

Formación de barras en la simulación Illustris TNG50

P.D. López¹, C. Scannapieco², S.A. Cora^{1,3} & I.D. Gargiulo¹

¹ Instituto de Astrofísica de La Plata, CONICET-UNLP, Argentina

² Departamento de Física, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, UBA, Argentina

³ Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, UNLP, Argentina

Contacto / plopez@fcaglp.unlp.edu.ar

Resumen / Las barras son estructuras muy comunes de las galaxias y están presentes en una gran fracción de las galaxias de disco. Sin embargo, no está claro por qué ciertas galaxias terminan desarrollando una estructura de barra mientras que otras galaxias con masa y morfología similares no lo hacen. En este trabajo utilizamos la simulación cosmológica magnetohidrodinámica Illustris TNG50, con el fin de identificar los procesos físicos involucrados en la formación de barras. Nos focalizamos en galaxias dominadas por una componente disco, con masa estelar en el rango $M_* \geq 10^{10} M_\odot$ a $z = 0$, seleccionando un total de 8 galaxias, 4 de las cuales poseen barra. Para las galaxias barradas, calculamos la fuerza de la barra y su tiempo de formación – que varían entre ~ 6 y 10 Gyr – y evaluamos la capacidad de interacciones y fusiones con galaxias cercanas de inducir la formación de las barras. Encontramos que las fusiones no pueden explicar la formación de las barras en los 4 casos analizados, sugiriendo que su formación fue secular. El análisis de una muestra mayor de galaxias permitirá estimar la fracción relativa de barras formada a partir de procesos internos y externos.

Abstract / Bars are very common structures of galaxies and are present in a large fraction of disc galaxies. However, it remains unclear why certain galaxies end up developing a bar structure whereas other galaxies with similar mass and morphology do not. In this work we use the cosmological, magnetohydrodynamical simulation Illustris TNG50, in order to identify the physical processes involved in the formation of bars. We focus on disc-dominated galaxies of stellar mass $M_* \geq 10^{10} M_\odot$ at $z = 0$, and select a total of 8 galaxies, 4 of which have bars. For the barred galaxies, we calculate the bar strength and formation time – which varies between ~ 4 and 10 Gyr – and assess the ability of interactions and fusions with nearby galaxies to induce the formation of bars. We find that mergers can not explain the formation of the bars of our barred galaxies, suggesting that their formation was secular. The analysis of a larger sample of galaxies will allow to estimate the relative fractions of bars formed via external and internal processes.

Keywords / galaxies: formation — galaxies: evolution — methods: numerical

1. Introducción

Aproximadamente dos tercios de las galaxias espirales en el Universo local poseen barras estelares (Grosboel et al. 2004; Barazza et al. 2008), son estructuras elongadas y simétricas contenidas en discos estelares bien formados. Se sabe que las barras juegan un rol fundamental en la evolución secular de las galaxias que las contienen, principalmente redistribuyendo el momento angular de la componente bariónica y de materia oscura. A su vez, interactúan dinámicamente con otras componentes como el disco, el bulbo, si es que poseen, y el halo de materia oscura (Debattista & Sellwood, 2000).

Si bien en la literatura existen trabajos que analizan los parámetros que caracterizan a las barras y cómo estas influyen en la evolución de las galaxias (Algorry et al., 2017), poco se entiende sobre los procesos físicos involucrados en su formación. Las barras se pueden crear debido a inestabilidades en el disco estelar que pueden ser producidas por procesos internos propios de las galaxias (Zana et al., 2017), o por procesos externos como los que se producen a través de interacciones con otras galaxias como fusiones o *flybys* (Lang et al., 2014) o por transformaciones dentro de cúmulos de galaxias (Łokas et al., 2016).

Varios trabajos han analizado estas estructuras mediante el uso de simulaciones de galaxias aisladas (Athanasoula, 2003) y, más recientemente, utilizando simulaciones en un contexto cosmológico (Scannapieco & Athanasoula, 2012). En este trabajo utilizamos la simulación magnetohidrodinámica TNG50 (Nelson et al. 2019; Pillepich et al. 2019) del proyecto IllustrisTNG (Pillepich et al., 2017) con el objetivo de analizar en mayor detalle la formación de barras en el contexto del modelo cosmológico estándar (Λ CDM).

A continuación, la Sección 2 describe la simulación y los métodos utilizados para nuestro análisis; la Sección 3 discute los resultados obtenidos; y en la Sección 4 se presentan las conclusiones.

2. Simulación y análisis

La simulación TNG50 provee una buena combinación de volumen y resolución permitiendo estudios de la estructura galáctica e involucrando gran cantidad de galaxias. TNG50 fue corrida con AREPO (Springel, 2010), un código cosmológico magnetohidrodinámico que sigue la evolución no colisional de las componentes oscura y estelar en conjunto con la evolución magnetohidro-

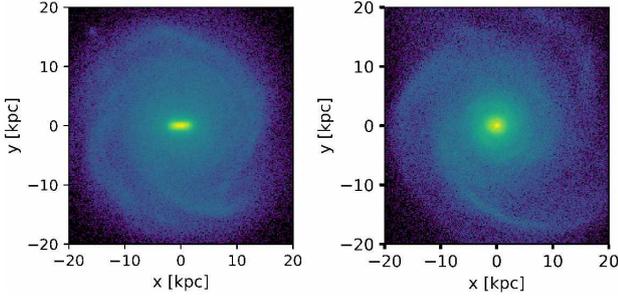


Figura 1: Proyección en el plano del disco xy (*face-on*) de la densidad de masa estelar para la galaxia barrada B_1 (*panel izquierdo*) y sin barra NB_1 (*panel derecho*), a $z=0$.

dinámica del gas. El modelo de formación de galaxias incluye enfriamiento radiativo, formación estelar, campos magnéticos, retroalimentación química y energética por supernovas y acreción sobre agujeros negros. TNG50 simula un volumen de 51.7 Mpc comóviles de lado, y posee 100 salidas entre corrimientos al rojo (*redshifts*) $z = 20.05$ y $z = 0$.

Se seleccionaron galaxias en un rango de masas viriales de $3 - 9 \times 10^{11} M_\odot$ a $z = 0$, y con estructura discoidal. Para esto último, se calculó el cociente entre la masa del disco estelar y la masa estelar total (D/T) a partir de la distribución del parámetro $\epsilon = j_{z,i}/j_{\text{circ}}$, donde $j_{z,i}$ y j_{circ} denotan el momento angular de cada partícula estelar en el eje \hat{z} y el momento angular correspondiente para una órbita circular, respectivamente. Este parámetro permite una identificación de partículas estelares compatibles con una rotación ordenada en una estructura de tipo discoidal (Scannapieco et al., 2009). En este trabajo consideramos como galaxias de disco aquellas con $D/T \gtrsim 0.5$. En particular, las galaxias seleccionadas poseen valores para el D/T en el rango $\sim 0.5 - 0.66$.

La identificación de la barra se realizó a través del desarrollo de Fourier de la densidad de masa estelar proyectada en el plano del disco (xy):

$$\Sigma(R, \theta) = a_0(R) + \sum_m [a_m(R) \cos(m\theta) + b_m(R) \sin(m\theta)], \quad (1)$$

siendo θ el ángulo azimutal y R el radio proyectado. Cada término de la expansión está dado por:

$$\begin{aligned} a_m(R) &= \sum_i m_i \cos(m\theta_i), \quad m \geq 0, \\ b_m(R) &= \sum_i m_i \sin(m\theta_i), \quad m > 0, \end{aligned} \quad (2)$$

donde m_i es la masa de cada partícula estelar y m indica los distintos modos de la expansión de Fourier. Para realizar la descomposición se tomaron anillos de ancho 0.1 ckpc, desde el centro galáctico hasta un radio de 7 ckpc*. La amplitud de los modos de Fourier está definida como $I_m = \sqrt{a_m^2 + b_m^2}$. De esta forma, se estimó la fuerza de la barra a partir del cociente $A_2 \equiv I_2/I_0$, siendo $I_0 = a_0$. El máximo del perfil radial de A_2 , $A_{2,\text{max}}$,

*Debido a que las galaxias analizadas poseen masas similares, se espera que las barras, si existen, estén contenidas en este radio.

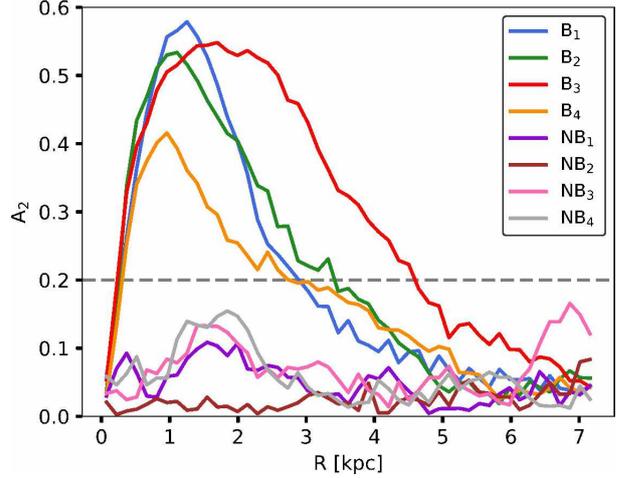


Figura 2: Perfil radial del parámetro A_2 de las galaxias con barra y sin barra, a $z = 0$. La línea a rayas horizontal gris corresponde al valor límite de A_2 , 0.2, por encima del cual se considera la presencia de una barra.

permite identificar galaxias con barra – si $A_{2,\text{max}} > 0.2$ – y sin barra – en caso contrario**. En este trabajo analizamos 4 galaxias con barras a $z = 0$, denominadas B_1 , B_2 , B_3 y B_4 , y 4 galaxias sin barra, a las que llamamos NB_1 , NB_2 , NB_3 y NB_4 .

A modo de ejemplo, la Fig. 1 muestra la proyección *face-on* de la densidad estelar de masa a $z = 0$ para las galaxias B_1 (panel izquierdo) y NB_1 (panel derecho). En el caso de B_1 , se puede apreciar claramente la componente de barra en la zona central. En la Fig. 2 se muestra el perfil radial del parámetro A_2 para las 8 galaxias simuladas, a $z = 0$, donde se distinguen claramente las galaxias barradas de las galaxias sin barra.

3. Resultados

3.1. Tiempos de formación las barras

Con el fin de evaluar los procesos físicos que dieron lugar a la presencia de la barra es necesario conocer su tiempo de formación. Para ello, se calculó la evolución temporal del valor máximo del parámetro A_2 , y se definió como tiempo de formación de la barra aquel en el cual el valor de $A_{2,\text{max}}$ supera el valor límite de 0.2 por primera vez, verificando que $A_{2,\text{max}}$ posea un crecimiento sostenido para tiempos posteriores. La Fig. 3 muestra la evolución temporal de $A_{2,\text{max}}$ para las cuatro galaxias con barra; así como los tiempos de formación, t_{bar} (indicados con las rayas verticales). Esta figura muestra que las barras poseen variedad en su crecimiento a lo largo del tiempo, así como en su tiempo de formación característico, el cual se encuentra en el rango 3.7 – 10.6 Gyr.

**La presencia de las barras también fue confirmada analizando la fase $\phi_b = \arctan(b_2/a_2)$, la cual se mantiene constante dentro del radio de la barra.

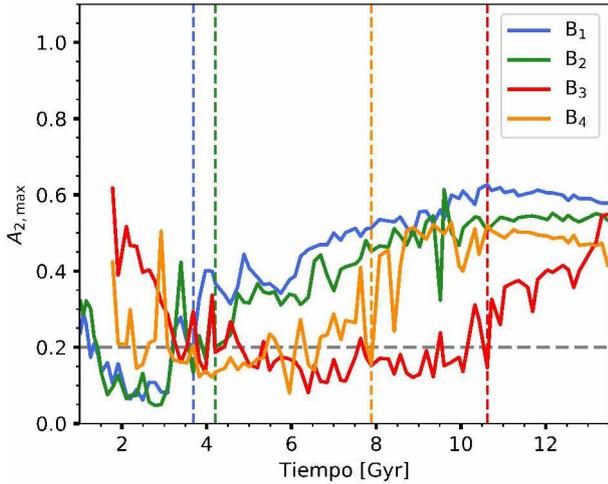


Figura 3: Evolución temporal del valor máximo del parámetro A_2 para las galaxias con barra. La línea a rayas horizontal gris indica el valor límite considerado para establecer la presencia de una barra (0.2). Las líneas a rayas verticales indican los tiempos de formación de la barra de cada una de las galaxias, luego del cual $A_{2,max}$ crece sostenidamente.

3.2. Fusiones de satélites y su efecto

Una vez identificados los momentos de formación de las barras, se analizaron las fusiones sufridas por cada una de las galaxias con galaxias satélites, buscando posibles correlaciones con la formación de las barras. Para ello, centramos nuestro análisis en las fusiones ocurridas en los tiempos anteriores a t_{bar} , y seleccionamos aquellas donde la masa total de las galaxias satélites representan al menos un 2 % de la masa de la galaxia barrada central.

La Fig. 4 muestra la distancia al centro galáctico de cada uno de los satélites de estas características, en función del tiempo; no se incluyó B_2 ya que no posee fusiones acordes a los criterios descriptos. La curva negra marca la evolución del radio virial de la galaxia barrada, y la línea vertical indica el tiempo de formación de la barra. Se encontró que la masa de los satélites fusionados representan como máximo un 6 % de la masa de las correspondientes galaxias centrales, y ocurrieron hace más de ~ 1.4 Gyr previos a t_{bar} . Esto parece indicar que las fusiones sufridas por las galaxias analizadas no fueron relevantes en la formación de sus barras.

4. Conclusiones

En este trabajo utilizamos la simulación cosmológica TNG50 con el fin de estudiar los procesos de formación de barras galácticas. Se seleccionó una muestra de 8 galaxias de disco, 4 de las cuales poseen barras a $z = 0$. Para las galaxias barradas, se calcularon sus tiempos de formación y fuerza a lo largo del tiempo, evaluando la influencia de fusiones como disparadores de la formación de barras. Se encontró una gran variedad en

el tiempo de formación de las barras, t_{bar} , en el rango $\sim 4 - 10$ Gyr. El estudio de las fusiones sufridas por las galaxias mostró que las galaxias barradas sólo experimentaron fusiones menores anteriores a t_{bar} , y finali-

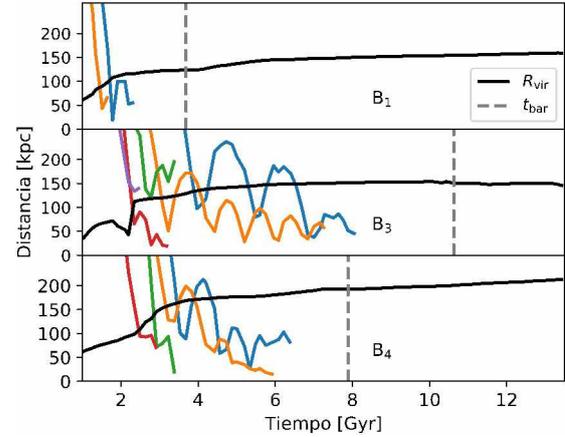


Figura 4: Evolución temporal de la distancia de distintas galaxias satélites respecto al centro galáctico de las galaxias barradas. Cada curva indica la evolución de un satélite, y finaliza en el momento de la fusión; la curva negra indica el R_{vir} en función del tiempo.

zaron al menos ~ 1.4 Gyr antes de la formación de las barras. Esto sugiere que, en nuestra muestra, las barras se formaron secularmente. Como continuación de este trabajo se extenderá el análisis a una muestra mayor de galaxias, con el fin de determinar la fracción relativa de barras formadas a través de procesos internos y externos.

Agradecimientos: Este trabajo ha sido realizado con financiamiento de CONICET (PIP-2876), Agencia Nacional de Promoción de la Investigación, el Desarrollo Tecnológico y la Innovación (Agencia I+D+i, PICT-2018-3743), y Universidad Nacional de La Plata (G11-150), Argentina.

Referencias

- Algorry D.G., et al., 2017, MNRAS, 469, 1054
 Athanassoula E., 2003, MNRAS, 341, 1179
 Barazza F.D., Jogee S., Marinova I., 2008, ApJ, 675, 1194
 Debattista V.P., Sellwood J.A., 2000, ApJ, 543, 704
 Grosboel P., Patsis P., Pompei E., 2004, VizieR Online Data Catalog
 Lang M., Holley-Bockelmann K., Sinha M., 2014, ApJL, 790, L33
 Nelson D., et al., 2019, MNRAS, 490, 3234
 Pillepich A., et al., 2017, MNRAS, 473, 4077
 Pillepich A., et al., 2019, MNRAS, 490, 3196
 Scannapieco C., Athanassoula E., 2012, MNRAS, 425, L10
 Scannapieco C., et al., 2009, MNRAS, 396, 696
 Springel V., 2010, MNRAS, 401, 791
 Zana T., et al., 2017, MNRAS, 473, 2608
 Lokas E.L., et al., 2016, ApJ, 826, 227