



Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

Facultad de Ciencias Físico-Matemáticas

Evolución de Galaxias en Cúmulos

Tesis presentada al

Colegio de Física

como requisito parcial para la obtención del grado de

Licenciado en Física

por

Mayra Mabel Valerdi Negreros

asesorada por

Dr. Héctor Bravo Alfaro

Puebla, Pue.
Julio de 2013



Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

Facultad de Ciencias Físico-Matemáticas

Evolución de Galaxias en Cúmulos

Tesis presentada al

Colegio de Física

como requisito parcial para la obtención del grado de

Licenciado en Física

por

Mayra Mabel Valerdi Negreros

asesorada por

Dr. Héctor Bravo Alfaro

Puebla, Pue.
Julio de 2013

Título: Evolución de Galaxias en Cúmulos

Estudiante: MAYRA MABEL VALERDI NEGREROS

COMITÉ

Dra. María del Rosario Pastrana Sánchez
Presidente

Dr. Oscar Mario Martínez Bravo
Secretario

Dr. Carlos Ignacio Robledo Sánchez
Vocal

Dr. Humberto Antonio Salazar Ibargüen
Vocal

Dr. Héctor Bravo Alfaro
Asesor

Índice general

Resumen	XI
1. Introducción	1
1.1. Conceptos Fundamentales de Física	1
1.2. Propiedades Físicas de las Galaxias	8
1.3. El Cúmulo Abell 85	17
1.4. El Cúmulo Abell 1367	18
2. Observaciones y Tratamiento de Imágenes	21
2.1. El Telescopio 2,1 <i>m</i> del OAN	21
2.2. Reducción y Análisis de Imágenes	24
2.3. Proceso de Obtención de Datos Fotométricos	27
2.4. Análisis de Asimetría en Imágenes de la Banda J	28
3. Resultados del Cúmulo Abell 85	31
3.1. Atlas de imágenes J, H, K'	34
3.2. Catálogo Fotométrico	46
3.3. Resultado de Asimetrías	48
4. Resultados del Cúmulo Abell 1367	51
4.1. Atlas de imágenes J, H, K'	53
4.2. Catálogo Fotométrico	61
4.3. Resultado de Asimetrías	63
5. Conclusiones	67

Índice de figuras

1.1. Diagrama del Espectro Electromagnético. Se muestran todos los rangos y se clasifica en longitud de onda y frecuencia.	2
1.2. Ley de Planck. Curvas de emisión de cuerpos negros a diferentes temperaturas y Ley de desplazamiento de Wien (relación inversa entre la longitud de onda en la que se produce el pico de emisión de un cuerpo negro y su temperatura).	5
1.3. Clasificación de Hubble. Las galaxias presentan una gran variedad de formas, en 1930 Hubble clasificó las galaxias en elípticas, espirales e irregulares.	9
1.4. Tipos de Galaxias. En la imagen se muestran ejemplos de los diferentes tipos de galaxias, de izquierda a derecha: galaxia NGC 4486 [E0-1], NGC 2787 [SB0], NGC 1309 [SA(s)bc], NGC 1300 [(R')SB(s)bc] y NGC 1427A [IB(s)m].	9
1.5. Esquema de clasificación de Cúmulos ricos por Rood & Sastry [28], según la distribución de las 10 galaxias más brillantes en el cúmulo.	14
1.6. Relación Morfología-Densidad [10] Relación entre la densidad local proyectada de galaxias y el tipo morfológico para 55 cúmulos.	15
1.7. Cúmulo de galaxias Abell 85. Imagen obtenida de SDSSr (Sloan Digital Sky Survey, red), tamaño $0,1 \times 0,1$ grados, centrado en (J2000) 00h 41m 43s, -09d 26m 24s. . .	18
1.8. Cúmulo Abell 85, distribución de los grupos 85/87/89 que se encuentran en el mismo corrimiento al rojo. Las dimensiones no están en la misma escala.	19
1.9. Cúmulo de galaxias Abell 1367. Imagen obtenida de SDSSr (Sloan Digital Sky Survey, red), tamaño $0,5 \times 0,5$ grados, centrado en (J2000) 11h 45m 05.41s, 19d 47m 29.7s.	20
1.10. Parte central del cúmulo Abell 1367 y los grupos respecto al centro del cúmulo. En los grupos, se muestra en contornos negros la detección en HI obtenida del VLA [31]. 20	
2.1. A la izquierda se muestra el edificio del Telescopio de 2.12m, a la derecha se muestra la cámara infrarroja Camila.	22
2.2. Transmitancia de la Atmósfera en todo el rango del espectro. Se muestra en ampliación la región de los tres filtros usados (J, H y K').	23
2.3. Imágenes obtenidas de una Estrella Estándar en las 4 posiciones de la secuencia. .	26
2.4. Campo 15 del cúmulo Abell 85. Se muestra en a) la imagen original obtenida del telescopio y en b) la imagen final con correcciones.	27
2.5. Gráficos de los distintos parámetros que genera el primer ajuste. 1-valor de magnitud, 2-elipticidad, 3-posición de ángulo, 6 y 9-centro de la elipse x_0 y y_0 respectivamente.	29
2.6. Galaxia 097027 del cúmulo Abell 1367, la cual presenta una asimetría. a) imagen final obtenida después de las correcciones, b) modelo de la galaxia y c) residuo de galaxia.	30
2.7. Galaxia 097041 del cúmulo Abell 1367. a) imagen final obtenida después de las correcciones, b) modelo de la galaxia y c) residuo de galaxia.	30

3.1. Cúmulo Abell 85. Imagen óptica de SDSS filtro rojo, tamaño 1.5×1.5 grados, centro en 00 41 37.8, -09 25 30. En los recuadros se muestran los 26 campos estudiados, los campos observados para este trabajo están en rojo.	32
3.2. Campo [DFL98]150. a) Imagen de SDSS, b) Filtro J, c) Filtro H y d) Filtro K'. Tamaño del campo: 3 arcmin.	34
3.3. Campo [DFL98]323. a) Imagen de SDSS, b) Filtro J, c) Filtro H y d) Filtro K'. Tamaño del campo: 3 arcmin.	35
3.4. Campo [DFL98]347. a) Imagen de SDSS, b) Filtro J, c) Filtro H y d) Filtro K'. Tamaño del campo: 3 arcmin.	36
3.5. Campo [DFL98]374. a) Imagen de SDSS, b) Filtro J, c) Filtro H y d) Filtro K'. Tamaño del campo: 3 arcmin.	37
3.6. Campo [DFL98]391. a) Imagen de SDSS, b) Filtro J, c) Filtro H y d) Filtro K'. Tamaño del campo: 3 arcmin.	38
3.7. Campo [DFL98]442. a) Imagen de SDSS, b) Filtro J, c) Filtro H y d) Filtro K'. Tamaño del campo: 3 arcmin.	39
3.8. Campo [DFL98]451. a) Imagen de SDSS, b) Filtro J, c) Filtro H y d) Filtro K'. Tamaño del campo: 3 arcmin.	40
3.9. Campo [DFL98]461. a) Imagen de SDSS, b) Filtro J, c) Filtro H y d) Filtro K'. Tamaño del campo: 3 arcmin.	41
3.10. Campo [DFL98]486. a) Imagen de SDSS, b) Filtro J, c) Filtro H y d) Filtro K'. Tamaño del campo: 3 arcmin.	42
3.11. Campo [DFL98]491. a) Imagen de SDSS, b) Filtro J, c) Filtro H y d) Filtro K'. Tamaño del campo: 3 arcmin.	43
3.12. Campo [DFL98]496. a) Imagen de SDSS, b) Filtro J, c) Filtro H y d) Filtro K'. Tamaño del campo: 3 arcmin.	44
3.13. Campo [DFL98]502. a) Imagen de SDSS, b) Filtro J, c) Filtro H y d) Filtro K'. Tamaño del campo: 3 arcmin.	45
3.14. Gráfica de error entre los valores de magnitud de 2MASS y los valores obtenidos en este trabajo.	47
3.15. Gráfica de error entre los valores de magnitud de 2MASS y los valores obtenidos en este trabajo	47
3.16. Gráfica de error entre los valores de magnitud de 2MASS y los valores obtenidos en este trabajo.	48
3.17. Galaxia [DFL98]374 del campo 15. En el fondo se muestra la imagen de la galaxia en el filtro J y en contornos la asimetría encontrada.	49
4.1. Cúmulo Abell 1367. Imagen óptica de SDSS filtro rojo, tamaño del campo, 1.2×1.2 grados, centro en 11 41 00, 19 45 00. En contornos se presenta la emisión de rayos X (ROSAT) del cúmulo.	51
4.2. Campo A. Imagen obtenida de SDSS en la banda roja, tamaño del campo 0.2×0.2 grados, centro en 11 37 02, 20 00 04. * velocidades radiales.	52
4.3. Campo B. Imagen obtenida de SDSS en la banda roja, tamaño del campo 0.2×0.2 grados, centro en 11 39 08, 19 35 06. * velocidades radiales.	52
4.4. Campo CGCG 097-026. a) Imagen de SDSS y b) Filtro J. Tamaño del campo: 3 arcmin.	54
4.5. Campo CGCG 097-027. a) Imagen de SDSS, b) Filtro J, c) Filtro H y d) Filtro K'. Tamaño del campo: 3 arcmin.	55
4.6. Campo 11.62, 20.02. a) Imagen de SDSS, b) Filtro J, c) Filtro H y d) Filtro K'. Tamaño del campo: 3 arcmin.	56
4.7. Campo FGC 1287. a) Imagen de SDSS, b) Filtro J, c) Filtro H y d) Filtro K'. Tamaño del campo: 3 arcmin.	57

4.8. Campo CGCG 097-036. a) Imagen de SDSS, b) Filtro J y c) Filtro H. Tamaño del campo: 3 arcmin.	58
4.9. Campo CGCG 097-041. a) Imagen de SDSS, b) Filtro J, c) Filtro H y d) Filtro K'. Tamaño del campo: 3 arcmin.	59
4.10. Campo CGCG 097-102. a) Imagen de SDSS, b) Filtro J, c) Filtro H y d) Filtro K'. Tamaño del campo: 3 arcmin.	60
4.11. Gráfica de error entre magnitud de 2MASS y la obtenida en este trabajo.	62
4.12. Gráfica de error entre magnitud de 2MASS y la obtenida en este trabajo.	62
4.13. Gráfica de error entre magnitud de 2MASS y la obtenida en este trabajo.	62
4.14. Galaxia CGCG 097-026. En el fondo se muestra la imagen de la galaxia en el filtro J y en contornos la asimetría encontrada.	64
4.15. Galaxia CGCG 097-027. En el fondo se muestra la imagen de la galaxia en el filtro J y en contornos la asimetría encontrada.	64
4.16. Galaxia FGC 1287. En el fondo se muestra la imagen de la galaxia en el filtro J y en contornos la asimetría encontrada.	65
4.17. Galaxia CGCG 097-036. En el fondo se muestra la imagen de la galaxia en el filtro J y en contornos la asimetría encontrada.	65
4.18. Galaxia CGCG 097-102. En el fondo se muestra la imagen de la galaxia en el filtro J y en contornos la asimetría encontrada.	66

Índice de tablas

1.1. Agrupación jerarquizada de las galaxias [2].	12
1.2. Grado de riqueza	13
1.3. Comparación y tendencias generales de la clasificación morfológica de los cúmulos.	13
2.1. Característica de los filtros J, H y K'	22
2.2. Magnitud publica de las estrellas estándar [16].	27
2.3. Valor del factor ZP y error. Filtro J	28
2.4. Valor del factor ZP y error. Filtro H	28
2.5. Valor del factor ZP y error. Filtro K'	28
3.1. Notas: [1] Número de campo en el cúmulo. [2] Nombre de la galaxia de acuerdo al Catálogo de Durret F. et al. (1998) [11] y (*) Catálogo de Slezak E. et al. (1998) [29]. [3] Coordenadas (AR y Dec). [4] Velocidad Radial obtenida de NED. [5] Magnitud del filtro g(SDSS PSF)AB y (*) Magnitud b-J obtenida de NED. [6] Diámetro del eje mayor en arcmin obtenido de NED. [7] Clasificación de la galaxia obtenida de NED.	33
3.2. Notas:[1] Número de campo en el cúmulo. [2] Nombre de las galaxias tomadas del catálogo de Durret F. et al. (1998) [11] y (*) catálogo de Slezak E. et al. (1998) [29]. [3] Magnitud obtenida de las imágenes finales de éste trabajo, (*) magnitudes tomadas de Yoganarasimhan (2013). Los espacios vacíos, se debe a que las imágenes finales, no tienen suficiente señal para obtener una magnitud.	46
4.1. Notas: [1] Nombre de las galaxias tomadas de CGCG <i>Catalogue of Galaxies and of Clusters of Galaxies</i> [35]; (*) catálogo FGC <i>Flat Galaxy Catalogue</i> [18] y (**) catálogo de Sloan Digital Sky Survey. [2] Coordenadas (AR y Dec). [3] Velocidad Radial obtenida de NED. [4] Magnitud del filtro g(SDSS PSF)AB y (*) Magnitud I-t obtenida de NED. [5] Diámetro del eje mayor en arcmin obtenido de NED. [6] Clasificación de la galaxia obtenida de NED.	53
4.2. Notas: [1] Nombre de las galaxias tomadas del catálogo de CGCG <i>Catalogue of Galaxies and of Clusters of Galaxies</i> [35], (*) catálogo FGC <i>Flat Galaxy Catalogue</i> [18] y (**) catálogo de <i>Sloan Digital Sky Survey</i> . [2] Magnitud obtenida de las imágenes finales de éste trabajo, (*) magnitudes tomadas de Yoganarasimhan (2013). Los espacios vacíos, se debe a que las imágenes finales, no tienen suficiente señal para obtener una magnitud.	61

Resumen

Esta tesis es parte de un proyecto más amplio de observaciones multifrecuencia y simulaciones numéricas, que estudia las propiedades de galaxias en cúmulos del universo cercano (corrimientos al rojo $z < 0,30$). El objetivo particular de esta tesis es ampliar nuestro conocimiento sobre la evolución de galaxias, principalmente averiguar si existe una transformación de galaxias espirales a galaxias elípticas o lenticulares (S0) y los efectos que juega el medio ambiente en la transformación de éstas. Para realizar el estudio se usaron dos cúmulos muy cercanos ($z < 0,06$) y se han analizado una serie de imágenes en el infrarrojo cercano de los filtros J ($1.275 \mu\text{m}$), H ($1.672 \mu\text{m}$) y K' ($2.124 \mu\text{m}$), las cuales se obtuvieron del telescopio de 2,1 m del OAN, en San Pedro Mártir. Estas imágenes permiten realizar un análisis detallado del disco estelar de población relativamente vieja, lo que a su vez se utiliza para la búsqueda de interacciones gravitacionales con otras galaxias ocurridas en los últimos 10^9 años. En este trabajo obtuvimos catálogos fotométricos de magnitudes (J, H y K') y un atlas de las imágenes correspondientes para cada cúmulo. Los cúmulos que se estudiaron son Abell 85 ($z = 0,05$) y Abell 1367 ($z = 0,02$), los cuales han sido ampliamente observados con el VLA para estudiar la componente gaseosa de hidrógeno atómico (HI) en la línea de 21cm. Esta tesis busca complementar la comparación de los efectos hidrodinámicos (e.g. “*ram pressures stripping*”) estudiados a partir del HI, contra los efectos gravitacionales que son responsables de las perturbaciones en los discos estelares, lo cual se puede estudiar a partir de las imágenes J, H, K'. Como principales resultados tenemos que las galaxias estudiadas en Abell 85, con una sola excepción, no presentan asimetrías en sus discos estelares. Por otra parte, las galaxias estudiadas en Abell 1367, pertenecientes a dos grupos en caída hacia el centro del cúmulo, sí presentan fuertes asimetrías, lo que indica que en esos sistemas las interacciones gravitacionales dominan la evolución de las galaxias. En su conjunto, los resultados de este trabajo muestran que no se puede atribuir a un sólo tipo de mecanismos (gravitacionales vs hidrodinámicos) las transformaciones morfológicas de galaxias espirales en cúmulos masivos.

Capítulo 1

Introducción

Los cúmulos de galaxias son sistemas ligados gravitacionalmente conteniendo cientos de galaxias. En el presente trabajo se realizó un estudio de las distintas propiedades de las galaxias que conforman estos cúmulos.

Procederemos a describir en este capítulo los conceptos físicos que se requieren para el entendimiento de los procesos que vamos a estudiar. Primero se describe el espectro electromagnético, el cual es una de las herramientas más importantes dado que los objetos astronómicos proporcionan distintos tipos de información dependiendo el rango del espectro en que se observen. En astronomía, la emisión de las estrellas y las galaxias se puede aproximar como un cuerpo negro, por tal razón se describen las características generales de un cuerpo negro. Finalmente se describe el átomo de hidrógeno debido a que es el elemento más abundante en el universo y se encuentra en 3 formas: neutro, ionizado y molecular, en particular, nos interesa la forma neutra, debido a que nuestros objetos fueron observados en la zona de 21 cm de radio (con el observatorio radioastronómico VLA) y al final se realiza un análisis de las observaciones en infrarrojo y las observaciones de radio.

1.1. Conceptos Fundamentales de Física

La naturaleza de la luz ha sido estudiada desde hace muchos años por científicos, en particular para los astrónomos conocer la radiación electromagnética (luz) es un elemento clave debido a que toda la información que se obtiene del Universo llega a través de ella.

La radiación electromagnética comprende una amplia variedad de emisiones que van, desde los rayos gamma hasta las ondas de radio (en orden decreciente de energía y de frecuencia). Todas estas emisiones son producidas en el curso de procesos energéticos que involucran partículas elementales, de las cuales está formada la materia y constituyen el espectro electromagnético.

Espectro Electromagnético

El espectro electromagnético es la distribución de la radiación electromagnética de acuerdo con la energía, frecuencia o longitud de onda.

Las diferentes regiones del espectro electromagnético proporcionan distintos tipos de información como resultado de la interacción entre la materia y la luz (radiación electromagnética). Debido a la dualidad de la luz, ésta se puede considerar como onda o como partícula, así se puede tener en cuenta que una frecuencia o longitud de onda dada, está asociada con un tipo de “cuanto de luz” que se denomina fotón, el cual tiene una determinada energía. La siguiente ecuación describe la relación proporcional entre la frecuencia y la energía.

$$E = h\nu,$$

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1. CONCEPTOS FUNDAMENTALES DE FÍSICA

donde: h es la constante de Planck ($h = 6,62 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$) y dado que $c = \nu\lambda \Rightarrow E = h\frac{c}{\lambda}$.
 La energía de un fotón equivale a la diferencia de energía de dos estados cuánticos del material y esta diferencia depende de sus propiedades, por tanto el espectro proporciona información muy útil para averiguar propiedades a cerca de objetos celestes tales como su composición química y movimiento, a través del efecto Doppler.
 En general, se denota como espectro a la distribución de intensidad de luz en función de la frecuencia o longitud de onda. Gráficamente el espectro muestra la intensidad de luz que es emitida en un intervalo de energía.

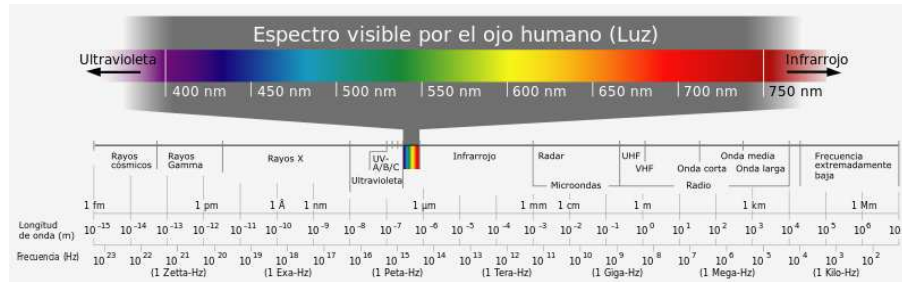


Figura 1.1: Diagrama del Espectro Electromagnético. Se muestran todos los rangos y se clasifica en longitud de onda y frecuencia.

En el espectro, las ondas electromagnéticas se clasifican en diferentes grupos según su frecuencia con un rango de 10Hz a 10²³Hz (10⁷m a 10⁻¹⁴m en longitud de onda) la clasificación no tiene límites precisos entre cada grupo. A continuación se describe cada zona:

★ Rayos Gamma

Los rayos gamma conforman el extremo más elevado de energía del espectro electromagnético, las ondas se encuentran en una frecuencia aproximada de $3 \times 10^{18} \text{ Hz}$ o mayor y longitud de onda de $100 \times 10^{-12} \text{ m}$ o menor. No existe una diferencia definida entre la energía más elevada de los rayos X y la energía más baja de los rayos gamma, de hecho, la diferencia entre ellos se basa en el origen de radiación, ya que los rayos gamma se producen a causa de transiciones nucleares, mientras que los rayos X son resultado de la aceleración de electrones.

La radiación de rayos gamma proveniente del espacio es absorbida por la atmósfera, por lo que no llegan a la superficie terrestre. Para observar el Universo en estas frecuencias es necesario usar observatorios exoespaciales y para su detección, se utiliza el efecto Compton. En Astronomía, el área de rayos gamma (llamados BRGs), es a veces llamada del Universo “violento” debido a que las fuentes de rayos gamma son, por lo general, explosiones de supernova, colisiones a gran velocidad, chorros de partículas, agujeros negros, entre otros. Algunos de los telescopios que se usan para detectar esta radiación son: VERITAS, HESS y MAGIC.

★ Rayos X

La región de rayos X se encuentran entre el rango de frecuencia de $30 \times 10^{15} \text{ Hz}$ a $30 \times 10^{18} \text{ Hz}$ ($10 \times 10^{-12} \text{ m}$ a $10 \times 10^{-9} \text{ m} \rightarrow \text{nm}$ en longitud de onda). En la práctica, los rayos X, se producen al acelerar electrones y luego, hacerlos chocar con una placa metálica, así la radiación de frenado produce estos rayos. En el área de la Astronomía, este tipo de radiación procede de fuentes que contienen gas muy caliente a varios millones de Kelvin, en general en objetos cuyos átomos o electrones tienen una gran energía. A raíz de los estudios realizados, se sabe que esas fuentes de rayos X son remanentes estelares, como estrellas de neutrones o agujeros negros. La fuente de energía se encuentra en la energía gravitacional, que procede del gas calentado por la caída en el campo gravitacional de esos objetos.

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1. CONCEPTOS FUNDAMENTALES DE FÍSICA

Los rayos X son absorbidos por la atmósfera y en la actualidad los observatorios para detección de éste tipo de rayos, se instalan en satélites, algunos de ellos son: Observatorio Chandra de Rayos X, XMM-Newton, ROSAT, entre otros. Los objetos más estudiados son: atmósferas estelares, estrellas de neutrones y agujeros negros, núcleos de galaxias activas y gas caliente en cúmulos de galaxias.

★ *Rango Ultravioleta (UV)*

El rango ultravioleta abarca frecuencias desde los $800 \times 10^{12}\text{Hz}$ a los $20 \times 10^{15}\text{Hz}$ (15nm a 400nm en longitud de onda). Los átomos y moléculas sometidos a descargas eléctricas producen este tipo de radiación. Existen reacciones químicas que absorben prácticamente toda radiación ultravioleta proveniente del espacio, por lo que, solamente llega una pequeña fracción a la superficie de la Tierra.

Los telescopios que se usan para obtener información en esta región son espaciales como: El Observatorio Astronómico Copérnico, EUVE, GALEX, etc. Este tipo de radiación proporciona información sobre la composición química del Universo y es especialmente sensible al material difuso que invade el espacio intergaláctico e interestelar, los objetos que son estudiados en este rango son: estrellas calientes y medio interestelar.

★ *Rango Óptico*

La luz visible es la forma más conocida de radiación electromagnética y constituye una pequeña porción del espectro a la que el ojo humano es sensible. Las ondas ópticas o luz visible, se encuentran en un rango de frecuencias entre los $450 \times 10^{12}\text{Hz}$ y $750 \times 10^{12}\text{Hz}$ (400nm a 700nm en longitud de onda). Los colores que componen la luz visible son: *rojo*(620 - 750nm), *anaranjado*(590 - 620nm), *amarillo*(570 - 590nm), *verde*(495 - 570nm), *azul*(450 - 495nm) y *violeta*(380 - 450nm).

En Astronomía, la principal herramienta que se utiliza es el telescopio óptico. Antes de la llegada de la fotografía, el único detector usado era el ojo humano, el cual tiene una gran limitante, sin embargo la fotografía permitió un aumento enorme de la sensibilidad de las observaciones. En lugar de la fracción de segundo en que el ojo recibe fotones antes de mandar la señal al cerebro, una placa fotográfica puede ser expuesta durante horas, sin embargo, en las últimas décadas del siglo XX, la placa fotográfica fue gradualmente reemplazada por detectores electrónicos, el más útil y ampliamente usado es el CCD.

A pesar de la apertura de nuevas regiones del espectro, la Astronomía óptica sigue siendo un área inmensamente activa, ya que a pesar de ser una región pequeña del espectro, proporciona información importante y complementaria para el estudio de objetos celestes.

En la actualidad existen una gran variedad de telescopios ópticos como: El Telescopio Espacial Hubble, VLT, Gran Telescopio Canarias, entre otros. Y los objetos que más se estudian en este rango son: planetas, estrellas y su evolución, galaxias normales y activas, estructura a gran escala del Universo.

★ *Rango Infrarrojo*

La radiación infrarroja comprende un rango de frecuencias entre los $300 \times 10^9\text{Hz}$ (GHz) y $400 \times 10^{12}\text{Hz}$ (750nm y 1mm, en longitud de onda). La atmósfera de la Tierra es opaca debido a que los gases tienden a absorber la radiación infrarroja.

La investigación del cielo a través del infrarrojo tiene una enorme importancia para la astronomía, porque permite descubrir objetos de interés cosmológico como estrellas en las primeras etapas de su formación y nubes de polvo interestelar.

El universo envía una enorme cantidad de información en forma de radiación electromagnética, donde gran parte se encuentra en forma de ondas infrarrojas. Sólo una pequeña cantidad de las ondas infrarrojas alcanzan la superficie de la Tierra; sin embargo, el estudio de las longitudes de onda infrarrojas ha permitido a los astrónomos descubrir una extraordinaria cantidad de información. El espectro infrarrojo se subdivide en 3 categorías:

- ▷ Infrarrojo cercano: de 800nm a 2500nm.
- ▷ Infrarrojo medio: de $2,5\mu\text{m}$ a $50\mu\text{m}$.
- ▷ Infrarrojo lejano: de $50\mu\text{m}$ a $1000\mu\text{m}$.

Esta subdivisión tiene su razón de ser en los diferentes fenómenos físicos que son observables en cada uno de estos rangos, éstos fenómenos son de tipo térmicos.

Entre los telescopios para detectar radiación infrarroja se encuentran: Spitzer, IRAS y Herschel, entre otros. Los objetos que se estudian en esta longitud de onda son: formación de estrellas, estrellas frías, centro de la Vía Láctea, galaxias activas y estructura a gran escala del Universo.

★ *Ondas Milimétricas:*

Las ondas milimétricas se encuentran en el rango de frecuencias entre $300 \times 10^6\text{Hz}$ (MHz) y $300 \times 10^9\text{Hz}$ (1mm a 10m en longitud de onda). La radiación electromagnética en longitudes de onda milimétrica haciendo referencia en Astronomía proviene esencialmente de dos efectos físicos: uno es relativo a la temperatura de los cuerpos y el otro es la excitación del gas molecular. También se genera de transiciones de tipo hidrógeno molecular, como vibraciones de la molécula.

Dentro de estas ondas, se encuentran las microondas, que tienen la propiedad de excitar la molécula de agua, por lo que en general se utilizan en hornos de microondas. En astronomía, la radiación de fondo de microondas es una radiación de baja temperatura que llega a la superficie de la Tierra. De acuerdo con la teoría de gran aceptación, ésta radiación es lo que queda de las elevadísimas temperaturas propias de los primeros momentos del Big Bang. Para obtener datos en estas longitudes de onda se usan telescopios milimétricos como: GBT, ALMA e IRAM.

★ *Ondas de Radio:*

Las ondas de radio se usan extensamente en las comunicaciones, se encuentran en un rango de frecuencias entre $3 \times 10^3\text{Hz}$ (KHz) y $300 \times 10^6\text{Hz}$ (100mm a 100Km en longitud de onda). La mayoría de las ondas de radio pasan libremente a través de la atmósfera de la Tierra, sin embargo, algunas frecuencias pueden ser reflejadas o absorbidas por las partículas cargadas de la ionosfera. Los mecanismos físicos que están en la base de las emisiones de radio por parte de los objetos celestes, son diferentes de aquellos que hacen brillar a los mismos objetos con luz visible. Mientras casi todas las ondas electromagnéticas comprendidas en el espectro visible tienen un origen térmico, las ondas electromagnéticas comprendidas en el rango de radio se deben, sobre todo, al movimiento de partículas elementales cargadas de energía; uno de los mecanismos típicos de la emisión de ondas de radio celestes es la llamada *radiación Sincrotrón* (el movimiento en espiral de los haces de electrones que se desplazan a la velocidad de la luz a través de los campos magnéticos estelares o galácticos).

El campo de la radioastronomía se originó con el trabajo de Karl Jansky en los laboratorios Bell en 1931, cuando estaba investigando el uso de *ondas cortas* (entre 10-20m) para el servicio transatlántico de radiotelefonía.

Para obtener información en este rango de frecuencia, se usan radiotelescopios de antena fija como: Observatorio de Arecibo, RATAN-600, Effelsberg, entre otros e interferómetros como: EVLA, GMRT, entre otros. Los objetos de estudio en este rango son: campos magnéticos planetarios, nubes interestelares de gas y moléculas (Regiones HI), galaxias activas, radiación cósmica de fondo.

Cuerpo Negro

A la radiación emitida por un cuerpo como resultado de su temperatura se le conoce como *radiación térmica*. Todos los cuerpos emiten tal radiación en su entorno y la absorben de sus inmediaciones. La materia en un estado condensado (sólido o líquido) emite un espectro continuo de radiación, los detalles del espectro dependen de la temperatura.

El denominado *cuerpo negro* es una clase de cuerpo caliente que absorbe toda la radiación que le llega a todas las longitudes de onda y la radiación que emite es sólo función de la temperatura y de la frecuencia de la onda. A una temperatura dada, el espectro es el mismo independientemente de los detalles de su composición y dado que no reflejan luz, a temperatura ambiente el objeto debería ser perfectamente negro, si se calentara a una temperatura alta, comenzaría a brillar produciendo radiación térmica. Obviamente no existe objeto alguno con tales características, es decir, es una idealización, como lo es un gas ideal, sin embargo existen cuerpos que se aproximan a la definición de cuerpo negro.

La radiación de un cuerpo negro depende sólo de su temperatura, la distribución de longitud de onda o frecuencia de la radiación obedece la *Ley de Planck*, por lo que la intensidad a una frecuencia ν de un cuerpo negro a una temperatura T es:

$$B_{\lambda}(T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/\lambda kT} - 1} \quad \text{ó} \quad B_{\nu}(T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1},$$

donde:

h es la constante de Planck; $h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$.

c es la velocidad de la luz en el vacío; $c = 3 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

k es la constante de Boltzmann; $k = 1,38 \times 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$.

Las unidades de intensidad son: $[B_{\nu}] = [B_{\lambda}] = \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{Hz}^{-1} \cdot \text{sterad}^{-1}$.

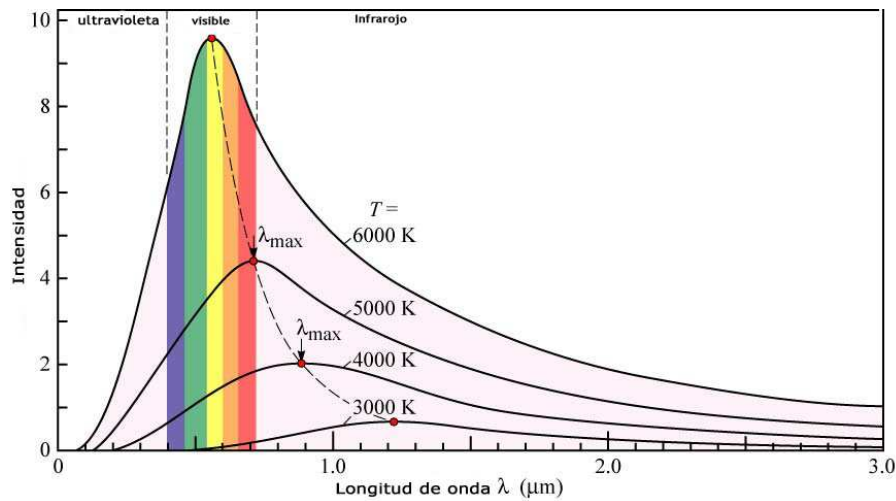


Figura 1.2: Ley de Planck. Curvas de emisión de cuerpos negros a diferentes temperaturas y Ley de desplazamiento de Wien (relación inversa entre la longitud de onda en la que se produce el pico de emisión de un cuerpo negro y su temperatura).

La Ley de Planck implica dos resultados importantes:

- a) La Ley de Desplazamiento de Wien.
- b) La Ley de Stefan-Boltzmann.

a) Al aumentar la temperatura T , la longitud de onda (λ_{max}) correspondiente a la máxima energía se desplaza hacia las ondas cortas, de modo que dicha longitud de onda, es inversamente proporcional a la temperatura absoluta. Cuando se evalúa el máximo a partir de la Ley de Planck, se encuentra que el producto de la longitud de onda máxima y la temperatura es constante:

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1. CONCEPTOS FUNDAMENTALES DE FÍSICA

$$\lambda_{max}T = 2,9 \times 10^{-3} m \cdot K.$$

De manera similar, se puede obtener ν_{max} . Esta relación es útil para determinar la temperatura de cualquier objeto, cuya temperatura sea mucho mayor que la de su entorno, como es el caso de objetos celestes.

Cuando la longitud de onda se encuentra cerca de λ_{max} , la Ley de Planck puede ser aproximada a una expresión simple, de manera que si $\lambda \approx \lambda_{max}$ lo cual implica que $hc/(\lambda kT) \gg 1$, entonces:

$$e^{hc/\lambda kT} \gg 1,$$

en este caso, se obtiene la aproximación de Wien:

$$B_{\lambda}(T) \approx \frac{2hc^2}{\lambda^5} e^{-hc/\lambda kT},$$

cuando $hc/(\lambda kT) \ll 1$, lo cual implica que $\lambda \gg \lambda_{max}$, se tiene:

$$e^{hc/\lambda kT} \approx 1 + \frac{hc}{\lambda kT},$$

lo cual da como resultado la aproximación de *Rayleigh-Jeans*, que es útil particularmente en Radioastronomía

$$B_{\lambda}(T) \approx \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{\lambda kT}{hc} = \frac{2cKT}{\lambda^4}.$$

b) Las funciones B_{λ} y B_{ν} se define de tal manera que la intensidad total se puede obtener de la misma manera utilizando cualquiera de ellas:

$$B(T) = \int_0^{\infty} B_{\nu} d\nu = \int_0^{\infty} B_{\lambda} d\lambda,$$

lo que da como resultado la intensidad total:

$$B(T) = \frac{2k^4}{c^2 h^3} \frac{\pi^4}{15} T^4.$$

La densidad de flujo F de radiación isotrópica de la intensidad de B es $F = \pi B$:

$$\Rightarrow F = \sigma T^4,$$

la ecuación anterior es llamada la *Ley de Stefan-Boltzmann* y $\sigma = \frac{2k^4 \pi^5}{15c^2 h^3} = 5,67 \times 10^{-8} W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$ es la constante de Stefan-Boltzmann.

De esta ley, se puede obtener la relación entre la Luminosidad y la Temperatura de una estrella. Si el radio de la estrella es R , el área superficial será $4\pi R^2$ y si la densidad de flujo en la superficie es F , entonces:

$$L = 4\pi R^2 F.$$

Si suponemos que la estrella radia como un cuerpo negro, se tiene que $F = \sigma T^4$ entonces la luminosidad es:

$$L = 4\pi \sigma R^2 T^4.$$

Átomo de Hidrógeno

En el Universo, el elemento más abundante es el hidrógeno y se encuentra en 3 formas: neutro (HI), ionizado (HII) y molecular (H_2). La densidad entre las regiones HI y las H_2 es enorme. El hidrógeno molecular es más abundante.

Entre los datos que se analizaron en este trabajo, se encuentran galaxias que fueron observadas en regiones HI . Una región HI es una nube formada por hidrógeno atómico frío, poco denso.

El átomo de hidrógeno es el más simple, consta de un protón que se encuentra en el núcleo y un electrón que “orbita” alrededor del núcleo. En 1913, Bohr presentó su teoría del átomo, donde sus postulados se basaron en resultados experimentales.

* *Primer postulado.* Los átomos existen en “estados estacionarios” de energía definida, en los cuales no radia energía y son estables (*cuantificación de la energía de los átomos*). Un electrón que gira alrededor de un núcleo, tiene un momento angular que es múltiplo de $\hbar$:

$$mvr = n\hbar,$$

donde:

m es la masa del electrón, v es la velocidad del electrón, r es el radio de la órbita, n es el número cuántico principal y $\hbar = h/2\pi$.

* *Segundo postulado.* El átomo emite o absorbe energía radiante *únicamente* cuando va de un estado a otro, y el cambio de energía del átomo es igual a la energía del fotón de radiación que se emite o absorbe. Si en el átomo se tienen las energías E_2 y E_1 , donde $E_2 > E_1$, entonces:

$$E_2 = E_1 + h\nu_{21},$$

donde ν_{21} es la frecuencia del fotón emitido. Si la transición es de E_1 a E_2 , se tiene $E_2 = E_1 + h\nu_{12}$ donde ν_{12} es la frecuencia del fotón absorbido. Este segundo postulado es llamado *condición de radiación*, el cual contiene la idea de la conservación de la energía.

* *Tercer postulado.* La teoría cuántica debe dar los mismos resultados que la teoría clásica, en el límite en el que la teoría clásica se conoce como correcta. Este postulado puede llamarse la regla de la cuantización, esto es una manera de determinar los estados permitidos de energía del átomo, esta regla es ahora conocida como *principio de correspondencia*.

En el caso del átomo de hidrógeno, una parte importante, son las energías permitidas de los estados estacionarios las cuales están dadas por la siguiente ecuación:

$$E_n = -\frac{hcR_H}{n^2},$$

donde, el número entero n determina una energía permitida (cuantizada). La energía más baja permitida corresponde a $n = 1$ y la más alta a $n = \infty$. El signo negativo de la ecuación anterior, significa que el sistema (átomo de hidrógeno) está *enlazado*, siendo negativa la energía total.

Transiciones del Hidrógeno

Un espectro atómico es la radiación característica emitida por los átomos de un elemento individual. Cuando esa radiación es observada a través de un espectroscopio, la radiación aparece como un conjunto de líneas estrechas cada una de un color particular, es decir, de frecuencia o longitud de onda distinta. Las posiciones e intensidades de cada una de las líneas son características de cada elemento.

En 1885 Johann J. Balmer encontró las líneas en la región visible del espectro de hidrógeno, el cual contiene cuatro líneas; roja, azul y dos violeta, conocidas por ello ahora como *serie de Balmer*.

El espectro de emisión del hidrógeno se debe a que los átomos son excitados, por lo que los átomos pasarán del estado fundamental, $n = 1$, a estados excitados: $n = 2$, $n = 3$, $n = 4$, etc. Cuando se

deja de aportar energía externa, puesto que los estados excitados son muy inestables, el electrón excitado retorna al estado fundamental o a otros estados energéticos inferiores. Estadísticamente se producen todas las posibles transiciones energéticas (de $n = 2$ a $n = 1$, de $n = 3$ a $n = 2$ y a $n = 1$, etc.). Estas líneas a longitudes de onda discreta, constituyen el espectro de emisión del hidrógeno.

Por otra parte se tiene otro tipo de transición. En 1944 *Christoffel Van De Hulst* encontró que en el átomo de hidrógeno los campos magnéticos asociados al protón y al electrón pueden estar orientados uno con respecto al otro en el mismo sentido o en sentido contrario. Cada una de esas orientaciones relativas de los campos magnéticos corresponde a un nivel de energía del átomo. Hulst calculó la diferencia entre ambos niveles.

Hay dos estados de energía dependiendo del espín del protón y el electrón. Se puede imaginar al espín como una rotación, aunque en realidad el espín es el momento angular intrínseco de una partícula. Si la orientación relativa cambia de paralela a antiparalela, la energía del átomo pasa de mayor a menor, emitiéndose un fotón, donde su energía es la diferencia del salto energético. Si sucede lo contrario, incide un fotón sobre el hidrógeno, éste lo absorbe y su estado de energía pasa de menor a mayor. Dado que la diferencia entre los dos niveles es muy pequeña, el fotón emitido o absorbido transporta una energía muy baja y genera una línea espectral que se encuentra en el rango de ondas de radio, con una longitud de onda de 21cm. En particular esta transición es muy poco probable, pero debido a que hay una enorme cantidad de hidrógeno atómico, recibimos todo un conjunto de emisión en radio de 21cm.

Por el desarrollo de la teoría sobre la radiación de cuerpo negro, se sabía que en el equilibrio de la radiación, la densidad de energía por unidad de volumen por unidad de frecuencia era igual a: $\rho(\nu) = 8\pi h\nu^3/c^3$. Einstein postuló en el campo de la termodinámica que la probabilidad de la emisión espontánea A , estaba relacionada con la probabilidad de la emisión estimulada B , por la relación $A/B = 8\pi h\nu^3/c^3$, de manera que sostuvo que sólo si la proporción de los coeficientes A y B tenían ese valor, sería posible el equilibrio obedeciendo las leyes de la termodinámica.

En Astronomía, el medio interestelar desempeña un papel crucial a causa de su situación entre las escalas estelar y galáctica. Las estrellas se forman dentro de regiones HI (regiones frías del medio interestelar), las cuales no emiten radiación en el rango visible, sino en radio. Este tipo de observaciones, se realiza con radiotelescopios como el VLA (*Very Large Array*), VLBA (*Very Long Baseline Array*), radiotelescopio de Arecibo, entre otros.

1.2. Propiedades Físicas de las Galaxias

Las galaxias son agrupaciones de miles de millones de estrellas y a su vez, son los bloques de construcción fundamentales del Universo. Estrellas, gas y polvo interestelar orbitan alrededor del centro de la galaxia debido a la atracción gravitatoria de todas las demás estrellas. Se crean nuevas generaciones de estrellas a partir del gas que se condensa en regiones llamadas nubes moleculares. Cuando una estrella alcanza el final de su evolución, puede devolver mucho gas al medio interestelar que será la fuente para una nueva generación de estrellas.

Mientras que las estrellas dentro de una galaxia están separadas por distancias muy grandes comparadas con sus tamaños, las galaxias están separadas de sus vecinas más cercanas por distancias que son mucho más pequeñas cuando se comparan con las distancias entre las estrellas dentro de las galaxias. Así, no son inusuales las colisiones entre galaxias conforme éstas se mueven a través del espacio intergaláctico, pero cuando se encuentran en grupos pueden colisionar, de manera que las órbitas de las estrellas pueden ser sustancialmente perturbadas (debido a la fuerza gravitacional que una galaxia ejerce sobre la otra) y la comprensión de las nubes de gas puede estimularlas a colapsar y formar estrellas con una tasa especialmente alta.

Clasificación de galaxias

Alrededor de 1930 el astrónomo *Edwin Hubble*, fué el primero en establecer una clasificación morfológica de las galaxias, en 4 tipos básicos: *espirales*, *elípticas*, *lenticulares* e *irregulares*. El esquema de Hubble sólo se basa en la apariencia visual, no toma en cuenta otros aspectos, tales como la tasa de formación de estrellas, la actividad del núcleo galáctico, índices de color, parámetros espectroscópicos, entre otros, es por eso que en los últimos años se han hecho muchas modificaciones y mejoras, pero la clasificación morfológica definida por el Hubble sigue siendo hoy en día la más conocida.

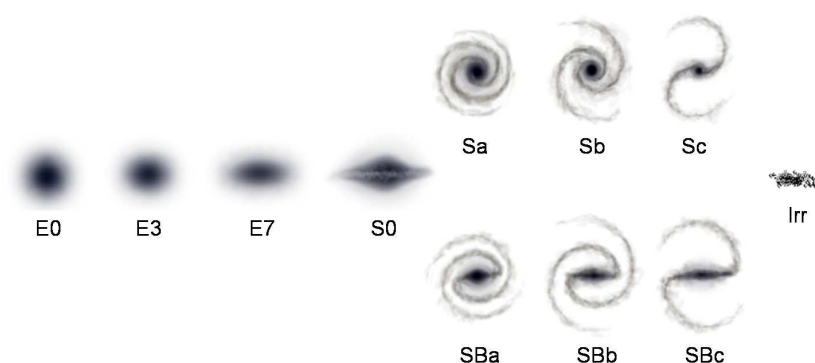


Figura 1.3: Clasificación de Hubble. Las galaxias presentan una gran variedad de formas, en 1930 Hubble clasificó las galaxias en elípticas, espirales e irregulares.

A la secuencia de Hubble también se le conoce como *diagrama diapasón* a consecuencia de la forma de su representación gráfica. A continuación se describen los distintos tipos morfológicos:

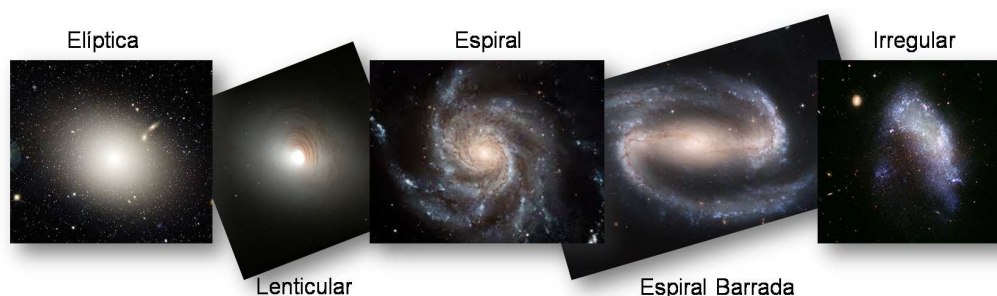


Figura 1.4: Tipos de Galaxias. En la imagen se muestran ejemplos de los diferentes tipos de galaxias, de izquierda a derecha: galaxia NGC 4486 [E0-1], NGC 2787 [SB0], NGC 1309 [SA(s)bc], NGC 1300 [(R')SB(s)bc] y NGC 1427A [IB(s)m].

★ Elípticas

Las galaxias elípticas (*E*) tienen isofotas (contornos que a lo largo de la superficie brillante de una fuente es constante) casi elípticas, no tienen una estructura claramente definida. Se subdividen

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.2. PROPIEDADES FÍSICAS DE LAS GALAXIAS

según su elipticidad $\epsilon \equiv 1 - \frac{b}{a}$ (a semieje mayor y b semieje menor). Su densidad estelar aumenta en el núcleo central.

La mayoría de galaxias elípticas son débiles dado que son muy escasas en material interestelar y por tanto la formación de estrellas es mínima, están compuestas por estrellas rojas y viejas de población II.

Este tipo de galaxias difieren en sus luminosidades y tamaños, una subdivisión es la siguiente:

Elípticas normales. Comprenden elípticas gigantes (GE), de luminosidad intermedia (E) y compactas (ce).

Elípticas enanas (dE). Estas difieren de las cE en que tienen un brillo de superficie significativamente menor y una menor metalicidad.

Galaxias CD. Estas son extremadamente luminosas y grandes (de $R \sim 1Mpc$), por lo general se encuentran en el centro de los cúmulos densos de galaxias. Poseen un halo estelar extendido y se ha observado que tiene múltiples núcleos galácticos.

Galaxias azules enanas compactas. Estas galaxias (BCD) son claramente más azules que otras elípticas y contienen una cantidad apreciable de gas en comparación.

Esferoidales enanas (dSph). Muestran una luminosidad y brillo superficial muy bajo.

Los perfiles de brillo de E y CD siguen un perfil de Vaucouleurs, en el caso de DE y $dSph$ siguen una distribución diferente. En particular, el brillo de la superficie disminuye en E con luminosidad creciente, mientras que aumenta para DE y $dSph$. Los rangos de magnitud bolométrica son: -8 a -25 y en masa de $10^7 M_\odot$ a $10^{14} M_\odot$.

★ *Lenticulares*

Estas galaxias son una transición entre elípticas y espirales, presentan una formación similar a las elípticas. Contienen una protuberancia y una gran envolvente de brillo poco estructurada, que a menudo aparece como un disco sin brazos espirales, pero poseen núcleo.

Están formadas por estrellas viejas y aunque carecen prácticamente de gas, poseen cantidades importantes de polvo. El disco suele ser muy plano y el núcleo mayor que el de las galaxias espirales. En las galaxias lenticulares se encuentran muchas estrellas viejas, las cuales giran alrededor del núcleo de la galaxia. Por esta razón se piensa que son galaxias muy viejas, aunque siguen estando en constante movimiento. Casi no tienen materia interestelar aunque quedan remanentes de gas y polvo interestelares. Los rangos de magnitud bolométrica son: -17 a -22 y en masa de $10^{10} M_\odot$ a $10^{12} M_\odot$.

★ *Espirales*

Este tipo de galaxias consisten en un disco con estructura espiral con brazos y una protuberancia central. Se dividen en dos subclases: espirales normales (S) y espirales barradas (SB). En comparación con las elípticas, las espirales cubren una gama menor en magnitud absoluta y masa. Los rangos de magnitud bolométrica son: -16 a -23 y en masa de $10^9 M_\odot$ a $10^{12} M_\odot$. Los brazos espirales son las regiones más azules y contienen estrellas jóvenes y regiones HII. El perfil brillo de la protuberancia de espirales se describe mediante un perfil de Vaucouleurs, mientras que el disco sigue un perfil de brillo exponencial.

a) *Espirales normales.* Las galaxias de este tipo, contienen un disco galáctico aplanado en el cual se encuentran los brazos, un bulbo central galáctico con un núcleo denso y un halo extendido de estrellas débiles y viejas. La densidad estelar es mayor en el núcleo galáctico. En el esquema de Hubble una galaxia espiral se denota por la letra S y se clasifica en 3 tipos: a , b y c .

b) *Espirales con barra.* Este tipo de galaxias difieren de las espirales ordinarias principalmente por la presencia de una barra alargada de materia estelar e interestelar que pasa por el centro y se extiende más allá del bulbo, en el disco y la cual afecta el movimiento de las estrellas. Los brazos surgen de los extremos de la barra. En el esquema de Hubble una galaxia espiral barrada

se denota por las letras *SB*, se divide en tres categorías: *SBa*, *SBb* y *SBc*.

La barra en estas galaxias perturba la simetría axial del potencial gravitacional, que puede tener una serie de consecuencias. Una de ellas es que esta perturbación puede conducir a una redistribución del momento angular de las estrellas, el gas y la materia oscura. Además, puede perturbar las órbitas, el gas puede ser conducido hacia el centro de la galaxia que puede tener consecuencias importantes para la actividad de activación nuclear.

★ *Irregulares*

La última clase de galaxias identificadas por el Hubble son las galaxias irregulares, llamadas así, porque su aspecto visual no permite colocarlas en las demás categorías. Este tipo de galaxias, tienden a ser ricas en materia interestelar así que es posible que tengan formación estelar activa y por tanto son ricas en estrellas jóvenes y azules. Carecen de una estructura regular, como brazos espirales o bulbo central. Los rangos de magnitud bolométrica son: -13 a -18 y en masa de $10^8 M_\odot$ a $10^{10} M_\odot$.

La mayor parte de estas galaxias son pequeñas y débiles, tienden a ser más pequeñas que las espirales, pero algo mayor que las elípticas enanas. Se clasifican en dos subclases *Irr I* e *Irr II*, las galaxias del tipo *Irr I* por lo general parecen espirales deformadas y las de tipo *Irr II* son asimétricas y sus formas distorsionadas parecen deformaciones causadas por colisiones galácticas. Las *nubes de Magallanes* son un ejemplo de este tipo de galaxias.

Galaxias activas

Además de la clasificación morfológica antes mencionada, existe otro tipo de clasificación que organiza galaxias extremadamente luminosas y compactas las cuales se denominan *Galaxias Activas*. En un sentido amplio, se considera como galaxias activas aquellas que, independientemente de su morfología, presentan una significativa emisión de energía en sus regiones nucleares, emisión que no puede explicarse por los mecanismos conocidos en la mayoría de las galaxias. Existen dos tipos de galaxias activas: *Starburst* y *AGN*.

★ *Starburst*

Este tipo de galaxias en el Universo, tienen una vida agitada en su interior, en muchas de ellas se están produciendo tasas inusualmente altas de formación estelar a gran escala y su luz está dominada por la emisión óptica e infrarroja de estrellas jóvenes masivas.

Este tipo de efecto se origina generalmente cerca del centro galáctico y a veces en el disco. Aún no se sabe con certeza el origen del aumento de formación estelar, pero se piensa que puede originarse de la colisión de galaxias o por el encuentro gravitacional en un sistema de galaxias en interacción.

★ *AGN*

Casi todas las galaxias tienen un agujero negro en su centro, mientras el agujero negro está activo, atrapa e ingiere toda la materia que le rodea. Cuando ya no tiene capacidad para ingerir más, la materia continúa girando en torno a él, pero ya no cae dentro. Las galaxias cuyo agujero negro aún está activo se llaman galaxias activas. Los núcleos galácticos activos (AGN) comprenden las fuentes estables más poderosas en el Universo. La emisión está distribuida a través de todo el espectro electromagnético, generalmente la emisión tiene un pico en el UV, pero con luminosidad significativa en las bandas de rayos-X e infrarrojo.

Se conocen distintos tipos de galaxias activas entre las cuales se encuentran los cuásares, blazares, radiogalaxias y galaxias Seyfert. Los cuásares y los blazares son los objetos más lejanos y de mayor energía que se conocen. Se observan tal y como eran en el pasado, cuando las galaxias aún se estaban formando, además son los objetos más brillantes del Universo, a pesar de que están lejos, su luz llega débilmente. Por otra parte, las radiogalaxias y las galaxias Seyfert son objetos más cercanos y también muy brillantes, emiten rayos X, radiación infrarroja y ondas de radio, su radiación es tan grande, que son la principal fuente de ondas de radio de todo el Cosmos.

Sistemas de galaxias

Es frecuente encontrar en el universo estructuras aisladas, relativamente bien definidas, constituidas por objetos cuya situación de equilibrio y movimientos que describen, son el resultado de la acción gravitacional producida por el conjunto de todos ellos. Las galaxias son ejemplo de la tendencia a la agrupación jerarquizada que muestran todos los objetos celestes, dado que forman sistemas de todos los tamaños.

Nombre del sistema	No. de Galaxias	Cantidad en $M_{\odot}$
Par / Triplete	2 / 3	$\sim 10^{12} M_{\odot}$
Grupo	~ 10	$\sim 10^{12} - 10^{13} M_{\odot}$
Cúmulo Pobre	~ 100	$\sim 10^{13} - 10^{14} M_{\odot}$
Cúmulo Rico	~ 1000	$\sim 10^{14} - 10^{15} M_{\odot}$
Supercúmulo	~ 10000	$\sim 10^{15} - 10^{16} M_{\odot}$

Tabla 1.1: Agrupación jerarquizada de las galaxias [2].

En las escalas más grandes del Universo visible, la materia se agrupa en filamentos y extensas paredes o muros rodeadas de vacío a modo de enormes burbujas huecas con los supercúmulos en forma de nodos, dichas estructuras se mantienen cohesionadas por la fuerza de la gravedad. A continuación se hace una breve descripción de cada sistema:

★ Grupos

El tipo más común de los sistemas de galaxias son grupos pequeños e irregulares de unas pocas decenas de galaxias. La mayoría de los grupos de galaxias contienen una alta proporción de las galaxias que tienen peculiaridades morfológicas o cinemáticas, radio nuclear, emisión de infrarrojos y núcleos galácticos activos (AGN).

Los valores típicos para su masa son $M \lesssim 3 \times 10^{14} M_{\odot}$ y tienen diámetros $D \lesssim 1,5h^{-1}\text{Mpc}$.

La *vía láctea* y las galaxias más próximas como las *Nubes de Magallanes*, *Andrómeda*, *M32* y aproximadamente otras treinta más, forman el *Grupo Local de Galaxias*. Este grupo es todavía joven y forma parte de una estructura aún mayor, llamada *Supercúmulo de Virgo*.

★ Cúmulos

Los cúmulos de galaxias se caracterizan por la concentración espacial de las galaxias. Un sistema de galaxias puede ser definido como un cúmulo si contiene un número más grande (al menos 50) de las galaxias brillantes. Los cúmulos tienen tres componentes principales: *a)* galaxias que contienen estrellas, gas y polvo; *b)* nubes de gas intracumular caliente (ICM) y *c)* materia oscura, una misteriosa forma de materia que hasta ahora ha escapado a la detección directa con cualquier tipo de telescopio, pero hace sentir su presencia a través de su atracción gravitacional sobre las galaxias y el gas caliente.

Las galaxias determinan la apariencia óptica de un cúmulo, la masa contenida en las galaxias contribuye sólo una pequeña fracción de la masa total. Los cúmulos de galaxias son fuentes intensas de radiación de rayos X que se emite por un gas caliente ($T \sim 3 \times 10^7 \text{K}$) situado entre las galaxias (medio intracumular, ICM). A partir de la dinámica de las galaxias, de las propiedades de la emisión de rayos X de los cúmulos y del efecto de lente gravitacional se deduce la existencia de la materia oscura, la cual domina la masa del cúmulo, como lo hace para las galaxias.

Los cúmulos de galaxias son las estructuras más masivas unidas gravitacionalmente en el Universo, los valores típicos para su masa son $M \gtrsim 3 \times 10^{14} M_{\odot}$ y tienen diámetros $D \gtrsim 1,5h^{-1}\text{Mpc}$.

En el caso particular de los cúmulos, se han propuesto diversas clasificaciones basada en

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.2. PROPIEDADES FÍSICAS DE LAS GALAXIAS

Grado de Riqueza	No. de Galaxias
0	30-49
1	50-79
2	80-129
3	130-199
4	200-300
5	< 300

Tabla 1.2: Grado de riqueza

distintos criterios. Abell, et al. [2] propusieron una clasificación basada en el número de galaxias que contiene el cúmulo o también llamado el grado de riqueza.

Para generar la clasificación de los cúmulos, se han usado diversos criterios como:

- Riqueza [1].
- Forma de la distribución de las galaxias [2].
- Concentración [34].
- Distribución de los miembros más brillantes [28].
- Presencia o ausencia de una galaxia cD [3].
- Morfología de la galaxia dominante [3] [1].
- Subestructuras.
- Contenido de galaxias (E-rico, Sp-rico, azul-rico, ...).

Propiedad	Regular	Intermedio	Irregular
Tipo Zwicky	Compacto	Medio	Abierto
Tipo Bautz-Morgan	I, I-II, II	II, II-III	II-III, III
Tipo Rood-Sastry	cD, B, L, C	L, C, F	F, I
Tipo Oemler	CD, pobre en Espirales	Pobre Espirales	Rico en Espirales
Simetría	Esférica	Intermedia	Irregular
Concentración	Alta	Moderada	Baja
Perfil central	Precipitado	Intermedio	Plano
Emisión de Radio	50 %	50 %	20 %
Luminosidad en rayos X	Alta	Intermedia	Baja
Subestructura	Ausente	Moderado	Significativa
Riqueza	Ricos	Moderado	Pobres
Ejemplos	Coma	Abell 194	Virgo

Tabla 1.3: Comparación y tendencias generales de la clasificación morfológica de los cúmulos.

Criterios basado en la distribución de 10 galaxias más brillantes del cúmulo por Rood & Sastry [28]

- CD → Dominante solo CD.
- B → Binario dominante.
- L → Formación lineal de las galaxias.
- C → Solo núcleo de las galaxias.
- F → Distribución aplanada.
- I → Distribución irregular.

★ *Supercúmulos*

Estas estructuras son complejas y se forman a partir de 2 o más cúmulos galácticos interactuando gravitatoriamente entre sí. Los diámetros de los supercúmulos son alrededor de 10 – 20 Mpc ,

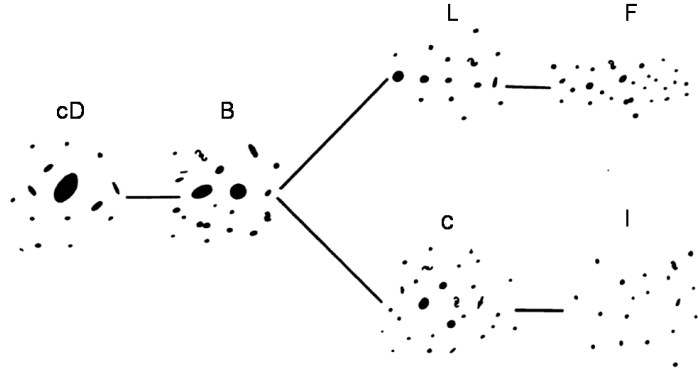


Figura 1.5: Esquema de clasificación de Cúmulos ricos por Rood & Sastry [28], según la distribución de las 10 galaxias más brillantes en el cúmulo.

la gravedad es tan grande que toda la materia se atrae y por eso se crean enormes espacios vacíos entre unos supercúmulos y otros.

El Grupo Local al que pertenece la Vía Láctea, forma parte del Supercúmulo de Virgo. El Supercúmulo de Coma, que también es conocido como Abell 1656, es una pequeña estructura del Universo. Localizado a 300 millones de años luz de la Tierra y se encuentra en el centro de la Gran Muralla. Ha sido uno de los primeros supercúmulos en ser descubiertos y ha ayudado mucho a los astrónomos a entender la estructura del Universo.

★ Estructura del Universo

La gravedad es la fuerza de trabajo que produce los largos filamentos de grupos en torno a enormes burbujas de espacio vacío. La materia oscura tiene que desempeñar un papel importante, sin embargo, aún no se sabe cómo lo hace. Los astrónomos usan supercomputadoras para simular las interacciones gravitacionales de millones de partículas y para observar el comportamiento de la materia oscura en el código de simulación. Los primeros resultados de las simulaciones fueron capaces de producir la estructura filamentosa y huecos. El comportamiento de la materia oscura que se ajusta al agrupamiento de las galaxias observadas viene de la materia oscura formada por partículas que son masivas de interacción débil y sólo responden a la gravedad.

Evolución de galaxias en cúmulos

Desde los inicios de la Astronomía extragaláctica ya se había notado que las galaxias *E* son más frecuentes en cúmulos de galaxias que en el campo. Un estudio sistemático hecho por A. Dressler [10] a partir de 55 cúmulos de galaxias, determinó que hay una relación entre la proporción de tipos morfológicos y la densidad de galaxias del medio. La fracción de galaxias elípticas es mayor en las regiones más densas (regiones centrales de los cúmulos de galaxias), los medios más densos poseen más galaxias tempranas de tipo *E* y *S0* y medios menos densos galaxias tardías del tipo *S* y *Irr*.

La imagen 1.6 es una gráfica que muestra la *relación morfología-densidad*, cada curva representa el cambio en la fracción de un tipo de galaxia respecto a la densidad proyectada del medio. Existe una fuerte correlación entre el tipo morfológico y la densidad local proyectada de galaxias. Dressler examinó la relación densidad-morfología para cúmulos de alta concentración de galaxias, baja concentración y cúmulos con una fuerte emisión en rayos X; en todos los casos, la relación que encontró fué similar. Para las tres muestras, la fracción de galaxias elípticas es la misma, mientras que la fracción de espirales es más baja en los cúmulos con gran emisión en rayos X. Esto

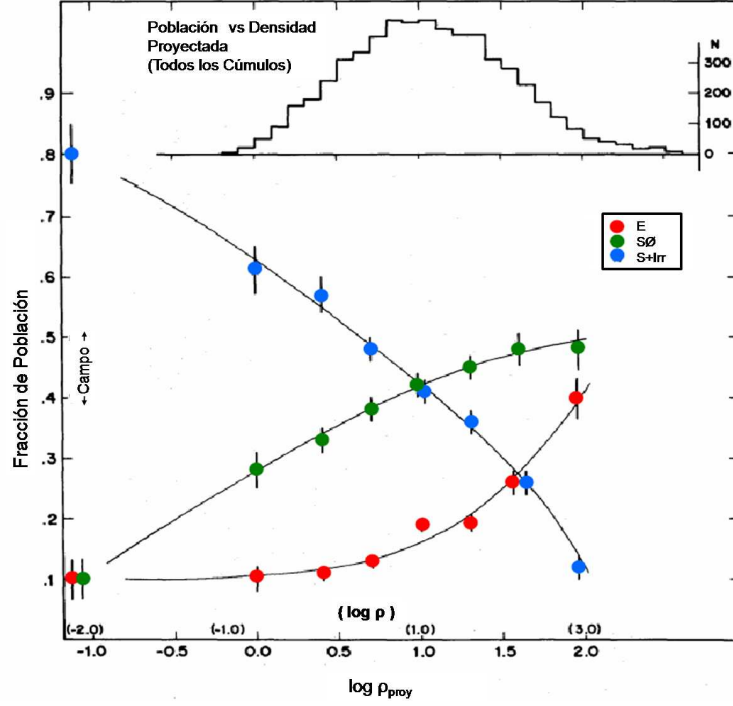


Figura 1.6: Relación Morfología-Densidad [10] Relación entre la densidad local proyectada de galaxias y el tipo morfológico para 55 cúmulos.

sugiere que las propiedades globales de los cúmulos pueden influir en la morfología de las galaxias. Se han propuesto diferentes mecanismos para explicar cómo influye el medio ambiente en las galaxias: interacciones entre las galaxias y el medio intracúmulo, interacciones gravitacionales entre las galaxias e interacciones entre las galaxias y el potencial del cúmulo.

El primer modelo se basa en efectos gravitacionales, incluye todo tipo de interacciones de marea:

- *Galaxia-Galaxia*; este tipo de interacción actúa sobre el gas, polvo y estrellas, así como en la materia oscura, lo cual produce transformaciones morfológicas. La fuerza de marea actúa como M/R^3 . Las simulaciones de Byrd y Valtonen [7] muestran que las interacciones de marea producen entrada de gas suficiente desde el disco a las regiones circumnucleares, siempre que el parámetro de perturbación:

$$P_{gg} = \frac{(M_{comp}/M_{gal})}{(d/r_{gal})^3},$$

sea $P_{gg} \geq 0,006 - 0,1$ (dependiendo de la relación halo-disco-masa). Donde M_{comp} es la masa de la galaxia compañera, M_{gal} y r_{gal} son la masa y el radio del disco visible de la galaxia espiral, respectivamente y d es la separación entre las dos galaxias.

- *Galaxia-Cúmulo*; Dada la gran masa de cúmulos (superior a $10^{14}M_{\odot}$), las interacciones de marea entre las galaxias y el potencial del cúmulo, pueden generar la entrada de gas, formación de barras y formación de estrellas en el núcleo. Los modelos de Fujita [13] y Henriksen & Byrd [17] muestran que las fuerzas de marea por el potencial del cúmulo, puede acelerar nubes moleculares de las galaxias que caen hacia el centro de la agrupación. El aumento de la presión cinética en el medio interestelar induce la formación de estrellas. La eficiencia de la interacción puede ser cuantificada

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.2. PROPIEDADES FÍSICAS DE LAS GALAXIAS

por el parámetro P perturbación, definido como:

$$P_{gc} = \frac{(M_{\text{cúmulo}}/M_{gal})}{(R/r_{gal})^3},$$

donde R es la distancia de la galaxia al centro del cúmulo.

- *Efecto combinado de múltiples encuentros entre galaxias* (“*Galaxy Harassment*”, en inglés); Moore et al. [23] [24] [25] proponen que la evolución de las galaxias de cúmulos se rige por el efecto combinado de múltiples encuentros entre galaxias cercanas ($\sim 50 Kpc$) de alta velocidad y la interacción con el pozo de potencial del cúmulo. Este fenómeno depende de la frecuencia de colisión, la fuerza de las colisiones individuales, campo de marea del cúmulo y la distribución de la potencial dentro de las galaxias.

El segundo modelo hace referencia a las interacciones hidrodinámicas, las cuales se dan entre el Medio Interestelar (ISM) de la galaxia y el medio intergaláctico. En estos modelos se considera la fuerza de restitución, la cual es reactiva, es decir, es una reacción del objeto ante la fuerza activa que lo tiende a deformar, en el caso de una galaxia, ésta fuerza está dada por la densidad superficial de estrellas y la densidad de gas que se encuentra en el disco (en este caso hidrógeno atómico HI). Para obtener la fuerza de restitución se utiliza la siguiente ecuación:

$$F_R = 2\pi G \sigma_{tot} \sigma_{gas},$$

donde σ_{tot} es la densidad superficial total y σ_{gas} es la densidad superficial del gas. En los siguientes párrafos se describen distintos mecanismos hidrodinámicos.

- *Presión de Empuje* (“*Ram Pressure*”, en inglés); Gunn y Gott [14] propusieron que el medio interestelar (ISM) podía ser removido de las galaxias que se mueven a velocidades cercanas a 1000Km/s a través del medio intergaláctico por medio de un mecanismo de presión empuje. El efecto Ram Pressure puede eliminar el ISM si supera la presión gravitacional fijando el gas en el disco [14].

$$\rho_{IGM} V_{gal}^2 \geq 2\pi G \sum_{estrella} \sum_{gas},$$

donde ρ_{IGM} es la densidad del medio intergaláctico (IGM), V_{gal} es la velocidad de la galaxia dentro del cúmulo, $\sum_{estrella}$ es la densidad superficial de la estrella y $\sum_{gas}$ es la densidad superficial del gas. Los distintos modelos que se han hecho para simular este fenómeno, coinciden en establecer que este mecanismo es suficiente para eliminar el ISM de las galaxias en escalas de tiempo comparables al cruce de la misma por el cúmulo ($\sim 10^9$ años).

- *Presión de Viscosidad* (“*Viscous Stripping*”, en inglés); Nulsen [27] lo propuso como un posible mecanismo para eliminar el gas de las galaxias en los cúmulos. Si una galaxia (de radio r_{gal}) que lleva su frío y denso ISM (Medio interestelar) viajando a velocidad V_{gal} a través del medio intergaláctico caliente (T_{IGM}) y tenue (r_{IGM}), las capas exteriores de su ISM transfieren un momento de viscosidad que es suficiente para desprender gas en algún tipo de fusión [4]

- *Evaporación Térmica*: Este mecanismo es eficiente para eliminar el gas en las galaxias del cúmulo. Si la temperatura IGM es alta comparada con la velocidad de dispersión de la galaxia, en la interfaz entre el medio intergaláctico (IGM) caliente y el medio interestelar (ISM) frío, la temperatura del ISM se eleva rápidamente, se evapora el gas y no es conservada por el campo gravitatorio [4].

También se presentan otros dos procesos híbridos, los cuales combinan mecanismos gravitacionales e hidrodinámicos:

- *Inanición* (“*Starvation*”, en inglés); Larson et al. [21] propuso un proceso para explicar la transformación de las galaxias espirales en lenticulares. En las galaxias, el gas que produce la formación estelar proviene de una reserva del gas que proviene del halo externo y cae en el disco. En una escala de tiempo de unos cuantos 10×10^9 años, la formación estelar agotaría el

gas disponible, sofocando la formación estelar futura y dejando a la galaxias con un disco sin estructura espiral.

- *Preprocesamiento* (“*Preprocessing*”, en inglés); De acuerdo con el escenario jerárquico de la formación de estructuras a gran escala, los grupos de galaxias que caen en los cúmulos de galaxias representan los bloques de construcción de los cúmulos ricos de galaxias de hoy en día. Infraestructuras observadas en los estudios de rayos X y la cinemática de los cúmulos de galaxias son la evidencia más fuerte a favor de este mecanismo de formación de cúmulos [20] Los grupos de galaxias por lo tanto pueden representar sitios naturales para una etapa de preprocesamiento en la evolución de las galaxias, a través de las interacciones de marea.

1.3. El Cúmulo Abell 85

El cúmulo de Abell 85 es un sistema complejo que ha sido estudiado en radio continuo, en la región óptica y en rayos X. Las investigaciones a cerca del cúmulo han determinado que se trata de un sistema dinámicamente joven.

En particular se tiene un gran interés, ya que es probable que se den diversos mecanismos físicos que afecten la evolución de las galaxias. El estudio de HI demostró que la distribución de galaxias azules es asimétrica y de la revisión de 42 galaxias, se encontró que 30 son deficientes en HI [5], es decir, que no hay mucho hidrógeno neutro.

Las razones por las cuales se ha elegido este cúmulo es con el fin de analizar los mecanismos hidrodinámicos que afectan a las galaxias espirales y por medio de las observaciones en infrarrojo se pueden comparar los posibles efectos gravitacionales en discos estelares.

Abell 85 es un cúmulo rico de clase I (Ver Tabla 1.2), de tipo esférico, se encuentra en dirección de la constelación *Acuario* ($00h41m37,8s$, $-09d20m33s$), la velocidad de recesión es de $16507Km/s$ y tiene un redshift $z = 0,055061$.

El cúmulo contiene una galaxia cD cerca de su centro y existen dos grupos cerca de la proyección de Abell 85 que son Abell 89 y Abell 87. De las investigaciones que se han realizado [11] se concluyó que Abell 89 esta constituido por dos capas de galxias en el fondo, en cambio Abell 87 es un grupo individual que se mueve en torno a Abell 85. El cúmulo tiene las siguientes subestructuras:

- *Núcleo*: Contiene una galaxia principal (cD) y un grupo de galaxias en una etapa avanzada de fusión con la galaxia principal. El cúmulo es fuerte dinámicamente y es muy activo.
- *La región SB*: Se encuentra proyectada a unos $10'$ al sur de la galaxia central *cD*, posiblemente consiste en un grupo de galaxias en fusión [19] las galaxias dentro de esta estructura tienen velocidades alrededor de $17000Km/s$.
- *Región SE*: Se encuentra cerca de la posición proyectada del cúmulo Abell 87, consiste en un grupo con desviaciones cinemáticas, probablemente se trata de un subgrupo relativamente pobre sufriendo una acreción a gran velocidad hacia Abell 85. La mayoría de las galaxias tienen color azul, con morfología tipo tardías, y tiene velocidades alrededor de $15800Km/s$. Las galaxias azules más brillantes son 42 en el rango de velocidades entre $14600 - 18400Km/s$ [5].
- *Región W*: Tiene casi la misma distancia proyectada desde el centro de la agrupación al igual que la región SE. Las galaxias contenidas aquí tienen velocidades alrededor de $18000Km/s$.
- *Región NE*: Es una estructura posible, ya que no se ha detectado una estructura cinemática. Tiene una extensión muy grande y hay un número pequeño de galaxias, las cuales han sido detectadas en HII.

De acuerdo a los estudios que se han realizado, se predice que el mecanismo de *ram pressure stripping* es el mecanismo más importante responsable de la pérdida de gas interestelar, por lo que las galaxias se ven afectadas debido a este proceso en la zona intermedia y en la periferia del cúmulo [5].

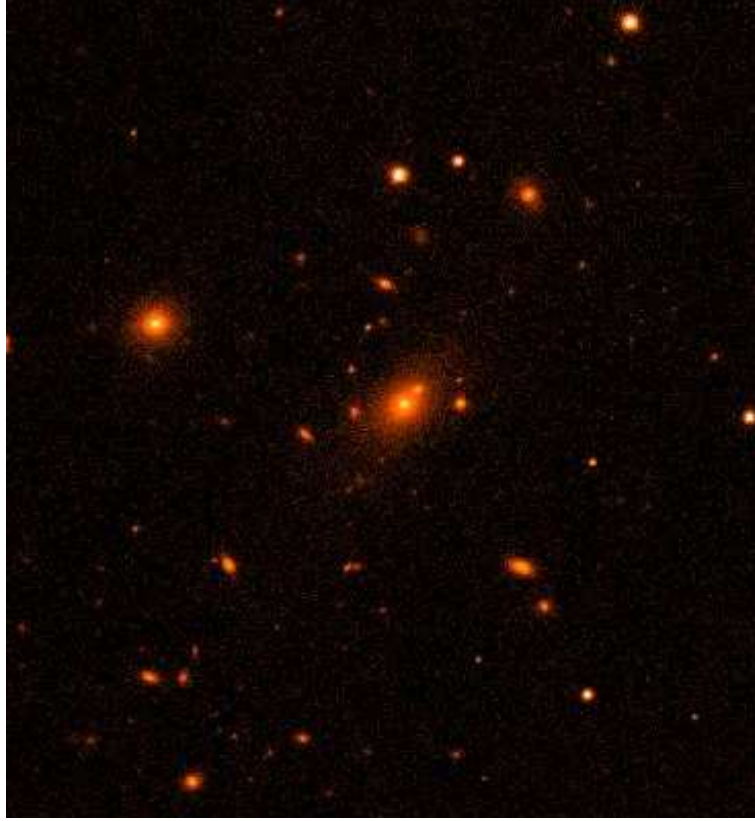


Figura 1.7: Cúmulo de galaxias Abell 85. Imágen obtenida de SDSSr (Sloan Digital Sky Survey, red), tamaño $0,1 \times 0,1$ grados, centrado en (J2000) 00h 41m 43s, -09d 26m 24s.

La imagen anterior muestra cada subgrupo en su posición de rayos X y se representa en ascensión recta al plano de la velocidad. Esto sugiere que una corriente de material, está cayendo sobre el núcleo principal de Abell 85. También se observan dos estructuras con las mayores velocidades (amarillo y cian), las cuales parecen trazar dos capas de galaxias, ambas están inclinadas a lo largo de la línea de visión y parece que se cruzan [11].

1.4. El Cúmulo Abell 1367

Abell 1367 es un cúmulo rico de clase II (Ver Tabla 1.2), se encuentra en dirección de la constelación *Leo* ($11h44m29,5s$, $+19d50m21s$). La velocidad de recesión es de 6595 Km/s y tiene un redshift $z = 0,022000$. Junto con Abell 1656 (cúmulo de Coma) constituyen la mayor parte del supercúmulo de Coma.

Abell 1367 al igual que Abell 85, es un conjunto dinámico joven, en el cual se ha determinado su contenido en *HI* [8] Tiene galaxias brillantes de tipo tardío (espirales) en un volumen centrado en un subgrupo (NW), Scott et al [30] hizo un análisis el cual reveló que el cúmulo contiene espirales en una amplia gama de estados evolutivos, imágenes de VLA-D centradas en el subgrupo NW indica la mayoría de las galaxias en ese campo tienen su máxima intensidad *HI* desplazados con respecto a su contraparte óptica, lo que implica una perturbación reciente y fuerte.

En la parte central se encuentran 2 galaxias elípticas que dominan el centro del cúmulo. Una de estas galaxias es NGC 3842 y alrededor de ella se encuentran proyectados 3 cuásares. Por otra

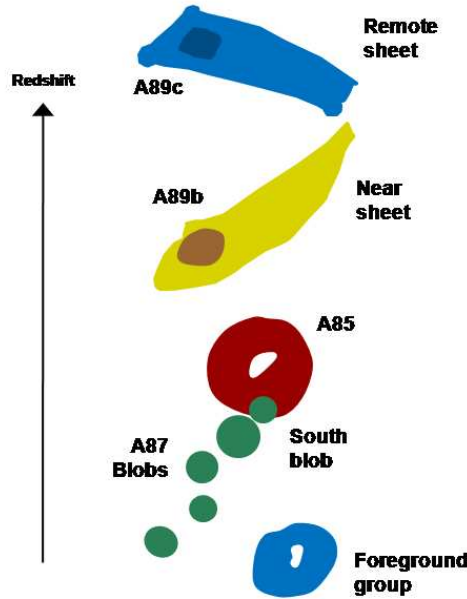


Figura 1.8: Cúmulo Abell 85, distribución de los grupos 85/87/89 que se encuentran en el mismo corrimiento al rojo. Las dimensiones no están en la misma escala.

parte se encuentran varias galaxias espirales orientadas hacia la galaxia NGC 3842. Estas galaxias que caen, tienden a mostrar una mayor formación de estrellas de un lado y largas colas de gas en dirección opuesta. Normalmente los cúmulos están dominados por galaxias elípticas, sin embargo, en este caso Abell 1367 tiene una mayor porción de galaxias espirales, por tal razón se piensa que se formó tiempo después en que se formaron la mayoría de los cúmulos.

A diferencia de Abell 85, las galaxias de Abell 1367 detectadas en HI, presentan deformaciones que indican una interacción de marea entre los miembros del grupo.

T.C. Scott et al [31] presentan una serie de resultados en HI de dos grupos de galaxias: RSCG 42 y FGC 128, las cuales se proyectan al oeste del cúmulo a $\sim 1,8$ y $2,7$ Mpc. *The Arecibo Galaxy Environment Survey*, proporcionó evidencia de que las regiones de HI se extienden más allá de los 200Mpc en ambos grupos. Observaciones con mayor resolución revelan que las regiones de HI son en realidad colas extraordinariamente largas que se extienden por 160 y 250Kpc respectivamente (se encuentran entre las estructuras más largas de HI observadas en los grupos de galaxias).

En particular, la cola de HI de RSCG 42, presenta una morfología y dinámica, así como propiedades ópticas de los integrantes del grupo, que parecen estar en un esenario de interacción de marea. Sin embargo, el origen de las características asociadas al grupo FGC 1287 no son claras, esta galaxia muestra una excepcional cola larga de HI, debido a la gran distancia que hay respecto a Abell 1367, no permite que haya un efecto de *ram pressure* por otra parte no es posible tener una interacción de marea debido a las bajas velocidades, de tal manera que parece imposible explicar la gran longitud de la cola y la falta de señales de perturbación. Por tal razón, se piensa que podría ser que la galaxia haya experimentado recientemente una interacción de alta velocidad con algún miembro del cúmulo Abell 1367 o del cúmulo de coma. Mientras que el mecanismo responsable queda por determinar, este descubrimiento pone en evidencia que aún hay efectos ambientales por comprender.

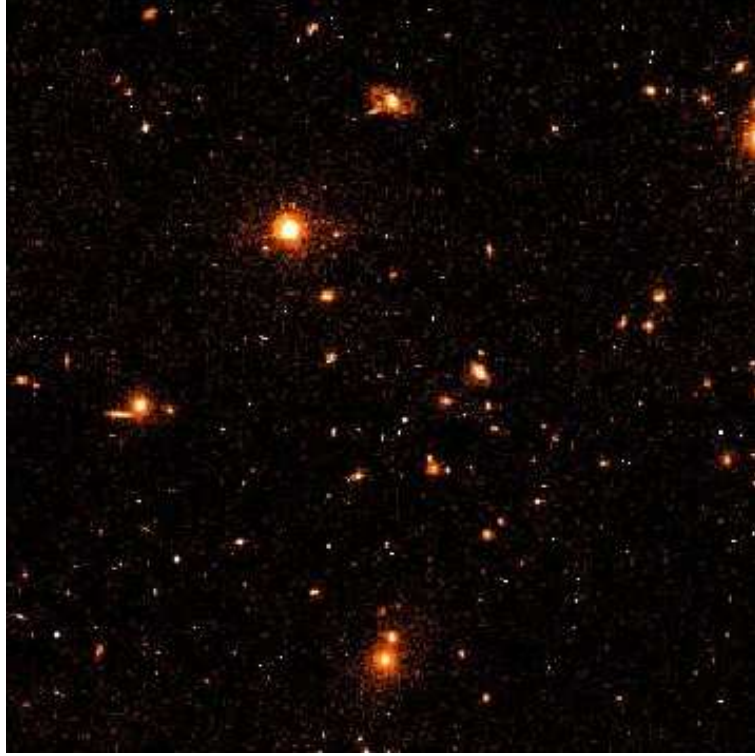


Figura 1.9: Cúmulo de galaxias Abell 1367. Imágen obtenida de SDSSr (Sloan Digital Sky Survey, red), tamaño $0,5 \times 0,5$ grados, centrado en (J2000) 11h 45m 05.41s, 19d 47m 29.7s.

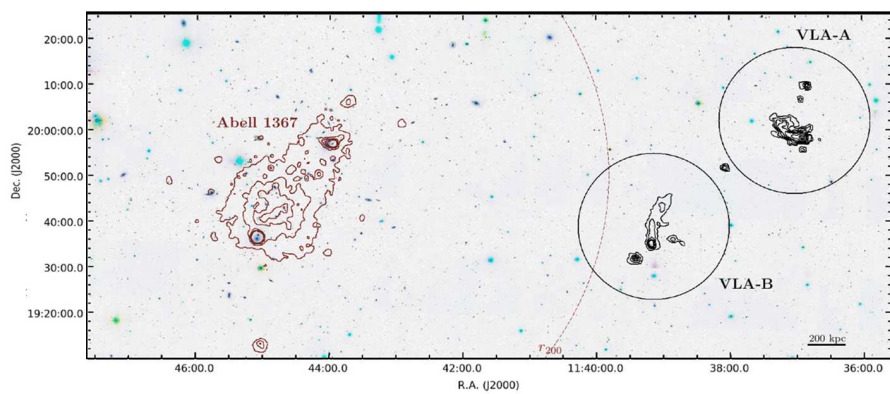


Figura 1.10: Parte central del cúmulo Abell 1367 y los grupos respecto al centro del cúmulo. En los grupos, se muestra en contornos negros la detección en HI obtenida del VLA [31].

Capítulo 2

Observaciones y Tratamiento de Imágenes

2.1. El Telescopio 2,1 m del OAN

Los datos obtenidos para llevar a cabo este trabajo, provienen del *Observatorio Astronómico Nacional* (OAN), el cual se encuentra en la Sierra de San Pedro Mártir en Baja California, en el noroeste de México ubicado a una longitud de $115^{\circ}27'49''$ Oeste y latitud $31^{\circ}02'39''$ Norte a 2830m sobre el nivel del mar. El lugar donde se encuentra es todavía un sitio privilegiado para la observación astronómica. Se analizaron dos cúmulos: Abell85 y Abell1367, los cuales se observaron en temporadas distintas, el primero se realizó en el período del 3 al 11 de Octubre de 2012 y el segundo del 2 al 7 de Febrero del 2012.

El Observatorio Astronómico Nacional es operado por el Instituto de Astronomía de la UNAM. El OAN cuenta actualmente con tres telescopios cuyos diámetros son 2,12m, 1,5m y 0,84m. Para este trabajo de investigación, se utilizó el telescopio de 2,12m.

★ Características del Telescopio

El telescopio tiene una montura ecuatorial y un diseño Ritchey-Chretien, el cual es una modificación del telescopio Cassegrain. En este telescopio los dos espejos son hiperboloidales, y no como en el Cassegrain, donde el primario es paraboloïdal. De esta manera, ambos espejos tienen aberración de esfericidad, pero de valor opuesto, de tal manera que el valor final es cero. Esto es con el propósito de poder corregir no solamente la aberración de esfericidad, sino también la de coma. A cambio de esto, se elimina la posibilidad de usar el espejo primario sin el secundario, pues la aberración de esfericidad está corregida en el sistema total, pero no de manera individual en cada uno de los espejos. En este caso el espejo primario es de 2,12m y tiene tres posibles secundarios de tal manera que: $f/7,5$ ($\sim 13,0''/mm$), $f/13,5$ ($\sim 7,15''/mm$) y $f/30$ ($\sim 3,25''/mm$). Los límites en ascensión recta y declinación son: $AH : 5,5h$ y $DEC : +69^{\circ}40'$ y -40° respectivamente. Cuenta con una platina giratoria manual y el lóbulo de la cúpula tiene 2 segmentos que pueden ponerse arriba o abajo (los 2 o 1) según sea la región del cielo que se observa.

Este telescopio cuenta con los siguientes instrumentos disponibles para su utilización en tres áreas:

- *Espectroscopia*: Espectroscopia óptica, Espectrógrafo Boller & Chivens, Espectrógrafo Echelle clásico REOSC, Espectrógrafo Echelle nebulas MES-SPM e Interferómetro Fabry-Perot PUMA.
- *Infrarrojo*: Camila; IR cercano (1 a 2,5 micras NICMOS) y CID; imagen y espectroscopia e IR medio (1 a 20 micras, InSb, BIB)
- *Imagen directa (óptico)*: Rueda de filtros italiana.

CAPÍTULO 2. OBSERVACIONES Y TRATAMIENTO DE IMÁGENES

2.1. EL TELESCOPIO 2,1 M DEL OAN

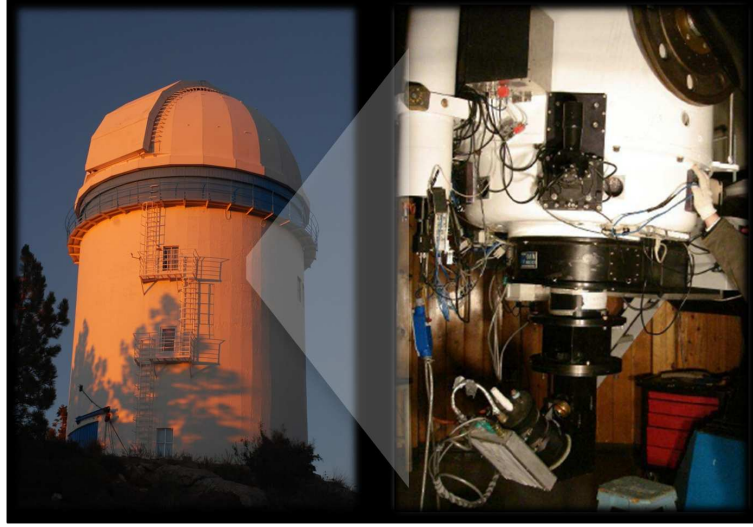


Figura 2.1: A la izquierda se muestra el edificio del Telescopio de 2.12m, a la derecha se muestra la cámara infrarroja Camila.

Para la obtención de datos, se utilizó el instrumento *Camila*.

Camila es un espectrógrafo/cámara criogénico infrarrojo, se compone de un detector CCD (Charge Coupled Device) el cual es un circuito compuesto por un número determinado de sensores acoplados en un arreglo rectangular a manera de pixeles y su funcionamiento principal se basa en el efecto fotoeléctrico: cuando un fotón de luz incide sobre una superficie, si tiene la suficiente energía, conseguirá arrancar algunos electrones del material y con esto se puede generar corriente eléctrica que posteriormente es digitalizada para obtener una imagen. El número de electrones producido es proporcional a la cantidad de luz recibida. La sensibilidad del detector depende de la eficiencia cuántica (cantidad de fotones que deben incidir para producir una corriente eléctrica). En todos los CCD el ruido electrónico aumenta fuertemente con la temperatura, por tal razón, el detector está localizado dentro de una celda criogénica de nitrógeno líquido a 77K ($\sim -196,15^\circ\text{C}$). El detector es de tipo NICMOS 3 (Near Infrared Camera and Multi-Object Spectrometer) con un formato de 256×256 pixeles [9].

Camila es sensible en el intervalo de longitud de onda de 1 a 2.5 micras, tiene dos cámaras de razones focales: $f/13,5$ y $f/4,5$, cuenta con un carrusel de 11 filtros; J, H, K' , HeI, PaGama, BrGama, FeII, H2 (1-0), H2 (2-1), CO y cK, con 12 posiciones, incluye una rueda de diafragmas/rendijas enfriada para reducir el nivel de la radiación de fondo, cuenta con lámparas de comparación y un etalón Fabry-Perot. Las escalas de placa y magnitudes límite dependen de la configuración que se usa.

En este caso se usó la configuración de la cámara con razón focal $f/4,5$, con la cual se obtiene una escala de placa de $0,85''/\text{pixel}$ y un campo de $3,63' \times 3,63'$, para ello se usaron los filtros J, H y K' , los cuales tienen las siguientes características:

Filtro	Longitud de onda λ	Ancho del Filtro $\Delta\lambda$	Magnitud Límite
J	$1.275 \mu\text{m}$	$0.282 \mu\text{m}$	17.6
H	$1.672 \mu\text{m}$	$0.274 \mu\text{m}$	17.0
K'	$2.124 \mu\text{m}$	$0.337 \mu\text{m}$	16.0

Tabla 2.1: Característica de los filtros J, H y K'

CAPÍTULO 2. OBSERVACIONES Y TRATAMIENTO DE IMÁGENES

2.1. EL TELESCOPIO 2,1 M DEL OAN

Estos filtros se encuentran en el rango del infrarrojo cercano. Como se discutió en el capítulo 1, la mayor parte de la radiación infrarroja es absorbida por el vapor de agua de la atmósfera y solo un rango de longitudes de onda la atraviesan. Cada uno de los intervalos de longitud de onda en los que una radiación procedente del exterior de la Tierra puede atravesar la atmósfera sin ser absorbida y así ser detectada por un telescopio en el suelo, se muestra en la siguiente imagen.

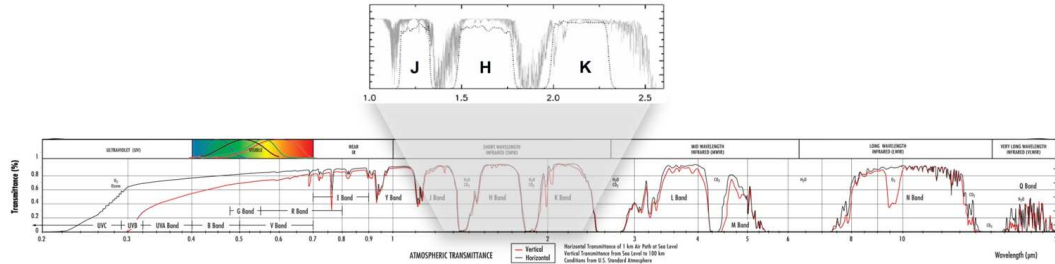


Figura 2.2: Transmitancia de la Atmósfera en todo el rango del espectro. Se muestra en ampliación la región de los tres filtros usados (J, H y K').

A nivel del mar, las únicas ondas electromagnéticas que llegan del cosmos son ondas de radio y luz visible (más una pequeña fracción de radiación infrarroja y ultravioleta) que corresponden a las llamadas ventanas de radio y óptica. Por otra parte, en particular la atmósfera produce un problema en el rango infrarrojo, porque emite fuertemente en esas longitudes de onda, hasta el punto de que en algunas ocasiones la radiación infrarroja de la atmósfera es más fuerte que la de los objetos que se quieren observar. Esta emisión atmosférica tiene un máximo alrededor de $10\mu m$.

★ Obtención de Imágenes

Las imágenes generadas con la interfaz de Camila tienen formato *FITS* (*Flexible Image Transport System*). Para la mayoría de las aplicaciones, donde el ruido dominante es ruido de fotones y radiación de fondo, se trabaja con dos lecturas. De esta manera se generan dos imágenes: la *imagen.b.fits* la cual contiene el resultado de la primera lectura y la *imagen.d.fits* que contiene el resultado de la segunda lectura menos la primera, dividida por el tiempo de integración. Ésta imagen, será la señal neta en conteos por segundo y así se elimina el ruido asociado a una sola lectura.

En una noche de observación se realiza lo siguiente:

- Dos horas antes de que inicie la observación, el domo del telescopio se debe abrir, esto se hace con el fin de equilibrar la temperatura con el ambiente (termalizar el telescopio) y así evitar al máximo la turbulencia.
- Una vez que el Sol se oculta, inicia la observación tomando imágenes que son necesarias para calibrar la respuesta del detector en cada filtro, son llamadas *flat field* (campo plano) se toman 2 tipos, *brillantes* y *oscuros*. Se pueden obtener de varias formas, en este caso se capturaron imágenes del cielo en el crepúsculo y se toman de 20 a 30 por filtro (iniciando con K', H y J). Primero se toman los *flat field bright* e inmediatamente después se toman los *flat field dark*, ambos con tiempos de exposición dependiendo del filtro, debido a que éstos se saturan en tiempos distintos.
- Dado que se realiza la fotometría a los objetos observados, es necesario tomar imágenes de la primer *estrella estándar*. Al momento de tomar estas imágenes, se debe determinar el valor del foco en cada filtro. Para captar las imágenes, es conveniente usar secuencias que automáticamente realicen cambios en la posición del objeto, en este caso se usó la secuencia *cuadro 40* que consta de 5 imágenes por secuencia, como se muestra en la imagen de secuencias. Normalmente se toman

entre 2 y 3 secuencias por filtro.

- Una vez que se tiene la primer estrella estándar, empiezan las observaciones de los campos del cúmulo, se toman imágenes en los tres filtros. En este caso se toman entre 3 y 4 secuencias en los filtros J y H y hasta 5 secuencia en el filtro K', cada secuencia genera 9 imágenes. Se toman con tiempos de exposición desde 5 hasta 30 seg, dependiendo del objeto y del filtro se que usa.
- Finalmente, después de terminar los campos, se toma nuevamente una estrella estándar (diferente a la primera) en los tres filtros, con las mismas características a la primera en cuestión de secuencia y tiempo de exposición. Así finaliza la noche de observación.

2.2. Reducción y Análisis de Imágenes

IMÁGENES FINALES

Para cada noche de observación se tienen los *flats field*, las estrellas estándar y los objetos de estudio. En cada caso, se tienen dos tipos de imágenes (*imagen.b.fits* e *imagen.d.fits*), pero se trabaja únicamente con *imagenes.d.fits*. Estas imágenes son sometidas a un proceso de corrección y para ello se usa el software *IRAF* (*Image Reduction and Analysis Facility*).

IRAF es una gran colección de software escrito por astrónomos y programadores mantenida por el *National Optical Astronomy Observatory* (NOAO), en Estados Unidos, enfocado a la reducción de imágenes astronómicas en *arrays* de píxeles, es decir, datos tomados de detectores de imágenes. Debido a que las imágenes son procedentes de una cámara CCD, implica una *matriz de números*, por lo que al realizar el tratamiento de imágenes, es equivalente a realizar operaciones matriciales. A continuación se describen los diferentes procesos para obtener imágenes finales ("limpias", solo con información del objeto).

◦ **Corrección por bias y dark:** Un *bias*, es una imagen de tiempo de integración cero que mide el *offset* de la electrónica en cada pixel. En este caso la sustracción de *bias* es hecha automáticamente por el programa de adquisición de datos.

Por otra parte la imagen *dark* es capturada con el mismo tiempo de integración que las imágenes de los objetos de estudio y normalmente se genera sin que la luz llegue al detector (por ejemplo cerrando el obturador de la cámara). Esta imagen es el resultado de una corriente eléctrica que fluye a través de dispositivos fotosensibles, en este caso el CCD y se debe a la generación aleatoria de electrones y huecos, que son arrastrados por el campo eléctrico, a este efecto se le llama *dark current*. Esta corrección elimina la señal debida al movimiento térmico de los electrones. En este caso no se realizó la corrección porque los tiempos de exposición de las imágenes son muy pequeños.

◦ **Corrección por Flats:** Es una técnica usada para mejorar la calidad de la imagen digital, el objetivo es eliminar los artefactos de la imagen que son causadas por las variaciones en la sensibilidad de un píxel a otro del detector y/o por las distorsiones en el camino óptico.

Para poder hacer esta corrección, se debe tener una imagen final de *FLATS* (*FBDN.fits*). Y para generarla, se hace lo siguiente:

—◦ Se despliega cada una de las imágenes en *DS9* (aplicación de visualización de imágenes y de datos astronómicos) y se verifica que tengan el mismo número de cuentas, una vez que se hayan analizado todas, se eliminan aquellas que estén fuera del rango. Las imágenes de *flats* brillantes tendrán mayor número de cuentas que los flats oscuros.

—◦ Se combinan las imágenes elegidas de los *flats* brillantes (*FJB.fits*) y por otra parte de los *flats* oscuros (*FJD.fits*), esta combinación se hace usando la mediana de cada imagen.

—◦ Se hace una diferencia de las imágenes obtenidas en el paso anterior: *flat* brillante menos *flat* oscuro:

$$FB.fits - FD.fits = FBD.fits.$$

CAPÍTULO 2. OBSERVACIONES Y TRATAMIENTO DE IMÁGENES

2.2. REDUCCIÓN Y ANÁLISIS DE IMÁGENES

—o Finalmente se normaliza ésta imagen con la media (valor promedio de cuentas por imagen), esto se hace con el fin de facilitar las operaciones de las imágenes que involucran al *flat* final:

$$FBDN.fits = \frac{FBD.fits}{media}.$$

Este *flat* final, permite corregir las diferencias de sensibilidad en diferentes regiones ópticas en la cámara. El procedimiento anterior, se realiza para cada filtro.

◦ **Sustracción de emisión del cielo en el cercano IR:** La radiación del cielo en el infrarrojo es muy brillante y varía con mucha frecuencia, por eso es imprescindible alternar observaciones del objeto de interés con observaciones del cielo.

En este caso la observación de nuestros objetos se obtuvieron por medio de secuencias programadas de imágenes, esto se hace al ir moviendo el telescopio a posiciones cercanas. Y para obtener la imagen que usaremos para la corrección se combinan las imágenes de cada una de las secuencias con la mediana y dado que el objeto se encuentra en diferentes posiciones, la imagen final será homogénea, es decir, ya no contendrá ningún objeto y solo quedará la emisión IR del cielo. Este procedimiento se realiza para cada campo observado, así como para las estrellas estándar, en cada secuencia y para cada filtro.

Las imágenes que se describieron anteriormente, se van a usar para *limpiar* las imágenes de los objetos de estudio.

Por otra parte, para hacer un análisis de los objetos de interés, es necesario que las imágenes proporcionen información únicamente del objeto y para ello se realizan una serie de procesos usando el software *IRAF*. Como se menciono anteriormente, las imágenes se obtienen en secuencias, es decir, los objetos de estudio se encuentran en distintas posiciones, como ejemplo, se muestra la imagen de una estrella estándar en las 4 posiciones posibles. En el caso de las estrellas estándar, las secuencias son de 5 imágenes, por tanto la estrella de la imagen 5 se encuentra en la misma posición que la 1. En el caso de los objetos de estudio, las secuencias son de 9 imágenes, por lo tanto, a partir de la imagen 5, la secuencia se repite, de manera que la imagen final se encuentra en la misma posición de la imagen 1.

—o Primero se deben desplegar las imágenes en *DS9* y verificar que cada secuencia este completa, es decir, que las posiciones del objeto sean correctas (como en la imagen anterior).

—o Una vez que se confirmó la posición de cada imagen, se lleva a cabo corrección por *flats*, para esto se debe dividir cada imagen entre la imagen final de *flat* (*FBDN.fits*):

$$\frac{A85_374J001.d.fits}{FBDN.fits} = A85_374J001_flat.fits.$$

—o Posteriormente, se lleva a cabo la sustracción de emisión IR del cielo, para esto se resta a cada imagen obtenida del paso anterior la imagen final de emisión del cielo (*A85_374Jj1_sky.fits*):

$$A85_374J001_flat.fits - A85_374Jj1_sky.fits = rgA85_374J001sf.fits.$$

—o Una vez que las imágenes están corregidas, se procede a realizar una alineación, esto se hace porque los objetos se encuentran en distintas posiciones. Para alinear se elige una imagen en la que el objeto a analizar esté en el centro de la imagen, enseguida se elige un objeto de referencia (de preferencia una estrella) el cual servirá de guía y se toman sus coordenadas, que serán las de referencia.

—o Ya que se tiene el objeto de referencia, se toman las coordenadas del mismo objeto en las demás imágenes de la secuencia y con ayuda de un *scrip* en el cual se ingresan las coordenadas obtenidas anteriormente, se lleva a cabo un proceso que genera imágenes del objeto con la misma posición, es decir, se tiene la misma cantidad de imágenes obtenidas en la secuencia, pero ahora todas están alineadas.

—o Estas imágenes generadas, se despliegan en *DS9* y se analiza una por una, al mismo tiempo

CAPÍTULO 2. OBSERVACIONES Y TRATAMIENTO DE IMÁGENES

2.2. REDUCCIÓN Y ANÁLISIS DE IMÁGENES

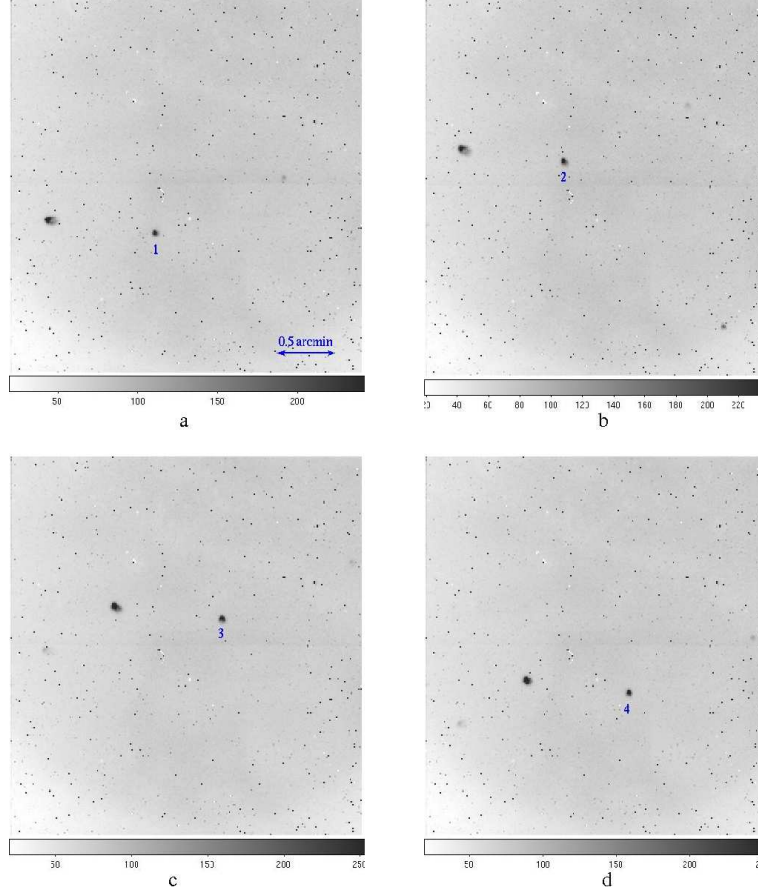


Figura 2.3: Imágenes obtenidas de una Estrella Estándar en las 4 posiciones de la secuencia.

que se observa su estadística y se descartan aquellas que tengan mucho ruido o que tengan cuentas promedio en toda la imagen fuera del rango.

→ Finalmente se hace una combinación con la mediana de las imágenes generadas en el paso anterior y así se obtiene una imagen final, la cual está corregida por cielo y *flat*.

→ En algunas ocasiones, la imagen obtenida en el paso anterior tienen un nivel de fondo alto, el valor de cuentas por píxel debe ser idealmente cero o cercano, si el valor difiere mucho de cero, se toman valores aleatorios de cuentas en todo el fondo y se hace un promedio, de tal manera que el número obtenido se suma o resta como una constante a la imagen total, obteniendo así una nueva imagen que en este caso será la final:

$$rgA85_374J_final.fits - (cielo) = rgA85_374J_final_ok.fits.$$

La siguiente figura muestra la imagen original de un campo a estudiar (obtenida del telescopio) y la imagen final en la cual se hará el análisis.

Todos los pasos descritos anteriormente, se realizan en *IRAF* mediante el *script de camila* [22] (www.inaoep.mx/~ydm/), solo se deben introducir los parámetros adecuados y en automático se genera la corrección por *flats*, la sustracción de emisión del cielo y la alineación de las imágenes. Los demás pasos como visualización de imágenes, elección de las mismas y combinación final, se lleva a cabo en la terminal de *IRAF* y *DS9*. Se realiza el mismo procedimiento para cada secuencia y para cada filtro, en todos los campos observados. Los detalles del uso del código se pueden ver

CAPÍTULO 2. OBSERVACIONES Y TRATAMIENTO DE IMÁGENES

2.3. PROCESO DE OBTENCIÓN DE DATOS FOTOMÉTRICOS

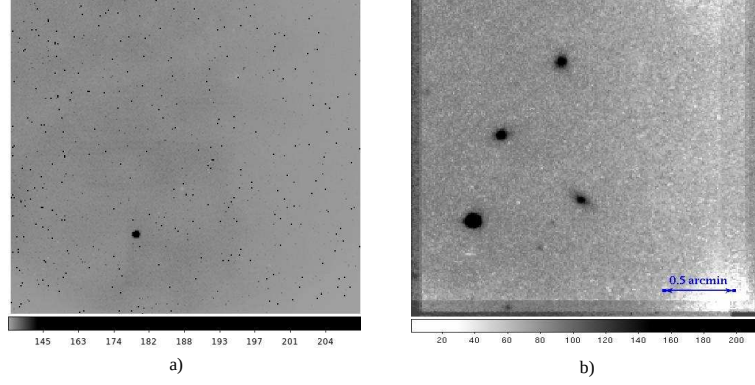


Figura 2.4: Campo 15 del cúmulo Abell 85. Se muestra en a) la imagen original obtenida del telescopio y en b) la imagen final con correcciones.

Estrella Estándar	Magnitud J	Magnitud H	Magnitud K'
FS110	11.71	11.402	11.324
FS150	10.158	10.004	9.96
FS123	10.177	10.189	10.211
FS135	11.984	10.64	11.594

Tabla 2.2: Magnitud publica de las estrellas estándar [16].

en el trabajo reportado por Navarro, F. [26].

2.3. Proceso de Obtención de Datos Fotométricos

La fotometría es un método de observación que permite obtener la magnitud de los objetos observados, por tal razón se deben observar estrellas estándar para determinar el *zero point*, el cual es un factor de corrección y depende de las características de la instrumentación empleada; telescopio, fotómetro, detector, etc.

La siguiente ecuación se emplea para obtener este factor:

$$m_{\lambda}^0 = -2,5 \log F_{\lambda}(I) + ZP,$$

donde: m_{λ}^0 es la magnitud física, $F_{\lambda}(I)$ es el flujo observado y ZP es el zero point. En el caso de las estrellas estándar el valor de la magnitud física es conocido y sus valores son publicados [16].

Para obtener el valor de zero point, se tiene:

$$m_{\lambda}^0 = m_{instr} + ZP \Rightarrow ZP = m_{\lambda}^0 - m_{instr}.$$

Para confiar en el valor obtenido de ZP, se obtiene la magnitud física de la segunda estrella y el valor debe ser lo más cercano posible al valor publicado, lo cual garantiza que el proceso fotométrico es correcto. La magnitud publicada se muestra en la tabla anterior y la magnitud instrumental se obtiene de la imagen final de la estrella estándar correspondiente, para obtener este valor, se despliega la imagen en DS9 y con ayuda de un comando el cual genera un perfil radial del objeto cerca del cursor y donde el valor FWHM (Full Width at Half Maximum) que es valor de nuestro interés es el mostrado en una tabla junto con los parámetros del ajuste.

Dado que las condiciones cambian de una noche a otra, se tiene un zero point para cada noche y

CAPÍTULO 2. OBSERVACIONES Y TRATAMIENTO DE IMÁGENES
2.4. ANÁLISIS DE ASIMETRÍA EN IMÁGENES DE LA BANDA J

Noche	Zero Point	Magnitud de FS150	Error
1	-	-	-
2	-4.54	10.8	0.642
3	-4.71	10.13	0.028
4	-4.68	10.28	0.122
5	-4.73	9.73	0.428
6	-4.7	10.27	0.112

Tabla 2.3: Valor del factor ZP y error. Filtro J

Noche	Zero Point	Magnitud de FS150	Error
1	-4.986	10.112	0.108
2	-4.838	11.062	1.058
3	-4.906	9.262	0.742
4	-4.918	9.952	0.052
5	-4.956	9.852	0.152
6	-4.938	10.052	0.048

Tabla 2.4: Valor del factor ZP y error. Filtro H

para cada filtro. En la siguiente tabla se muestran los valores obtenidos:

Filtro J, ZP de la estrella FS110 para obtener valor de la estrella FS150

Filtro H, ZP de la estrella FS110 para obtener valor de la estrella FS150

Filtro K', ZP de la estrella FS110 para obtener valor de la estrella FS150

En las tablas anteriores, se puede observar que en algunos casos el valor en el error es muy alto, esto es debido a las condiciones climatológicas (en particular la presencia de cirrus) de la noche de observación, lo cual impide que los valores fotométricos sean reportados.

Una vez que se tiene el ZP de cada noche y de cada filtro, se puede obtener el valor de la magnitud física de los objetos de estudio, siempre y cuando se tenga la magnitud instrumental. Así, solo se aplica la formula:

$$m_{\lambda}^0 = m_{instr} + ZP.$$

2.4. Análisis de Asimetría en Imágenes de la Banda J

La parte final de este trabajo es analizar las galaxias de cada campo. Aquí el objetivo principal es buscar asimetrías de las galaxias y para ello se realiza lo siguiente:

— Se despliega cada imagen en *DS9* y se identifican las galaxias más grandes ($\sim 2arcmin$ o

Noche	Zero Point	Magnitud de FS150	Error
1	-5.206	10.084	0.124
2	-5.206	10.664	0.704
3	-5.18	9.794	0.166
4	-5.206	9.944	0.016
5	-5.196	9.984	0.024
6	-5.18	10.004	0.044

Tabla 2.5: Valor del factor ZP y error. Filtro K'

CAPÍTULO 2. OBSERVACIONES Y TRATAMIENTO DE IMÁGENES

2.4. ANÁLISIS DE ASIMETRÍA EN IMÁGENES DE LA BANDA J

mayor).

— Se usan tareas de *IRAF*, las cuales nos ayudaran a analizar el objeto de estudio. En primer lugar se genera una elipse encima de la galaxia de interés y se toman las coordenadas del centro, los valores de los ejes y el ángulo de inclinación. Estos datos se introducen en una de las tareas y al momento de ejecutar se obtiene una tabla con una serie de valores de ajuste que se generaron alrededor de la galaxia.

— Auxiliándose con un comando que genera un conjunto de 9 gráficas (como en la imagen), que proporcionan parámetros obtenidos en el primer ajuste, nos enfocamos en 5 de ellas: magnitud, elipticidad, posición de ángulo, coordenadas del centro x_0 y y_0 , de los cuales se eligen dos o tres valores de prueba observando la gráfica de elipticidad y posición de ángulo. Posteriormente, los valores elegidos, se usarán para realizar modelos de la galaxia original.

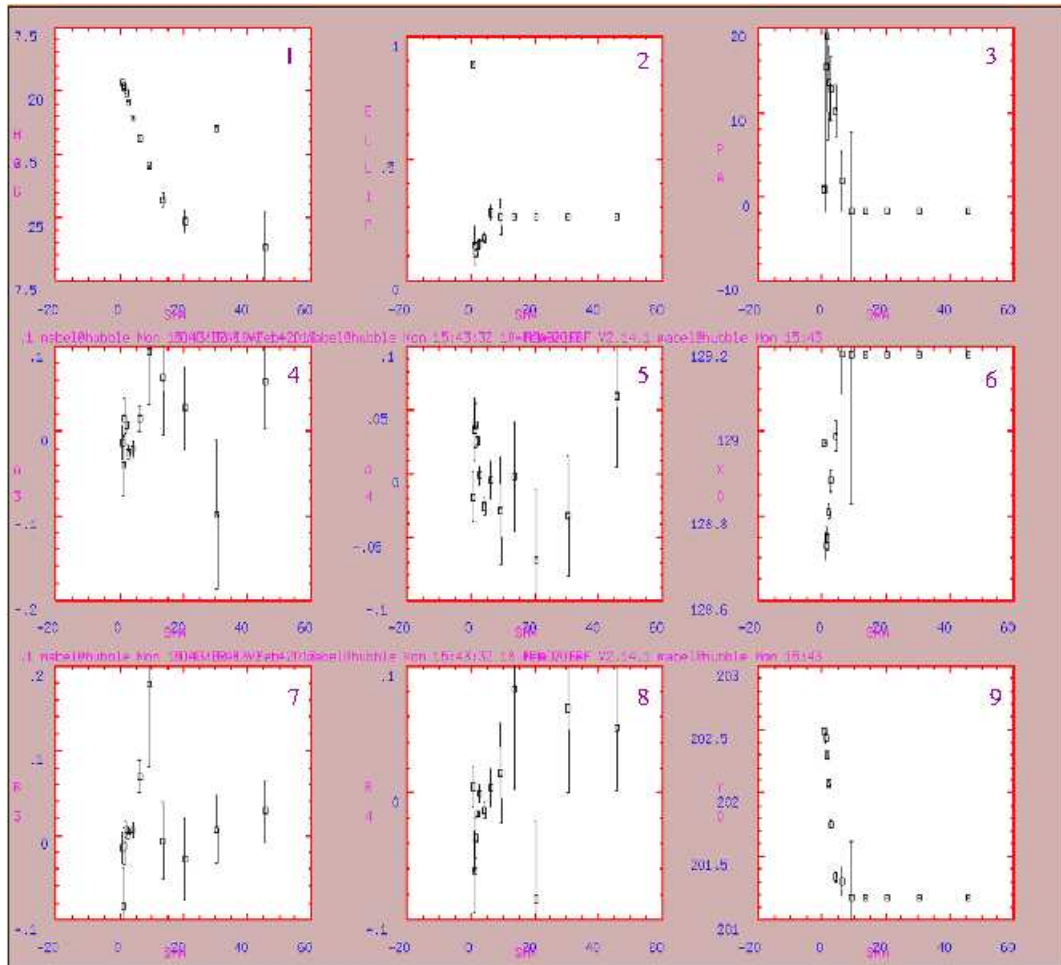


Figura 2.5: Gráficos de los distintos parámetros que genera el primer ajuste. 1-valor de magnitud, 2-elipticidad, 3-posición de ángulo, 6 y 9-centro de la elipse x_0 y y_0 respectivamente.

— Una vez que se eligieron los parámetros, se introducen en una tarea la cual genera un modelo con los valores elegidos, éste modelo de la galaxia, no tiene ruido fotométrico. Ya que se tiene la imagen del modelo, se realiza una sustracción de ésta a la imagen original, de manera que el resultado es una posible asimetría de la galaxia.

La imagen anterior muestra el campo de la imagen final, el modelo que se realizó de la galaxia y

CAPÍTULO 2. OBSERVACIONES Y TRATAMIENTO DE IMÁGENES

2.4. ANÁLISIS DE ASIMETRÍA EN IMÁGENES DE LA BANDA J

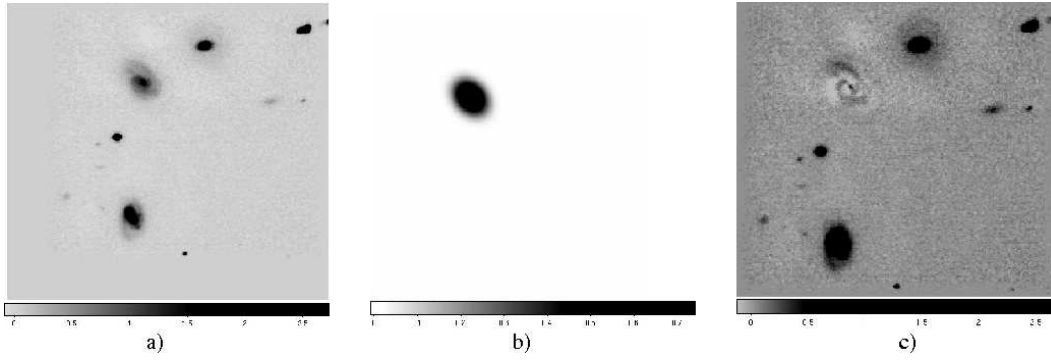


Figura 2.6: Galaxia 097027 del cúmulo Abell 1367, la cual presenta una asimetría. a) imagen final obtenida después de las correcciones, b) modelo de la galaxia y c) residuo de galaxia.

la imagen de la sustracción del modelo a la imagen original, en esta última se analizan las posibles asimetrías que tiene cada galaxias.

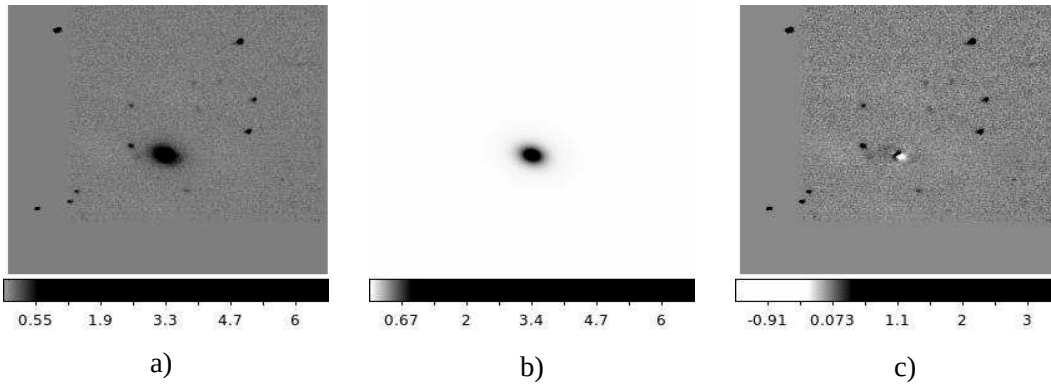


Figura 2.7: Galaxia 097041 del cúmulo Abell 1367. a) imagen final obtenida después de las correcciones, b) modelo de la galaxia y c) residuo de galaxia.

La imagen anterior muestra el caso de una galaxia la cual no presenta perturbaciones en el disco estelar. En la imagen c), se observa el residuo obtenido después de la sustracción del modelo. Como se puede ver, solo la parte central presenta perturbación debido que el modelo va cambiando de centro conforme toma radios más grandes.

Capítulo 3

Resultados del Cúmulo Abell 85

En este capítulo se muestran los resultados obtenidos del análisis de datos observados en la temporada 2012 del cúmulo Abell 85, en primer lugar se presenta cada campo con las imágenes correspondientes a los tres filtros (J, H y K'), después se da la información obtenida de la fotometría de las galaxias en cada campo y finalmente se muestran los resultados obtenidos del análisis de asimetría.

El cúmulo ha sido observado en temporadas pasadas, sin embargo, de los 26 campos que se han observado, no todos han sido estudiados exitosamente debido a diversas razones que afectaron los datos, por ejemplo, las condiciones climatológicas de la temporada de observación, las fallas de la cámara camila, entre otras. En particular, las observaciones de la temporada 2012 se realizaron con el fin de completar la información de algunos campos y observar las galaxias de la periferia del cúmulo, para tener un estudio más amplio sobre el ambiente del mismo.

Los datos de esta temporada no fueron buenos para obtener fotometría, debido a que en la mayoría de las noches de observación hubo presencia de cirrus (tipo de nube compuesto de cristales de hielo y caracterizado por bandas delgadas y finas) los cuales afectaron los datos fotométricos, pero dado que nuestro interés es la evolución de las galaxias, nos enfocamos en la parte morfológica, lo cual no es afectado por las condiciones climatológicas.

Se observaron y analizaron en total 12 campos, de los cuales 11 se encuentran en la periferia y uno en el centro, la siguiente imagen muestra la ubicación de los campos observados en el cúmulo.

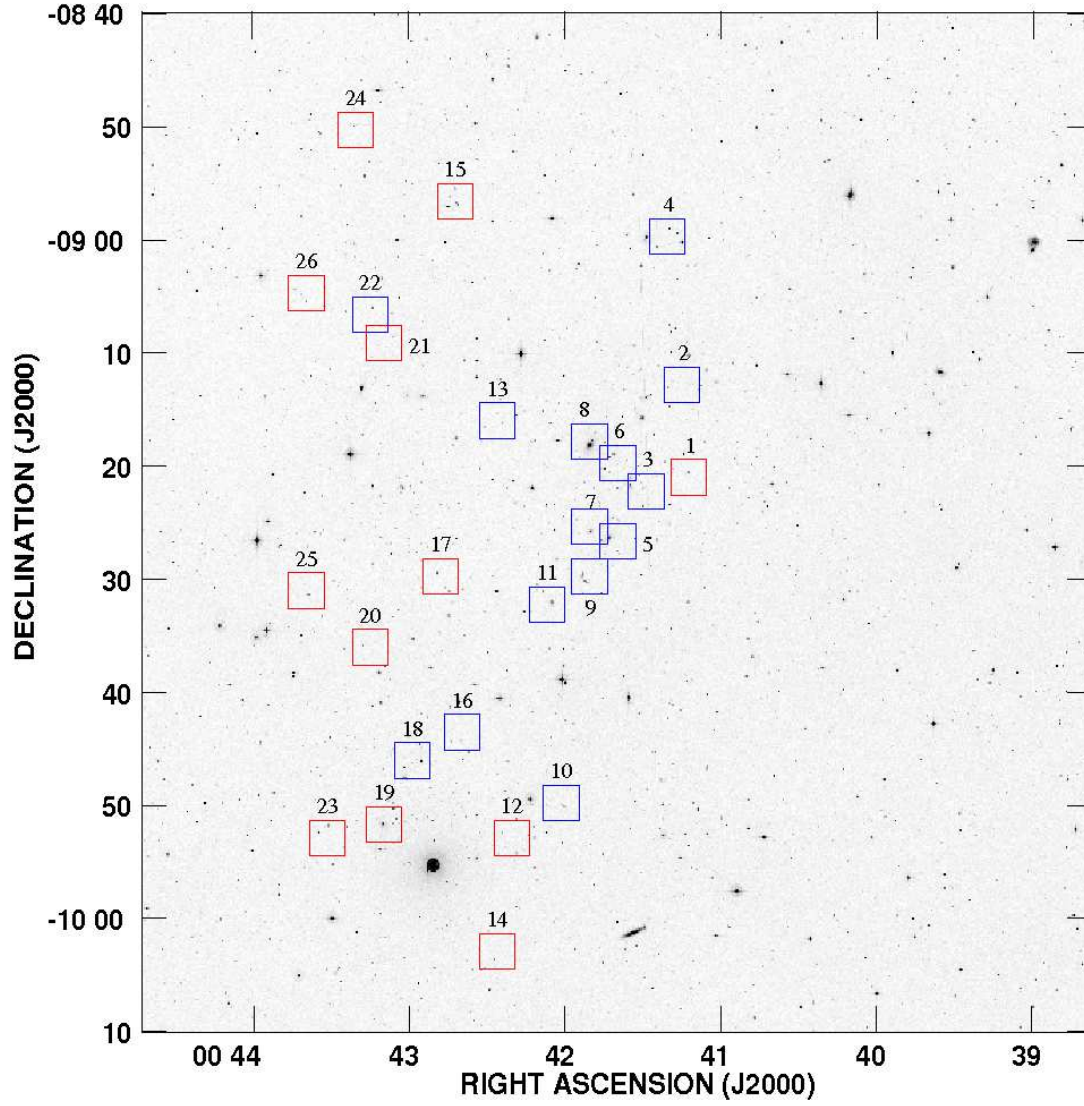


Figura 3.1: Cúmulo Abell 85. Imagen óptica de SDSS filtro rojo, tamaño 1.5×1.5 grados, centro en 00 41 37.8, -09 25 30. En los recuadros se muestran los 26 campos estudiados, los campos observados para este trabajo están en rojo.

CAPÍTULO 3. RESULTADOS DEL CÚMULO ABELL 85

La siguiente tabla muestra la información detallada de las galaxias en cada campo. Como se observa, la mayoría de las galaxias no tienen clasificación morfológica, por tanto los datos observados pueden servir para obtener esa información y completar la tabla.

Cúmulo Abell 85						
Campo [1]	Galaxias [2]	$\alpha_{J2000}, \delta_{J2000}$ [3]	Vel. (km/s) [4]	Magnitud [5]	Diámetro [6]	Morfología [7]
1	[DFL98]150	00 41 19.8, -09 23 27	14 681	18.5	0.30	-
	[DFL98]145	00 41 19.0, -09 23 24	14 935	19.2	0.21	-
12	[DFL98]323	00 42 18.7, -09 54 14	15 618	20.5	0.31	-
	[DFL98]315	00 42 16.1, -09 54 23	>30000	19.2	0.18	S0
	[DFL98]306	00 42 11.9, -09 52 55	16 309	19.0	0.51	S0
14	[DFL98]347	00 42 29.5, -10 01 07	15 165	20.6	0.29	-
15	[DFL98]374	00 42 41.5, -08 56 49	15 106	18.7	0.56	-
	[DFL98]385	00 42 44.2, -08 56 12	16 150	17.9	0.31	-
	[DFL98]377	00 42 42.2, -08 55 28	16 992	17.8	0.43	-
17	[DFL98]391	00 42 48.4, -09 34 41	17 940	21.1	0.33	-
	*[SDG98]2746	00 42 48.1, -09 34 54	-	19.6	0.18	-
19	[DFL98]442	00 43 10.1, -09 51 41	15 142	17.5	0.68	E/S0
	[DFL98]435	00 43 06.0, -09 50 15	14 742	18.7	0.37	Se
	*[SDG98]3023	00 43 11.3, -09 51 59	-	21.7	0.12	-
	*[SDG98]2950	00 43 06.4, -09 51 40	17 727	20.1	0.24	-
	*[SDG98]2934	00 43 05.0, -09 51 11	-	19.8	0.13	-
	*[SDG98]2923	00 43 03.9, -09 51 38	-	20.7	0.08	-
20	[DFL98]451	00 43 11.6, -09 38 16	16 253	18.3	0.48	Se
21	[DFL98]461	00 43 14.3, -09 10 21	15 015	20.7	0.28	-
23	[DFL98]486	00 43 31.2, -09 51 48	16 619	18.8	0.52	S1
	*[SDG98]3234	00 43 32.6, -09 51 52	-	20.9	0.12	-
24	[DFL98]491	00 43 34.0, -08 50 37	14 968	19.4	0.33	-
	[DFL98]492	00 43 34.3, -08 51 15	>30000	*18.9	0.22	-
	*[SDG98]3260	00 43 35.1, -08 51 13	-	20.6	0.17	-
	[DFL98]484	00 43 30.7, -08 52 05	>30000	19.5	0.19	-
25	[DFL98]496	00 43 38.7, -09 31 21	15 004	19.2	0.34	-
	*[SDG98]3270	00 43 35.9, -09 32 14	-	20.9	0.14	-
26	[DFL98]502	00 43 43.9, -09 04 23	15 004	*17.6	0.40	-

Tabla 3.1: Notas: [1] Número de campo en el cúmulo. [2] Nombre de la galaxia de acuerdo al Catálogo de Durret F. et al. (1998) [11] y (*) Catálogo de Slezak E. et al. (1998) [29]. [3] Coordenadas (AR y Dec). [4] Velocidad Radial obtenida de NED. [5] Magnitud del filtro g(SDSS PSF)AB y (*) Magnitud b_J obtenida de NED. [6] Diámetro del eje mayor en arcmin obtenido de NED. [7] Clasificación de la galaxia obtenida de NED.

3.1. Atlas de imágenes J, H, K'

A continuación se presentan las imágenes finales de cada campo observado en las tres bandas J, H y K', así como la descripción de cada uno. Para comparar con el rango visible, se muestra una imagen de *Sloan Digital Sky Survey* (SDSS) en el filtro rojo.

★ *Campo 1, Abell 85: [DFL98]150*

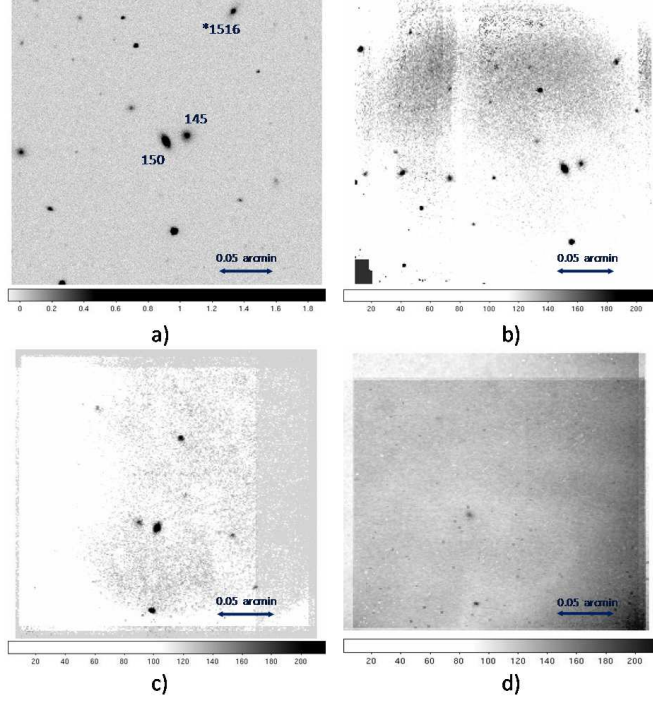


Figura 3.2: Campo [DFL98]150. a) Imagen de SDSS, b) Filtro J, c) Filtro H y d) Filtro K'. Tamaño del campo: 3 arcmin.

El campo 1 fue dedicado a las galaxias [DFL98]150 y [DFL98]145, las cuales se encuentran proyectadas en la región central del cúmulo, posiblemente asociadas a la subestructura **SB** reportada por Bravo-Alfaro et al. (2009) [5]. En la temporada de observación 2012 se obtuvieron los filtros H y K'; el filtro J y H ya fue reportado previamente por Venkatapathy, Y. [32]. El campo fue elegido para estudiarse debido a que la galaxia [DFL98]150 es de tipo tardío y fue apuntada con el *VLA*. De las observaciones con el *VLA* se obtuvo como resultado una fuerte emisión en H_{α} . Las galaxias [DFL98]150 y [DFL98]145, se encuentran separadas por una distancia de 10.5 arcsec (~ 10.9 kpc en proyección) y una velocidad (radial) relativa entre ellas de 254 km/s. Esto hace pensar en la posibilidad de que hayan tenido una interacción indirecta dentro de los últimos $\sim 13,3 \times 10^6$ años (límite inferior al tiempo real desde que las galaxias tuvieron su máxima aproximación).

La fotometría sólo se obtuvo en el filtro H. En el caso de la galaxia [DFL98]150, el valor de la magnitud, se encuentra muy cercano al valor reportado por *2MASS*, sin embargo, para la galaxia [DFL98]145 no se tuvo una buena aproximación, esto por las condiciones climatológicas de la noche de observación.

Por otra parte, debido al tamaño angular de las galaxias, no fue posible hacer un análisis de asimetría. En el caso del filtro K', fue imposible obtener un valor de magnitud para las galaxias debido a que la imagen tiene una señal deficiente.

CAPÍTULO 3. RESULTADOS DEL CÚMULO ABELL 85

3.1. ATLAS DE IMÁGENES J, H, K'

★ *Campo 12, Abell 85:[DFL98]323*

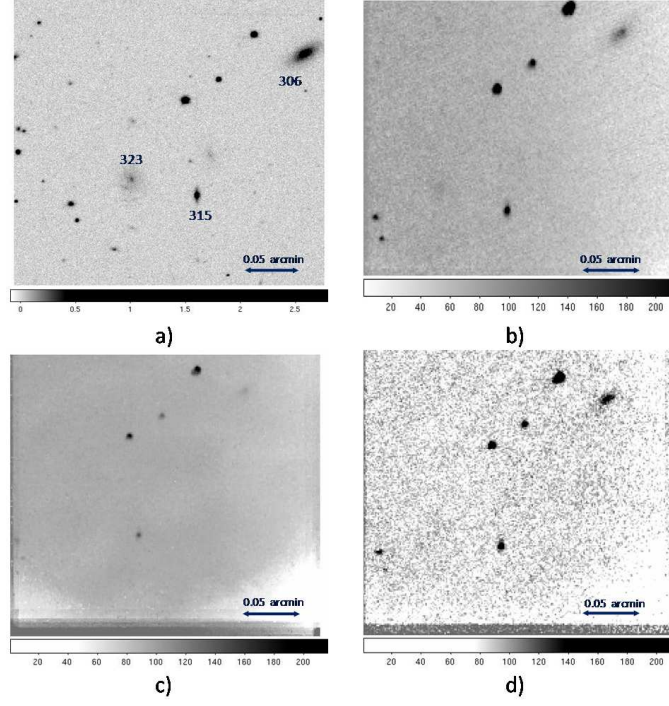


Figura 3.3: Campo [DFL98]323. a) Imagen de SDSS, b) Filtro J, c) Filtro H y d) Filtro K'. Tamaño del campo: 3 arcmin.

El campo 12 fue dedicado a las galaxias [DFL98]323, [DFL98]315 y [DFL98]306, las cuales se encuentran proyectadas en la región S del cúmulo, posiblemente asociadas a la subestructura **SE** reportada por Bravo-Alfaro et al. (2009) [5]. En la temporada de observación 2012 se obtuvieron los filtros J, H y K'; el filtro J, H y K' ya fue reportado previamente Yoganarasimhan (2013) para la galaxia [DFL98]315. El campo fue elegido para estudiarse debido a que la galaxia [DFL98]323 es de tipo tardío y fue apuntada con el *VLA*.

De las observaciones con el *VLA* se detectó una región HI en [DFL98]323 y dado que es una galaxia muy azul, no se logró captar en las imágenes obtenidas en el infrarrojo. La galaxia [DFL98]323 y [DFL98]306, se encuentran separadas por una distancia de 1.7 arcmin (~ 106 kpc) y una velocidad (radial) relativa entre ellas de 691 km/s. Esto hace pensar en la posibilidad de que hayan tenido una interacción indirecta dentro de los últimos $\sim 130 \times 10^6$ años.

La fotometría se obtuvo en los tres filtros, sólo para las galaxias [DFL98]315 y [DFL98]306, particularmente en el filtro H, la galaxia [DFL98]306 tuvo baja señal por lo que no se tuvo un valor. En el caso de la galaxia [DFL98]315, los valores obtenidos en los filtros J y H son muy cercanos a los valores reportados en *2MASS*, sin embargo en el filtro K' el valor difiere mucho debido al mal foco al momento de observar. La galaxia [DFL98]306, se encuentra en una zona demasiado cerca del borde del detector, por lo que los valores obtenidos no son totalmente confiables, sin embargo, son cercanos a los reportados.

Por otra parte, debido al tamaño angular de las galaxias, se le aplicó un análisis de asimetría a las galaxias [DFL98]315 y [DFL98]306, pero en ningún caso se encontraron perturbaciones en el disco estelar.

CAPÍTULO 3. RESULTADOS DEL CÚMULO ABELL 85

3.1. ATLAS DE IMÁGENES J, H, K'

★ *Campo 14, Abell 85:[DFL98]347*

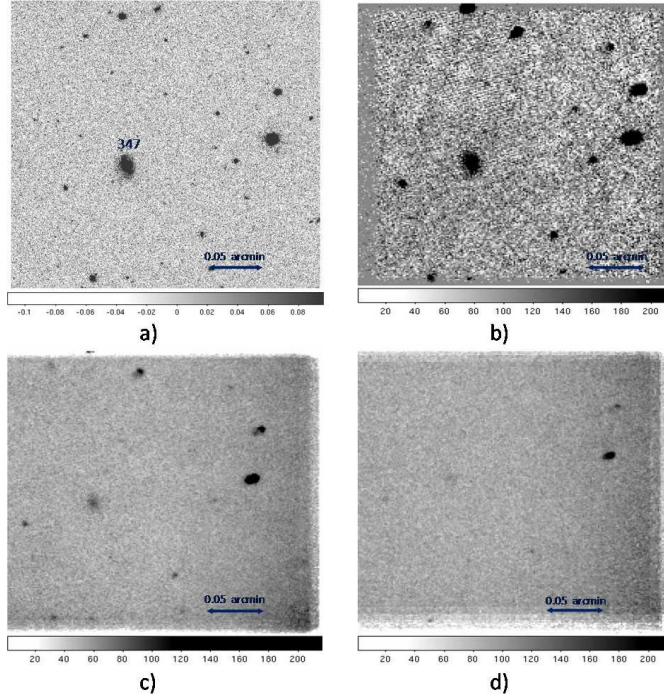


Figura 3.4: Campo [DFL98]347. a) Imagen de SDSS, b) Filtro J, c) Filtro H y d) Filtro K'. Tamaño del campo: 3 arcmin.

El campo 14 fue dedicado a la galaxia [DFL98]347, la cual se encuentra proyectada en la región S del cúmulo y posiblemente este relacionada a la subestructura **SE** reportada por Bravo-Alfaro et al. (2009) [5]. En la temporada de observación 2012 se obtuvieron los filtros J, H y K' y no han sido reportados antes. El campo fue elegido para estudiarse debido a que la galaxia [DFL98]347 es de tipo tardío y fue apuntada con el *VLA*.

De las observaciones con el *VLA* se detectó una región HI. La galaxia [DFL98]347 aparentemente es aislada, es decir, no tiene compañeros cercanos con los cuales pueda interaccionar.

La fotometría se obtuvo en los tres filtros, los valores obtenidos son reportados y no hay comparación con otros valores.

Por otra parte, debido al tamaño angular y a pesar de ser una galaxia aparentemente aislada, se aplicó un análisis de asimetría, pero no se detectaron irregularidades en el disco estelar.

CAPÍTULO 3. RESULTADOS DEL CÚMULO ABELL 85

3.1. ATLAS DE IMÁGENES J, H, K'

★ *Campo 15, Abell 85:[DFL98]374*

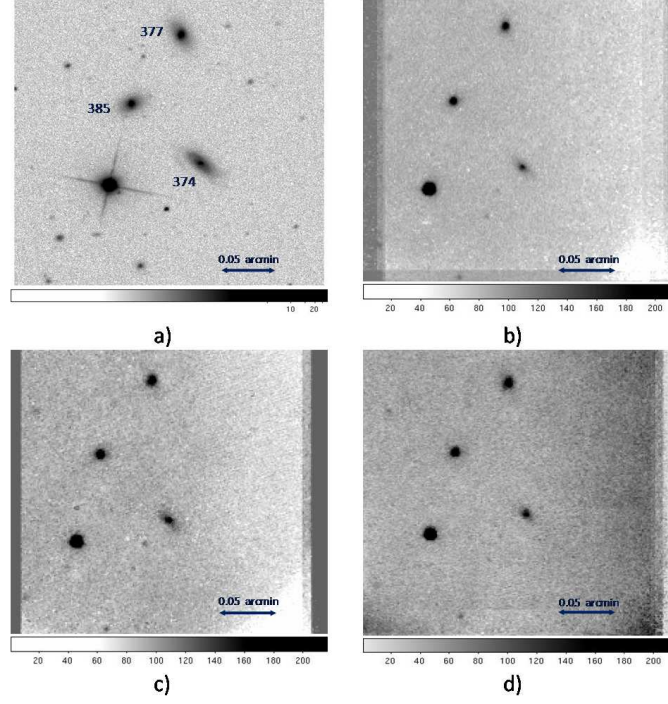


Figura 3.5: Campo [DFL98]374. a) Imagen de SDSS, b) Filtro J, c) Filtro H y d) Filtro K'. Tamaño del campo: 3 arcmin.

El campo 15 fue dedicado a las galaxias [DFL98]374, [DFL98]377 y [DFL98]385, las cuales se encuentran proyectadas en la región N del cúmulo. En la temporada de observación 2012 se obtuvieron los filtros J, H y K'; de manera equivalente los tres filtros ya fueron reportados previamente Yoganarasimhan (2013) para las tres galaxias. El campo fue elegido para estudiarse debido a que la galaxia [DFL98]374 es de tipo tardío y fue apuntada con el *VLA* [5].

De las observaciones del *VLA* se detectó una región HI en [DFL98]374. Las galaxias [DFL98]374 y [DFL98]377, se encuentran separadas por una distancia de 1.1 arcmin (~ 68 kpc) y una velocidad (radial) relativa entre ellas de 1886 km/s, esto hace pensar en la posibilidad de que hayan tenido una interacción indirecta dentro de los últimos ~ 83 giga años. [DFL98]377 y [DFL98]385, se encuentran separadas por una distancia de 45 arcsec (~ 47 kpc) y una velocidad (radial) relativa entre ellas de 842 km/s, esto hace pensar en la posibilidad de que hayan tenido una interacción indirecta dentro de los últimos ~ 57 giga años y finalmente [DFL98]374 y [DFL98]385, se encuentran separadas por una distancia de 46 arcsec (~ 48 kpc) y una velocidad (radial) relativa entre ellas de 1044 km/s, lo cual indica una posibilidad de que hayan tenido una interacción indirecta dentro de los últimos $\sim 58 \times 10^6$ años.

La fotometría se obtuvo en los tres filtros, debido a las condiciones climatológicas de la noche de observación, los valores de magnitud en los tres filtros difieren mucho de los valores reportados en *2MASS*.

Por otra parte, debido al tamaño angular de las galaxias, se le aplicó un análisis de asimetría a las tres galaxias y en efecto, se detectó una perturbación en el disco estelar, el cual se reporta en la parte final del capítulo.

CAPÍTULO 3. RESULTADOS DEL CÚMULO ABELL 85

3.1. ATLAS DE IMÁGENES J, H, K'

★ *Campo 17, Abell 85:[DFL98]391*

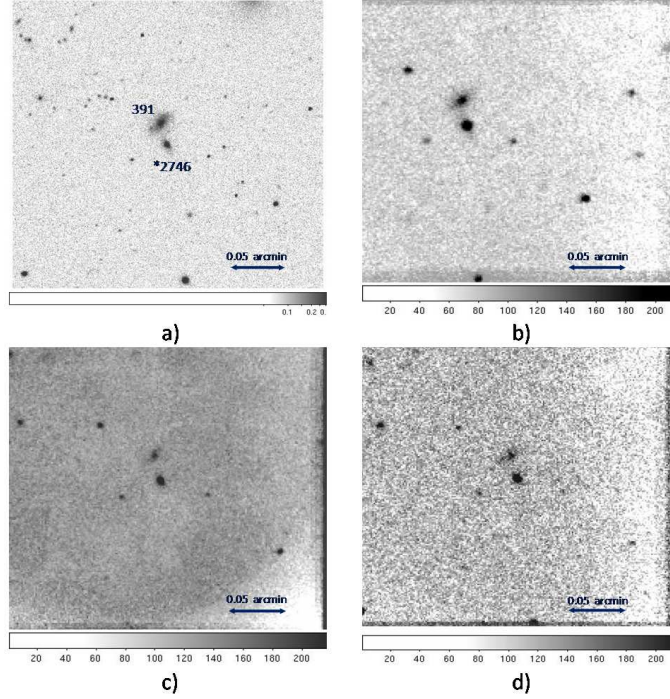


Figura 3.6: Campo [DFL98]391. a) Imagen de SDSS, b) Filtro J, c) Filtro H y d) Filtro K'. Tamaño del campo: 3 arcmin.

El campo 17 fue dedicado a las galaxias [DFL98]391 y [SDG98]2746, las cuales están posiblemente asociadas a la subestructura **SE** reportada por Bravo-Alfaro et al. (2009) [5]. En la temporada de observación 2012 se obtuvieron los filtros H y K'; el filtro J ya fue reportado previamente Yoganarasimhan (2013) para las dos galaxias. El campo fue elegido para estudiarse debido a que la galaxia [DFL98]391 es de las más brillantes del cúmulo y fue apuntada con el *VLA*.

De las observaciones del *VLA* no se detectó emisión H_{α} , ni región HI. Las galaxias [DFL98]391 y [SDG98]2746, se encuentran separadas por una distancia de 12 arcsec (~ 12 kpc), dado que no se sabe la velocidad (radial) de [DFL98]2746, no se puede asegurar que sea parte del cúmulo, pero si lo fuera, existiría la posibilidad de que hayan tenido una interacción indirecta dentro de los últimos $\sim 15 \times 10^6$ años.

La fotometría se obtuvo para las dos galaxias en los dos filtros. Los valores obtenidos son reportados y no hay comparación con otros valores. Por otra parte, debido al tamaño angular de las galaxias, no fue posible hacer un análisis de asimetría.

CAPÍTULO 3. RESULTADOS DEL CÚMULO ABELL 85

3.1. ATLAS DE IMÁGENES J, H, K'

★ *Campo 19, Abell 85:[DFL98]442*

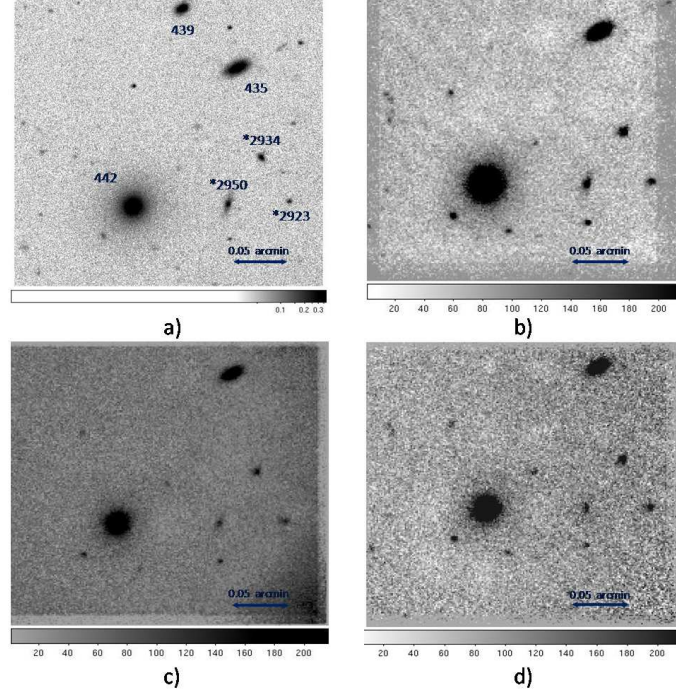


Figura 3.7: Campo [DFL98]442. a) Imagen de SDSS, b) Filtro J, c) Filtro H y d) Filtro K'. Tamaño del campo: 3 arcmin.

El campo 19 fue dedicado a las galaxias [DFL98]435, [DFL98]442, [SDG98]2923, [SDG98]2934, [SDG98]2950 y [SDG98]3023, las cuales están posiblemente asociadas a la subestructura **SE** reportada por Bravo-Alfaro et al. (2009) [5]. En la temporada de observación 2012 se obtuvieron los filtros J, H y K'; el filtro J y H ya fue reportado previamente Yoganarasimhan (2013). El campo fue elegido para estudiarse debido a que en proyección la galaxia [DFL98]442 está rodeada de pequeñas galaxias las cuales parecieran ser satélites de ella, además la galaxia [DFL98]435 es una de las más brillantes del cúmulo y fue apuntada con el *VLA*.

De las observaciones del *VLA* no se detectó emisión H_{α} , ni región HI. Las galaxias [DFL98]435 y [DFL98]442, se encuentran separadas por una distancia de 1.5 arcmin (~ 93 kpc) y una velocidad (radial) relativa entre ellas de 400 km/s, esto hace pensar en la posibilidad de que hayan tenido una interacción indirecta dentro de los últimos $\sim 113 \times 10^6$ años.

La fotometría se obtuvo en los tres filtros, pero debido a las condiciones climatológicas de la noche de observación (presencia de cirrus), los valores de magnitud en los tres filtros difieren mucho de los valores reportados en *2MASS*.

Finalmente, debido al tamaño angular de las galaxias, sólo se aplicó un análisis de asimetría a las galaxias [DFL98]435 y [DFL98]442, pero no se detectó ningún tipo de perturbación en el disco estelar.

CAPÍTULO 3. RESULTADOS DEL CÚMULO ABELL 85

3.1. ATLAS DE IMÁGENES J, H, K'

★ *Campo 20, Abell 85:[DFL98]451*

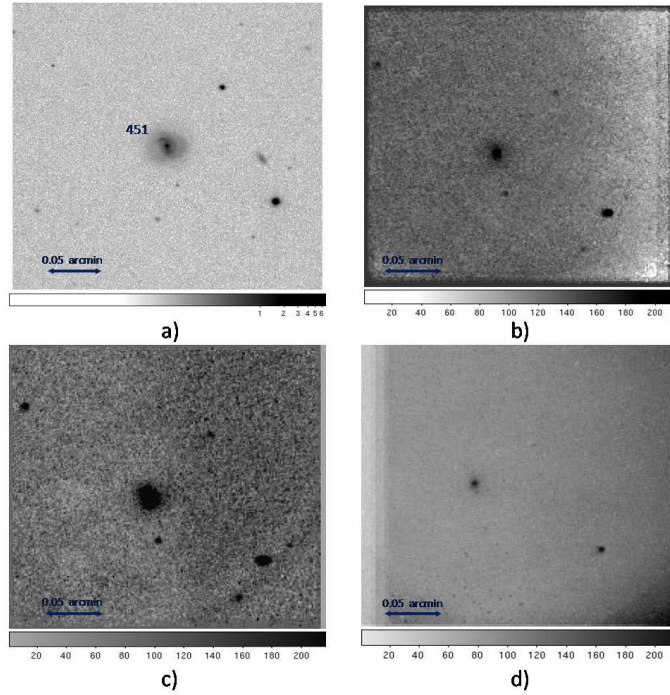


Figura 3.8: Campo [DFL98]451. a) Imagen de SDSS, b) Filtro J, c) Filtro H y d) Filtro K'. Tamaño del campo: 3 arcmin.

El campo 20 fue dedicado a la galaxia [DFL98]451, la cual esta posiblemente asociadas a la subestructura **SE** reportada por Bravo-Alfaro et al. (2009) [5]. En la temporada de observación 2012 se obtuvieron los filtros J, H y K' y no han sido reportados antes. El campo fue elegido para estudiarse debido a que la galaxia es una de las más brillantes del cúmulo y fue apuntada con el *VLA*.

De las observaciones con el *VLA* resultó ser un posible candidato a *AGN*. Aparentemente [DFL98]451 es una galaxia aislada, es decir, no tiene compañeros cercanos con los cuales pueda interaccionar.

La fotometría se obtuvo en los tres filtros. El valor del filtro J difiere demasiado respecto al reportado en *2MASS*, esto debido a las condiciones climatológicas de la noche de observación (presencia de cirrus), razón por la cual no se reporta. En el caso de los otros filtros, los valores obtenidos difieren un poco de los reportados, por la misma razón del clima.

Finalmente, debido al tamaño angular y a pesar de ser una galaxia aparentemente aislada, se realizó un análisis de asimetría, pero no se detectaron irregularidades en el disco estelar.

CAPÍTULO 3. RESULTADOS DEL CÚMULO ABELL 85

3.1. ATLAS DE IMÁGENES J, H, K'

★ *Campo 21, Abell 85:[DFL98]461*

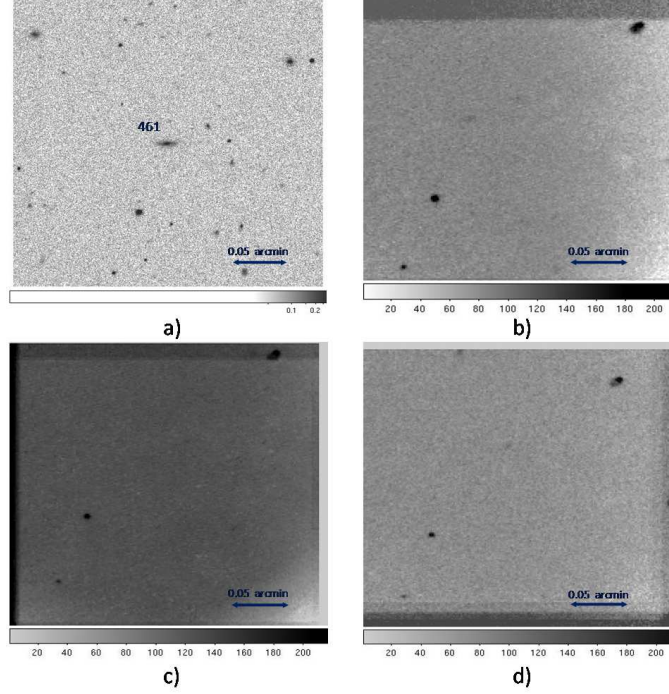


Figura 3.9: Campo [DFL98]461. a) Imagen de SDSS, b) Filtro J, c) Filtro H y d) Filtro K'. Tamaño del campo: 3 arcmin.

El campo 21 fue dedicado a la galaxia [DFL98]461, la cual se encuentran proyectadas en la región NE del cúmulo. En la temporada de observación 2012 se obtuvieron los filtros J, H y K' y no han sido reportados antes. El campo fue elegido para estudiarse debido a que la galaxia [DFL98]461 es de las más brillantes del cúmulo y fue apuntada con el *VLA* [5].

De las observaciones con el *VLA* se detectó una región HI. La galaxia [DFL98]461, tiene una compañera cercana en proyección como se muestra en la imagen y se distingue muy tenue en el filtro J, pero no se tienen datos sobre ésta.

La fotometría se obtuvo sólo en J y K', dado que en el filtro H, la señal es muy baja y no se detecta. Los valores obtenidos son reportados y no hay comparación con otros valores. Por otra parte, debido al tamaño angular, no se aplicó un análisis de asimetría.

CAPÍTULO 3. RESULTADOS DEL CÚMULO ABELL 85

3.1. ATLAS DE IMÁGENES J, H, K'

★ *Campo 23, Abell 85:[DFL98]486*

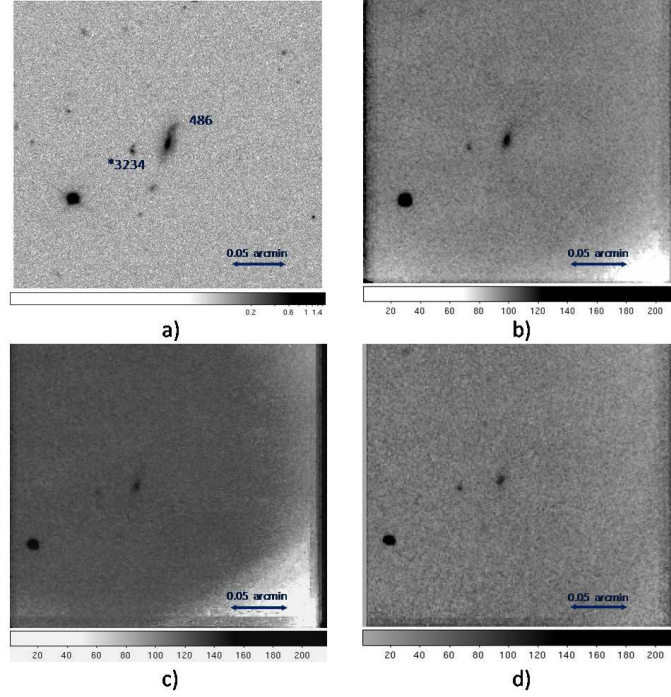


Figura 3.10: Campo [DFL98]486. a) Imagen de SDSS, b) Filtro J, c) Filtro H y d) Filtro K'. Tamaño del campo: 3 arcmin.

El campo 17 fue dedicado a las galaxias [DFL98]486 y [SDG98]3234, las cuales están posiblemente asociadas a la subestructura **SE** reportada por Bravo-Alfaro et al. (2009) [5]. En la temporada de observación 2012 se obtuvieron los filtros J, H y K'; el filtro J y H ya fue reportado previamente Yoganarasimhan (2013) sólo para [DFL98]486. El campo fue elegido para estudiarse debido a que la galaxia [DFL98]486 es de las más brillantes del cúmulo y fue apuntada con el *VLA*.

De las observaciones del *VLA* se detectó una región HI. Las galaxias [DFL98]486 y [SDG98]3234, se encuentran separadas por una distancia de 17 arcsec (~ 17 kpc), dado que no se sabe la velocidad (radial) de [DFL98]3234, no se puede asegurar que sea parte del cúmulo, pero si lo fuera, existiría la posibilidad de que hayan tenido una interacción indirecta dentro de los últimos $\sim 21 \times 10^6$ años. La fotometría se obtuvo para las dos galaxias en los tres filtros. Los valores obtenidos son reportados y sólo se pueden comparar con los valores reportados por Yoganarasimhan (2013), de los cuales no difieren mucho. Finalmente, debido al tamaño angular sólo fue posible hacer un análisis de asimetría a la galaxia [DFL98]486, la cual no presentó ningún tipo de perturbación en su disco estelar.

CAPÍTULO 3. RESULTADOS DEL CÚMULO ABELL 85

3.1. ATLAS DE IMÁGENES J, H, K'

★ *Campo 24, Abell 85:[DFL98]491*

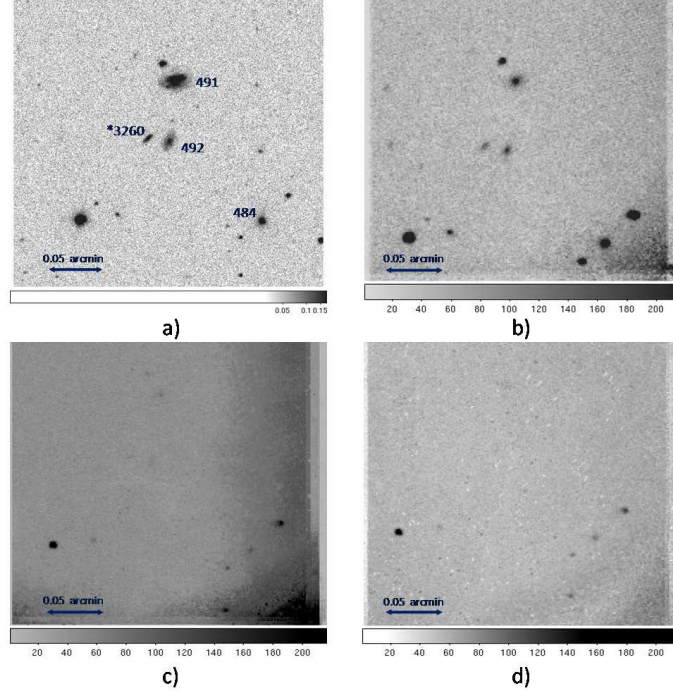


Figura 3.11: Campo [DFL98]491. a) Imagen de SDSS, b) Filtro J, c) Filtro H y d) Filtro K'. Tamaño del campo: 3 arcmin.

El campo 24 fue dedicado a las galaxias [DFL98]484, [DFL98]491, [DFL98]492, y [SDG98]3260, las cuales se encuentran proyectadas en la región NE del cúmulo. En la temporada de observación 2012 se obtuvieron los filtros J, H y K'; el filtro J y H ya fue reportado previamente Yoganarasimhan (2013) sólo para la galaxia [DFL98]491. El campo fue elegido para estudiarse debido a que [DFL98]491 es de las más brillantes del cúmulo y fue apuntada con el *VLA* [5].

De las observaciones del *VLA* se detectó una región HI. Las galaxias [DFL98]491 y [SDG98]3260, se encuentran separadas por una distancia de 32 arcsec (~ 33 kpc), dado que no se sabe la velocidad (radial) de [DFL98]3260, no se puede asegurar que sea parte del cúmulo, pero si lo fuera, existiría la posibilidad de que hayan tenido una interacción indirecta dentro de los últimos $\sim 40 \times 10^6$ años. La fotometría se obtuvo sólo en el filtro J y debido a las condiciones climatológicas de la noche de observación (presencia de cirrus) las imágenes de los filtros H y K' no tienen señal suficiente para obtener su fotometría. Los valores obtenidos son reportados y sólo se pueden comparar con los valores reportados por Yoganarasimhan (2013), de los cuales difieren mucho.

Por otra parte, debido al tamaño angular de las galaxias, sólo se realizó un análisis de asimetría a [DFL98]491 y [DFL98]492, del cual no se detectó ninguna perturbación en el disco estelar.

CAPÍTULO 3. RESULTADOS DEL CÚMULO ABELL 85

3.1. ATLAS DE IMÁGENES J, H, K'

★ *Campo 25, Abell 85:[DFL98]496*

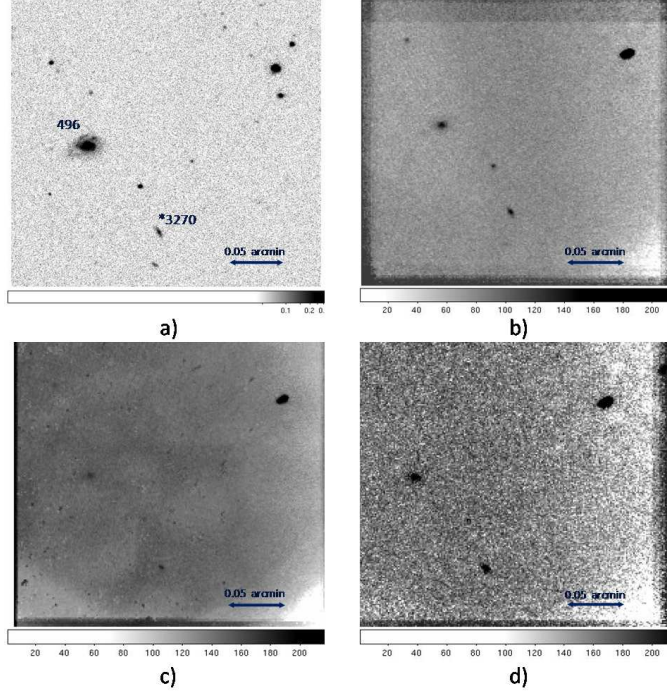


Figura 3.12: Campo [DFL98]496. a) Imagen de SDSS, b) Filtro J, c) Filtro H y d) Filtro K'. Tamaño del campo: 3 arcmin.

El campo 25 fue dedicado a las galaxias [DFL98]496 y [SDG98]3270, las cuales se encuentran proyectadas en la región SE del cúmulo y posiblemente están asociadas a la subestructura **SE** reportada por Bravo-Alfaro et al. (2009) [5]. En la temporada de observación 2012 se obtuvieron los filtros J, H y K'; el filtro H y K' ya fue reportado previamente Yoganarasimhan (2013) sólo para [DFL98]496. El campo fue elegido para estudiarse debido a que la galaxia [DFL98]496 es de las más brillantes del cúmulo y fue apuntada con el *VLA*.

De las observaciones del *VLA* se detectó una región HI. Las galaxias [DFL98]496 y [SDG98]3270, se encuentran separadas por una distancia de 1.3 arcmin (~ 81 kpc), dado que no se sabe la velocidad (radial) de [DFL98]3270, no se puede asegurar que sea parte del cúmulo, pero si lo fuera, existiría la posibilidad de que hayan tenido una interacción indirecta dentro de los últimos $\sim 986 \times 10^6$ años.

La fotometría se obtuvo para las dos galaxias en los tres filtros. Los valores obtenidos son reportados y sólo se pueden comparar con los valores reportados por Yoganarasimhan (2013), de los cuales están muy cerca. Finalmente, debido al tamaño angular sólo fue posible hacer un análisis de asimetría a la galaxia [DFL98]496, la cual no presentó ningún tipo de perturbación en su disco estelar.

CAPÍTULO 3. RESULTADOS DEL CÚMULO ABELL 85

3.1. ATLAS DE IMÁGENES J, H, K'

★ *Campo 26, Abell 85:[DFL98]502*

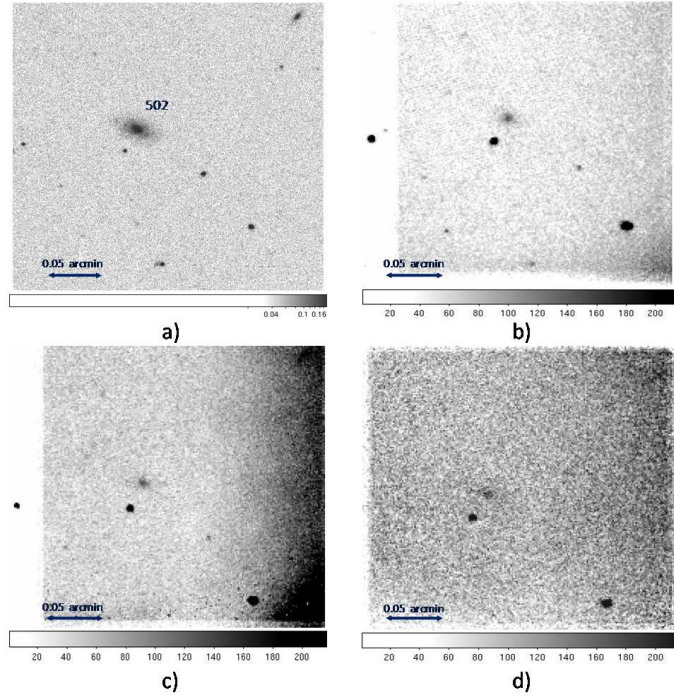


Figura 3.13: Campo [DFL98]502. a) Imagen de SDSS, b) Filtro J, c) Filtro H y d) Filtro K'. Tamaño del campo: 3 arcmin.

El campo 26 fue dedicado a la galaxia [DFL98]502, la cual se encuentran proyectadas en la región NE del cúmulo. En la temporada de observación 2012 se obtuvieron los filtros J, H y K'; el filtro J y H ya fue reportado previamente Yoganarasimhan (2013). El campo fue elegido para estudiarse debido a que la galaxia [DFL98]502 es de las más brillantes del cúmulo y fue apuntada con el *VLA* [5].

De las observaciones con el *VLA* se detectó una región HI. La galaxia [DFL98]347 aparentemente es aislada, es decir, no tiene compañeros cercanos en proyección con los cuales pueda interactuar. La fotometría se obtuvo en los tres filtros, los valores obtenidos son reportados y sólo se pueden comparar con los valores reportados por Yoganarasimhan (2013), de los cuales están cerca. Por otra parte, debido al tamaño angular y a pesar de ser una galaxia aparentemente aislada, se aplicó un análisis de asimetría, pero no se detectaron irregularidades en el disco estelar.

3.2. Catálogo Fotométrico

Los valores de magnitud, se obtuvieron de las imágenes finales de cada filtro, las cuales se presentaron en la sección anterior. La siguiente tabla muestra los valores correspondientes a las galaxias de cada campo.

Fotometría					
	Campo	Galaxias	Magnitud		
	[1]	[2]	J	H [3]	K'
1	1	[DFL98]150	*14.59	14.17	-
2		[DFL98]145	*15.93	15.43	-
3	12	[DFL98]315	15.72	14.36	14.86
4		[DFL98]306	15.05	-	13.57
5	14	[DFL98]347	16.11	15.76	15.34
6	15	[DFL98]374	14.75	14.06	13.62
7		[DFL98]385	14.57	13.89	12.92
8		[DFL98]377	14.51	14.13	12.91
9	17	[DFL98]391	*14.58	14.29	14.08
10		*[SDG98]2746	*15.36	15.07	14.70
11	19	[DFL98]442	12.91	12.12	11.93
12		[DFL98]435	14.19	12.99	13.03
13		*[SDG98]2950	16.34	16.62	14.76
14		*[SDG98]2934	16.41	15.56	15.06
15	20	[DFL98]451	14.64	13.05	12.56
16	21	[DFL98]461	15.05	-	-
17	23	[DFL98]486	15.48	14.45	14.63
18		*[SDG98]3234	17.53	15.56	15.78
19	24	[DFL98]491	14.38	-	-
20		[DFL98]492	15.49	-	-
21		[DFL98]484	15.35	-	-
22		*[SDG98]3260	16.28	-	-
23	25	[DFL98]96	15.95	14.48	14.73
24		*[SDG98]3270	16.84	-	15.68
25	26	[DFL98]502	15.13	14.60	13.60

Tabla 3.2: Notas:[1] Número de campo en el cúmulo. [2] Nombre de las galaxias tomadas del catálogo de Durret F. et al. (1998) [11] y (*) catálogo de Slezak E. et al. (1998) [29]. [3] Magnitud obtenida de las imágenes finales de éste trabajo, (*) magnitudes tomadas de Yoganarasimhan (2013). Los espacios vacíos, se debe a que las imágenes finales, no tienen suficiente señal para obtener una magnitud.

Las siguientes gráficas muestran el error que se encontró al comparar la magnitud obtenida en este trabajo y la magnitud obtenida de 2MASS (The Two Micron All Sky Survey). En el caso ideal, los puntos en las gráficas deberían estar alineados en $y = 0$, pero como se observa, en algunos casos existe un error muy grande, ésto debido a las condiciones climatológicas de las noches de observación.

Filtro J

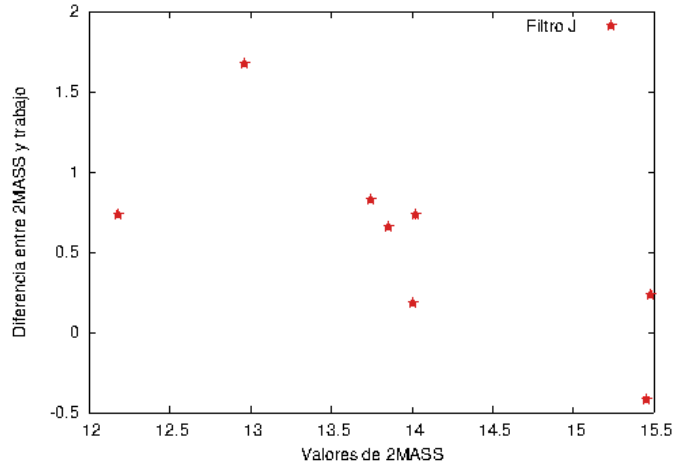


Figura 3.14: Gráfica de error entre los valores de magnitud de 2MASS y los valores obtenidos en este trabajo.

Filtro H

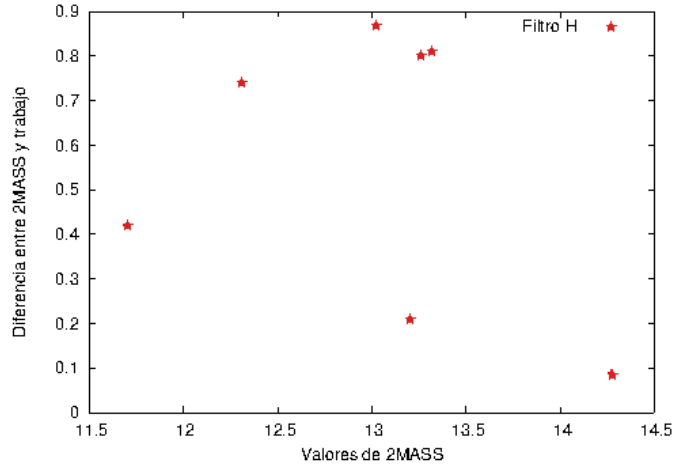


Figura 3.15: Gráfica de error entre los valores de magnitud de 2MASS y los valores obtenidos en este trabajo

Filtro K'

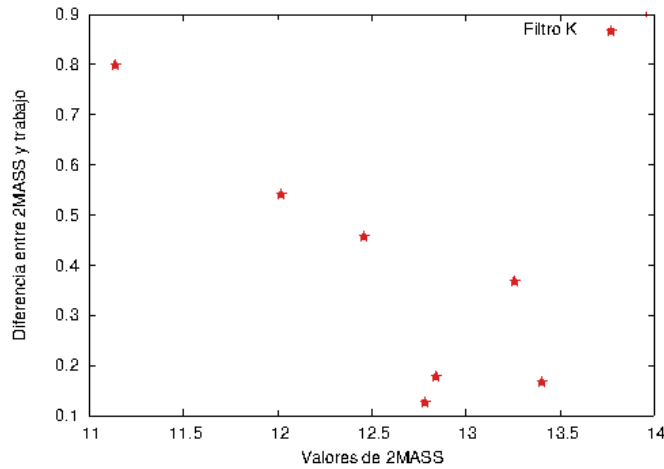


Figura 3.16: Gráfica de error entre los valores de magnitud de 2MASS y los valores obtenidos en este trabajo.

3.3. Resultado de Asimetrías

Del análisis realizado a las galaxias más grandes, en términos generales no se encontraron perturbaciones en el disco estelar de población vieja. Como se mostro al inicio, algunos de los campos observados se encuentran en el subcúmulo del SE [5], el cual esta cayendo al centro del cúmulo, de manera que se esperaban detectar galaxias con asimetría, pero debido a que no se detectaron tales irregularidades hace más interesante el tema de evolución de galaxias en caída hacia cúmulos masivos, en este caso Abell 85, pues al tratarse de objetos azules (varios con evidencia de actividad al observar sus espectros) significaría que es otro tipo de proceso, como *ram pressure stripping* el cual domina la transformación de galaxias tardías.

De todos los casos observados en la temporada 2012, solo se encontró una galaxia, la cual presenta rasgos de asimetría en su disco estelar. A continuación, se muestra una imagen del campo 15, donde la galaxia [DFL98]374 presenta tal irregularidad y en la cual se realizó un análisis de manera que al realizar la sustracción del modelo de la galaxia a la imagen original se observa una asimetría. Ésta se presenta en contornos obtenidos con *AIPS (Astronomical Image Processing System)*, los cuales permiten visualizar con mayor facilidad las irregularidades.

Para tener mayor información sobre esta asimetría, es preferible observar la galaxia con un telescopio más grande, de manera que la irregularidad sea más clara y se pueda realizar un mejor análisis.

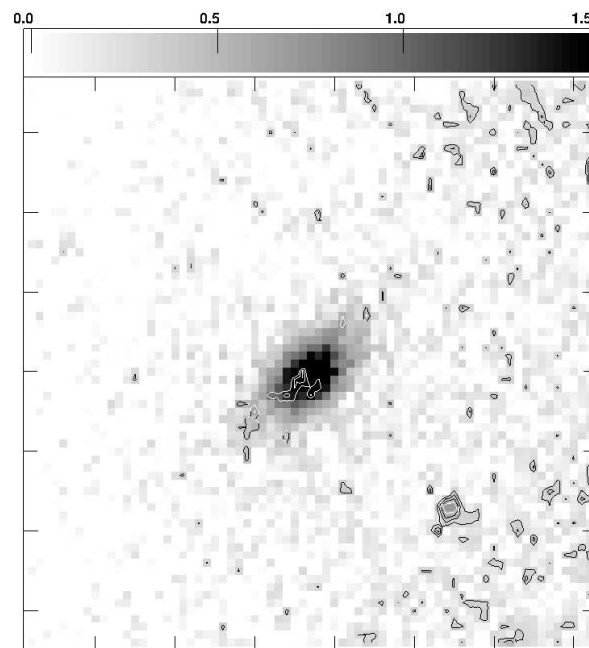


Figura 3.17: Galaxia [DFL98]374 del campo 15. En el fondo se muestra la imagen de la galaxia en el filtro J y en contornos la asimetría encontrada.

Capítulo 4

Resultados del Cúmulo Abell 1367

En esta sección se muestran los resultados obtenidos del análisis de datos observados en la temporada 2012 del cúmulo Abell 1367, en primer lugar se presenta cada campo con las imágenes correspondientes a los tres filtros (J, H y K'), después se da la información obtenida de la fotometría de las galaxias en cada campo y finalmente se muestran los resultados obtenidos del análisis de asimetría.

Los datos de esta temporada no fueron buenos para obtener fotometría, debido a que en la mayoría de las noches de observación hubo malas condiciones climatológicas, las cuales afectaron los datos fotométricos, pero dado que nuestro interés es la evolución de las galaxias, nos enfocamos en la parte morfológica, lo cual no es afectado por éstas.

El cúmulo Abell 1367 a diferencia de la mayoría de los cúmulos está dominado por galaxias espirales, las cuales presentan una amplia gama de estados evolutivos. Se observaron 6 campos, de los cuales uno se encuentra en el centro del cúmulo y los demás están distribuidos en dos grupos que se proyectan al oeste del cúmulo. Las galaxias que se analizaron en los dos grupos presentan evidencia de que las regiones de HI se extienden más allá de los 200Mpc, en ambos grupos [31].

Cúmulo Abell 1367 y emisión de rayos X.

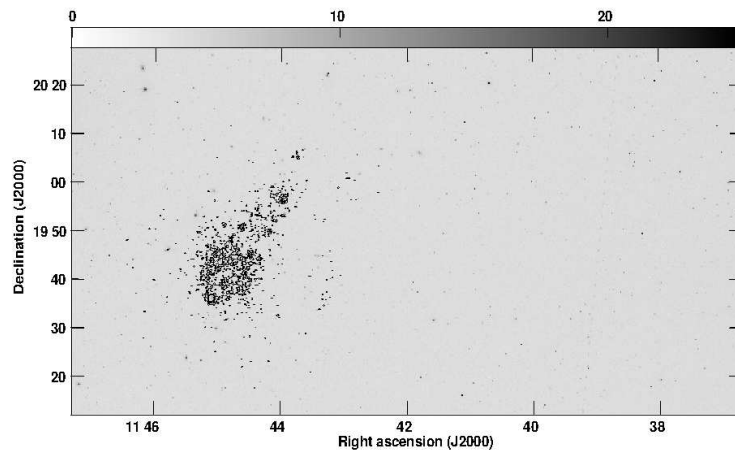


Figura 4.1: Cúmulo Abell 1367. Imagen óptica de SDSS filtro rojo, tamaño del campo, 1.2×1.2 grados, centro en 11 41 00, 19 45 00. En contornos se presenta la emisión de rayos X (ROSAT) del cúmulo.

Grupos A (RSCG 42) y B (FGC 1287) del cúmulo.

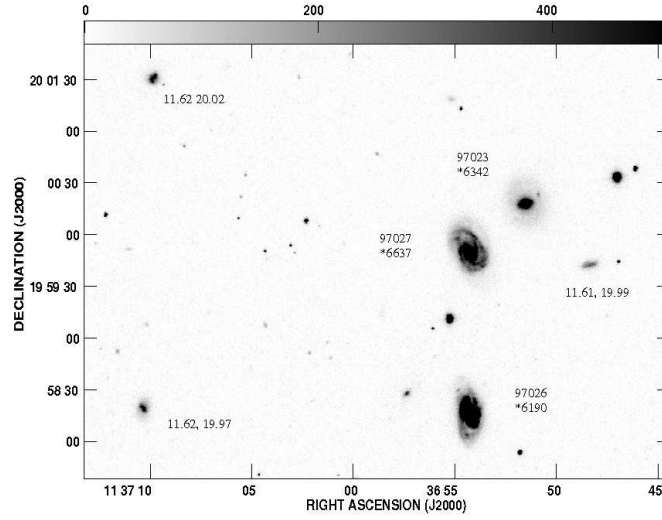


Figura 4.2: Campo A. Imagen obtenida de SDSS en la banda roja, tamaño del campo 0.2×0.2 grados, centro en 11 37 02, 20 00 04. * velocidades radiales.

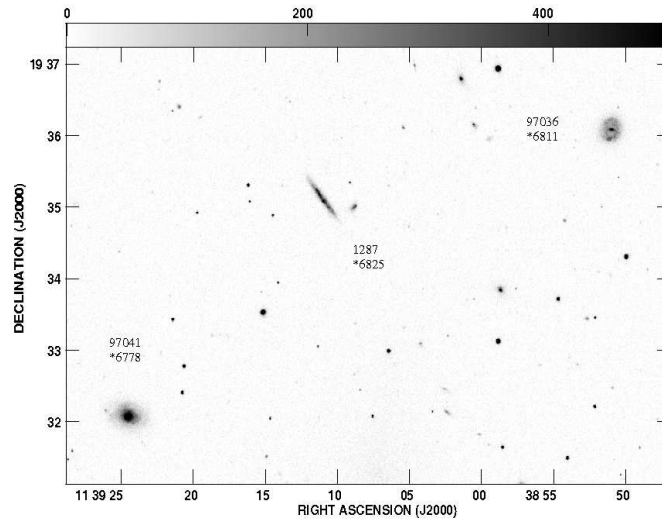


Figura 4.3: Campo B. Imagen obtenida de SDSS en la banda roja, tamaño del campo 0.2×0.2 grados, centro en 11 39 08, 19 35 06. * velocidades radiales.

CAPÍTULO 4. RESULTADOS DEL CÚMULO ABELL 1367

4.1. ATLAS DE IMÁGENES J, H, K'

La siguiente tabla muestra la información detallada de las galaxias en cada campo. Como se observa, un par de galaxias no tienen clasificación morfológica, por tanto, los datos observados pueden servir para obtener esa información y completar la tabla.

Cúmulo ABELL 1367						
Campo	Galaxias [1]	$\alpha_{J2000}, \delta_{J2000}$ [2]	Vel. (km/s) [3]	Magnitud [4]	Diámetro [5]	Morfología [6]
1	**11.61, 19.9	11 36 48.3, +19 59 42	-	20.2	0.30	-
	CGCG 97023	11 36 51.5, +20 00 18	3 342	16.8	0.20	S0
	CGCG 97027	11 36 54.2, +19 59 50	6 637	18.7	0.70	Sc
	CGCG 97026	11 36 54.4, +19 58 15	6 190	*12.9	0.70	SBa pec HII
2	**11.62, 20.02	11 37 09.8, +20 01 31	6 056	23.1	0.06	-
3	CGCG 97036	11 38 51.0, +19 36 05	6 811	19.2	0.50	S0/a
4	*FGC 1287	11 39 10.9, +19 35 06	6 825	*14.3	1.01	Sdm
5	CGCG 97041	11 39 24.4, +19 32 05	6 778	17.6	0.80	S0
6	CGCG 970102S	11 44 16.5, +20 13 01	6 364	16.8	0.60	E
	CGCG 970102N	11 44 17.2, +20 13 24	6 368	18.2	0.30	Sa

Tabla 4.1: Notas: [1] Nombre de las galaxias tomadas de CGCG *Catalogue of Galaxies and of Clusters of Galaxies* [35]; (*) catálogo FGC *Flat Galaxy Catalogue* [18] y (**) catálogo de Sloan Digital Sky Survey. [2] Coordenadas (AR y Dec). [3] Velocidad Radial obtenida de NED. [4] Magnitud del filtro g(SDSS PSF)AB y (*) Magnitud I_{t} obtenida de NED. [5] Diámetro del eje mayor en arcmin obtenido de NED. [6] Clasificación de la galaxia obtenida de NED.

4.1. Atlas de imágenes J, H, K'

A continuación se presentan las imágenes finales de cada campo observado en las tres bandas J, H y K'. Para comparar con el rango visible, se muestra una imagen de *Sloan Digital Sky Survey* (SDSS) en el filtro rojo.

El grupo A fue dedicado a las galaxias CGCG 097-023, CGCG 097-026, CGCG 097-027, SDSS 11.61 19.99, SDSS 11.62 20.02 y SDSS 11.62 19.97. Se observó en tres campos, como se muestra a continuación.

CAPÍTULO 4. RESULTADOS DEL CÚMULO ABELL 1367

4.1. ATLAS DE IMÁGENES J, H, K'

★ *Campo CGCG 097-026*

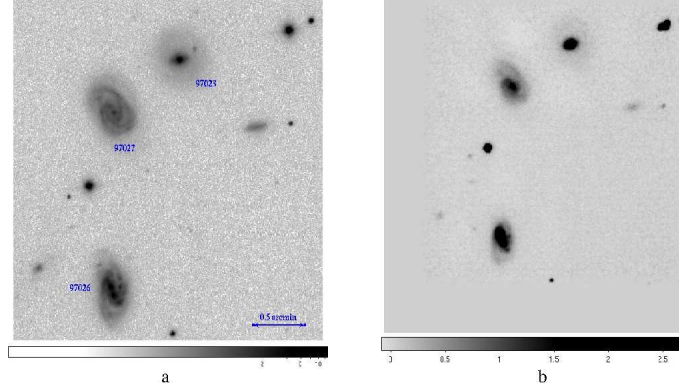


Figura 4.4: Campo CGCG 097-026. a) Imagen de SDSS y b) Filtro J. Tamaño del campo: 3 arcmin.

El campo 1 fue dedicado a las galaxias CGCG 097-023, CGCG 097-026, CGCG 097-027, SDSS 11.61 19.99 y se observó en dos partes. En la temporada de observación 2012 se obtuvieron los filtros J, H y K'.

El grupo fue elegido para estudiarse debido a que la galaxia CGCG 097-026 fue apuntada con el VLA y se obtuvo una fuerte detección en HI [31], la cual presenta una espectacular cola con longitud de $\sim 160 Kpc$. La masa de HI implica que se encuentra en su acreción inicial hacia el cúmulo. Esta evidencia parece indicar una interacción de marea entre 97026 y 97027, dado que tienen una diferencia de velocidades de $\sim 447 Km/s$

Las galaxias CGCG 097-023 y CGCG 097-026, se encuentran separadas por una distancia de 1.7 arcmin ($\sim 42 kpc$) y una velocidad (radial) relativa entre ellas de 152 km/s, esto hace pensar en la posibilidad de que hayan tenido una interacción indirecta dentro de los últimos $\sim 80 \times 10^6$ años. CGCG 097-023 y CGCG 097-027, se encuentran separadas por una distancia de 38 arcsec ($\sim 16 kpc$) y una velocidad (radial) relativa entre ellas de 295 km/s, esto hace pensar en la posibilidad de que hayan tenido una interacción indirecta dentro de los últimos $\sim 30 \times 10^6$ años y finalmente CGCG 097-026 y CGCG 097-027, se encuentran separadas por una distancia de 1.3 arcmin ($\sim 32 kpc$) y una velocidad (radial) relativa entre ellas de 447 km/s, lo cual indica una posibilidad de que hayan tenido una interacción indirecta dentro de los últimos $\sim 61 \times 10^6$ años.

La fotometría se obtuvo sólo en el filtro J, debido a que en las imágenes la señal fue muy baja en los demás filtros, por las condiciones climatológicas de la noche de observación. Los valores de la magnitud se reportaron, pero al comparar difieren de los valores reportados en el catálogo **CGCG**. Por otra parte, al aplicar un análisis de asimetría a las tres galaxias, se detectaron perturbaciones en el disco estelar de las galaxias CGCG 097-026 y CGCG 097-027, las cuales se reportan en la parte final del capítulo.

CAPÍTULO 4. RESULTADOS DEL CÚMULO ABELL 1367

4.1. ATLAS DE IMÁGENES J, H, K'

★ *Campo CGCG 097-027*

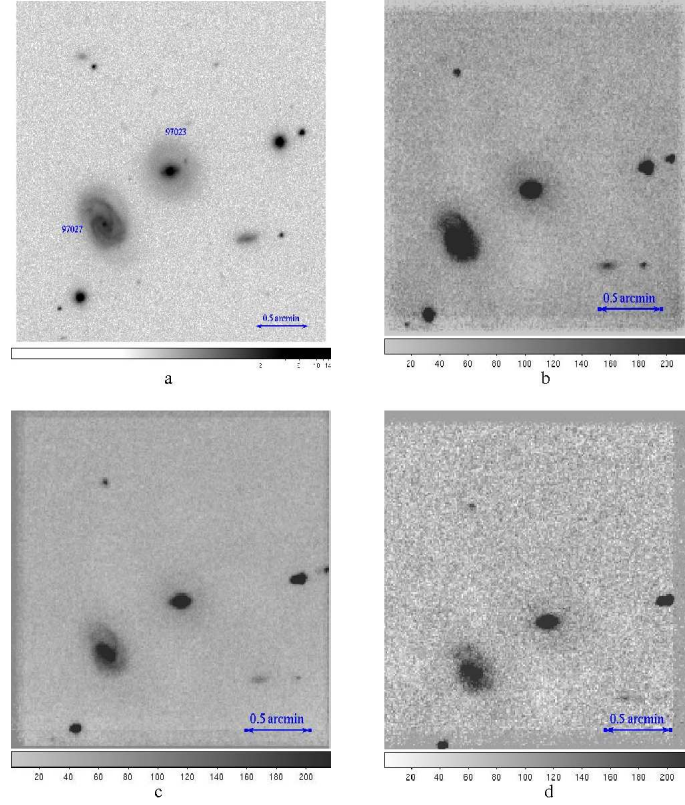


Figura 4.5: Campo CGCG 097-027. a) Imagen de SDSS, b) Filtro J, c) Filtro H y d) Filtro K'. Tamaño del campo: 3 arcmin.

La parte 2 del campo 1 fue dedicado a las galaxias CGCG 097-023 y CGCG 097-027 y se obtuvieron los filtros J, H y K'.

El grupo se volvió a observar, debido a que en la parte 1, estas dos galaxias se encontraban en el borde de la imagen, por lo que no eran confiables sus datos.

La fotometría se obtuvo en los tres filtros, pero nuevamente debido a las condiciones climatológicas de la noche de observación, los valores obtenidos no se acercan a los valores reportados en el catálogo **CGCG**.

Por otra parte, dado que las galaxias ahora se encuentran en la zona central de la imagen, los resultados obtenidos se vuelven más confiables, por lo que se realizó un análisis de asimetría a las dos galaxias y se detectó una perturbación en el disco estelar de la galaxia CGCG 097-027, la cual se reporta en la parte final del capítulo.

CAPÍTULO 4. RESULTADOS DEL CÚMULO ABELL 1367

4.1. ATLAS DE IMÁGENES J, H, K'

★ *Campo 11.62, 20.02*

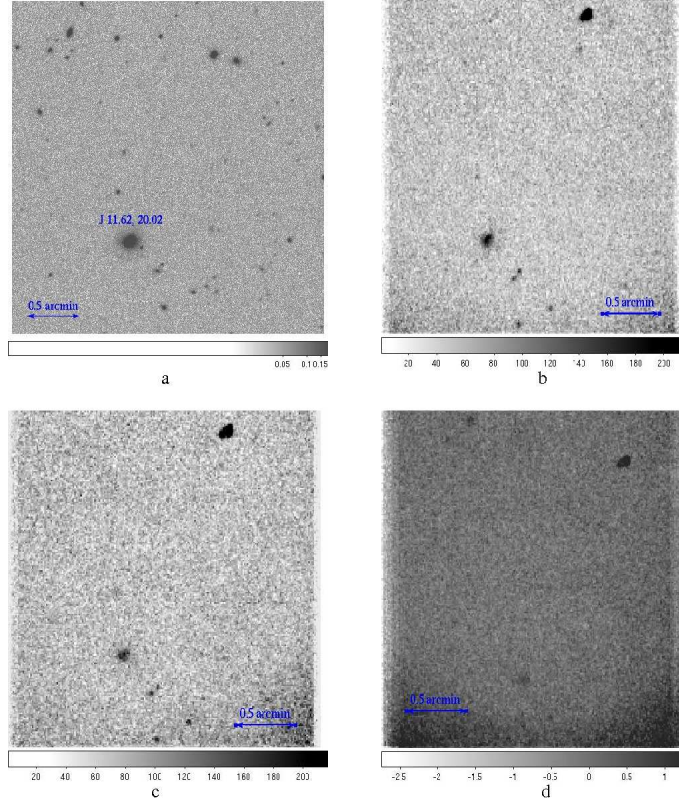


Figura 4.6: Campo 11.62, 20.02. a) Imagen de SDSS, b) Filtro J, c) Filtro H y d) Filtro K'. Tamaño del campo: 3 arcmin.

El campo 2 fue dedicado a la galaxia SDSS 11.62 20.02. En la temporada de observación 2012 se obtuvieron los filtros J, H y K'.

El grupo fue elegido para estudiarse debido a que la galaxia se encuentra proyectada en la misma dirección de la cola de HI detectada en la galaxia CGCG 097-026 y posiblemente por tal razón sea afectada [31].

La fotometría se obtuvo en los tres filtros, los valores obtenidos son reportados y no hay comparación con otros valores. Finalmente debido a su tamaño, fue imposible realizar un análisis de asimetría, por lo que sigue siendo un misterio si es afectada o no por la cola de HI.

CAPÍTULO 4. RESULTADOS DEL CÚMULO ABELL 1367

4.1. ATLAS DE IMÁGENES J, H, K'

El grupo B fue dedicado a las galaxias FGC 1287, CGCG 097-036 y CGCG 097-041. Las cuales se observó en tres campos, como se muestra a continuación.

★ *Campo FGC 1287*

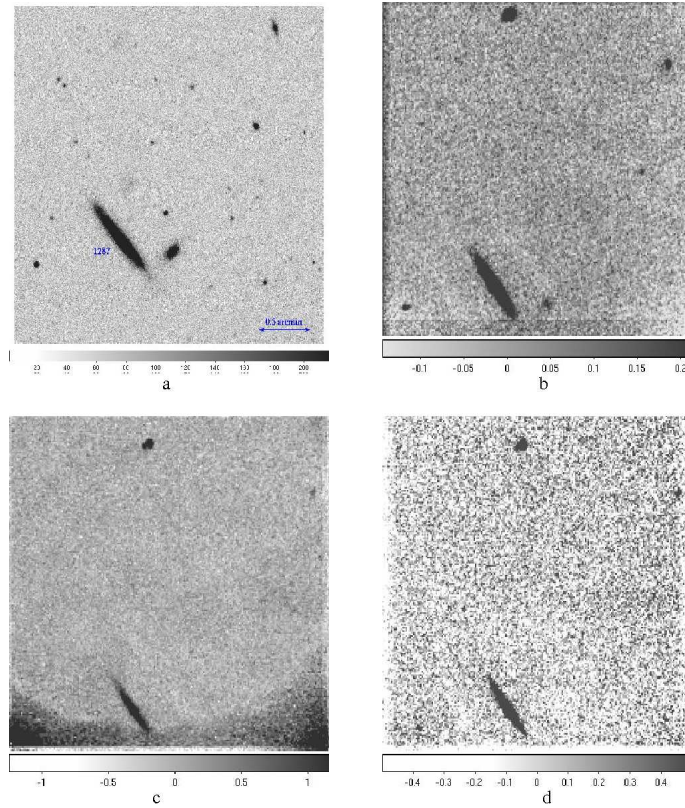


Figura 4.7: Campo FGC 1287. a) Imagen de SDSS, b) Filtro J, c) Filtro H y d) Filtro K'. Tamaño del campo: 3 arcmin.

El campo 3 fue dedicado a la galaxia FGC 1287. En la temporada de observación 2012 se obtuvieron los filtros J, H y K'.

El grupo fue elegido para estudiarse debido a que ésta galaxia fue apuntada con el VLA y se obtuvo una fuerte detección en HI [31], la cual similarmente a CGCG 097-026 presenta una cola extensa de HI.

La fotometría se obtuvo en los tres filtros, pero nuevamente debido las condiciones climatológicas de la noche de observación, los valores obtenidos no se acercan a los valores reportados en el catálogo **CGCG**.

Por otra parte, al aplicar un análisis de asimetría, como era de esperarse, se detectaron perturbaciones en el disco estelar, las cuales se reporta en la parte final del capítulo.

CAPÍTULO 4. RESULTADOS DEL CÚMULO ABELL 1367

4.1. ATLAS DE IMÁGENES J, H, K'

★ *Campo CGCG 097-036*

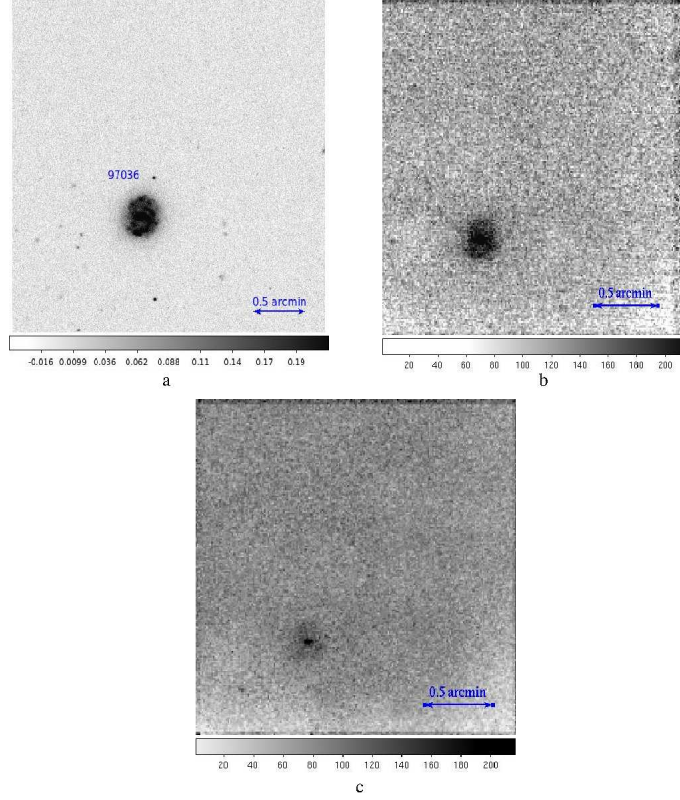


Figura 4.8: Campo CGCG 097-036. a) Imagen de SDSS, b) Filtro J y c) Filtro H. Tamaño del campo: 3 arcmin.

El campo 4 fue dedicado a la galaxia CGCG 097-036. En la temporada de observación 2012 se obtuvieron los filtros J, H y K'.

El grupo fue elegido para estudiarse debido a que ésta galaxia fue apuntada con el VLA y se obtuvo una pequeña detección en HI a comparación de las anteriores [31].

La fotometría se obtuvo sólo en J y H, debido a que la señal en la imagen K fue muy baja debido a las condiciones climatológicas de la noche de observación. Los valores obtenidos difieren un poco de los valores reportados en el catálogo **CGCG**, por la misma razón.

Por otra parte, al aplicar un análisis de asimetría, como era de esperarse, se detectaron perturbaciones en el disco estelar, en particular se observa en uno de los brazos un brote de formación estelar. Los resultados se reportan en la parte final del capítulo.

CAPÍTULO 4. RESULTADOS DEL CÚMULO ABELL 1367

4.1. ATLAS DE IMÁGENES J, H, K'

★ *Campo CGCG 097-041*

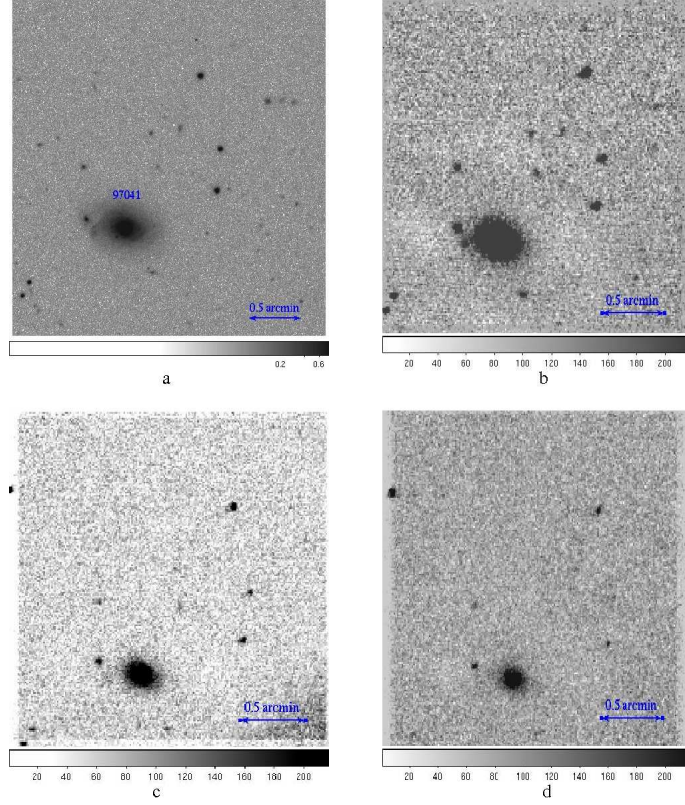


Figura 4.9: Campo CGCG 097-041. a) Imagen de SDSS, b) Filtro J, c) Filtro H y d) Filtro K'. Tamaño del campo: 3 arcmin.

El campo 5 fue dedicado a la galaxia CGCG 097-041. En la temporada de observación 2012 se obtuvieron los filtros J, H y K'.

El grupo fue elegido para estudiarse debido a que ésta galaxia fue apuntada con el VLA y se obtuvo una pequeña detección en HI [31], además de que se encuentra cerca de la galaxia FGC 1287.

La fotometría se obtuvo en los tres filtros y nuevamente debido las condiciones climatológicas de la noche de observación, los valores obtenidos no se acercan a los valores reportados en el catálogo **CGCG**.

Finalmente, al aplicar un análisis de asimetría, no se detectaron perturbaciones en el disco estelar, lo cual es interesante debido a su detección en HI.

CAPÍTULO 4. RESULTADOS DEL CÚMULO ABELL 1367

4.1. ATLAS DE IMÁGENES J, H, K'

Campo central del cúmulo.

★ *Campo CGCG 097-102*

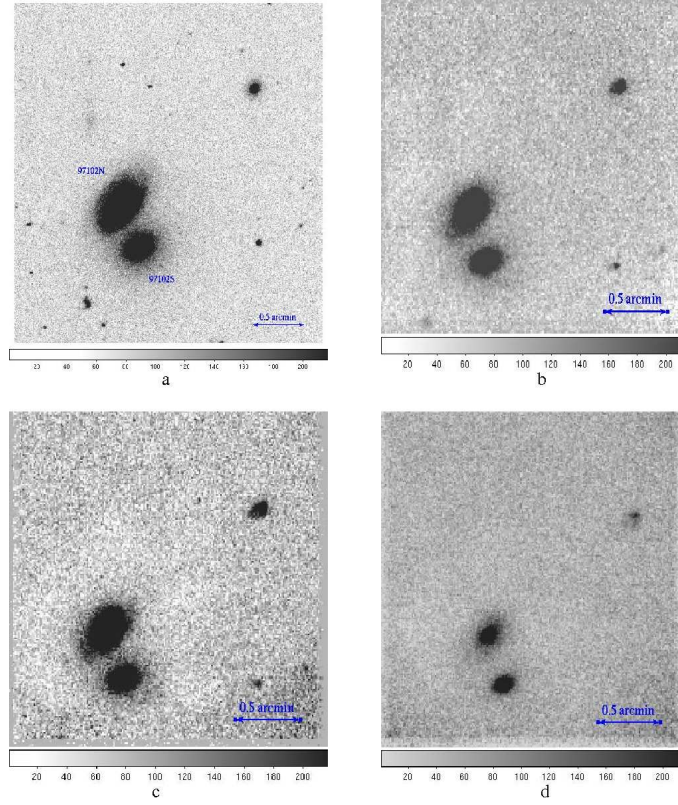


Figura 4.10: Campo CGCG 097-102. a) Imagen de SDSS, b) Filtro J, c) Filtro H y d) Filtro K'. Tamaño del campo: 3 arcmin.

El campo 6 fue dedicado a las galaxias CGCG 097-102S y CGCG 097-102N. En la temporada de observación 2012 se obtuvieron los filtros J, H y K'.

El grupo fue elegido para estudiarse debido a que las galaxias se encuentran muy cerca una de otra y se piensa que existe una fuerte interacción.

Las galaxias se encuentran separadas por una distancia de 21 arcsec (~ 9 kpc) y una velocidad (radial) relativa entre ellas de 4 km/s, esto hace pensar en la posibilidad de que hayan tenido una interacción indirecta dentro de los últimos $\sim 17 \times 10^6$ años.

La fotometría se obtuvo en los tres filtros y en particular los valores en los filtros J y H, son muy cercanos a los valores reportados en el catálogo **CGCG**. Los valores en K' difieren de los reportados debido a las condiciones climatológicas de la noche de observación.

Por otra parte, al aplicar un análisis de asimetría, sólo se detectó en la galaxia norte, una pequeña perturbación, la cual se reporta en la parte final del capítulo.

4.2. Catálogo Fotométrico

Los valores de magnitud, se obtuvieron de las imágenes finales, las cuales se presentaron en la sección anterior en las bandas J, H y K'. La siguiente tabla muestra los valores correspondientes a cada campo.

Fotometría					
	Campo	Galaxias [1]	J	Magnitud H [2]	K'
1	1	**11.61, 19.99	15.78	15.06	-
2		CGCG 97023	12.74	12.56	11.38
3		CGCG 97027	12.44	12.24	11.11
4		CGCG 97026	12.32	-	-
5	2	**11.62, 20.02	15.21	15.39	-
6	3	CGCG 97036	13.81	13.36	-
7	4-1	*FGC 1287	13.88	12.91	13.19
8	4-2	*FGC 1287	13.37	-	12.60
9	5	CGCG 97041	13.15	12.49	12.25
10	6	CGCG 970102S	12.43	11.58	11.56
11		CGCG 970102N	12.35	11.52	11.37

Tabla 4.2: Notas: [1] Nombre de las galaxias tomadas del catálogo de CGCG *Catalogue of Galaxies and of Clusters of Galaxies* [35], (*) catálogo FGC *Flat Galaxy Catalogue* [18] y (**) catálogo de *Sloan Digital Sky Survey*. [2] Magnitud obtenida de las imágenes finales de éste trabajo, (*) magnitudes tomadas de Yoganarasimhan (2013). Los espacios vacíos, se debe a que las imágenes finales, no tienen suficiente señal para obtener una magnitud.

Las siguientes gráficas muestran el error que se encontró al comparar la magnitud obtenida en este trabajo y la magnitud obtenida de 2MASS (The Two Micron All Sky Survey). En el caso ideal, los puntos en las gráficas deberían estar alineados en $y = 0$, pero como se observa, en algunos casos existe un error muy grande, esto debido a las condiciones climatológicas de las noches de observación.

Filtro J

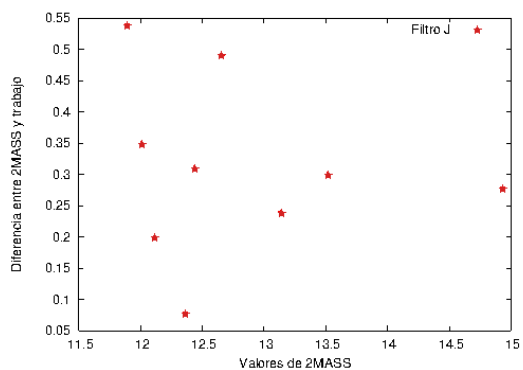


Figura 4.11: Gráfica de error entre magnitud de 2MASS y la obtenida en este trabajo.

Filtro H

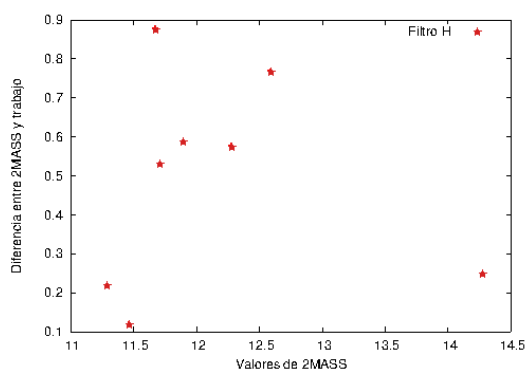


Figura 4.12: Gráfica de error entre magnitud de 2MASS y la obtenida en este trabajo.

Filtro K'

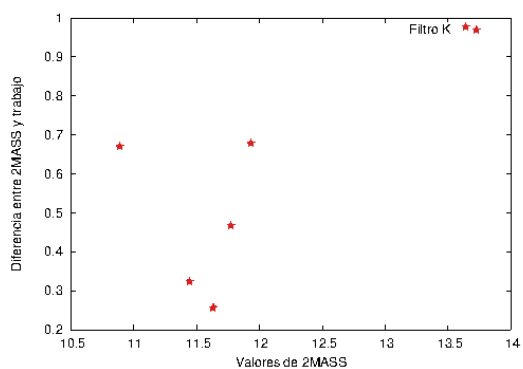


Figura 4.13: Gráfica de error entre magnitud de 2MASS y la obtenida en este trabajo.

4.3. Resultado de Asimetrías

Del análisis de asimetría realizado a todas las galaxias, en términos generales se encontraron perturbaciones en el disco estelar de población vieja. De los resultados en HI obtenidos en T. C. Scott et al (2011) [31], se tenía una idea de la irregularidad de las galaxias. Del grupo A, se encontraron irregularidades en las galaxias CGCG 097-026 y CGCG 097-027. Del grupo B, se encontraron irregularidades en las galaxias FGC 1287 y CGCG 097-036. Y finalmente en la región central, se encontró irregularidad en la galaxia norte CGCG 097-102N. Las deformaciones encontradas podrían indicar una interacción de marea entre los miembros del grupo.

Las interacciones de marea entre pares de galaxias actúan en el gas, el polvo y la componente estelar, así como sobre la materia oscura, con una eficiencia en función de la gravedad de delimitación de los diversos componentes, esto produce transformaciones morfológicas selectivas. Dado que las fuerzas de marea actúan como M/R^3 , si los radios galaxia no son demasiado pequeñas en comparación con la separación media entre las galaxias, las interacciones de marea pueden ser muy eficiente en la eliminación de la materia de los halos galácticos. En los casos cuando las galaxias presentan asimetría, esto indica que las fuerzas de marea debidas a la presencia de una o varias galaxias es mayor a la fuerza de restitución (fuerza que mantiene unidas las estrellas), por lo tanto la vencen y se presentan deformaciones.

En cada caso se realizó un modelo de la galaxia de interés, el cual sirve para realizar una sustracción del modelo a la galaxia original, de manera que el residuo presente las perturbaciones. A continuación, se presenta una imagen de cada galaxia con su respectiva perturbación, la cual se muestra en contornos obtenidos con *AIPS* (*Astronomical Image Processing System*), los cuales permiten visualizar con mayor facilidad las irregularidades.

★ Grupo A

Este grupo es muy interesante debido a que la galaxia CGCG 097-026 presenta una enorme cola detectada en HI con el VLS [31] y en la proyección de la cola, se encuentra la galaxia CGCG 097-027.

Al realizar el análisis de asimetría se detectaron irregularidades en éstas galaxias. Las siguientes imágenes muestran los resultados donde la galaxia se presenta en una imagen óptica del filtro J y los contornos representan la asimetría (obtenidos en *AIPS*). Es importante mencionar que al realizar la sustracción del modelo a la galaxia, siempre se obtiene un residuo en el centro debido el centro del modelo va cambiando conforme abarca radios más grandes, pero lo que nos interesa es la parte de afuera.

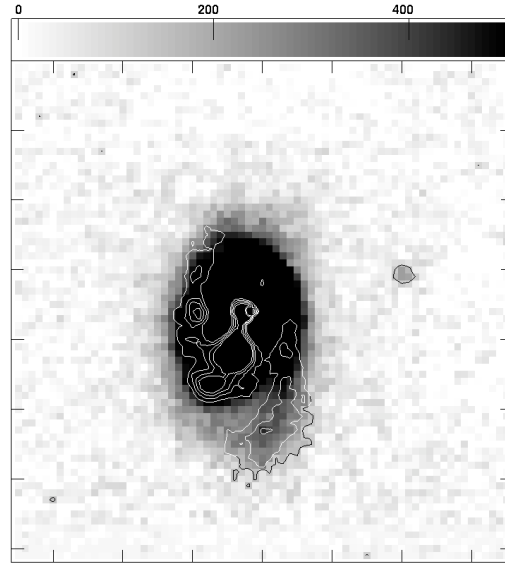


Figura 4.14: Galaxia CGCG 097-026. En el fondo se muestra la imagen de la galaxia en el filtro J y en contornos la asimetría encontrada.

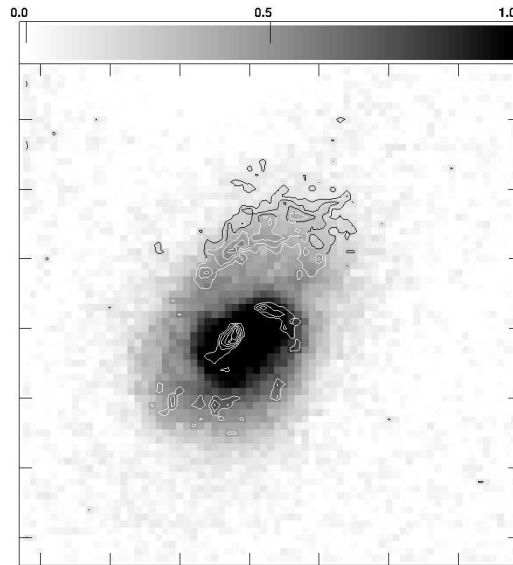


Figura 4.15: Galaxia CGCG 097-027. En el fondo se muestra la imagen de la galaxia en el filtro J y en contornos la asimetría encontrada.

★ *Grupo B*

Sin duda este grupo es muy interesante, dado que la galaxia FGC 1287 tiene una extraordinaria cola detectada en HI [31]. La causa de la cola en esta galaxia no es clara, T. C. Scott et. al. (2012) descartan algunos efectos como *ram-pressure-stripped*, mecanismos hidrodinámicos y efectos de

mareas [31].

Las siguientes imágenes muestran los resultados del análisis de asimetría.

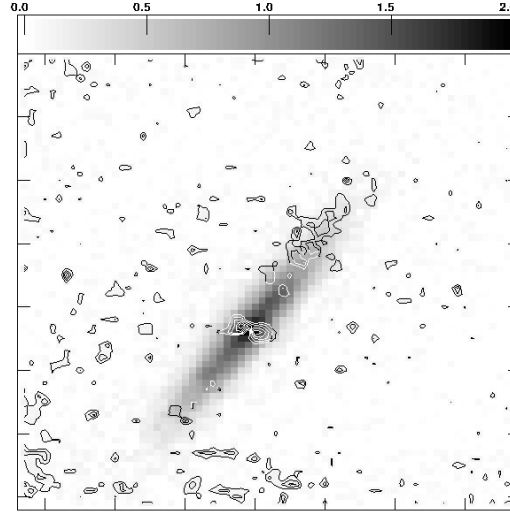


Figura 4.16: Galaxia FGC 1287. En el fondo se muestra la imagen de la galaxia en el filtro J y en contornos la asimetría encontrada.

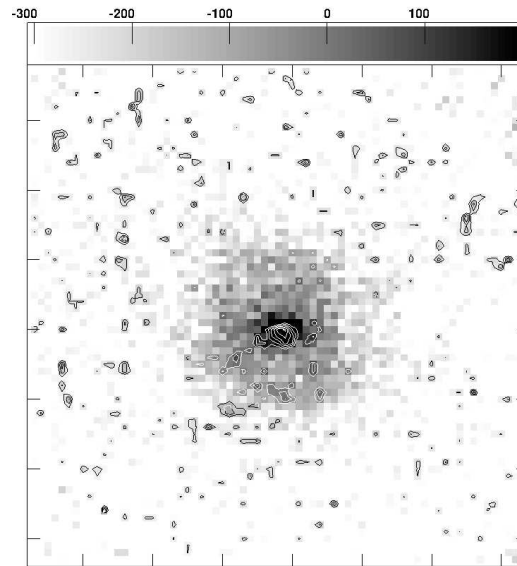


Figura 4.17: Galaxia CGCG 097-036. En el fondo se muestra la imagen de la galaxia en el filtro J y en contornos la asimetría encontrada.

CAPÍTULO 4. RESULTADOS DEL CÚMULO ABELL 1367

4.3. RESULTADO DE ASIMETRÍAS

★ *Grupo Central*

El campo observado contiene dos de las muchas galaxias que se encuentran el centro del cúmulo. En particular este par es muy interesante debido a que se encuentran muy cerca.

Al realizar el análisis de asimetría, se esperaba encontrar gran irregularidad en las dos galaxias, pero sólo se detectó en la galaxia norte, lo cual indica que probablemente se encuentran en un proceso temprano de interacción.

Las siguientes imágenes muestran los resultados del análisis de asimetría.

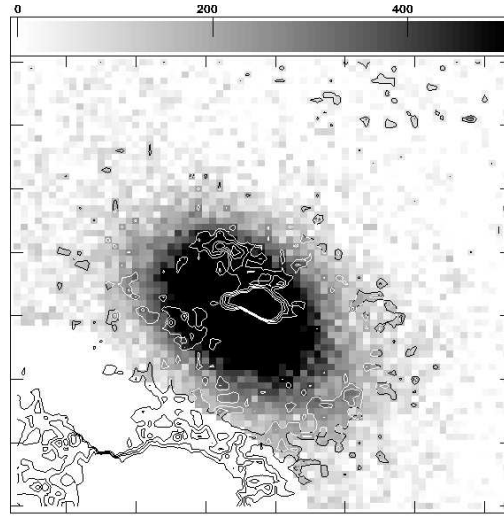


Figura 4.18: Galaxia CGCG 097-102. En el fondo se muestra la imagen de la galaxia en el filtro J y en contornos la asimetría encontrada.

Capítulo 5

Conclusiones

Hemos llevado a cabo un estudio de galaxias, principalmente espirales, en dos cúmulos cercanos: Abell 85 y Abell 1367, con el fin de estudiar los mecanismos físicos que dominan la evolución de estas galaxias y su posible transformación en objetos de tipo lenticular en cúmulos masivos. Para ello, hemos llevado a cabo observaciones de imágenes del cercano infrarrojo en las bandas J, H y K', las cuales nos permiten buscar posibles asimetrías en los discos estelares de población de edad intermedia/avanzada, como indicadores de interacciones gravitacionales con galaxias vecinas y/o con el potencial global del cúmulo. Hemos obtenido, además de datos fotométricos y un atlas de imágenes, un análisis detallado de asimetría en los discos estelares de nuestra muestra. Este último análisis, que se hace a partir del residuo de la substracción de un modelo simétrico de la imagen original de una galaxia dada, nos permite evaluar el grado de asimetría que presentan algunas galaxias. En este trabajo nos limitamos a hacer un estudio cuantitativo de dichas asimetrías, debido a que algunas galaxias (especialmente las de Abell 85) son demasiado pequeñas para llevar a cabo análisis cuantitativos, por ejemplo, usando parámetros de Fourier. Sin embargo, se contempla aplicar estas técnicas en cuanto se obtengan imágenes con telescopios de mayor diámetro.

En lo que concierne al cúmulo Abell 85, la mayoría de los 26 campos elegidos para el estudio de asimetrías NIR, ya habían sido observados. Esta tesis estuvo en parte dedicada a la observación de campos que incluyen galaxias muy azules, varias de ellas detectadas en HI con el VLA. A pesar de que las imágenes obtenidas con el telescopio 2,1 m del OAN fueron de buena calidad para el estudio de la morfología, una fracción de los datos fotométricos adolecen de incertidumbres mayores a $0,2\ mag$, principalmente debido a la presencia de cirrus durante algunas noches de observación, por lo que estas observaciones debían ser repetidas. En cuanto a las asimetrías, de los campos observados en esta tesis, sólo una galaxia presentó claras perturbaciones del disco estelar. En total, considerados los 26 campos obtenidos de todas las temporadas, se obtuvieron apenas una docena de asimetrías, lo que representa alrededor del 20 % de las galaxias analizadas con esta técnica. Y dado que la mayoría de las galaxias observadas, aún sin presentar asimetría, son activas (*starburst* o *AGN*) o presentan deficiencia en HI, entonces es evidente que otros mecanismos ambientales dominan su evolución. En este caso, la conclusión es que los procesos físicos de tipo hidrodinámico como el "*ram pressures stripping*" es el principal responsable de los efectos aquí reportados.

En el caso de Abell 1367 es interesante debido a que es un sistema dinámicamente más joven (comparado con Abell 85) y como es de esperar, contiene una mayor fracción de espirales en una amplia gama de estados evolutivos, desde pasivas, hasta enrojecidas, pasando por *starburst* y *AGNs*. En esta tesis nos enfocamos al estudio de dos grupos con propiedades cercanas a los compactos de Hickson, los cuales se encuentran a algunos Mpc al oeste del centro del cúmulo. Es sabido que estos grupos se encuentran en dirección a la estructura filamentaria que alimenta

a este cúmulo, por lo que suponemos que ambos grupos están en caída hacia Abell 1367. Ambos grupos han sido observados en HI con el VLA y ambos presentan fuertes perturbaciones en las componentes gaseosas de las galaxias individuales, uno de ellos presentando la “cola” de HI más larga que se conozca (250 kpc) a partir de una galaxia individual. Respecto al estudio de las imágenes NIR, las galaxias de estos dos grupos de Abell 1367, a diferencia de lo encontrado en Abell 85, presentan deformaciones evidentes de los discos estelares, lo que indica una constante presencia de interacciones de marea entre los miembros de los grupos.

Como resumen de los principales resultados de esta tesis tenemos:

Se obtuvo un atlas de imágenes, en tres filtros del infrarrojo cercano J, H y K', de los cuales se tienen:

- Cúmulo Abell 85: 9 campos del filtro J, 8 campos del filtro H y 11 campos del filtro K'.
- Para tener el atlas completo, se agregaron las imágenes obtenidas en temporadas de observación pasadas.
- Cúmulo Abell 1367: 6 campos del filtro J, 6 campos del filtro H y 5 campos del filtro K'.

Para el catálogo fotométrico que incluye 38 galaxias de ambos cúmulos se tienen:

- Cúmulo Abell 85: 21 galaxias del filtro J, 18 galaxias del filtro H y 18 galaxias del filtro K'.
- Cúmulo Abell 1367: 11 galaxias del filtro J, 9 galaxias del filtro H y 6 galaxias del filtro K'.

Como se mencionó anteriormente, una fracción importante de nuestras magnitudes tienen desviaciones mayores a $0,2\text{ mag}$ relativas al catálogo *2MASS*, debido muy posiblemente a la presencia de cirrus delgados en varias noches de observación.

En el análisis de asimetría se tuvieron los siguientes resultados:

- Cúmulo Abell 85: Se encontró solo un caso de perturbación en la galaxia [DFL98]374. La mayoría de los datos que se analizaron en este trabajo pertenecen a la región SE en donde se esperaban más asimetrías, por tratarse de galaxias miembro de un cúmulo pobre (o “*loose group*”) que inicia su interacción con el cuerpo principal de Abell 85.

- Cúmulo Abell 1367: En este cúmulo se encontraron cinco galaxias que presentan perturbaciones en su disco estelar. Dos son del grupo A, dos del Grupo B y una de la región central.

Del grupo A las galaxias son CGCG 097-026 y CGCG 097-027. En particular CGCG 097-026 tiene una estructura en HI $\sim 250\text{ kpc}$ [31], la cual proyectada cubre a CGCG 097-027. Del análisis de asimetría las dos resultaron con perturbaciones en sus discos estelares.

Del grupo B las galaxias son FGC 1287 y CGCG 097-036. Al observar FGC 1287 con el VLA [31] se encontró una extraordinaria cola detectada en HI. La causa de la cola en esta galaxia no es clara, y los autores que la reportan descartan algunos efectos hidrodinámicos, por lo que nuestros resultados son de particular importancia ya que confirmarían que son el resultado de efectos de marea. Acerca del grupo, la galaxia CGCG 097-036 presenta también una estructura de HI, aunque pequeña comparada con la de FGC 1287. Al hacer el análisis de asimetría se encontró perturbación en uno de sus brazos.

Finalmente en la región central, a pesar de ser un caso muy interesante, sólo se encontró asimetría en CGCG 097-102N, lo cual podría indicar que se encuentran en interacción temprana con su compañera CGCG 097-102S.

Para concluir podemos decir que hemos mostrado que el análisis de imágenes de cercano infrarrojo son una herramienta poderosa para el estudio de los efectos ambientales y la evolución de galaxias en cúmulos, aún en sistemas con $z = 0,05$.

Los resultados obtenidos, van a servir para comparar con modelos numéricos de interacciones, tanto hidrodinámicas como gravitacionales.

Además de los resultados científicos, la autora de esta tesis se entrenó en las siguientes actividades: preparación de temporada de observación de Abell 85; asistir a dicha temporada y entrenarse en la correcta adquisición de imágenes NIR. Aprender el procedimiento de reducción de datos con *IRAF* y utilización de *scripts* que le ayudaron a realizar esta tarea de manera más eficiente. Por último, llevó a cabo el análisis de los datos y la correlación de la información arrojada por ellos, con la física relacionada con los procesos que dominan la evolución de sus objetos de estudio. Aunque no participó en la temporada de Abell 1367, ella llevó a cabo en su totalidad la reducción y análisis de imágenes. Por último, para la redacción de la tesis, tuvo que llevar a cabo una revisión bibliográfica bastante completa para tener un panorama del lugar que ocupan sus resultados en el contexto de la astrofísica actual.

Los resultados de esta tesis, puestos en conjunto con trabajo que se realiza en paralelo, serán enviados para su publicación en el futuro cercano a una revista de circulación internacional (*MNRAS* o *Astronomical Journal*).

TRABAJO FUTURO

En ambos cúmulos, sobre todo en Abell 85, se observó que muchas galaxias no tienen velocidades radiales, lo cual hace que algunos resultados no sean completos, por ejemplo, la interacción de galaxias. Por lo tanto es importante realizar espectros de éstas galaxias. Para ello se han solicitado, con éxito, cinco noches de observación espectroscópica con el 2,1 *m* del OAN y el “Boller y Chivens” para completar esta parte del proyecto. De igual manera, la mayoría de las galaxias de Abell 85 carecen de clasificación morfológica, por lo que es importante obtener los perfiles de brillo. Por otra parte, dado que los resultados fotométricos de la temporada 2012 no fueron todo lo buenos que se esperaba, se contempla la posibilidad de volver a observar algunos campos. Sin embargo, se planea utilizar telescopios del rango 3,6 *m* (*CFHT*) a 4,0 *m* (*Mayall KPNO*, o *WHT*) con cámaras NIR de más de 20 *armin* de campo para completar estos *surveys*, lo cuales, incluirán a otros cúmulos como Abell 496 y Abell 2670 que ya fueron observados con el VLA. Finalmente, con imágenes de mejor calidad, se debe aplicar más de una técnica de asimetrías, al menos una de las cuales permita cuantificar el grado de perturbación.

Bibliografía

- [1] Abell, G. O., *The distribution of rich clusters of galaxies*, Astronomical Journal, Vol. 62, pp. 3-211, 1957.
- [2] Abell, G. O.; Corwin, H. G., Jr. and Olowin, R. P., *A catalog of rich clusters of galaxies*, Astrophysical Journal Supplement Series, Vol. 70, pp. 1-138, 1989.
- [3] Bautz, L. P. and Morgan, W. W., *On the Classification of the Forms of Clusters of Galaxies*, Astrophysical Journal, Vol. 162, pp. L149-L153, 1970.
- [4] Boselli, A. and Gavazzi, G., *Environmental Effects on Late-Type Galaxies in Nearby Clusters*, The Publications of the Astronomical Society of the Pacific, Vol. 118, pp. 517-559, 2006.
- [5] Bravo-Alfaro, H.; Caretta, C. A.; Lobo, C.; Durret, F. and Scott, T., *Galaxy evolution in Abell 85. I. Cluster substructure and environmental effects on the blue galaxy population*, Astronomy and Astrophysics, Vol. 495, pp. 379-387, 2009.
- [6] Bravo-Alfaro, H.; Scott, T. C.; Brinks, E.; Cortese, L.; Granados, P.; Navarro-Poupard, F.; Mayya, Y. D. and Durret, F., *Environmental Effects in Galaxy Clusters: Infalling Groups in Abell 85 and 1367*, Tracing the Ancestry of Galaxies (on the land of our ancestors, Proceedings of the International Astronomical Union, IAU Symposium, Vol. 277, pp. 296-299, 2011.
- [7] Byrd, G. and Valtonen, M., *Tidal generation of active spirals and S0 galaxies by rich clusters*, Astrophysical Journal, Vol. 350, pp. 89-94, 1990.
- [8] Cortese, L.; Minchin, R. F.; Auld, R. R.; Davies, J. I., et al. *The Arecibo Galaxy Environment Survey - II. A HI view of the Abell cluster 1367 and its outskirts*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Vol. 383, pp. 1519-1537, 2008.
- [9] Cruz-González, I.; Carrasco, L.; Ruiz, E.; et al. *Camila: infrared camera/spectrograph.*, Revista Mexicana de Astronomía y Astrofísica, Vol. 29, pp. 197-201, 1994.
- [10] Dressler, A., *A catalog of morphological types in 55 rich clusters of galaxies*, Astrophysical Journal Supplement Series, Vol. 42, pp. 565-609, 1980.
- [11] Durret, F.; Forman, W.; Gerbal, D.; Jones, C. and Vikhlinin, A., *The rich cluster of galaxies ABCG 85. III. Analyzing the ABCG 85/87/89 complex*, Astronomy and Astrophysics, Vol. 335, pp. 41-48, 1998.
- [12] Frank H. Shu, *The Physical Universe, An Introduction to Astronomy*, University Science Books, Ed. 1, 1982.
- [13] Fujita, Y., *Quantitative Estimates of Environmental Effects on the Star Formation Rate of Disk Galaxies in Clusters of Galaxies*, The Astrophysical Journal, Vol. 509, pp. 587-594, 1998.

- [14] Gunn, J. E. and Gott, J. R., *III, On the Infall of Matter Into Clusters of Galaxies and Some Effects on Their Evolution*, Astrophysical Journal, Vol. 176, pp. 1-20, 1972.
- [15] H. Karttunen; P. Kröger, H. Oja and M. Poutanen K. J. Donner., *Fundamental Astronomy*, Springer, Ed. 5, 2007.
- [16] Hawarden, T. G.; Leggett, S. K.; Letawsky, M. B.; Ballantyne, D. R. and Casali, M. M., *JHK standard stars for large telescopes: the UKIRT Fundamental and Extended lists*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Vol. 325, pp. 563-574, 2001.
- [17] Henriksen, M. and Byrd, G., *Tidal Triggering of Star Formation by the Galaxy Cluster Potential*, Astrophysical Journal, Vol. 459, pp. 82-88, 1996.
- [18] Karachentsev, I. D.; Karachentseva, V. E. and Parnovskij, S. L., *Flat galaxy catalogue*, Astronomische Nachrichten, Vol. 314, pp. 97-222, 1993.
- [19] Kempner, J. C.; Sarazin, C. L. and Ricker, P. M., *Chandra Observations of A85: Merger of the South Subcluster*, The Astrophysical Journal, Vol. 579, pp. 236-246, 2002.
- [20] Kodama, T.; Tanaka, M.; Tamura, T.; Yahagi, H., et al. *Panoramic Views of Cluster-Scale Assemblies Explored by Subaru, Wide-Field Imaging*, Publications of the Astronomical Society of Japan, Vol. 57, pp. 309-323, 2005.
- [21] Larson, R. B.; Tinsley, B. M. and Caldwell, C. N., *The evolution of disk galaxies and the origin of S0 galaxies*, Astrophysical Journal, Vol. 237, pp. 692-707, 1980.
- [22] Mayya, Y. D., *Comunicación Privada*, 2011.
- [23] Moore, B.; Katz, N.; Lake, G.; Dressler, A. and Oemler, A., *Galaxy harassment and the evolution of clusters of galaxies*, Nature, Vol. 379, pp. 613-616, 1996.
- [24] Moore, B.; Lake, G. and Katz, N., *Morphological Transformation from Galaxy Harassment*, Astrophysical Journal, vol. 495, pp. 139-151, 1998.
- [25] Moore, B.; Lake, G.; Quinn, T. and Stadel, J., *On the survival and destruction of spiral galaxies in clusters*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Vol. 304, pp. 465-474, 1999.
- [26] Navarro, F., *Tesis de Licenciatura*, Universidad de Guanajuato, 2011.
- [27] Nulsen, P. E. J., *Transport processes and the stripping of cluster galaxies*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Vol. 198, pp. 1007-1016, 1982.
- [28] Rood, H. J. and Sastry, G. N., *"Tuning Fork Classification of Rich Clusters of Galaxies*, Publications of the Astronomical Society of the Pacific, Vol. 83, pp. 313-319, 1971.
- [29] Slezak, E.; Durret, F.; Guibert, J. and Lobo, C., *A photometric catalogue of galaxies in the cluster Abell 85*, Astronomy and Astrophysics Supplement, Vol. 128, pp. 67-73, 1998.
- [30] Scott, T. C.; Bravo-Alfaro, H.; Brinks, E.; Cortese, L. and Boselli, A., *Probing evolutionary mechanisms in galaxy clusters: HI in Abell 1367*, Astronomische Nachrichten, Vol. 330, pp. 919-923, 2009.
- [31] Scott, T. C.; Cortese, L.; Brinks, E.; Bravo-Alfaro, H.; Auld, R. and Minchin, R., *Two long H I tails in the outskirts of Abell 1367*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters, Vol. 419, pp. L19-L23, 2012.
- [32] Venkatapathy, Y. *Tesis de Maestría*, Universidad de Guanajuato, 2013

- [33] Whitmore, B. C.; Gilmore, Diane M. and Jones, C., *What determines the morphological fractions in clusters of galaxies?*, Astrophysical Journal, Vol. 407, pp. 489–509, 1993.
- [34] Zwicky, F., *Morphological stronomy*, The Observatory, Vol. 68, pp. 121-143, 1948.
- [35] Zwicky, F.; Herzog, E.; Wild, P.; Karpowicz, M. and Kowal, C. T., *Catalogue of galaxies and of clusters of galaxies, Vol. I*, Pasadena: California Institute of Technology (CIT), 1961.