

Simulaciones numéricas de la caída de asociaciones de galaxias enanas al Halo de la Vía Láctea

Numerical simulations of the fall of associations dwarfs galaxies at the halo of Milky Way

José Benavides Blanco, Rigoberto Casas Miranda

Grupo de Astrofísica, Universidad Nacional de Colombia

Aceptado Diciembre 2014; Publicado en línea Marzo 2015

ISSN 2256-3830

Resumen

El Grupo Local, dominado por las galaxias principales la Vía Láctea y la galaxia de Andrómeda, presenta un escenario en el cual se observa un conjunto de galaxias enanas satélite (incluyendo otras más recientes denominadas galaxias ultra tenues) que orbitan alrededor de alguna de estas dos galaxias. Las galaxias satélite de la Vía Láctea no presentan una distribución isotrópica sino que por el contrario la mayoría se encuentran sobre un plano casi perpendicular al plano del disco de la galaxia. Este se ha denominado el disco de satélites (DoS) o más recientemente el Vast Polar Structure of Satellites Galaxies (VPOS). Actualmente no se cuenta con un modelo teórico que explique correctamente tanto la abundancia como la distribución espacial de estos objetos dentro del Grupo Local, lo cual se constituye en uno de los grandes problemas de la astrofísica actual. Se presenta un estudio mediante simulaciones numéricas Newtonianas de N-cuerpos sobre la posible formación del disco de satélites de la Vía Láctea como un grupo de galaxias enanas, que conforman una asociación, que ingresa al halo de materia oscura de la Vía Láctea siguiendo órbitas parabólicas. Las condiciones iniciales se han creado con ZENO y las simulaciones se han desarrollado con Gadget2.

Palabras claves: Vía Láctea, Galaxias enanas, Materia oscura, Disco de satélites.

Abstract

The Local Group is dominated by the two principal galaxies the Milky Way and the Andromeda galaxy, they presented a stage in which a set of satellite dwarf galaxies observed (including the more recent objects called ultra faint dwarf galaxies) orbiting one of two principal galaxies. The satellite galaxies of the Milky Way don't present an isotropic distribution but instead most are on a plane almost perpendicular to the galaxy disk plane. This has been called the disc of satellites (DoS) or more recently Vast Structure of Polar Satellites Galaxies (VPOS). Actually don't has a theoretical model that explain, successfully, both the abundance like a spatial distribution of these objects in the Local Group, this constituted one of the major problems of modern astrophysics. A study is presented using numerical simulations Newtonian N-body on the possible formation of disk satellites of the Milky Way as a group of dwarf galaxies, which form an association, entering the dark matter halo of the Milky Way following orbits parabolic. The initial conditions were created with ZENO and simulations have been developed using Gadget2.

Keywords: Milky Way, Dwarf galaxies, Dark matter, Disc of satellites.

* joabenavidesbl@unal.edu.co

* racasasm@unal.edu.co

1. Introducción

Las galaxias enanas son estructuras estelares pequeñas, que presentan poco brillo superficial y bajo contenido estelar con relación a su masa total (Mateo, 1998), son pobres en metales dado que en su mayoría están compuestas por estrellas viejas (Da costa, 1999) (Lokas 2008, 2011). La gran importancia de las galaxias enanas radica en que son la población más dominante en el universo local y constituyen una herramienta fundamental para comprender los procesos de formación y evolución de galaxias más luminosas como la Vía Láctea, ya que según el modelo de evolución jerárquico las galaxias de gran tamaño se formaron a partir de mezclas o acreción entre galaxias menores. Esto las convierte en objetos importantes para entender el universo desde sus comienzos. Adicionalmente, estas galaxias enanas se caracterizan por tener un número de estrellas bajo con relación a sus masas totales que es del orden de 10^7 a $10^8 M_{\odot}$. Esta falta de masa luminosa se ha interpretado hasta ahora mediante un halo de materia oscura que la envuelve. A partir de sus velocidades de dispersión se puede concluir que sus radios de masa-luminosidad sobrepasan en orden de magnitud a los cúmulos globulares que es del orden de $10 - 20 M_{\odot}/L_{\odot}$ (Longain M., 1998), lo cual indicaría que una cantidad importante de materia oscura las domina. Sin embargo, estos valores altos de la razón masa-luminosidad de las enanas esferoidales podrían estar sobreestimados si se tiene en cuenta que dichos objetos no necesariamente se encuentran en equilibrio virial (Kroupa, 1997; Casas et al., 2012). En ese caso, las enanas carecerían o tendrían muy poca materia oscura.

Como el sistema vecino más cercano, las galaxias enanas en el grupo local pueden, y deben, ser estudiadas en gran detalle. De otro lado la importancia de estudiar las galaxias enanas del grupo local, además de las razones arriba expuestas, es debido a la discrepancia que existe entre las predicciones arrojadas por el modelo cosmológico de materia oscura fría y los datos observacionales, ya que, según el modelo, el orden de magnitud del número de galaxias enanas satélites de la Vía Láctea debería ser del ~ 300 , lo cual es muy superior al detectado actualmente en las observaciones que es de ~ 40 satélites (Klyping A. Kravtsov A. and Valenzuela O., 1999)

Es un hecho observacional bien conocido que las galaxias satélite más luminosas de la Vía Láctea presentan una distribución espacial anisotrópica (Metz, Kroupa & Jerjen, 2007). La exploración de este fenómeno reveló que el sistema de satélites asociado a la Vía Láctea obedece a una distribución espacial mediada por un plano virtual denominado el disco de satélites (DoS) (Metz, Kroupa, Jerjen, 2009) y más recientemente VPOS (vast polar structure) donde se han incluido otros objetos detectados recientemente como las galaxias enanas ultra tenues (UFDG) (Metz, Kroupa & Liebeskind, 2008). Este disco es una construcción geométrica a través de la cual las enanas satélite de la Vía Láctea orbitan. Metz, Kroupa y Jerjen (2007) demostraron con base en datos observacionales que el DoS se encuentra inclinado $\sim 88^{\circ}$ respecto al plano galáctico inducido por el disco de la Vía Láctea.

2. Metodología

Para el desarrollo de la propuesta se consideró un modelo en el cual las galaxias enanas ingresan en asociaciones, como las observadas en el filamento 14, (Mateo, 1998) al grupo local por efecto de precipitación por interacción gravitacional con los potenciales de la Vía Láctea y la M31 (en sus componentes de materia luminosa y materia oscura). Dado que la distribución del conjunto de galaxias que rodea a la M31 es similar al de la Vía Láctea, se considera que los resultados obtenidos del estudio de esta última podrían aplicarse tanto a la M31 como a otras galaxias. Se trata de estudiar galaxias enanas cuya luminosidad es baja ($L \leq 10^8 M_{\odot}$) y del tipo esferoidal (ya que la gran mayoría presentan esta forma) (Rocha M., Annika H., Bullock J. 2012). En particular se decidió analizar el problema de la caída de una asociación formada por seis galaxias enanas modeladas como esferas de Plummer, a partir de un perfil de potencial-densidad de la forma:

$$\phi_{plum}(r) = \frac{3M}{4\pi b^3} \left(1 + \frac{r^2}{b^2}\right)^{-\frac{5}{2}} \quad (1)$$

Siendo b el radio de Plummer. Para modelar los halos de materia oscura de la Vía Láctea y esferoide se utilizó un perfil de potencial esférico tipo Hernquist de la forma:

$$\phi_{Hern}(r) = -\frac{GM}{r+a} \quad (2)$$

Donde a es la longitud de escala del esferoide. Para el modelo del disco se utilizó un perfil de densidad de tipo exponencial (Springel and White, 1999; Springel et al., 2005) de la forma:

$$\rho_{disk}(R, z) = \frac{\Sigma(R)}{2z_0} \operatorname{sech}^2\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (3)$$

Dónde:

$$\Sigma(R) = \frac{M_d}{2\pi R_d^2} e^{-\frac{R}{R_d}} \quad (4)$$

Siendo M_d la masa del disco, R_d la longitud de escala radial y $\operatorname{sech}^2\left(\frac{z}{z_0}\right)$ representa la distancia vertical, (figura 1). Las condiciones iniciales para la Vía Láctea se desarrollaron en Zeno (Barnes, 2013) y posteriormente se realizó el proceso de virialización en GADGET-2 (Springer, 2005).

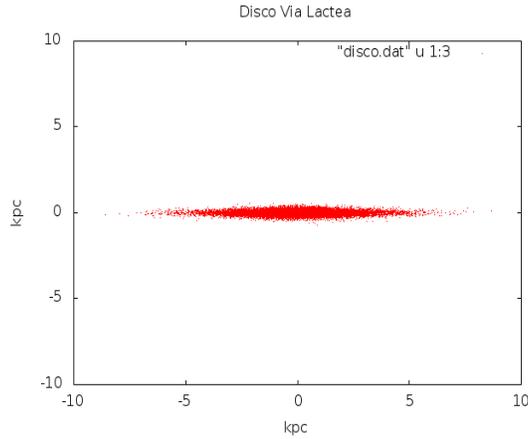


Figura 1. Vista lateral de una simulación del disco de la Vía Láctea, modelado a partir de un perfil de tipo exponencial.

Para el desarrollo del modelo se tuvieron en cuenta las siguientes características de cada uno de los cuerpos que interactúan, La Vía Láctea y las asociaciones de galaxias enanas (Tabla 1).

Tabla 1. Características de la Vía Láctea (Bournaud F & Duc P., 2006) y la asociación de galaxias enanas (Casas R, Arias V., Peña K & Kroupa P., 2012) utilizada para el desarrollo de las simulaciones.

Características Vía Láctea	
Masa del halo (M_H)	$9.054 \times 10^{11} M_\odot$
Radio del halo (R_H)	~ 280 kpc
Masa del disco (M_D)	$5 \times 10^{10} M_\odot$
Radio del disco (R_D)	15 kpc
Masa del bulbo (M_b)	$2 \times 10^{10} M_\odot$
Radio del bulbo (R_b)	~ 6 kpc

Características asociación	
Masa del Plummer (M_p)	$3 \times 10^7 M_\odot$
Radio del Plummer (R_p)	0.3 kpc

Como se mencionó la geometría del escenario para la interacción de las galaxias enanas con la Vía Láctea siguiendo una órbita parabólica. Teniendo en cuenta los parámetros orbitales (Van de Kamp, 1963) de posiciones y velocidades para la asociación progenitora.

$$r = \frac{p}{1 + e \cos\theta} \quad (5)$$

Con p el parámetro de impacto y e la excentricidad de la órbita.

La velocidad Radial:

$$v_r = \sqrt{\frac{\mu}{p}} \sin(\theta) \quad (6)$$

La velocidad circular:

$$v_\theta = \sqrt{\frac{\mu}{p}} [1 + \cos(\theta)] \quad (7)$$

Siendo μ el parámetro gravitacional dado por:

$$\mu = G(M + m) \quad (8)$$

Con M y m las masas de la Vía Láctea y de la asociación, respectivamente.

Se desarrollaron cinco simulaciones de N-cuerpos utilizando GADGET-2 y `combine_galaxies.h`, un código desarrollado en C++ (Casas R. 2012) que permite juntar los dos objetos (galaxia anfitriona y asociación) asignando las condiciones iniciales del problema propuesto en cada una de las simulaciones realizadas. Todas las simulaciones fueron ejecutadas en un rango de tiempo de 10 Gy, tomando en cuenta que el tiempo de Hubble para la edad del universo es del orden de 13.7 Gy. Los rangos de distancias para las asociaciones fueron pensados a partir de la revisión realizada por Casallas (2012) y tomando como base los datos de Mateo (1998) en el cual se registran una serie de propiedades de asociaciones de galaxias enanas periféricas al grupo local pertenecientes al filamento 14, cuyas distancias radiales se encuentran entre los 1.37 y los 7.9 Mpc (Mateo M., 1998).

3. Resultados y discusión

Del desarrollo de las simulaciones de N-cuerpos realizadas en Gadget-2 para la caída de una asociación progenitora de seis galaxias enanas de tipo esferoidal (figura 2) modeladas con un perfil de Plummer con radios de 0.3 kpc y masas de $3 \times 10^7 M_\odot$ y `softenig lengths` de 0.007 kpc (Casas R, Arias V., Peña K & Kroupa P., 2012).

A partir de los valores de masas de todos los objetos se calculó el valor del parámetro gravitacional μ de $1.3 \times 10^{32} \text{ Nm}^2/\text{kg}$. Con la excentricidad para una órbita parabólica de e de 1 se calculó el valor del parámetro de impacto a partir de los valores de posición de la asociación. Tomando valores iniciando a una distancia radial de 8 Mpc y posteriormente se tomaron valores más cortos.

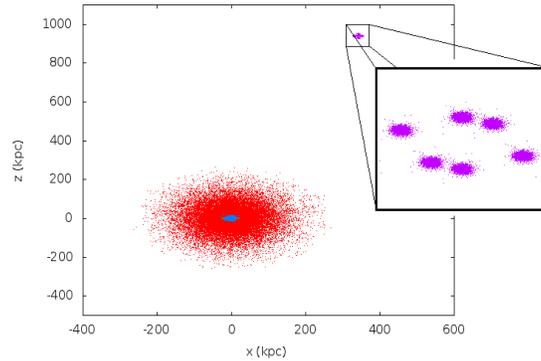


Figura 2. Asociación de seis galaxias enanas esferoidales a una distancia de 1 Mpc de la Vía Láctea.

Con las condiciones de posición calcularon las velocidades circular y radial de la asociación haciendo uso de las ecuaciones (6) y (7) de las cuales se obtienen las velocidades iniciales totales del grupo para la órbita propuesta. Algunos de los valores utilizados en las simulaciones (con $\theta = 70^\circ$) se muestran en la tabla 2.

Tabla 2. Parámetros iniciales para la simulación de la caída de la asociación progenitora al halo de la Vía Láctea.

Número de simulación	Distancia (Mpc)	Parámetro de impacto (kpc)	Velocidad Radial (km/s)	Velocidad circular (km/s)
1	8	1,07E+04	18,58	26,53
2	4	5,37E+03	26,28	37,52
3	3	4,03E+03	30,34	43,33
4	2	2,68E+03	37,16	53,07
5	1	1,34E+03	52,55	75,05

Todas las simulaciones fueron ejecutadas con un tiempo de simulación de 10 Gy. De los resultados obtenidos solo aquellas asociaciones ubicadas dentro de los 2 Mpc llegan por lo menos al pericentro de la órbita. Aquellas que se encontraban más allá de esta distancia requieren un tiempo que sería superior a un tiempo de Hubble para poder ingresar al halo de la Vía Láctea, siguiendo los parámetros orbitales propuestos.

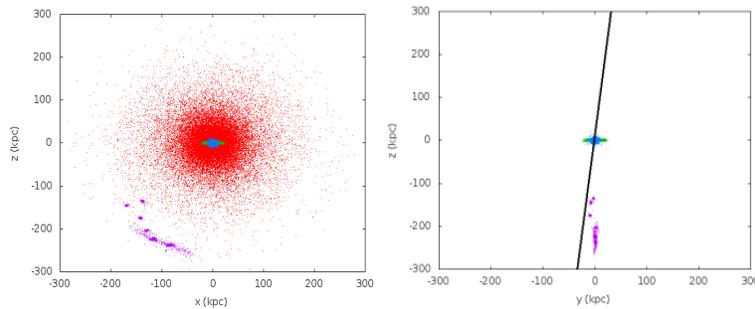


Figura 3: Interacción de la asociación de galaxias enanas con el halo de la Vía Láctea para una distancia inicial de 1 Mpc.

Dentro de los resultados previos se pueden observar (figura 3) distribuciones de las galaxias satélite de las cuales algunas mantienen su forma esferoidal mientras que otras presentan cambios morfológicos, tal y como el que presentan algunas galaxias como la Nube de Magallanes (Mateo M., 1998). Por otro lado se observa que la asociación mantiene su distribución alrededor del plano xz, lo cual es importante en términos de una distribución anisotrópica (Kroupa, 2005) como se espera para el caso del disco de satélites de la Vía Láctea y la Galaxia Andrómeda.

4. Conclusiones

Tomando en cuenta los resultados obtenidos en las primeras simulaciones realizadas, y teniendo en cuenta que la geometría fue propuesta para una trayectoria parabólica, no es posible admitir el modelo de formación de galaxias satélite a partir de la acreción de galaxias que ingresan al halo de materia oscura de la Vía Láctea para asociaciones ubicadas a distancias más allá de los 2 Mpc, debido a que su tiempo de caída es superior a un tiempo de Hubble para la edad del universo.

Debido a que las asociaciones de galaxias enanas periféricas al grupo local presentan valores de velocidades radiales reportados entre 11 y 42 km/s (Mateo M., 1998) las cuales están dentro del orden de las calculadas en este trabajo, podrían considerarse como posibles futuros candidatos a progenitores para ingresar al halo de la Vía Láctea siguiendo este tipo de órbitas, pero esto llevaría a tiempos de caída superiores a 30 Gy.

Partiendo de los resultados obtenidos en esta parte del trabajo, posteriormente se revisarán resultados obtenidos incluyendo halos de materia oscura en las galaxias enanas de la asociación progenitora. A partir de los resultados que se obtengan se podría suponer que las asociaciones que eventualmente podrían haber dado origen al disco de satélites de la Vía Láctea hubiesen tenido condiciones orbitales diferentes a las asociaciones conocidas actualmente.

5. Agradecimientos

Este trabajo ha sido apoyado por Colciencias a través del proyecto Jóvenes Investigadores 2014-2015. Se contó, además, con la colaboración de otros miembros del grupo de investigación de astrofísica de la Universidad Nacional de Colombia, Bohórquez O., Camargo Y. y Castellanos D.

6. Referencias bibliográficas

- [1] Bartlett R, Charlton J. *Comparison of N-Body Simulations to Statical Observations of Galaxy Pairs*. ApJ, **Vol 449**, 1995, p. 497.
- [2] Bournaud, F. and Duc, P. A. From tidal dwarf galaxies to satellite galaxies. Astronomy & Astrophysics manuscript no. TDG, 2013, p. 17
- [3] Binney, J, Tremaine, S. Galactic Dynamics Second Edition. Princeton Univ. Press. Princeton, NJ USA, 2008, 1994, p. 856.
- [4] Casallas A. *Estudio de la formación del disco de satélites de la Vía Láctea (DoS) como un grupo de progenitores que entra al halo de la Galaxia*. Bogotá, 2012, Trabajo de grado (Maestría en Ciencias-Física). Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias. Departamento de física.
- [5] Casas R., Arias V., Peña K. & P Kroupa. *Dwarf spheroidal satellites of the Milky Way from dark matter free tidal dwarf galaxy progenitors: maps of orbits*. MNRAS, **Vol 424**, 2012, p. 1941-1951.
- [6] Da Costa G. *The Dwarf Spheroidal Galaxies in the Galactic Halo*. In Gibson, B. K., Axelrod, R. S. and Putman, M. E., **Vol 165**, Society of the Pacific Conference Series, Page 153.
- [7] Klenssen R and Kroupa P. *Dwarf Spheroidal Satellite Galaxies without Dark Matter: Results from two different numerical techniques*. ApJ, **Vol 498**, 1998, p. 143-155,
- [8] Klyping A. Kravtsov A. and Valenzuela O. "where are the missing galactic satellites?". ApJ. Vol 522, 1999, p. 82-92
- [9] Kroupa, C.Theis, and C. M. Boily. *The great disk of milky-way satellites and cosmological sub-structures*. Astronomy and Astrophysics, 2005, **431(2)**, p. 517–521.
- [10] Li Y.& Helmi A. *Infall of substructures onto a Milky Way-like dark halo*. MNRAS, **Vol 385**, 2008, p 1365-1373
- [11] Lokas, E. L. Dark matter in dwarf galaxies of the Local Group, 2011, ArXive-prints.
- [12] Malcon S. Longain. Galaxy formation. University of Cambridge. United Kingdom. 1998, p. 536.
- [13] Sawala T. *Simulation of Dwarf Galaxy Formation*. Tesis de maestría, 2011, München, Ludwig Maximilians Universität, An der Fakultät für Physik.
- [14] Springel V. *The cosmological simulation code GADGET-2*. MNRAS, **Vol 365**, 2005, p 1105-1134.
- [15] Van de Kamp, P. Elements of Astromechanics. .H. Freeman, San Francisco, California, 1963. P.