Capítulo 6

La galaxia compacta azul Mrk 86: Cinemática

6.1 Campo de velocidad global

6.1.1 Espectroscopía de rendija

A lo largo de esta sección se analizará la cinemática del gas ionizado en Mrk 86 a partir de la medida de los desplazamientos Doppler de las principales líneas de emisión del gas observadas en los espectros de rendija (véase la Secc. 2.1.3). Con el fin de determinar los desplazamientos y las correspondientes velocidades radiales se empleó la tarea RVIDLINES de IRAF sobre cada uno los espectros de rendija obtenidos. En el caso de los espectros en el rango azul (b) se midieron las posiciones de las líneas [O II]λ3727, Hβ, [O III]λ4959, [O III]λ5007, y para los espectros en el rango rojo (r) las líneas [O III]λ5007, [N II]λ6548, Hα, [N II]λ6583, [S II]λ6717 y [S II]λ6731. Tras realizar este análisis, empleando separadamente líneas prohibidas y de recombinación y comprobarse que en ambos casos se obtenían resultados comparables, se utilizaron conjuntamente los dos grupos de líneas de emisión. El valor medio de la velocidad radial del gas en cada punto se obtuvo pesando las velocidades medidas para cada una de estas líneas con su intensidad relativa. El error en la velocidad radial se estimó como la desviación cuadrática media de las velocidades obtenidas en las diferentes líneas.

A partir de estas velocidades y las posiciones de las rendijas mostradas en la Figura 2.1 se reconstruyó el mapa en velocidad radial bidimensional mediante el uso de la tarea XYZTOIM de IRAF. Esta tarea permite obtener, a partir de una lista de posiciones y velocidades, una imagen interpolada del mapa de velocidad radial de la galaxia. En nuestro caso utilizamos una interpolación por polinomios de Chebyshev de segundo orden que incluyó términos cruzados. El análisis posterior de este mapa mostró un campo de velocidad radial característico de un sólido rígido con una velocidad angular central de Ω=34 km s^{-1} kpc^{-1} con ángulo de posición para el eje de rotación de AP$\simeq$78°.

En la Figura 6.1 (paneles **a**-**f**) se muestran los perfiles de velocidad radial obtenidos a lo largo de las rendijas situadas más próximas al ecuador galáctico (AP$\simeq$12°), estas son, #9R, #7R, #2b, #2r, #4b, #4r. Estos seis paneles han sido ordenados de modo que el panel **a** corresponde a la rendija situada más al Oeste y el panel **f** a la situada más al Este. La rendija #4b es la situada más cerca del centro galáctico, definido como el centro de las isofotas externas en banda R (véase la Secc. 2.3.1). El Norte en la dirección espacial de cada rendija se sitúa en el extremo izquierdo del correspondiente panel.

Los paneles **a** y **b** (rendijas #9R y #7R) muestran dos componentes de velocidad claramente diferenciadas, un gradiente muy pronunciado superpuesto a un gradiente del mismo signo pero más suave (véase también la Secc. 6.1.2). El gradiente más pronunciado parece estar asociado a las regiones #26 y #27, caracterizadas por una intensa luminosidad en banda K y alta actividad de formación estelar [EW(Hα)$\sim$100 Å]. El incremento en el gradiente de velocidad observado en estas regiones puede ser causado por un aumento en la densidad local de masa, debido, por ejemplo, a la presencia de la nube molecular densa donde estaría teniendo lugar la formación estelar observada en las regiones #26 y #27. Sin embargo, este tipo de perfil también podría estar causado por una galaxia de pequeña masa que se hubiera fusionado con Mrk 86 y que mostraría un campo de velocidad independiente. En particular, este mismo escenario fue propuesto para I Zw 18 (Skillman y Kennicutt 1993) y II Zw 40 (van Zee, Skillman y Salzer 1998). En este caso, la fusión podría ser responsable de la activación de la formación estelar en las regiones #26 y #27.

Figura 6.1: Perfiles de velocidad radial heliocéntrica comparados con los perfiles en luminosidad en banda K y anchura equivalente de Hα. **a)** Rendija #9R. **b)** Rendija #7R. **c)** Rendija #2b. **d)** Rendija #2r. **e)** Rendija #4b. **f)** Rendija #4r. En el caso de los paneles **e** y **f** se marcaron con símbolos especiales las posiciones correspondientes a la burbuja Mrk 86-B que se muestran en la Figura 6.14. Aquellos puntos representados con un círculo abierto indican que la velocidad se dedujo a partir de la posición de una única línea de emisión. El máximo en la anchura equivalente de Hα se ha tomado como referencia de distancias en el caso de los paneles **a**, **b**, **c** y **d**. En el primer caso este máximo se corresponde con la región #26 y en el resto con la región #27. Las distancias en el caso de los paneles **e** y **f** están referidas a la estrella de campo próxima. Los paneles inferiores de cada figura representan los residuos respecto al gradiente ajustado.

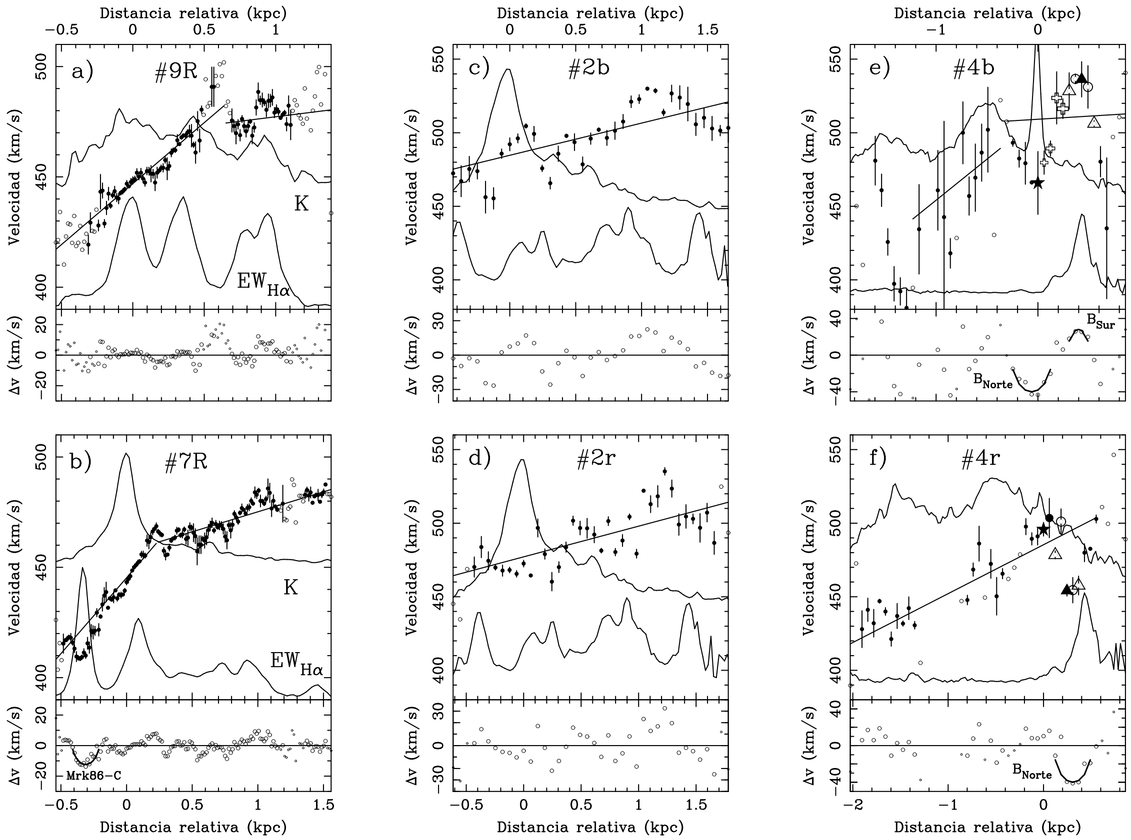


Tabla 6.1: Gradientes de velocidad ω_0 (medidos a lo largo de la posición de las rendijas) y ω (proyectados a lo largo del ecuador galáctico). Las distancias a lo largo del eje de rotación, d, se midieron respecto a la posición del centro de las isofotas externas en banda R. El valor central fue obtenido a partir del mapa de velocidad radial interpolado.

d (kpc)	ω_0 (km s^{-1} kpc^{-1}) Comp. pronunciada/plana	ω (km s^{-1} kpc^{-1}) Comp. pronunciada/plana	Rendija
1.03	55±4/8±3	56±5/8±3	#9R
0.85	69±5/18±2	70±5/19±2	#7R
0.73	21±4	21±4	#2r
0.73	22±5	22±5	#2b
0.00		34±5	
−0.12	33±4	33±4	#4r

Por otro lado, las componente plana observada en los espectros #9R y #7R, junto con los perfiles obtenidos a lo largo de las rendijas #2b, #2r y #4r, estarían relacionados con el campo de velocidad global de la galaxia. En la Tabla 6.1 se dan los valores medidos de los gradientes sobre las rendijas, ω_0, y los gradientes proyectados sobre el ecuador galáctico, ω, a partir del ángulo de posición deducido anteriormente para el mismo, $\omega_0{=}\omega\times\cos(\mathrm{AP}-12°)$. Aquellas regiones afectadas por movimientos locales del gas (véase la Secc. 6.2), no se incluyeron en el cálculo de los gradientes de velocidad. En la Tabla 6.1 se aprecia que la componente más suave del gradiente de velocidad radial crece de 10 km s^{-1} kpc^{-1} en las regiones más externas a aproximadamente 34 km s^{-1} kpc^{-1} cerca del ecuador galáctico. En la Secc. 6.1.4 compararemos este cambio en el gradiente de velocidad radial con el esperado en el caso de que el gas ionizado de esta galaxia estuviera distribuido en un disco plano.

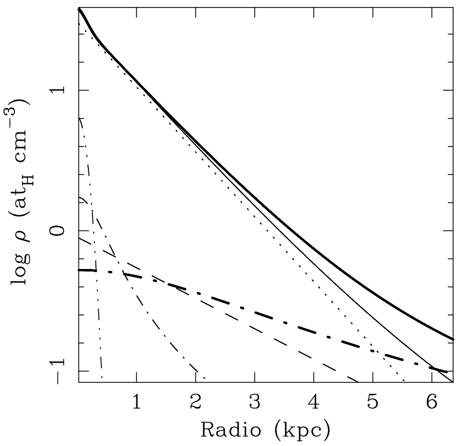
6.1.2 Observaciones Fabry-Pérot

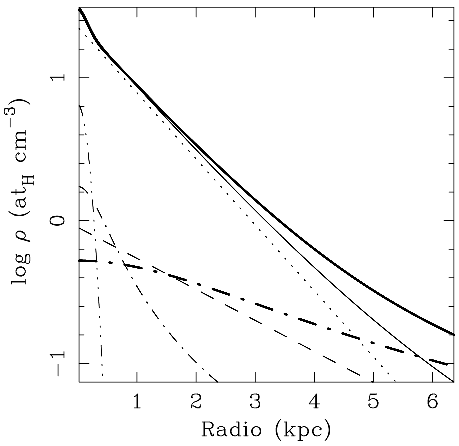
Los resultados descritos en la sección anterior son muy similares a los obtenidos a partir de la imagen Fabry-Pérot de la galaxia. Siguiendo el procedimiento descrito en la Secc. 2.2.4 se obtuvieron los mapas de velocidad radial, dispersión de velocidades, intensidad de línea y de continuo, con sus correspondientes errores (véase la Figura 2.9). El mapa de velocidad radial obtenido indica de nuevo claramente que esta galaxia posee en sus regiones centrales un campo de velocidad propio de un sólido rígido con una velocidad angular central aproximada de 34 km s^{-1} kpc. El ángulo de posición obtenido para el ecuador galáctico (5-10°) es, sin embargo, ligeramente menor al obtenido a partir de las observaciones de espectroscopía de rendija.

A fin de obtener información cuantitativa tanto de este mapa de velocidad radial como de los gradientes de velocidad medidos en la Secc. 6.1.1 se procedió a modelizar la distribución de masa de la galaxia.

6.1.3 Perfil de densidad de masa de la galaxia

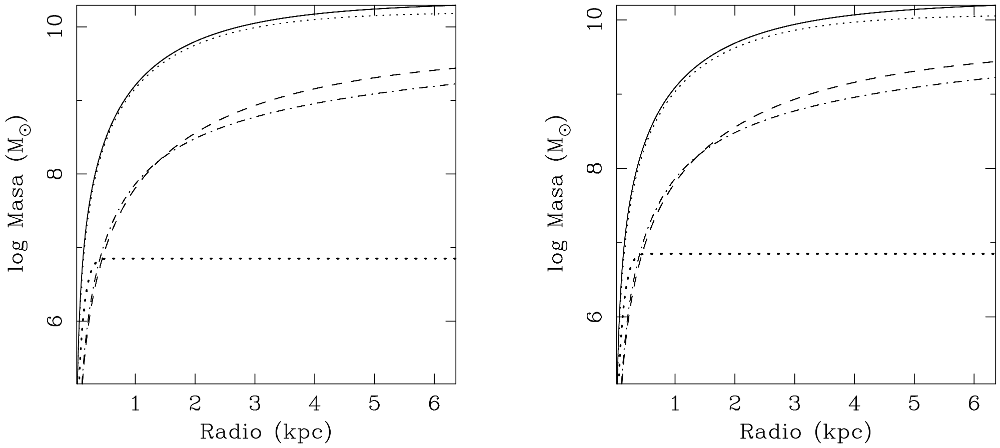
Figura 6.2: Perfiles de densidad de masa para el caso de $A_{B,\mathrm{interna}}$=0.0$^{\mathrm{m}}$ (*izquierda*) y $A_{B,\mathrm{interna}}$=0.0$^{\mathrm{m}}$ (*derecha*). Se han representado el perfil de masa total (*línea continua*), la contribución de la masa estelar asociada a la componente subyacente (*línea punteada*), al *starburst* (*3 puntos-raya*), el gas (*línea discontinua*; incluyendo hidrógeno y helio neutro) y materia oscura (*punto-raya*). En el caso de la materia oscura y la masa total se han mostrado las predicciones para una escala espacial, R_{DM}, de 0.5 kpc (*línea delgada*) y 3 kpc (*línea gruesa*).





En primer lugar se consideró que la masa total de la galaxia está constituida por cuatro componentes básicas, **la masa estelar**, **el gas neutro**, **el gas molecular** y **la materia oscura**. A continuación estudiaremos por separado cada una de estas componentes. En las Figuras 6.2 y 6.3 se muestran, respectivamente, los perfiles de densidad de masa y masa integrada correspondiente a cada una de estas componentes.

Figura 6.3: Masa integrada para el caso de $A_{B,\mathrm{interna}}$=0.0$^{\mathrm{m}}$ (*izquierda*) y $A_{B,\mathrm{interna}}$=0.20$^{\mathrm{m}}$ (*derecha*) y escala espacial del perfil de materia oscura R_{DM}=1 kpc. El significado de las líneas es el mismo que en la Figura 6.2.



Componente estelar

Del análisis de los perfiles de brillo superficial en bandas B y R de un total de 12 galaxias BCD, entre ellas Mrk 86, Papaderos et al. (1996a) encontraron que estos perfiles podían ser ajustados mediante tres componentes distintas, subyacente, *plateau* y *starburst*. Usando un procedimiento numérico de desproyección estos autores obtuvieron las densidades de luminosidad central y las escalas espaciales para cada una de estas componentes. Dichas componentes, tal y como se puso de manifiesto en el Capítulo 5, están relacionadas con tres poblaciones estelares distintas. En este apartado analizaremos únicamente la población subyacente y la componente *starburst* puesto que la contribución a la masa total de la galaxia de la componente *plateau* –formada por regiones de edad menor que 10 Ma– se puede considerar despreciable.

Siguiendo los resultados de Papaderos et al. (1996a) podemos asumir que las componentes subyacente y *starburst* poseen, respectivamente, perfiles de masa de tipo exponencial y gausiano, de modo que

$$\rho_{\mathrm{E}}(r) = \rho_{\mathrm{E},0} \exp\left(-r/R_{\mathrm{E}}\right) \tag{6.1}$$

$$\rho_{\mathrm{S}}(r) = \rho_{\mathrm{S},0} \exp\left(-r/R_{\mathrm{S}}\right)^2 \tag{6.2}$$

donde R_{E}=1.0 kpc y R_{S}=0.2 kpc (véase el Capítulo 5). El valor de la constante γ

corresponde al radio a 1 e-*folding* de la componente *starburst* dado en la Tabla 2.6.

Haciendo uso de las luminosidades centrales medidas por Papaderos et al. (1996a) para la componente exponencial y el *starburst*,

$$l_{\mathrm{E},0} = 0.28 L_{\odot,B}\,\mathrm{pc}^{-3} \qquad (\mathrm{para}\ \ \mathrm{d} = 7.0\,\mathrm{kpc}) \tag{6.3}$$
$$l_{\mathrm{S},0} = 2.27 L_{\odot,B}\,\mathrm{pc}^{-3} \qquad (\mathrm{para}\ \ \mathrm{d} = 7.0\,\mathrm{kpc}) \tag{6.4}$$

y teniendo en cuenta que la distancia adoptada por Papaderos et al. (1996a) fue de 7.0 Mpc, frente a los 8.9 kpc utilizados en este trabajo, obtenemos

$$l_{\mathrm{E},0} = 0.22 L_{\odot,B}\,\mathrm{pc}^{-3} \qquad (\mathrm{para}\ \ \mathrm{d} = 8.9\,\mathrm{kpc}) \tag{6.5}$$
$$l_{\mathrm{S},0} = 1.79 L_{\odot,B}\,\mathrm{pc}^{-3} \qquad (\mathrm{para}\ \ \mathrm{d} = 8.9\,\mathrm{kpc}) \tag{6.6}$$

Puesto que no conocemos la extinción del continuo estelar en el caso de la componente subyacente, al igual que se hizo en la Secc. 5.1, se estudiaron por separado los casos de $A_{\mathrm{interna},B}$=0.0$^{\mathrm{m}}$ y 0.20$^{\mathrm{m}}$. De este modo, a partir de estos valores y las correspondientes relaciones masa-luminosidad (véase la Secc. 5.1.2), se dedujo

$$\rho_{\mathrm{E},0} = 22.70\,\mathrm{at_H}\,\mathrm{cm}^{-3} \qquad (\mathrm{para}\ \ A_{\mathrm{interna},B} = 0.20^{\mathrm{m}}) \tag{6.7}$$
$$\rho_{\mathrm{E},0} = 30.58\,\mathrm{at_H}\,\mathrm{cm}^{-3} \qquad (\mathrm{para}\ \ A_{\mathrm{interna},B} = 0.00^{\mathrm{m}}) \tag{6.8}$$
$$\rho_{\mathrm{S},0} = 6.45\,\mathrm{at_H}\,\mathrm{cm}^{-3} \qquad (\mathrm{para}\ \ A_{\mathrm{interna},B} = 0.07^{\mathrm{m}}) \tag{6.9}$$

Hidrógeno neutro

De acuerdo a los resultados de la exploración WHISP[1] se asumió que la distribución del hidrógeno neutro en Mrk 86 sigue un perfil exponencial. De este modo, utilizando el procedimiento de desproyección desarrollado por Papaderos et al. (1996a) para el óptico

$$\rho_{\mathrm{HI}}(r) = \rho_{\mathrm{HI},0} \exp\left(-r/R_{\mathrm{HI}}\right) \tag{6.10}$$

donde $\rho_{\mathrm{HI},0} \simeq 0.7\,\mathrm{at_H}\,\mathrm{cm}^{-3}$ y $R_{\mathrm{HI}} \simeq 2.0$ kpc. Este procedimiento de desproyección presupone que el medio es ópticamente transparente, lo que se cumple con toda seguridad en el caso de la emisión en la línea de 21 cm. Finalmente, a fin de tener en cuenta la contribución del Helio neutro asumimos M_{gas}=$M_{\mathrm{HI+HeI}}$=1.34×M_{HI}.

[1] `http://www.thales.astro.rug.nl/~whisp/Database/`

Hidrógeno molecular

Sage et al. (1992) obtuvieron un cociente M(H_2)/M(HI) para Mrk 86 de 0.03. Por lo tanto, podemos asumir que el efecto de la componente de gas molecular en el potencial de la galaxia es despreciable.

Materia oscura

Finalmente, se consideró el efecto de la materia oscura sobre el campo de velocidad global. Siguiendo los trabajos observacionales más recientes (Salucci y Persic 1997; Flores y Primack 1994; Moore 1994), asumimos que el perfil de materia oscura de la galaxia poseía una región central de densidad aproximadamente constante denominada *core*. El trabajo teórico de Navarro, Eke y Frenk (1996) sugiere que la formación de este *core* pudo ser debida al efecto de los vientos de supernova sobre los perfiles de materia oscura fría (CDM, del inglés *Cold Dark Matter*).

Tanto el perfil de densidad de esfera isoterma modificado (véase, e.g. Binney y Tremain 1987) como el perfil empírico definido por Burkert (1995) incluyen dicho *core* y reproducen razonablemente bien las observaciones. En nuestro trabajo utilizamos el primero de estos perfiles

$$\rho_{\rm DM}(r) = \frac{\rho_{\rm DM,0}}{1+(r/R_{\rm DM})^2}. \tag{6.11}$$

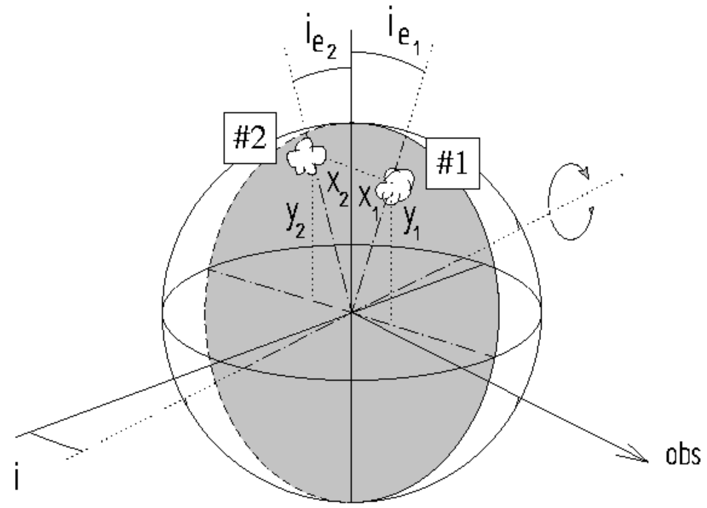
Así mismo, Burkert (1995; véase también MacLow y Ferrara 1999) demostró que la densidad central $\rho_{\rm DM,0}$ de este perfil está relacionada con la escala $R_{\rm DM}$ según la expresión

$$\rho_{\rm DM,0} = 2.7\times10^7 \left(\frac{R_{\rm DM}}{\rm kpc}\right)^{-2/3} \quad M_\odot\,{\rm kpc}^{-3}, \tag{6.12}$$

por lo que este perfil posee un único parámetro libre. En la Figura 6.2 se muestran los perfiles de masa para dos valores extremos de la escala del perfil de materia oscura, $R_{\rm DM}$=0.5 y 3 kpc.

Los perfiles de densidad de masa mostrados en la Figura 6.2 evidencian que tanto para $R_{\rm DM}$=0.5 kpc como para 3 kpc el perfil de masa está dominado por la población estelar subyacente hasta distancias de aproximadamente 4 kpc. Por su parte, en la Figura 6.3 se aprecia que la masa integrada de la galaxia viene dominada por la componente estelar incluso para distancias de 6 kpc. Esta última afirmación,

Figura 6.4: Ángulos de posición i e i_e y coordenadas x e y de dos regiones H II situadas en el ecuador de la galaxia (#1 y #2). El plano relleno en color gris representa la posición del ecuador galáctico.



sin embargo, presupone que la componente estelar presenta la misma distribución espacial hasta distancias tan alejadas.

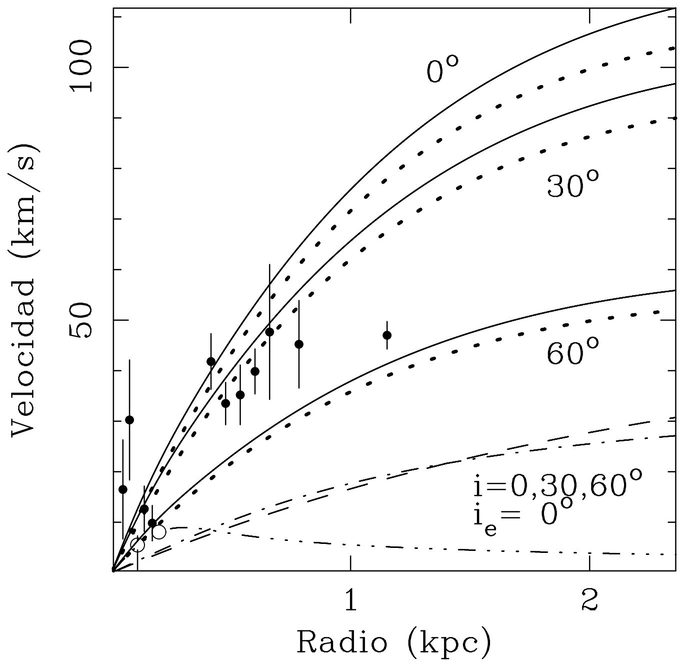
Curva de velocidad radial

La obtención del perfil de masa de la galaxia nos permitió derivar la curva de velocidad circular de la galaxia, y asumiendo diferentes distribuciones para el gas ionizado, la correspondiente curva de velocidad radial. Finalmente, esta curva de velocidad radial se comparó con el perfil de velocidad medido a lo largo de la rendija #4r, situada muy próxima ($\sim 3''$) y a lo largo del ecuador galáctico.

Para poder llevar a cabo dicha comparación fue necesario suponer que el movimiento del gas ionizado asociado a las regiones H II de esta galaxia está soportado por rotación y que el centro dinámico de la galaxia coincidía con el centro fotométrico, definido como el centro de las isofotas externas medidas en la imagen R.

Puesto que la emisión del gas ionizado se produce en regiones H II individuales, la componente proyectada de la velocidad circular dependerá de la posición de la región H II correspondiente, es decir, de la distribución del gas ionizado en la galaxia.

Figura 6.5: Curva de velocidad radial para una densidad central de la componente subyacente de $\rho_{\mathrm{E},0}$=25 at$_{\mathrm{H}}$ cm^{-3} y una escala para la componente de materia oscura de R_{DM}=1 kpc. El significado de las líneas es el mismo que en la Figura 6.2. Se han representado las predicciones para diferentes inclinaciones del disco de gas ionizado. Las velocidades radiales representadas corresponden a aquellas medidas a lo largo de la rendija #4r.

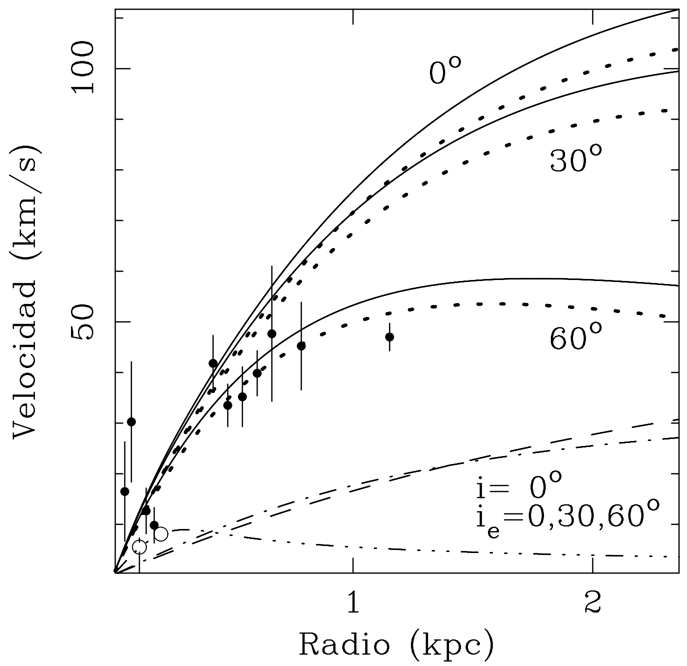


Se asumió, primeramente, que el gas ionizado esta distribuido en un disco delgado de inclinación i. Este ángulo mide la inclinación del eje de rotación respecto al plano del cielo (i.e. i=0° para un disco de canto). En la Figura 6.5 se muestra la curva de velocidad radial para diferentes inclinaciones, i=30, 45, 60°.

En la Figura 6.4 se han definido los ángulos i, i_{e}, y las coordenadas x e y que describen la posición de una determinada región H II en la galaxia. Bajo la hipótesis de disco delgado, si $i\neq 0°$ únicamente aquellas regiones con $i_{\mathrm{e}}\simeq 0°$ podrían observarse a lo largo e la rendija #4r.

Sin embargo, si la galaxia tuviera una inclinación i=0°, regiones H II con diferente ángulo i_{e} podrían haber sido observadas a través de esta rendija. En esta situación podrían observarse regiones con diferente velocidad radial en la misma posición aparente (regiones #1 y #2 en la Figura 6.4). Por ejemplo, si consideramos el

Figura 6.6: Curva de velocidad radial para una densidad central de la componente subyacente de $\rho_{\mathrm{E},0}$=25 at$_{\mathrm{H}}$ cm^{-3} y una escala para la componente de materia oscura de R_{DM}=1 kpc. El significado de las líneas es el mismo que en la Figura 6.2. Se han representado las predicciones para diferentes ángulos i_{e}. Las velocidades radiales representadas corresponden a aquellas medidas a lo largo de la rendija #4r.

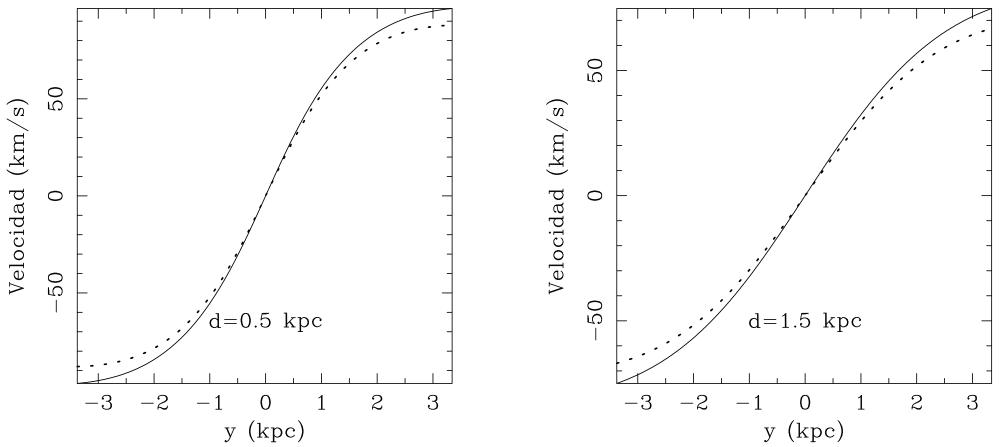


perfil de densidad de masa descrito en la Secc. 6.1.3 (para R_{DM}=1 kpc), se podrían medir diferencias en la velocidad radial de 15 km s^{-1} entre dos regiones situadas en x=0 y x=3 kpc para y=2.5 kpc. Por lo tanto, la existencia de inhomogeneidades en la distribución del gas ionizado de un disco grueso podría dar lugar a variaciones de pequeña escala en el campo de velocidad radial.

Las regiones emisoras pueden, en principio, tener cualquier ángulo $|i_{\mathrm{e}}| \leq 180°$. De hecho, una región con un valor determinado de i_{e}, evolucionará en el futuro hacia valores cada vez mayores de i_{e}. Suponiendo, formalmente, que todas las regiones H II se encuentran sobre planos de i_{e} constante, se obtienen las curvas de velocidad radial mostradas en la Figura 6.6.

Tal y como se indicó anteriormente la componente de masa estelar domina el perfil de densidad de masa total hasta distancias de $\sim$4 kpc. Sin embargo, la curva de velocidad radial medida lo largo de la rendija #4r puede ajustarse suponiendo diferentes distribuciones para el gas ionizado. En particular, podrían reproducirse las velocidades medidas si i=0° e 30°< i_{e} <70°, o si $i\simeq$40° e i_{e}=0°.

Figura 6.7: Perfil de velocidad radial medido perpendicularmente al eje de rotación a una distancia de 0.5 kpc (*izquierda*) y 1.5 kpc (*derecha*) para $\rho_{\mathrm{E},0}$=25 at$_{\mathrm{H}}$ cm^{-3} y R_{DM}=1 kpc. El significado de las líneas es el mismo que en la Figura 6.2. Se ha representado únicamente el perfil de velocidad debido a la masa total y la contribución de la población estelar subyacente.



6.1.4 Distribución espacial del gas ionizado

Por otro lado, la manera en que el gradiente de velocidad, o velocidad angular ω, disminuye perpendicularmente con la distancia al ecuador recuerda a los campos de velocidad radial observados en galaxias espirales con ángulo de inclinación intermedio (véase, e.g. Giovanelli y Haynes 1988). Utilizando el perfil de masa descrito en la Secc. 6.1.3 y asumiendo que la emisión proviene de un disco delgado con ángulo de inclinación i, se estimaron los gradientes de velocidad radial esperados para diferentes distancias, d, a lo largo del eje de rotación (véase la Tabla 6.1). En la Figura 6.7 se muestran los perfiles de velocidad radial predichos a distancias de 0.5 y 1.5 kpc del centro de la galaxia medidas a lo largo del eje de rotación. Por su parte, en la Figura 6.8 se comparan los gradientes medidos en la diferentes rendijas con las predicciones para el cambio en la velocidad radial en los 2 kpc centrales a ambos lados del eje de rotación. De esta figura se deduce que aunque las suposiciones realizadas reproducen en parte la disminución en la velocidad angular, aparentemente no son capaces de predecir de manera precisa los valores medidos. Una posible explicación es que el gas está realmente distribuido en un disco grueso. Por otro lado, el uso de un perfil de masa con una escala espacial menor para la componente estelar, e.g. R_{E}=0.5 kpc, es también capaz de reproducir el comportamiento observado.

Así mismo, a partir de las predicciones para el perfil de masa descrito en la Secc. 6.1.3, se reprodujo el campo de velocidad radial de la galaxia. En las Figuras 6.10-6.12 se muestran las predicciones para dicho campo en el caso de un disco delgado con diferentes inclinaciones (i=30, 45 y 60°). En estas figuras se muestran además los residuos obtenidos tras substraer al mapa Fabry-Pérot de velocidad radial (véase la Figura 6.9) las predicciones de los diferentes modelos de masa y distribuciones espaciales del gas ionizado. Los residuos obtenidos, menores en valor absoluto de 20-30 km s^{-1}, ponen de manifiesto que el gas ionizado está efectivamente distribuido en un disco inclinado aproximadamente 40° (i=50°) y que la componente estelar domina el perfil de densidad de masa total dentro de la extensión óptica de la galaxia.

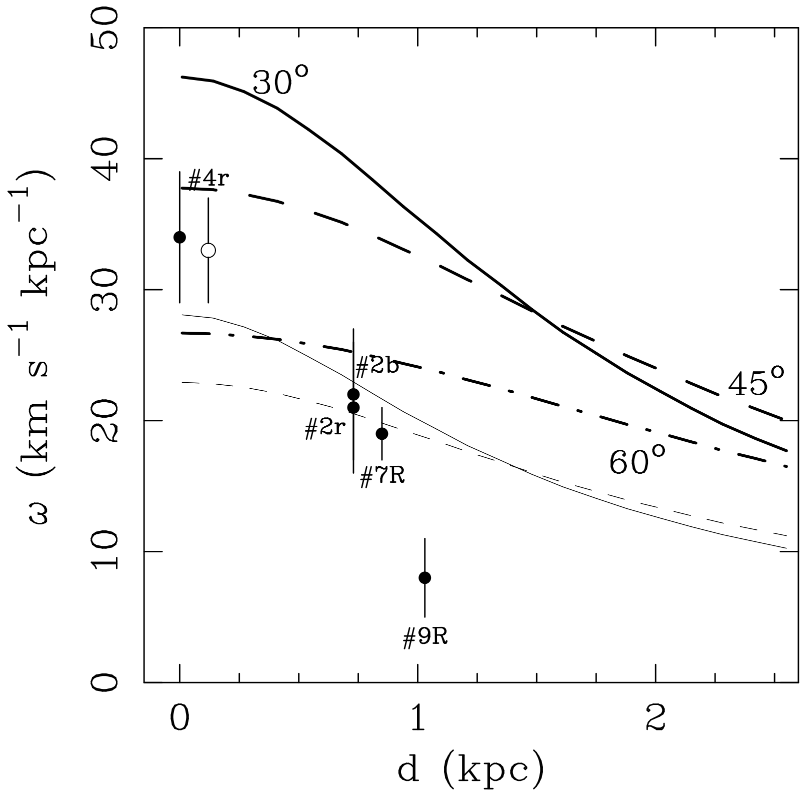
Este mapa de residuos en la velocidad radial muestra además dos regiones donde claramente el modelo no es capaz de reproducir la velocidad observada. Estas regiones corresponden a los nodos de formación estelar #8 y #70. En estas regiones las diferencias observadas respecto al campo de velocidad global son debidas, como veremos a continuación, a movimientos peculiares del gas asociados a burbujas de gas en expansión (véase la Secc. 6.2).

6.2 Burbujas de gas en expansión

En los perfiles de velocidad radial obtenidos se observaron diferentes regiones en las que el gas presentaba velocidades peculiares respecto al campo de velocidad global de la galaxia. La escala espacial de estos movimientos peculiares es del orden de varios cientos de parsec.

Este tipo de estructuras han sido observadas en el pasado en gran número de galaxias enanas (véase, e.g. Tomita et al. 1997, Petrosian et al. 1997). En dichos trabajos se han sugerido diferentes mecanismos capaces de explicar dichas perturbaciones en el campo de velocidad global, caída de regiones H II hacia el disco de la galaxia (Saitō et al. 1992), vientos colectivos de explosiones de supernova o

Figura 6.8: Cambio en el gradiente de velocidad radial con la distancia a lo largo del eje de rotación. Los datos para esta figura han sido tomados de la Tabla 6.1. Las *líneas gruesas* representan las predicciones para un perfil de densidad con $R_{\rm E}$=1 kpc e inclinaciones i=30° (*línea continua*), 45° (*línea discontinua*) y 60° (*punto-raya*). Por su parte, las *líneas delgadas* corresponden a un perfil de masa con $R_{\rm E}$=0.5 kpc e inclinación i=30° (*línea continua*) y 45° (*línea discontinua*).



inhomogeneidades en la distribución de gas ionizado (véase la Secc. 6.1).

En nuestro caso el perfil de velocidad de estas estructuras, con mínimos y máximos pronunciados (véase las Figuras 6.1b,e,f y 6.16) y perfil de velocidad de la forma $v \propto \sqrt{1-x^2}$, delata la presencia de vientos colectivos de supernova. En este mismo sentido apunta el hecho de que dichas estructuras se localicen en regiones de elevada fuerza de brote (véase la Secc. 5.2.4).

Figura 6.9: Mapa de velocidad radial Fabry-Pérot. Las coordenadas están referidas al centro de las isofotas externas en banda R de Johnson.

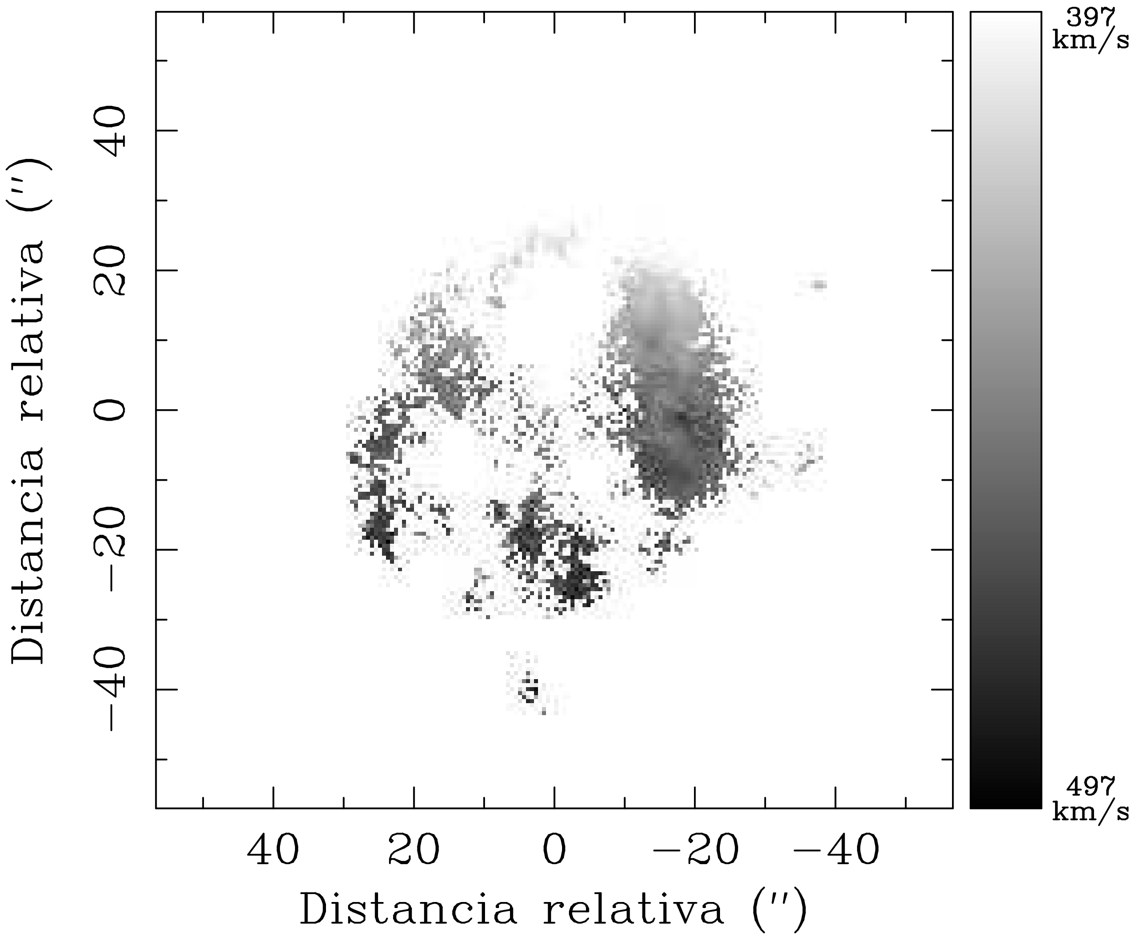
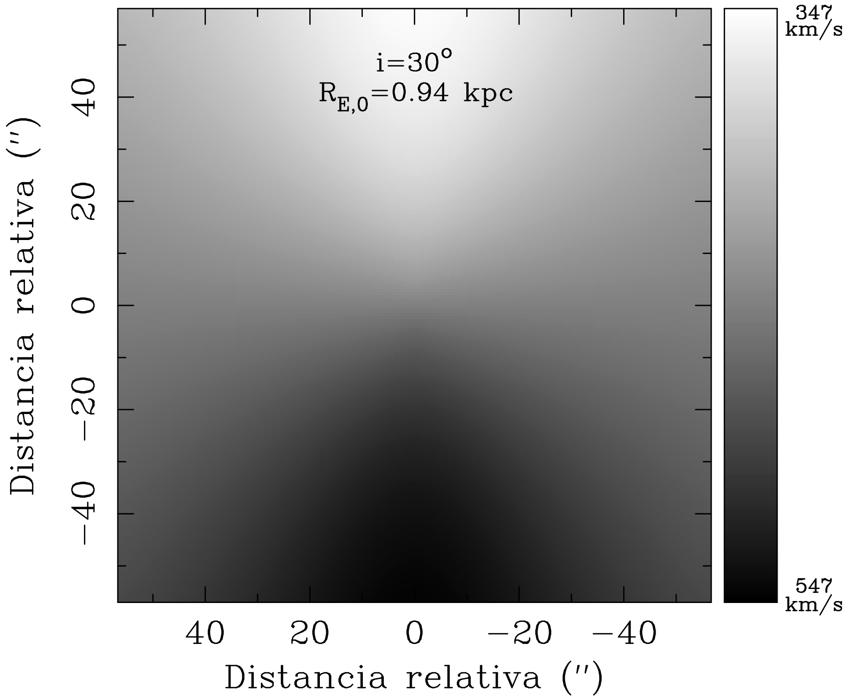


Figura 6.10: Mapa de velocidad radial predicho para i=30° (*superior*) y mapa de residuos (*inferior*) obtenido tras substraer a este mapa el mapa de velocidad radial mostrado en la Figura 6.9. Las coordenadas están referidas al centro de las isofotas externas en banda R de Johnson.



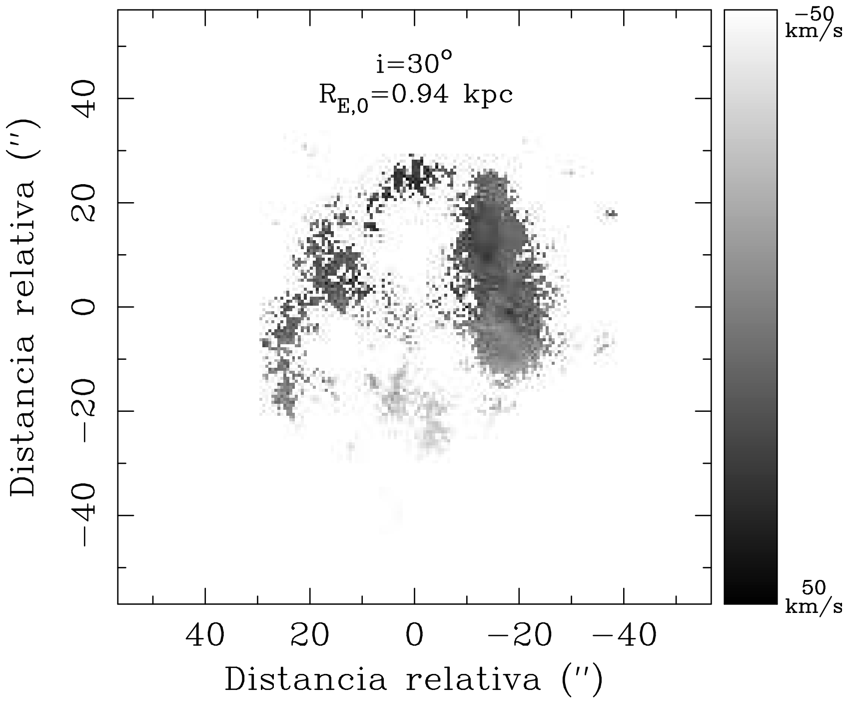


Figura 6.11: Mapa de velocidad radial predicho para i=45° (*superior*) y mapa de residuos (*inferior*) obtenido tras substraer a este mapa el mapa de velocidad radial mostrado en la Figura 6.9. Las coordenadas están referidas al centro de las isofotas externas en banda R de Johnson.

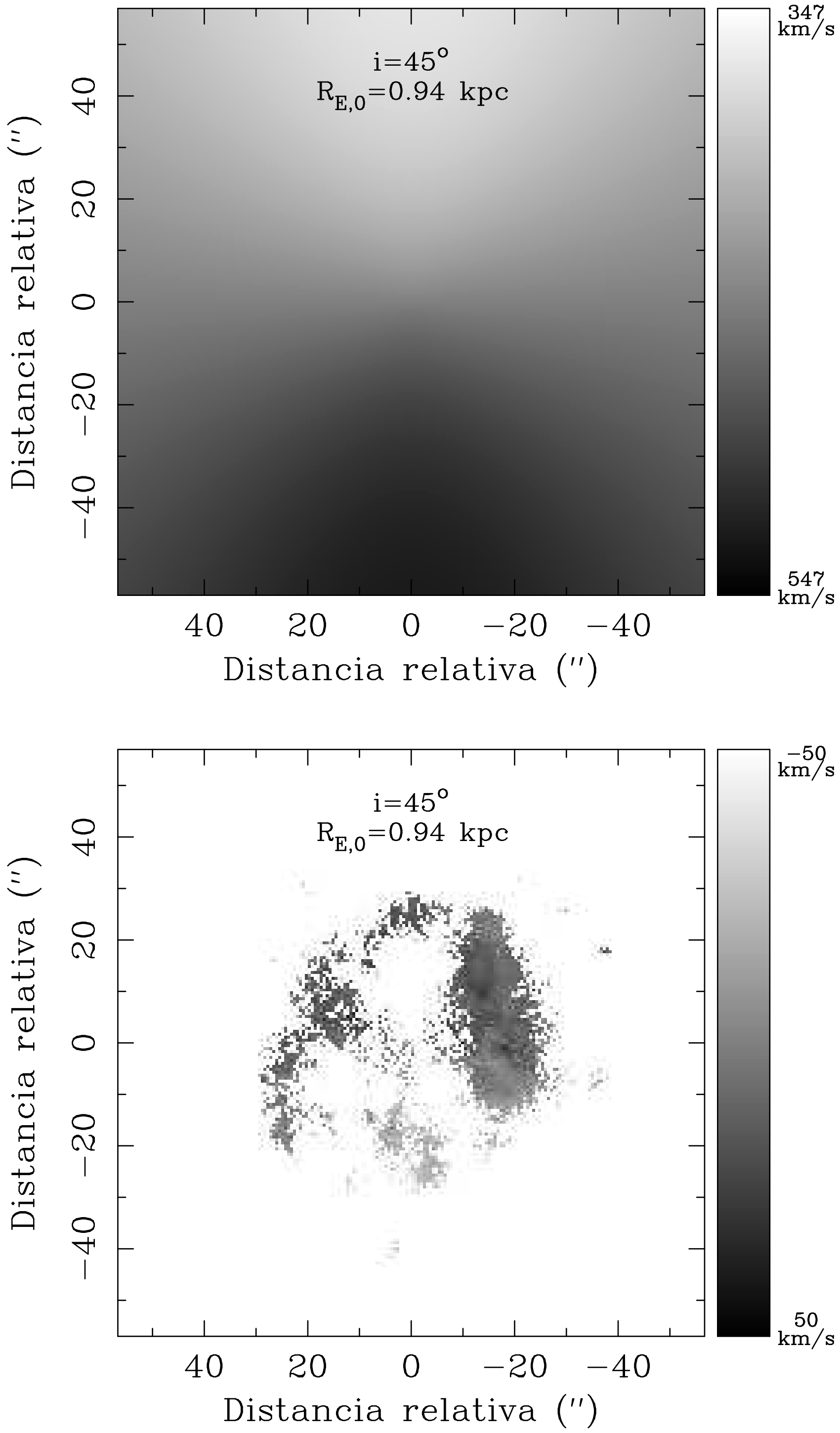


Figura 6.12: Mapa de velocidad radial predicho para i=60° (*superior*) y mapa de residuos (*inferior*) obtenido tras substraer a este mapa el mapa de velocidad radial mostrado en la Figura 6.9. Las coordenadas están referidas al centro de las isofotas externas en banda R de Johnson.

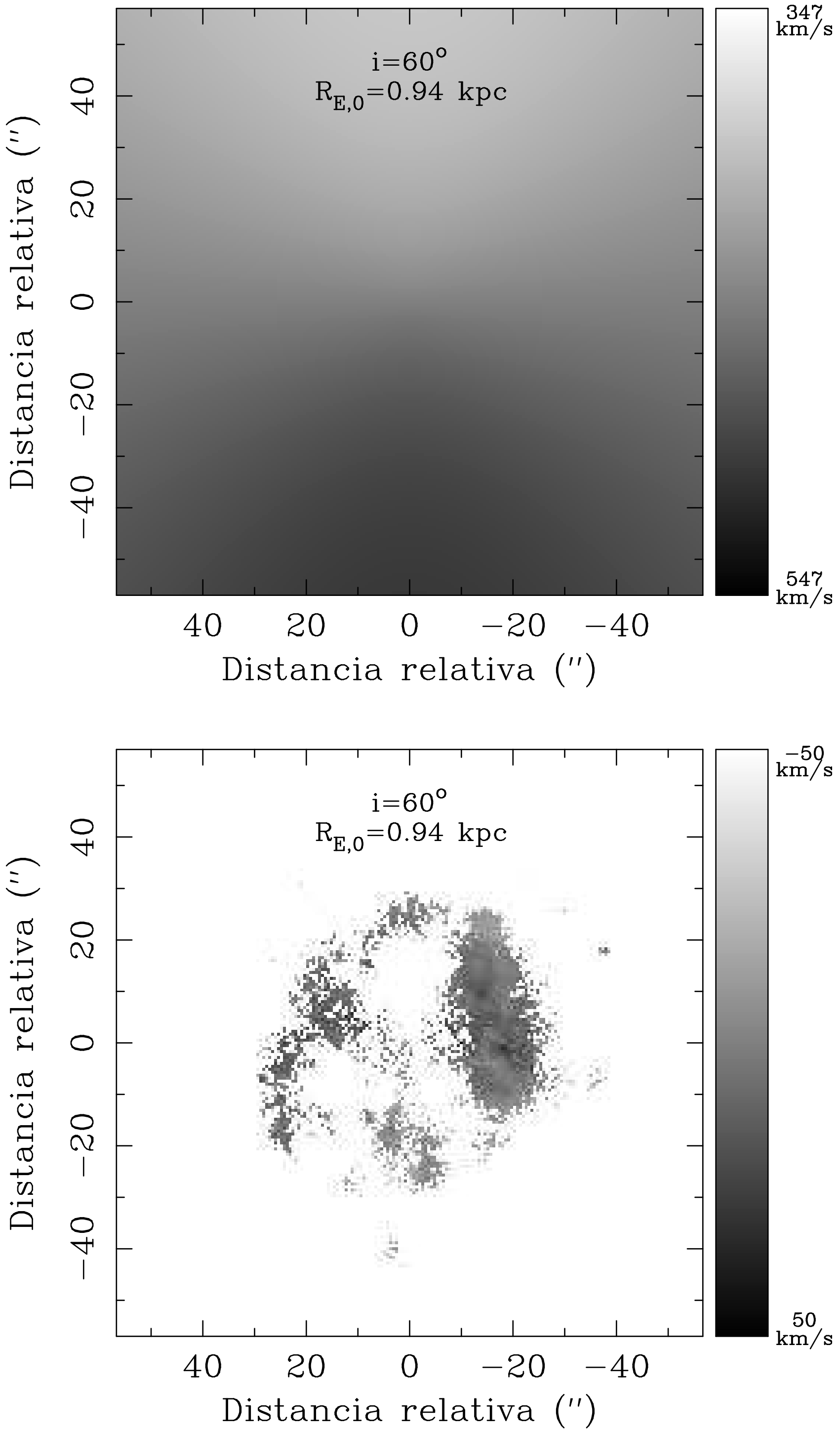
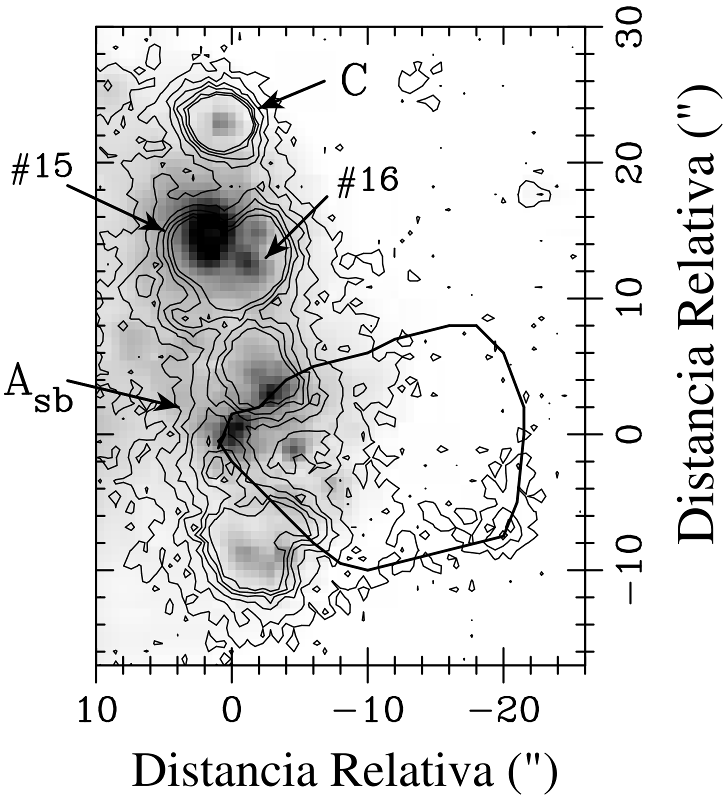


Figura 6.13: Región correspondiente a la burbuja Mrk 86-A en banda B (*escala de grises*) y en Hα (*contornos*). Los límites mostrados corresponden a los dados en el trabajo de Martin (1998) para esta misma burbuja.



6.2.1 Mrk 86-A

Usando espectroscopía *echelle* en la línea Hα con una resolución espectral aproximada de $11\,\mathrm{km\,s^{-1}}$ (FWHM), Martin (1998) dedujo la presencia de una burbuja, denominada Mrk 86-A ($A_{\rm big}$), que se extiende $22''$(940 pc) hacia el oeste de la galaxia. Los parámetros físicos de esta burbuja se indican en la Tabla 6.2 (véase también la Figura 6.13). De acuerdo con los resultados de Martin (1998), consideraremos la región de formación estelar #42 como precursora de la burbuja Mrk 86-A.

Los valores obtenidos para la fuerza de brote y la masa estelar de esta región se muestran en la Tabla 5.2. Estos valores, al igual que en el caso de las regiones #70 y #18, son significativamente diferentes a aquellos dados por Gil de Paz et al. (1999a), debido principalmente (1) al uso de diferente conjunto de modelos (Bruzual y Charlot 1996 vs. Leitherer y Heckman 1995), (2) la peor discretización en fuerza de brote de los modelos utilizados por Gil de Paz et al. (1999a; 1 dex en b) frente a los utilizados en este trabajo (0.04 dex en b), (3) la diferente función inicial de masa y (4) las diferentes aperturas utilizadas. En el caso de la masa estelar se une a esto el hecho de que las masas estelares dadas en Gil de Paz et al. (1999a) no están corregidas de apertura.

Finalmente, a partir de la velocidad de expansión y el radio de esta burbuja se dedujo su edad dinámica (asumiendo el modelo de expansión adiabática de Castor, Weaver y McCray 1975) mediante la expresión

$$t_{\rm dinamico} = 0.6 \times r_{\rm burbuja}/v_{\rm exp} \tag{6.13}$$

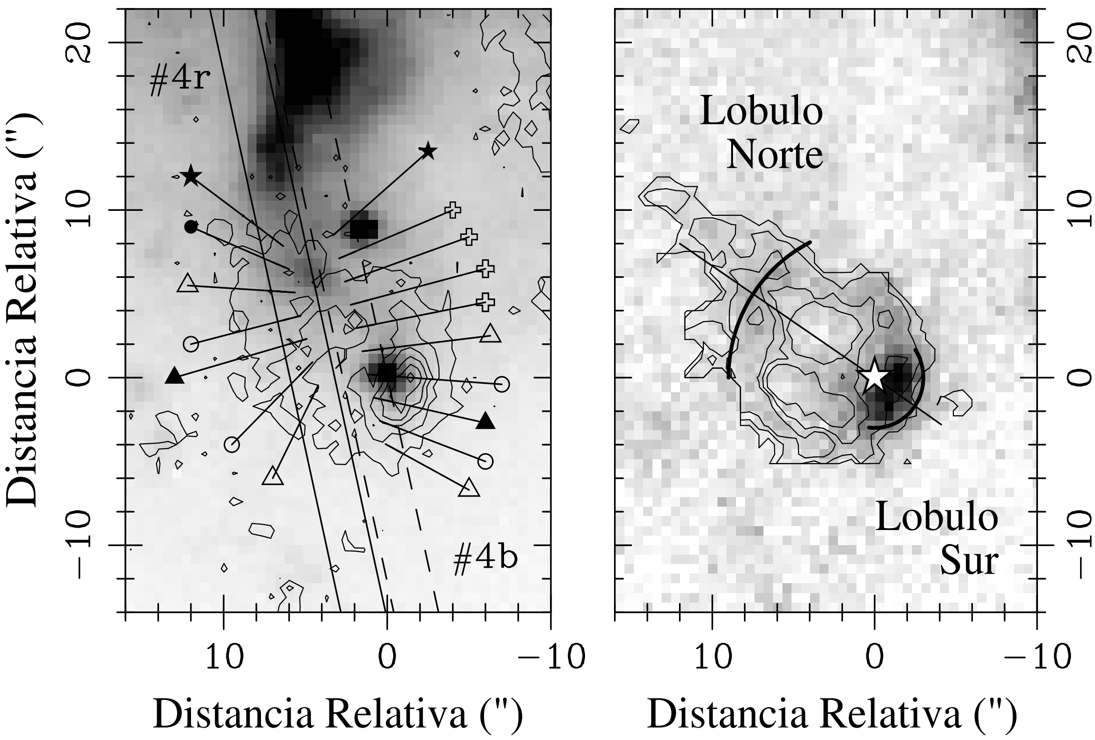
siendo $r_{\rm burbuja}$ y $v_{\rm exp}$, respectivamente, el radio de la burbuja y su velocidad de expansión.

6.2.2 Mrk 86-B

A lo largo del perfil de velocidad radial de la rendija #4b se observó la presencia de un mínimo y máximo locales (véase la Figura 6.1e). La diferencia entre ambos es de 68 km s^{-1} en velocidad (i.e. $\overline{v_{\rm exp}}$=34 km s^{-1}) y 10$''$ (430 pc) en distancia proyectada. El mínimo de velocidad se observa también en el perfil de velocidad radial de la rendija #4r. Asociada a estas peculiaridades cinemáticas se aprecia en la imagen Hα una clara estructura en forma de burbuja (véase la Figura 6.14), que posee un tamaño físico de aproximadamente 750×510 pc^2. Esta estructura recuerda a las observadas en otras regiones de I Zw 18 (Martin 1996), M 82 (Heckman, Armus y Miley 1990) y NGC 1705 (Marlowe et al. 1995). Asumiendo que el mínimo y máximo de velocidad radial observados corresponden a los dos lóbulos de una burbuja en expansión, la edad dinámica de esta burbuja, estimada como $t_{\rm dinamico}$=0.6×$(r_{\rm S} + r_{\rm N})/(v_{\rm S} + v_{\rm N})$, fue de 6.5 Ma. La diferencia en tamaño entre ambos lóbulos es probablemente debida a la presencia de un fuerte gradiente de densidad, de modo que las regiones más densas se situarían hacia el sudoeste de la burbuja.

Es comúnmente aceptado que la luminosidad Hα observada en burbujas en expansión es debida a fotoionización de los brotes de formación estelar precursores de dichas burbujas (Marlowe et al. 1995; Lehnert y Heckman 1996; Martin 1997), siendo la luminosidad Hα de origen colisional irrelevante dentro del total de emisión Hα. Las luminosidades Hα total medidas para estas burbujas fueron

Figura 6.14: *Izquierda*: Región correspondiente a la burbuja Mrk 86-B en banda B (*escala de grises*) y en Hα (*contornos*). La máximo de emisión observado 1″ al Este y 9″ al Norte del origen de coordenadas es una estrella de campo. En esta figura se han marcado con símbolos especiales aquellas regiones cuya velocidad se muestra en las Figuras 6.1e y 6.1f *Derecha*: Burbuja Mrk 86-B en Hα (*escala de grises*) y en [O III]λ5007/Hα (*contornos*). Las regiones de mayor ruido de este mapa de contornos han sido eliminadas artificialmente.



$L_{H\alpha}^{North}$=4.7×10^{37} erg s^{-1} y $L_{H\alpha}^{South}$=2.5×10^{38} erg s^{-1}. Asumiendo que ambas burbujas se pueden reproducir por elipsoides de revolución se obtuvieron las luminosidades colisionales aplicando la siguiente relación,

$$L_{\mathrm{H}\alpha} \simeq S_{\mathrm{burbuja}}\ n_0\ v_{\mathrm{exp}}\ \mathcal{F}\ h\ \nu_{\mathrm{H}\alpha}, \tag{6.14}$$

donde S_{burbuja} es la superficie de la burbuja, n_0 es la densidad en hidrógeno neutro del medio sin perturbar, v_{exp} la velocidad de expansión de la burbuja, $\mathcal{F}$ es el número de fotones Hα producidos por átomo de hidrógeno chocado y $\nu_{\mathrm{H}\alpha}$ es la frecuencia de los fotones Hα. Aplicando esta relación, las luminosidades colisionales predichas fueron $L_{H\alpha}^{Norte}$=2.4×10^{36} erg s^{-1} y $L_{H\alpha}^{Sur}$=1.6×10^{36} erg s^{-1}, es decir, del orden del 10 y del 1 por ciento, respectivamente, de las luminosidades totales medidas. Se asumió un $\mathcal{F}$ de 0.1, lo que corresponde al valor predicho por los modelos de Shull y McKee (1979) para un choque de 50 km s^{-1}. Se adoptó una densidad ambiente hidrógeno neutro de n_0=0.3 cm^{-3}, que coincide con el valor utilizado por Marlowe et al. (1995) para una muestra de galaxias enanas y con el obtenido asumiendo el perfil de hidrógeno neutro descrito en la Secc. 6.1.3 para una distancia galactocéntrica de 1.2 kpc.

Debido a la incertidumbre en la obtención del perfil de hidrógeno neutro, el valor de n_0 podría ser significativamente mayor, $\sim$1 cm^{-3}, lo que aumentaría la fracción de emisión Hα colisional. En cualquier caso, esta contribución sería desprecible en el caso del lóbulo sur ($\sim$3 por ciento) y no llegaría a dominar la luminosidad Hα total en el lóbulo norte ($<$30 por ciento).

Situado a 3$''$ (130 pc) hacia el nordeste del lóbulo sur de la burbuja (coincidiendo en el origen de coordenadas de la Figura 6.14) se situa la región #70, que asumiremos fue la precursora de esta burbuja. La comparación de los colores medidos con las prediccciónes de los modelos para esta región dió como resultado una edad de 12 Ma, una fuerza de brote de b=0.1 y una masa estelar (corregida de apertura) de 7.7×10^5 M$_\odot$. Puesto que la emisión Hα está dominada por fotoionización, el cociente entre la luminosidad de ambos lóbulos debe estar relacionada con el ángulo sólido subtendido por cada lóbulo desde la región #70. Asumiendo simetría de revolución para ambos lóbulos, se obtiene que $\Omega_{\mathrm{Sur}}/\Omega_{\mathrm{Norte}}$=5.5 ($\Omega_{\mathrm{Sur}}$=6.6 sr y Ω_{Norte}=1.2 sr), valor muy similar al cociente $L_{H\alpha}^{Sur}/L_{H\alpha}^{Norte}$=5.3. En el panel derecho de la Figura 6.14 se muestran los ángulos subtendidos para cada lóbulo y la posición de la fuente de la radiación ionizante. El hecho de que estos cociente sean similares implica también que no existe una gran diferencia entre el número de fotones ionizantes perdidos o absorbidos por polvo en ambos lóbulos.

Tabla 6.2: Parámetros físicos de las burbujas. La edad dinámica y luminosidades Hα colisionales de estas regiones se obtuvieron aplicando las Ecuaciones 6.13 y 6.14, respectivamente.

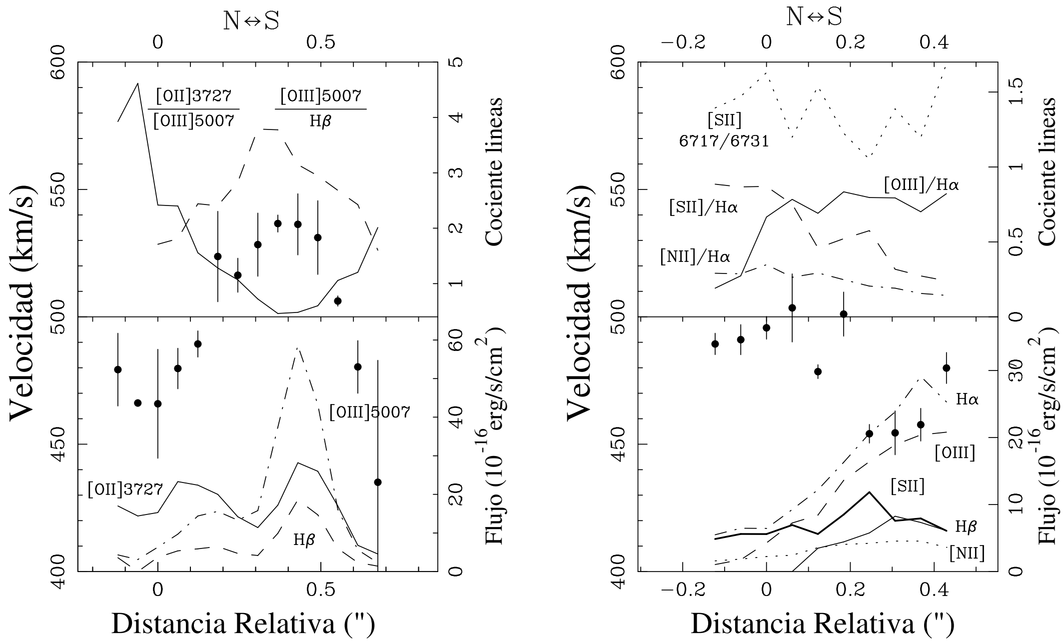
		A§	B (lóbulos N/S)	C
AR(B1950)		$08^h09^m40\overset{s}{.}0$	$08^h09^m42\overset{s}{.}3$	$08^h09^m41\overset{s}{.}1$
DEC(B1950)		$46°08'25\overset{''}{.}0$	$46°08'6\overset{''}{.}5$	$46°08'52\overset{''}{.}6$
$r_{\rm burbuja}$	(pc)	944	558/190	110
$v_{\rm exp}$	(km s^{-1})	47	40/28	17
$t_{\rm din}$	(Ma)	12	6.5	4
dE/dt$_{\rm cin}$	(erg s^{-1})	1.2$\times10^{40}$	2.5/0.1$\times10^{39}$	8$\times10^{36}$
L$_{\rm H\alpha}$	(erg s^{-1})	7$\times10^{37}$	0.5/2.5$\times10^{38}$	1.7$\times10^{39}$
$m_{\rm B}$		17.12	17.77	17.65
Edad†	(Ma)	14.2	11.5	7.7
$b^\dagger$		$\sim$0.01	$\sim$0.01	$\sim$0.01
$Z^\dagger$	(Z$_\odot$)	$\sim$0.25	$\sim$0.10	$\sim$0.10
Masa†	(M$_\odot$)	11$\times10^4$	6$\times10^4$	5$\times10^4$
dE/dt$_{\rm cin}{}^\dagger$	(erg s^{-1})	2.2$\times10^{39}$	1.4$\times10^{39}$	9$\times10^{38}$
Edad‡	(Ma)	13	12	5
$b^\ddagger$		0.05	0.09	0.02
$Z^\ddagger$	(Z$_\odot$)	0.4	0.02	0.2
Masa‡	(M$_\odot$)	6$\times10^5$	8$\times10^5$	1.5$\times10^5$
L$_{\rm H\alpha}$ colis.	(erg s^{-1})	9$\times10^{36}$	2.4/1.7$\times10^{36}$	2.3$\times10^{35}$

§Datos tomados de Martin (1998) convertidos a H_0=50 km s^{-1} Mpc^{-1}.

† Datos tomados de Gil de Paz et al. (1999a).

‡ Véase la Tabla 5.2.

Figura 6.15: Perfiles de velocidad (*círculos rellenos*) y cocientes de líneas a lo largo de la burbuja Mrk 86-B para las rendijas #4b (*izquierda*) y #4r (*derecha*). Las distancias relativas están referidas a las mismas regiones que los paneles **e** y **f** de la Figura 6.1.



Con el fin de determinar la importancia de los choques como mecanismo de excitación del gas se estudiaron diferentes cocientes de líneas a lo largo de la burbuja, [O IIλ3727/[O III]λ5007, [O III]λ5007/Hβ, [N II]6583/Hα y [S II]$\lambda\lambda$6717,6731/Hα. En el caso del lóbulo sur se obtuvieron cocientes de log ([O III]/Hβ) y log ([O II]/[O III]) iguales y de valor igual a 0.3. Estos valores pueden ser reproducidos mediantes modelos de fotoionización (véase la Figura 5.6) de bajo parámetro de ionización (log U$\simeq$−4; Martin 1997). Sin embargo, en el caso de las regiones más distantes del lóbulo norte, los altos valores del cociente log ([O II]/[O III])$\simeq$0.6, log ([N II]/Hα)$\simeq$-0.5 y log ([S II]/Hα)$\simeq$0 (véase la Figura 6.15) medidos sugieren la presencia de una mecanismo adicional de excitación (Lehnert y Heckman 1996; Martin 1997; véase la Secc. 5.2.5). Estos cocientes pueden ser reproducidos teniendo en cuenta la emisión predicha por los modelos de Shull y McKee (1979) para un choque de velocidad 90 km s^{-1}. Este resultado es, así mismo, consistente con la mayor fracción en luminosidad Hα debida a colisiones predicha para el lóbulo norte de esta burbuja.

6.2.3 Mrk 86-C

Finalmente, en los espectros de alta resolución #7R y #8R se pudo apreciar la presencia de una mínimo de velocidad radial (véase la Figura 6.16). Dicho mínimo se localiza en una región de intensa emisión Hα que corresponde con el nodo de formación estelar #18. Si suponemos que este mínimo de velocidad esta asociado a la parte de una burbuja en expansión (Mrk 86-C) que se está acercando hacia nosotros, podremos deducir sus parámetros físicos, $r_{\rm burbuja}$=110 pc y $v_{\rm exp}$=17.3 km s^{-1}, ajustando las velocidades radiales en torno al mínimo mediante una ley de expansión isótropa,

$$v_{\rm x} = v_{\rm exp}\sqrt{1-\frac{{\rm x}^2}{r_{\rm bubble}^2}}. \tag{6.15}$$

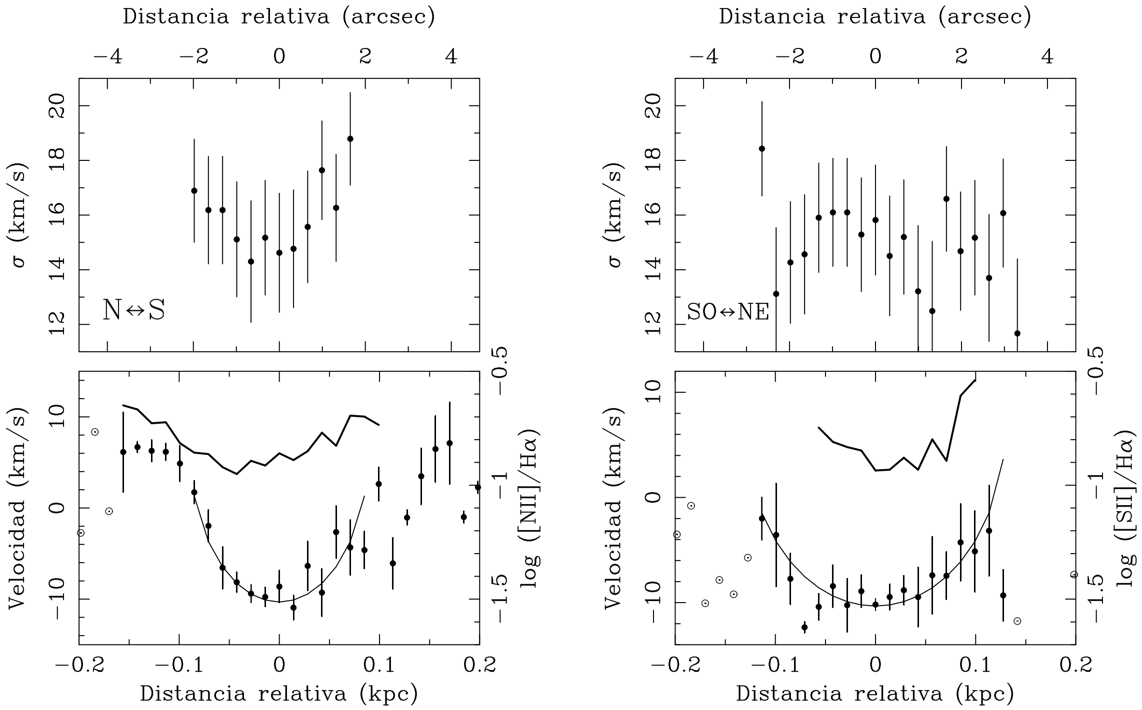
La velocidad $v_{\rm x}$ se obtuvo substrayendo del perfil de velocidad radial la componente correspondiente al gradiente de velocidad global. El hecho de que solo observemos la región más próxima de la burbuja ha de ser causado por la existencia de una alta extinción en las regiones internas de la burbuja o por la presencia de un fuerte gradiente de densidad hacia la zona donde debería expandirse el lóbulo más alejado de la burbuja.

A partir de los parámetros obtenidos y suponiendo simetría esférica se estimó la contribución de la luminosidad Hα debida a colisiones, que resultó ser 2.7$\times$10^{35} erg s^{-1}, es decir aproximadamente un 0.02 por ciento de la luminosidad Hα total (véase la Tabla 6.2). Por lo tanto, también en esta región la luminosidad Hα es debida principalmente a fotoionización.

Finalmente, se estudió la variación de los cocientes de líneas [N II]/Hα y [S II]/Hα a lo largo de las rendijas #7R y #8R (véase la Figura 6.16). Estos cocientes varían desde aproximadamente 0.1 en regiones próximas al brote de formación estelar a valores de en torno a 0.25 ([N II]/Hα) y 0.30 ([S II]/Hα), respectivamente, en las regiones externas y de menor brillo superficial en Hα. El aumento observado en estos cocientes hacia las regiones más externas de la burbuja se puede explicar por la disminución del parámetro de ionización debida a la dilución del campo de radiación con la distancia (Martin 1997; véase también Shields y Filippenko 1990).

Debido a la alta resolución espectral alcanzada con los espectros #7R y #8R pudimos medir la dispersión de velocidades en la burbuja Mrk 86-C. En primer lugar se determinó la resolución espectral a partir de la anchura de las líneas de cielo y de la lámpara de calibración, $\sigma_{\rm instrumental}$=16.4$\pm$2.1 km s^{-1}. Midiendo enton-

Figura 6.16: Perfiles de velocidad y cocientes de líneas a lo largo de la burbuja Mrk 86-C para las rendijas #7R (*izquierda*) y #8R (*derecha*). *Panel superior*: Dispersión de velocidades corregida de anchura instrumental. *Panel inferior*: Los círculos rellenos representan las velocidades substraídas del gradiente de velocidad radial global. La *línea continua* muestra el mejor ajuste a una curva de la forma $v \propto \sqrt{1-x^2}$. Se muestra también la variación de los cocientes de líneas de [N II]/Hα (*izquierda*) y [S II]/Hα (*derecha*) a lo largo de la burbuja.



ces la anchura de las líneas de emisión en el espectro de esta región ($4''\!.6\times1''$) y substrayendo cuadráticamente la anchura instrumental, se obtuvo la dispersión de velocidades. Los valores obtenidos fueron $\sigma_{\#7\mathrm{R}}$=16±2 km s^{-1} y $\sigma_{\#8\mathrm{R}}$=15±2 km s^{-1}. Se estudió, así mismo, la variación de la dispersión de velocidades a lo largo de las rendijas #7R y #8R (véase la Figura 6.16). Por último, calculamos los valores medios de la dispersión de velocidades de la burbuja a lo largo del eje espacial de la rendija en intervalos de 0.33, 1 y 2″. Los valores obtenidos fueron 17±3 y 14.9±1.6 km s^{-1} en intervalos de $0''\!.33$, respectivamente para los espectros #7R y #8R, 18±5 y 15.4±0.5 km s^{-1} para intervalos de 1″, y 19±5 y 15.2±0.3 km s^{-1} para intervalos de 2″. Las pequeñas diferencias obtenidas permiten asegurar que la dispersión de velocidades punto a punto es similar a la medida globalmente para toda la región. Finalmente, se estimó la dispersión de velocidades turbulenta, definida como la dispersión de velocidades substraída de la componente instrumental y térmica, es decir,

$$\sigma^2_{\rm turbulenta} = \sigma^2_{\rm observada} - \sigma^2_{\rm termica} - \sigma^2_{\rm intrinseca} - \sigma^2_{\rm instrumental} \quad (6.16)$$

donde, asumiendo $\sigma_{\rm intrinseca,H\alpha}$=7.1 km s^{-1} (Hippelein 1986) para T=10^4 K, resulta una dispersión de velocidades turbulenta de 10.7 km s^{-1} y 10.0 km s^{-1}, respectivamente para los espectros #7R y #8R. Considerando que la velocidad del sonido en el gas ionizado es aproximadamente 12.8 km s^{-1} (Dyson y Williams 1980), la dispersión de velocidades $\sigma_{\rm sonido}$ sería 8 km s^{-1} (Fuentes-Masip 1997), por lo que puede concluir que la dispersión de velocidades en esta región es sónica o ligeramente supersónica.

6.3 Conclusiones

- El campo de velocidad global de Mrk 86 posee una velocidad angular central proyectada de 34 km s^{-1} kpc con una ángulo de posición de aproximadamente AP$\simeq$5-12° (eje de rotación con AP$\simeq$78-85°). El gradiente de velocidad disminuye progresivamente hacia las regiones más exteriores de la galaxia, de 34 km s^{-1} kpc a $\sim$10 km s^{-1} kpc. Los perfiles de densidad obtenidos para cada una de las componentes de masa indican que la población estelar subyacente domina la masa total dentro de la extensión óptica de la galaxia. El cambio en el gradiente de velocidad en diferentes posiciones a lo largo del eje de rotación, así como el mapa de velocidad radial obtenido de observaciones Fabry-Pérot en el línea de Hα, sugieren que el gas ionizado está distribuido en un disco inclinado aproximadamente 40° respecto al plano del cielo.

- Sobreimpuesto en este campo de velocidad global y asociados a regiones de intensa formación estelar (#26 y #27) se midieron gradientes en velocidad radial próximos a 70 km s^{-1} kpc. Estos valores tan elevados pueden ser debidos a la existencia de una región de alta densidad o bien puede tratarse de un objeto en proceso de fusión que presenta un campo de velocidad independiente.

- Las observaciones llevadas a cabo revelaron la existencia de dos burbujas de gas en expansión, Mrk 86-B y Mrk 86-C. Las velocidades de expansión y tamaños deducidos para estas burbujas fueron $v_{\rm exp}$=34 km s^{-1} y $r_{\rm Mrk\ 86-B}$=374 pc para Mrk 86-B y $v_{\rm exp}$=17 km s^{-1} y $r_{\rm Mrk\ 86-C}$=120 pc para Mrk 86-C. Estas estructuras se formaron por la interacción de los vientos de estrellas masivas y explosiones de supernova originadas en las regiones de formación estelar #70 y #18 con el medio circundante. Estas regiones presentan bajas metalicidades y edades respectivas de 12 y 4.5 Ma y masas estelares de 7.7×10^5 y 1.5×10^5 $M_\odot$ (véase la Secc.5.2.4). La emisión Hα de dichas burbujas es debida principalmente a fotoionización, representando aproximadamente el 90 por ciento de la emisión observada. Los cocientes de líneas medidos son también reproducibles asumiendo que la emisión es debida a fotoionización, salvo en las regiones más externas del lóbulo norte de Mrk 86-B, donde parece que la contribución de ionización por choques es comparable, aunque algo menor, a la debida a fotoionización.

- Se estudiaron también las propiedades del brote de formación estelar precursor de la burbuja Mrk 86-A descubierta por Martin (1998). Los colores óptico-infrarrojos medidos corresponden a una región de 13 Ma de edad, metalicidad sub-solar y fuerza de brote del 5 por ciento.

- La dispersión de velocidades turbulenta de la región Mrk 86-C es sónica o ligeramente supersónica, con $\sigma_{\rm turbulenta}\simeq10\,{\rm km\,s^{-1}}$.