



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO

INSTITUTO DE ASTRONOMÍA
CENTRO DE RADIOASTRONOMÍA Y ASTROFÍSICA
FACULTAD DE CIENCIAS

“Fotometría de Anillos Polares
Galácticos”

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE

MAESTRO EN CIENCIAS (ASTRONOMÍA)

P R E S E N T A

ARTURO

GODÍNEZ

MARTÍNEZ



DIRECTOR DE TESIS: DR. ALAN M. WATSON



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

*A mis abuelitos:
Antonio, Carmen, Francisco y Lucía.*

Agradecimientos

Agradezco a mi familia por su apoyo, a mis profesores por los conocimientos compartidos, al Instituto de Astronomía de la UNAM por darme casa, al CRyA (investigadores, personal administrativo e intendente) por darme hogar, a mis compañeros y amigos por la convivencia.

Agradezco especialmente a mi asesor, Alan Watson, por enseñarme a hacer ciencia, y a mis sinodales Pedro Colín, Michael Richer, Simon Kemp y José Antonio de Diego, por sus valiosos comentarios.

A todos les debo la realización de ésta tesis. Gracias.

Índice general

1. Introducción	1
1.1. Definición	1
1.2. Antecedentes	1
1.3. El Catálogo de Anillos Polares	3
1.4. Galaxias con Anillo Polar confirmadas	4
1.5. Posibles orígenes de las GAP	6
1.6. Halos de materia oscura en las GAP	7
1.7. Importancia de la Forma del Halo de Materia Oscura	8
1.8. Formación estelar en las GAP	8
1.9. El Problema de la Estabilidad	8
2. Metas	11
3. Datos	13
3.1. Muestra	13
3.2. Observaciones	13
3.3. Reducción	14
3.4. Calibración	14
4. Modelos Galácticos	23
5. Fotometría	27
5.1. Extinción Galáctica	27
5.2. Galaxias Anfitrionas	28
5.3. Anillos Polares	28
5.4. Comparación con Anteriores Fotometrías	29
6. Discusión	35
6.1. Magnitudes de los Anillos	35

6.2. Intervalo de Colores de los Anillos	35
6.3. Los Anillos Azules de PRC B-17 y B-21	36
6.4. El Anillo Rojo de PRC B-20	36
7. Conclusiones	39
8. Trabajo Futuro	41
8.1. Confirmación	41
8.2. Extinción	41
8.3. Ampliación de la Muestra	42
8.4. Aumento en el Tiempo de Exposición	42
8.5. Campos Planos del Cielo	42

Capítulo 1

Introducción

1.1. Definición

Las *Galaxias con Anillo Polar* (GAP, de aquí en adelante) son sistemas con dos componentes cinemáticas distintas, en planos casi ortogonales (Cox & Sparke 1996). La primera componente se trata de una galaxia central, usualmente una S0, con poco polvo y población estelar vieja. La segunda componente es el llamado *Anillo Polar*, usualmente un anillo de gas, polvo y estrellas, y con una órbita casi circumpolar respecto a la galaxia anfitriona.

1.2. Antecedentes

Halton Arp publicó en 1966 su *Atlas de Galaxias Peculiares*. Parte de ese trabajo se basó en galaxias que anteriormente había estudiado Fritz Zwicky. En muchas de las imágenes se podían observar filamentos surgiendo de las galaxias y a veces formando puentes hacia otras galaxias. Zwicky ya había propuesto que esos filamentos eran producidos por fuerzas de marea y que eran prueba de la existencia de interacción entre las galaxias. Entonces empezó a ser claro que el estudio de estas galaxias y sus interacciones “congeladas” en el tiempo, eran una buena herramienta para estudiar la vida de las galaxias.

En el catálogo de Arp también se podían encontrar galaxias que parecían tener forma de “huso” (*spindle*, en inglés). Este término fue acuñado por Sandage (1961) al referirse a la apariencia de la componente central de Arp 336 (Galaxia de la Hélice o NGC 2685, ver figura 1.1) y dijo que era, tal vez, la galaxia más

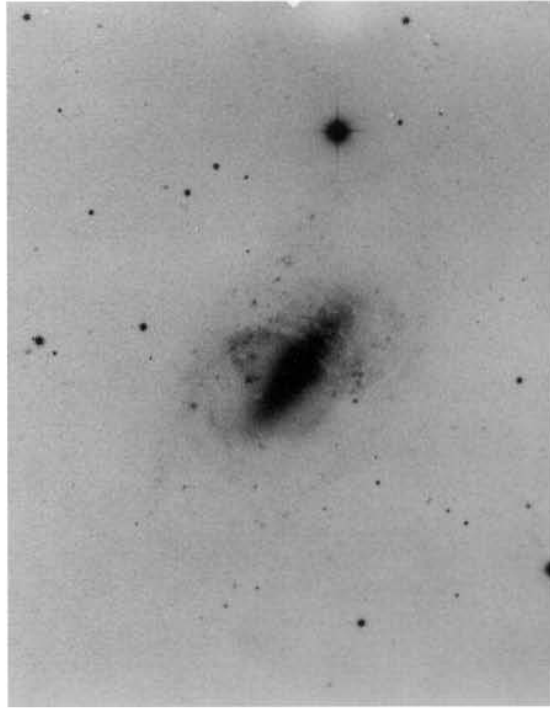


Figura 1.1: Galaxia Hélice (NGC 2685), del *Catálogo de Galaxias Peculiares de Arp*. La componente central es la galaxia anfitriona con aparente forma de huso.

inusual del catálogo Shapley-Ames. Ésta es la imagen estereotipo de una GAP. El “huso” corresponde a la galaxia central, vista un poco inclinada. En México seguramente hubiésemos dicho que parecía un “bolillo”. Como vemos, debido a la intuición, inicialmente se pensó que la componente central tenía forma de prolato con la segunda componente, con aparente forma espiral, girando alrededor de sus ejes menores.

Schechter y Gunn (1978) dieron a conocer que la componente central de NGC 2685 no era un “huso” sino un “hot cake”, es decir, que no era una galaxia con forma de prolato sino una galaxia plana. Hicieron un estudio de la curva de rotación en NGC 2685 a lo largo del aparente eje mayor y, basándose en él, sugirieron que se trataba de una galaxia S0 vista casi de canto con un disco de gas y polvo en órbita polar. Por primera vez se encontró que la galaxia y la componente polar estaban rotando en ejes distintos y casi perpendiculares uno del otro. Posteriormente, se encontraron los mismos resultados en otras galaxias *huso*, es decir, una galaxia central S0 y una componente polar (por ejemplo: Whitmore et al., 1982).

En los años setenta y ochenta se descubrieron la mayoría de las GAP que

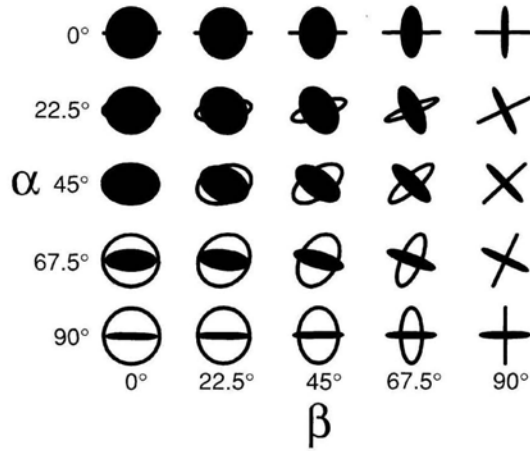


Figura 1.2: Figura de Whitmore et al. (1990), en donde nos muestran que podemos estar descartando más de la mitad de las GAP, simplemente por la orientación en que nos tocó verlas. El ángulo α indica la rotación del anillo y β la subsecuente rotación del disco.

conocemos actualmente, y muchas de ellas se han venido confirmando poco a poco.

La identificación de una GAP puede dificultarse por la perspectiva en que la observamos. En la figura 1.2 se muestran las formas que podríamos obtener de una galaxia circular, con un anillo polar también circular y del mismo radio rotándolos. Whitmore et al. (1990) calculan que, aproximadamente, el 0.5% de las galaxias S0 cercanas tienen anillos polares y que podríamos estar descartando más del doble de las GAP identificadas, simplemente por el ángulo que nos tocó observarlas.

1.3. El Catálogo de Anillos Polares

Whitmore et al. (1990) hicieron un *Atlas de Galaxias con Anillo Polar* (PRC, de aquí en adelante, acrónimo de *Polar Ring Catalog*) con la siguiente clasificación:

- A. Galaxias con anillo polar cinemáticamente confirmadas.
- B. Buenas candidatas, basándose en su apariencia morfológica.
- C. Posibles candidatas.
- D. Sistemas posiblemente relacionados.

Para confirmar que una posible GAP en realidad lo es, podemos hacer uso de estudios cinemáticos y de observaciones fotométricas, esto por que el anillo y la galaxia tienen vectores de momento angular perpendiculares y porque tienen diferente población estelar.

1.4. Galaxias con Anillo Polar confirmadas

Desde la publicación del catálogo de Whitmore et al. (1990) varias buenas candidatas y posibles candidatas (tipo B y C), han sido cinemáticamente confirmadas, por lo que ahora son de tipo A; sin embargo conservan su nombre del PRC. A continuación se enlistan las galaxias cinemáticamente confirmadas junto con un artículo de referencia y se hace una breve descripción de algunas características particulares:

- A-01 o A0136-0801. Schweizer et al. (1983), encontraron que se trataba de una galaxia S0 vista casi de canto. Debido a su perfil fotométrico y a su rápida rotación descartaron la estructura de prolato.
- A-02 o ESO 415-G26 (Whitmore et al., 1987). El anillo es muy débil, parece haber restos de la fusión con una galaxia pequeña.
- A-03 o NGC 2685. Schechter & Gunn (1978), concluyeron que esta galaxia se trataba de una S0 y no de una elíptica debido a la rapidez con que rotaba la componente interior. La componente exterior tiene estructura anular, pero parece tener también filamentos en forma espiral.
- A-04 o UGC 7576 (Whitmore et al., 1990). El anillo es delgado y tiene como tres veces el radio de la componente interior.
- A-05 o NGC 4650A. (Schechter et al., 1984). Probaron con espectroscopía que no era una galaxia con forma de prolato y un aro de gas rodeando su eje menor, sino una S0 vista casi de canto y con un anillo polar.
- A-06 o UGC 9796 (Whitmore et al., 1990). Esta galaxia tiene la peculiaridad de tener el anillo polar desviado casi 25° de la perpendicular.
- B-03 o IC 1689 (Sil'chenko, 1998). Ésta es una galaxia tipo S0 con disco combado y un pequeño anillo polar azul interior.

- B-11 o UGC 5600 (Shaliapina et al., 2003). Se tiene una galaxia espiral con un pequeño anillo polar interno.
- B-16 o NGC 5122 (Cox, 1996). Tiene un anillo muy débil, pero claramente perpendicular respecto a la galaxia anfitriona.
- B-17 o UGC 9562 (Cox et al., 2001). Esta galaxia cuenta con un filamento de gas que parece conectarla con una galaxia enana vecina, separada como 4 minutos de arco.
- B-19 o AM 2020-504 (Arnaboldi et al., 1993). Aquí tenemos un anillo polar alrededor de una galaxia elíptica. En el visible el anillo polar aparece un poco combado. La galaxia tiene el espectro UV característico de una galaxia con brote estelar.
- B-21 o ESO 603-G21 (Arnaboldi et al., 1994). La componente exterior muestra una estructura muy combada. La galaxia anfitriona parece ser de tipo temprano.
- C-3 o ESO 474-G26 (Reshetnikov et al., 2005). Una GAP peculiar. La componente central es una galaxia casi esférica, pero con colores que corresponderían a una galaxia espiral de tipo Sb. Además, la galaxia está rodeada por un par de anillos casi perpendiculares uno del otro.
- C-13 o NGC 660 (van Driel et al., 1995). El anillo se encuentra muy desviado de la perpendicular, aproximadamente 45° .
- C-24 o UGC 4261 (van Driel et al., 2000). El anillo no es simétrico, tal vez se encuentre en proceso de formación.
- C-27 o UGC 4385 (Reshetnikov & Combes, 1994). Tiene un anillo delgado y débil, visto de canto y de radio apenas mayor que la galaxia.
- C-45 o NGC 5128 (van Driel et al., 2000). La galaxia central muestra, lo que parece a primera vista, una senda de polvo cruzando parte del aparente eje menor.
- C-46 o ESO 576-G69 (Reshetnikov et al., 2001). Aquí tenemos una estructura en forma de anillo rotando alrededor del eje menor de la galaxia central, de tipo Sbc.

1.5. Posibles orígenes de las GAP

Se han sugerido varios escenarios para la formación de las GAP. En uno de ellos tendríamos que tanto la galaxia anfitriona como el anillo polar se formaron al mismo tiempo. Ésto podría darse en el caso en que una nube protogaláctica cree dos estructuras no alineadas (Curir & Diaferio 1994). Sin embargo, los anillos polares son ricos en gas (Richter et al., 1994 y van Driel et al., 2000 y 2002), mientras que en las galaxias anfitrionas en general es escaso. Además, parece que muchos de los anillos polares contienen una población estelar joven, mientras que la población estelar de las galaxias anfitrionas es vieja, como lo sugieren sus colores. Por lo que se descarta que el anillo y la galaxia central se hayan formado al mismo tiempo. Es por ésto que comúnmente se acepta que las GAP están compuestas por una galaxia anfitriona previamente formada y por una estructura polar más reciente.

Sin embargo, existen posibles explicaciones para la creación simultánea de las dos componentes que vemos en las GAP. El escenario de fusión fue investigado en detalle por Bekki (1997, 1998), y supone una colisión de frente entre dos galaxias espirales perpendiculares. Bekki supone una galaxia “intrusa” cayendo sobre una “víctima”, y mostró que cuando sus velocidades relativas son bajas, las dos galaxias se fusionan debido a la fricción dinámica. La intrusa se convierte en la galaxia anfitriona S0, mientras que la víctima se convierte en un delgado anillo polar.

El escenario de acreción (ver p. ejem: Schweizer, 1983) consiste en que el gas de una galaxia donante sea acretado por una galaxia receptora. Aunque puede darse la fusión de las galaxias, ésta no es necesaria. Lo que sí requiere la formación del anillo polar es que la galaxia donante tenga una trayectoria casi polar respecto a la galaxia anfitriona. También se ha sugerido que el material de acreción podría provenir de una nube primordial intergaláctica.

Bournaud & Combes (2003) han desarrollado simulaciones numéricas para tratar de explicar la formación de las GAP. En sus simulaciones dejan caer una galaxia “intrusa” sobre una “víctima” resultando ocasionalmente la formación de una GAP (ver figura 1.3).

La información obtenida de las características dinámicas y morfológicas puede usarse en modelos de interacción galáctica, y tratar de encontrar en el vecindario de las GAP alguna galaxia que haya contribuido a la formación del anillo polar.

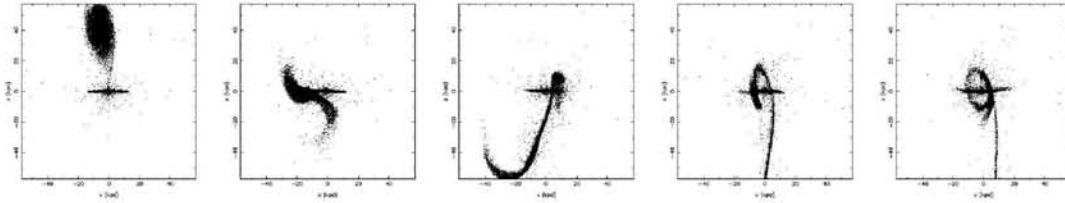


Figura 1.3: Secuencia extraída de una de las simulaciones de Bournaud & Combes (2003).

1.6. Halos de materia oscura en las GAP

De acuerdo a la distribución de la masa luminosa observada en las galaxias, la velocidad de rotación que observaríamos conforme nos alejamos del centro sería una curva decreciente, y sin embargo, lo que observamos es que nuestra curva se aplanan. Esto se puede explicar por la acción gravitacional de masa que no vemos, llamada *materia oscura*. Gracias a que las GAP tienen dos componentes cinemáticas perpendiculares, podríamos inferir la forma del halo de materia oscura en tres dimensiones, es decir, si el halo tiene forma de prolato, de oblato o triaxial, suponiendo que domina el potencial gravitacional.

Un método que se puede usar para encontrar la forma del halo de materia oscura es el de comparación de las curvas de rotación ecuatoriales y polares. Si el potencial gravitacional en una galaxia fuera esférico, tendríamos que la velocidad orbital a un radio dado sería la misma en cualquier dirección. En este caso, tendríamos la misma velocidad de rotación para un objeto, sin importar que se encontrara en el disco de la galaxia anfitriona o en el anillo polar, siempre y cuando estuvieran a una misma distancia del centro del sistema. Cuando la forma del potencial se achata hacia el plano de la galaxia central, entonces el anillo polar seguirá órbitas ovaladas. Éste tipo de pruebas ya se han hecho, por ejemplo, en PRC A-01 por Schweitzer et al. (1983), quienes encontraron que los movimientos de las componentes eran dominados por un halo de materia oscura y que tenía una forma casi esférica, aunque la incertidumbre era muy grande. Por otra parte, Sackett et al. (1994) encontraron que el halo de materia oscura para PRC A-05 tenía un aplanamiento similar al de una galaxia E6 o E7.

Otro método para inferir la forma del halo de materia oscura es el del aplanamiento inferido de la precesión de los anillos. Éste método toma el hecho de que el anillo y la galaxia anfitriona no son exactamente perpendiculares, sino que tienen una ligera inclinación. Las órbitas inclinadas del material del anillo tenderán a

precesar y como, a mayores radios se tienen mayores tiempos de precesión, la parte interna del anillo irá desarrollando una torsión. Así que basándose en la torsión del anillo, se puede inferir la forma del halo. La autogravedad del anillo es un problema para ésta técnica, pues puede contrarrestar la torsión e impedir hacer una buena restricción a la forma del halo.

También se han tratado de explicar los movimientos orbitales en las GAP sin recurrir a los halos de materia oscura. Por ejemplo, Sackett & Sparke (1990) pudieron reproducir las rotaciones observadas en PRC A-05 usando un anillo con cuatro veces la masa de la galaxia anfitriona y sin suponer la existencia de un halo de materia oscura.

1.7. Importancia de la Forma del Halo de Materia Oscura

La forma del halo de materia oscura tiene importancia principalmente porque puede ayudar a restringir modelos que describan la naturaleza de la materia oscura. Por ejemplo, si la materia oscura fuera disipativa (por ejemplo, MACHOs [*MAssive Compact Halo Objects*] de materia bariónica o gas molecular frío) el halo sería discoidal; lo cual no sería el caso para modelos de materia oscura sin disipación. La forma del halo también podría ayudarnos a restringir velocidades orbitales para diferentes componentes de las galaxias.

1.8. Formación estelar en las GAP

Los anillos polares también son una fuente de estudio de formación estelar en condiciones diferentes a las tradicionalmente estudiadas. Parecen tener una estructura coherente y carecer de los mecanismos que comúnmente sabemos disparan la formación estelar, como los pozos de potencial en los brazos en las galaxias espirales y en las galaxias de brote estelar.

1.9. El Problema de la Estabilidad

No era fácil aceptar que un anillo girara pasando cerca de los polos de una galaxia plana anfitriona, pues pequeñas desviaciones en la órbita polar de un disco o anillo de gas y polvo provocarían una precesión nodal diferencial, y teniendo disipación en una galaxia oblato, el gas se asentaría en el plano de simetría

perpendicular a la órbita polar. Tohline et al. (1982) calcularon la escala de tiempo que el proceso tomaría, y encontraron que sería entre 10^8 y 10^9 años, por lo que, las GAP deberían de observarse rara vez. Existen tres modelos básicos para explicar la estabilidad del sistema:

- Una opción es que el sistema no sea estable, pero que su tiempo de decaimiento sea muy grande. Schweizer et al. (1983) encontraron que en casos en que el anillo pasara muy cerca de los polos y teniendo precesión diferencial, el tiempo de escala para el asentamiento del anillo tomaría del orden de un tiempo de Hubble, y mucho menos cuando las órbitas de los anillos se inclinen por debajo de los $\sim 70^\circ$.
- Podría ser que el anillo sea estable por autogravedad, por ejemplo, Sparke 1986; Sackett & Sparke 1990; Arnaboldi & Sparke 1994. Algunos de éstos autores ya han modelado anillos masivos autogravitantes que recrean la cinemática observada en algunas galaxias.
- Se han desarrollado modelos en los que se ha encontrado que las órbitas polares podrían ser estables si el potencial gravitacional en que está sumergido el anillo fuera oblato-triaxial (Steiman-Cameron & Durisen 1988; Katz & Rix 1992).

Sin embargo, las edades de los anillos todavía se desconocen. Tal vez todos sean jóvenes e inestables, o algunos podrían ser viejos y estables.

Capítulo 2

Metas

El estudio de las GAP se concentra en dos ramas: el origen de los anillos polares y la naturaleza de los halos de materia oscura que se supone rodean a las galaxias. Dado que es ampliamente aceptado que el anillo polar es resultado del proceso de acreción o de fusión, tenemos que las edades de los anillos son importantes, pues se pueden utilizar para determinar la tasa de interacciones (la frecuencia dividida por la edad) y para restringir el potencial del halo a través de la estabilidad del anillo. Entonces, para el desarrollo teórico preciso de las dos ramas hace falta tener un buen conocimiento de la edad del anillo en la galaxia.

Los colores de los anillos son, en general, más azules que los de las galaxias anfitrionas. Si suponemos que el anillo se formó debido a material acretado por la galaxia ya formada, entonces es probable que las estrellas que vemos en los anillos se formaron allí mismo. De ser así, se podría conocer la edad de un anillo polar estimando la edad de su población estelar. Sin embargo, las observaciones hasta ahora no han ayudado mucho a la buena determinación de las edades de las poblaciones estelares. La mayoría son de baja calidad y las pocas existentes de alta calidad dan resultados discordantes. Por ejemplo, los materiales propuestos para la formación de los anillos polares tienen bajas abundancias de elementos pesados y, por otro lado, la única medida disponible de la metalicidad muestra que el anillo de NGC 2685 tiene una metalicidad casi solar (Eskridge & Pogge 1997).

Son necesarias observaciones minuciosas y el análisis sistemático de una muestra adecuada de galaxias para dar resultados más precisos y coherentes. Esas razones motivaron el proyecto en el que está inmersa la presente tesis, cuyas metas principales son la calibración, fotometría e interpretación básica de los datos que se tienen.

Capítulo 3

Datos

3.1. Muestra

Se seleccionaron todas las galaxias con anillo polar de las categorías A (confirmadas) y B (buenas candidatas) del catálogo de Whitmore et al. (1990), localizadas entre los -25° y $+60^\circ$ de declinación. Esos límites eran necesarios pues se planeó que las observaciones se llevaran a cabo con el telescopio de 1.5 metros del Observatorio Astronómico Nacional, localizado en la Sierra de San Pedro Mártir en Baja California, México. El límite sur asegura que podamos observar las galaxias con una masa de aire menor que 3, y el límite norte fue impuesto por la montura del telescopio. La muestra consistió de 16 galaxias (PRC A-01, A-03, A-04, A-06, B-01, B-03, B-09, B-10, B-13, B-14, B-15, B-16, B-17, B-20, B-21 y B-24).

3.2. Observaciones

Se observaron todas las galaxias de la muestra en dos temporadas de observación en 2001 en el Observatorio Astronómico Nacional de San Pedro Mártir. Se utilizaron los telescopios de 1.5 m y de 84 cm. En ambas temporadas se usaron el CCD SITE1 y los filtros *B2* (1 mm CG285 + 1 mm BG18 + 2 mm BG12) y *R2* (2 mm KG3 + 2 mm OG570).

El CCD SITE1 tiene 1024 pixeles de $24 \mu\text{m} \times 24 \mu\text{m}$. En el telescopio de 1.5 m cada pixel abarca $0''.25$, lo cual está muy por debajo del *seeing* típico de $1''.0$ – $2''.0$. Por esta razón se usó un *binning* de 2×2 . Se usó la ganancia en modo 1, lo cual nos da una ganancia de 5.0 electrones/ADU y un ruido de lectura de 14.5 electrones RMS.

Tabla 3.1: Bitácora de Observaciones

Galaxia	Fecha (Año 2001)	Telescopio	T. de exp. en $B2$	T. de exp. en $R2$
PRC A-01, A 0136-0801	19 de septiembre	1.5 m	2×1000 s	2×500 s
PRC A-04, UGC 7576	26 de abril	1.5 m	2×1000 s	2×500 s
PRC A-06, UGC 9796, II Zw 73	24 y 30 de abril	1.5 m	4×1000 s	4×500 s
PRC B-10, A 0950-2234	26 y 29 de abril	1.5 m	4×1000 s	4×500 s
PRC B-17, UGC 9562, II Zw 71	24 de abril	1.5 m	2×1000 s	2×500 s
PRC B-20, A 2135-2132	20 de septiembre	1.5 m	2×1000 s	2×500 s
PRC B-21, ESO 603-G21	19 de septiembre	1.5 m	2×1000 s	2×500 s

Las exposiciones fueron, por lo general, dos de 1000 s en $B2$ y dos de 500 s en $R2$. Subsecuentes análisis dejaron solo siete buenas candidatas para hacer fotometría de los anillos. Se trata de cinco galaxias con anillo polar confirmadas (A-01, A-04, A-06, B-17 y B-21) y dos sin confirmar (B-10 y B-20). En las otras nueve galaxias había varios problemas, algunas tenían al anillo y su galaxia anfitriona demasiado mezcladas (por ejemplo, A-03), en otras, los anillos en B eran demasiado débiles (por ejemplo, B-16). En tabla 3.1 se dan las fechas y los tiempos de exposición de las observaciones de las siete galaxias en que se hizo fotometría de los anillos.

3.3. Reducción

La reducción de la imágenes se llevó a cabo usando principalmente el paquete *ccdred* del programa *IRAF*. Cada noche se tomaron varias *bias* y fueron combinadas y procesadas usando las tareas *zerocombine* y *ccdproc*. Para corregir por campos planos se tomaron imágenes *twilight* cada día y fueron procesadas usando las tareas *flatcombine* y *ccdproc*. Los rayos cósmicos fueron sustraídos usando la tarea *cosmicrays*, y los remanentes no corregidos automáticamente fueron removidos mediante *imedit*. Las exposiciones de cada filtro fueron alineadas y sumadas. Las primeras columnas de las figuras 3.2 a la 3.8 muestran las imágenes finales de cada galaxia en $B2$ y $R2$.

3.4. Calibración

Debido a que no en todas las noches se tienen buenas condiciones atmosféricas para observar, es necesario hacer un análisis a posteriori para escoger las noches con las mejores observaciones.

Como ya mencionamos, las galaxias fueron observadas en el transcurso de dos temporadas de observación en 2001, en ambas temporadas se usó el telescopio de 1.5 m. En éstas temporadas se estuvieron tomando estrellas estándares para la calibración, pero además se tomaron en un par de noches más en el telescopio adyacente de 84 cm. En todas las observaciones se utilizaron el mismo CCD SITE 1, los mismos filtros $B2$ y $R2$ y se hicieron básicamente en el mismo lugar, por lo que se utilizaron las observaciones de los dos telescopios en el ajuste de calibración. Cada noche se observaron estrellas estándares del catálogo de Landolt (1992). Subsecuentes análisis mostraron que nueve noches en el telescopio de 1.5 m y dos más del telescopio de 84 cm fueron fotométricas. Durante estas noches se observaron un total de 106 estándares fotométricas en B y 107 en R , con un intervalo de color $B - R$ de -0.4 a $+2.2$ y en el intervalo de masa de aire de 1.1 a 2.3.

La reducción de las estándares se hizo de la misma manera que con las galaxias, con la excepción de la corrección manual de los rayos cósmicos. La fotometría de las estándares se realizó mediante la tarea *phot*. Se usó una apertura de $15''.2$ de diámetro.

Se realizó un ajuste para hacer la conversión de magnitudes instrumentales a naturales y estándares de acuerdo a las siguientes ecuaciones:

$$B2 = [B2] + Z_B + C_{X,B}X, \quad (3.1)$$

$$R2 = [R2] + Z_R + C_{X,R}X, \quad (3.2)$$

$$B = B2 + C_{C,B}(B - R), \quad (3.3)$$

$$R = R2 + C_{C,R}(B - R). \quad (3.4)$$

Las primeras dos ecuaciones relacionan las magnitudes instrumentales $[B2]$ y $[R2]$, la masa de aire X , y las magnitudes naturales $B2$ y $R2$. Las siguientes dos ecuaciones relacionan las magnitudes naturales con las estándares B y R . Se hizo un ajuste para puntos cero Z y coeficientes de extinción C_X diferentes para cada noche, pero un solo coeficiente de color C_C para todas las noches. Usando un solo coeficiente de extinción se mejora la precisión en el ajuste. Los residuos *RMS* fueron 2.0 % en B y 1.3 % en R . En la tabla 3.2 se muestran los coeficientes para cada noche, además del número de estrellas N contribuyendo al ajuste en cada banda. El valor de los coeficientes de extinción varía entre 0.17 y 0.32 para $B2$, y entre 0.07 y 0.17 para $R2$. Los resultados de los ajustes fotométricos se muestran en la figura 3.1. Los puntos cero reflejan claramente la diferencia de área entre los

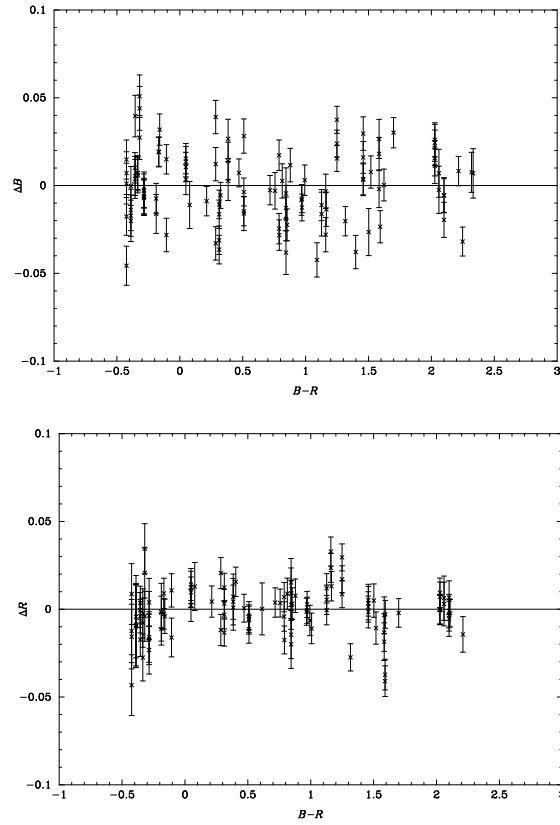


Figura 3.1: Residuos de la Fotometría. La imagen de arriba para B , y la de abajo para R .

dos telescopios y la mejor eficiencia del telescopio de 1.5 metros luego de haber sido realuminizado su espejo en el verano.

Los coeficientes de corrección de color encontrados son:

$$C_{C,B} = +0.112, \quad (3.5)$$

$$C_{C,R} = +0.008. \quad (3.6)$$

Esto indica que el filtro $B2$ es apenas más rojo que el filtro pasabandas estándar, mientras que $B2$ es más rojo aproximadamente 200 \AA (i.e.; como 10% de los aproximadamente 2000 \AA de diferencia entre los filtros B y R).

Tabla 3.2: Resultados del Ajuste de la Fotometría de las Estándares

Fecha (Año 2001)	Telescopio	N_b^a	Z_B^b	$C_{X,B}^c$	N_r^d	Z_R^e	$C_{X,R}^f$
24 de abril	1.5 m	15	-4.040	-0.218	16	-2.943	-0.07
26 de abril	1.5 m	11	-4.010	-0.247	11	-2.845	-0.13
28 de abril	1.5 m	11	-4.033	-0.260	10	-2.888	-0.12
29 de abril	1.5 m	7	-4.048	-0.287	7	-2.890	-0.16
30 de abril	1.5 m	6	-4.134	-0.243	6	-2.961	-0.12
1° de mayo	1.5 m	7	-4.022	-0.324	8	-2.891	-0.17
19 de septiembre	1.5 m	13	-3.298	-0.197	13	-2.623	-0.06
20 de septiembre	1.5 m	8	-3.265	-0.227	10	-2.556	-0.12
21 de septiembre	1.5 m	7	-3.382	-0.173	7	-2.551	-0.14
23 de septiembre	84 cm	13	-4.818	-0.178	11	-3.927	-0.06
24 de septiembre	84 cm	8	-4.776	-0.209	8	-3.804	-0.14

^a Número de estándares con el filtro B .

^b Puntos Cero calculados para el filtro B .

^c Coeficientes de extinción calculados para el filtro B .

^d Número de estándares con el filtro R .

^e Puntos Cero calculados para el filtro R .

^f Coeficientes de extinción calculados para el filtro R .

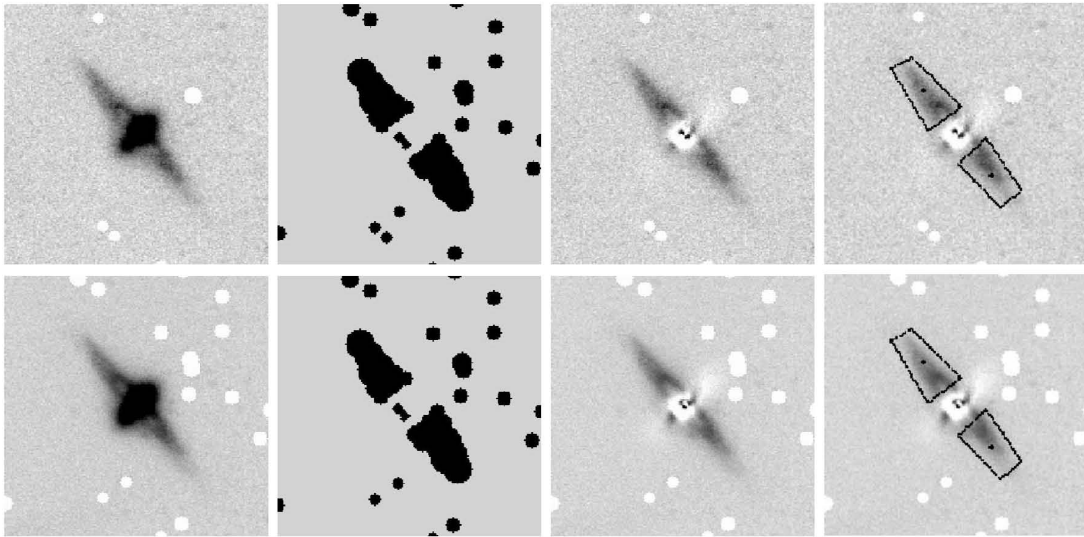


Figura 3.2: Las imágenes de PRC A-01 en $B2$ (paneles superiores) y $R2$ (paneles inferiores). Las imágenes son de $90'' \times 90''$ con el Norte a la izquierda y el Este hacia arriba. La primera columna muestra la galaxia anfitriona y el anillo. La segunda columna muestra la máscara usada para descartar ciertas regiones de ajuste del modelo de la galaxia anfitriona. La tercera columna muestra al anillo una vez que el modelo de la galaxia fue sustraído. La cuarta columna muestra las aperturas usadas para hacer la fotometría del anillo.

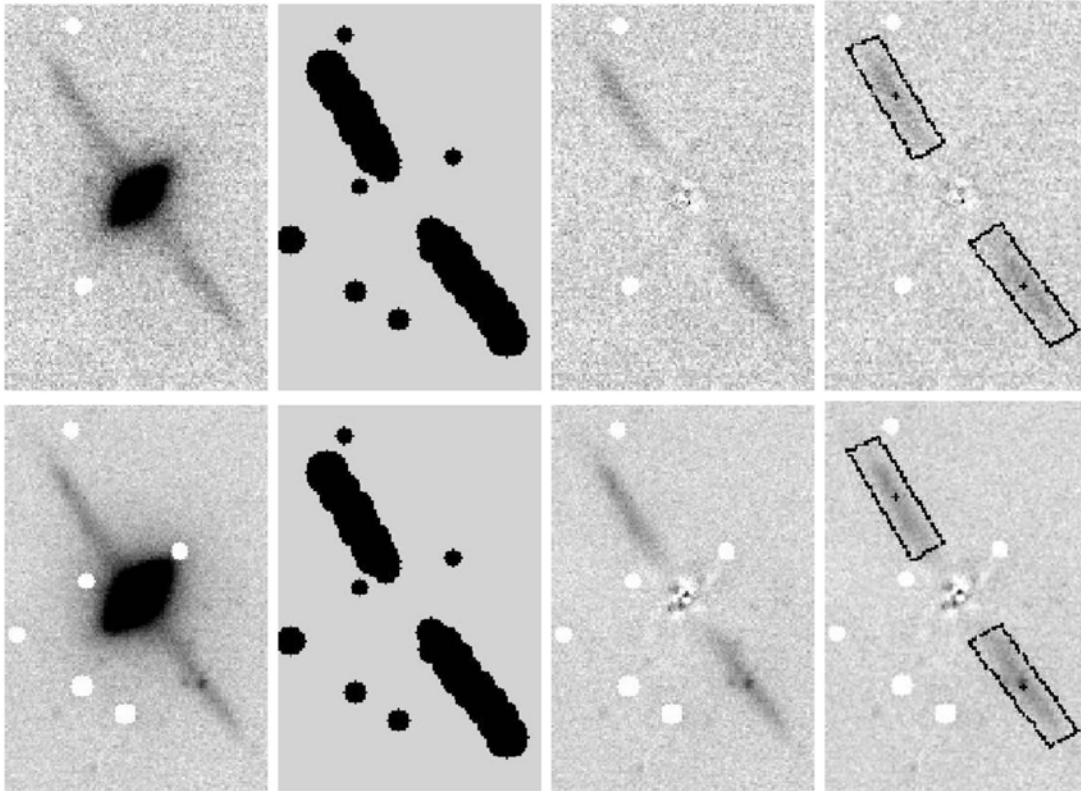


Figura 3.3: Las imágenes de PRC A-04 en $B2$ (paneles superiores) y $R2$ (paneles inferiores). Las imágenes son de $60'' \times 90''$ con el Norte a la izquierda y el Este hacia arriba. La primera columna muestra la galaxia anfitriona y el anillo. El orden de los paneles es el mismo que el mostrado en la figura 3.2.

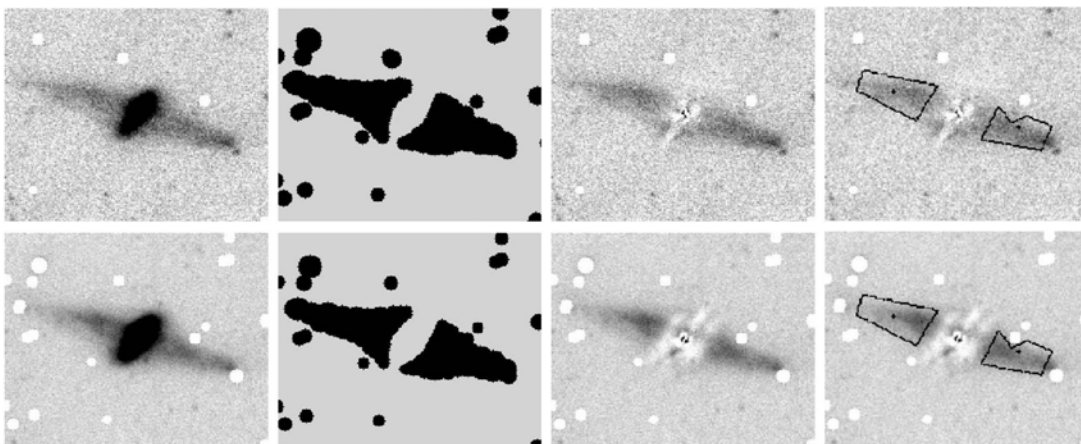


Figura 3.4: Las imágenes de PRC A-06 en $B2$ (paneles superiores) y $R2$ (paneles inferiores). Las imágenes son de $110'' \times 90''$ con el Norte a la izquierda y el Este hacia arriba. La primera columna muestra la galaxia anfitriona y el anillo. El orden de los paneles es el mismo que el mostrado en la figura 3.2.

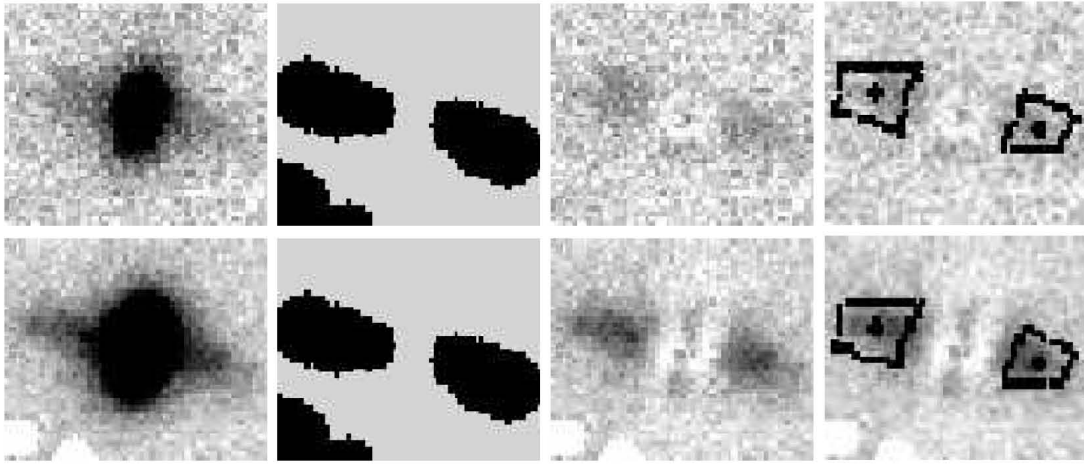


Figura 3.5: Las imágenes de PRC B-10 en $B2$ (paneles superiores) y $R2$ (paneles inferiores). Las imágenes son de $25'' \times 21''$ con el Norte a la izquierda y el Este hacia arriba. La primera columna muestra la galaxia anfitriona y el anillo. El orden de los paneles es el mismo que el mostrado en la figura 3.2.

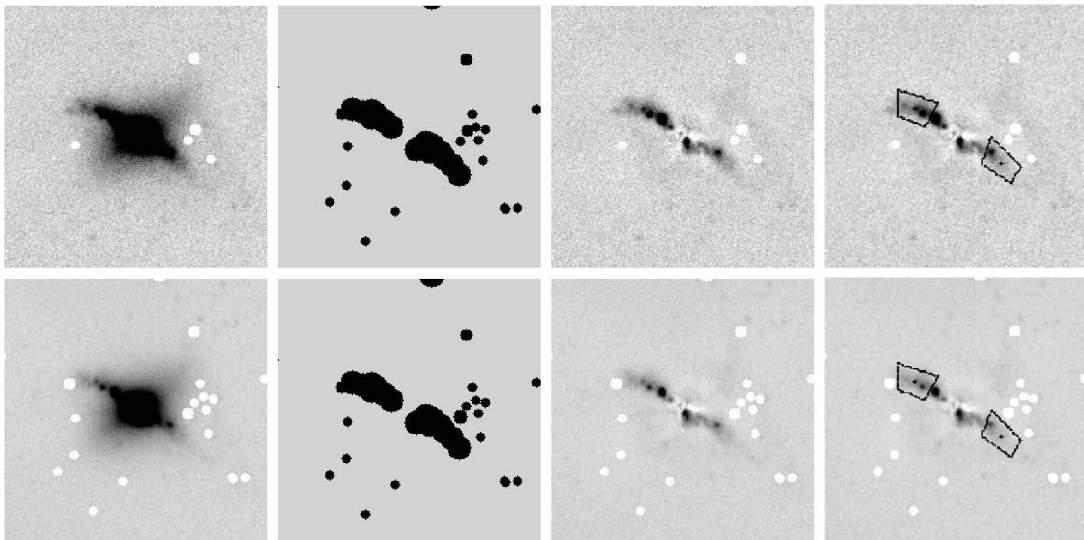


Figura 3.6: Las imágenes de PRC B-17 en $B2$ (paneles superiores) y $R2$ (paneles inferiores). Las imágenes son de $110'' \times 110''$ con el Norte a la izquierda y el Este hacia arriba. La primera columna muestra la galaxia anfitriona y el anillo. El orden de los paneles es el mismo que el mostrado en la figura 3.2.

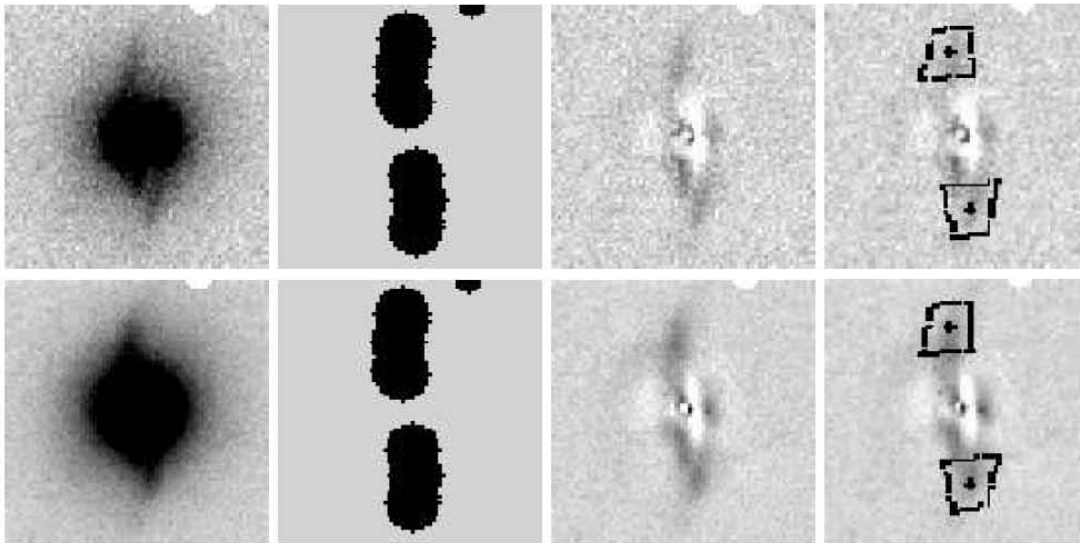


Figura 3.7: Las imágenes de PRC B-20 en $B2$ (paneles superiores) y $R2$ (paneles inferiores). Las imágenes son de $37'' \times 37''$ con el Norte a la izquierda y el Este hacia arriba. La primera columna muestra la galaxia anfitriona y el anillo. El orden de los paneles es el mismo que el mostrado en la figura 3.2.

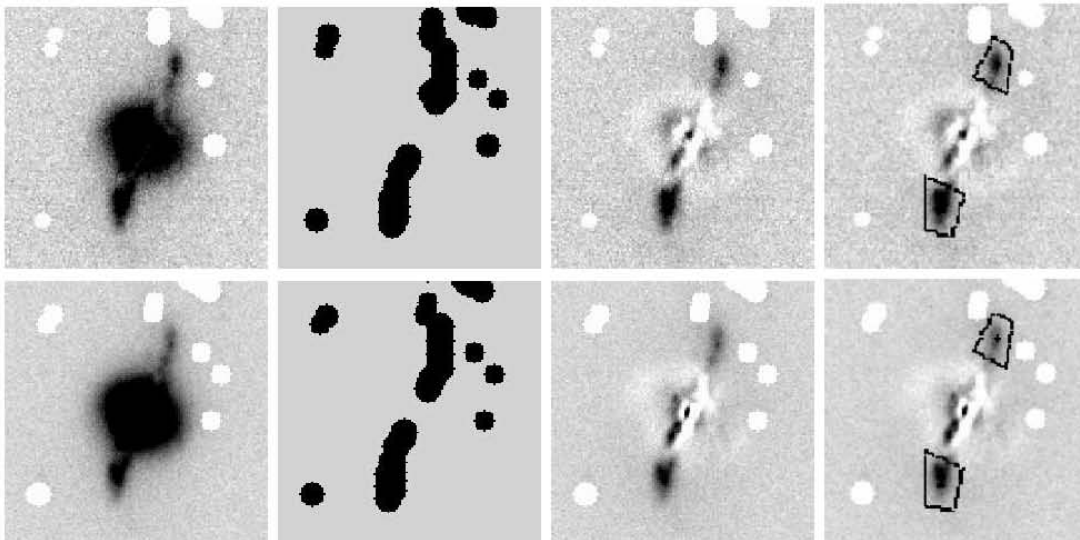


Figura 3.8: Las imágenes de PRC B-21 en $B2$ (paneles superiores) y $R2$ (paneles inferiores). Las imágenes son de $65'' \times 65''$ con el Norte a la izquierda y el Este hacia arriba. La primera columna muestra la galaxia anfitriona y el anillo. El orden de los paneles es el mismo que el mostrado en la figura 3.2.

Capítulo 4

Modelos Galácticos

Para hacer la fotometría de los anillos se tiene el problema de que la galaxia anfitriona aportará gran parte del flujo medido, así que era necesario eliminar en lo posible ésta fuente. Utilizamos *GALFIT* (Peng, 2001 y Peng et al., 2002), un programa que crea modelos de las componentes estructurales de las galaxias. Para crear los modelos, *GALFIT* dispone de varias funciones para hacer el ajuste: perfil Sérsic, perfil exponencial, perfil Gaussiano, perfil King (modificado), ley de Nuker, función Moffat, ajustes de *PSFs* (Funciones de Distribución Puntual) y ajuste del cielo. Una vez creado un buen modelo para la galaxia, éste era restado para dejar solo al anillo.

GALFIT necesitaba buenas *PSFs* para hacer los ajustes. Para esto se utilizaron las estrellas de campo, preferentemente las encontradas en la misma imagen de la galaxia que se quería modelar, o en su defecto se tomó alguna estrella de campo de otra observación que tuviera un *FWHM* (ancho a potencia media) similar.

Al tratar de modelar las galaxias había fuentes (estrellas, galaxias, el mismo anillo, etc.) que dificultaban a *GALFIT* hacer buenos ajustes. Para solucionar el problema, se crearon máscaras que le indicaban a *GALFIT* regiones que no debían de tomarse en cuenta al hacer el ajuste. Para esto recurrimos nuevamente a *imedit*, ésta vez con su función *e*, que crea máscaras circulares. De tal manera que las máscaras se formaron mediante la superposición de muchas máscaras circulares.

El ajuste de los modelos se empezó agregando un plano inclinado, representando al cielo, y luego se agregó una componente Sérsic o un disco exponencial. Posteriormente se agregaron diferentes componentes hasta que el χ^2_ν dejaba de reducir de manera significativa. Las componentes encontradas para cada galaxia

son listadas en la tabla 4.1. La tercera columna de las figuras 3.2 a la 3.8 muestran las imágenes luego de haberseles sustraído el modelo de la galaxia anfitriona.

Algunas componentes tienen claras interpretaciones físicas, otras, en particular las gaussianas, no. Nos vimos forzados a introducir esas componentes, tal vez, por errores en los PSF, absorción de polvo cerca del centro de las galaxias, o porque las componentes de *GALFIT* estén diseñadas para ajustar en galaxias menos inclinadas. Sin embargo, no fue algo tan preocupante, pues la meta no era encontrar las componentes reales de la galaxia, sino remover su luz. A pesar de nuestros intentos, no pudimos remover exclusivamente la galaxia y dejar sólo al anillo, sino que también se restaba la parte del anillo proyectada en la galaxia anfitriona. Es por esto que la fotometría de los anillos se realizó solamente fuera de las zonas brillantes de la galaxia anfitriona, usando dos aperturas poligonales para cada anillo.

Tabla 4.1: Componentes Ajustadas

Galaxia	Filtro χ^2_ν	Componente	$\Delta\alpha^a$	$\Delta\delta^a$	Δm^b	$r_{e,s}^c$	n^d	q^e	PA ^f	c^g
PRC A-01	B 1.5	Sérsic	0''0	0''0	0.00	10.24	1.21	0.59	-45.4	-0.38
		PSF	-0''5	+1''0	1.41	...	...	...	...	...
		Gaussiana	-0''7	-0''2	2.16	3.70	...	0.09	-58.1	-1.32
	R 1.9	Sérsic	0''0	0''0	0.00	10.08	1.16	0.55	-44.2	-0.22
		Gaussiana	-0''4	+0''3	0.93	2.64	...	0.46	+78.1	+0.00
		PSF	+0''7	-2''1	4.22	...	...	...	...	...
PRC A-04	B 1.3	Sérsic	0''0	0''0	0.00	24.79	1.16	0.79	+28.6	-0.63
		Sérsic	-0''2	-0''8	0.47	10.92	0.78	0.27	-43.2	+1.05
		Sérsic	+0''1	-0''5	0.95	2.79	1.66	0.59	-80.0	-1.24
	R 1.2	Sérsic	0''0	0''0	0.00	20.24	1.77	0.90	-35.6	-0.22
		Sérsic	-0''2	+0''3	0.77	11.09	0.59	0.29	-44.5	-0.03
		Sérsic	-0''1	+0''1	1.16	1.53	1.27	0.07	-65.2	0.00
PSF	+0''5	-1''9	4.67	...	...	...	...	...
PRC A-06	B 1.8	Sérsic	0''0	0''0	0.00	14.66	1.35	0.67	-57.0	-0.12
		Sérsic	+2''9	-1''8	0.83	14.34	0.37	0.22	-34.8	0.00
		Sérsic	+1''8	-1''2	1.40	2.44	0.03	0.80	+9.7	-0.24
		PSF	+2''3	-1''4	2.05	...	...	...	...	...
	R 1.4	Sérsic	0''0	0''0	0.00	11.05	0.83	0.27	-35.5	0.00
		Sérsic	+0''9	-0''6	0.36	21.15	0.24	0.65	-59.8	-0.70
Sérsic	+0''0	-0''4	1.23	2.07	0.86	1.00	-19.2	-0.68		
PSF	+0''8	-0''4	1.46	...	...	...	...	...
PRC B-10	B 1.1	Sérsic	0''0	0''0	0.00	6.36	1.79	0.59	-14.3	+0.06
	R 1.0	Sérsic	0''0	0''0	0.00	6.31	1.18	0.57	-13.6	+0.43
PSF	+0''2	+0''1	2.17	...	...	...	...	...
PRC B-17	B 1.8	Sérsic	0''0	0''0	0.00	25.90	1.70	0.46	+55.9	+0.17
		Exp.	-0''5	-0''9	0.06	20.20	...	0.50	-52.3	-0.20
	Sérsic	-0''3	-1''8	2.62	2.75	1.21	0.75	-10.8	-0.41	
	R 1.2	Exp.	0''0	0''0	0.00	18.89	...	0.57	-52.3	-0.34
Sérsic		-0''3	+1''0	0.52	20.43	1.59	0.53	+59.8	+0.59	
Sérsic	-0''2	-0''8	3.01	3.20	2.07	0.74	-22.5	-0.57		
PRC B-20	B 1.2	Exp.	0''0	0''0	0.00	10.51	...	0.92	-26.4	-0.14
		Sérsic	+0''6	-0''2	1.40	5.75	0.71	0.61	+85.4	+0.70
		PSF	+0''4	-0''1	2.68	...	...	...	...
	R 1.6	Exp.	0''0	0''0	0.00	10.45	...	0.91	-27.2	-0.12
Sérsic		+0''2	-0''5	0.96	5.01	1.34	0.64	+81.2	+0.55	
PSF	+0''2	-0''3	2.60	...	...	...	...
PRC B-21	B 1.6	Sérsic	0''0	0''0	0.00	16.11	0.37	0.97	+24.1	+0.77
		Sérsic	-1''8	-1''8	2.36	5.57	0.32	0.67	-26.9	-0.17
	R 2.3	Sérsic	0''0	0''0	0.00	14.34	0.47	0.96	+19.6	+0.88
Sérsic	-0''9	-0''6	2.39	4.25	0.68	0.42	-25.4	+0.47		

^a *Offsets* entre los centros de las componentes.

^b Diferencia de magnitud en las componentes.

^c r_e es el radio efectivo de la ley de Sérsic, r_s es la escala de longitud para el disco exponencial y para la Gaussiana es el *FWHM*.

^d n es el exponente Sérsic $1/n$.

^e Razón axial.

^f Posición angular.

^g Parámetro *diskiness* (positivo) / *boxiness* (negativo).

Capítulo 5

Fotometría

5.1. Extinción Galáctica

Se corrigió la fotometría debida a la extinción galáctica usando valores de NED, los cuales fueron tomados del apéndice B de Schlegel et al. (1998). Las correcciones por extinción deben de ser calculadas para las longitudes de onda del sistema natural. Dado que nuestro filtro $R2$ es muy similar al estándar R , usamos $A_{R2} = A_R$. Sin embargo, puesto que nuestro filtro $B2$ es como 200 Å más rojo que el filtro pasabandas estándar, en éste caso usamos $A_{B2} = 0.8A_B + 0.2A_V$. En la tabla 5.1 se pueden ver los valores de extinción usados. El mayor enrojecimiento fue de 0.07 para PRC B-10.

Se obtuvieron magnitudes y colores corregidos por enrojecimiento, primero, corrigiendo por extinción las magnitudes naturales, usando

$$B2_0 = B2 - A_{B2}, \quad (5.1)$$

$$R2_0 = R2 - A_{R2}. \quad (5.2)$$

Se obtuvo el color estándar sin enrojecimiento invirtiendo la transformación entre las magnitudes natural y estándar

$$(B - R)_0 = (1 - C_{C,B} + C_{C,R})^{-1}(B2 - R2)_0. \quad (5.3)$$

Finalmente, aplicamos la transformación de color para obtener las magnitudes sin enrojecimiento

$$B_0 = B2_0 + C_{C,B}(B - R)_0, \quad (5.4)$$

$$R_0 = R2_0 + C_{C,R}(B - R)_0. \quad (5.5)$$

5.2. Galaxias Anfitrionas

Se hizo la fotometría para las galaxias anfitrionas mediante el uso de dos técnicas: aperturas en *IRAF* y los modelos de *GALFIT*. Para la fotometría de apertura, primero se sustrajo el cielo determinado por *GALFIT* y luego se usó el paquete *apphot* con aperturas de un diámetro de $15''.2$, idénticas a las usadas para las estándares, con el fondo ajustado a cero. Para la fotometría modelada, se sumaron las componentes ajustadas por *GALFIT*. La tabla 5.2 muestra las magnitudes R_0 y los colores $(B - R)_0$ corregidos por extinción con ambos métodos. Los colores modelados son sistemáticamente más azules que los colores de apertura, esto probablemente es debido a gradientes de color en las galaxias. Para corroborarlo hicimos fotometría instrumental en las galaxias anfitrionas de la muestra, con aperturas de $7''.6$, $15''.2$ y $22''.8$. Encontramos que conforme aumentaba el radio los colores se hacían ligeramente más azules, teniendo en general una diferencia de color de aproximadamente 0.1 entre la apertura de $7''.6$ y la de $22''.8$. La excepción fue B-17, en donde el color se hizo ligeramente más rojo a mayor radio, esto puede deberse a reciente formación estelar en su anillo.

Los errores para la fotometría de apertura fueron calculados tomando en cuenta la contribución de las incertidumbres en la calibración (2.0% en B y 1.4% en R), el ruido de Poisson del objeto y del cielo, e incertidumbres en el nivel del cielo. Estimamos el ruido de Poisson del objeto midiendo el cielo en una decena de pequeñas regiones sin galaxia y sin presencia de otras fuentes (estrellas, por ejemplo), y calculando la desviación estándar entre esas medidas del cielo, y multiplicándola por el área de apertura. En todas las galaxias, excepto en B de PRC B-10, el contribuyente dominante en el ruido es la incertidumbre en la calibración. En B de PRC B-10, el contribuyente dominante es la incertidumbre en la determinación del nivel del cielo.

No calculamos los errores para la fotometría del modelo. La fotometría del modelo es algo secundario en nuestros propósitos y obtener las incertidumbres para los parámetros del modelo es algo complicado. Sin embargo, esperamos que sean similares a los errores de la fotometría de apertura.

5.3. Anillos Polares

Para hacer la fotometría de los anillos utilizamos las imágenes obtenidas con *GALFIT* luego de haber restado la galaxia anfitriona y el cielo. Para hacer la fotometría recurrimos a las tareas *polymark* y *polyphot* de *IRAF*. La primera

nos da la posibilidad de dibujar polígonos en nuestras imágenes, demarcando los anillos a ambos lados de la galaxia anfitriona (ver cuarta columna de la figura 3.2 a la 3.8), mientras que la segunda hace la fotometría en dichos polígonos. La tabla 5.2 muestra las magnitudes obtenidas para los anillos y los colores corregidos por extinción Galáctica.

Los errores fueron estimados de la misma manera que para la fotometría de apertura de la galaxias anfitrionas. En todos los casos el contribuyente principal es la incertidumbre en la determinación del nivel del cielo. *GALFIT* puede ajustar el cielo modelándolo con un plano inclinado. Cotejamos que en general se obtiene un menor error en la fotometría cuando se usa un modelo para el cielo que cuando no se usa.

5.4. Comparación con Anteriores Fotometrías

La tabla 5.3 compara nuestra fotometría de las galaxias anfitrionas con la de otros autores. La comparación directa de los colores de las galaxias es difícil, debido a los gradientes de color, los cuales pueden acarrear fácilmente diferencias hasta de una décima de magnitud. Sin embargo, pudimos hacer una comparación directa de nuestra fotometría con la de Mould et al. (1982) y Reshetnikov et al. (1994) en PRC A-04. Estos autores dan un color de $B - R$ de $+1.75$ y $+1.77$, respectivamente, usando una apertura de $8''.4$ de diámetro. El color que nosotros obtuvimos fue de $+1.66 \pm 0.03$, con la misma apertura, aproximadamente $+0.1$ magnitudes o 3σ más azul que ellos. Revisamos cuidadosamente nuestra fotometría y no encontramos ningún error. Notamos que Mould et al. (1982) usaron *flats* de cúpula, los cuales no son siempre confiables, mientras que Reshetnikov et al. (1994) usaron coeficientes de extinción promedio, lo cual puede acarrear errores significativos (Landolt, 1983).

Nuestro color de B-17 es consistente, dentro de la incertidumbre, con el color dado por Gil de Paz et al. (2003), y es un poco más azul que el de $+0.99$ dado por Cox et al. (2001). Sin embargo sus colores fueron medidos en regiones alejadas del anillo, mientras que nuestros colores incluyen contaminación del anillo, el cual es más azul que la galaxia.

Las mayores diferencias son respecto a A-01 y B-21. En el caso de A-01, nuestro color $B - R$ es 0.4 magnitudes más rojo que el obtenido a partir de la fotometría de Whitmore et al. (1990) en B y g , convertido a $B - V$ por Reshetnikov et al. (1994) y finalmente a $B - R$ suponiendo $B - R = 1.5(B - V)$. Desafortunadamente, Whitmore et al. (1990) no dan detalles de su calibración fotométrica, sólo hacen referencia a la lectura de Whitmore et al. (1987). En ese artículo, los autores también promedian los coeficientes de extinción, aunque no parece que esto pueda explicar toda la diferencia. En el caso de B-21, nuestro color $B - R$

es 0.7 magnitudes más rojo que el color $B - R$ medido por Reshetnikov et al. (2002), pero está en concordancia con el color dado por Lauberts & Valentijn (1989) y con razonable acuerdo con el dado por Stockton & MacKenty (1983). Concluimos que la fotometría de Reshetnikov et al. (2002) debe contener algún error. Notamos nuevamente que estos autores usaron curvas de extinción promedio pero, otra vez, es difícil que esto pueda acarrear un error tan grande como 0.7 magnitudes.

En resumen, hemos encontrado que nuestros colores son consistentes con los de otros autores dentro de una décima de magnitud o mejor, con la excepción de los colores de A-01 y B-21 medidos por Whitmore et al. (1990) y Reshetnikov et al. (2002). Creemos que la dispersión interna de 0.024 magnitudes en $B - R$ de nuestras estándares fotométricas da confianza a nuestra calibración fotométrica.

Tabla 5.1: Extinción Galáctica Supuesta

Galaxia	A_{B2}	A_{R2}
PRC A-01	0.110	0.071
PRC A-04	0.089	0.058
PRC A-06	0.110	0.072
PRC B-10	0.192	0.124
PRC B-17	0.052	0.034
PRC B-20	0.178	0.116
PRC B-21	0.137	0.089

Tabla 5.2: Fotometría

Galaxia	Apertura		Modelo		Anillo	
	R_0	$(B - R)_0$	R_0	$(B - R)_0$	R_0	$(B - R)_0$
PRC A-01	14.62 ± 0.01	$+1.62 \pm 0.02$	14.44	+1.62	16.23 ± 0.03	$+1.21 \pm 0.05$
PRC A-04	14.72 ± 0.01	$+1.57 \pm 0.03$	14.23	+1.53	17.35 ± 0.07	$+1.10 \pm 0.15$
PRC A-06	14.96 ± 0.01	$+1.59 \pm 0.02$	14.66	+1.53	16.58 ± 0.03	$+1.07 \pm 0.06$
PRC B-10	16.14 ± 0.02	$+1.65 \pm 0.05$	16.16	+1.58	18.73 ± 0.04	$+1.49 \pm 0.16$
PRC B-17	14.71 ± 0.01	$+0.89 \pm 0.03$	13.69	+0.86	16.97 ± 0.04	$+0.61 \pm 0.06$
PRC B-20	14.68 ± 0.01	$+1.78 \pm 0.03$	14.18	+1.67	18.45 ± 0.03	$+1.67 \pm 0.10$
PRC B-21	14.87 ± 0.01	$+1.77 \pm 0.03$	14.22	+1.60	17.00 ± 0.02	$+0.89 \pm 0.04$

Tabla 5.3: Colores de las Galaxias

Galaxia	Color de Apertura $(B - R)_0$	Color de Modelo $(B - R)_0$	Otros Autores $(B - R)_0^a$
PRC A-01	$+1.61 \pm 0.03$	+1.61	+1.2 ^b
PRC A-02	...	...	+1.5 ^c
PRC A-03	...	...	+1.3 ^d
PRC A-04	$+1.57 \pm 0.03$	+1.53	+1.75 ^e , +1.77 ^f , +1.30 ^g
PRC A-05	...	...	+1.2 ^h , +1.5 ⁱ
PRC A-06	$+1.58 \pm 0.03$	+1.52	+1.47 ^j
PRC B-03	...	...	+1.39 ^k
PRC B-10	$+1.63 \pm 0.05$	+1.56	...
PRC B-17	$+0.88 \pm 0.03$	+0.85	+0.99 ^l , +0.9 \pm 0.2 ^m
PRC B-19	...	...	+1.6 ⁿ
PRC B-20	$+1.76 \pm 0.03$	+1.65	...
PRC B-21	$+1.76 \pm 0.03$	+1.59	+1.4 ^o , +1.5 \pm 0.2 ^p , 0.90 \pm 0.1 ^q
PRC C-02	...	...	+0.90 ^r
PRC C-03	...	...	+1.31 ^s
PRC C-12	...	...	+0.95 ^r
PRC C-13	...	...	+2.7 ^t
PRC C-27	...	...	+0.73 ^r

^a Los colores fueron convertidos cuando ha sido necesario a $B - R$ usando $(B - R) \approx 1.5(B - V) \approx 1.5(V - I)$.

^b A partir del color $B - V$ de +0.8 dado por Reshetnikov et al. (1994), quien obtuvo el color $B - V$ convirtiéndolo a partir de los colores $B - g$ y $B - i$ de Whitmore et al. (1990).

^c A partir del color $B - V$ de 1.02 ± 0.03 en una apertura de 2''9 en el centro y 0.90 ± 0.08 en el halo, dados por Whitmore et al. (1987).

^d A partir del color $B - V$ de 0.87 dado por Peletier & Christodoulou (1993), fuera de los primeros 4''0.

^e Mould et al. (1982) usando una apertura de 8''4 de diámetro.

^f Reshetnikov et al. (1994), usando una apertura de 8''4 de diámetro.

^g Reshetnikov et al. (1994).

^h A partir del color $B - V$ de +0.81 dado por Whitmore et al. (1987) del color $B - V$ de Sérsic & Agüero (1972).

ⁱ A partir del color $(B - I)_0 = 2.0$ dado por Gallagher et al. (2002)

^j Reshetnikov et al. (1994).

^k Reshetnikov et al. (1995).

^l Cox et al. (2001).

^m Gil de Paz et al. (2003).

ⁿ Arnaboldi et al. (1993).

^o Stockton & MacKenty (1983).

^p Lauberts & Valentijn (1989).

^q Reshetnikov et al. (2002).

^r Reshetnikov (2004).

^s Reshetnikov et al. (2005) usando una apertura de 10''0.

^t A partir del color $V - I$ de +1.8 dado por van Driel et al. (1995).

Tabla 5.4: Colores de los Anillos

Galaxia	Nuestros $(B - R)_0$	Otros $(B - R)_0^a$
PRC A-01	$+1.20 \pm 0.05$	$+0.8^b$
PRC A-02	...	$+1.0^c$
PRC A-03	...	$+1.1^d$
PRC A-04	$+1.10 \pm 0.15$	$+0.82^e, +1.0 \pm 0.1^f$
PRC A-05	...	$-0.1^g, +1.1^h$
PRC A-06	$+1.07 \pm 0.06$	$+0.91^i$
PRC B-03	...	$+0.6 \pm 0.14^j$
PRC B-10	$+1.47 \pm 0.16$	...
PRC B-17	$+0.61 \pm 0.06$	$+0.63^k$
PRC B-19	...	$+1.0^l$
PRC B-20	$+1.65 \pm 0.10$	...
PRC B-21	$+0.88 \pm 0.04$	$+0.5^m$
PRC C-02	...	$+0.86^n$
PRC C-03	...	$+0.9^o$
PRC C-13	...	$+1.5^p$
PRC C-27	...	$+0.6^n$

^a Los colores fueron convertidos cuando ha sido necesario a $B - R$ usando $(B - R) \approx 1.5(B - V) \approx 1.5(V - I)$.

^b A partir del color $B - V$ de $+0.55$ dado por Reshetnikov et al. (1994), quien obtuvo el color $B - V$ convirtiéndolo a partir de los colores $B - g$ y $B - i$ de Whitmore et al. (1990).

^c A partir del color $B - V$ de 0.65 ± 0.08 dado por Whitmore et al. (1987).

^d A partir del color $B - V$ de 0.71 dado por Peletier & Christodoulou (1993).

^e Reshetnikov et al. (1994).

^f Mould et al. (1982).

^g A partir del color $B - V$ de -0.09 dado por Whitmore et al. (1987) del color $B - V$ de Sérsic & Agüero (1972).

^h A partir del color $B - I \approx 1.5$ dado por Gallagher et al. (2002).

ⁱ Reshetnikov et al. (1994).

^j Reshetnikov et al. (1995).

^k Cox et al. (2001).

^l Arnaboldi et al. (1993).

^m Reshetnikov et al. (2002).

ⁿ Reshetnikov (2004).

^o Reshetnikov et al. (2005).

^p A partir del color $V - I$ de 1.0 dado por van Driel et al. (1995).

Capítulo 6

Discusión

6.1. Magnitudes de los Anillos

Las magnitudes R del anillo son entre 1.8 y 4.3 magnitudes más débiles que las magnitudes obtenidas del modelo para las galaxias anfitrionas, aunque hay que notar que las magnitudes del anillo no abarcan el anillo completo. Se puede hacer una burda corrección a este hecho si suponemos que abarcamos la mitad del anillo, en cuyo caso, los anillos son entre 1.1 y 3.6 magnitudes más débiles que las galaxias. Entonces, calculamos que los anillos aportan entre el 4 % y el 40 % de la luz de la galaxia anfitriona. Los anillos más dominantes están en A-01, A-06 y B-21.

6.2. Intervalo de Colores de los Anillos

Se midieron los colores $B - R$ de siete anillos polares (ver la tabla 5.4). Observadores previos habían obtenido colores más azules que $B - R = +1.1$, excepto van Driel et al. (1995), quien obtuvo $V - I \approx +1.0$ (lo cual sugiere $B - R \approx +1.5$).

Nuestros colores $B - R$ van desde $+0.61 \pm 0.06$ hasta $+1.65 \pm 0.10$. La dos galaxias más rojas son PRC B-10 y B-20. En B-10 el anillo es débil, y el color de $+1.47 \pm 0.16$ es correspondientemente incierto. Su color es consistente al nivel de 3σ con un color intermedio de $+1.0$. Por otra parte, en B-20 el anillo es más brillante y tiene un color más preciso de $+1.65 \pm 0.10$, el cual, aún moviéndose 3σ hacia el azul, sería tan rojo como $+1.35$. Por lo que, consideramos que B-20 tiene un anillo realmente rojo.

Nuestro trabajo identifica a B-20 como la segunda galaxia con anillo rojo y confirma que hay anillos azules y rojos. Ésta dispersión podría ser causada por diferencias en una o más de las siguientes propiedades: la edad, la metalicidad o el enrojecimiento interno.

6.3. Los Anillos Azules de PRC B-17 y B-21

Nuestros anillos más azules (los de PRC B-17 y B-21) son también los únicos en nuestra muestra que tienen brillantes regiones H 2 (Cox et al., 2001; Watson, aún no publicado). Esto sugiere que reciente formación estelar es la causa de éstos colores azules.

6.4. El Anillo Rojo de PRC B-20

Como mencionamos anteriormente, el anillo de PRC B-20 tiene un color $B-R$ de $+1.65 \pm 0.10$. Este color tan rojo se puede deber principalmente a la edad o a la extinción interna, aunque la metalicidad también modifica los colores, especialmente para las poblaciones más viejas.

Desafortunadamente la extinción interna de los anillos polares no se conoce bien. Gallagher et al. (2002) hicieron un diagrama color-magnitud para el anillo de PRC A-05, manejando la información pixel por pixel. Estadísticamente los pixeles con polvo resultaron más rojos y débiles. Desafortunadamente nuestros datos no tienen una resolución espacial adecuada para usar ésta técnica. Además, la técnica es insensible a una extinción uniforme.

Adicionalmente, la metalicidad del anillo de B-20 también se desconoce. En otros anillos, la metalicidad abarca desde la solar (Eskridge & Pogge 1997) hasta casi la mitad de la solar (Sparke et al., no publicado).

Se procedió a estimar las probables edades para los anillos, haciendo varias suposiciones. Se supuso que la metalicidad podía tomar valores desde $1/5$ de la solar hasta la solar y el enrojecimiento interno de 0 a 0.3 magnitudes. Como resultado encontramos que un color intrínseco de $+1.65$ podría implicar una edad que excedería los 10 Gyr, de acuerdo a los modelos de Kurth et al. (1999), sin importar la metalicidad. Por otra parte, un color intrínseco de $+1.35$, ya sea como resultado de una desviación de 3σ hacia el azul o por una extinción interna de $+0.3$ magnitudes, implicaría edades de aproximadamente 2.5 Gyr para una metalicidad solar y 10 Gyr para una metalicidad de $1/5$ la solar. Finalmente, un color intrínseco de $+1.05$, suponiendo una desviación de 3σ hacia el azul y $+0.3$ magnitudes de extinción interna, implicaría edades de aproximadamente 1.3 Gyr para una metalicidad solar y 2 Gyr para una metalicidad de $1/5$ la solar.

A una distancia de aproximadamente 140 Mpc (Jones et al., 2004; suponiendo $H_0 = 75 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc, s}^{-1}$), el diámetro del anillo de aproximadamente $22''$ correspondería aproximadamente a 15 kpc. Si la velocidad orbital a esta distancia es 120 km s^{-1} , el periodo orbital sería de aproximadamente 0.4 Gyr. Si la edad del anillo de B-20 es definitivamente mayor que 1.2 Gyr, esto querría decir que el anillo ha sobrevivido por al menos 3 periodos orbitales, por lo que podría ser estable.

Antes de concluir que todos los anillos polares son estables, debemos notar

que B-20 no ha sido confirmada como *GAP*; es simplemente una buena candidata (así como tampoco ha sido confirmada B-10). La confirmación requerirá mediciones de la cinemática, tanto de la galaxia como del anillo. Además, nuestra edad calculada está fuertemente supeditada a las incertidumbres en la metalicidad y al enrojecimiento interno en el anillo.

Capítulo 7

Conclusiones

Encontramos que en nuestra muestra los anillos aportan entre el 4 y el 40 % de la luz de la galaxia, lo cual concuerda con otros autores (aproximadamente 25 % en PRC A-05, Gallagher et al., 2002; 11 % en PRC C-02, Reshetnikov 2003; 14 y 24 % para PRC A-04 y A-06 respectivamente, Reshetnikov & Combes 1994; un intervalo entre el 1 y el 40 % para las galaxias confirmadas del PRC, Reshetnikov et al., 1994).

El color de nuestros anillos más azules coincide con la posesión de H 2, lo que nos indica que la causa podría ser reciente formación estelar.

Los colores encontrados para los anillos van desde aproximadamente +0.61 hasta +1.65. Los anillos, efectivamente, pueden llegar a ser muy rojos. En particular, el color que encontramos para PRC B-20 es muy rojo. Encontramos que los anillos tienen un amplio intervalo de colores y tenemos como posibles causas, la edad, la metalicidad y el enrojecimiento interno. Sin embargo, el valor de esas tres cantidades no se conoce con precisión, pero encontramos que usando distintos valores razonables, tanto de la metalicidad como de la extinción, obteníamos edades entre 1.3 Gyr y más de 10 Gyr. Es un intervalo demasiado grande, y éste resultado sugiere que es necesario conocer mejor los valores de los factores de enrojecimiento en las Galaxias con Anillo Polar, en particular la extinción por polvo.

Capítulo 8

Trabajo Futuro

Las Galaxias con Anillo Polar son sistemas complejos que, como hemos visto, nos dan oportunidad de ver cómo se comporta la materia bajo nuevas condiciones. Esto crea muchas interrogantes y la oportunidad de ir las contestando poco a poco.

8.1. Confirmación

En nuestra muestra hay dos galaxias que no han sido confirmadas como GAP (PRC B-10 y B-20). Algo que se podría hacer es un estudio para saber si realmente lo son o no. Puesto que el anillo y la galaxia central están formadas de diferentes materiales, tenemos que usar distintas técnicas en cada uno. En los anillos se puede usar de trazador la línea de 21 cm de HI. Las galaxias centrales normalmente tienen poco gas, aquí podemos hacer estudios espectroscópicos de líneas de absorción de las estrellas.

Una vez que hayamos obtenido la velocidad heliocéntrica de diferentes puntos de ambas componentes, podemos obtener una velocidad de rotación para cada componente y estimar la dirección de su eje de rotación, recordando que la galaxia anfitriona deberá de ser una galaxia plana y que los vectores de momento angular deberán de ser más o menos perpendiculares.

8.2. Extinción

Como hemos visto, hay factores que pueden incidir fuertemente en el enrojecimiento de los anillos polares, particularmente el polvo. Por lo tanto, una mejor comprensión de cómo afecta el polvo a la fotometría de nuestras componentes nos ayudaría a restringir su error provocado y calcular con mayor precisión la edad de los anillos galácticos. Un ejemplo de este tipo de estudios es el de Gallagher et al. (2002), en el que hicieron diagramas color-magnitud de pixeles de diferentes regiones tomadas en las componentes de PRC A-05. Cada pixel abarca gran cantidad de espacio y, por lo tanto, una mezcla de las estrellas, gas y polvo

del volumen proyectado. Los pixeles afectados por polvo serán más rojos y más débiles que el promedio.

También se podrían hacer observaciones en infrarrojo usando el filtro H, aprovechando que el color R-H es menos afectado por el polvo que B-R.

8.3. Ampliación de la Muestra

La muestra podría ampliarse a objetos del PRC tipo C que hayan sido promovidos de categoría, ya sea porque se hayan confirmado como tipo A o porque se crea que son buenas candidatas, es decir, tipo B. Otra ampliación posible a la muestra, sería la observación de GAP que no son visibles desde San Pedro Mártir.

8.4. Aumento en el Tiempo de Exposición

En nuestras galaxias observadas, hay algunas en las que el anillo resultó demasiado débil para hacer fotometría; éstas galaxias se podrían volver a observar usando un tiempo de exposición mayor.

8.5. Campos Planos del Cielo

Cuando se observan objetos muy débiles (como el anillo de PRC B-10), los errores en la estimación del cielo de fondo pueden llegar a dominar la fotometría, por lo que se necesita un buen ajuste para restarlo lo mejor posible. En nuestras observaciones se utilizaron campos planos del crepúsculo. Para obtener mejores resultados se pueden usar campos planos del cielo nocturno. En éstos casos se toman imágenes del mismo cielo que afecta a nuestros objetos observados y, por lo tanto, hacemos una mejor estimación del espectro que hay que corregir.

Bibliografía

- Arnaboldi, M.; Freeman, K. C.; Sackett, P. D.; Sparke, L. S.; & Capaccioli, M. 1995, P&SS, 43, 1377
- Arnaboldi, M.; Capaccioli, M.; Barbaro, G.; Buson, L.; Longo, G., 1993, A&A, 268, 103A
- Arnaboldi, M.; Capaccioli, M.; Combes, F., 1994, ASPC, 54, 437A
- Arnaboldi, M.; Capaccioli, M.; Cappellaro, E.; Held, E. V.; Sparke, L., 1993, A&A, 267, 21A
- Arnaboldi, M.; Capaccioli, M.; Capellaro, E.; Held, E. V.; & Koribalski, B., 1995, AJ, 110, 199A
- Arnaboldi, M. & Sparke, L. S., 1996, AJ, 107, 958A
- Arp, H., 1966, ApJS, 14, 1A
- Bekki, K., 1997, ApJ, 490, L37
- Bekki, K., 1998, ApJ, 499, 635
- Bessell, M. S., 1990, PASP, 102, 1181
- Bournaud, F. & Combes, F., 2003, A&A 401, 817-833
- Cox, A. L., 1996, Ph.D. thesis, Univ. Wisconsin-Madison
- Cox, A. L. & Sparke, L. S., 1996, ASPC, 106, 168C
- Cox, A. L.; Sparke, L. S.; Watson, A. M.; & van Moorsel, G., 2001, AJ, 121, 692
- Cox, A. L. & Sparke, L. S., 2004, AJ, 128:2013-2021
- Curir, A. & Diaferio, A., 1994, A&A, 285, 389C
- Eskridge, P. B.; & Pogge, R. W., 1997, ApJ, 486, 259
- Gallagher, J. S.; Sparke, L. S.; Matthews, L. D.; Frattare, L. M.; English, J.; Kinney, A. L.; Iodice, E.; Arnaboldi, M., 2002, ApJ, 568, 199G
- Gil de Paz, A.; Madore, B. F.; & Pevunova, O., 2003, ApJS, 147, 29G
- Hartley, K. 1987, Science News, 132, 282

- Jones, D. H.; Saunders, W.; Colless, M.; Read, M. A.; Parker, Q. A.; Watson, F. G.; Campbell, L. A.; Burkey, D.; Mauch, T.; Moore, L.; Hartley, M.; Cass, P.; James, D.; Russell, K.; Fiegert, K.; Dawe, J.; Huchra, J.; Jarrett, T.; Lahav, O.; Lucey, J.; Mamon, G. A.; Proust, D.; Sadler, E. M.; Wakamatsu, K., 2004, MNRAS, 355, 747J
- Katz, N. & Rix, H. W., 1992, ApJ, 389L, 55K
- Kennicutt, R. C., 1998, ARA&A, 36, 189
- Kinney, A. L.; Gallagher, J.; Matthews, L.; Sparke, L.; Bond, H. E.; Christian, C. A.; English, J.; Frattare, L.; Hamilton, F.; Levay, Z.; Noll, K.; Hubble Heritage Team, 1999, AAS, 194, 0601K
- Kobulnicky, H. A.; Kennicutt, R. C. Jr. & Pizagno, J. L., 1999, ApJ, 514, 544
- Koeppen, J.; & Arimoto, N., 1991, A&AS, 87, 109
- Kurth, O. M.; Fritze-v. Alvensleben, U.; & Fricke, K. J., 1999, A&AS, 138, 19K
- Landolt, A. U., 1983, AJ, 88, 439L
- Landolt, A. U., 1992, AJ, 104, 340
- Lauberts, A. & Valentijn, E. A., 1989, ESO
- McGaugh, S. S., 1991, ApJ, 380, 140
- Mould, J.; Balick, B. & Aaronson, M., 1982, ApJ, 260, L37-L40
- O'Connell, R. W. 1997, The Ultraviolet Universe at Low and High Redshift, eds. Waller, W. H.; Fanelli, M. N. & Danks, A. C.
- Peletier, R. F.; Christodoulou, D. M., 1993, AJ, 105, 1378P
- Peng, C. Y., 2001, *GALFIT* Quick Start Guide
- Peng, C. Y.; Ho, L. C.; Impey, C. D. & Rix, H.-W., 2002, AJ, 124, 266
- Reshetnikov, V. P. & Combes, F., 1994, A&A, 291, 57R
- Reshetnikov, V. & Sotnikova, N., 1997, A&A, 325, 933R
- Reshetnikov, V. P.; Hagen-Thorn, V. A.; & Yakovleva, V. A., 1994, A&A, 290, 693-704
- Reshetnikov, V. P.; Hagen-Thorn, V. A.; & Yakovleva, V. A., 1995, A&A, 303, 398R
- Reshetnikov, V. P.; Faúndez-Abans, M.; & de Oliveira-Abans, M., 2001, RAS, 322, 689-694
- Reshetnikov, V. P.; Faúndez-Abans, M.; & de Oliveira-Abans, M., 2002, A&A, 383, 390R
- Reshetnikov, V. P., 2004, A&A, 416, 889-900

- Reshetnikov, V.; Bournaud, F.; Combes, F.; Faúndez-Abans, M.; de Oliveira-Abans, M.; van Driel, W.; & Schneider, S. E. 2005, *A&A*, 431, 503-510
- Sackett, P. D.; Rix, H.-W.; Jarvis, B. J. & Freeman, K. C., 1994, *ApJ*, 436, 629
- Sackett, P. D. & Sparke, L. S., 1990, *ApJ*, 361, 408
- Schechter, P. L.; Boksenberg, A.; Ulrich, M.-H., 1984, *ApJ*, 277, 526S
- Schechter, P. L. & Gunn, J. L., 1978, *AJ*, 83, 1360
- Schlegel, D. J.; Finkbeiner, D. P.; Davis, M., 1998, *ApJ*, 500, 525S
- Schweizer, F.; Whitmore, B. C. & Rubin, V. C., 1983, *AJ*, 88, 909
- Sérsic, J. L. & Agüero, E. L., 1972, *Ap&SS*, 19, 387S
- Sil'chenko, O. K., 1988, *A&A*, 330, 412S
- Sparke, L. S., 1986, *MNRAS*, 219, 657S
- Steinman-Cameron, T. Y. & Durisen, R. H., 1988, *ApJ*, 325, 26
- Stockton, A. & MacKenty, J. W., 1983, *Nature*, 305, 678S
- Taniguchi, Y.; Shibata, K. & Wakamatsu, K. I., 1986, *Ap&SS*, 118, 529
- Tohline, J. E.; Simonson, G. F. & Caldwell, N., 1982, *ApJ*, 252, 92T
- van Driel, W.; Arnaboldi, M.; Combes, F. & Sparke, L. S., 2000, *A&AS*, 141, 385
- van Driel, W.; Combes, F.; Casoli, F.; Gerin, M.; Nakai, N.; Miyaji, T.; Hamabe, M.; Sofue, Y.; Ichikawa, T.; Yoshida, S.; Kobayashi, Y.; Geng, F.; Minezaki, T.; Arimoto, N.; Kodama, T.; Goudfrooij, P.; Mulder, P. S.; Wakamatsu, K.; Yanagisawa, K., 1995, *AJ*, 109, 942V
- Whitmore, B. C.; Schweizer, F. & Rubin, V. C., 1982, *BAAS*, 14, 643
- Whitmore, B. C.; McElroy, D. B. & Schweizer, F., 1987, *AJ*, 314, 439
- Whitmore, B. C.; Lucas, R. A.; McElroy, D. B.; Steiman-Cameron, T. Y., Sackett, P. D. & Olling, R. P., 1990, *AJ*, 100, 1489