

Cinemática y Masa dinámica de la Galaxia NGC 7331

Armijos-Abendaño Jairo^{*}; López Ericson¹; Llerena Mario¹; Aldas Franklin¹

¹Escuela Politécnica Nacional, Observatorio Astronómico, Quito, Ecuador

Resumen: Se llevó a cabo un estudio de la curva de rotación de la galaxia NGC 7331 situada a 14,7 Mpc de la Tierra. La curva de rotación se derivó usando observaciones radioastronómicas del monóxido de carbono (CO). La forma de la curva de rotación y las velocidades son muy similares a aquellas derivadas previamente, empleando datos de hidrógeno atómico, lo que sugiere la coexistencia de ambos elementos en las regiones estudiadas en NGC 7331. Se descubrió que el ensanchamiento de la línea de CO, transición 2-1, está dominado por efectos turbulentos del gas de CO antes que por efectos térmicos. Asimismo, se estudió el campo de velocidades de NGC 7331, lo que puso en evidencia la rotación de la galaxia en el sentido de las agujas del reloj. Finalmente, asumiendo una aproximación esférica para la forma de la galaxia se estimó una masa dinámica de $1,4E+10$ masas solares para NGC 7331.

Palabras clave: Radioastronomía, galaxia, curva de rotación, masa galáctica, gas molecular.

Kinematics and Mass of the NGC 7331 Galaxy

Abstract: The study of the rotation curve of the galaxy NGC 7331, located at 13,870 Mpc from the Earth, was carried out. The rotation curve is obtained using radio astronomy observations of the carbon monoxide (CO). The shape of the rotation curve and the velocities are very similar to those derived from atomic hydrogen data, suggesting the coexistence of both elements in the studied regions of NGC 7331. We found that the CO (2-1) line broadening is dominated by turbulent effects rather than by thermal effects. The velocity field of the galaxy is studied as well, showing that the galaxy is rotating clockwise. Finally, assuming a spherical approximation for the galaxy shape, a dynamical mass of $1,4E+10$ solar masses is estimated for NGC 7331.

Keywords: Radio astronomy, galaxy, rotation curve, galactic mass, molecular gas.

1. INTRODUCCIÓN

NGC 7331 es una galaxia espiral cercana, con un tamaño aparente de 13.5 minutos de arco (Bosma, 1978) y situada a 14,7 Mpc de la Tierra (de Blok et al., 2008). La normal del plano de esta galaxia posee una inclinación (i) de 74.8 grados con respecto a la línea de mira del observador (de Blok et al., 2008). Gráficas de la velocidad de rotación del gas de hidrógeno atómico representadas en función del radio galáctico se han usado en un estudio del campo de velocidades de NGC 7331 (Bosma, 1981). Este tipo de gráficas se conocen como curvas de rotación. La masa de la materia visible (gas atómico y molecular, polvo cósmico, estrellas, etc.) observada en NGC 7331 y en otras galaxias deberían dar lugar a curvas de rotación con velocidades que disminuyen con el aumento del radio galáctico, contrario a lo que revelan las observaciones de NGC 7331 (Bosma, 1981) y de otras galaxias (Bosma, 1981; Sofue y Rubin, 2001). Un estudio llevado a cabo por de Blok et al., (2008) revela que las curvas de rotación de NGC 7331 obtenidas a partir del gas HI de las regiones que se acercan y se alejan del observador difieren en alrededor 25 km s^{-1} . La curva de rotación en NGC 7331 se mantiene relativamente constante en regiones externas situadas a gran distancia de su centro (Rubin, 1965; Bosma, 1981). Este hecho es característico de las galaxias espirales

(Sofue et al., 1999). Se ha propuesto la presencia de un halo de materia oscura en las galaxias espirales, materia responsable de mantener constante la velocidad rotacional en regiones tan alejadas de los centros galácticos. Hasta el momento se desconoce la naturaleza de la materia oscura, pues ésta se puede estudiar únicamente por sus efectos gravitatorios.

Sofue et al., (1999) estudiaron las curvas rotacionales de una muestra de galaxias espirales, hallando que las galaxias barradas muestran mayor dispersión de velocidad que aquellas de galaxias “normales”, ello posiblemente debido a movimientos no circulares del gas. Estos autores también descubrieron que estallidos de formación estelar nuclear y núcleos activos parecen no correlacionar con las propiedades de las curvas de rotación, sugiriendo así que estos procesos nucleares son causados por efectos locales y no por propiedades dinámicas globales.

Teniendo en cuenta una aproximación esférica, la masa (M) de una galaxia se relaciona con la velocidad de rotación (V_{rot}) mediante la siguiente expresión (Sofue y Rubin, 2001):

$$M = \frac{RV_{rot}^2}{G} \quad (1)$$

*jairo.armijos@epn.edu.ec

Recibido: 01/12/2016

Aceptado: 20/07/2018

Publicado: 31/07/2018

donde R es el radio de la galaxia y G es la constante gravitacional e igual a $6,67E-11 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$.

Uno de los objetivos del presente trabajo consiste en la estimación de la masa de la galaxia NGC 7331, ello a partir de su curva de rotación derivada a partir de datos de monóxido de carbono CO (2-1) (Leroy et al., 2009), donde (2-1) denota el hecho que se observó la transición rotacional 2-1 a 230,5 GHz. Estos datos se describen brevemente en la Sección 2. En la Sección 3 se muestra un mapa y espectros de CO (2-1) de NGC 7331. En la Sección 3.1 se lleva a cabo un estudio sobre el ensanchamiento de la línea de emisión de CO (2-1). La Sección 4 ofrece una explicación sobre la metodología empleada en la obtención de una curva de rotación, en base a los datos de monóxido de carbono. Un estudio sobre el campo de velocidades en la galaxia NGC 7331 se presenta en la Sección 5. El procedimiento usado en la derivación de la masa dinámica de la galaxia NGC 7331 se expone en la Sección 6. Finalmente, en la Sección 7 se presentan las conclusiones del presente trabajo.

2. DATOS

Para llevar a cabo el presente estudio se emplearon datos públicos de CO (2-1), los cuales se publicaron por primera vez en Leroy et al., (2009). Estos datos se obtuvieron con el radio telescopio IRAM de 30 metros de diámetro (<http://www.iram-institute.org/EN/30-meter-telescope.php>). A la frecuencia (230,5 GHz) de la transición de CO (2-1) el radiotelescopio proporcionó una resolución espacial de 13 segundos de arco. El autocorrelador WILMA se usó en las observaciones del radio telescopio IRAM, produciendo espectros con una resolución de $2,6 \text{ km s}^{-1}$ y un ancho de banda de 1200 km s^{-1} a la frecuencia de la transición CO (2-1) (Leroy et al., 2009). En la observación de la galaxia NGC 7331 y de otras galaxias con el radio telescopio IRAM se usó el modo de observación On the Fly. La información de las observaciones se guardó en cubos de datos, donde las intensidades de los espectros de CO (2-1) están dadas en temperatura de antena y los espectros suavizados a una resolución de $10,4 \text{ km s}^{-1}$. Los datos que se descargaron para nuestro trabajo ya están corregidos por la línea de base.

Para el desarrollo del presente trabajo se descargó el cubo de datos de CO (2-1) correspondiente a la galaxia NGC 7331 que está disponible en la página web de IRAM (<http://www.iram-institute.org/>).

3. MAPA Y ESPECTROS DE LA GALAXIA NGC 7331

Se usó el software GILDAS (<https://www.iram.fr/IRAMFR/GILDAS/>) para la visualización del cubo de datos de NGC 7331. Seguidamente con este software se procedió a ejecutar una tarea que permitió obtener un mapa integrado de NGC 733 entre +550 y +1100 km s^{-1} . Este mapa se muestra en la Figura 1. En esta figura los ejes X y Y corresponden a la ascensión recta (α) y la declinación (δ), respectivamente, en el sistema ecuatorial de coordenadas J2000. La cruz roja en la Figura 1 representa el

centro radio (fotométrico) de NGC 7331 con las siguientes coordenadas: $22^{\text{h}}37^{\text{m}}04,0^{\text{s}}$ y $34^{\circ}24'56.4''$ (Israel y Baas, 1999). En la Figura 1 también se ha dibujado una elipse de color azul con un eje mayor igual a 290 segundos de arco y el eje menor igual a 84 segundos de arco, y un ángulo de posición de 167 grados (Israel y Baas, 1999). El tamaño de la elipse ha sido elegido a ojo y aproxima bastante bien la forma de la galaxia. El centro de la elipse es el centro radio de NGC 7331. En esta figura se usan, asimismo, contornos que permiten resaltar la forma de la galaxia. Estos contornos inician a 3σ y continúan con pasos 10σ , con σ siendo igual a $0,33 \text{ Kelvin (K) km s}^{-1}$.

Por otro lado, en la Figura 2 se presenta el espectro de emisión de CO (2-1) que corresponde al centro radio de la galaxia NGC 7331, indicado con una cruz roja en la Figura 1. Como se puede apreciar en la Figura 2, la línea de emisión de CO (2-1) tiene una forma relativamente gaussiana y un pico de emisión a una velocidad de $\sim 831 \text{ km s}^{-1}$. En la Figura 3 se presenta el espectro que corresponde a una región alejada alrededor de 60 segundos de arco del centro de la galaxia NGC 7331. En este espectro no se detecta emisión de CO (2-1) a diferencia de aquella detectada en el centro de NGC 7331. Otro hecho importante que se infiere a partir de las Figuras 2 y 3 es que el ruido de los espectros es de aproximadamente 10 mK.

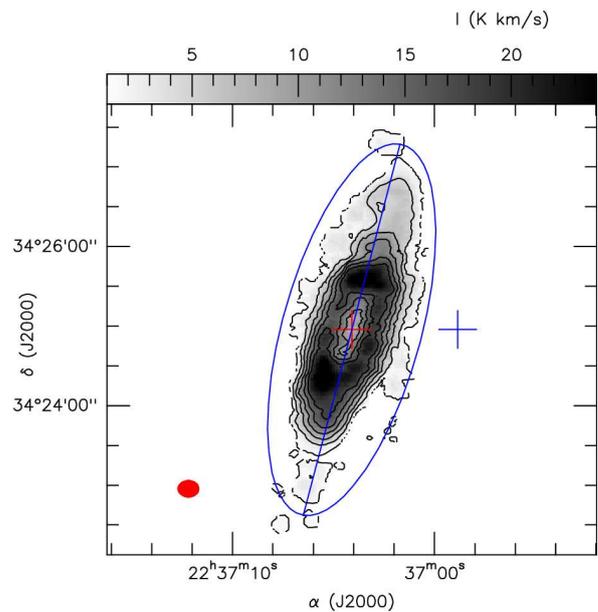


Figura 1. Mapa de intensidad integrada de CO (2-1) de la galaxia NGC 7331. En la figura se usó el sistema de coordenadas ecuatorial J2000. La cruz roja señala el centro radio de la galaxia, mientras que la cruz azul representa la posición del espectro que se muestra en la Figura 3. Toda la región de emisión de la galaxia puede aproximarse por una elipse de color rojo. La línea azul es el eje mayor de la elipse. La paleta de grises muestra la intensidad integrada del mapa dada en K km s^{-1} . En esta figura se usan, además, contornos de intensidad que resaltan la forma de la galaxia. La elipse rellena en rojo muestra el tamaño del haz del telescopio de 13 segundos de arco.

Se realizó, asimismo, un ajuste gaussiano a la línea de CO(2-1) mostrada en la Figura 2, con el objetivo de derivar los valores del pico de intensidad (T), la velocidad radial (V) y el ancho de la línea (ΔV). De esta manera se obtuvieron los siguientes valores: $T=99,0 \text{ mK}$, $V=831,2\pm 2,3 \text{ km s}^{-1}$ y $\Delta V=142,3\pm 5,9 \text{ km s}^{-1}$. El valor de ΔV permitirá llevar a cabo un breve estudio (Sección 3.1), sobre las contribuciones de los

efectos térmicos y turbulentos del gas molecular en el ensanchamiento de la línea de CO (2-1). La velocidad de 831 km s⁻¹ se considera como la velocidad sistémica de NGC 7331 y ésta es similar a aquella dada en Israel y Baas (1999) y mayor que aquella de 818 km s⁻¹ dada en de Blok et al., (2008).

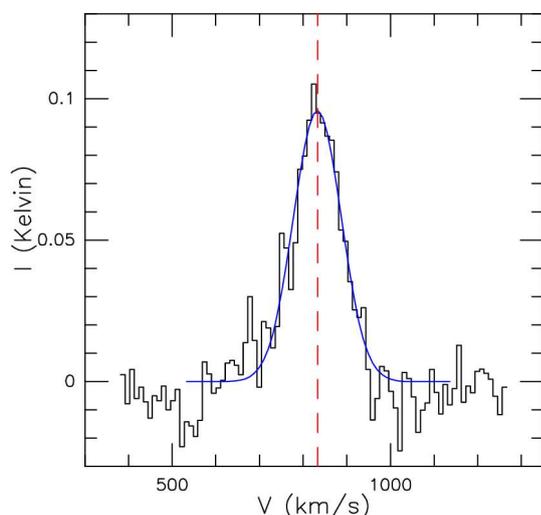


Figura 2. Espectro de emisión de CO (2-1) de la galaxia NGC 7331. El espectro corresponde al centro radio de NGC 7331, indicada en la Figura 1. La velocidad sistémica de NGC 7331 se considera igual a 831 km s⁻¹, la que se señala con una línea roja entrecortada. En el eje Y la intensidad de la radiación está dada en Kelvin. La línea de color azul muestra el ajuste gaussiano a la línea de CO (2-1) (Véase la Sección 3).

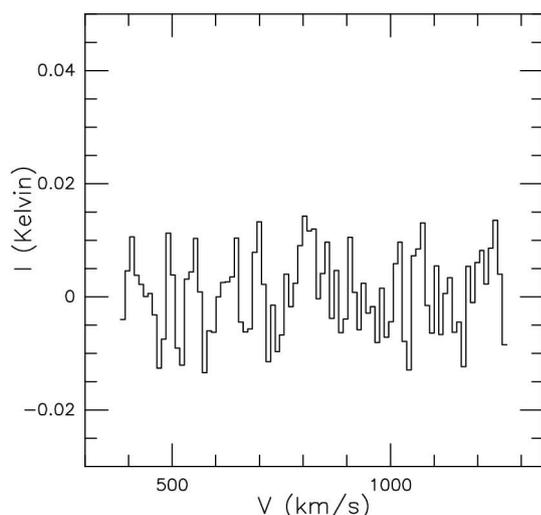


Figura 3. Espectro observado en el mismo rango espectral, centrado a 230,538 GHz, al igual que el de la Figura 2. La posición, alejada alrededor de 60 segundos de arco del centro de NGC 7331, a la que corresponde este espectro, se indica con una cruz azul en la Figura 1. En este espectro no se detecta emisión de CO (2-1) a diferencia de lo que sí se observa en la Figura 2.

3.1. Ensanchamiento De La Línea De CO (2-1)

Si se supone que la anchura de una línea molecular es consecuencia solamente de efectos térmicos y turbulentos, entonces el ancho de la línea ΔV de monóxido de carbono viene dado por la siguiente ecuación (Teague et al., 2016):

$$\Delta V_{\text{tur}} = \sqrt{\frac{\Delta V^2}{4 \ln 2} - \Delta V_{\text{ter}}^2} \quad (2)$$

y

$$\Delta V_{\text{ter}}^2 = \frac{2kT_{\text{cin}}}{\mu m_{\text{H}}} \quad (3)$$

donde ΔV_{tur} es el ensanchamiento de la línea molecular originada por turbulencia, ΔV_{ter} es el ensanchamiento térmico de la línea molecular, $k=1,38\text{E-}23$ J K⁻¹ es la constante de Boltzmann, T_{cin} es la temperatura cinética, $\mu=28$ es la masa molecular de CO, y m_{H} es la masa molecular del hidrógeno atómico e igual a $1,67\text{E-}24$ g. Si se reemplazan estos valores en las Ecuaciones (2) y (3) y considerando una $T_{\text{cin}}=20$ K (Israel y Baas, 1999), se halla una $\Delta V_{\text{ter}}=0,11$ km s⁻¹ y una $\Delta V_{\text{tur}}=85,0$ km s⁻¹. Este resultado pone en evidencia que en NGC 7331 domina la turbulencia en el ensanchamiento de la línea de CO (2-1) ante los efectos térmicos. Sin embargo, el ensanchamiento de las líneas atómicas y moleculares no depende únicamente de los efectos térmicos y turbulentos, sino también que puede estar afectado, en cierto grado, por los movimientos sistémicos y relativos de unas partes de la región estudiada con respecto a otras.

El tamaño del haz del telescopio IRAM de 13 segundos de arco a 230,5 GHz traza regiones de alrededor 900 pc de NGC 7331. Esto puede causar que movimientos relativos del gas afecte a la anchura de la línea. Sin embargo, incluso suponiendo que la anchura no afectada por movimientos relativos sea cuatro veces menor que lo que medimos, es decir un ancho de la línea de ~ 36 km s⁻¹, se obtendría una $\Delta V_{\text{tur}}=21.3$ km s⁻¹, que sigue siendo mucho mayor que aquella causada por los efectos térmicos. La resolución espectral de los datos usados en este trabajo de 10 km s⁻¹ empezaría a afectar a la anchura de las líneas de CO si éstas tuvieran anchuras menores a 60 km s⁻¹.

4. CURVA DE ROTACIÓN DE NGC 7331

En esta sección se procederá a derivar una curva de rotación de la galaxia NGC 7331, estudio previo a la determinación de la masa dinámica de NGC 7331. Dicha curva a su vez se obtiene a partir de una figura donde se representan las velocidades de la emisión de CO (2-1) correspondientes a diferentes posiciones. Para este estudio se han obtenido las velocidades de las posiciones situadas a lo largo del eje mayor de NGC 7331 mostrada en la Figura 1. Como se mencionó este eje tiene un ángulo de posición de 167 grados. Los resultados se muestran en la Figura 4, donde el centro de las posiciones corresponde al centro radio de NGC 7331. La figura resultante se conoce como diagrama posición-velocidad, donde se usan también contornos que ponen de manifiesto de una mejor manera la forma relativamente simétrica de las velocidades del gas con respecto a la velocidad sistémica de 831 km s⁻¹. Dichos contornos inician a 3σ y continúan con pasos 4σ , con σ siendo igual a 10 mK.

En la Figura 4 también se indica las curvas de rotación (en color rojo) que viene determinadas por la siguiente ecuación (Sofue y Rubin, 2001):

$$V_{\text{rot}} = (V_t - V_{\text{sys}})/\sin i - (\sigma_{\text{ISM}}^2 + \sigma_{\text{obs}}^2)^{1/2} \quad (4)$$

donde V_t es la velocidad terminal, V_{sys} es la velocidad sistémica de la galaxia con respecto al observador, $\sin i$ es un factor de corrección relacionado con la inclinación i de la galaxia ($i=75,8$ grados para NGC 7331), σ_{ISM} es la dispersión de velocidades y σ_{obs} es la resolución en velocidades dada por las observaciones. V_t se define como la velocidad que corresponde a un 20% del pico de intensidad en una posición dada (Sofue y Rubin, 2001). En este trabajo se considera un valor de $\sigma_{ISM}=7 \text{ km s}^{-1}$, que es un valor típico para el medio interestelar de nuestra Galaxia (Sofue y Rubin, 2001), entretanto, de las observaciones se conoce que $\sigma_{obs}=10,4 \text{ km s}^{-1}$. De esta manera se obtienen las curvas de rotación indicadas con color rojo en la Figura 4. Promediando velocidades de rotación al rojo y al azul se obtienen los valores, a un determinado radio, que se listan en la Tabla 1.

Tabla 1. Velocidades de rotación derivadas para NGC 7331

Radio (segundos de arco)	V_{rot} (km s^{-1})
0	0
13,4	89,7
26,8	229,0
40,0	254,8
53,6	265,1
67,0	265,1
80,4	262,7
93,8	266,1
107,2	273,3
120,6	268,2
130,0	265,1
145,0	265,0

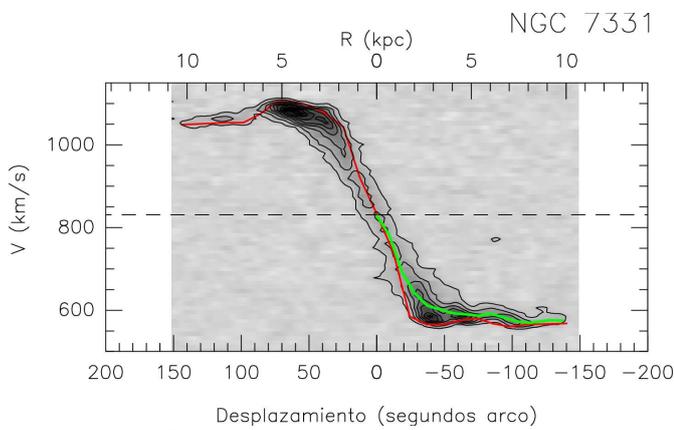


Figura 4. Diagrama posición-velocidad.

Las posiciones en el eje X inferior, dadas en segundos de arco, corresponden al semieje mayor indicado con la línea azul en la Figura 1. En la misma figura, el centro de posiciones, que corresponde al centro radio de NGC 7331, es indicado con la cruz roja. El eje X superior está dado en kpc. En la presente figura, la línea roja representa la curva de rotación que se obtiene siguiendo los pasos descritos en la Sección 4. En la figura se usan contornos que resaltan la estructura relativamente simétrica de la emisión de CO(2-1) con respecto a la velocidad sistémica de la galaxia de 831 km s^{-1} , la misma que se indicada con un línea entrecortada.

Se aprecia en el diagrama posición-velocidad que la emisión de CO (2-1) llega hasta un radio de ~ 145 segundos de arco, valor que equivale a 10 kpc considerando una distancia para la fuente de 14,7 Mpc (de Blok et al., 2008). A esta distancia del centro de la galaxia NGC 7331, se infiere una velocidad de rotación de 265 km s^{-1} . La forma de la curva de rotación y las velocidades derivadas en este trabajo son muy similares a aquellas derivadas en base a las observaciones de la línea de hidrógeno atómico (Bosma, 1981), sugiriendo la coexistencia del gas de monóxido de carbono e hidrógeno atómico dentro de un radio de 10 kpc en NGC 7331. Sin embargo, la emisión producida por el hidrógeno atómico es mucho más extensa que aquella de CO(2-1), debido a que en el trabajo llevado a cabo por Bosma (1981) se muestra la detección de la emisión del hidrogeno atómico en regiones alejadas 30 kpc del centro de NGC 7331.

5. CAMPO DE VELOCIDADES EN NGC 7331

En la Figura 5 se muestra un mapa de la velocidad promedio del gas de CO, ello con el objetivo de estudiar el campo de velocidades en la galaxia NGC 7331. Este mapa se ha obtenido usando una tarea del software GILDAS, donde se tiene que especificar el rango de velocidades donde se buscará la velocidad promedio en el cubo de datos descrito en la Sección 2. Como se observa en la Figura 5, existe una diferencia marcada entre las velocidades del gas de CO, para las regiones sur y norte de NGC 7331, cuya forma ha sido delineada con una elipse similar a aquella mostrada en la Figura 1. Las velocidades más altas, mayores a 831 km s^{-1} , se encuentran en las regiones sur de la galaxia, mientras que las velocidades menores a 831 km s^{-1} se hallan en las regiones norte de NGC 7331. La Figura 5 proporciona información sobre la rotación de la galaxia; el gas de monóxido de carbono que posee velocidades mayores que la velocidad sistémica de la galaxia, indica que este gas se aleja del observador, entretanto que el gas molecular con velocidades menores a 831 km s^{-1} , se acerca al observador, es decir, la galaxia NGC 7331 se encuentra rotando en el sentido de las agujas del reloj.

Se puede usar el campo de velocidades presentado en la Figura 5 para obtener una curva de rotación. Usando el software Gildas se puede extraer información sobre las velocidades a lo largo del eje mayor mostrado en la Figura 5. Las velocidades extraídas de esta manera para el gas que se acerca al observador se muestran con una línea de color verde en la Figura 5. Como se puede apreciar en esta figura las velocidades de rotación obtenidas a partir del campo de velocidades son menores (en la mayoría de las posiciones) a aquellas estimadas a partir del método expuesto en la Sección 3. Este hecho es consecuencia de que el método usado en la Sección 3 considera la velocidad terminal y no la velocidad promedio, lo que no subestima la velocidad de rotación.

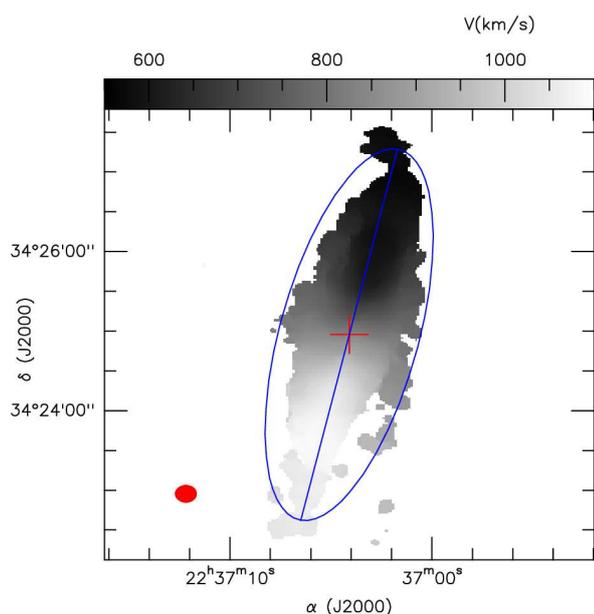


Figura 5. Campo de velocidades de la galaxia NGC 7331.

La cruz roja muestra el centro de la galaxia, mientras que la elipse es similar a aquella mostrada en la Figura 1. La línea azul indica el eje mayor de la elipse. La paleta de gris señala los valores de velocidades mostrados en esta figura. La elipse rellena en rojo muestra el tamaño del haz del telescopio de 13 segundos de arco.

6. MASA DINÁMICA DE NGC 7331

Asumiendo una aproximación esférica para la forma de la galaxia NGC7331, se puede estimar su masa dinámica mediante la ecuación (1). El valor del semieje mayor de 145 segundos de arco de la elipse, que aproxima bastante bien la forma de NGC 7331 (véase la Sección 3), se considerará como radio de la esfera. Este valor equivale a 10.3 kpc. En la Tabla 1 se halla que una velocidad de rotación de 265 km s^{-1} corresponde a un radio de 145 segundos de arco. Reemplazando valores en la ecuación (1), se obtiene una masa dinámica de $1,7\text{E}+11$ masas solares para NGC 7331. Asumiendo una densidad constante de la materia, se halla que la masa calculada para una geometría esférica, es un factor 12 mayor que aquella de un elipsoide con dos de sus semiejes iguales a 42 segundos de arco y el tercer semieje igual a 145 segundos de arco. Como se dijo, una elipse con semiejes de 42 y 145 segundos se empleó para ajustar la forma de NGC 7331 en la Figura 1. Considerando ese factor 12, se encuentra una masa dinámica de $1,4\text{E}+10$ masas solares para NGC 7331. Es importante recalcar que esta masa dinámica excluye la masa de las regiones externas galácticas que en esta galaxia llegan hasta radios de alrededor 30 kpc (Bosma, 1981). La línea de HI de 21 cm traza bien las regiones externas de galaxias (Sandstrom et al., 2013), donde se piensa que se halla la mayor cantidad materia oscura.

También se halla una masa igual a $1.1\text{E}+11$ masas solares para NGC 7331 a partir de la intensidad integrada de CO(2-1) y factores de conversión entre la masa de HII y las masas estelar y de HI dados en la Tabla 3 de Leroy et al., (2009). De esta manera la masa de $1.1\text{E}+11$ masas solares, considera las masas

de HII, HI y de estrellas. Los valores dados en la Tabla 3 de Leroy et al., (2009) se calcularon para una elipse con un tamaño sólo un factor 1,2 mayor que la elipse usada en nuestros cálculos. La masa hallada a partir de la curva de rotación bajo la suposición de una densidad constante de la materia en NGC 7331 subestima la masa dinámica en un factor 7,9. La estimación de masas dinámicas a partir de curvas de rotación y una aproximación esférica puede ser más correcta para galaxias con formas proyectadas relativamente circulares. En estos casos las aproximaciones usadas en este trabajo pueden dar valores más cercanos a aquellos que se basan en la intensidad integrada de CO, HI y en la emisión del polvo cósmico.

7. CONCLUSIONES

El ensanchamiento de las líneas de CO (2-1), en la galaxia NGC 7331, está dominado por movimientos turbulentos del gas antes que por efectos térmicos.

La forma de la curva de rotación y las velocidades de NGC 7331 derivadas a partir de observaciones de la transición 2-1 del monóxido de carbono son muy similares a aquellas derivadas usando el hidrógeno atómico (Bosma, 1981). Este resultado sugiere la coexistencia del gas de monóxido de carbono e hidrógeno atómico en las regiones estudiadas de NGC 7331.

Se estudió el campo de velocidades del gas de monóxido de carbono en la galaxia NGC 7331, trabajo que muestra que esta galaxia rota en el sentido de las agujas del reloj.

Usando una aproximación esférica para la forma de la galaxia, se deriva una masa dinámica de $1,4\text{E}+10$ masas solares para la galaxia NGC 7331, subestimando en un factor 7,9 el valor obtenido empleando un método basado en la intensidad integrada de la línea de CO (2-1). El método usado en este trabajo para derivar la masa dinámica de una galaxia puede ser más correcta para galaxias con formas relativamente circulares.

REFERENCIAS

- Bosma, A. (1978). The distribution and kinematics of neutral hydrogen in spiral galaxies of various morphological types. Obtenido de: https://ned.ipac.caltech.edu/level5/March05/Bosma/Bosma_contents.html. (octubre, 2016).
- Bosma, A. (1981). 21-cm line studies of spiral galaxies. I. Observations of the galaxies NGC 5033, 3198, 5055, 2841, and 7331. *The Astronomical Journal*, vol. 86, pp. 1791-1846.
- de Blok, W. J. G., Walter, F., Brinks, E., Trachternach, C., Oh S. -H., Kennicutt Jr., R. C. (2008). High-resolution rotation curves and galaxy mass models from THINGS. *The Astronomical Journal*, vol. 136, pp. 2648.
- Leroy, A. K., Walter, F., Bigiel, F., et al., (2009). Heracles: the HERA CO line extragalactic survey. *The Astronomical Journal*, vol. 137, pp. 4670-4696.
- Israel, F. P., & Baas, F. (1999). Molecular gas in the bulge and ring of NGC 7331. *Astronomy and Astrophysics*, vol. 351, pp. 10-20.
- Rubin, V. C., Burbidge, E. M., Burbidge, G. R., Crampin, D. J., & Predegarst, K. H. (1965). The rotation and mass of NGC 7331. *Astrophysical Journal*, vol. 141, pp. 759.
- Sandstrom, K. M., Leroy, A. K., Walter, F., et al. (2013). The CO-to-H2 conversion factor and dust-to-gas ratio on kiloparsec scales in nearby galaxies. *The Astrophysical journal*, vol. 777, pp. 5

- Sofue, Y., Tutui, Y., Honma, M., Tomita, A., Takamiya, T., Koda, J., Takeda, Y. (1999). Central rotation curves of spiral galaxies. *The Astrophysical Journal*, vol. 523, pp. 136-146.
- Sofue, Y., & Rubin, V. (2001). Rotation curves of spiral galaxies. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, vol. 39, pp. 137-174.
- Teague, R., Guilloteau, S., Semenov, D., et al., (2016). Measuring turbulence in TW Hydrae with ALMA: methods and limitations. *Astronomy and Astrophysics*, vol. 592, pp. A49.

BIOGRAFÍAS



Ericson López. Doctor en Astrofísica (PhD) por la Academia de Ciencias de Rusia y Físico Teórico por la Escuela Politécnica Nacional. Ha realizado investigaciones post doctorales en

Brasil y Estados Unidos. Es científico colaborador del Harvard-Smithsonian Center para la Astrofísica y profesor adjunto del Departamento de Astronomía de la Universidad de Sao Paulo. Ha realizado más de treinta publicaciones científicas y varias otras publicaciones relevantes. Es Director del Observatorio Astronómico de Quito desde 1997 y miembro de la Academia de Ciencias del Ecuador. Es profesor principal de la Facultad de Ciencias de la EPN por más de 25 años, en la que imparte cursos formales de Física y Astrofísica.



Jairo Armijos. Realizó sus estudios de pregrado en Astronomía en la Universidad Estatal de San Petersburgo, Rusia. Obtuvo su título de Maestría en Astrofísica y su título de Doctorado en Astrofísica en la Universidad Autónoma de Madrid, España. Actualmente es investigador del Observatorio Astronómico de Quito.



Mario Llerena. Realizó sus estudios de pregrado en la Escuela Politécnica Nacional, obteniendo su título de Físico en el 2016. Es miembro del Observatorio Astronómico de Quito como parte de Unidades Científicas de investigación en Gravitación y Cosmología, Radioastronomía y Astrofísica de Altas Energías.



Franklin Aldás. Realizó sus estudios de pregrado en la Escuela Politécnica Nacional, obteniendo su título de Físico en el 2018. Es miembro del Observatorio Astronómico de Quito como parte de Unidades Científicas de investigación en Gravitación y Cosmología, Radioastronomía y Clima Espacial.