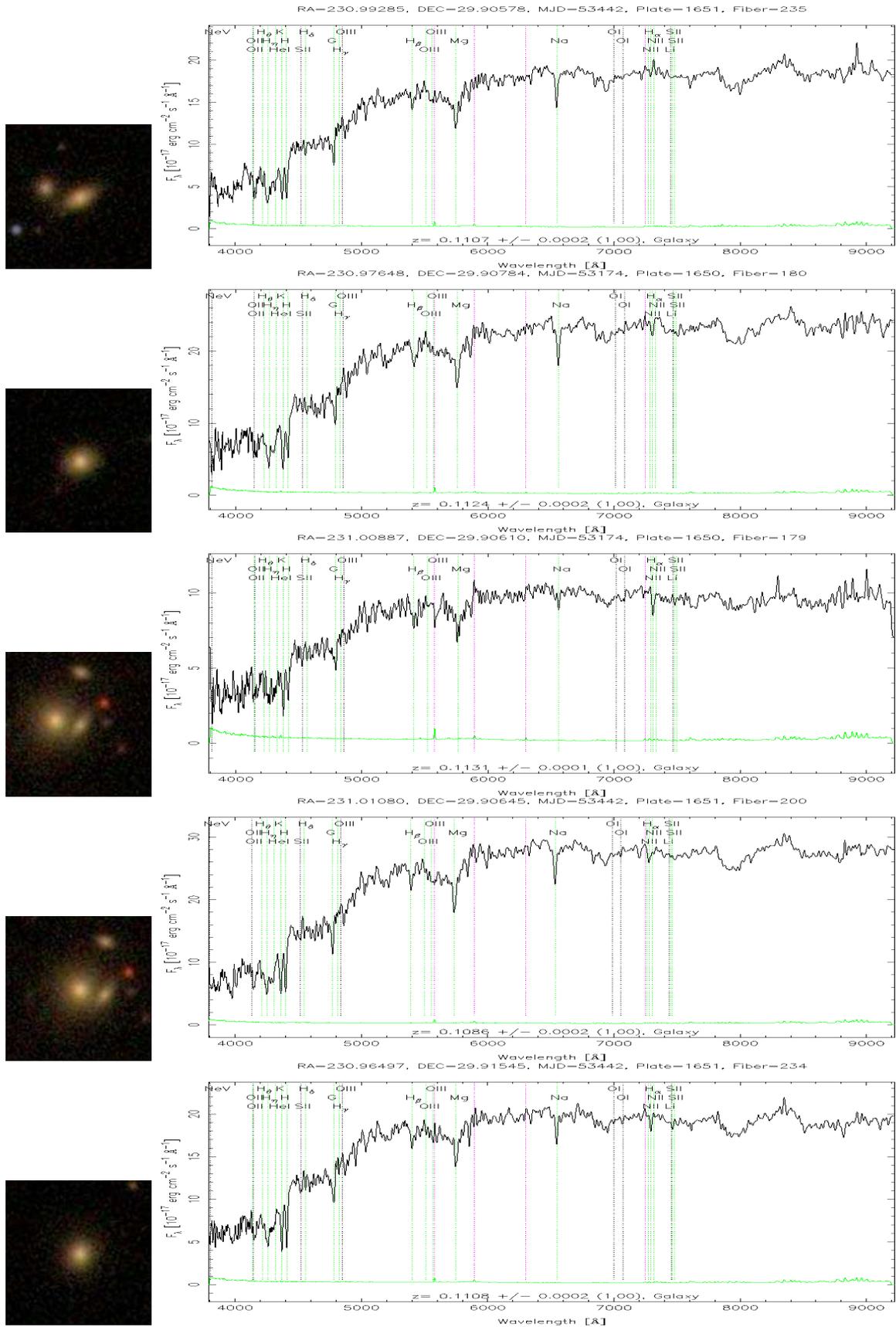


Figura F.2: Galaxias de Abell 2065 (de 1 a 5)

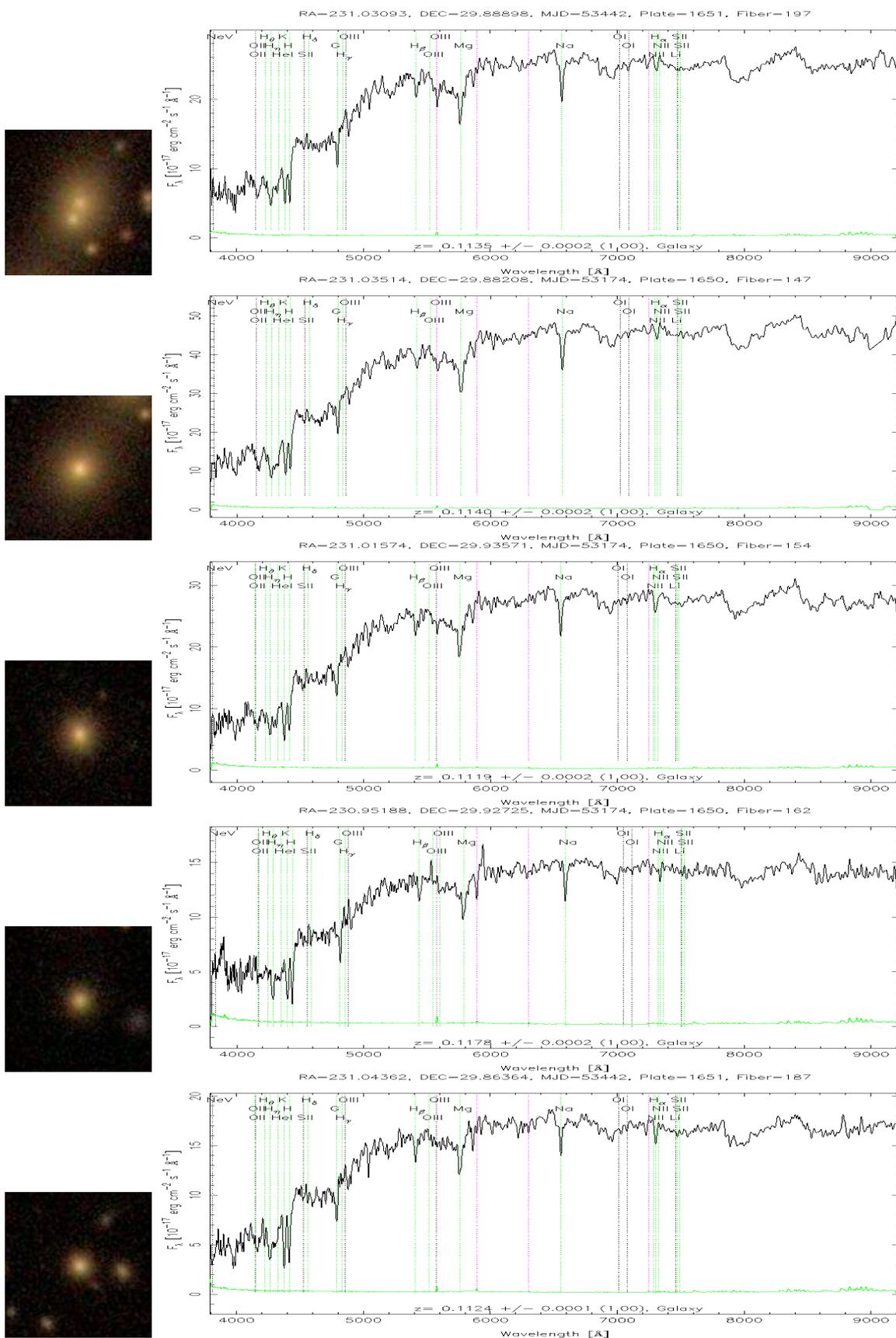


Figura F.3: Galaxias de Abell 2065 (de 6 a 10)

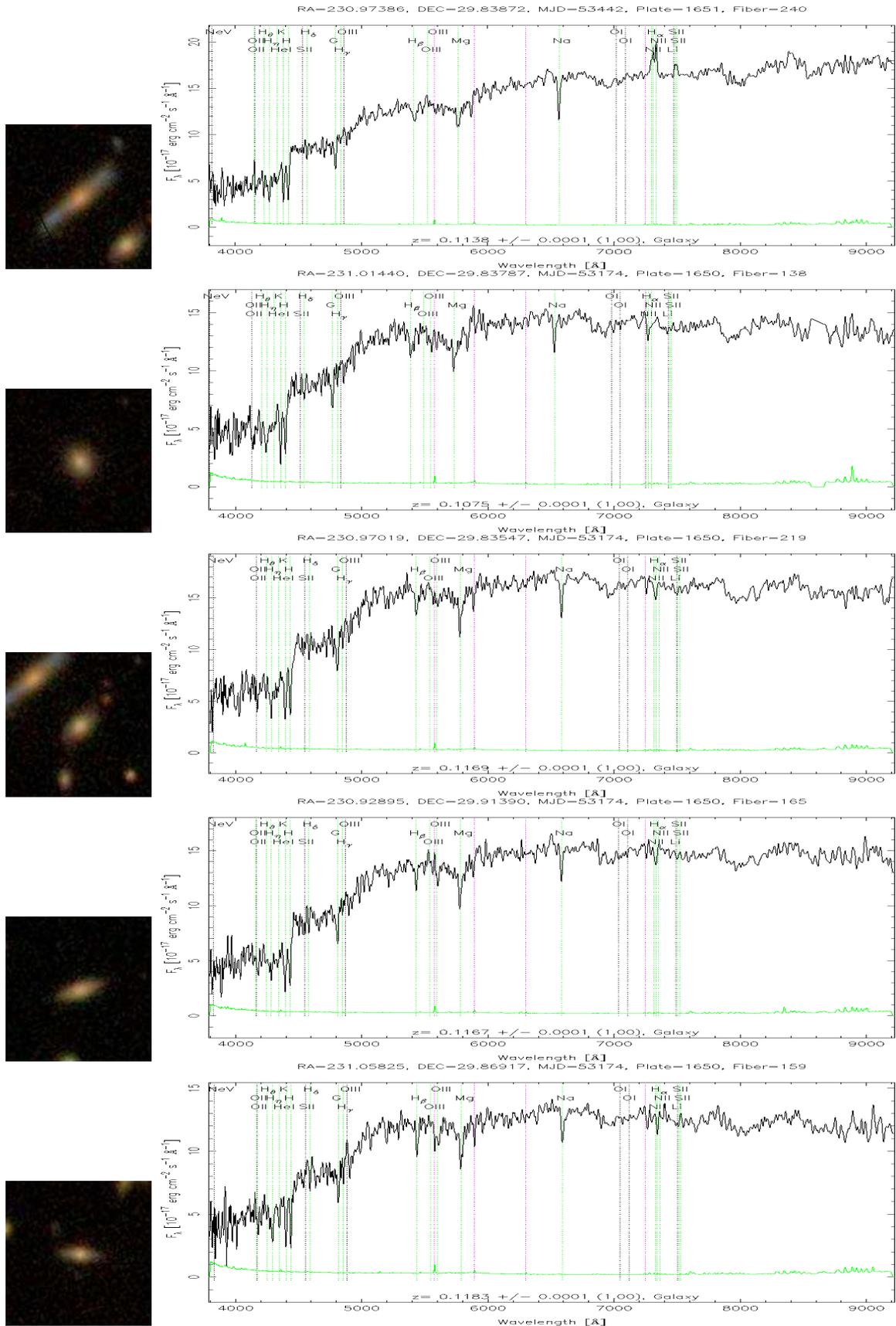


Figura F.4: Galaxias de Abell 2065 (de 11 a 15)

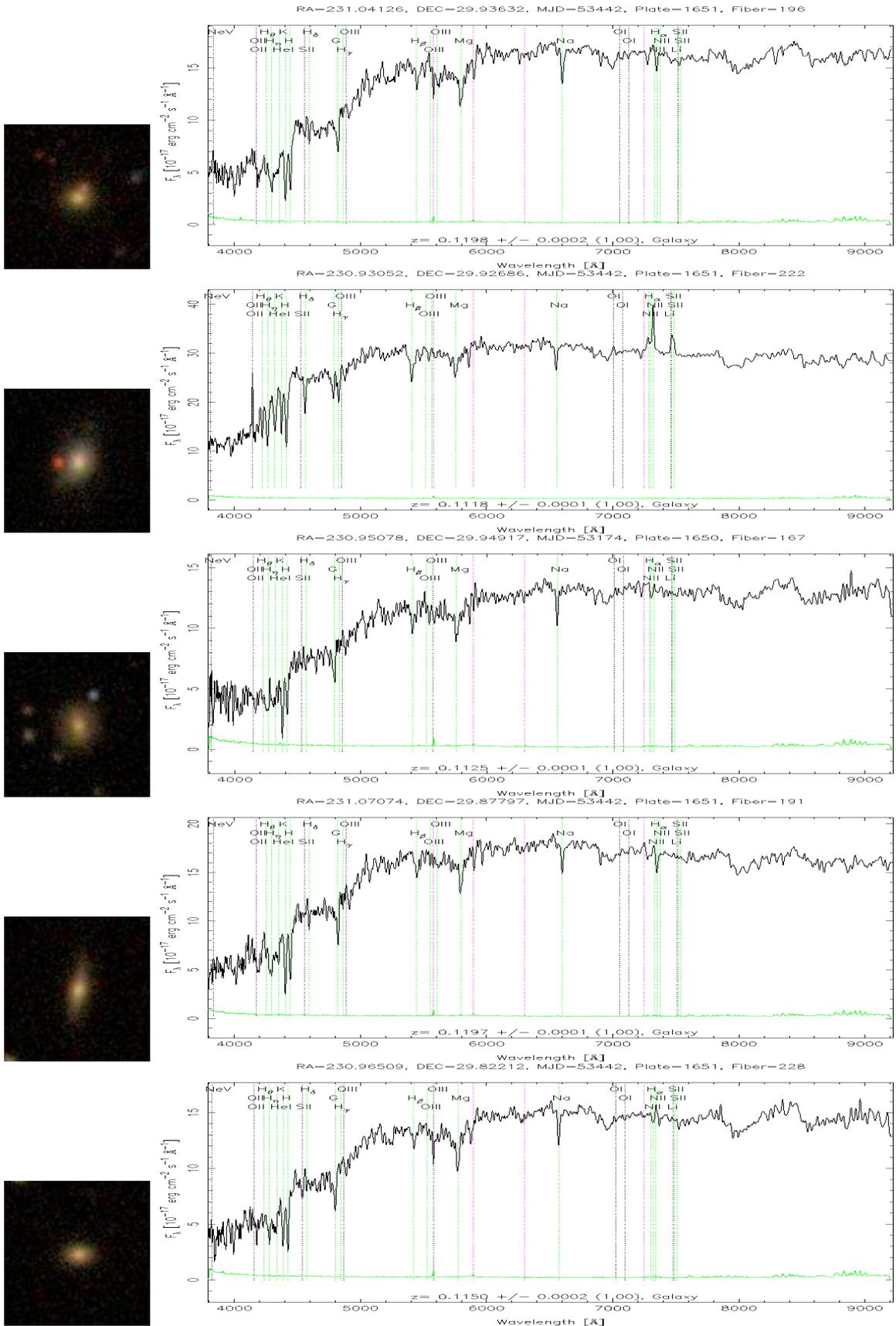


Figura F.5: Galaxias de Abell 2065 (de 16 a 20)

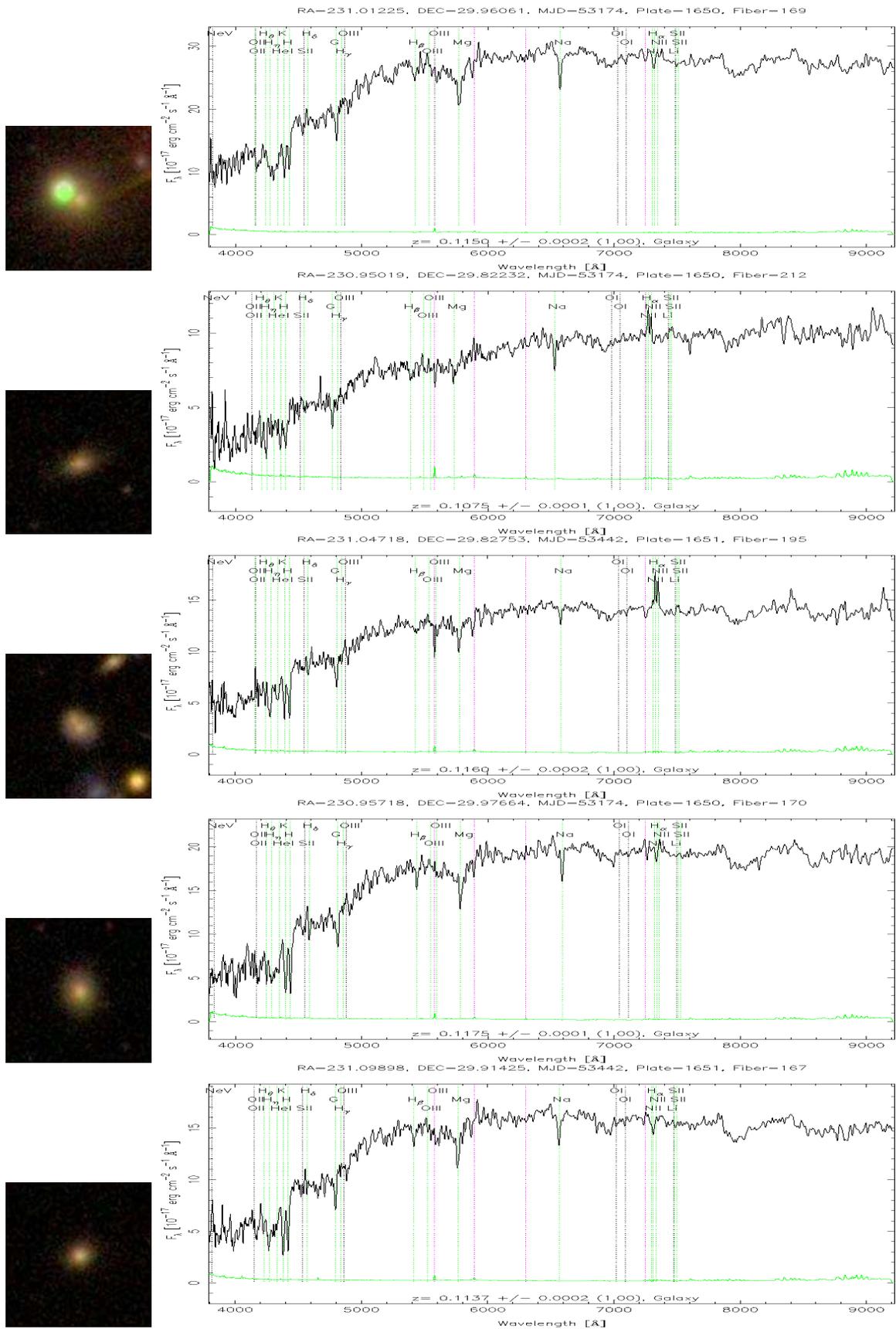


Figura F.6: Galaxias de Abell 2065 (de 21 a 25)



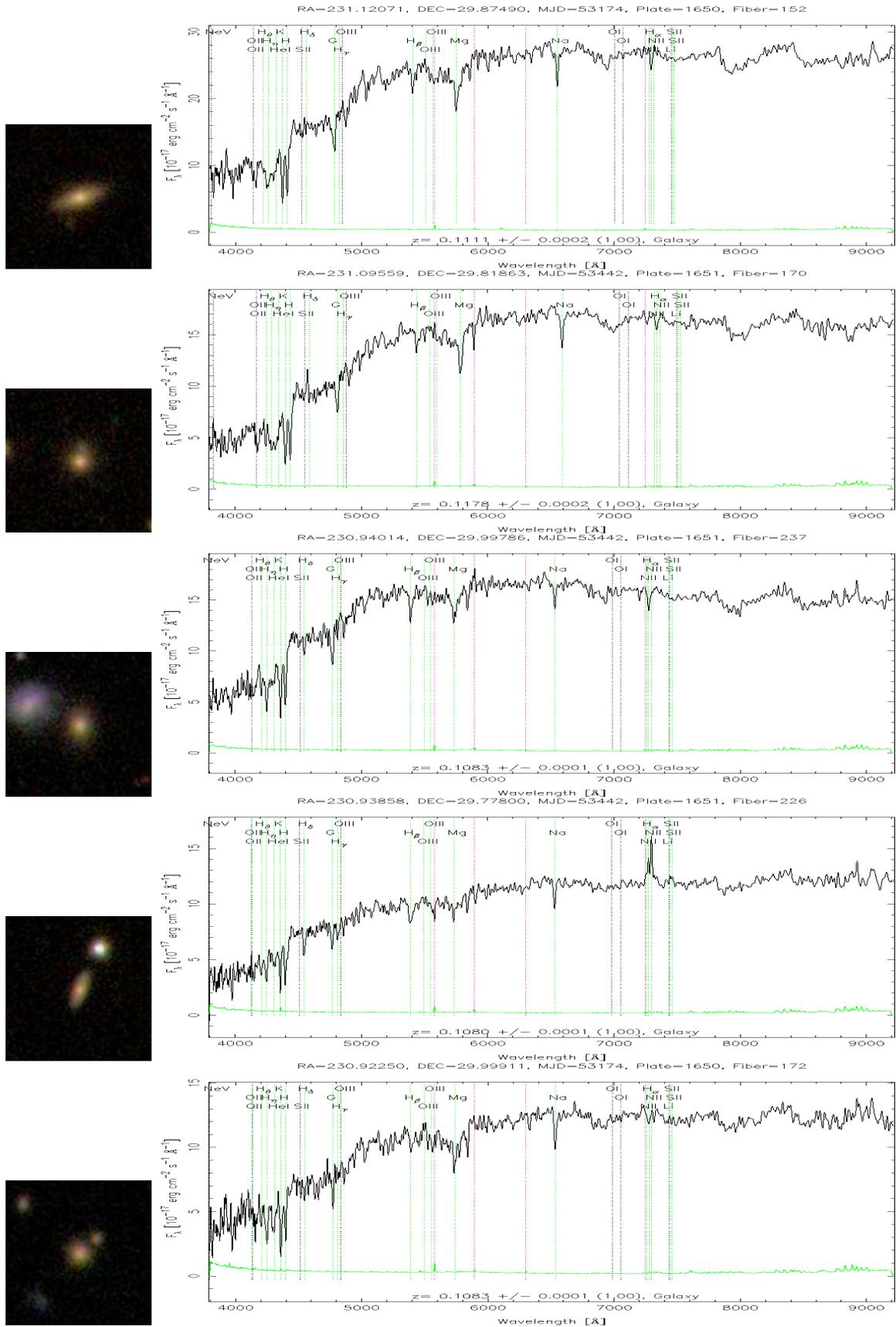


Figura F.8: Galaxias de Abell 2065 (de 31 a 35)

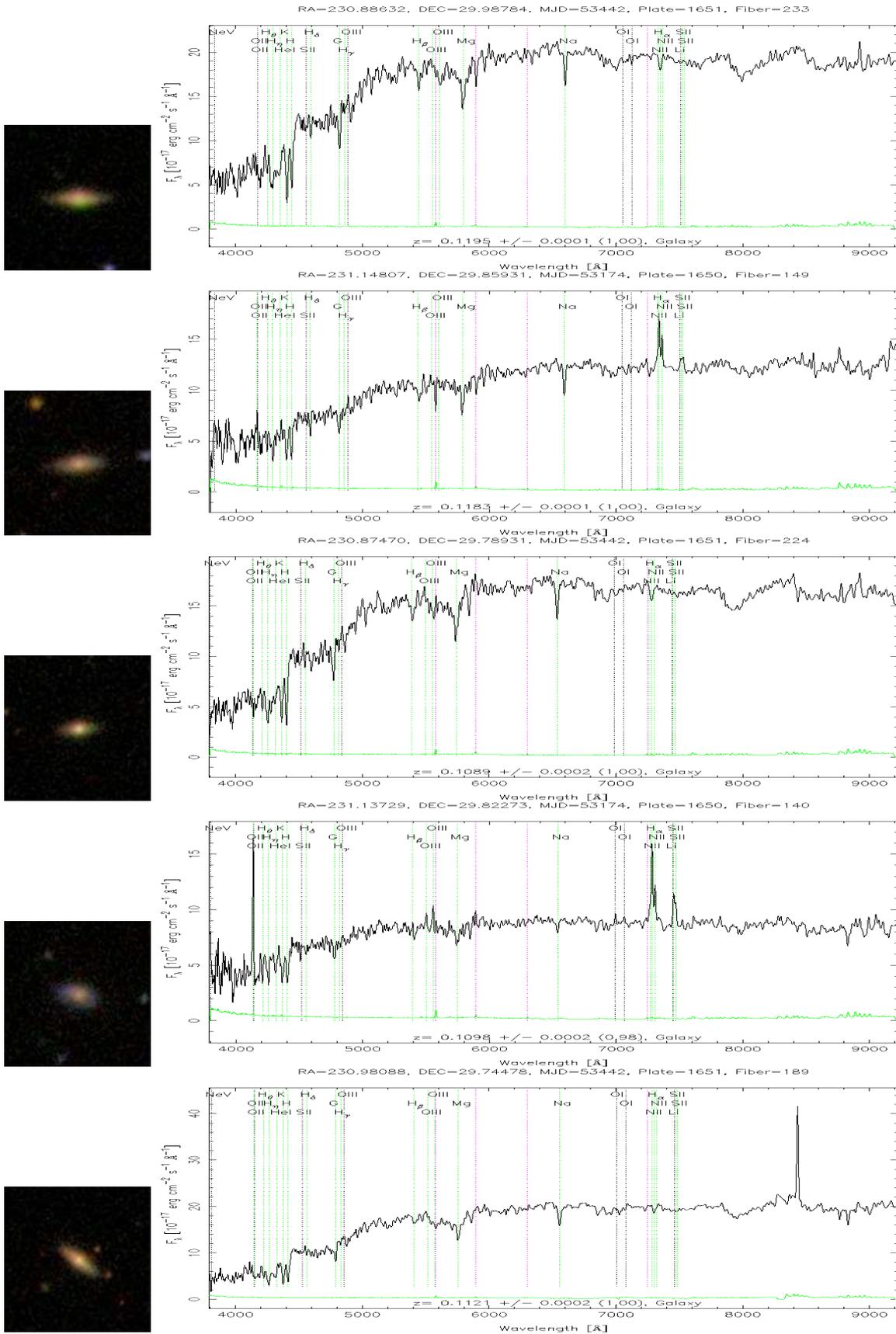


Figura F.9: Galaxias de Abell 2065 (de 36 a 40)

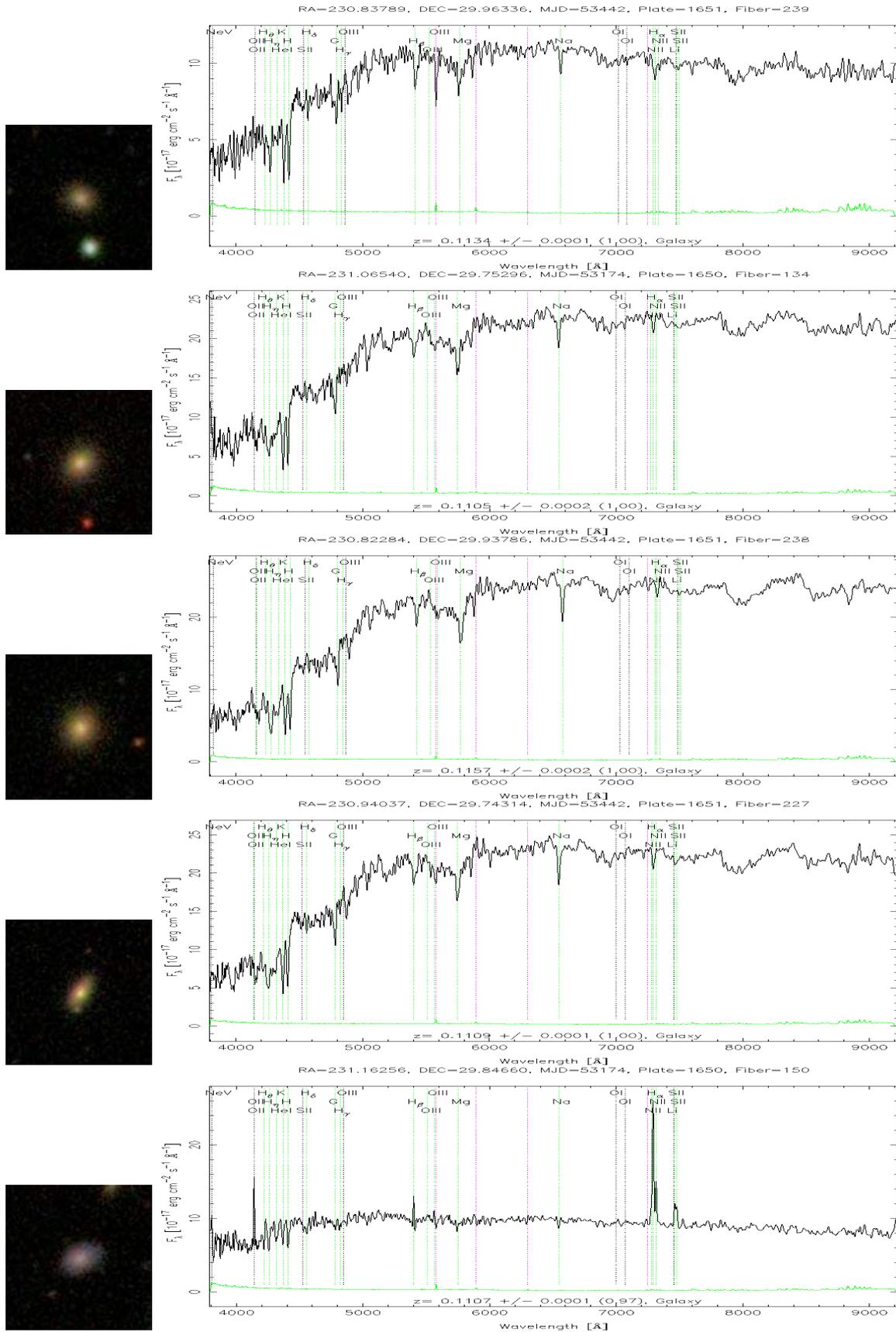


Figura F.10: Galaxias de Abell 2065 (de 41 a 45)

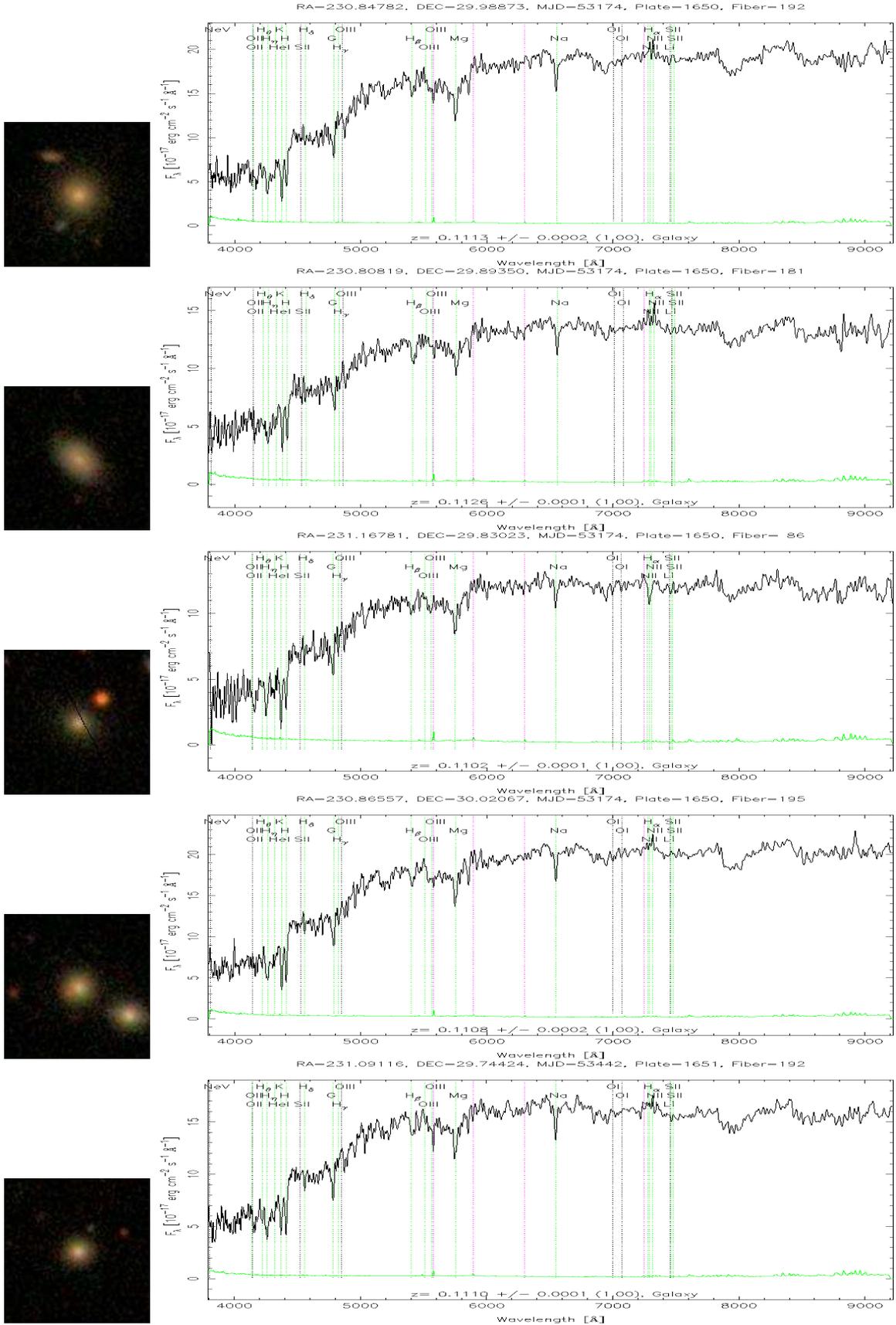


Figura F.11: Galaxias de Abell 2065 (de 46 a 50)

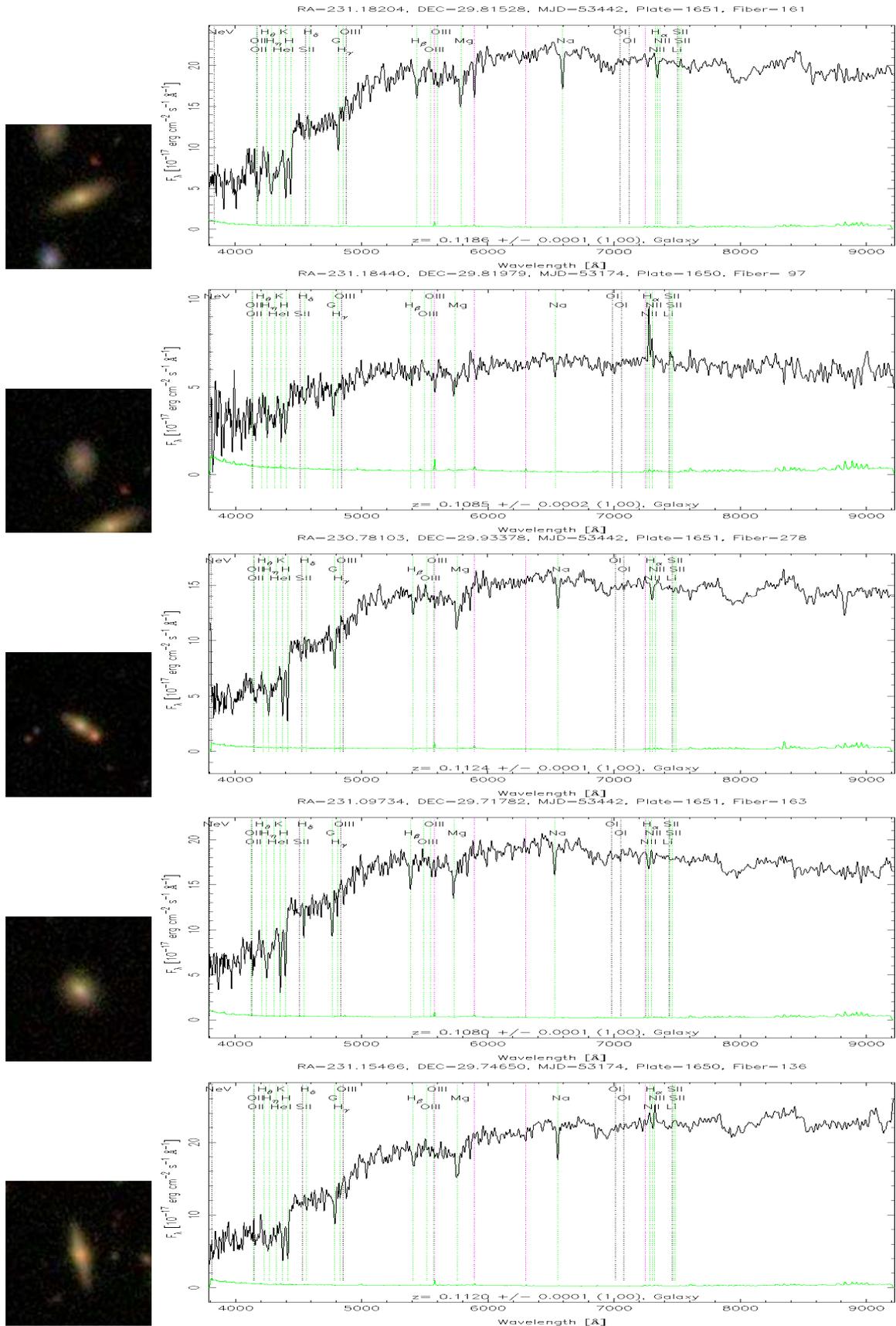


Figura F.12: Galaxias de Abell 2065 (de 51 a 55)

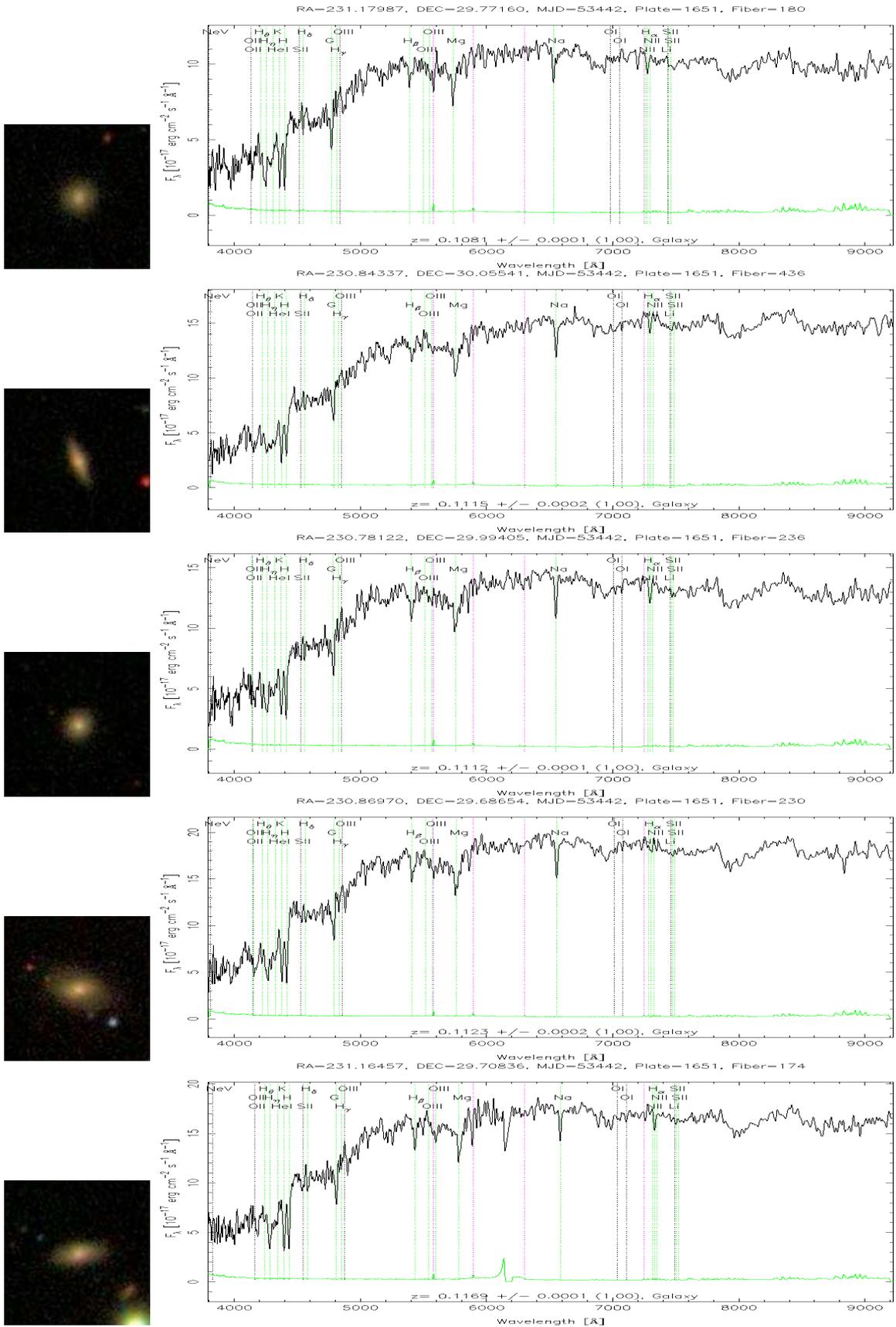


Figura F.13: Galaxias de Abell 2065 (de 56 a 60)

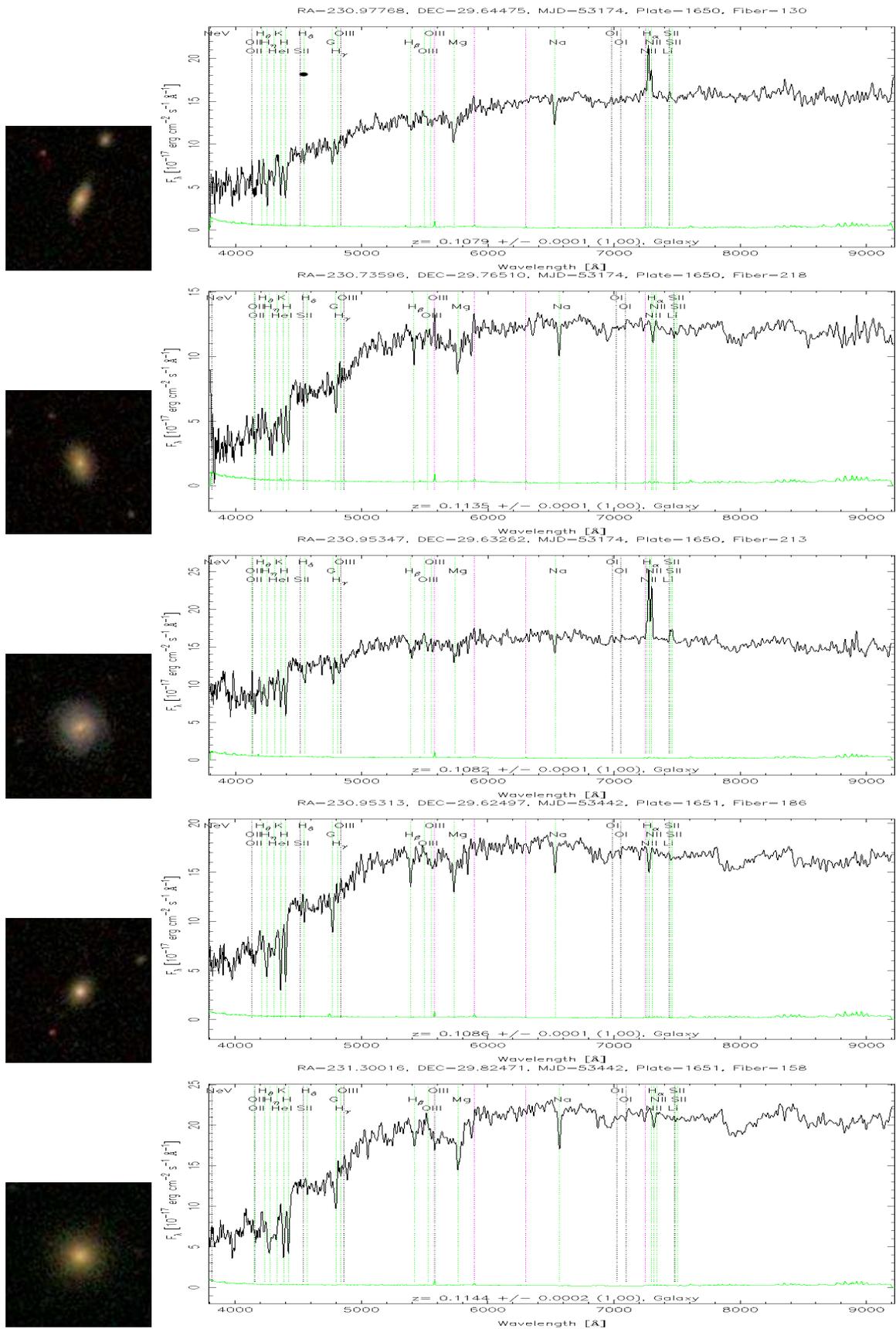


Figura F.14: Galaxias de Abell 2065 (de 61 a 65)

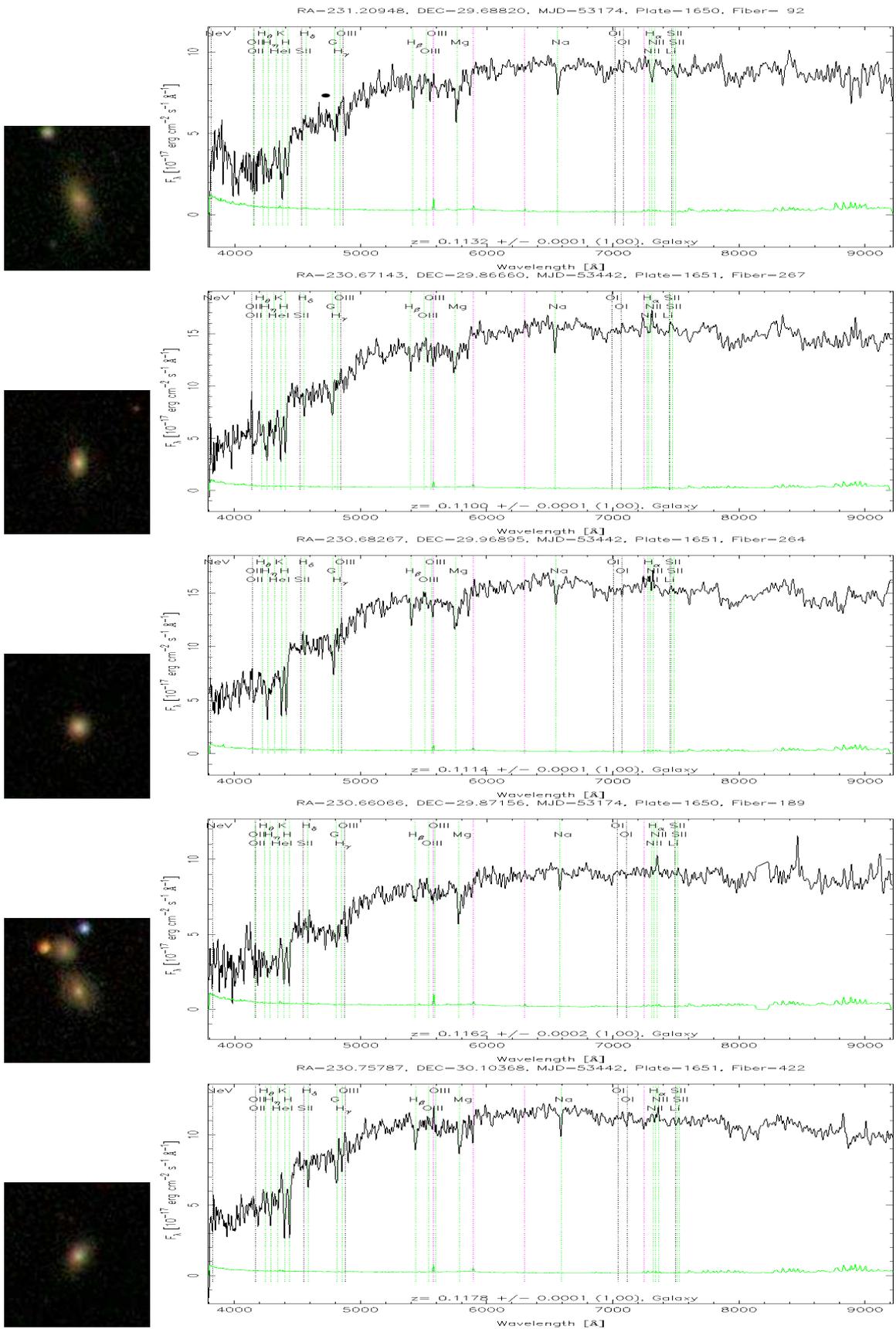


Figura F.15: Galaxias de Abell 2065 (de 66 a 70)

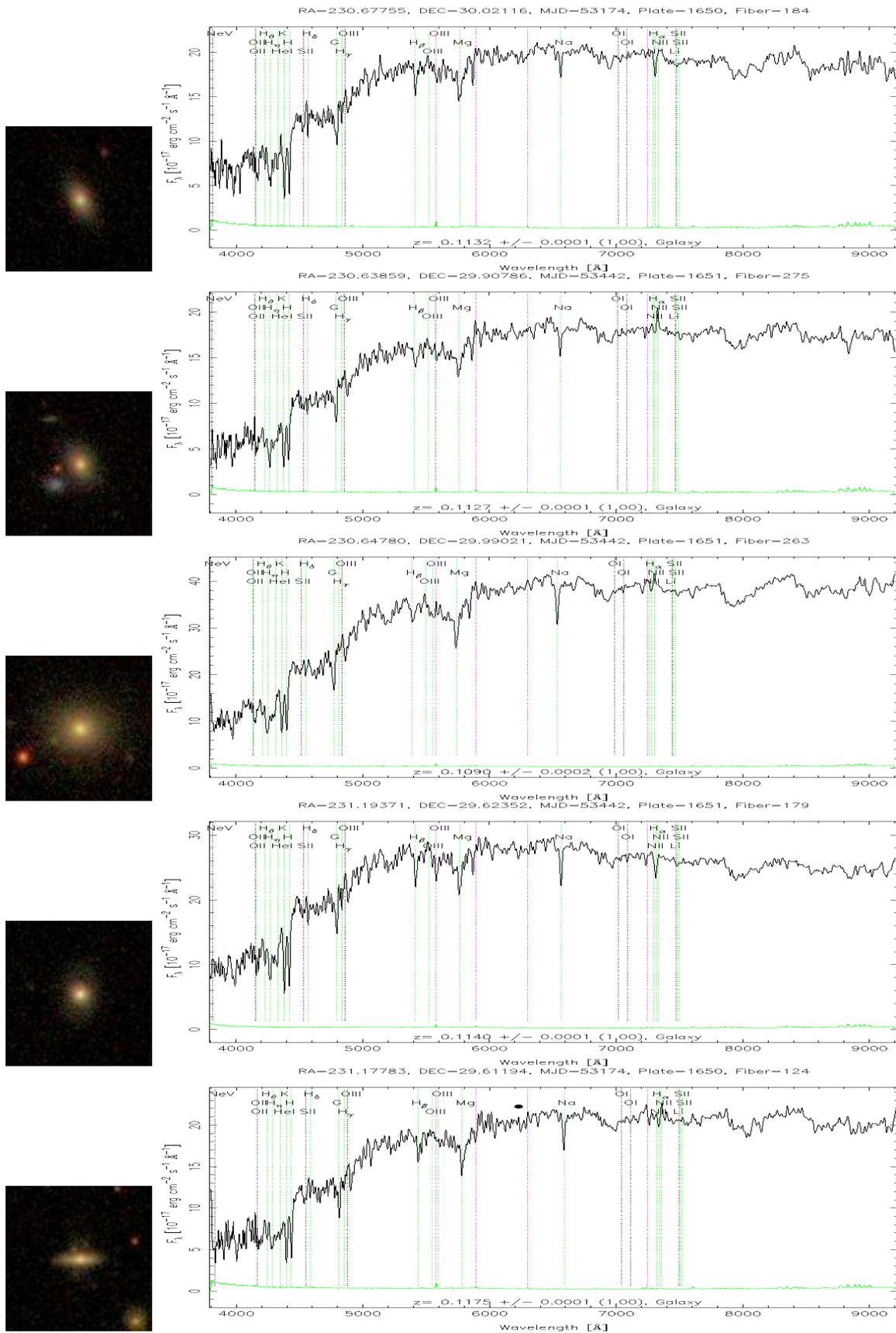


Figura F.16: Galaxias de Abell 2065 (de 71 a 75)

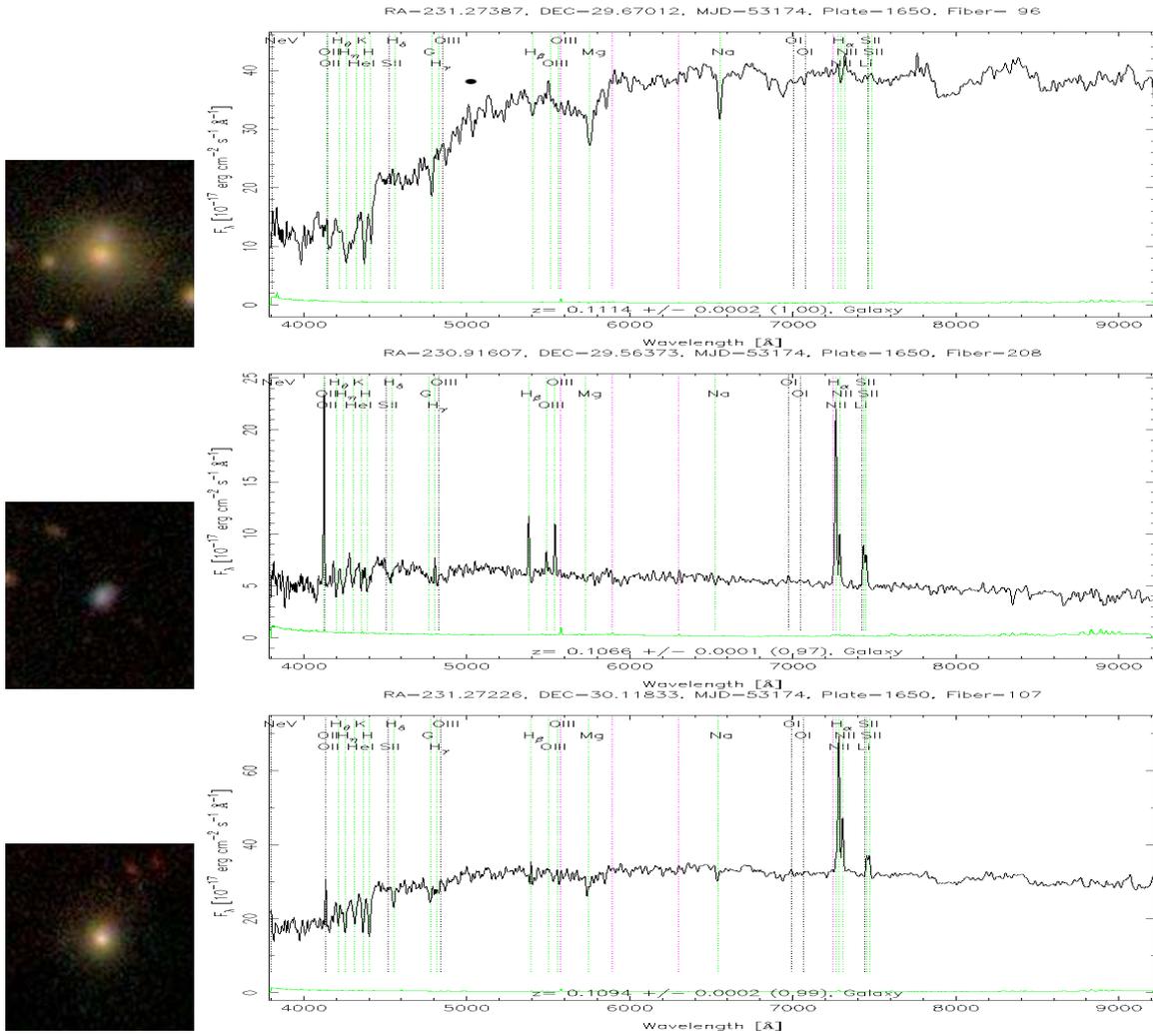


Figura F.17: Galaxias de Abell 2065 (de 76 a 78)

# G

## Zona Intercumular RA:232.06 Dec:30.51

Relación de galaxias y morfología de la zona intercumular RA:232.06 Dec:30.51

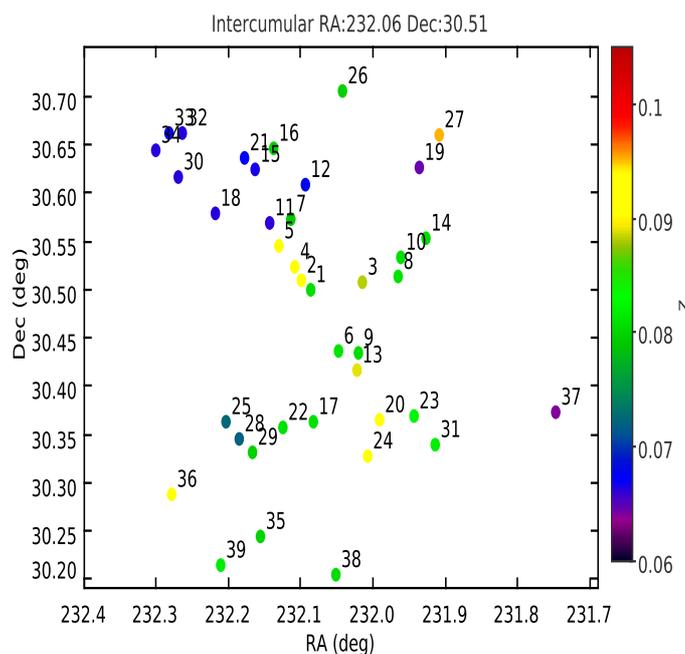


Figura G.1: Distribución espacial de las galaxias de la zona intercumular (RA:232.06 , Dec:30.51) en los primeros 20 minutos de arco desde el centro. Las etiquetas muestran el número de la galaxia en la tabla G y en las sucesivas figuras este apéndice.

En este apéndice están representadas aquellas galaxias que pueblan desde el centro de la zona intercumular de coordenadas RA:232.06 y Dec:30.51 y se encuentran a un desplazamiento al rojo comprendido entre  $0,06 \leq z \leq 0,10$  hasta un radio de 20 minutos de arco.

Las imágenes de las galaxias que se presentan en las distintas figuras tienen un tamaño de  $0.3''/pix$  de la cámara usada por el SDSS. Las coordenadas y la distancia al centro de la mancha y a su vez su clasificación morfológica se representan en la siguiente tabla:

N	RA (J2000) (deg)	Dec (J2000) (deg)	rad (' arco)	z	$z_{err}$	tipo (a)	Emisión (b)
1	232.08558	30.49741	1.522929	0.080587	1.64E-4	2	6
2	232.09892	30.50781	2.016179	0.091299	1.49E-4	1	6
3	232.01506	30.50516	2.341196	0.088271	1.25E-4	1	6
4	232.10803	30.5208	2.565824	0.090482	1.66E-4	1	6
5	232.1301	30.54332	4.138002	0.090609	1.57E-4	3	6
6	232.04697	30.43372	4.626135	0.081228	1.44E-4	2	6
7	232.11384	30.57164	4.628068	0.079087	1.69E-4	2	6
8	231.96585	30.511	4.867187	0.081017	1.53E-4	2	6
9	232.02067	30.43322	5.035793	0.080534	1.47E-4	2	6
10	231.96135	30.53191	5.265623	0.08076	1.44E-4	1	6
11	232.14251	30.56638	5.442814	0.065963	1.39E-4	2	5
12	232.09268	30.6073	6.077265	0.068004	1.36E-4	3	6
13	232.02271	30.41389	6.080545	0.089193	1.58E-4	3	5
14	231.9277	30.55048	7.25605	0.080464	1.5E-4	3	6
15	232.16336	30.6225	8.606761	0.0665	2.57E-4	3	5
16	232.13711	30.64387	8.965632	0.079977	1.44E-4	2	5
17	232.08264	30.3605	9.04614	0.080788	1.79E-4	3	6
18	232.21844	30.57666	9.112042	0.066148	1.86E-4	3	5
19	231.93655	30.62447	9.372664	0.064555	2.08E-4	3	5
20	231.99175	30.36296	9.502651	0.091086	1.56E-4	3	6
21	232.17751	30.63362	9.584673	0.067294	1.59E-4	1	6
22	232.12524	30.35511	9.887292	0.080836	1.85E-4	3	6
23	231.94339	30.36687	10.494701	0.082358	1.53E-4	3	5
24	232.00721	30.3264	11.349576	0.091083	1.43E-4	3	6
25	232.20355	30.36123	11.611384	0.072361	8.9E-5	3	5
26	232.0414	30.70336	11.641294	0.079604	1.86E-4	3	5
27	231.90812	30.6589	11.889523	0.095303	1.89E-4	3	5
28	232.18446	30.34238	11.941953	0.072052	9.5E-5	3	5
29	232.16736	30.32939	12.177363	0.079746	1.45E-4	1	6
30	232.26901	30.61424	12.478931	0.066185	1.45E-4	1	6
31	231.91471	30.33666	12.832565	0.081813	1.55E-4	1	6
32	232.26279	30.65982	13.803018	0.066176	1.79E-4	2	6
33	232.28236	30.66084	14.622723	0.067596	1.6E-4	1	6
34	232.30107	30.64181	14.752083	0.06624	1.48E-4	3	5
35	232.15591	30.24333	16.75272	0.079946	1.52E-4	3	5
36	232.27776	30.28682	17.501814	0.090754	1.07E-4	3	5
37	231.7477	30.37142	18.169226	0.063994	1.62E-4	2	6
38	232.05201	30.20259	18.449238	0.080674	1.45E-4	2	5
39	232.20972	30.21232	19.470213	0.081618	1.78E-4	2	6

Tabla G.1: Tabla de las galaxias de la región intercumular Ra:232.06 y Dec:30.51. Notas: (a) tipo morfológico de las galaxias, 1 para las E, 2 para las S0-S6 y 3 para las galaxias Espirales (b) presencia de líneas de emisión en el espectro de las galaxias, 5 para las que presentan líneas de emisión y 6 para las que no presentan líneas de emisión.

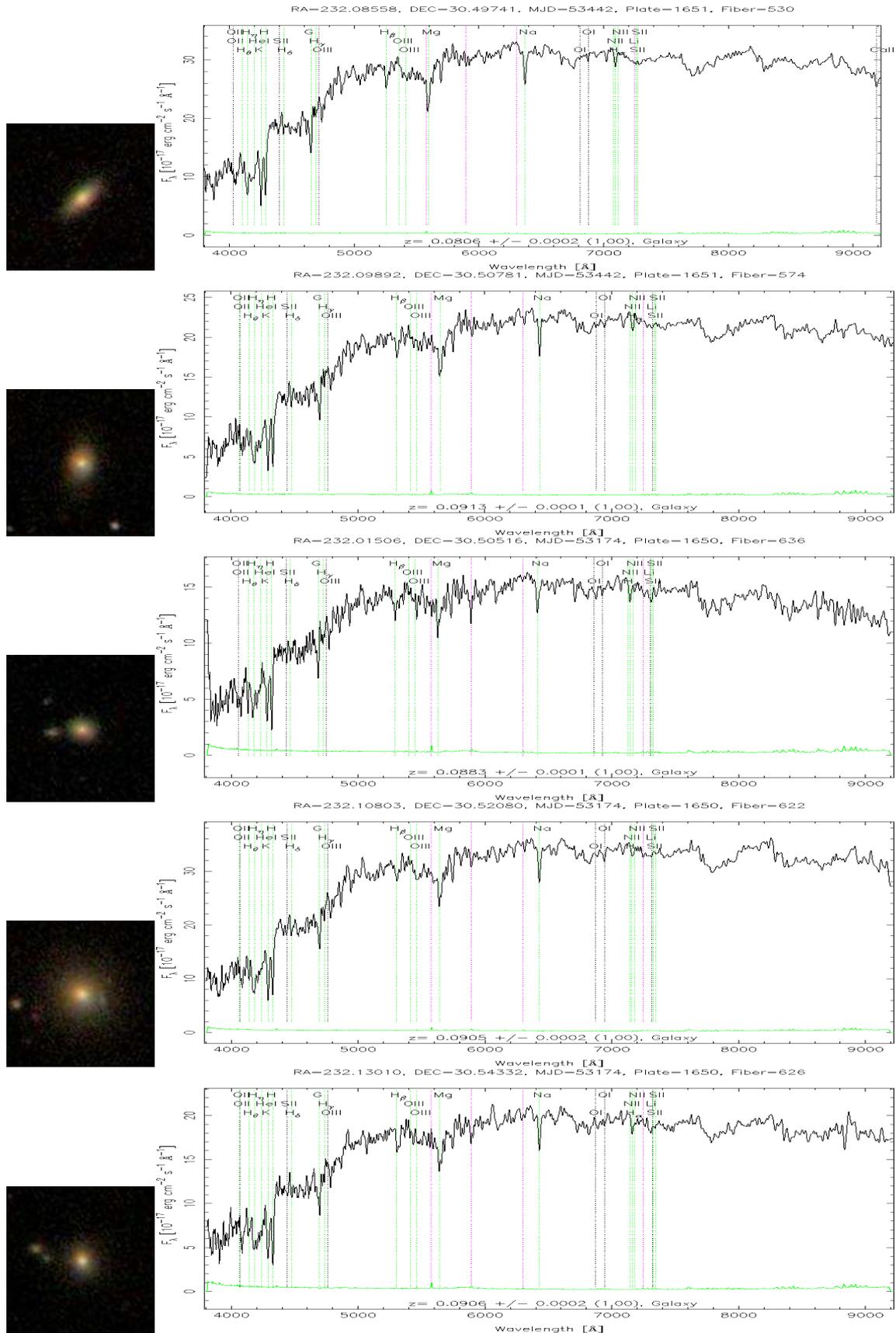


Figura G.2: Galaxias de la zona intercumular RA:232.06 y Dec:30.51 (de 1 a 5)

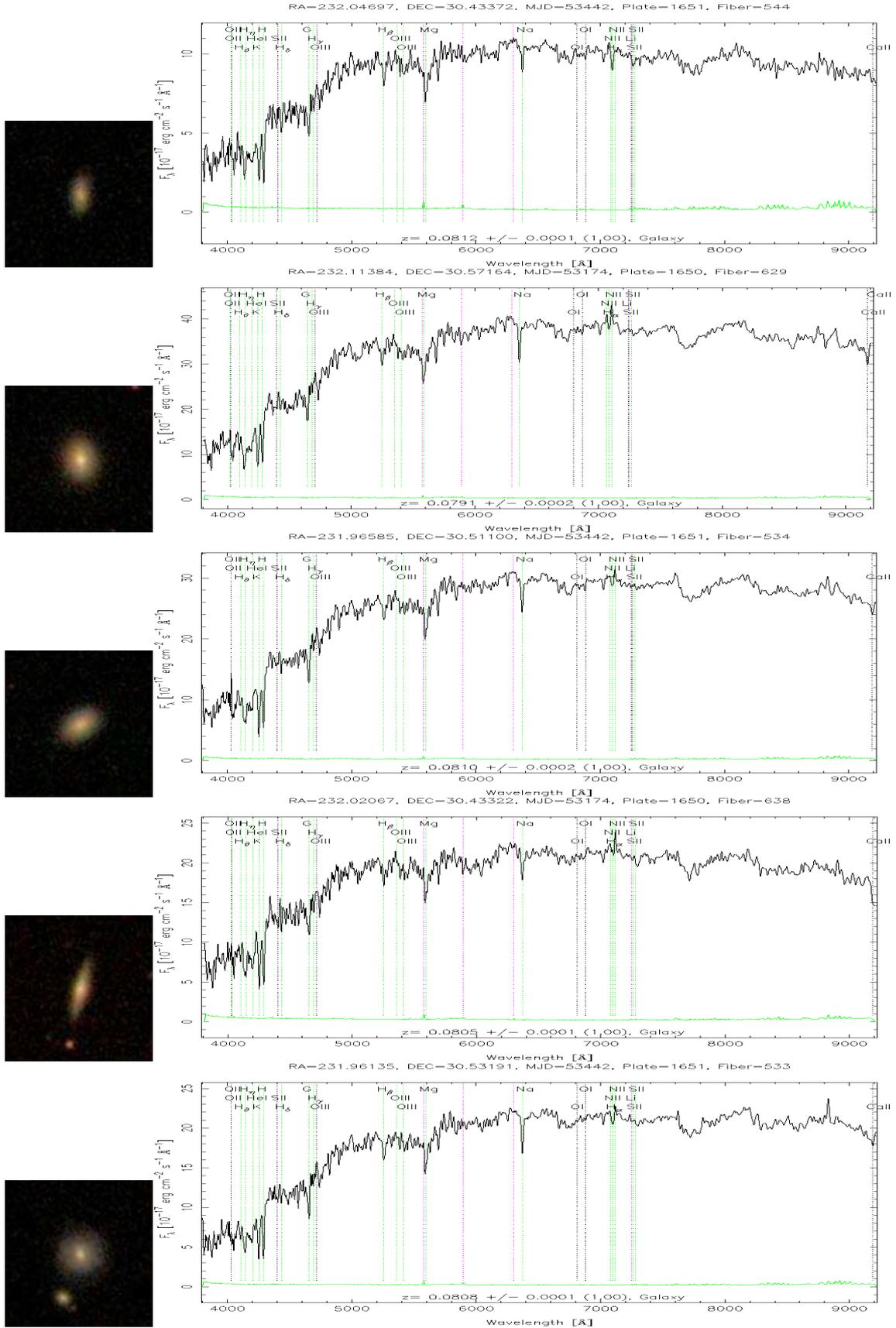


Figura G.3: Galaxias de la zona intercumular RA:232.06 y Dec:30.51 (de 6 a 10)

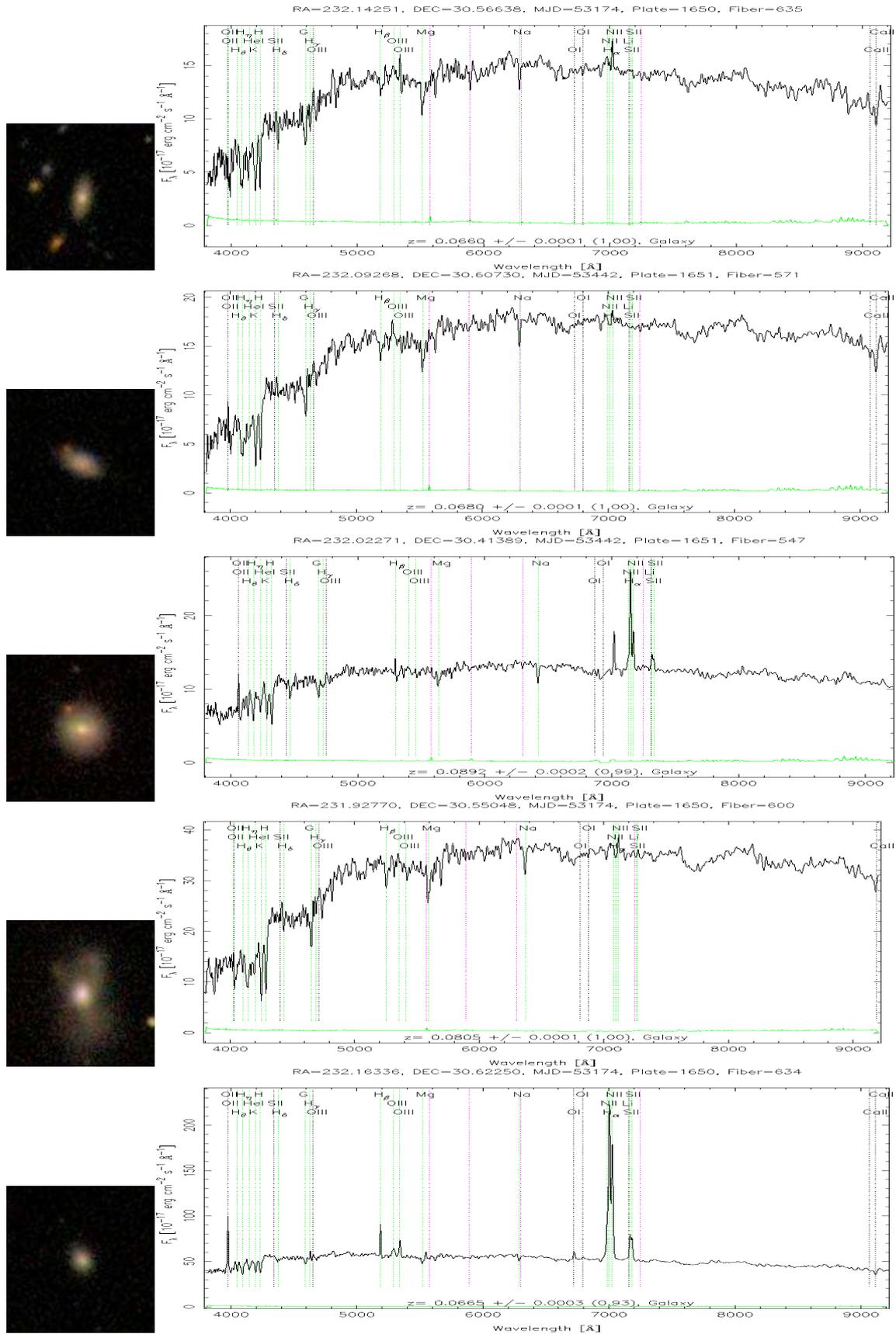


Figura G.4: Galaxias de la zona intercumular RA:232.06 y Dec:30.51 (de 11 a 15)

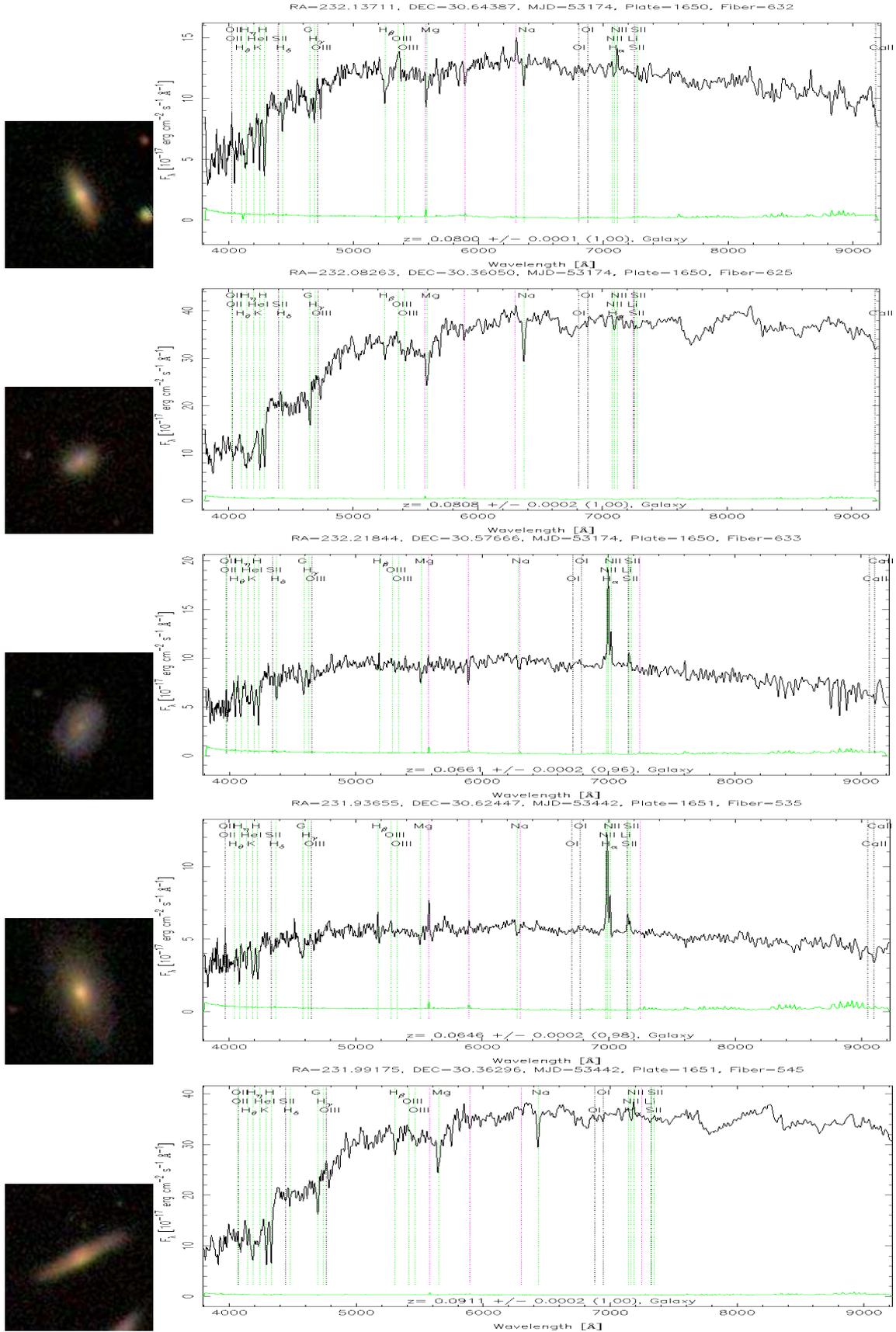


Figura G.5: Galaxias de la zona intercumular RA:232.06 y Dec:30.51 (de 16 a 20)

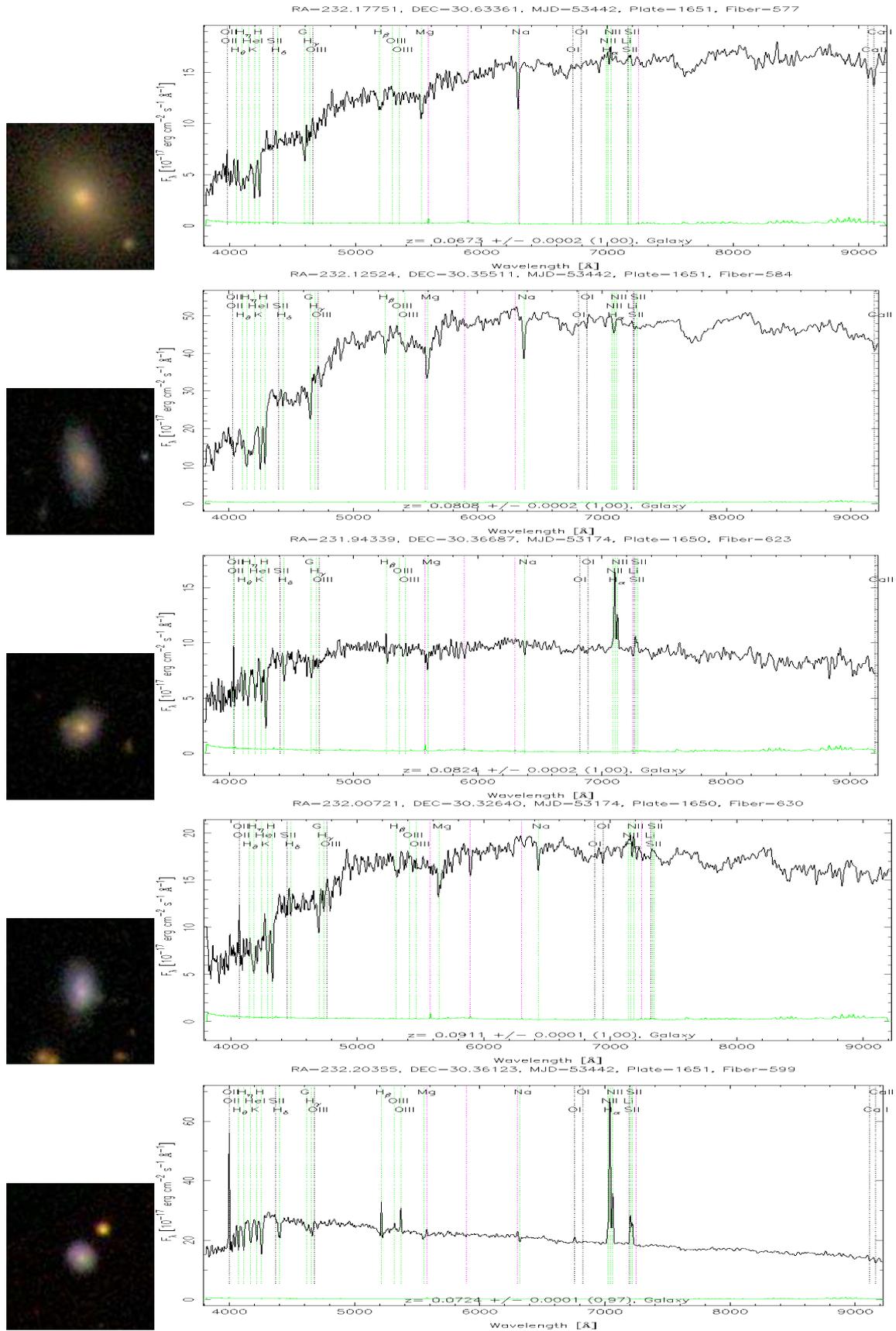


Figura G.6: Galaxias de la zona intercumular RA:232.06 y Dec:30.51 (de 21 a 25)

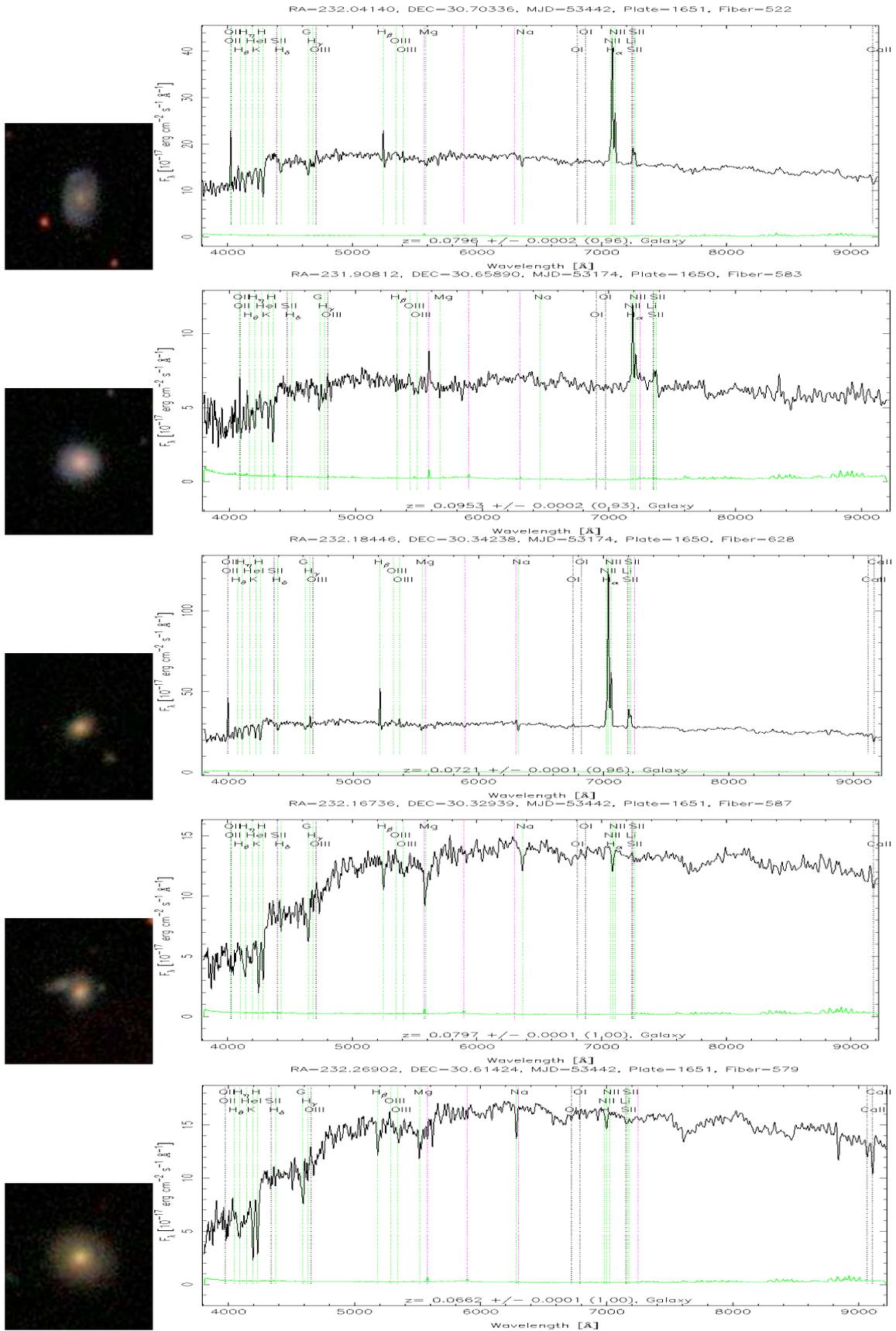


Figura G.7: Galaxias de la zona intercumular RA:232.06 y Dec:30.51 (de 26 a 20)

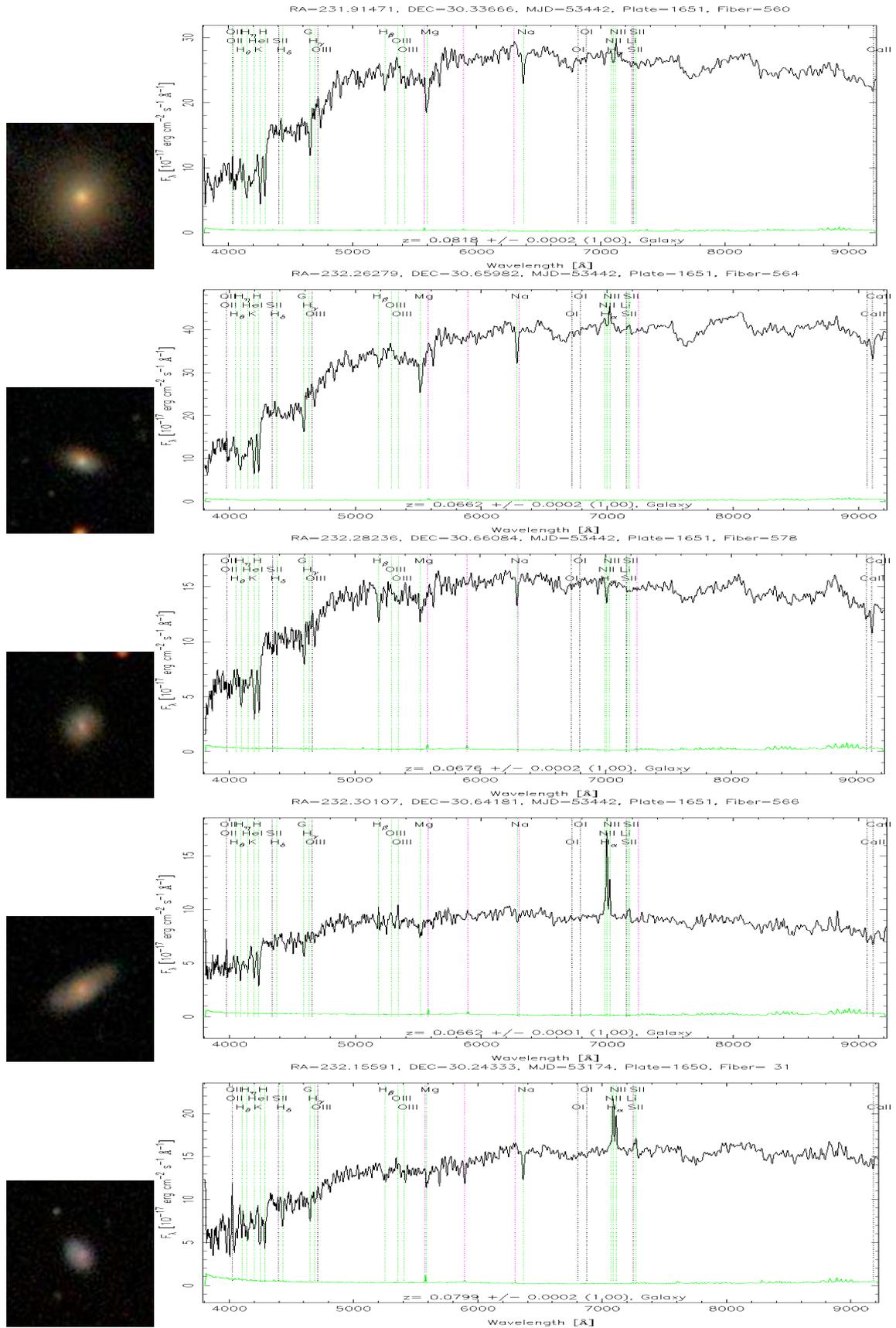


Figura G.8: Galaxias de la zona intercumular RA:232.06 y Dec:30.51 (de 31 a 35)

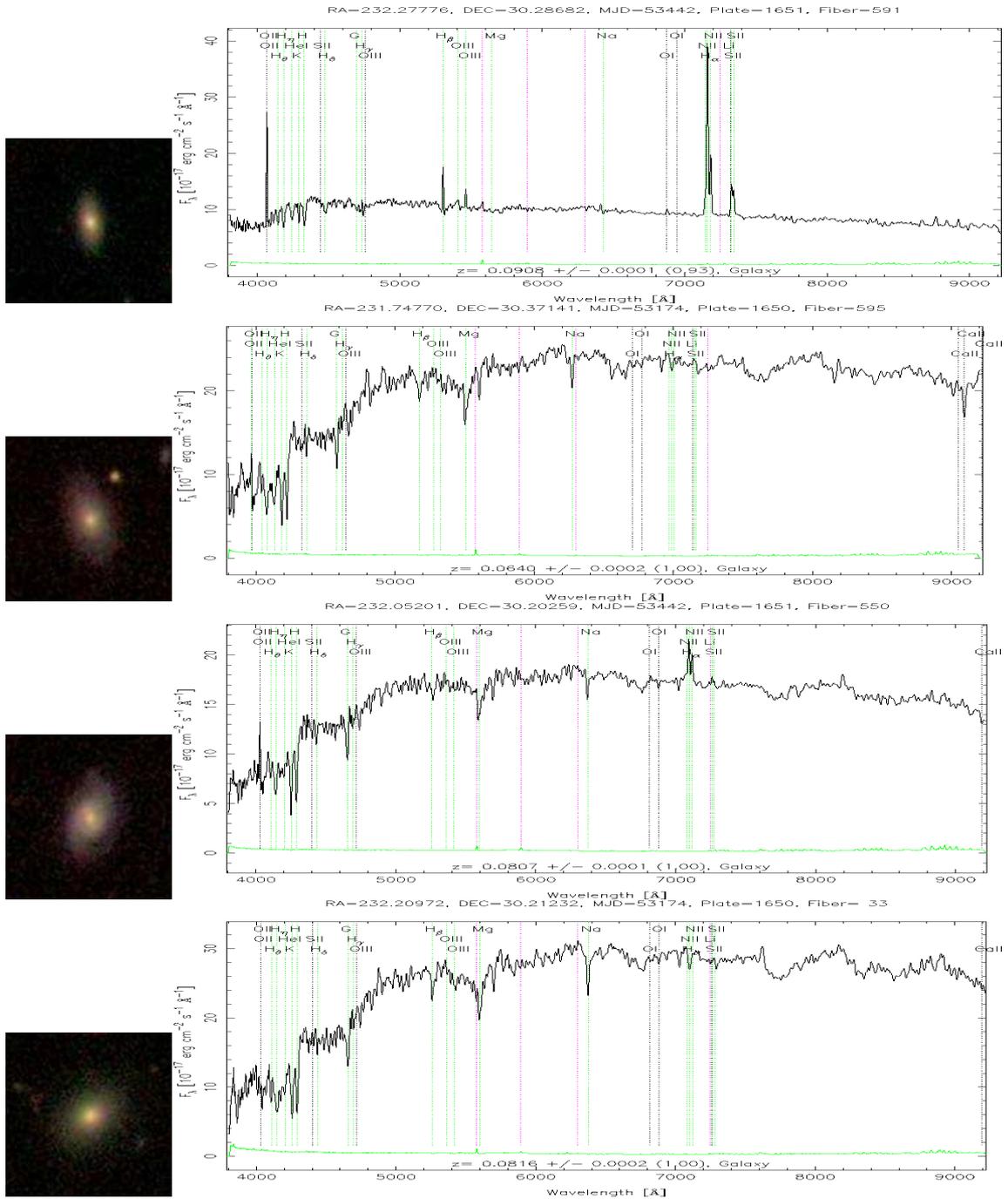


Figura G.9: Galaxias de la zona intercumular RA:232.06 y Dec:30.51 (de 35 a 39)

# H

## Zona Intercumular RA:230.56 Dec:30.01

Relación de galaxias y morfología de la zona intercumular RA:230.56 Dec:30.01

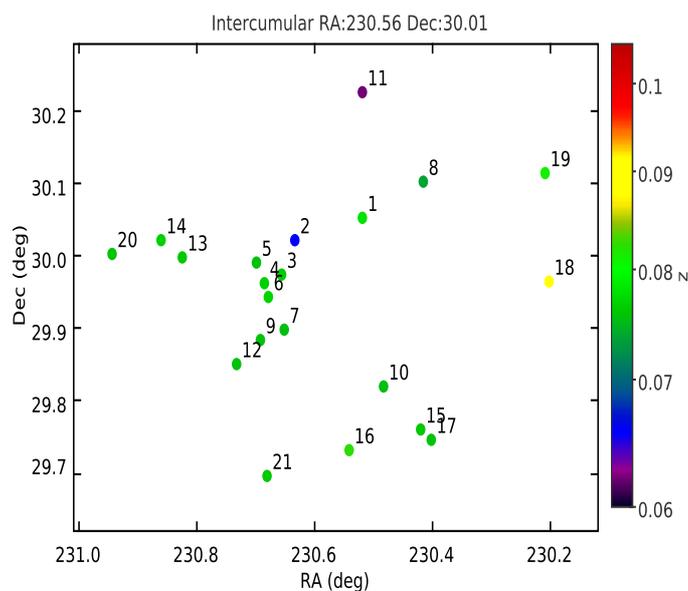


Figura H.1: Distribución espacial de las galaxias de la zona intercumular (RA:230.56 , Dec:30.01) en los primeros 20 minutos de arco desde el centro. Las etiquetas muestran el número de la galaxia en la tabla G y en las sucesivas figuras este apéndice.

En este apéndice se resumen las propiedades físicas de las galaxias que habitan el centro de la zona intercumular centrada en las coordenadas RA:230.56 Dec:30.01 y que se encuentran a un desplazamiento al rojo comprendido entre  $0,06 \leq z \leq 0,10$  hasta un radio de 20 minutos de arco desde el centro de la misma. Las imágenes de las galaxias que se presentan en las distintas figuras tienen un tamaño de  $0.3''/pix$  de la cámara usada por el SDSS. Las

coordenadas, la distancia al centro y la clasificación morfológica se resumen en la siguiente tabla:

N	RA (J2000) (deg)	Dec (J2000) (deg)	rad (' arco)	z	$z_{err}$	tipo (a)	Emisión (b)
1	230.51904	30.04881	3.154289	0.077849	7.9E-5	3	5
2	230.63367	30.01791	3.85678	0.065774	1.66E-4	1	6
3	230.65514	29.97182	5.449001	0.07618	1.68E-4	2	6
4	230.68542	29.95865	7.209538	0.076499	1.54E-4	2	6
5	230.69982	29.98905	7.373232	0.075473	9.9E-5	3	5
6	230.6781	29.94188	7.374415	0.076813	1.55E-4	1	6
7	230.65258	29.89575	8.375848	0.075303	1.89E-4	2	6
8	230.41666	30.09932	9.172514	0.073611	1.82E-4	3	5
9	230.69182	29.88167	10.307989	0.07551	1.64E-4	2	6
10	230.48251	29.81874	12.162648	0.075164	1.41E-4	2	6
11	230.51797	30.22328	12.981389	0.062053	9.0E-5	3	5
12	230.73343	29.84883	13.222655	0.075535	1.71E-4	3	6
13	230.82559	29.99555	13.82728	0.076039	1.83E-4	2	6
14	230.8616	30.01874	15.678094	0.076486	1.52E-4	1	6
15	230.41906	29.75928	16.734852	0.075984	1.77E-4	3	6
16	230.54183	29.73	16.826578	0.082483	1.39E-4	2	6
17	230.4021	29.74339	17.982646	0.07564	1.91E-4	3	5
18	230.20253	29.96119	18.806794	0.090811	8.1E-5	3	5
19	230.2097	30.11035	19.161608	0.081168	1.55E-4	1	6
20	230.94421	29.99926	19.973594	0.075765	8.2E-5	3	5
21	230.68037	29.69371	19.98445	0.076079	1.8E-4	3	5

Tabla H.1: Tabla de las galaxias de la región intercumular Ra:230.56 y Dec:30.01. Notas: (a) tipo morfológico de las galaxias, 1 para las E, 2 para las S0-S6 y 3 para las galaxias Espirales (b) presencia de líneas de emisión en el espectro de las galaxias, 5 para las que presentan líneas de emisión y 6 para las que no presentan líneas de emisión.

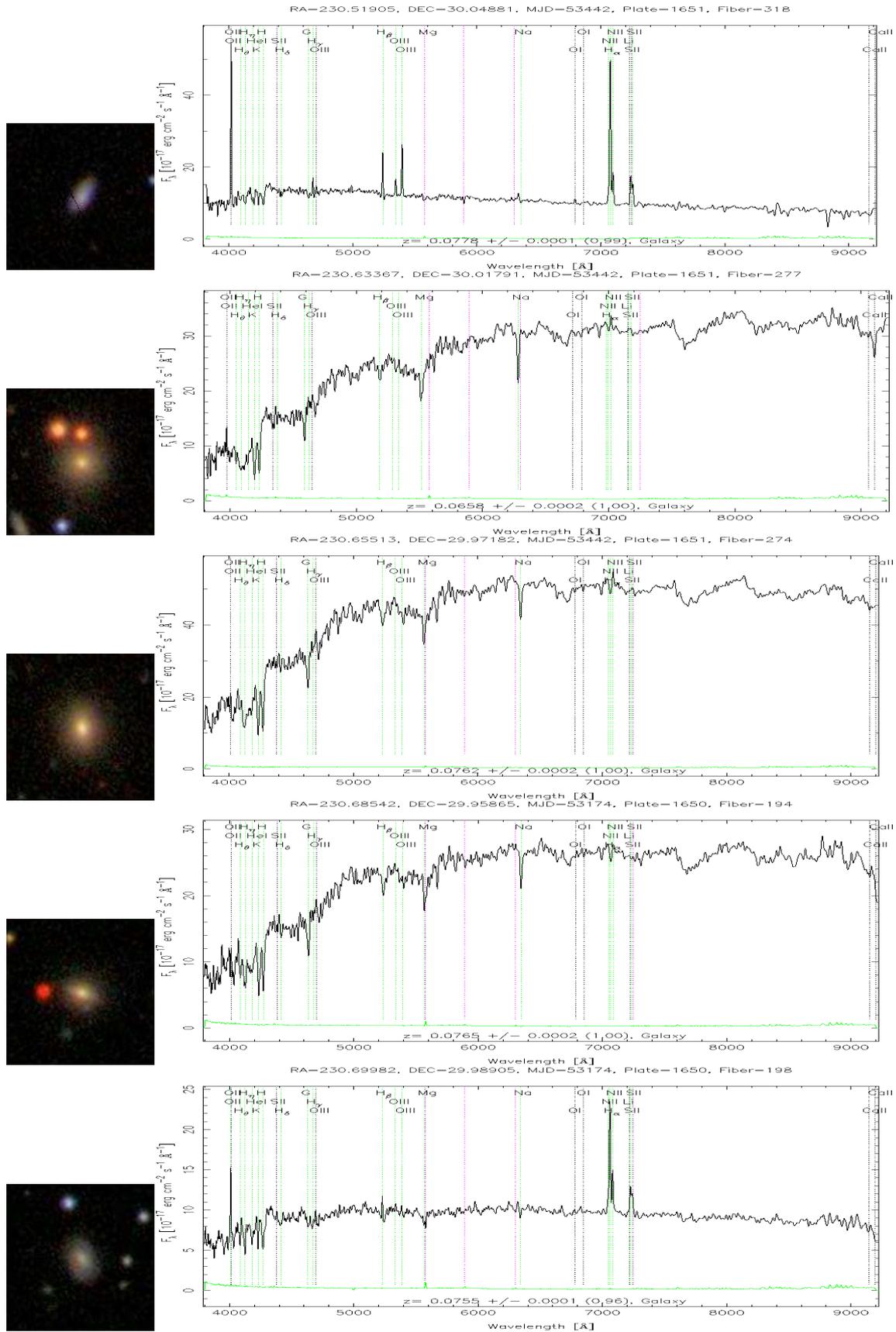


Figura H.2: Galaxias de la zona intercumular RA:230.56 y Dec:30.01 (de 1 a 5)

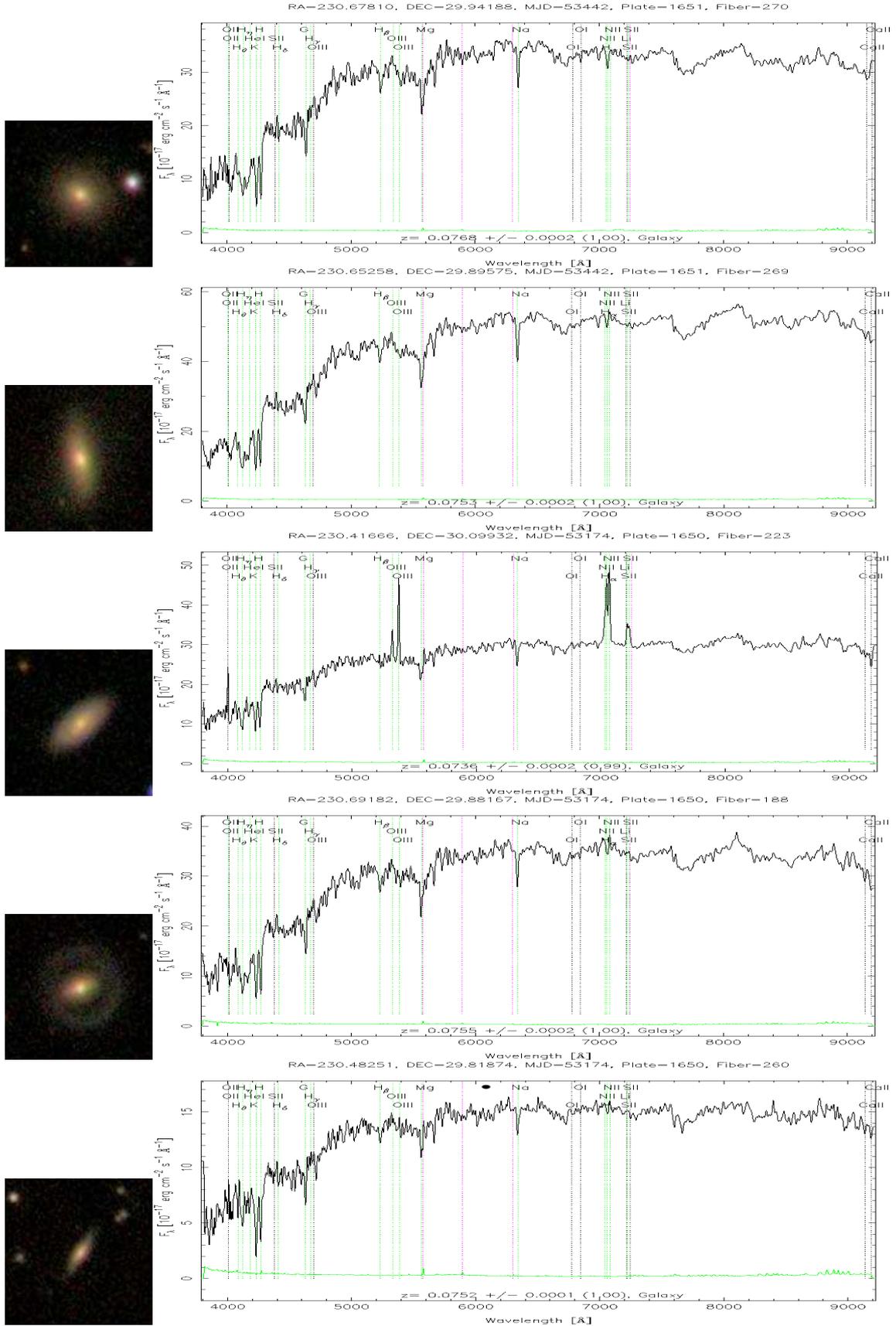


Figura H.3: Galaxias de la zona intercumular RA:230.56 y Dec:30.01 (de 6 a 10)

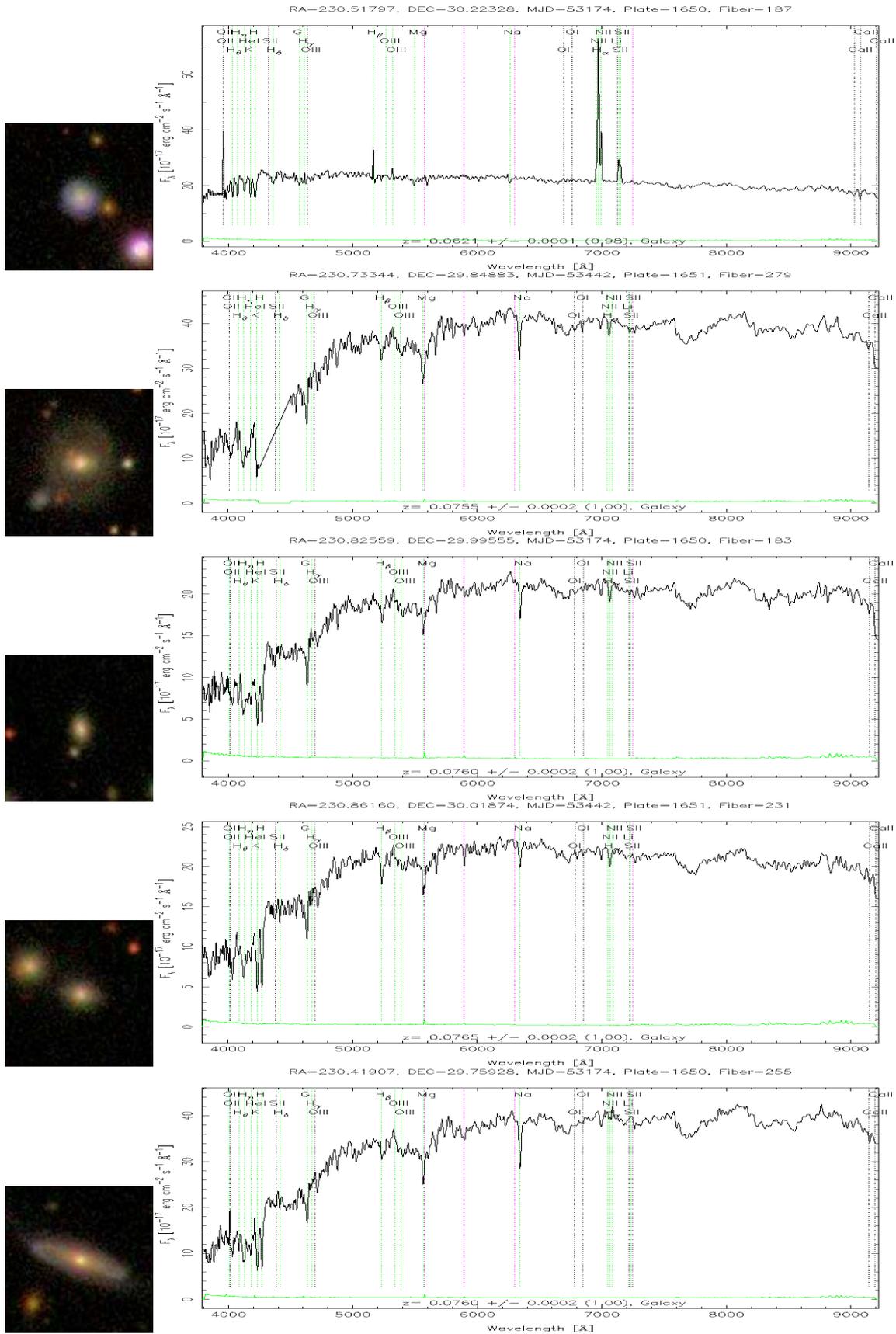


Figura H.4: Galaxias de la zona intercumular RA:230.56 y Dec:30.01 (de 11 a 15)

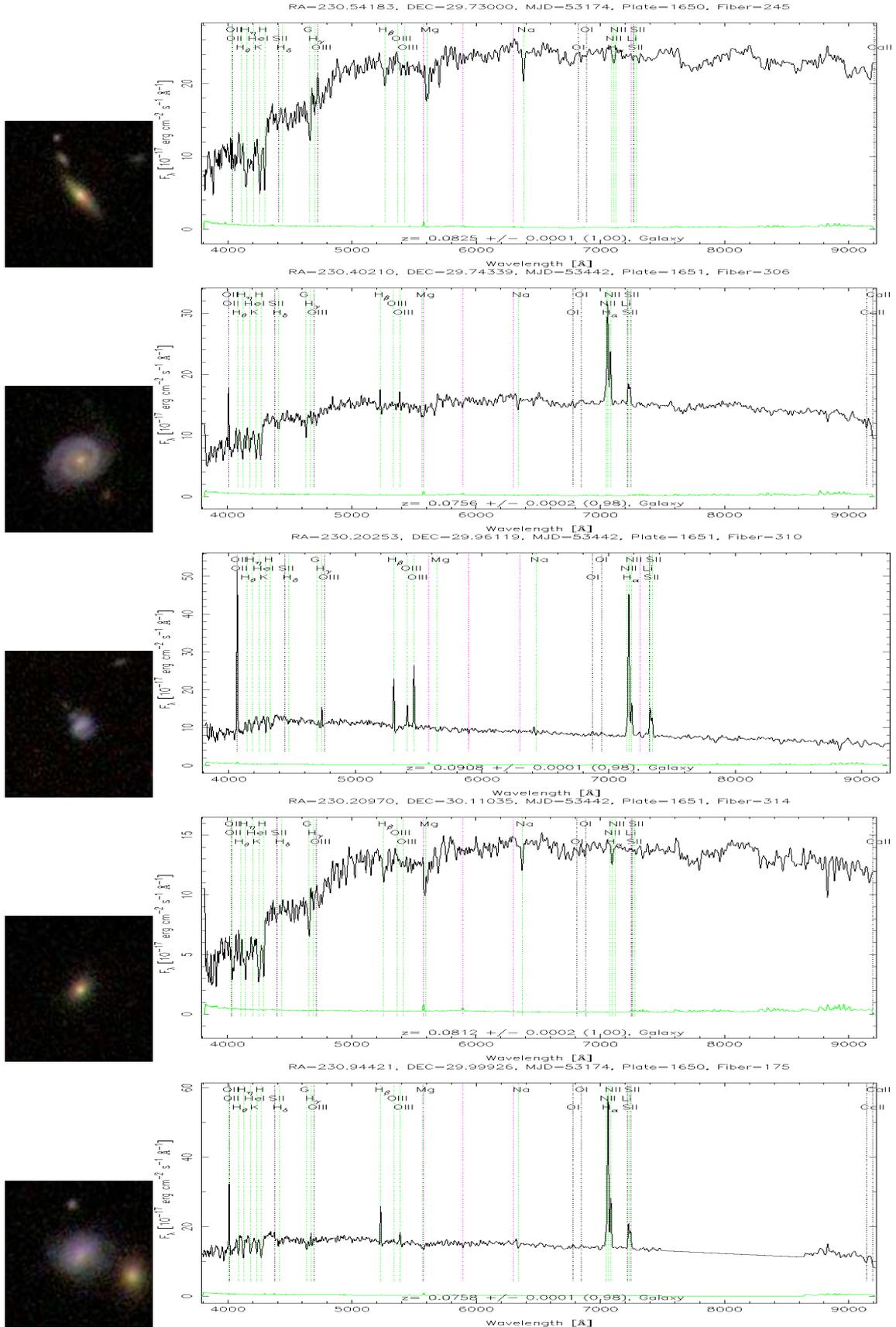


Figura H.5: Galaxias de la zona intercumular RA:230.56 y Dec:30.01 (de 16 a 20)

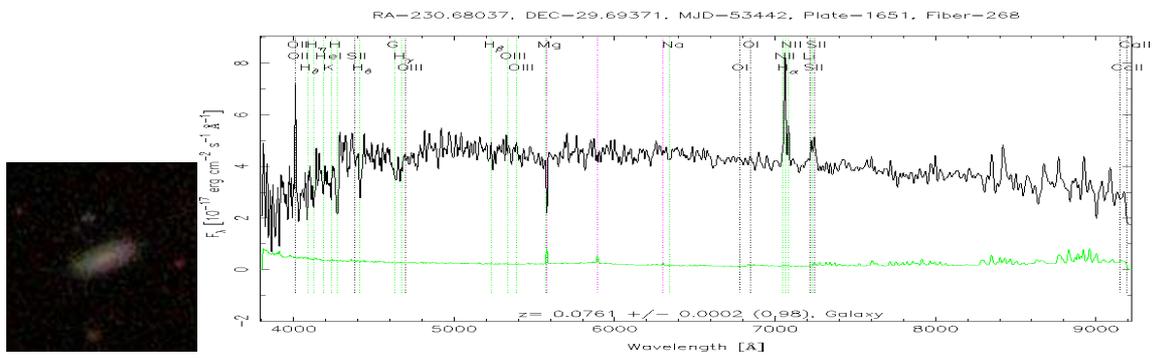


Figura H.6: Galaxia de la zona intercumular RA:230.56 y Dec:30.01 (21)

# I

## Zona Intercumular RA:230.56 Dec:28.51

Relación de galaxias y morfología de la zona intercumular RA:230.56 Dec:28.51

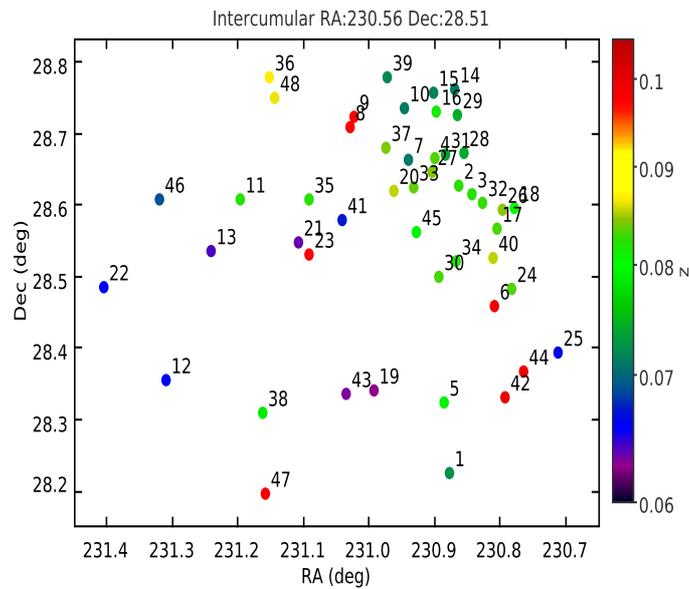


Figura I.1: Distribución espacial de las galaxias de la zona intercumular (RA:230.56 , Dec:28.51) en los primeros 20 minutos de arco desde el centro. Las etiquetas muestran el número de la galaxia en la tabla I y en las sucesivas figuras este apéndice.

En este apéndice se representan las galaxias que pueblan la zona intercumular centrada en RA:230.56 Dec:28.51 a  $0,06 \leq z \leq 0,10$  en un radio de 20 minutos de arco. Las imágenes de las galaxias que se presentan en las distintas figuras tienen un tamaño de  $0.3''/pix$  de la cámara usada por el SDSS. Véase la tabla I:

]]h]

N	RA (J2000) (deg)	Dec (J2000) (deg)	rad (' arco)	z	$z_{err}$	tipo (a)	Emisión (b)
1	230.87785	28.22438	19.651038	0.072305	8.3E-5	3	5
2	230.86213	28.62571	12.526662	0.082448	1.9E-4	1	5
3	230.84292	28.61255	12.989515	0.082213	1.63E-4	1	6
4	230.89956	28.66372	12.51073	0.083151	1.68E-4	1	6
5	230.88577	28.32234	14.536608	0.079228	1.51E-4	2	6
6	230.80806	28.45646	13.669484	0.099044	1.47E-4	2	6
7	230.93964	28.65997	11.00819	0.071096	8.7E-5	3	5
8	231.02868	28.70514	11.824061	0.097658	1.77E-4	3	5
9	231.02191	28.72028	12.775315	0.097626	1.5E-4	3	5
10	230.94499	28.73186	14.625003	0.071026	1.67E-4	3	5
11	231.19546	28.60592	9.169733	0.082037	1.52E-4	2	6
12	231.30984	28.35382	16.173588	0.066034	1.47E-4	2	6
13	231.23999	28.53314	9.589794	0.064028	1.71E-4	1	6
14	230.87006	28.75813	17.935949	0.07128	1.65E-4	2	6
15	230.90065	28.75517	16.935523	0.071489	1.71E-4	1	5
16	230.89824	28.72822	15.621099	0.081437	1.63E-4	2	6
17	230.80508	28.56464	13.831082	0.083029	1.69E-4	1	6
18	230.77831	28.59241	15.647792	0.080207	1.52E-4	1	6
19	230.99235	28.33792	10.924474	0.06252	1.55E-4	2	6
20	230.96249	28.61695	8.220838	0.08544	7.41E-4	3	5
21	231.10736	28.54621	3.309548	0.063525	7.7E-5	3	5
22	231.40489	28.48187	18.264559	0.065761	1.43E-4	1	6
23	231.09213	28.52886	2.037086	0.09806	1.39E-4	3	5
24	230.781438	28.481409	14.788729	0.083204	1.54E-4	2	6
25	230.711003	28.390406	19.759868	0.066434	1.77E-4	2	6
26	230.797182	28.590336	14.666256	0.084441	1.88E-4	2	6
27	230.903145	28.643094	11.492492	0.084088	1.92E-4	1	5
28	230.854154	28.670139	14.488938	0.073919	1.97E-4	3	5
29	230.865294	28.724232	16.443631	0.074245	1.51E-4	1	6
30	230.893079	28.498043	8.830437	0.08309	1.53E-4	3	5
31	230.882582	28.667284	13.282617	0.073517	9.6E-5	3	5
32	230.82741	28.600897	13.416317	0.082724	1.51E-4	2	6
33	230.931622	28.621135	9.498908	0.083646	1.52E-4	2	6
34	230.867817	28.519014	10.146652	0.081973	1.48E-4	1	6
35	231.091527	28.6055	5.966021	0.082134	1.72E-4	2	6
36	231.151605	28.775019	16.616687	0.086792	1.81E-4	1	5
37	230.973541	28.676508	10.97982	0.084193	1.47E-4	2	6
38	231.16235	28.306219	13.366837	0.07851	9.9E-5	3	5
39	230.972166	28.776461	16.643219	0.071859	1.53E-4	3	6
40	230.811047	28.524735	13.154629	0.085431	1.36E-4	3	5
41	231.040435	28.577548	4.182014	0.067141	1.8E-4	3	5
42	230.79185	28.328706	17.847897	0.099728	1.77E-4	3	5
43	231.0347	28.333599	10.667925	0.063125	1.71E-4	3	5
44	230.763582	28.366174	17.861889	0.099193	1.65E-4	1	6
45	230.92782	28.56029	7.592717	0.079154	1.73E-4	1	6
46	231.319229	28.606531	14.838385	0.068891	1.82E-4	3	5
47	231.157083	28.195263	19.567622	0.098116	1.42E-4	3	5
48	231.144545	28.746469	14.870388	0.086401	1.44E-4	1	6

Tabla I.1: Tabla de las galaxias de la región intercumular Ra:230.56 y Dec:28.51. Notas: (a) tipo morfológico de las galaxias, 1 para las E, 2 para las S0-S6 y 3 para las galaxias Espirales (b) presencia de líneas de emisión en el espectro de las galaxias, 5 para las que presentan líneas de emisión y 6 para las que no presentan líneas de emisión.

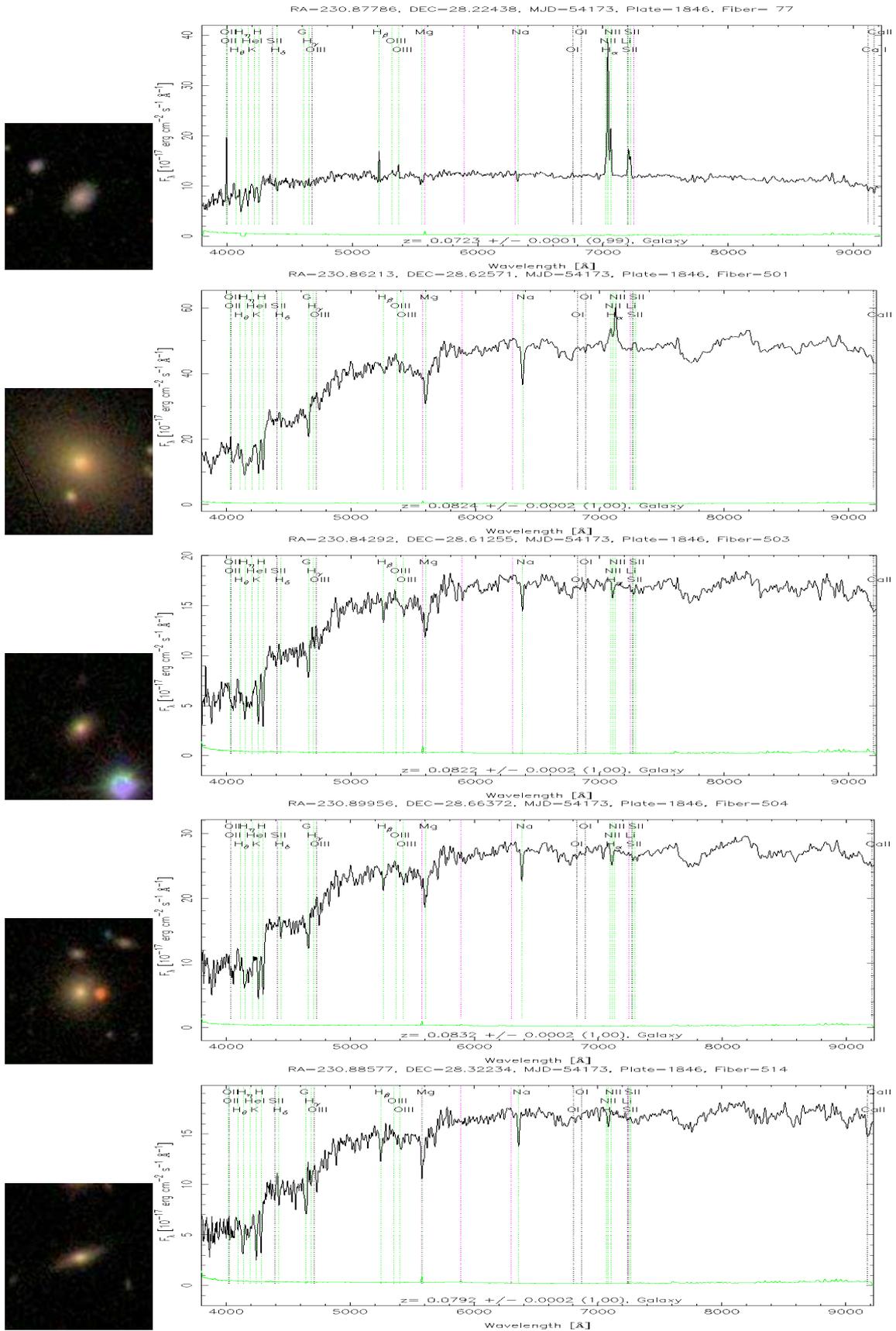


Figura I.2: Galaxias de la zona intercumular RA:230.56 y Dec:28.51 (de 1 a 5)

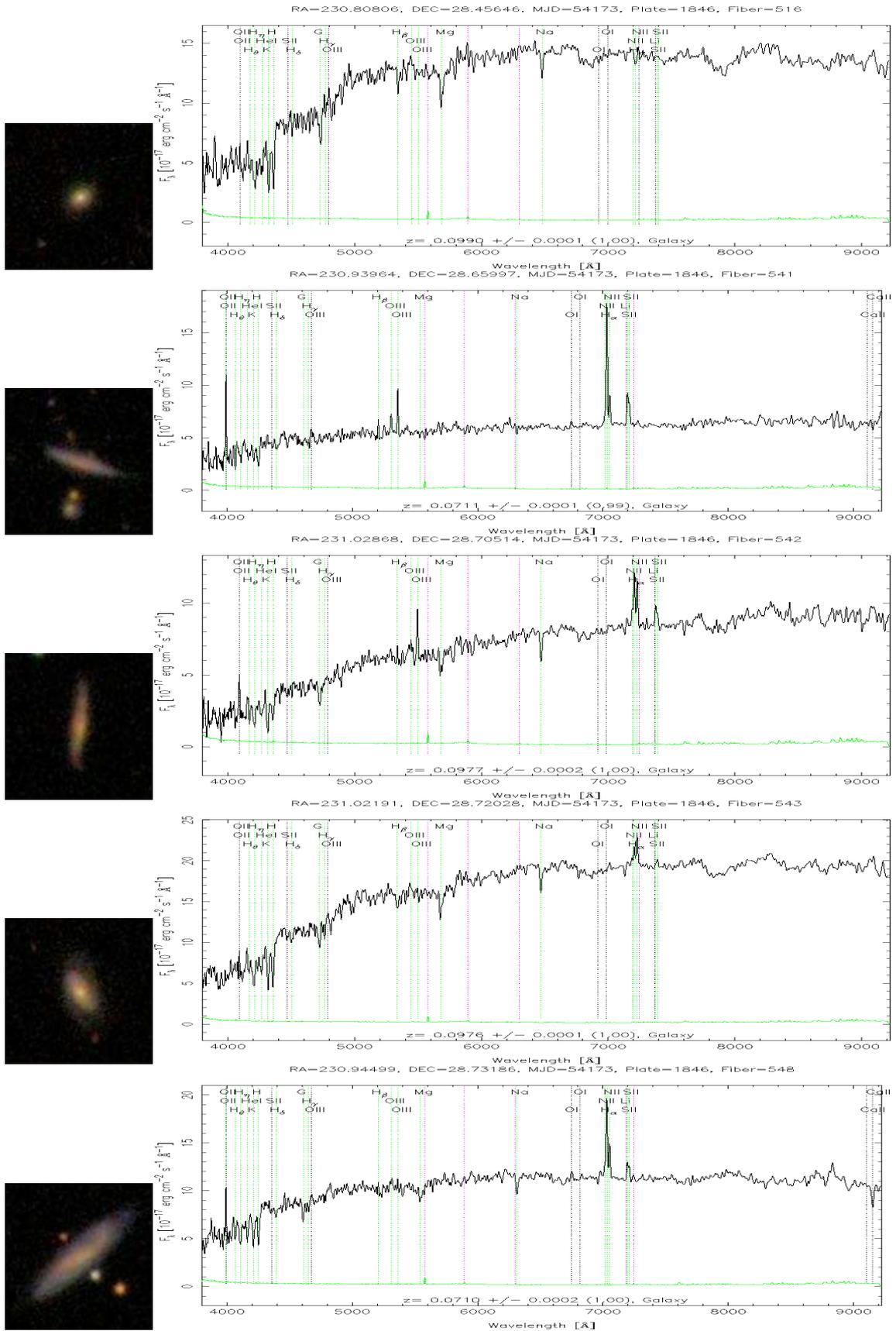


Figura I.3: Galaxias de la zona intercumular RA:230.56 y Dec:28.51 (de 6 a 10)

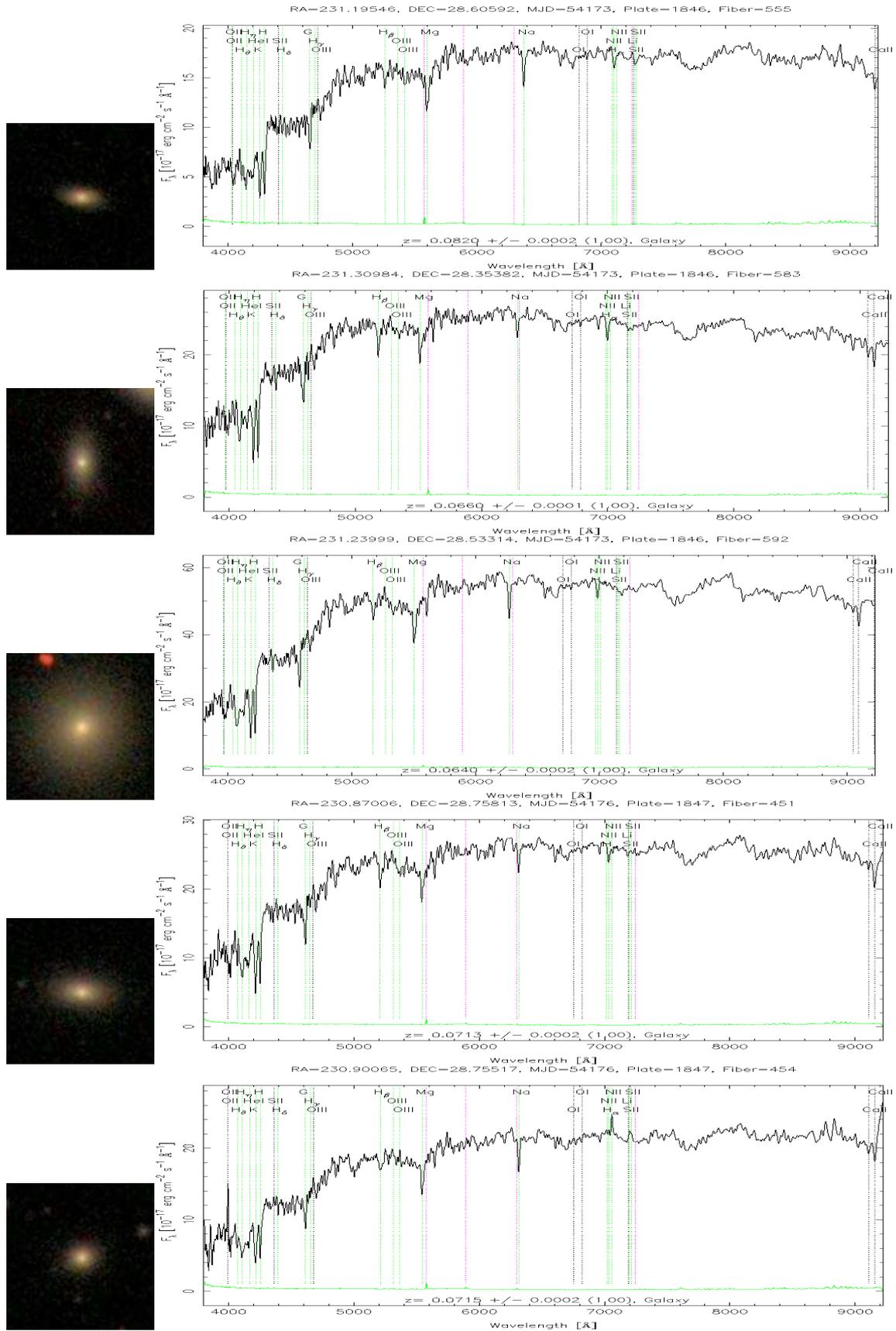


Figura I.4: Galaxias de la zona intercumular RA:230.56 y Dec:28.51 (de 11 a 15)

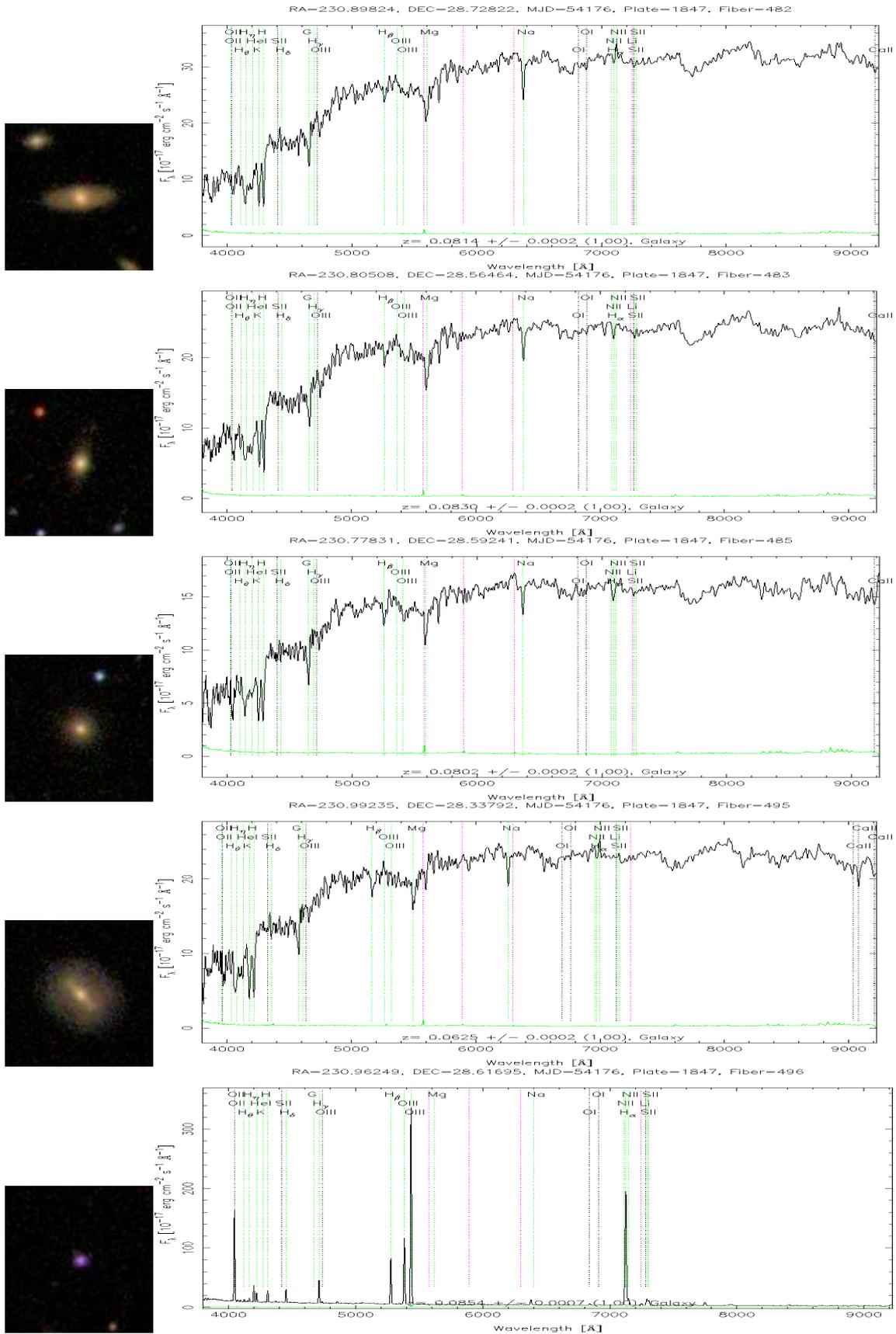


Figura I.5: Galaxias de la zona intercumular RA:230.56 y Dec:28.51 (de 16 a 20)

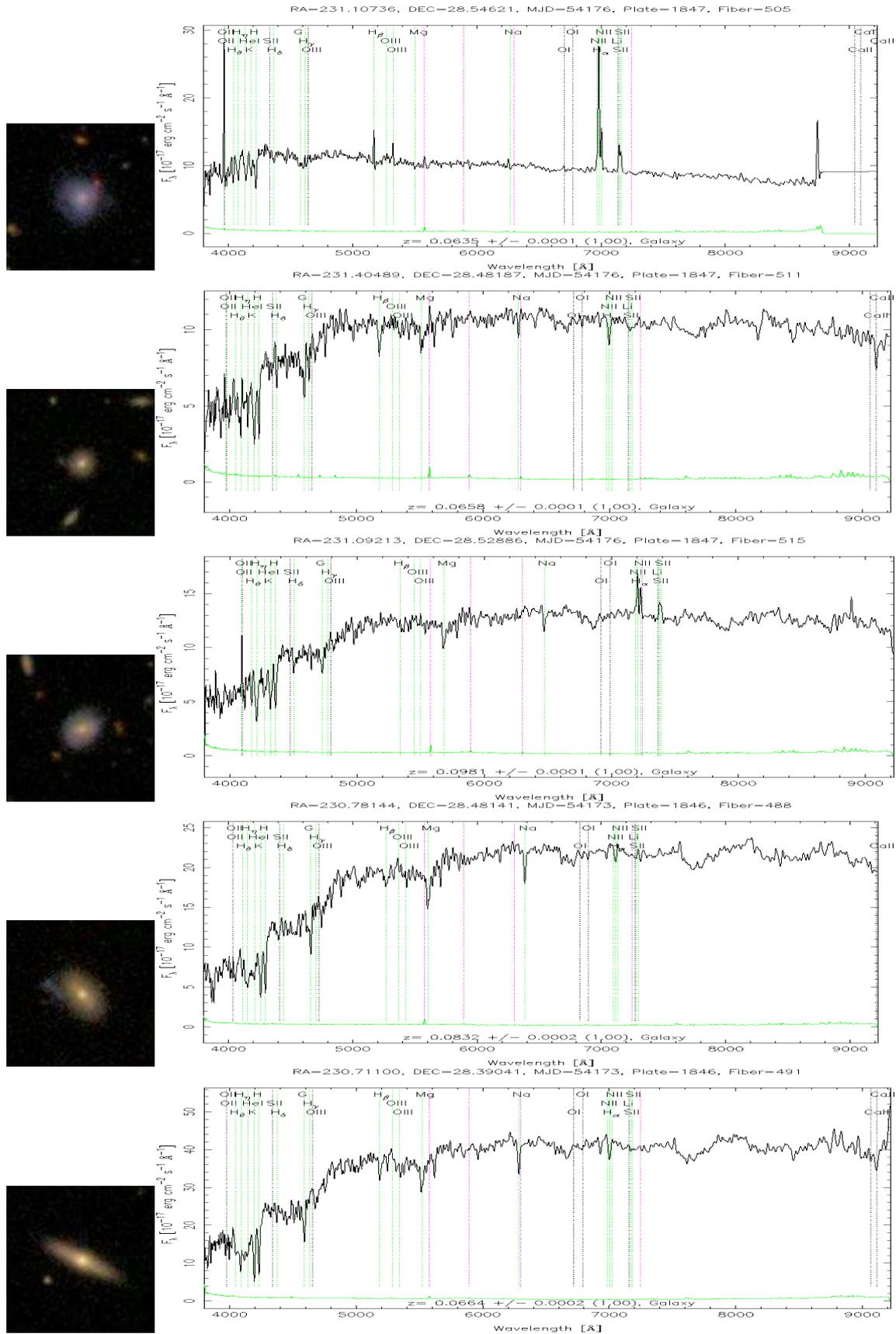


Figura I.6: Galaxias de la zona intercumular RA:230.56 y Dec:28.51 (de 21 a 25)

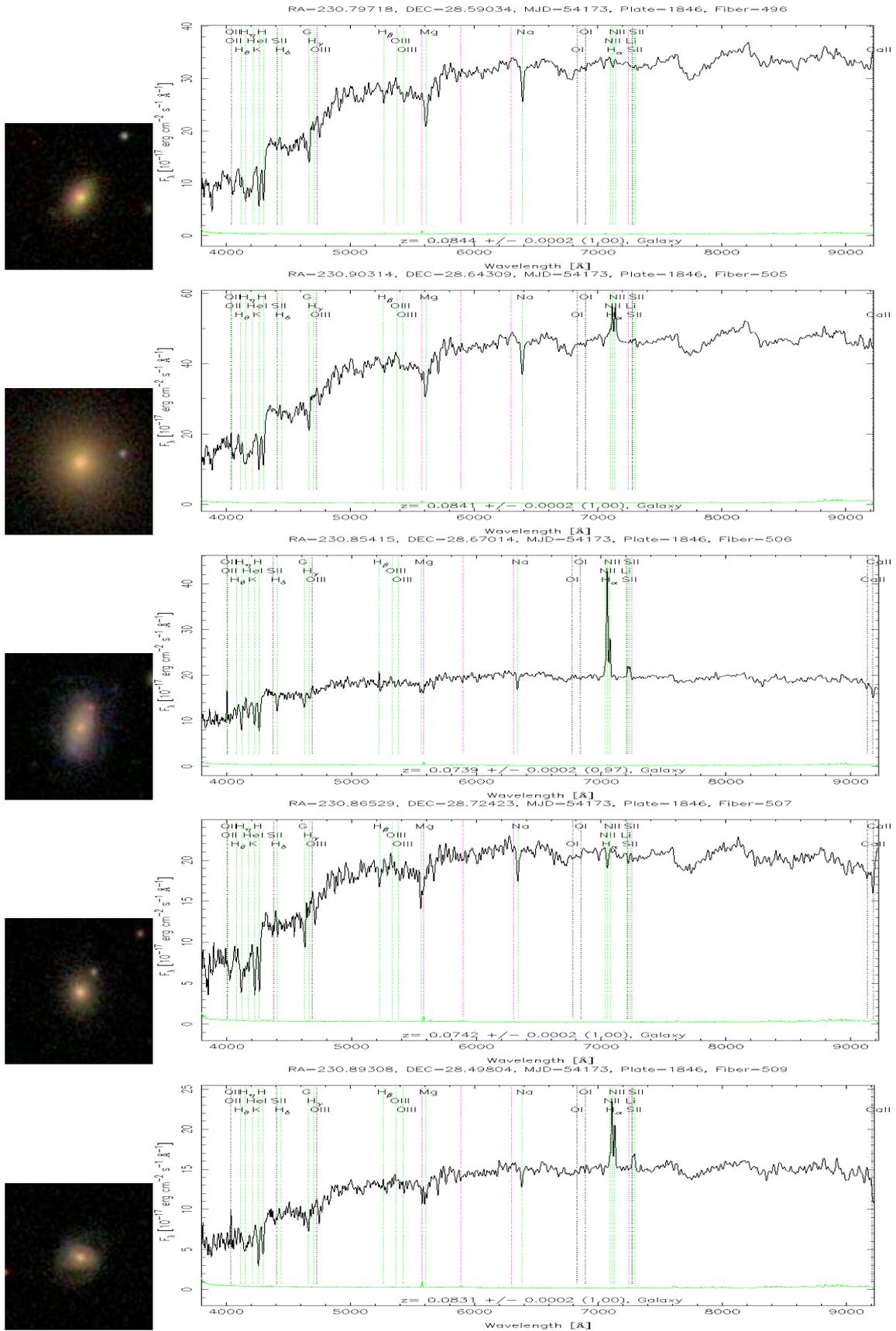


Figura I.7: Galaxias de la zona intercumular RA:230.56 y Dec:28.51 (de 26 a 30)

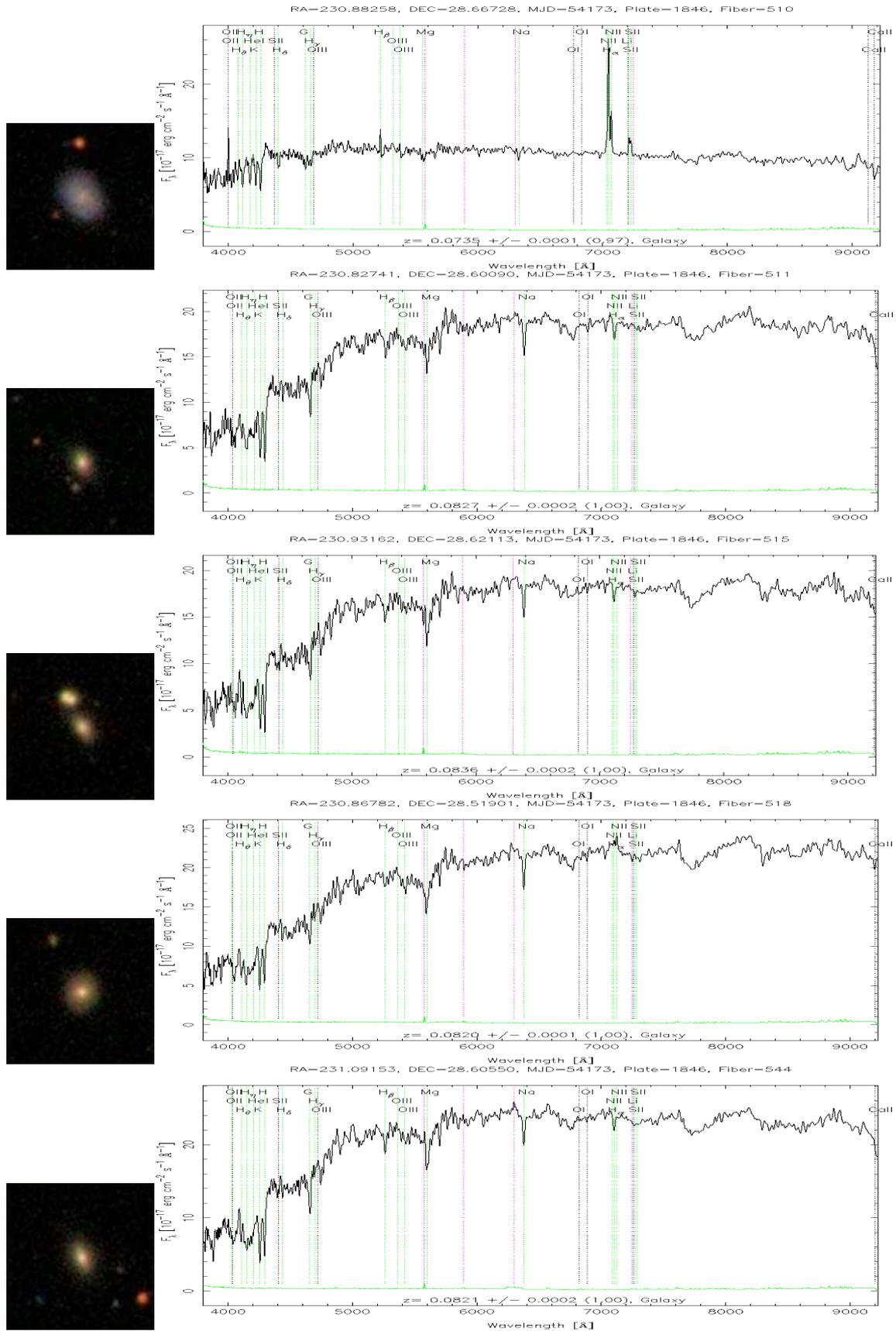


Figura I.8: Galaxias de la zona intercumular RA:230.56 y Dec:28.51 (de 31 a 35)

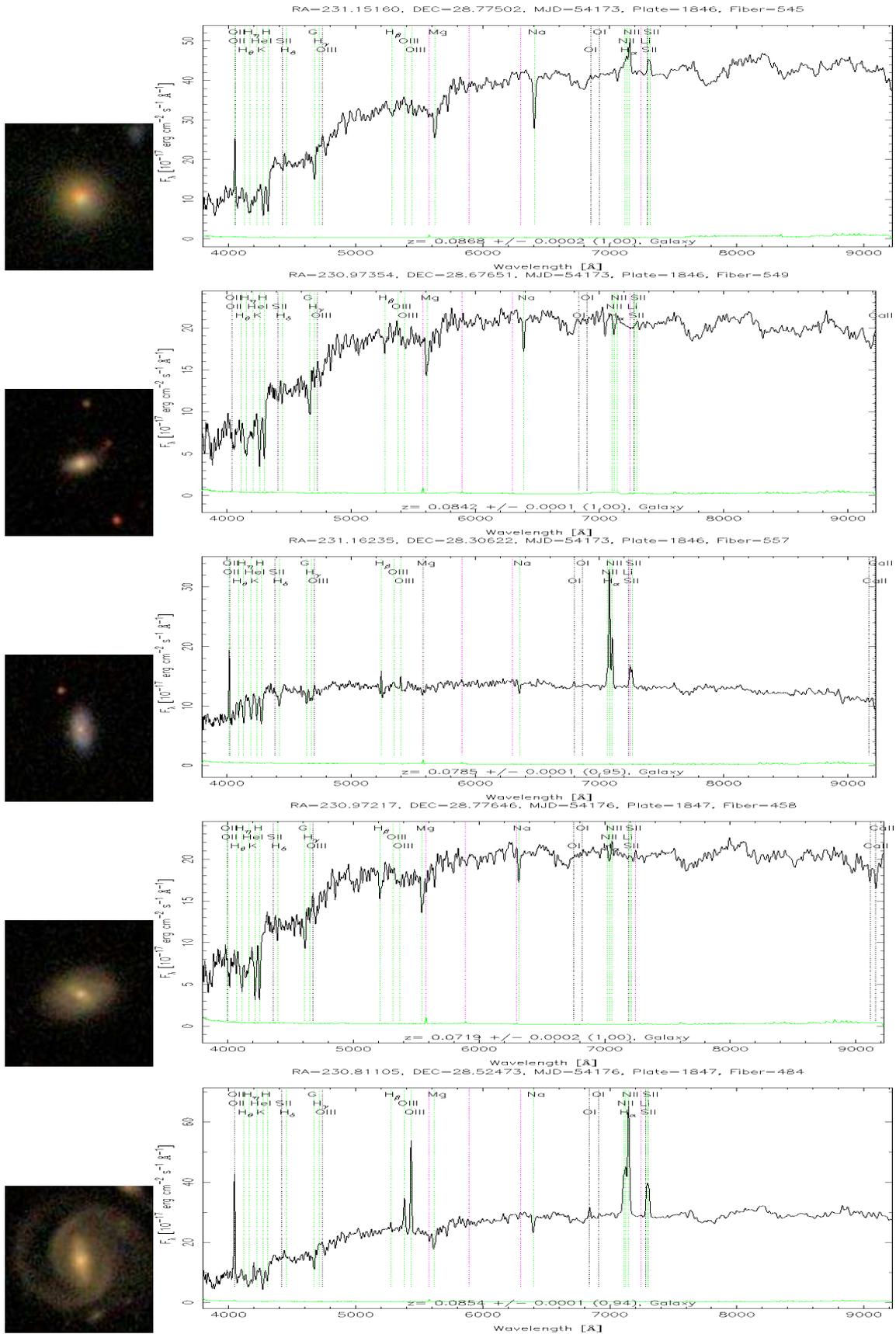


Figura I.9: Galaxias de la zona intercumular RA:230.56 y Dec:28.51 (de 36 a 40)

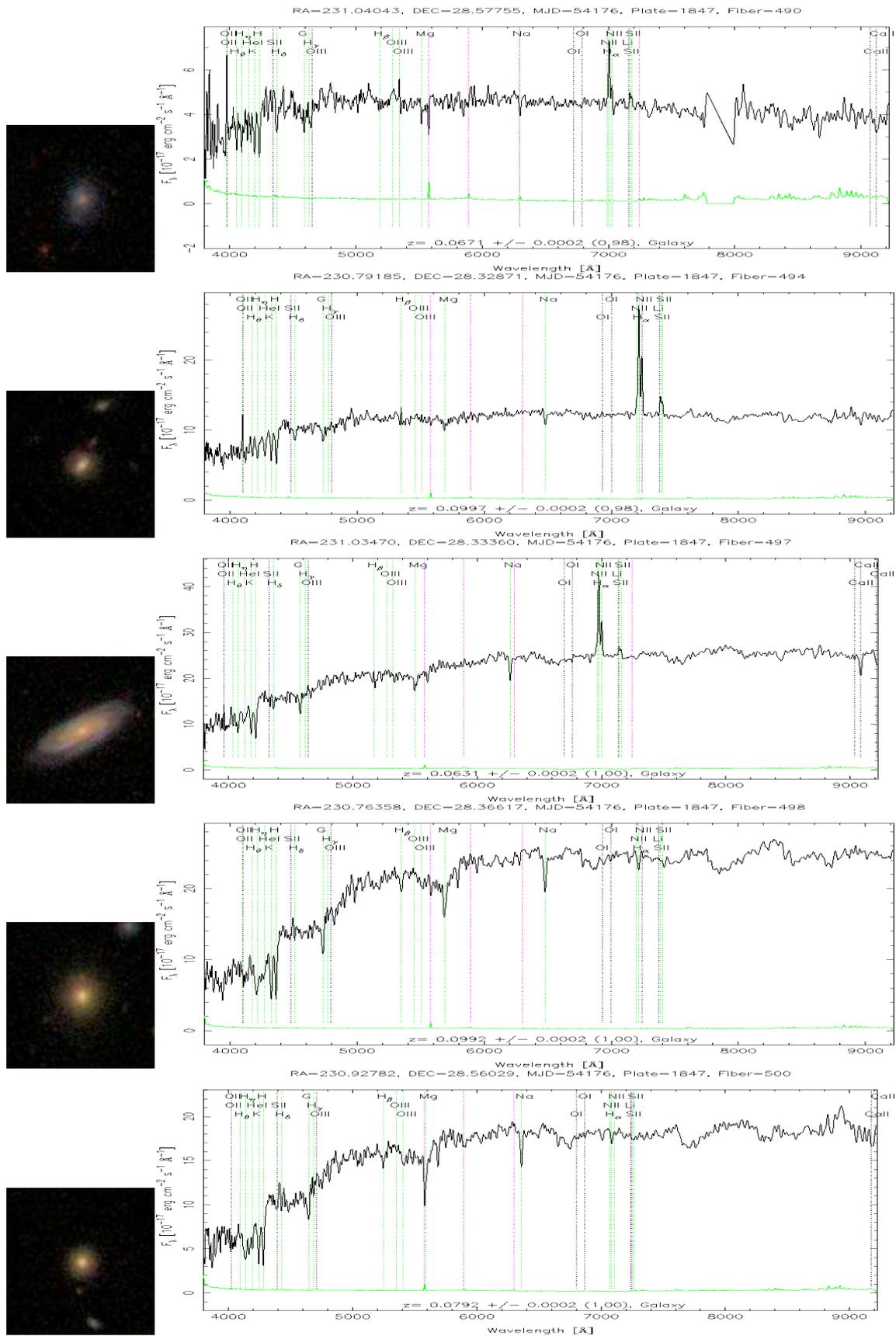


Figura I.10: Galaxias de la zona intercumular RA:230.56 y Dec:28.51 (de 41 a 45)

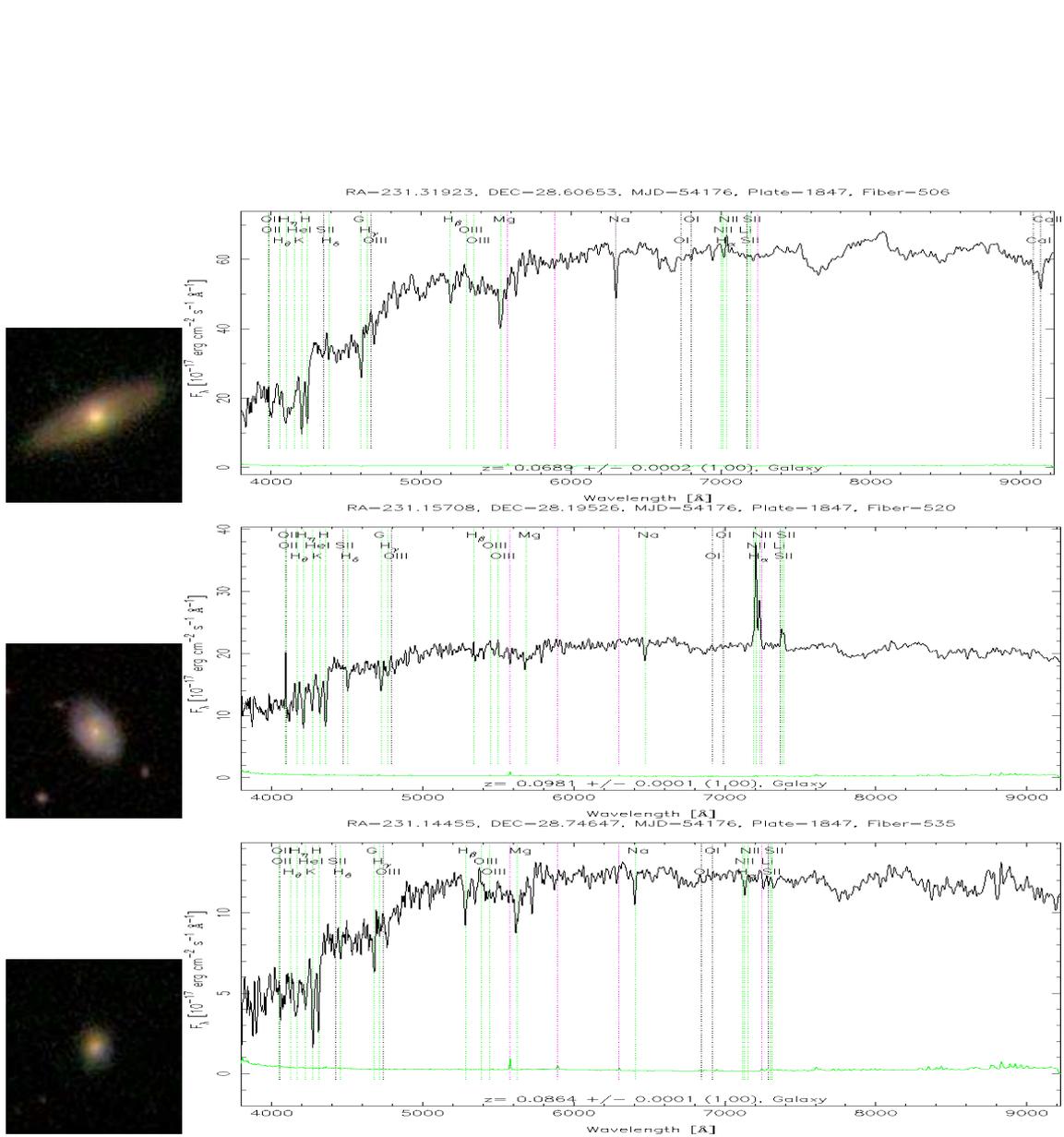


Figura I.11: Galaxias de la zona intercumular RA:230.56 y Dec:28.51 (de 46 a 48)

# J

## Zona Intercumular RA:228.56 Dec:28.01

### J.1. A bajo desplazamiento al rojo $0.06 \leq z \leq 0.10$

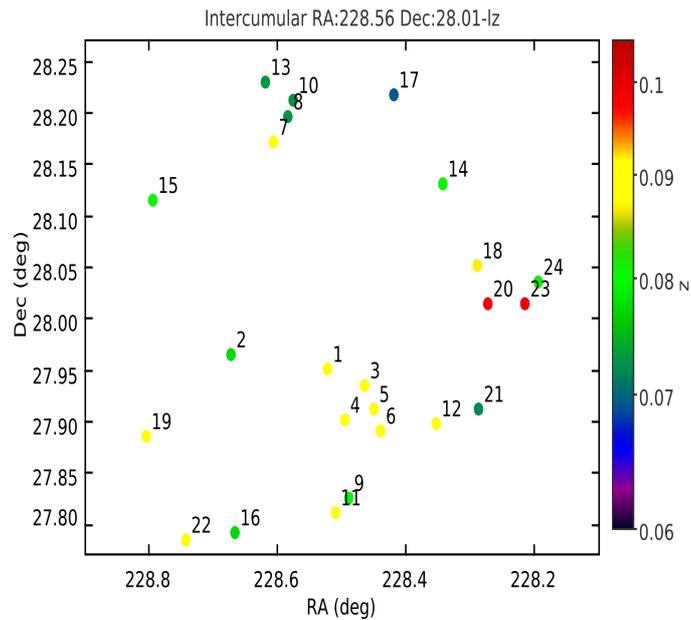


Figura J.1: Distribución espacial de las galaxias de la zona intercumular (RA:228.56 Dec:28.01)–lz, es decir, que están a un desplazamiento al rojo comprendido en el rango  $0.06 \leq z \leq 0.10$  en los primeros 20 minutos de arco desde el centro. Las etiquetas muestran el número de la galaxia en la tabla J.1 y en las sucesivas figuras este apéndice.

En este apéndice se representan las galaxias que pueblan zona intercumular centrada en RA:228.56.06 Dec:28.01, están a un desplazamiento al rojo entre  $0.06 \leq z \leq 0.10$  en un radio

de 20 minutos de arco desde el centro. Las imágenes de las galaxias que se presentan en las distintas figuras tienen un tamaño de  $0.3''/pix$  de la cámara usada por el SDSS. Véase la tabla J.1:

N	RA (J2000) (deg)	Dec (J2000) (deg)	rad (' arco)	z	$z_{err}$	tipo (a)	Emisión (b)
1	228.52145	27.94887	4.198233	0.089201	1.37E-4	3	5
2	228.67139	27.96349	6.528315	0.077345	1.45E-4	2	6
3	228.46367	27.93362	6.859952	0.089962	1.62E-4	2	6
4	228.49516	27.90053	7.412853	0.090104	4.8E-5	3	5
5	228.44893	27.91118	8.354867	0.090669	4.5E-5	3	5
6	228.43983	27.88947	9.636678	0.090851	1.43E-4	3	5
7	228.60587	28.17	9.902285	0.089026	1.53E-4	3	5
8	228.58286	28.19553	11.197357	0.072582	1.6E-4	3	5
9	228.48787	27.82301	11.853238	0.079796	8.5E-5	3	5
10	228.57499	28.21125	12.101031	0.072619	7.9E-5	3	5
11	228.50888	27.80925	12.346195	0.088558	5.2E-5	3	5
12	228.35305	27.89589	12.929826	0.090926	5.4E-5	3	5
13	228.61757	28.22856	13.462823	0.07272	7.4E-5	3	5
14	228.34156	28.13033	13.633347	0.080594	1.57E-4	3	5
15	228.79334	28.11296	13.812956	0.080661	4.2E-5	3	5
16	228.66607	27.79066	14.311898	0.077225	7.5E-5	3	5
17	228.41838	28.21536	14.421948	0.069426	1.62E-4	2	6
18	228.28837	28.05063	14.591137	0.091848	1.0E-4	3	5
19	228.80379	27.88435	14.960043	0.088493	7.24E-4	3	5
20	228.27181	28.01347	15.267153	0.098805	6.0E-5	3	5
21	228.28748	27.91125	15.610636	0.071971	1.67E-4	3	5
22	228.74294	27.78325	16.709357	0.091479	1.57E-4	2	6
23	228.21431	28.01358	18.312819	0.099105	1.26E-4	3	5
24	228.19477	28.0345	19.400505	0.080488	1.62E-4	3	5

Tabla J.1: Tabla de las galaxias de la región intercumular Ra:228.56 y Dec:28.01 a bajo desplazamiento al rojo. Notas: (a) tipo morfológico de las galaxias, 1 para las E , 2 para las S0-S6 y 3 para las galaxias Espirales (b) presencia de líneas de emisión en el espectro de las galaxias, 5 para las que presentan líneas de emisión y 6 para las que no presentan líneas de emisión.

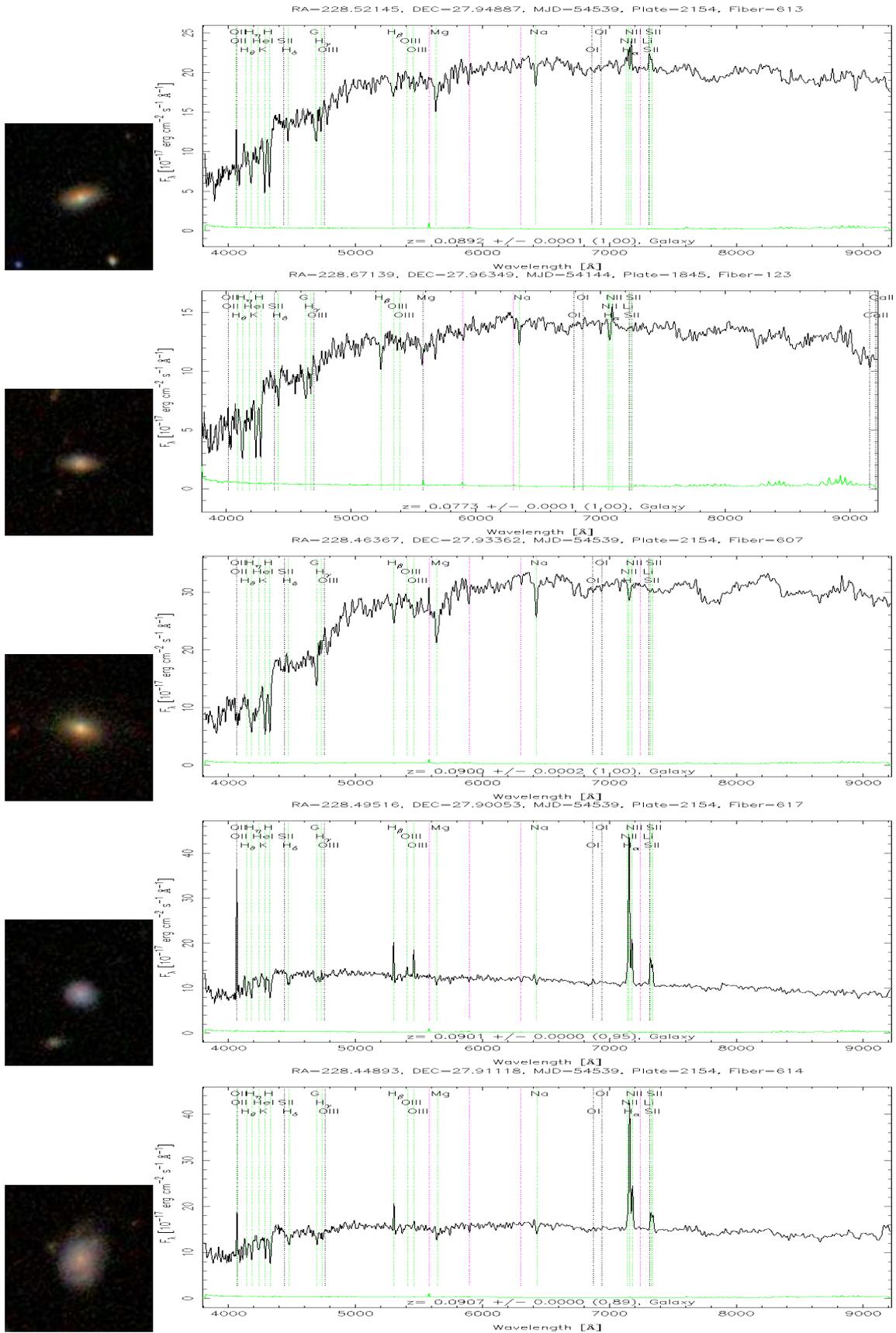


Figura J.2: Galaxias de la zona intercumular RA:228.56 y Dec:28.01  $-lz$  (de 1 a 5)

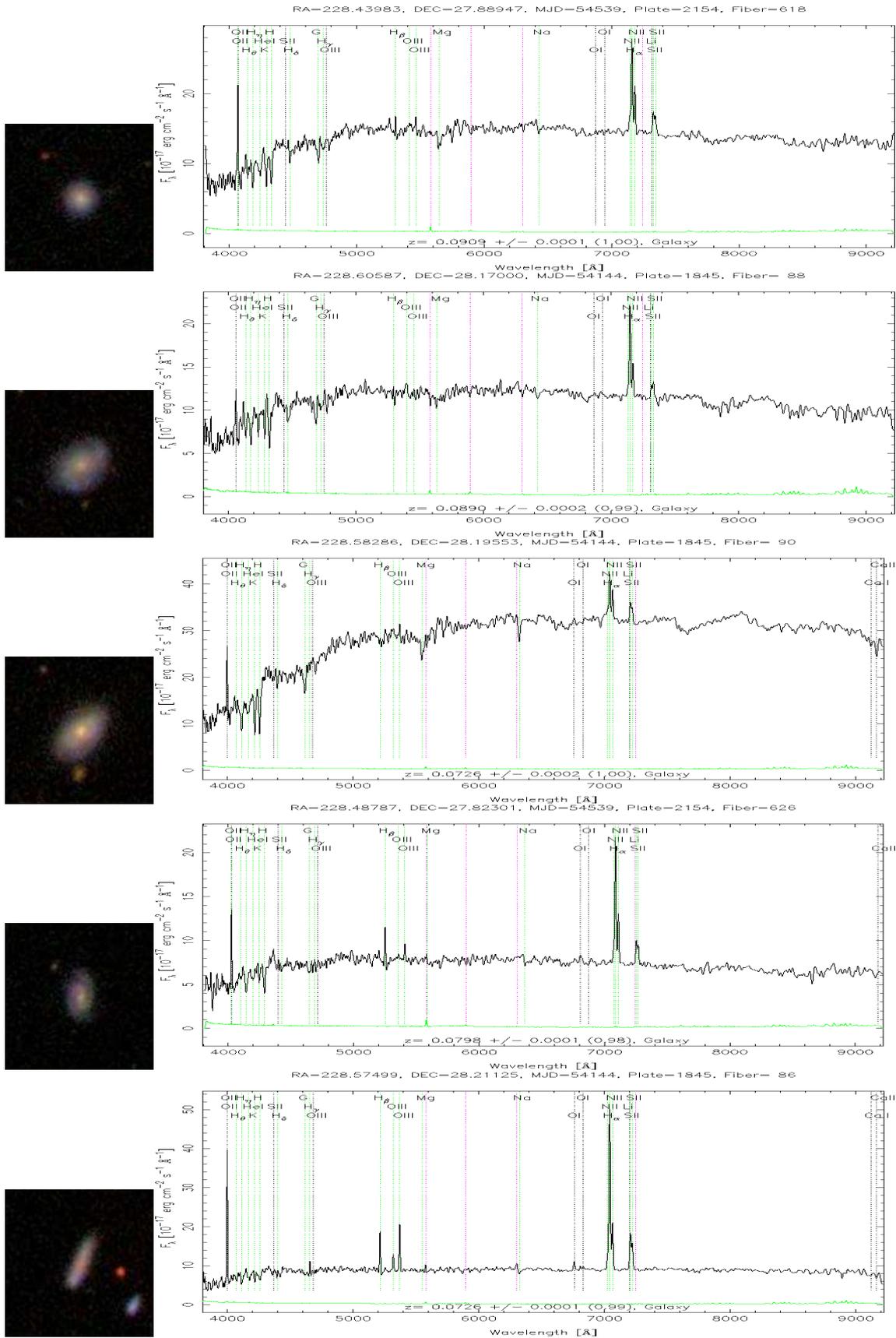


Figura J.3: Galaxias de la zona intercumular RA:228.56 y Dec:28.01 –lz (de 6 a 10)

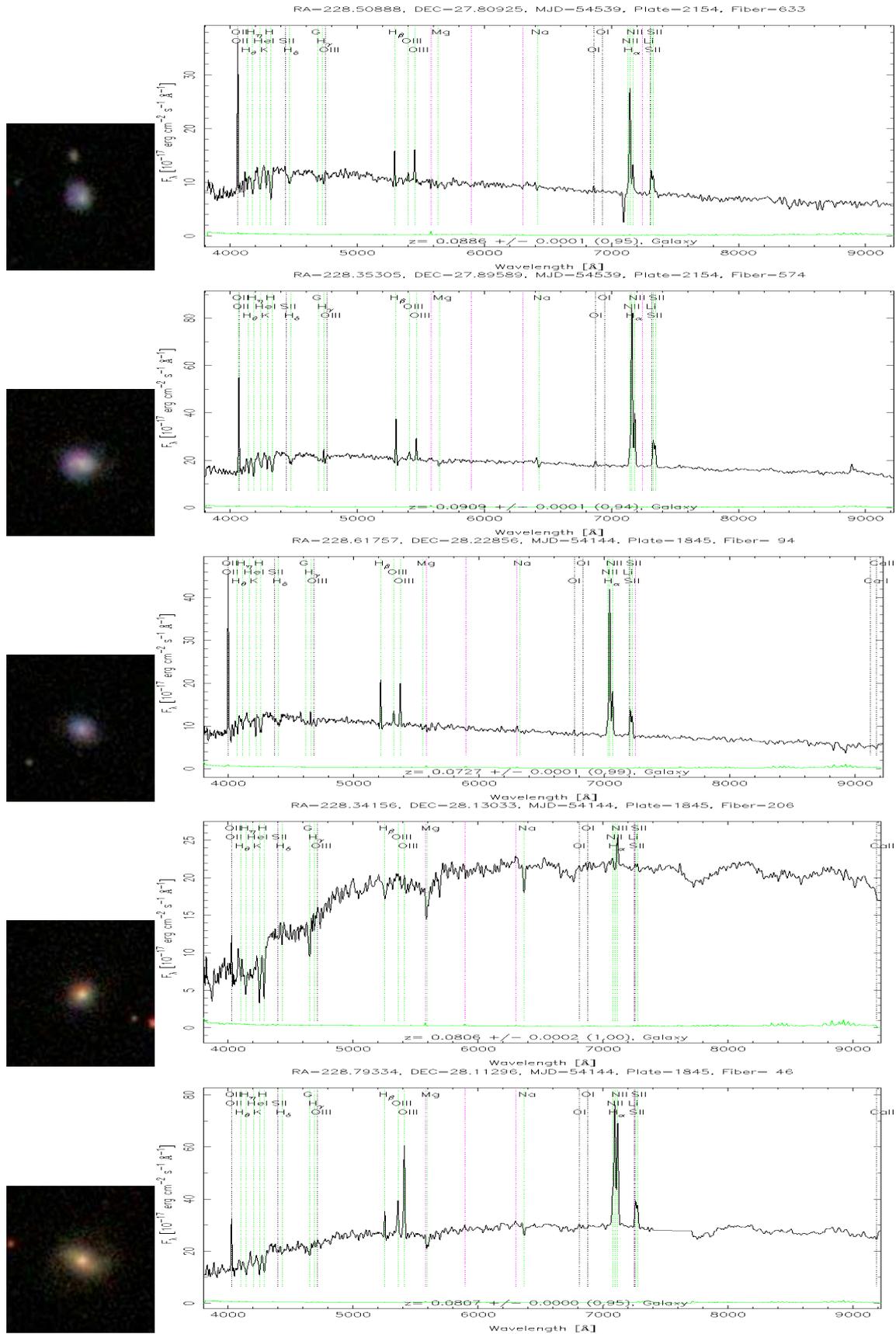


Figura J.4: Galaxias de la zona intercumular RA:228.56 y Dec:28.01  $-lz$  (de 11 a 15)

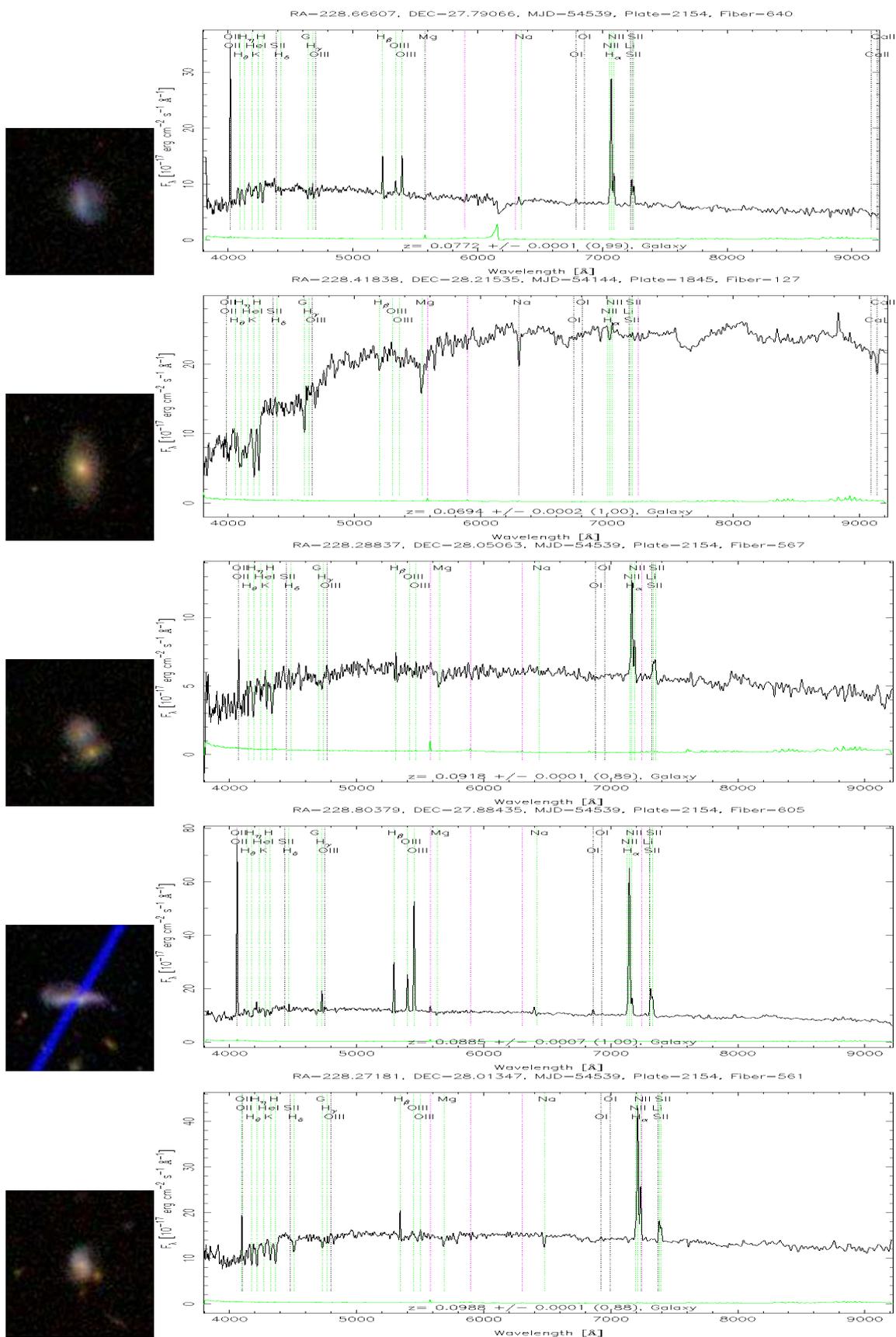


Figura J.5: Galaxias de la zona intercumular RA:228.56 y Dec:28.01  $-lz$  (de 16 a 20)

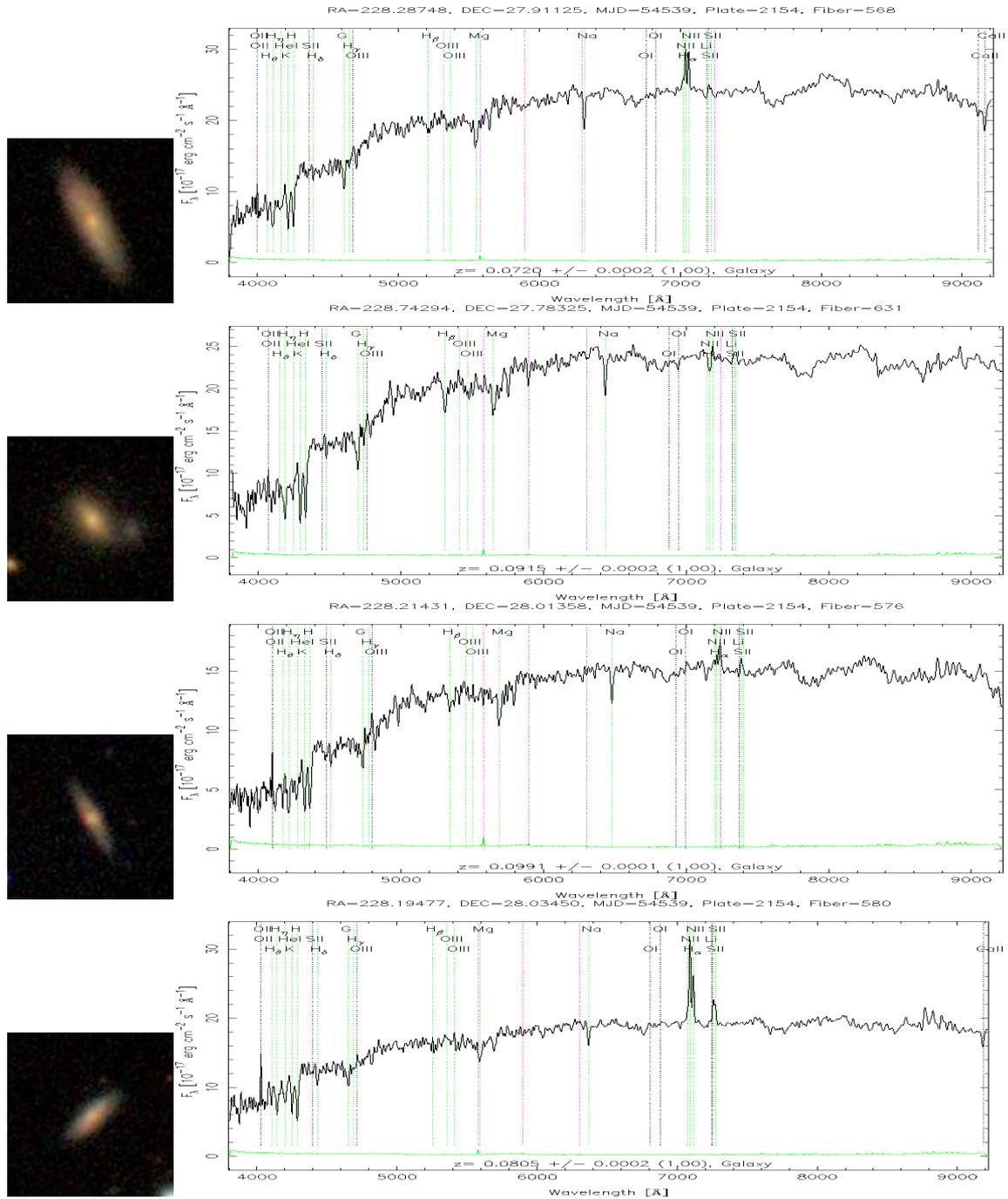


Figura J.6: Galaxias de la zona intercumular RA:228.56 y Dec:28.01  $-lz$  (de 21 a 24)

### J.2. A alto desplazamiento al rojo $0.10 \leq z \leq 0.12$

En este apéndice van a estar representadas aquellas galaxias que poblando el centro de la zona intercumular centrada en RA:228.56 Dec:28.01, medidas a un desplazamiento al rojo de  $0.10 \leq z \leq 0.12$  en un radio de  $20'$  de arco desde el centro. Las imágenes de las galaxias que se presentan en las distintas figuras tienen un tamaño de  $0.3''/pix$  de la cámara usada por el SDSS. Las coordenadas, la distancia al centro del grupo y la su clasificación morfológica se representan en la tabla J.2:

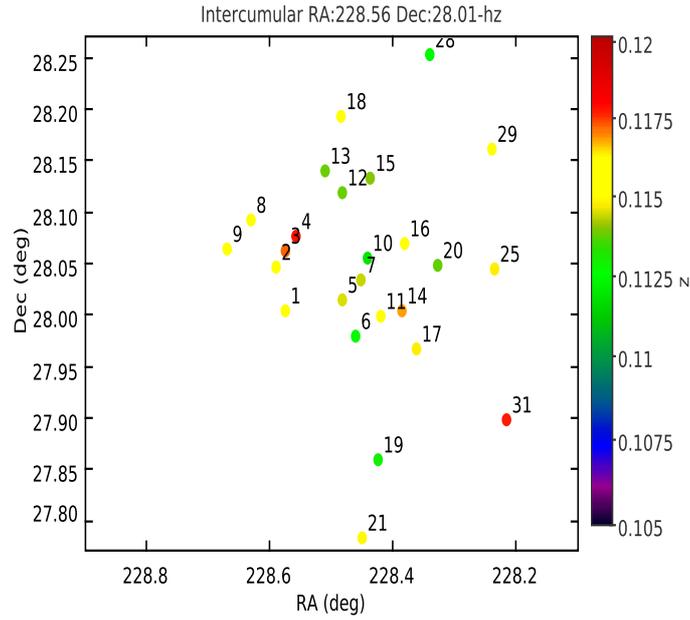


Figura J.7: Distribución espacial de las galaxias de la zona intercumular (RA:228.56 Dec:28.01)– $hz$ , es decir, que están a un desplazamiento al rojo comprendido en el rango  $0.06 \leq z \leq 0.10$  en los primeros 20 minutos de arco desde el centro. Las etiquetas muestran el número de la galaxia en la tabla J.1 y en las sucesivas figuras este apéndice.

N	RA (J2000) (deg)	Dec (J2000) (deg)	rad (' arco)	z	$z_{err}$	tipo (a)	Emisión (b)
1	228.57475	28.00196	0.918282	0.11565	1.63E-4	2	5
2	228.58861	28.04476	2.577947	0.11626	1.46E-4	2	6
3	228.57335	28.06004	3.084521	0.117248	1.49E-4	1	6
4	228.55781	28.07516	3.91132	0.117864	1.78E-4	2	6
5	228.48123	28.01316	4.176844	0.114512	1.59E-4	2	6
6	228.45951	27.97692	5.681906	0.112694	2.03E-4	1	5
7	228.45185	28.03297	5.891766	0.114447	1.58E-4	2	6
8	228.63094	28.09125	6.154368	0.115862	1.47E-4	1	6
9	228.66893	28.06302	6.587809	0.115932	9.8E-5	3	5
10	228.43993	28.05356	6.875207	0.111873	1.36E-4	3	5
11	228.41918	27.99661	7.503108	0.115235	1.69E-4	1	6
12	228.48222	28.11714	7.634338	0.113796	9.6E-5	3	5
13	228.50877	28.13903	8.203114	0.113838	1.98E-4	3	5
14	228.38535	28.00195	9.264493	0.116896	1.56E-4	1	6
15	228.43727	28.13128	9.75553	0.11401	1.55E-4	3	5
16	228.38108	28.06699	10.073344	0.116252	1.65E-4	2	6
17	228.36198	27.96503	10.833091	0.114759	1.45E-4	2	6
18	228.48475	28.19084	11.558276	0.115544	1.53E-4	3	5
19	228.4237	27.85739	11.663899	0.112955	1.43E-4	1	6
20	228.32622	28.0469	12.578044	0.113757	4.8E-5	3	5
21	228.44855	27.78095	14.959877	0.116332	1.48E-4	2	6
22	228.55829	27.74809	15.714862	0.119915	1.49E-4	2	6
23	228.45545	27.75307	16.382664	0.117265	1.3E-4	3	5
24	228.59543	28.29469	17.183924	0.114231	1.47E-4	3	5
25	228.23352	28.0424	17.400604	0.114783	1.0E-4	3	5
26	228.71979	28.27472	17.992923	0.112461	1.42E-4	3	6
27	228.4425	27.72687	18.09496	0.11493	1.11E-4	3	5
28	228.339	28.25057	18.576553	0.11244	1.35E-4	2	6
29	228.2383	28.16043	19.273215	0.115514	1.44E-4	2	6
30	228.3343	27.75506	19.423119	0.111996	1.55E-4	1	6
31	228.21478	27.89692	19.514028	0.117711	1.57E-4	3	5

Tabla J.2: Tabla de las galaxias de la región intercumular Ra:228.56 y Dec:28.01 con alto desplazamiento al rojo. Notas: (a) tipo morfológico de las galaxias, 1 para las E , 2 para las S0-S6 y 3 para las galaxias Espirales (b) presencia de líneas de emisión en el espectro de las galaxias, 5 para las que presentan líneas de emisión y 6 para las que no presentan líneas de emisión.

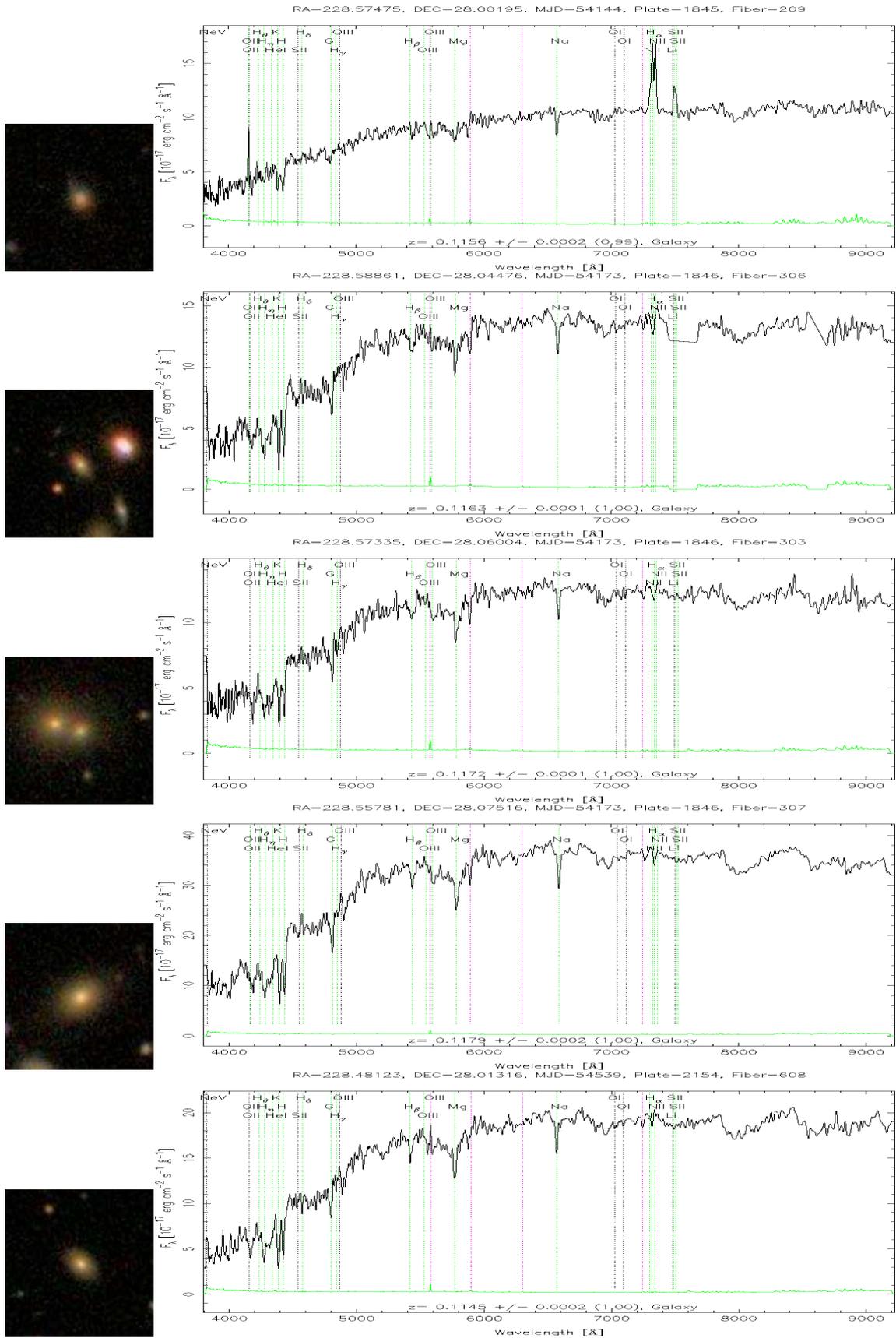


Figura J.8: Galaxias de la zona intercumular RA:228.56 y Dec:28.01 –hz (de 1 a 5)

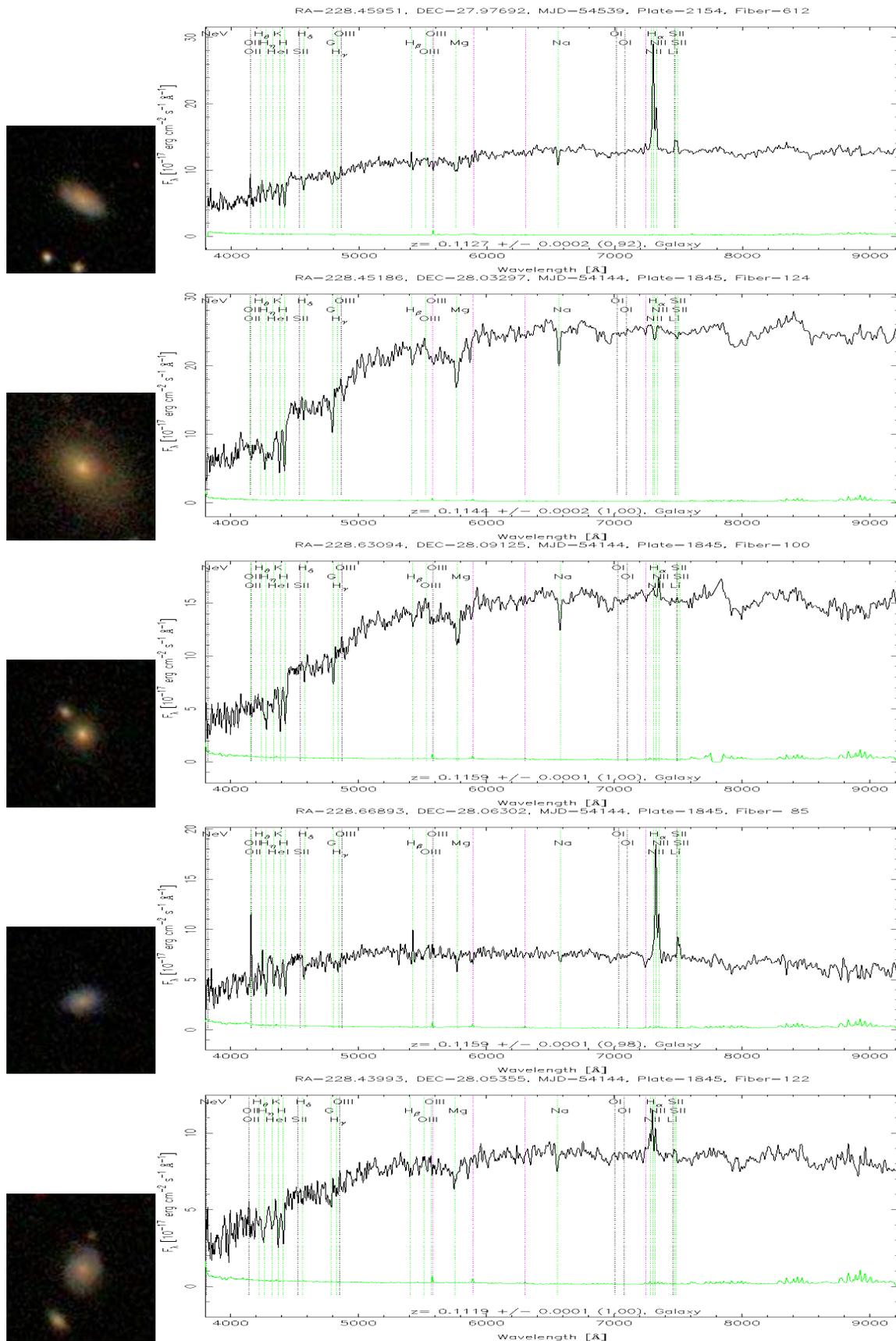


Figura J.9: Galaxias de la zona intercumular RA:228.56 y Dec:28.01  $-hz$  (de 6 a 10)

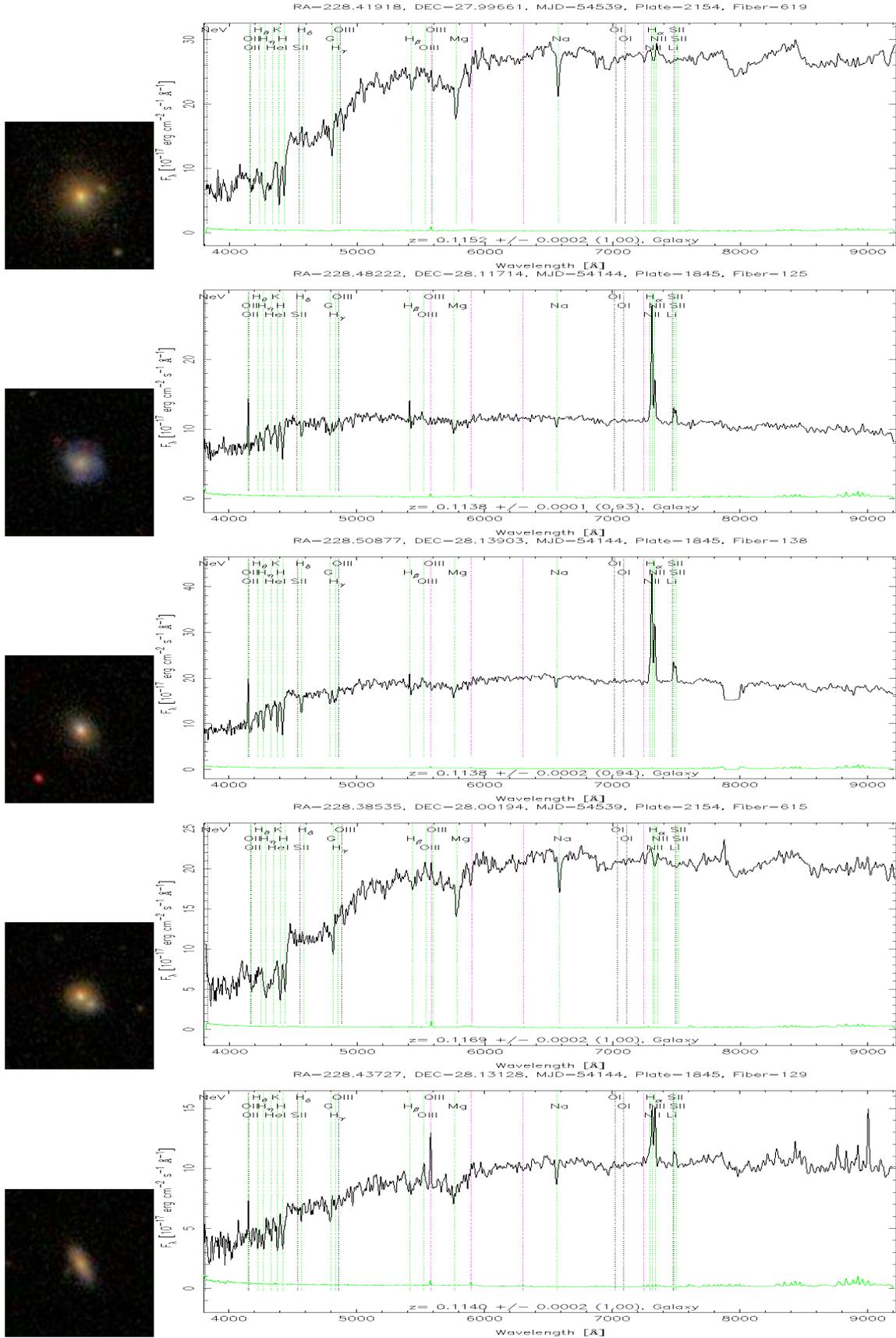


Figura J.10: Galaxias de la zona intercumular RA:228.56 y Dec:28.01 –hz (de 11 a 15)

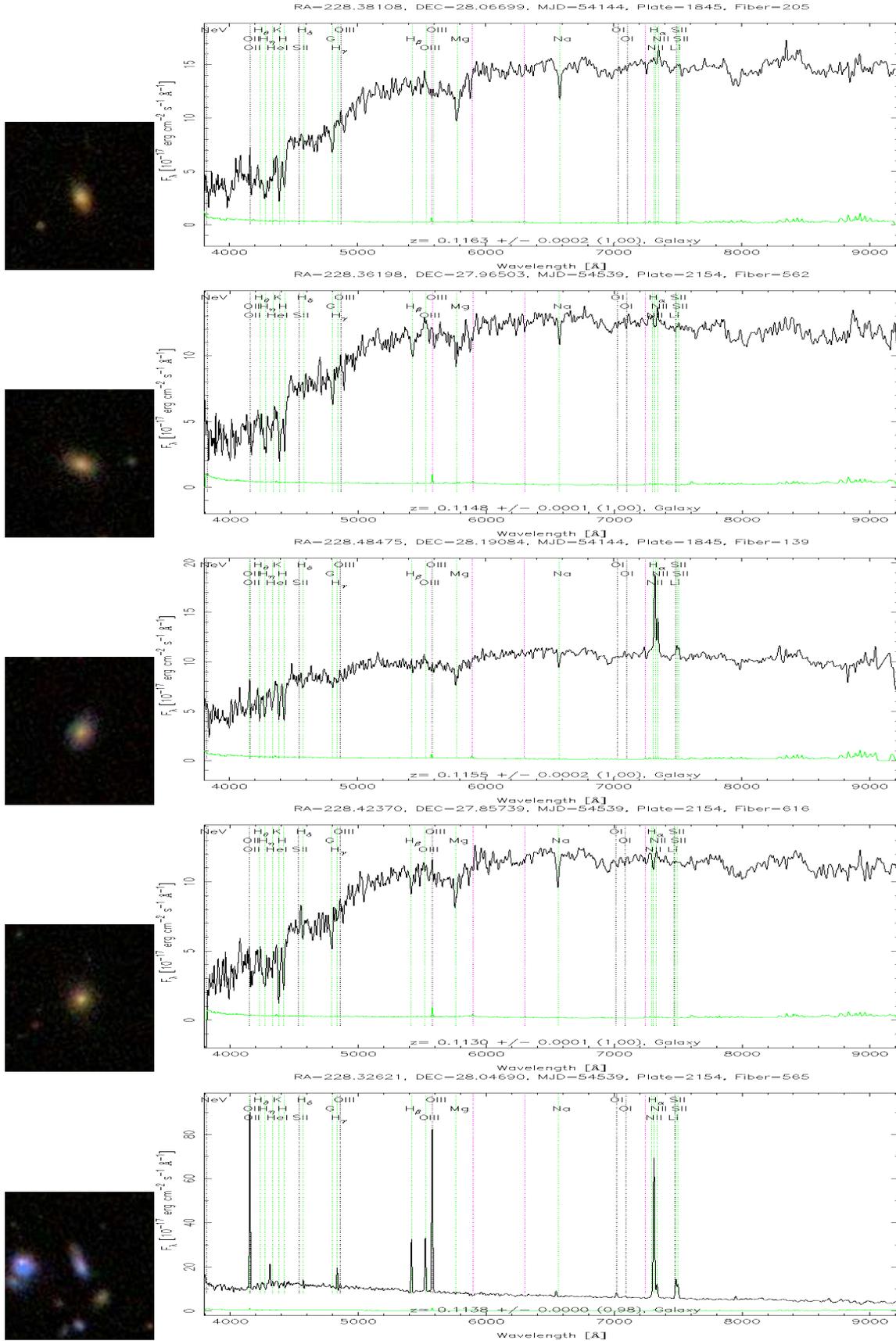


Figura J.11: Galaxias de la zona intercumular RA:228.56 y Dec:28.01 –hz (de 16 a 20)

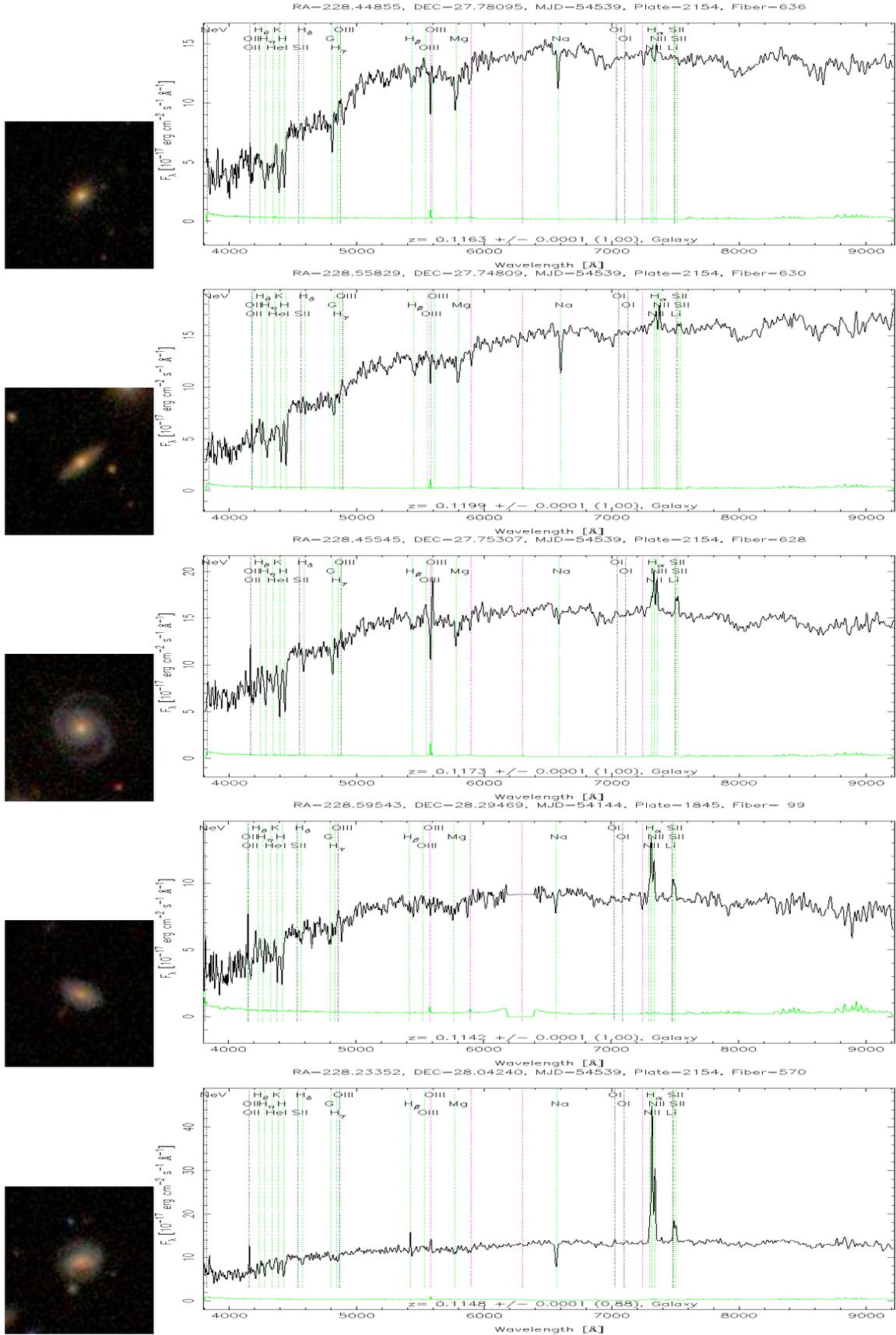


Figura J.12: Galaxias de la zona intercumular RA:228.56 y Dec:28.01 –hz (de 21 a 25)

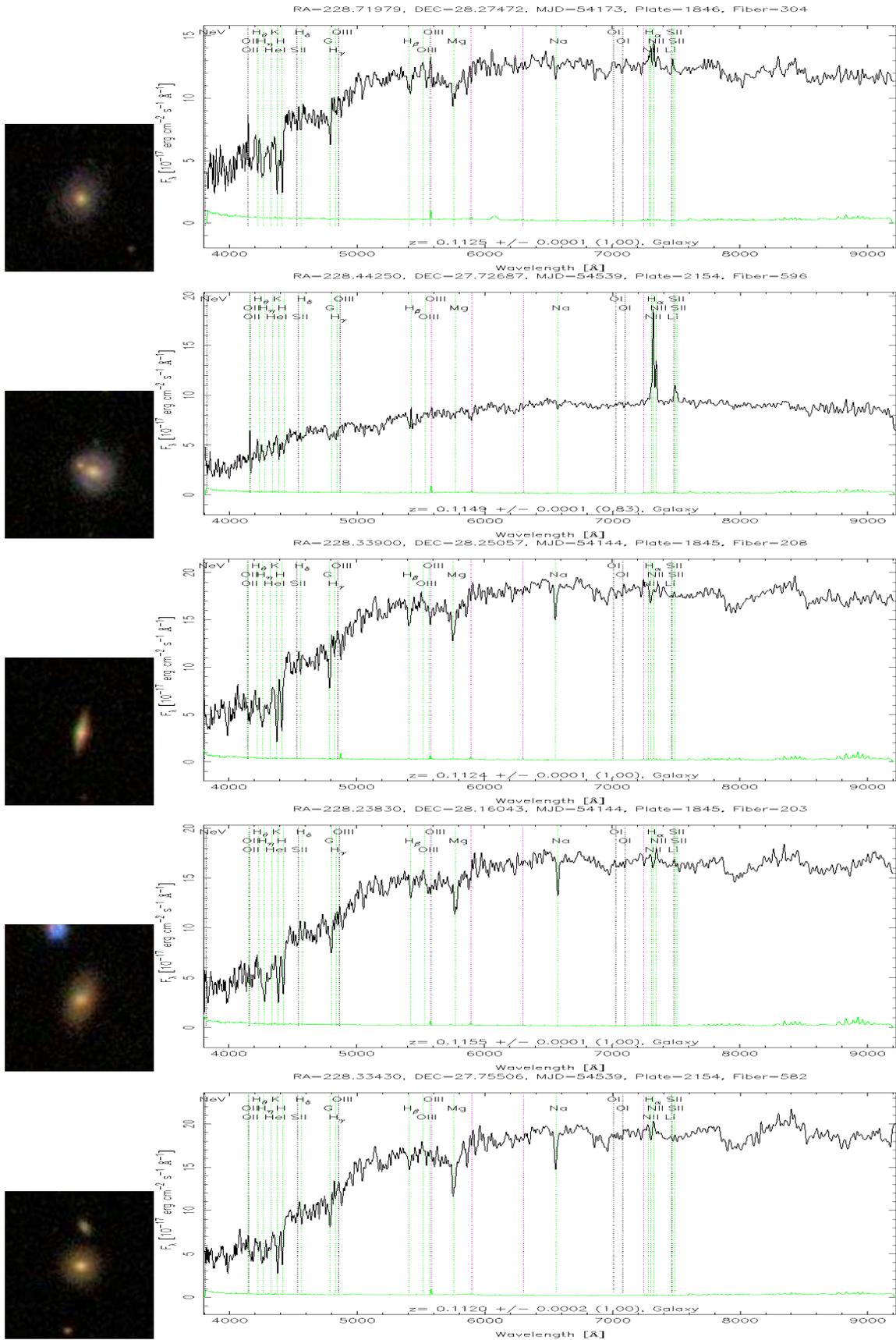


Figura J.13: Galaxias de la zona intercumular RA:228.56 y Dec:28.01 -hz (de 26 a 30)

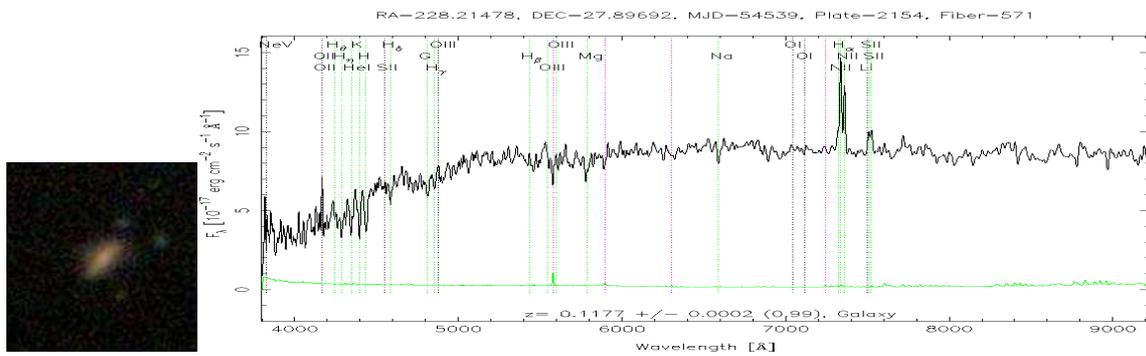


Figura J.14: Galaxia de la zona intercumular RA:228.56 y Dec:28.01  $-hz$  (31)