"COULD A COLLISION BETWEEN A GHOST GALAXY AND THE MILKY WAY BE THE ORIGIN OF THE VPOS OR DOS? "

> Omar Bohórquez Pacheco Dr. Rigoberto Casas Miranda

Departamento de física Universidad Nacional de Colombia Bogotá D.C VII Astronomía Dinámica en Latinoamérica AdeLA2016@BOG Septiembre 2016

Resumen

Determinar el origen de las galaxias enanas esferoidales satélite de las galaxias dominantes del grupo local (Vía Láctea y Andrómeda) y el por qué de su particular distribución espacial es uno de los grandes retos en la astrofísica moderna. En general estas galaxias se encuentran distribuidas en un plano que esta dispuesto de forma prácticamente perpendicular al plano de la galaxia dominante, este plano recibe el nombre de disco de satélites (DoS).

Las predicciones realizadas por los modelos estándar de la astrofísica en la actualidad para estos objetos (CDM) predicen una distribución de tipo espacial que es muy diferente a la encontrada en las observaciones, por las razones expuestas anteriormente se lleva a cabo un trabajo que realiza simulaciones numéricas de N-cuerpos con el software Gadget2, para determinar si es posible que el origen de las galaxias satélite de las galaxias dominantes del grupo local se pudieran originar a través de la colisión de dos galaxias de disco.

Grupo Local



Fig. 1 Esquema representativo de la disposición espacial de algunos de los objetos del grupo local.

Galaxias Enanas



Fig. 2 Galaxia Enana de Fornax



Fig. 3 Galaxia Enana NGC 4449

Galaxias Enanas satélites de la Vía Láctea



Fig. 4 Ubicación espacial de algunas Galaxias Satélite de la vía láctea

Fig. . 5 Distribución radial de los satélites de la Vía Láctea, en la parte inferior se muestra la frecuencia a acumulada, se aprecia la acumulación de satélites en los primeros 100 Kpc (McConnachie and Irwin, 2006).

Disco de satélites de la Vía Láctea (DoS)



Fig. 6 Aquí se presentan todas las galaxias satélite dentro de unos 250 kpc alrededor de la MW, El disco galáctico del MW se ve casi de canto, la dirección del polo norte galáctico es hacia arriba, Los satélites .MW con movimientos propios conocidos y velocidades radiales se muestran como círculos de colores. Los satélites rojos se están alejando del observador, los azules se están acercando al observador. Kroupa et al, 2014.



Fig. 7 Imagen ilustrativa de la posible forma del plano que se ajusta a la distribución de disco de las galaxias satélite de la vía láctea Tomada de http://www.newscientist.com/article/.

Hipótesis de formación del DoS

- Materia oscura fría (CDM)
- Formación por acreción (Caída de asociaciones) Mateo (1996)
- Encuentros cercanos (Colisión galáctica) Pawlowski et al. (2011)



Fig. 5 Isotropía materia oscura fría (Izquierda), Anisotropía Kroupa et al (Derecha).

Modelo de formación del DoS

 Este trabajo se fundamenta en el modelo en el cual la vía láctea hace miles de millones de años interactuó con una galaxia de disco (Ghost Galaxy) cuya masa se considera mucho menor que la de la Vía Láctea, esta interacción genero unas colas de marea que se consideran como las posibles causantes de las galaxias satélite de la vía láctea. Después de la colisión se analizan los escombros de marea en busca de grupos de partículas que se comporten de manera similar a las galaxias satélites de la vía láctea tanto en su distribución espacial como en su número.*

^{*} Se decidió dar este nombre a la galaxia que interactúa con la Vía Láctea, en conversación con mi compañero de grupo de investigación y amigo José Benavides, recordando hace unos años cuando trabaje como físico forense, cuando un vehículo atropella a una víctima solo queda evidencia física en la vía de dicho evento, pero nadie sabe en realidad que vehículo fue el que perpetro el hecho se le denomina (carro fantasma), igual como pasa en el caso de la (Ghost Galaxy) nadie sabe quién es pero pudo dejar evidencia de su existencia.

Componentes de una galaxia de disco



Fig. 6 Elementos constitutivos de una galaxia de disco. Tomada de http://alquimiayciencias.blogspot.com

- Bulbo central
- Disco
- Halo estelar
- Halo de materia oscura

Perfiles de densidad

Perfil de Hernquist (Halo de materia oscura y bulbo)

$$\rho_h = \frac{Ma}{2\pi r(a+r)^3}$$
$$a = r_s \sqrt{2[\ln(1+c) - c/(1+c)]}$$
$$c = \frac{r_{200}}{r_s}$$

(Hernquist, 1990 y 1993) y Springel et al. (2005)

Donde:

M: Representa la masa del esferoide. G: La constante de gravitación universal. r: Punto donde se mide el potencial. a: Radio del núcleo asociado al esferoide (Longitud de escala radial). Perfil Exponencial (Disco)

$$\rho_d(R, z) = \frac{M_d}{4\pi R_d^2 z_0} e^{-R/R_d} \operatorname{sech}^2\left(\frac{z}{z_0}\right)$$
$$\Sigma(R) = \frac{M_d}{2\pi R_d^2} e^{-R/R_d}$$
$$\Sigma_0 = \frac{M_d}{2\pi R_d^2}$$

(Springel and White, 1999)

Donde:

M_d: Es la masa del disco.

R_d: La longitud escala radial.

z₀: longitud de escala vertical.

Orbita pre-colisión y parámetro de impacto

$$v_r = \sqrt{\frac{\mu}{p}} esen(\theta)$$

$$v_{\theta} = \sqrt{\frac{\mu}{p}} \left[1 + e\cos(\theta)\right]$$

 $\mu = G(M + m)$

Fig. 8

Fig. 7 Orbita parabólica prograda (Toomre & Toomre. 1972).

Expresiones matemáticas para la velocidad paralela al radio vector v_r , la velocidad perpendicular al radio vector v_{θ} , parámetro gravitatorio y parámetro de impacto p de la orbita parabólica (Van de Kamp, 1964).





Condiciones iniciales

- Las condiciones iniciales de la galaxia nodriza así como de la galaxia fantasma (Ghost galaxy) se encontraron en la literatura, los objetos fueron construidos en el software ZENO.
- Este software fue desarrollado por Joshua Barnes, es un software para generar condiciones iniciales de simulación, que permite generar estructuras de tipo astrofísico con N-cuerpos y diferentes tipos de potencial gravitacional, entre estos potenciales se encuentran los ya mencionados (perfil de Hernquist (Halo y Bulbo) y perfil exponencial (Disco)).

Parámetros iniciales de la Vía Láctea

Parámetro	Descripción	Vía Láctea	Unidades
M _h	Masa halo de materia oscura	$1,55 \ge 10^{12}$	${ m M}_{\odot}$
R _{vir} o R ₂₀₀	Radio virial del halo	244.8	kpc
a _H	Longitud de escala del halo	37	kpc
M _d	Masa del disco	5,0 x 10 ¹⁰	M _☉
R _S	Longitud de escala radial del disco	4	kpc
R _Z	Longitud de escala vertical del disco	0.3	Крс
M _b	Masa del bulbo	$1.8 \ge 10^{10}$	${ m M}_{\odot}$
R _{SB}	Longitud de escala bulbo	0.6	kpc
С	Parámetro de concentración	12	-

Tabla 1. Parámetros galácticos para la Vía Láctea (Frenk and White 2014), (Pawlowski 2011) y (Binney and Tremaine 2008).

Condiciones iniciales Vía Láctea



Fig. 9 Características vía láctea virializada 2 Gyr con 150000 partículas, verde disco y rojo bulbo.

Fig. 10 Energía virializada de la Vía Láctea verde energía cinética, rojo energía potencial y azul energía mecánica.



Parámetros iniciales de la galaxia fantasma (Ghost Galaxy)



En este cálculo se estima la velocidad circular de la Ghost Galaxy acotada por el parámetro **n** que es la relación de masa entre el halo de materia oscura de la Vía Láctea y el de la Ghost Galaxy. Se supone una densidad superficial inicial \sum_0 igual para la Vía Láctea que para la Ghost Galaxy, y conociendo el parámetro **k** se calcula la longitud de escala radial de la Galaxia incidente **Rss**.

 $\sum_{0} = \frac{M_d}{2\pi R_d^2}$

 $\frac{M_{dL}}{M_{dS}} = k$

 $\frac{R_{SL}}{\sqrt{k}} = R_{SS}$

Para encontrar la longitud de escala vertical de la Ghost Galaxy Z_{0S} se calcula el cociente τ y se asume un comportamiento idéntico para la Vía Láctea, 0 cual genera una proporción.

 $\frac{R_{SL}}{z_{0L}} = \tau$

 $\frac{R_{SS}}{\tau} = Z_{0S}$

$$\rho_{h} = \frac{Ma}{2\pi r (a+r)^{3}}$$

$$\boldsymbol{\beta} = \frac{M_{BL}}{M_{BS}}$$

$$\boldsymbol{\psi}$$

$$\frac{a_{L}}{\sqrt[3]{\beta}} = a_{S}$$

$$\boldsymbol{\psi}$$

Para llevar a cabo el calculo de la longitud de escala del bulbo de la Ghost Galaxy se asume que la densidad de los halos de las dos galaxias es la misma y esto resulta siendo escalar una esfera con densidad ρ constante.

Corroborando el modelo

		equal mass ratio 4-to-1 mass ratio			
	Symbol	Infalling & Target	Infalling	Target	Description
Disc	N _d	500 000	500 000	500 000	number of disc particles
	$M_{\rm d}$	$8.0 \times 10^9 M_{\odot}$	$4.0 \times 10^9 M_{\odot}$	$16.0 \times 10^9 \mathrm{M}_{\odot}$	disc mass
	R _d	1.60 kpc	1.15 kpc	2.25 kpc	disc scale length
	R_d^{\max}	8.00 kpc	5.75 kpc	11.25 kpc	maximum disc radius
	$\tilde{R_{\odot}}$	6.00 kpc	4.30 kpc	8.40 kpc	solar radius
	Q_{\odot}	1.70	1.70	1.70	Toomre Q at R_{\odot}
	z_0	0.25 kpc	0.20 kpc	0.35 kpc	disc scale height
	z_{max}	2.50 kpc	2.00 kpc	3.50 kpc	maximum particle height
Halo	$N_{\rm H}$	1 000 000	1 000 000	1 000 000	number of halo particles
	$M_{ m H}$	$8.0 \times 10^{10} M_{\odot}$	$4.0 \times 10^{10} M_{\odot}$	$16.0 \times 10^{10} M_{\odot}$	halo mass
	a	10.0 kpc	6.9 kpc	12.4 kpc	halo core radius
	R_{μ}^{\max}	100.0 kpc	100.0 kpc	150.0 kpc	maximum halo radius

Tabla 2 Los parámetros de infalling galaxy de disco (Pawlowski, 2011).

Corroborando el modelo

Parámetro	Descripción	Infall P	Infall O	Dif %
M _h	Masa halo de materia oscura	4,0 x $10^{10}~{ m M}_{\odot}$	$3,9 \ { m x} \ 10^{10} \ { m M}_{\odot}$	0,95
a _H	Longitud de escala del halo	6,9 kpc	6,9 kpc	0,0
M _d	Masa del disco	4,0 x $10^9 {\rm ~M}_{\odot}$	$3.9 ext{ x } 10^9 ext{ M}_{\odot}$	0,25
R _S	Longitud de escala radial del disco	1,15 kpc	1,12 kpc	2,61
R _{máxd}	Radio máximo del disco	5,75 kpc	5.62 kpc	2.26
R _Z	Longitud de escala vertical del disco	0,20 kpc	0,175 kpc	12,5

Tabla 3comparativa entre los datos usados por Pawlowsky y los datos obtenidos por elmodelo usado por este estudio, se nota que la diferencia porcentual media entre los datoses del 3 % lo cual es un buen indicativo para la utilización de este modelo.

Parámetros iniciales de la galaxia fantasma (Ghost galaxy)

Parámetro	Descripción	4%	8%	12%	16%	Unidades
M _h	Masa halo de materia oscura	6,20 x 10 ¹⁰	1,24 x 10 ¹¹	1,94 x 10 ¹¹	2,48 x 10 ¹¹	${ m M}_{\odot}$
R _{vir} o R ₂₀₀	Radio virial del halo	83,7	105,5	122,4	132,9	Крс
a _H	Longitud de escala del halo	8,0	10,1	11,7	12,7	Крс
M _d	Masa del disco	$2 \ge 10^9$	$4 \ge 10^9$	6,25 x 10 ⁹	8 x 10 ⁹	${ m M}_{\odot}$
R _S	Longitud de escala radial del disco	0,8	1,13	1,41	1,60	Крс
Rz	Longitud de escala vertical del disco	0,06	0,085	0,106	0,120	Крс
M _b	Masa del bulbo	7,2 x 10 ⁸	1,44 x 10 ⁹	2,25 x 10 ⁹	2,88 x 10 ⁹	${ m M}_{\odot}$
R _{SB}	Longitud de escala del bulbo	0.205	0,26	0,30	0,33	Крс
С	Parámetro de concentración	21.8	21.8	21.8	21.8	-

Tabla 4 se muestran los parámetros de las diferentes Ghost Galaxy utilizadas en este estudio, calculados con
la metodología planteada.(Quiroga 2013)

Condiciones iniciales Ghost Galaxy



Fig.11 Características galaxia fantasma (4% y 8%) virializadas 2 Gyr con 350300 partículas, rojo disco y verde bulbo.

Condiciones iniciales Ghost Galaxy



Fig.12 Características galaxia fantasma (12% y 16%) virializadas 2 Gyr con 350300 partículas, rojo disco y verde bulbo.

Condiciones orbitales iniciales

Parámetro	Descripción	4%	8%	12%	16%	Unidades
Р	Parámetro de impacto	45	45	45	45	kpc
μ	Parámetro Gravitatorio	2,23 x 10 ³²	2,32 x 10 ³²	2, 41 x 10 ³²	2,49 x 10 ³²	kg/Nm ²
Θ	Angulo medido respecto a x	130	130	130	130	O
x	Posición en x	0	0	0	0	kpc
Y	Posición en y	-80.98	-80.98	-80,98	-80.98	kpc
Z	Posición en z	96.50	96.50	96,50	96.50	kpc
v _x	Velocidad en x	0	0	0	0	km/s
v _y	Velocidad en y	307.28	313.14	319,60	324,54	km/s
Vz	Velocidad en z	-143.29	-146.02	-149,03	-151.33	km/s

 Tabla 5 Aquí muestran los parámetros de las diferentes galaxias satélite utilizadas en este estudio para las orbitas de tipo parabólico planteadas.

- A continuación se muestran los resultados obtenidos en las simulaciones realizadas con las relaciones de masa de 4, 8, 12 y 16% de la masa de la Vía Láctea y además se realizan los análisis correspondientes a la disposición espacial de los remantes de la colisión, así como en el número de grupos que se formaron dentro del remanente los cuales indican la cantidad de galaxias satélite que se pudieron haber formado producto de la colisión, estos resultados y análisis serán contrastados con las observaciones reportadas en la literatura.
- Gadget2 es un software de simulación numérica de N-cuerpos, recibe su nombre por las siglas en ingles (GAlaxies with Dark matter and Gas intEracT), desarrollado y publicado por (Springel, Yoshida & White 2001a), software que ha permitido desarrollar simulaciones cosmológicas hasta con 10¹⁰ partículas. Gadget2 fundamenta su funcionamiento en técnicas como (SPH) hidrodinámica de partículas suavizadas entre otras.

16%



12%



8%

4%

Resultados

 A continuación se muestran los resultados obtenidos en las simulaciones realizadas con las relaciones de masa de 4, 8, 12 y 16% de la masa de la VL y además se realizan los análisis correspondientes a la disposición espacial de los restos de la colisión, así como en el número de grupos que se formaron dentro de los remanentes, los cuales indican la cantidad de galaxias satélite que se pudieron haber formado producto de la colisión, estos resultados y análisis serán contrastados con las observaciones reportadas en la literatura.

Resultados simulaciones baja resolución

Recordando que estas simulaciones permiten determinar cual es el parámetro de impacto óptimo para realizar la colisión entre la galaxia fantasma y la galaxia anfitriona en simulaciones de alta resolución.

Se encontró a partir de estas simulaciones que el parámetro de impacto más optimo para que se generen grandes colas de marea es uno de **45 Kpc** para todas las galaxias.



Resultados simulaciones alta resolución galaxia 4%



Fig.14 Simulación obtenida para un parámetro de impacto de 45 kpc y una masa del 4% de la de la Vía Láctea, de izquierda a derecha (Plano Y-Z, Plano X-Y y Plano X-Z).

Resultados simulaciones alta resolución galaxia 8%



Fig.15 Simulación obtenida para un parámetro de impacto de 45 kpc y una masa del 8% de la de la Vía Láctea, de izquierda a derecha (Plano Y-Z, Plano X-Y y Plano X-Z).

Resultados simulaciones alta resolución galaxia 12%



Fig.16 Simulación obtenida para un parámetro de impacto de 45 kpc y una masa del 12% de la de la Vía Láctea, de izquierda a derecha (Plano Y-Z, Plano X-Y y Plano X-Z).

Resultados simulaciones alta resolución galaxia 16%



Fig.17 Simulación obtenida para un parámetro de impacto de 45 kpc y una masa del 16% de la de la Vía Láctea, de izquierda a derecha (Plano Y-Z, Plano X-Y y Plano X-Z).

Análisis de grupos

A continuación se procede a buscar grupos de partículas dentro de los remanentes de la colisión los cuales se puedan definir como candidatos a galaxia fantasma, para esta búsqueda se utiliza el programa amigos de amigos (FoF), para así poder determinar su dinámica y compararla con la reportada por las observaciones.

Una partícula pertenece a un grupo de amigos-de-amigos si está dentro de alguna longitud de enlace de cualquier otra partícula en el grupo. En el método de amigos-de-amigos (FoF), se especifica una longitud de enlace, y se identifican todos los pares de partículas con una separación igual o menor a la longitud de enlace.

Grupos galaxia fantasma 12 %

Longitud de enlace	Número de grupos
(kpc)	
0.4	5
0.5	14
0.6	17
0.7	19
0.8	24
0.9	30
1.0	32

Tabla 6. Número de grupos respecto a la distancia de enlace elegida, se escogió la distancia de 1kpc por ser la distancia que genera un número de grupos del orden de los observados.

Grupos galaxia fantasma 12 %



y (kpc)

Perfil de densidad y dispersión de velocidades de la Vía Láctea 12%



Fig.19 a. Perfil de densidad del disco de la VL en azul antes de la colisión y rojo después, como se aprecia el perfil de densidad en ambas situaciones se comporta de manera similar en la región de interés entre 0 kpc y 16 kpc.

Fig.19 b. Dispersión de velocidades en z (s) para la VL respecto a la coordenada radial del disco (R) en morado antes de la colisión y verde después, se observa un aumento en la dispersión de velocidades en z antes y después de la colisión.

Plano de la Vía Láctea y Plano grupos 12%



Fig.20 a. Plano de la VL obtenido con las posiciones de las partículas del disco de la Vía Láctea usando el método de mínimos cuadrados para dos variables.

Fig.20 b. Plano de los grupos del 12% obtenido con las posiciones de los grupos encontrados usando el método de mínimos cuadrados para dos variables.

Planos y ángulo entre planos 12%







Fig.21. Partículas rojas Vía Láctea, puntos azules grupos, plano verde Vía Láctea y plano morado grupos, longitudes en kpc. 4 se calculó el ángulo entre el plano de la VL y el plano de los grupos del 12%, el cual tiene un valor de $\beta = 17.4^{\circ}$, este ángulo es pequeño comparado con el de **88**° reportado por las observaciones (Kroupa 2014).

Dispersión de velocidades en grupos del 12%



Fig.22 a. En esta gráfica se aprecia la dispersión de velocidades media de los 32 grupos encontrados en los remanentes de la galaxia fantasma dejados después de la colisión, el promedio de estas dispersiones es de 242 km/s.

Fig.22 b. En esta imagen se aprecian las dispersiones de velocidades de algunas galaxias enanas satélites de la VL respecto a R en (pc), se aprecian dispersiones de velocidad del orden de 10 km/s (Walker et al. 2008).

Amontonamiento 12 %



Fig.23 Graficas comparativas entre los datos obtenidos en la simulación y los datos reales (McConnachie and Irwin, 2006).

Masa 12 %



Fig 24. Escala de masa frecuente para algunas galaxias enanas del grupo local, (Strigari et al. 2008).

Grupos galaxia fantasma 16 %

Longitud de enlace	Número de grupos
(kpc)	
0.3	1
0.4	7
0.5	11
0.6	14
0.7	17
0.8	25
0.9	28
1.0	35

Tabla 7. Número de grupos respecto a la distancia de enlace elegida, se escogió la distancia de 1kpc por ser la distancia que genera un número de grupos del orden de los observados.

Grupos galaxia fantasma 16 %



Fig.25 Grupos generados después de la colisión en los planos X-Y , X-Z y Y-Z para la galaxia fantasma del 16% de masa de la VL.

Perfil de densidad y dispersión de velocidades de la Vía Láctea 16%



Fig.26 a. Perfil de densidad del disco de la VL en azul antes de la colisión y rojo después, como se aprecia el perfil de densidad en ambas situaciones se comporta de manera similar en la región de interés entre 0 kpc y 16 kpc.

Fig.26 b. Dispersión de velocidades en z (s) para la VL respecto a la coordenada radial del disco (R) en morado antes de la colisión y verde después, se observa un aumento en la dispersión de velocidades en z antes y después de la colisión.

Plano de la Vía Láctea y Plano grupos 16%



Fig.27 a. Plano de la VL obtenido con las posiciones de las partículas del disco de la Vía Láctea usando el método de mínimos cuadrados para dos variables.

Fig.27 b. Plano de los grupos del 16% obtenido con las posiciones de los grupos encontrados usando el método de mínimos cuadrados para dos variables.

Planos y ángulo entre planos 16%



Fig.28. Partículas rojas Vía Láctea, puntos azules grupos, plano verde Vía Láctea y plano morado grupos, longitudes en kpc. 4 se calculó el ángulo entre el plano de la VL y el plano de los grupos del 12%, el cual tiene un valor de $\beta = 14.3^{\circ}$, este ángulo es pequeño comparado con el de 88° reportado por las observaciones (Kroupa 2014).



Dispersión de velocidades en grupos del 16%



Fig.29 a. En esta gráfica se aprecia la dispersión de velocidades media de los 32 grupos encontrados en los remanentes de la galaxia fantasma dejados después de la colisión, el promedio de estas dispersiones es de 242 km/s.

Fig.29 b. En esta imagen se aprecian las dispersiones de velocidades de algunas galaxias enanas satélites de la VL respecto a R en (pc), se aprecian dispersiones de velocidad del orden de 10 km/s (Walker et al. 2008).

Conclusiones y recomendaciones

- El número de galaxias satélite encontradas es compatible con el número de galaxias observadas.
- La distribución espacial de las galaxia fantasma, no es compatible con la distribución observada, ya que después de la colisión se encuentra un gran amontonamiento de galaxias satélite sobre el disco de la vía láctea, situación que en general es solo compatible con la galaxia enana de sagitario.
- Respecto a la masa de la galaxia incidente se puede decir para este estudio debe ser inferior al 16% de la Vía Láctea bajo un parámetro de impacto de 45 kpc, ya que bajo estas condiciones se presenta un calentamiento de disco de la galaxia anfitriona.
- El valor medio de masa de los grupos en la colisión del 12 % y 16% es de 1,48x107 $\rm M_{\odot.}$
- Se puede decir que bajo las condiciones iniciales planteadas para estas simulaciones no es posible generar las características dinámicas y espaciales de lo que se denomina el disco de galaxias satélite la Vía Láctea (DoS), sin embargo, esto no descarta por completo el modelo propuesto para este estudio ya que si bien no refleja los resultados esperados, se pueden proponer trabajos futuros para realizar simulaciones y modificar los parámetros de impacto y las relaciones de masa para poder enmarcar las condiciones físicas bajo las cuales es posible este evento. Los resultados de este trabajo permiten acotar aún más el espacio de condiciones iniciales orbitales y de masa de eventuales progenitores del DoS de la VL.

Referencias

- Angus, G. W., Diaferio, A., and Kroupa, P. (2011). Using dwarf satellite proper motions to determine their origin. MNRAS, 416:1401–1409.
- Barnes, J. E. 2011, Astrophysics Source Code Library, record ascl:1102.027
- Binney, J.; Merrifield, M. (1998). *Galactic Astronomy*. Princeton: Princeton University Press. ISBN: 978-0-691-02565-0. OCLC 39108765.
- Binney. J, Tremaine. S. (2008). *Galactic Dynamics*, Princeton Univ.Press, U.K. Second Edition. ISBN: 987-0691130279 p. 904
- Casallas A. (2012) 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. Facultad de Ciencias, Departamento de Física. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá.
- Casallas A., Cubillos D., Casas Miranda R. (2009). *Galaxias Enanas del Grupo Local*. Momento-Revista de Física, No 38.
- Cassan, A. et al. (2012). "One or more bound planets per Milky Way star from microlensing observations". Nature 481 (7380): 167–169. arXiv:1202.0903. Bibcode:2012Natur.481..167C.
- Chandrasekhar, S. (1943), "Dynamical Friction. I. General Considerations: the Coefficient of Dynamical Friction", ApJ vol. 97, 255–262.
- Collins Dictionary of Astronomy, 2nd Ed.; Harper Collins Publishers; 2000; pp.444,449
- Cubillos D. (2013). Estudio de la Formación de Galaxias Enanas Esferoidales Satélites de la Vía Láctea Mediante la Simulación de la Colisión de dos Galaxias. Facultad de Ciencias, Departamento de Física. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá.

Referencias

- D'Onghia, E., Besla, G., Cox, T. J., and Hernquist, L. (2009). Resonant stripping as the origin of dwarf spheroidal galaxies. Nature, 460:605–607.
- Da Costa, G. S. (1999). The Dwarf Spheroidal Galaxies in the Galactic Halo. In Gibson, B. K., Axelrod, R. S., and Putman, M. E., editors, The Third Stromlo Symposium: The Galactic Halo, volume 165 of Astronomical Society of the Pacific Conference Series, page 153.
- Diemand, J.; Moore, B. & Stadel, J. (2005). "Earthmass dark-matter haloes as the first structures in the early Universe". Nature 433. pp. 389-391.doi:10.1038/nature10684. PMID 22237108.
- Graham, A.W., Worley, C.C. (2008). Inclination- and dust-corrected galaxy parameters: Bulgeto-disc ratios and size-luminosity relations MNRAS, 388, 1708.
- Grebel, E. K., Gallagher, J. S., & Harbeck, D. (2003). The Progenitors of Dwarf Spheroidal Galaxies ApJ, vol. 125, 1926
- Grebel. E.K, (1998). Star Formation Histories of Local Group Dwarf Galaxies, Arxiv:9806191v2 [astro-ph].
- Hernquist, L. (1990). An analytical model for spherical galaxies and bulges. ApJ, 356:359–364.
- Hernquist, L., Spergel, D. N., and Heyl, J. S. (1993). Structure of Merger Remnants. III. Phase-Space Constraints. , 416:415.
- Hubble, E. P. (1936). The Realm of the Nebulae. New Haven: Yale University Press. LCCN 36018182.
- Huctchmeier.W, I. D. Karachentsev, V. E. Karachentseva, D.I. Makarov. (2006). A Catalog of Neighboring Galaxies. The Astronomical Journal, 132:729–748, August ApJ, 132, 729.
- Imamura, Jim (2006). "Mass of the Milky Way Galaxy". University of Oregon. Archived from the original on March 1, 2007. Retrieved May 10, 2007.
- Karachentsev, I. D.; Kashibadze, O. G. (2006). "Masses of the local group and of the M81 group estimated from distortions in the local velocity field". Astrophysics 49 (1): 3–18.

Referencias

- Karttunen. H, Kroger. P, Oja. H, Poutanen. M. And Donner. (2003) M. Fundamental Astronomy. Springer. 5th edition, New York.
- Kravtsov, Andrey V.; Borgani, Stefano, *Formation of Galaxy Clusters*. Annual Review of Astronomy and Astrophysics, vol. 50, p.353-409.
- Kroupa, C. Theis, and C. M. Boily (2005). The great disk of milky-way satellites and cosmological sub-structures. Astronomy and Astrophysics, 431(2):517–521.
- Kroupa, P (2014). Lessons from the Local Group (and beyond) on dark matter. arXiv:1409.6302v1 [astro-ph.GA].
- Łokas, E. L. (2008). The Milky Way's Neighbors. Academia: Magazine of the Polish Academy of Sciences, 2:12–15.
- Lokas, E. L. (2011). Dark matter in dwarf galaxies of the Local Group. ArXiv e-prints.
- Longair, M. S. (1998). Galaxy Formation. New York: Springer. ISBN 3-540-63785-0.
- Longair, Malcolm S. (2006), *The Cosmic Century: A History of Astrophysics and Cosmology*, Cambridge: Cambridge University Press, ISBN 9780521474368.
- Mashchenko, S., Couchman, H. M. P., and Sills, A. (2005). Modeling Star Formation in Dwarf Spheroidal Galaxies: A Case for Extended Dark Matter Halos. ApJ, 624:726–741.
- Mateo, M. (1996). Dwarf Spheroidal Galaxies and the Formation of the Galactic Halo. In Morrison, H. L. and Sarajedini, A., editors, Formation of the Galactic Halo...Inside and Out, volumen 92 of Astronomical Society of the Pacific Conference Series, page 434.
- Mateo, M. L. (1998). *Dwarf Galaxies of the Local Group*. Annual Review of Astronomy & Astrophysics, 36:435–506.
- McConnachie, A.W. and Irwin, M. J. (2006). The satellite distribution of M31. MNRAS, 365:902–914.
- Metz, M., Kroupa, P., and Jerjen, H. (2007). The spatial distribution of the Milky Way and Andromeda satellite galaxies. MNRAS, 374:1125–1145.
- Metz, M., Kroupa, P., and Jerjen, H. (2007). The spatial distribution of the Milky Way and Andromeda satellite galaxies. MNRAS, 374:1125–1145.

Gracias