Capítulo 7

Historia de la formación estelar en Mrk 86

A lo largo de los capítulos precedentes hemos estudiado las propiedades de la galaxia compacta azul Mrk 86. Este estudio ha puesto de manifiesto que esta galaxia posee, al menos, tres poblaciones estelares diferenciadas:

- **Población subyacente**: Presenta un perfil de brillo superficial exponencial y unos colores característicos de una población estelar de entre 5 y 10 Ga de edad y metalicidad menor que solar. El perfil de masa deducido para esta componente domina el perfil de masa total de la galaxia hasta distancias del orden de 4 kpc.

- **Starburst central**: La fuerza de brote deducida para este *starburst* es del orden del 20 por ciento para una edad de 30 Ma y una masa total en estrellas de $1.5\times10^{7}\ M_{\odot}$.

- **Regiones de formación estelar reciente**: Estas regiones presentan fuerzas de brote ($\sim$2 por ciento) y edades (5-13 Ma) mucho menores que las obtenidas para la componente *starburst*.

Por otro lado, a lo largo de este trabajo se ha puesto en evidencia que esta galaxia presenta un importante déficit en materia oscura en relación con la materia estelar si se comparan nuestros resultados con los obtenidos para otras galaxias enanas (véase Moore 1994 y referencias allí citadas). Así mismo se ha puesto de manifiesto que el gas ionizado se encuentra distribuido en un disco inclinado unos 40° respecto al plano del cielo.

En este último capítulo plantearemos un escenario que pretende explicar la mayor parte de las propiedades observadas en esta galaxia. Basándonos en este escenario intentaremos comprender la evolución de la formación estelar en este objeto tanto a corto como a medio plazo. Finalmente, analizaremos la relevancia de las conclusiones extraídas en este trabajo dentro de la teoría de evolución de las galaxias enanas.

7.1 Formación estelar reciente en Mrk 86

La mayoría de las regiones de formación estelar reciente de Mrk 86 están localizadas en una barra orientada en dirección Norte-Sur situada $20''$ al este del centro de la galaxia y en una estructura en forma de arco que va desde el Sudeste (regiones #58 y #64) hasta el Norte (regiones #13 y #16) del *starburst* central.

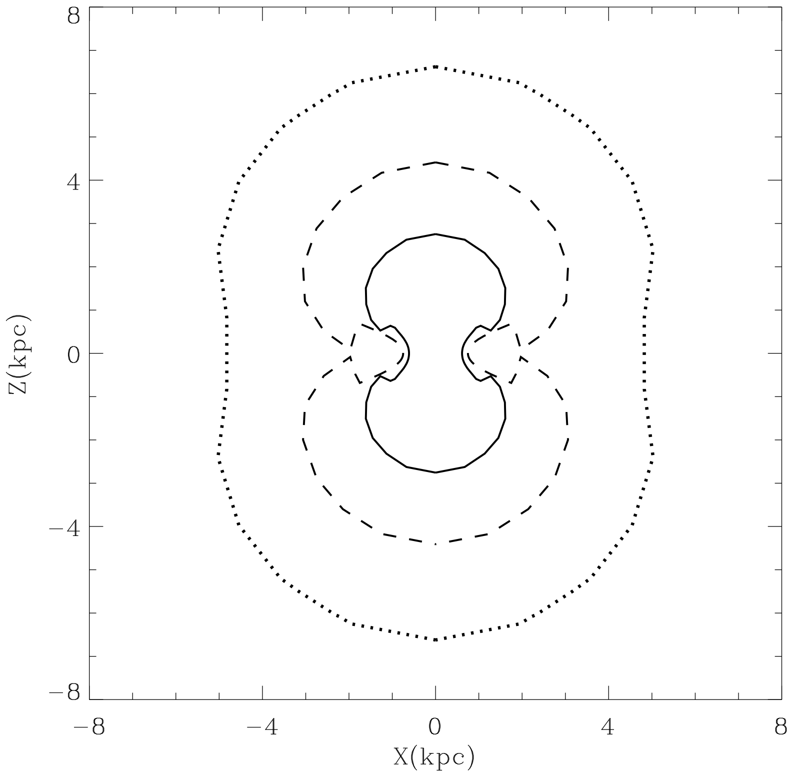
Tal y como se determinó en la Secc. 5.2.4, el rango de edad de las regiones de formación estelar es muy estrecho, no observándose además gradientes de edad significativos en estas estructuras. Esto sugiere la existencia de un mecanismo a gran escala que habría sido el responsable de la activación de la formación estelar hace aproximadamente 10 Ma.

Proponemos que este mecanismo de activación a gran escala está relacionado con la evolución de una burbuja originada hace aproximadamente 30 Ma por la deposición de energía cinética de la componente *starburst*. En el caso de algunas de las regiones de formación estelar más jóvenes, la activación podría estar relacionada con fenómenos de propagación a pequeña escala. Este es quizás el caso de los complejos formados por las regiones #26-#27, #26-#18, #58-#64 y #16-#13. Estos complejos se componen de una región de formación estelar de edad intermedia ($\sim$10 Ma) y un brote joven ($\leq$5 Ma). Los mecanismos de activación en este caso serían similares a los descritos por Stewart et al. (1999) para el caso de la galaxia Holmberg II.

A continuación nos centraremos en la descripción del mecanismo propuesto para la activación de la formación estelar a gran escala. De acuerdo a los modelos de Silich y Tenorio-Tagle (1998; véase también De Young y Heckman 1994), los vientos colectivos de supernova se expanden principalmente en la dirección perpendicular al disco de la galaxia, es decir, a lo largo de la dirección en la que la densidad del medio interestelar disminuye más rápidamente. La evolución de esta burbuja da lugar a la formación de una burbuja de gas interestelar que es arrastrado por la misma. Aproximadamente 25-30 Ma después del brote de formación estelar esta burbuja rodea las regiones internas y más densas del disco. En ese momento, la onda de choque es capaz de atravesar el disco debido a la menor densidad del medio uniéndose con su contrapartida al otro lado del disco de la galaxia. En la Figura 7.1 se muestra la evolución en el tiempo de la burbuja para el modelo A100 de Silich y Tenorio-Tagle (1998). Durante la fusión de las dos partes de la burbuja una fracción el gas interestelar arrastrado queda atrapado en una estructura en forma de toroide. En la Figura 7.2a se muestra la variación en la masa del gas interestelar arrastrado en función de la edad de la burbuja. El salto de $2{\times}10^{8}\,\mathrm{M}_{\odot}$ observado en esta figura corresponde a la masa que permanece asociada a dicho toroide. Este toroide, debido a la compresión sufrida hacia el plano de la galaxia, no participa en el movimiento global de expansión de la burbuja que lo originó. Si la densidad superficial de masa en este toroide fuera del orden de 5-10 $\mathrm{M}_{\odot}\,\mathrm{pc}^{-2}$ dicha compresión podría dar lugar a la activación de la formación estelar (Skillman et al. 1987; Kennicutt 1989; Taylor et al. 1994).

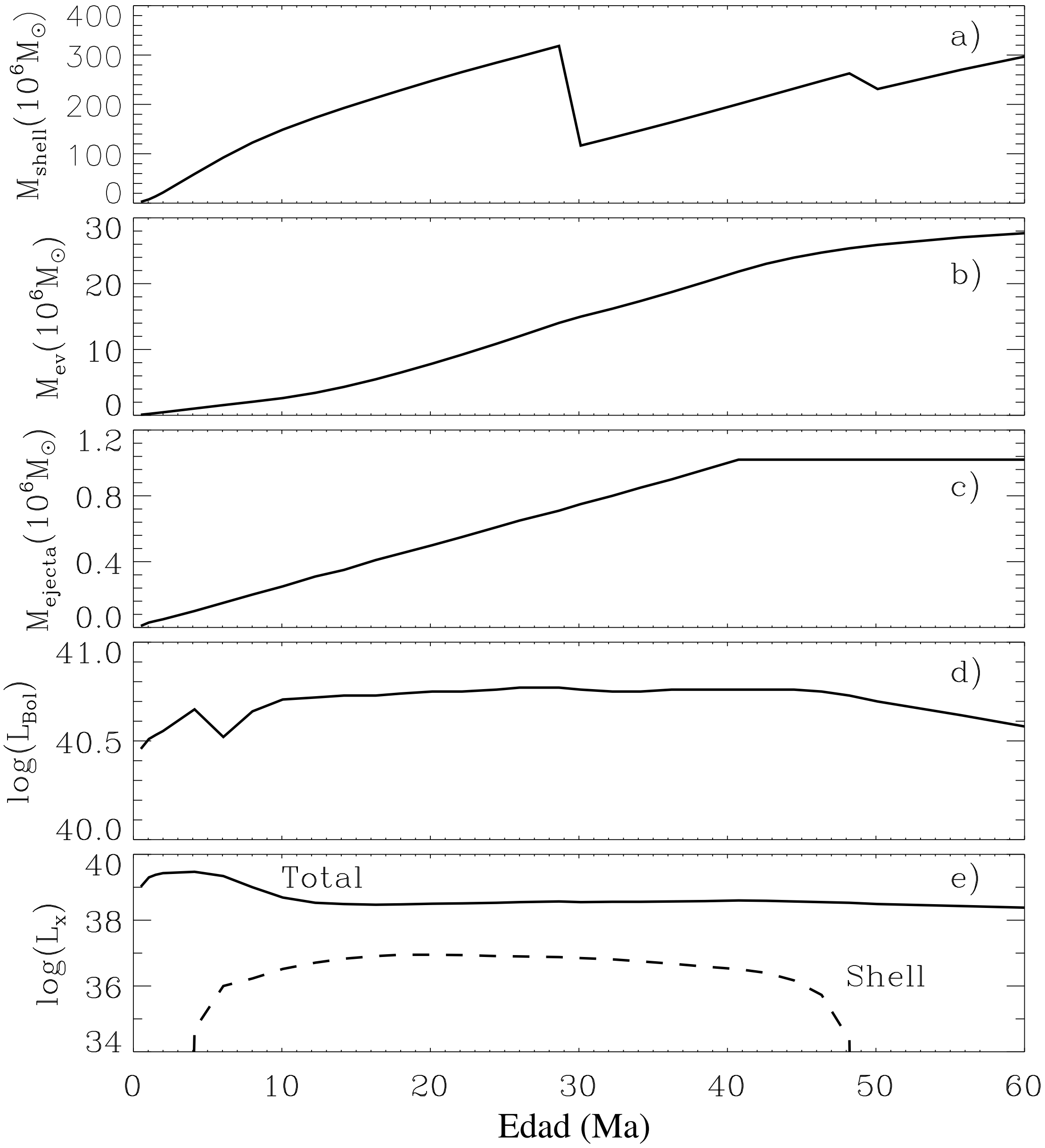
A fin de comprobar la validez de esta hipótesis, hemos comparado nuestros datos con el modelo A100 de Silich y Tenorio-Tagle (1998). Este modelo considera una galaxia con una masa total de $10^{10}\,\mathrm{M}_{\odot}$ y un 10 por ciento de contenido en gas neutro sobre la que evoluciona una burbuja, siendo el que presenta unos parámetros más parecidos a los deducidos para Mrk 86. La energía total inyectada en esta burbuja sería E_{brote}=10^{56} erg. Finalmente, este modelo considera una densidad central para el medio interestelar de n_0=20.2 cm^{-3} con una metalicidad de Z=0.3 $\mathrm{Z}_{\odot}$. El trabajo de Silich y Tenorio-Tagle (1998) predice un radio y época de formación para este toroide de 1.5 kpc y 25-30 Ma, respectivamente. Por su parte, la diferencia de edad deducida entre la componente *starbust* y las regiones de formación estelar más reciente así como la distribución de las mismas sugiere que el tiempo transcurrido para la formación del hipotético toroide debió ser alrededor de 20 Ma, siendo el radio del mismo del orden de 1-1.5 kpc.

Figura 7.1: Evolución de la burbuja descrita por el modelo A100 de Silich y Tenorio-Tagle (1998). Los contornos dibujados muestran la posición de la burbuja 14, 26 y 50 Ma después del brote de formación estelar (Figura 3a de Silich y Tenorio-Tagle 1998).



Las diferencias observadas entre las propiedades predichas por el modelo A100 de Silich y Tenorio-Tagle (1998) y las deducidas en el caso Mrk 86 pueden deberse a un diferente perfil de masa y ritmo de inyección de energía cinética. En particular, el ritmo medio de inyección de energía cinética obtenida para la componente *starburst* es ligeramente mayor. Así, asumiendo una masa estelar de $1.5{\times}10^{7}\,\mathrm{M}_{\odot}$, resulta ser $L{\sim}2.5{\times}10^{41}\,\mathrm{erg\,s^{-1}}$. Este valor fue obtenido promediando el ritmo de deposición de energía proporcionado por los modelos de Leitherer y Heckman (1995) durante los 20 primeros millones de años de evolución de un brote de formación estelar de metalicidad $\mathrm{Z}{=}0.1\,\mathrm{Z}_{\odot}$. Por otro lado, el perfil de densidad del gas es mucho menos pronunciado en Mrk 86 que en el caso del modelo A100 de Silich y Tenorio-Tagle (1998). Es importante tener en cuenta que, si consideramos el efecto que la evolución de la burbuja pueda haber tenido sobre la distribución del medio interestelar, la distribución inicial de gas en Mrk 86 pudo haber sido similar a la asumida para el

Figura 7.2: Evolución con el tiempo de la burbuja A100. El panel **a** muestra la cantidad de medio interestelar arrastrada por la burbuja en función del tiempo, mientras que los paneles **b** y **c** representan, respectivamente, la materia depositada en el interior de la burbuja originalmente arrastrada por la burbuja y la materia expulsada en las explosiones de supernova. Por último, los paneles **d** y **e** muestran, respectivamente, las luminosidades de la burbuja bolométrica y en rayos X (adaptada de la Figura 4 de Silich y Tenorio-Tagle 1998).



modelo A100 de Silich y Tenorio-Tagle (1998).

Por último, tal y como sugiere el propio Prof. S. Silich (comunicación privada), el aumento en el ritmo de deposición de energía cinética puede acelerar la formación del toroide de gas, dando lugar a tiempos de evolución menores. Este hecho, sin embargo, es fuertemente dependiente del perfil de masa que se asuma para la galaxia.

La densidad superficial de gas del toroide, adoptando una anchura de 500 pc y una masa de $2\times10^{8}\,\mathrm{M}_{\odot}$, sería aproximadamente $64\,\mathrm{M}_{\odot}\,\mathrm{pc}^{-2}$. Este valor se sitúa entre los medidos en los discos de las galaxias espirales y en galaxias *starburst* detectadas en el infrarrojo (véase Kennicutt 1998). Usando la masa estimada por Silich y Tenorio-Tagle (1998) para este toroide y calculando, a partir de los datos suministrados en la Tabla 5.2, la masa estelar de las regiones de formación estelar reciente ($\sim10^{7}\,\mathrm{M}_{\odot}$), es posible estimar la eficiencia necesaria para convertir este gas en estrellas. El valor que se obtiene, en torno al 5 por ciento, es similar al medido por Kennicutt (1998) en los discos de galaxias normales.

Finalmente, es importante señalar que el tiempo transcurrido entre el brote de formación estelar asociado a la componente *starburst* y la formación del toroide de gas neutro, 20 Ma, es mucho menor que el período de rotación de la galaxia, que es de aproximadamente 140 Ma. Por lo tanto, el tiempo transcurrido es insuficientemente para que cualquier rotación diferencial residual pudiera haber destruido este toroide. El período de rotación de la galaxia se obtuvo asumiendo una velocidad angular proyectada de unos $34\,\mathrm{km\,s^{-1}\,kpc^{-1}}$ y un ángulo de inclinación del eje de rotación respecto al plano del cielo de 50° (véase la Secc. 6.1 y Gil de Paz et al. 1999a).

El escenario descrito en este apartado es similar al observado en otras galaxias enanas con formación estelar, aunque en nuestro caso a una escala mayor. Así, en el caso de la burbuja LMC4, perteneciente a la Gran Nube de Magallanes (LMC, del inglés *Large Magellanic Cloud*), se observan claramente dos arcos de cúmulos estelares jovenes situados sobre los bordes de la misma. En el centro de esta burbuja se localizan un conjunto de estrellas supergigantes y variables Cefeidas de aproximadamente 30 Ma de edad (Efremov y Elmegreen 1998). Un estudio similar para el caso de la burbuja DEM192, también perteneciente a la LMC, fue llevado a cabo por Oey y Smedley (1998). Los resultados descritos a lo largo de esta sección y las secciones precedentes aparecen también en Gil de Paz et al. (1998, 1999b, 2000b, 2000c)

7.2 Formación estelar en Mrk 86 hace 30 Ma

Bajo el escenario descrito anteriormente las propiedades de Mrk 86 hace aproximadamente 30 Ma serían muy similares a las que se observan en las galaxias compactas azules nucleadas (nE BCDs). Estas galaxias presentan un brote de formación estelar central muy masivo superpuesto a una componente evolucionada de bajo brillo superficial careciendo prácticamente de componente *plateau* (véase, e.g. Papaderos et al. 1996a y referencias allí citadas). A partir de las predicciones de nuestros modelos de síntesis evolutiva se deduce que la luminosidad predicha para la componente *starburst* hace 30 Ma en banda B sería al menos un factor 3 mayor, con lo que la magnitud absoluta de dicha componente, substraida de la emisión de la población subyacente, debería ser $M_B < -15$.

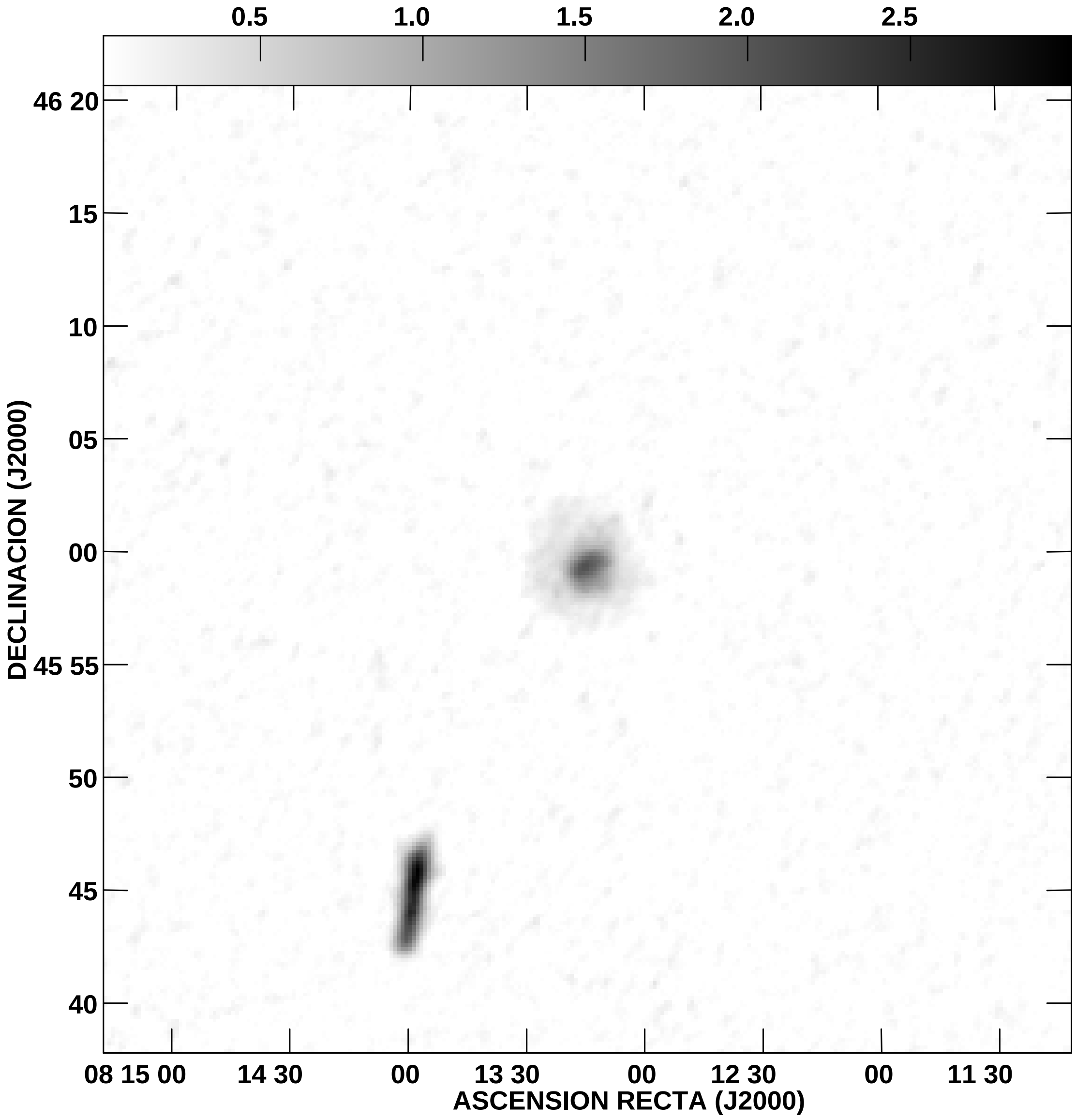
Es por tanto factible que exista una conexión evolutiva entre las galaxias compactas azules nE y las tipo iE como Mrk 86. Es necesario, sin embargo, extender este tipo de análisis detallado a un mayor número de galaxias compactas azules, tal y como se propone en el Capítulo 8 dentro del conjunto de proyectos futuros relacionados con este trabajo de tesis doctoral.

Por otro lado, el hecho de asumir que la formación estelar más reciente observada en Mrk 86 se debe a la evolución de una burbuja originada en la componente *starburst* sólo consigue que trasladar en el tiempo la cuestión acerca del mecanismo de regulación de la formación estelar en galaxias como Mrk 86. Por eso, a lo largo de esta sección, estudiaremos los principales mecanismos que podrían haber sido responsables de la activación de la formación estelar en la componente *starburst* de Mrk 86.

En primer lugar se analizó la posibilidad de que la formación estelar asociada a la componente *starburst* tuviera su origen en la evolución de un brote de formación estelar de edad intermedia. Sin embargo, a lo largo de este estudio no se han encontrado evidencias para una población estelar de edad intermedia con estas características, salvo quizás en el caso de la región #26.

Dicha región muestra un campo de velocidad peculiar, con un gradiente de velocidad bastante pronunciado y mucho mayor al observado en regiones limítrofes. Tal y como se comentó en el Capítulo 6, existen dos posibles explicaciones para este hecho. Por un lado, que este gradiente sea debido a la presencia de una zona de alta densidad dentro de la galaxia, y por otro, que pertenezca a un objeto independiente

Figura 7.3: Mapa de intensidad en la línea de 21 cm obtenido con el red de antenas VLA (configuración D) cortesía de E. Wilcots. El Norte en esta figura se sitúa arriba y el Este a la izquierda. La escala de grises varía entre 0.025 y 3 kJy m s^{-1} haz^{-1} (véase la barra situada sobre la figura), siendo el tamaño del haz a mitad de potencia de 46$''$ (HPBW, del inglés *Half Power Beam Width*). La galaxia de canto situada al sudeste de Mrk 86 es UGC 4278.



de masa muy pequeña que puede encontrarse en proceso de fusión con Mrk 86. Dicho proceso de fusión podría haber sido el responsable de la activación de la formación estelar en la componente *starburst* de Mrk 86 (véase Barnes y Hernquist 1992). Sin embargo, la distribución a gran escala del gas neutro en la galaxia (véase la Figura 7.3; cortesía de E. Wilcots) parece indicar que si dicho proceso de fusión tuvo realemente lugar debió ocurrir hace mucho tiempo, probablemente hace varios períodos orbitales.

Es conveniente, por tanto, estudiar otros posibles mecanismos capaces de explicar la activación de la formación estelar ocurrida hace aproximadamente 30 Ma en esta galaxia. Taylor et al. (1994) sugirieron que en la mayor parte de las galaxias compactas azules la causa responsable de la regulación de la formación estelar parece ser la interacción o aproximación entre dos galaxias distantes. A lo largo de los últimos años gran número de trabajos (Barnes y Hernquist 1992; Taylor et al. 1994; Mihos y Hernquist 1996) han puesto en evidencia que este tipo de encuentros distantes son capaces de producir la caída de grandes cantidades de gas neutro desde las regiones más externas de las galaxias hacia su centro. Este flujo de masa sería particularmente efectivo en el caso de Mrk 86, debido a su bajo contenido en materia oscura.

Dicha interación podría así mismo explicar el bajo contenido en materia oscura deducido para esta galaxia. Mediante el uso de modelos químico-dinámicos basados en la aproximación SPH (del inglés *Smoothed Particle Hydrodynamics*) Berczik y Kravchuk (1999) demostraron que una galaxia enana sometida al potencial de una galaxia tipo Vía Lactea es capaz de perder, debido a fuerzas de marea, gran parte de su contenido en materia oscura en un breve lapso de tiempo. El gas, sin embargo, debido a su naturaleza disipativa, permanecería asociado a la galaxia (véase Berczik 1999).

El primer objeto que podría estar perturbando mediante fuerzas marea el medio interestelar de Mrk 86 es NGC 2537A (α(2000)=$8^{\mathrm{h}}13^{\mathrm{m}}40\overset{\mathrm{s}}{.}9$; δ(2000)=$+45°59'41''$). Sin embargo, tanto los datos de espectroscopía óptica de Heyd & Wiyckoff (1992) como el mapa de hidrógeno neutro que se muestra en la Figura 7.3, en el que no se aprecia ningún objeto en dichas coordenadas, ponen de manifiesto que este objeto es claramente una galaxia de fondo, por lo que no podría ser responsable de la activación de la formación estelar en la componente *starburst*. Por tanto, el objeto que con mayor probabilidad podría estar interaccionando con Mrk 86 es la galaxia UGC 4278 (α(2000)=$8^{\mathrm{h}}13^{\mathrm{m}}58\overset{\mathrm{s}}{.}8$; δ(2000)=$+45°44'36''$). Este objeto es una galaxia espiral prácticamente de canto situada a una distancia proyectada de Mrk 86 de aproximadamente 43 kpc (véase la Figura 7.4). La velocidad heliocéntrica de recesión de esta galaxia es 553 $\mathrm{km\,s^{-1}}$ (Goad y Roberts 1981; véase también Schneider y Salpeter 1992). Tanto en el mapa de intensidad de la línea de 21 cm como en la imagen en banda R de Johnson mostrados en las Figuras 7.3 y 7.4 ponen en evidencia que, en caso de estarse produciendo efectivamente dicha interacción, la distancia entre las dos galaxias no debió ser mucho menor en el pasado, pues no existen signos de un encuentro cercano.

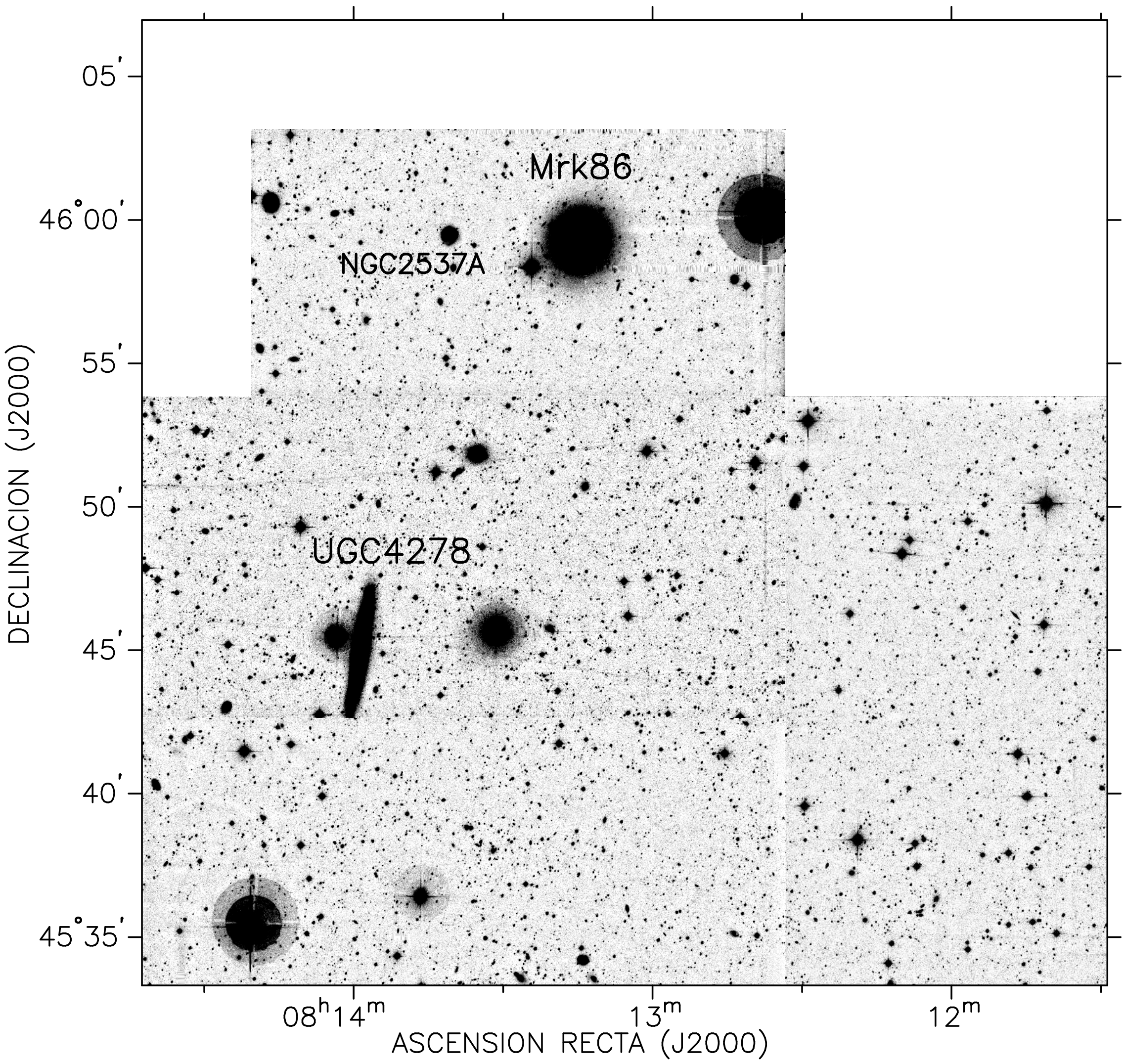
El siguiente paso debería ser estimar la cantidad de masa en gas que esta interacción sería capaz de hacer llegar hasta las regiones centrales de la galaxia, determinando así mismo la eficiencia requerida para que dicho gas diera lugar a la formación de hasta $1.5\times10^7\,\mathrm{M}_\odot$ de estrellas jóvenes. Sin embargo, la ausencia de estudios teóricos sobre interacción de galaxias enanas que modelicen además la formación de estrellas nos ha impedido obtener resultados más cuantitativos. El hecho de que este tipo de interacciones, tal y como sugieren Taylor et al. (1994), puedan ser las responsables de la formación estelar en la mayor parte de las galaxias compactas azules, es algo que ha de ser determinado mediante el estudio detallado de un gran número de sistemas y la correspondiente modelización de los mismos.

Sin embargo, a partir de la magnitud en la banda I y la anchura de la línea de 21 cm ($10^{2.220\pm0.019}\,\mathrm{km\,s^{-1}}$) de la galaxia UGC4278 y aplicando la calibración de la relación Tully-Fisher dada por Giovanelli et al. (1997) se deriva una velocidad peculiar para esta galaxia de $-253\,\mathrm{km\,s^{-1}}$. De este modo, la velocidad radial referida a la radiación de fondo de microondas será 968 $\mathrm{km\,s^{-1}}$ (R. Giovanelli, comunicación privada). Por tanto, la distancia que se deduce podría oscilar entre unos 13 Mpc (para h_{100}=0.75) y 20 Mpc (para h_{100}=0.5). Este valor es muy diferente del que Sharina et al. (1999) deducen para Mrk 86 (6.9 Mpc) a partir de la medida de las magnitudes de las tres estrellas azules más brillantes, con lo que no es posible asegurar que estas dos galaxias formen en efecto un sistema ligado o se encuentren en interacción.

7.3 Formación estelar en el pasado

A lo largo de este trabajo nos hemos centrado básicamente en el estudio de la historia de la formación estelar en Mrk 86 a corto y medio plazo. A continuación

Figura 7.4: Imagen en banda R de Johnson obtenida con la cámara de gran campo (WFC) del telescopio INT. En esta figura se han marcado las posiciones de las galaxias Mrk 86, NGC 2537A y UGC 4278. La escala de esta imagen es $0\farcs33\,\mathrm{pixel}^{-1}$.



analizaremos brevemente las principales conclusiones que se pueden extraer de este trabajo acerca de la historia de la formación estelar más a largo plazo. En particular nos centraremos en las propiedades deducidas para la población estelar subyacente de la galaxia y sus implicaciones respecto a la formación y evolución de las galaxias enanas.

Mori et al. (1997) propusieron que este tipo de galaxias enanas pudieron haberse formado a consecuencia de la evolución de una burbuja de gas en expansión, en modo similar a como hemos supuesto que se ha producido la propagación de la formación estelar más reciente en Mrk 86. Este mecanismo de formación habría dado lugar a importantes gradientes de metalicidad y consecuentemente también gradientes de color. No parece que dicho mecanismo de formación pudiera haber tenido lugar en este objeto, o no al menos en la forma en la que proponen Mori et al. (1997), a la vista de los gradientes de color deducidos para Mrk 86. Esta misma conclusión se puede extraer del trabajo de Papaderos et al. (1996b), en el cual se obtuvieron perfiles de color prácticamente planos en las regiones externas de una muestra de 12 galaxias BCDs. Así mismo, en el caso de las galaxias elípticas enanas o galaxias esferoidales los trabajos de Gorgas et al. (1997) y Martínez-Delgado (1999) han puesto que manifiesto que los gradientes de índices espectroscópicos o colores son muy pequeños o incluso negativos, pero en cualquier caso inferiores a los que deberían observarse si el modelo propuesto por Mori et al. (1997) fuera válido.

A partir de la forma de los perfiles de brillo superficial de la componente estelar subyacente en estas galaxias es posible establecer la apariencia de estos objetos en las largas etapas interbrote. Tal y como se dijo en el Capítulo 1, determinar de modo inequívoco la apariencia de estos objetos durante dichas etapas y la posibilidad de que las propiedades de los mismos en dicha fase fuera similar a la observada en otras variedades de galaxias enanas sería de vital importancia a la hora de determinar la evolución pasada y futura de estos objetos y del conjunto de galaxias enanas. En la Figura 1.3 se mostraron los parámetros de los perfiles de brillo superficial en banda B de diferentes galaxias enanas. Se representaron los resultados obtenidos por Binggeli y Cameron (1991) y Drinkwater y Hardy (1991) para una muestra para galaxias elípticas enanas, los resultados de Patterson y Thuan (1996) para una muestra de galaxias irregulares así como los resultados del trabajo de Papaderos et al. (1996a, 1996b). A la vista de la Figura 1.3 (véase también Papaderos et al. 1996b), la escala espacial deducida para el perfil de brillo superficial exponencial de esta componente es significativamente diferente de la obtenida para el resto de galaxias enanas. Esto mismo sucede en el caso del brillo superficial central extrapolado, $\mu_{\rm E,0}$, que es menor (más brillante) en el caso de las galaxias BCD que en el resto de las galaxias.

Papaderos et al. (1996b) sugirieron que esta diferencia en la distribución de la población estelar subyacente está probablemente asociada con la presencia de eventos de formación estelar muy masivos en las regiones centrales de estas galaxias. Así, estos autores propusieron que la formación estelar central podría producir una expansión adiabática de la distribución de masa estelar. Dicha redistribución de la población estelar subyacente daría lugar al suavizado de los perfiles de brillo superficial observados. Bajo este escenario una galaxia BCD podría cambiar sus propiedades estructurales lo suficiente como para evolucionar hacia una galaxia dI o dE. Por su parte, la caída de gas hacia las regiones centrales de las galaxias dI provocaría una evolución contraria a la descrita previamente, pronunciándose los perfiles de brillo superficial de la galaxia. Eventualmente además, dependiendo de la masa de gas acretada, esta galaxia podría albergar un episodio de intensa formación estelar, convirtiéndose así en una galaxia BCD tipo nE y de ahí en una galaxia compacta tipo iE.