



Simulaciones de formación de galaxias disco barreadas

D.G. Algorry^{1,2}, M.G. Abadi^{1,2} & I. Ferrero^{1,2}

¹ *Instituto de Astronomía Teórica y Experimental IATE (CONICET-UNC)*

² *Observatorio Astronómico de Córdoba, UNC*

Contacto/ DGA: david@oac.uncor.edu

Resumen / En este trabajo presentamos un análisis de la formación y evolución de dos galaxias barreadas extraídas de las simulaciones numéricas cosmológicas hidrodinámicas GIMIC. La primera de ellas, es una galaxia con una barra central a *redshift* $z = 0$ que aparece a tiempo $t \approx 10$ Gyr coincidente con el momento en que la galaxia comienza a acretar gas desde distintas direcciones formando un anillo localizado en un plano diferente respecto del disco de la galaxia. En este tiempo, el disco preexistente transfiere su momento angular al gas y a la materia oscura, decayendo su patrón de velocidad y formando la componente barreada. En contraposición, la segunda galaxia presenta una barra formada desde el comienzo de la simulación que sobrevive hasta tiempo $t \approx 10$ Gyr, desintegrándose paulatinamente y dando lugar a una galaxia dominada por un disco a *redshift* $z = 0$. Esta desintegración es inusual y se debe a fuertes perturbaciones que sufre la galaxia debido a la proximidad con un satélite masivo a $t \sim 10$ Gyr.

Abstract / In this work we present a study of the formation and evolution of two galaxies selected from a series of numerical cosmological hydrodynamical simulations called GIMIC. The first one is a galaxy with a central bar at redshift $z = 0$ formed between $9 < t$ [Gyr] < 11 . At this time, the galaxy accretes gas from distinct directions forming a ring located in a different plane respect to the galaxy disc. This disc transfers its angular momentum to the gas and halo decaying its pattern speed and becoming a bar. The second one is a galaxy that had a bar until a time $t \sim 10$ Gyr. After this time, the bar gradually disintegrate until redshift $z = 0$ ($t = 13.6$ Gyr). This disintegration is unusual and may be due to strong perturbations originated by the proximity of a massive satellite at $t \sim 10$ Gyr.

Keywords / Simulations: Galaxies — bars: formation, evolution

1. Introducción

Las barras están presentes en más del 60% de las galaxias disco que observamos en el Universo actual. Se cree que su formación está ligada directamente a la evolución secular de la galaxia a la que pertenece. Numerosos estudios observacionales brindan información acerca de sus propiedades cinemáticas, morfológicas y fotométricas. Estos esfuerzos observacionales han sido complementados por estudios teóricos mediante el uso de simulaciones numéricas diseñadas particularmente para explorar los mecanismos dinámicos que disparan la formación y evolución de barras en galaxias. No obstante, son escasos los trabajos realizados a partir de simulaciones de N-cuerpos en donde se analice la formación de estos objetos dentro de un contexto cosmológico del modelo de materia oscura fría con constante cosmológica (Λ CDM, por sus siglas en inglés). Entre estos ejemplos podemos citar a Scannapieco & Athanassoula (2012) quienes mostraron que galaxias barreadas se pueden formar en simulaciones cosmológicas de este modelo cosmológico. Asimismo, Okamoto et al. (2014) presentan un estudio de la evolución de dos galaxias barreadas con simulaciones individuales de galaxias con masa similar a la de la Vía Láctea. El objetivo de este trabajo es analizar la formación y estabilidad de barras en el modelo Λ CDM.

2. Simulaciones Numéricas

Para llevar a cabo este trabajo, utilizamos el conjunto de simulaciones numéricas cosmológicas hidrodinámicas de alta resolución *Galaxies-Intergalactic Medium Interaction Calculation* (GIMIC, Crain et al., 2009). Las condiciones iniciales de estas simulaciones se generaron a partir de una región esférica de aproximadamente $20 h^{-1}$ Mpc de radio extraída de las simulaciones de N-cuerpos Millenium (Springel et al., 2005). Estas simulaciones siguen la evolución temporal de 5 regiones esféricas de aproximadamente $20 h^{-1}$ Mpc de radio, seleccionadas para muestrear regiones con desviaciones respecto de la densidad media del Universo de $(-2, -1, 0, +1, +2)\sigma$ a redshift $z = 1.5$, donde σ es la desviación cuadrática media de la fluctuación de la masa medida en escalas de $20 h^{-1}$ Mpc. De las 5 regiones existentes, este trabajo se focaliza en el análisis de la región 0σ con el fin de estudiar una región de densidad típica del Universo. Estas simulaciones adoptan los mismos parámetros cosmológicos que las simulaciones *Millenium*, consistentes con los datos de WMAP-1: $\Omega_m = 0.25$, $\Omega_\Lambda = 0.75$, $\Omega_b = 0.045$, $n_s = 1$, $\sigma_8 = 0.9$, $h = 0.73$. Las masas de las partículas son de $1.4 \times 10^6 h^{-1} M_\odot$ y $6.6 \times 10^6 h^{-1} M_\odot$ para los bariones y materia oscura, respectivamente.

Para identificar las galaxias utilizamos el algoritmo SUBFIND (Springel et al. (2001)) y seleccionamos sólo las galaxias centrales (es decir que no son satélites) con

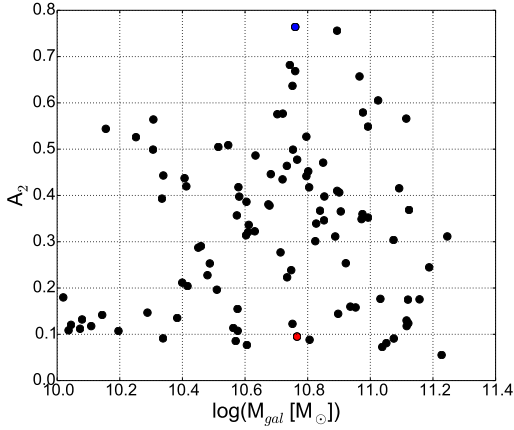


Fig. 1: Relación entre la masa estelar de la galaxia (M_{gal}) y la intensidad A_2 de las galaxias centrales de la muestra seleccionada. Las galaxias con mayor A_2 poseen barras más intensas en su centro. Los círculos rojo y azul son los dos casos analizados en este trabajo.

masa estelar $M_{gal} > 10^{10} M_{\odot}$ a *redshift* $z = 0$, no contaminadas con partículas de baja resolución. Utilizando este criterio identificamos 119 galaxias centrales con buena resolución permitiendo una estimación razonable de sus propiedades intrínsecas tales como masa, tamaño, velocidad, luminosidad, etc.

3. Análisis

En esta sección, en primer lugar describimos el criterio de identificación utilizado para identificar barras estelares en galaxias simuladas y luego realizamos un estudio detallado de la evolución de dos de las galaxias seleccionadas de la muestra. Para medir la intensidad de la barra en una galaxia, utilizamos una técnica basada en las componentes de Fourier de la distribución bidimensional de la masa (Athanasoula et al. (2013)):

$$a_m(R) = \sum_{i=0}^{N_R} m_i \cos(m\theta), \quad m = 0, 1, 2 \quad (1)$$

$$b_m(R) = \sum_{i=0}^{N_R} m_i \sin(m\theta), \quad m = 0, 1, 2 \quad (2)$$

donde N_R es el número de partículas estelares dentro de un anillo de un radio cilíndrico R , m_i es la masa de la i -ésima partícula y θ_i es el ángulo azimutal. A partir de estas dos funciones dependientes de R definimos la intensidad de la barra como la amplitud máxima relativa a la componente $m=2$

$$A_2 = \max \left(\frac{\sqrt{a_2^2 + b_2^2}}{a_2} \right). \quad (3)$$

Este parámetro puede tomar valores en el rango $[0,1]$, siendo 1 para una barra perfecta y 0 para un círculo.

La relación que existe entre la masa estelar de las galaxias y la intensidad A_2 (Fig. 1), muestra que las

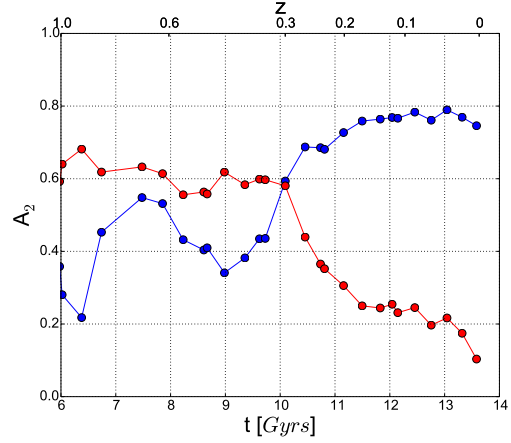


Fig. 2: Evolución de la intensidad A_2 de las dos galaxias seleccionadas. El color de las líneas corresponde con los de los círculos marcados en la Fig. 1.

galaxias con barra más intensa se encuentran en el rango de masas estelares de $10.6 \leq \log(M_{gal} [M_{\odot}]) \leq 11$.

Para realizar un estudio detallado acerca de la formación de barras seleccionamos de nuestra muestra la galaxia con mayor intensidad de barra ($A_2 \sim 0.76$), marcada en azul en la Fig. 1. El panel superior derecho de la Fig. 3 muestra la distribución espacial de esta galaxia vista de frente (rotada de tal forma que el momento angular de las partículas estelares de la galaxia apunte en la dirección del eje z) a *redshift* $z = 0$ ($t \sim 13.6$ Gyr). Esta figura muestra una galaxia disco con una masa estelar $\log(M_{gal} [M_{\odot}]) \sim 10.75$ que presenta una barra central.

La misma galaxia se muestra, a *redshift* $z = 1$ ($t \sim 6$ Gyr), en el panel superior izquierdo de la Fig. 3. En este tiempo, la galaxia seleccionada presenta un disco sin la presencia de una barra, teniendo una intensidad $A_2 \sim 0.2$. Analizando más en detalle la evolución temporal de A_2 de esta galaxia (curva azul de la Fig. 2), se observa que, si bien posee algunas oscilaciones entre 6 y 9 Gyr, la barra se desarrolla principalmente en el rango de tiempo $9 < t [\text{Gyr}] < 11$.

Entre estos tiempos la galaxia comienza a acretar gas desde diferentes direcciones formando un anillo en un plano diferente y teniendo un momento angular casi opuesto al de la componente estelar de la galaxia disco existente en ese momento. Este disco comienza a transferir su momento angular a las partículas de gas y materia oscura lo que ocasiona una pérdida del patrón de velocidad y la subsecuente formación de la barra. Para tiempos posteriores a $t \sim 11$ Gyr, los planos formados por la galaxia y el anillo de gas empiezan a alinearse quedando ambas componentes coplanares a *redshift* $z = 0$. Además, las estrellas formadas a partir de este anillo terminan formando un anillo estelar de unos 5 kpc de radio con rotación opuesta a la de la barra.

Además de esta galaxia, en la muestra seleccionada existen otras 5 galaxias en el rango de masas $10.6 < \log(M_{gal} [M_{\odot}]) < 11$ que poseen barras con $A_2 > 0.6$. Estas galaxias poseen características similares a la analizada, mostrando poca acreción de gas desde diferentes

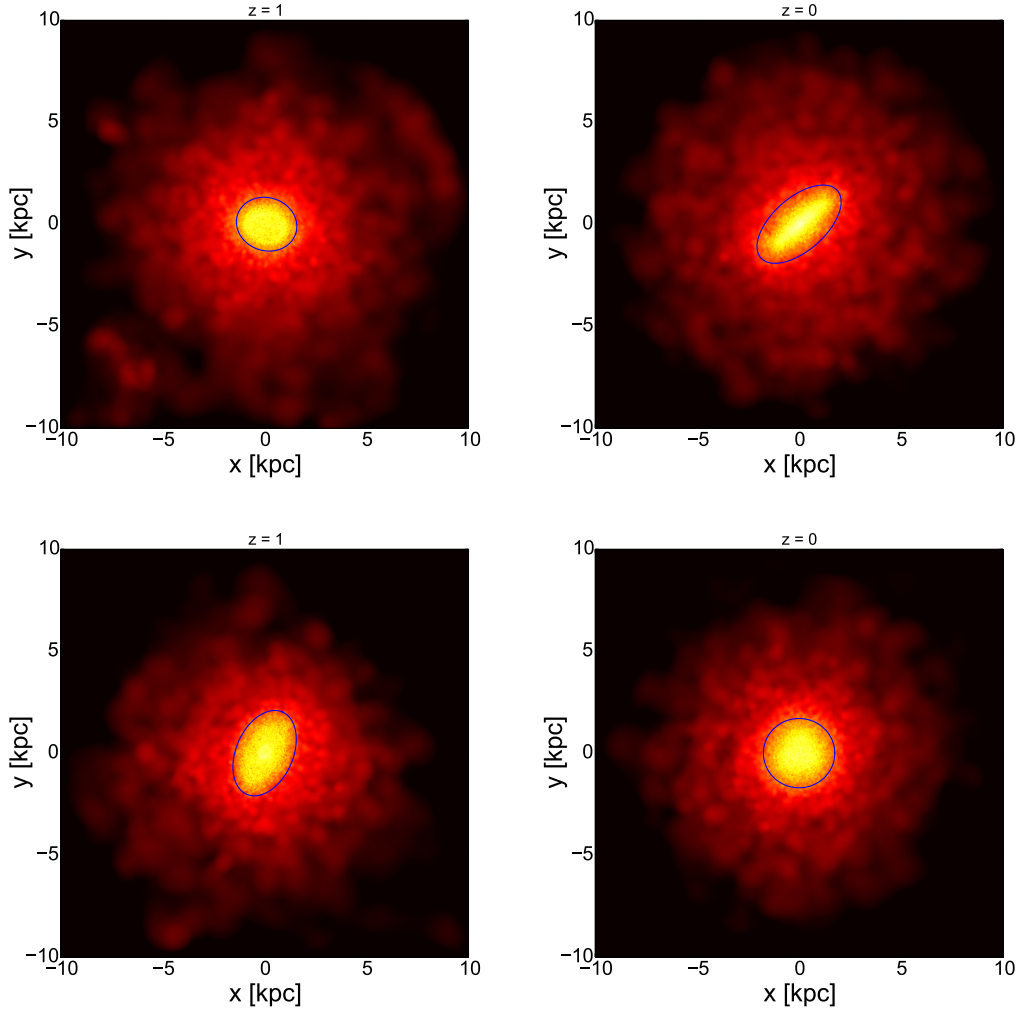


Fig. 3: Paneles izquierdos: Distribución espacial vista de frente de las galaxias seleccionadas en la Fig 1 a *redshift* $z = 1$ ($t \sim 6$ Gyr). La intensidades de las barras en este tiempo son de $A_2 \sim 0.2$ (Panel superior) y $A_2 \sim 0.62$ (Panel inferior). Paneles derechos: Distribución espacial de las mismas galaxias vista de frente pero a *redshift* $z = 0$. en este caso las intensidades son de $A_2 \sim 0.76$ (Panel superior) y $A_2 \sim 0.1$ (Panel inferior) ($t \sim 6$ Gyr).

direcciones formando anillos de gas en planos diferentes al de la componente estelar de la galaxia. Cuando esto ocurre, el disco estelar pierde su momento angular formando una barra.

Con el fin de estudiar un caso inverso, seleccionamos una galaxia (círculo rojo de la Fig. 1) con una intensidad baja $A_2 \sim 0.1$ y masa estelar similar al caso anterior seleccionado a *redshift* $z = 0$. La distribución espacial de ésta (panel inferior derecho Fig. 3), muestra una galaxia disco sin la presencia de una barra en su centro. No obstante, a *redshift* $z = 1$, la galaxia presenta una barra central con una intensidad $A_2 \sim 0.62$.

Analizando más en detalle la evolución de la intensidad A_2 de esta galaxia (curva roja de la Fig. 2), se observa que formó una barra central que se fue desintegrando gradualmente para tiempo posteriores a $t \sim 10$ Gyr (*redshift* ~ 0.3). Este decaimiento se produce por fuertes perturbaciones gravitatorias originadas por la proximidad de un satélite. En la muestra de galaxias

simuladas, esta es de las pocas que presentan este comportamiento por lo que no es usual que las barras se desintegren una vez formadas.

Referencias

- Athanassoula E., Machado R. E. G., Rodionov S. A., 2013, MNRAS, 429, 1949
 Crain R. A., et al., 2009, MNRAS, 399, 1773
 Okamoto T., Isoe M., Habe A., 2014, ArXiv e-prints
 Scannapieco C., Athanassoula E., 2012, MNRAS, 425, L10
 Springel V., et al., 2005, Nature, 435, 629
 Springel V., Yoshida N., White S. D. M., 2001, New A., 6, 79