Capítulo 8

Resumen, conclusiones y proyectos futuros

A lo largo de este trabajo se estudió la historia de la formación estelar a corto, medio y largo plazo de la galaxia compacta azul Mrk 86 con la ayuda de imágenes en diferentes bandas óptico-infrarrojas ($BVRJHK$, Hα, [O III]λ5007) y espectros ópticos de resolución intermedia y alta. Esta galaxia, como prototipo de las galaxias compactas azules iE, presenta un gran número de regiones de formación estelar distribuidas sobre toda la superficie óptica de la galaxia, lo que nos ha permitido indagar sobre los posibles mecanismos de activación y propagación de la formación estelar en las galaxias BCD.

A partir de la medida de los colores y flujos de las líneas de emisión se determinaron las edades, fuerzas de brote, excesos de color y abundancias metálicas de las diferentes poblaciones estelares. Para ello fue necesario desarrollar un conjunto de modelos de síntesis evolutiva para regiones de formación estelar así como un procedimiento de comparación entre modelos y observables. El procedimiento de comparación desarrollado garantiza que las soluciones obtenidas representan adecuadamente las propiedades de las poblaciones estelares estudiadas, permitiendo además conocer y cuantificar las posibles degeneraciones existentes entre estas propiedades.

Este procedimiento fue empleado también para estudiar la historia de la formación estelar reciente en un conjunto de 67 galaxias de la exploración UCM. Las imágenes ópticas (r), infrarrojas (JK') y espectros ópticos obtenidos nos permitieron determinar la edad, fuerza de brote, abundancia metálica y masa estelar total de las mismas. La fiabilidad de este método de comparación a la hora de analizar sistemas globales hace del mismo una potente herramienta para el estudio de las poblaciones estelares en galaxias a alto desplazamiento al rojo.

El análisis de las poblaciones estelares y cinemática de la galaxia BCD Mrk 86 nos ha permitido profundizar significativamente en el conocimiento de los mecanismos de activación y propagación de la formación estelar en este tipo de galaxias, determinando así mismo la importancia de las diferentes componentes de masa sobre su dinámica. Sin embargo, a pesar de las claves aportadas, existen aún importantes dudas respecto a algunas de las principales cuestiones relacionadas con estos temas. Con este fin se han puesto en marcha diferentes líneas de investigación que pretendemos desarrollar en un futuro próximo (véase la Secc. 8.2).

A continuación presentamos las conclusiones finales de este trabajo de tesis doctoral.

8.1 Conclusiones finales

Se ha estudiado la historia de la formación estetar a corto, medio y largo plazo de la galaxia compacta azul Mrk 86 así como la dinámica de su gas ionizado. Para llevar a cabo este estudio se desarrollaron un conjunto de modelos de síntesis evolutiva y un novedoso procedimiento de comparación entre modelos y observables.

- Empleando dicho procedimiento se analizaron tres poblaciones estelares diferenciadas:

  i) La población subyacente, que muestra un perfil de brillo exponencial, perfiles de color planos y una edad de entre 5 y 9 Ga.

  ii) Las regiones de formación estelar reciente, con edades entre 5 y 13 millones de años, fuerzas de brote del 1 por ciento y bajas metalicidades, de entre 1/10 y 1/20 $Z_{\odot}$.

Y finalmente,

iii) la componente *starburst*, situada en el centro de la galaxia, con una edad de 30 Ma, una fuerza de brote del 20 por ciento y una masa estelar de $1.5\times10^7\,M_\odot$.

- El estrecho rango de edad así como la distribución espacial de las regiones de formación estelar más reciente apuntan hacia la existencia de un único mecanismo a gran escala responsable de la activación de esta formación estelar.

- Debido a la elevada fuerza de brote y masa estelar de la componente *starburst*, esta región debió dar lugar durante su evolución a la formación de una burbuja de gas en expansión que estaría siendo calentada por los vientos de las estrellas masivas y las explosiones de supernova. Según los modelos hidrodinámicos de Silich y Tenorio-Tagle (1998), la evolución de esta burbuja debió dar lugar a la formación de un toroide de gas neutro a una distancia de entre 1 y 2 kpc unos 25 Ma después de la formación del *starburst*. Estos parámetros coinciden aproximadamente con la distancia y diferencia de edad medida entre dicha componente y las regiones de formación estelar más reciente.

- Los mecanismos más factibles para la activación de la formación estelar en esta componente *starburst* son la fusión con una galaxia de pequeña masa y/o la interacción con la galaxia UGC 4278.

- Por último, el estudio del campo de velocidad radial del gas ionizado en este objeto ha puesto de manifiesto que la población estelar subyacente domina la masa total y por tanto la dinámica dentro de la extensión óptica de la galaxia. La comparación de este campo de velocidad radial con diferentes perfiles de masa y diferentes distribuciones para el gas ionizado sugiere que este gas está probablemente confinado en un disco inclinado entre 30° y 40° respecto al plano del cielo. Esta distribución para el gas ionizado apoya el hecho de que la formación estelar más reciente hubiera tenido lugar en un toroide de gas neutro situado en torno a la componente *starburst*.

A partir de la aplicación del procedimiento de comparación descrito con anterioridad se analizó también la historia de la formación estelar reciente en un total de 67 galaxias de la exploración UCM. Esta comparación puso de manifiesto la fiabilidad de dicho procedimiento a la hora de estudiar las propiedades integradas de las galaxias, haciendo del mismo una potente herramienta para la caracterización de las poblaciones estelares en galaxias a alto desplazamiento al rojo.

8.2 Líneas de investigación futura

8.2.1 Población estelar subyacente en galaxias compactas azules

Una de las principales cuestiones aún por resolver acerca de las naturaleza de las galaxias compactas azules se refiere a la naturaleza y propiedades de su población subyacente, básicamente sus propiedades estructurales y la posible presencia de gradientes de edad o metalicidad. Estas propiedades proporcionarían importantes claves para el conocimiento de los mecanismos de formación de las galaxias BCD. Desde Febrero de 1999 se han realizado observaciones ultraprofundas en el infrarrojo cercano (bandas JK') de una muestra de 10 galaxias compactas azules a lo largo de tres períodos de observación diferentes. La muestra seleccionada incluye 9 galaxias de campo procedentes de diferentes exploraciones, UCM1612+1308, UCM0148+2124, UCM1413+2446, UM334, UM496, CG222, CG779, CG541, SBS0136+328 y una galaxia de cúmulo VPC326.

Las observaciones se han llevado a cabo utilizando diferentes sistemas de óptica adaptativa (véase la Tabla 8.1), lo que permitirá segregar espacialmente la emisión procedente de la población subyacente y de las regiones de formación estelar más reciente. A partir de estas imágenes podremos determinar los perfiles de brillo superficial y de color de la componente subyacente hasta brillos superficiales del orden de 23 mag/arcsec^2 en J y 22 mag/arcsec^2 en K.

Simultáneamente con estas observaciones se obtuvieron espectros en el infrarrojo cercano para 5 objetos de esta muestra con el espectrógrafo CGS4 del telescopio UKIRT (2 noches en tiempo de servicio). Estos espectros permitirán delimitar la región con líneas de emisión, diagnosticar las propiedades del gas ionizado y estudiar las propiedades de la población subyacente a partir de la medida del índice de CO (Kleinmann y Hall 1986).

Tabla 8.1: Tabla de observaciones realizadas con óptica adaptativa (OA) en el infrarrojo cercano

Fecha	Telescopio	Cámara	OA	Noches
Febrero 1999	3.5m CAHA	OMEGA Cass.	ALFA	2
Enero 2000	3.5m CAHA	OMEGA Cass.	ALFA	2
Abril 2000	3.5m TNG	ARNICA	AdOpt	3
Noviembre 2000	3.5m CAHA	OMEGA Cass.	ALFA	2
Diciembre 2000†	4.2m WHT	INGRID	NAOMI	2

†Solicitado

8.2.2 Imágenes multibanda y Fabry-Pérot de una muestra de galaxias BCD

A fin de generalizar los resultados obtenidos para Mrk 86 para una muestra representativa de galaxias BCD se pretenden tomar imágenes en diferentes bandas óptico-infrarrojas y de interferometría Fabry-Pérot de una muestra de 10 galaxias compactas azules. Se empleará para este análisis un procedimiento similar al utilizado en el caso de Mrk 86.

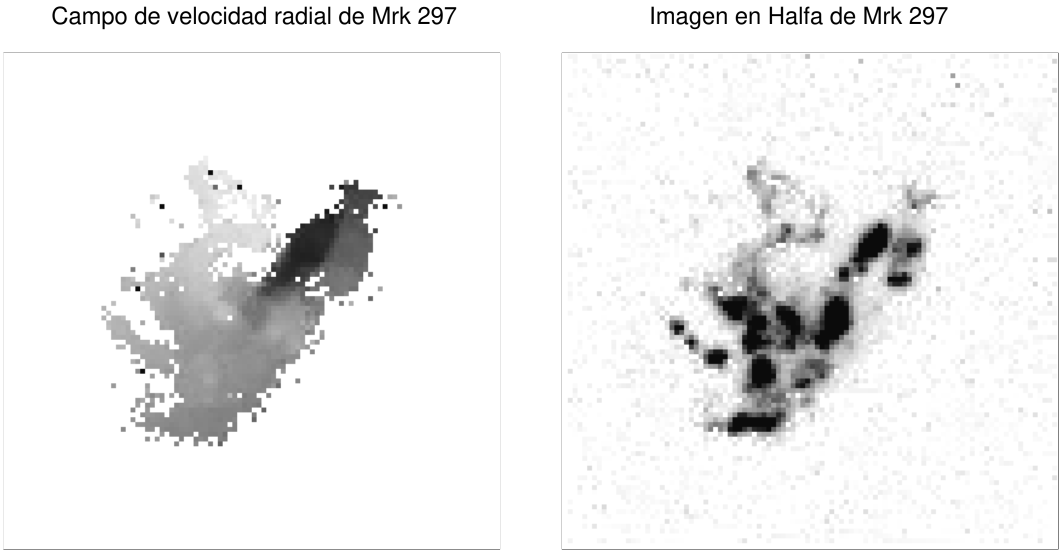
Hasta la fecha se han obtenido imágenes Fabry-Pérot en Hα e imágenes infrarrojas en J y K de todas las galaxias. Para la mitad de la muestra se han obtenido además imágenes ópticas en las bandas BR y espectros *echelle* de alta resolución con el espectrógrafo HIRES del telescopio Keck-I (Gallego et al. 2000). Las galaxias que forman esta muestra son UCM2304+1640, UCM0049−0006, UCM0148+2124, UCM1612+1308, UCM1646+2725, UCM2326+2435, UM306, UM374, Mrk 297 y Arp 262.

En la Figura 8.1 se muestra el campo de velocidad radial y de intensidad de línea de una de estas galaxias (Mrk 297) obtenido a partir de las observaciones Fabry-Pérot en la línea Hα.

8.2.3 Estudio de cúmulos globulares jovenes en Mrk 86

Por último, a pesar del exhaustivo estudio llevado a cabo en la galaxia BCD Mrk 86, existen algunas cuestiones referentes a este objeto cuya resolución pretendemos abor-

Figura 8.1: Campo de velocidad radial del gas ionizado de Mrk 297 (*izquierda*) y la imagen de intensidad en Hα (*derecha*) obtenidas a partir de observaciones Fabry-Pérot con el instrumento TAURUS II del telescopio WHT.



dar en un futuro próximo. En particular, durante el desarrollo de este trabajo de tesis doctoral se puso de manifiesto la existencia de una población de regiones de formación estelar con intensas líneas de emisión pero muy débil continuo (véase el Capítulo 5).

La posición de estas regiones, a una gran distancia galactocéntrica, su baja luminosidad, pequeño tamaño y altas anchuras equivalentes ($\geq$300 Å; deducidas a partir de nuestra imagen Hα) sugieren que podrían tratarse de cúmulos globulares en formación (Whitmore 2000). Estos cúmulos se habrían empezado a formar posiblemente a causa de una fusión galáctica o interacción reciente (véase la Secc. 7.3; véase también Puzia et al. 1999). Las propiedades de estas regiones recuerdan a las de los cúmulos globulares más jovenes analizados por Östlin et al. (1998) en la galaxia Tololo 1924-416.

A fin de comprender los mecanismos de formación y enriquecimiento químico en estos objetos pretendemos determinar las abundancias metálicas del gas ionizado, su estado evolutivo y su masa dinámica, mediante la obtención de espectros ópticos de resolución intermedia (brazo azul) y alta (brazo rojo) con el espectrógrafo doble ISIS del telescopio WHT.

8.2.4 Estudio de la muestra UCM en la banda B

Como se mostró en el Capítulo 4, la medida de los colores óptico-infrarrojos y de la anchura equivalente de Hα no permiten romper de manera completa las degeneraciones edad-metalicidad y edad-fuerza de brote. Por tanto, a fin de reducir las incertidumbres en las propiedades derivadas, es necesario introducir nuevos observables. Así, desde el año 1998 se vienen realizando observaciones en banda B de las galaxias de las listas I y II (Zamorano et al. 1994, 1996) de la exploración UCM (véase Pérez-González et al. 2000a). Esta observaciones, en combinación con los datos en las bandas rJK, permitirán además profundizar en el conocimiento de la historia de la formación estelar a medio y largo plazo de estos objetos. Así mismo, dichas observaciones proporcionarán información fácilmente comparable con la obtenida en exploraciones a alto desplazamiento al rojo.