

Galaxias Enanas del Grupo Local

A. Casallas Lagos, D. J. Cubillos Jara, R. A. Casas Miranda

Grupo de Astrofísica, Departamento de Física,
Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.

Resumen

Las galaxias satélite de la Vía Láctea son de especial importancia para el estudio de la formación y evolución de galaxias, así como para el estudio de la materia oscura. En este artículo de revisión se presentan algunas propiedades estructurales del Grupo Local y de las galaxias enanas esferoidales que componen este sistema, con especial énfasis en las galaxias satélite de la Vía Láctea y su distribución espacial en el disco de satélites. Adicionalmente se presentan los estudios recientes más relevantes relacionados con el problema de la formación del disco de satélites de la Vía Láctea.

Palabras claves: Vía Láctea, Grupo Local, galaxias enanas, disco de satélites.

Abstract

The satellite galaxies of the Milky Way are very important both for the studies of the formation and evolution of galaxies and for the research on the dark matter problem. In the present review paper some structural properties of the Local Group, as well as of the dwarf spheroidal galaxies that compose this astrophysical system are presented. Special emphasis is paid to the satellite galaxies of the Milky Way and their spatial distribution on the disk of satellites (DoS). Furthermore, the more relevant recent studies related to the formation of the disk of satellites of the Milky Way are mentioned.

Keywords: Milky Way, Local Group, dwarf galaxies, disk of satellites.

1. Introducción

A escalas astronómicas uno de los sistemas físicos más relevantes a la hora de describir la evolución dinámica y estructural del universo son las galaxias. En particular, pequeñas agrupaciones¹ poco luminosas denominadas galaxias enanas proveen información valiosa acerca de la constitución actual del universo [13, 14, 15, 18].

Observacionalmente es un hecho bien conocido [1] que las galaxias interactúan primordialmente a través de la gravitación dando origen a grandes grupos conocidos como cúmulos de galaxias. Un grupo de especial importancia para nosotros lo constituye el conjunto de galaxias interactuantes en el cual se encuentra inmersa la Vía Láctea. Este grupo, denominado Grupo Local, está dominado dinámicamente por dos galaxias espirales barradas gigantes [4], la recientemente mencionada Vía Láctea y la Galaxia de Andromeda (M31), alrededor de las cuales orbitan una serie de galaxias menores o galaxias satélite.

Debido a su cercanía las galaxias satélite de la Vía Láctea representan un excelente laboratorio para el estudio de la formación y evolución de galaxias y el posible contenido de materia oscura a escala galáctica. A continuación se presenta una revisión acerca de las galaxias satélite del Grupo Local y en particular de la Vía Láctea.

2. Propiedades Estructurales del Grupo local

En esta sección se introducen algunas de las principales propiedades estructurales del grupo local y de las galaxias enanas que lo componen, prestando especial atención a los parámetros de selección que permiten detectar nuevos miembros potenciales de este cúmulo.

Para 1971 la población total de galaxias asociadas al grupo local constaba de 14 miembros [8]. Con el desarrollo progresivo de los instrumentos de detección astronómica la población de enanas se ha incrementado a cerca de 40 galaxias claramente identificables

¹Pequeñas en comparación con una galaxia como la Vía Láctea o Andrómeda

[13]. Sin embargo, el número exacto de galaxias que componen el grupo local permanece aún sin establecerse [8, 13, 18, 23].

Dada la dificultad observacional que se presenta al intentar detectar nuevas galaxias enanas pertenecientes al Grupo Local, durante la última década se han incorporado nuevas técnicas analíticas que tienen como propósito caracterizar las propiedades de galaxias que podrían ser miembros potenciales de este grupo [13, 14, 17, 18]. A continuación se señalarán algunos de los parámetros de selección usados para determinar si una galaxia recién descubierta puede ser considerada miembro del Grupo Local.

2.1. Morfología

Los parámetros morfológicos, siguiendo la secuencia de Hubble, desempeñan un papel importante en la caracterización de las galaxias que podrían ser consideradas como miembros del Grupo Local. Aunque no hay una morfología estándar asociada a los miembros del Grupo Local [13, 14] es común identificar galaxias enanas de tipo irregular (*dIrr*) y esferoidales (*dSph*) [13]. Abundante evidencia observacional sugiere que las galaxias enanas del grupo local experimentan una transición morfológica de tipo irregular a esferoidal a través del medio interestelar de tipo *I* [13]. Esto indica que la población de galaxias jóvenes manifiesta una morfología irregular; mientras que las galaxias más antiguas exhiben una morfología esferoidal.

2.2. Dinámica

Las velocidades heliocéntricas observadas en las galaxias del Grupo Local tienen valores característicos entre -400 km/s y 400 km/s [13]. A partir de los valores relacionados con estas velocidades es posible estimar la masa del grupo local en $M_{GL} = 3,3 \times 10^{12} M_{\odot}$ y su radio en $R_{GL} = 1,5 Mpc$ [18]. Con base en las posiciones y velocidades heliocéntricas de las galaxias del Grupo Local es posible determinar el rango de velocidades posibles de una galaxia dada, de posición conocida, para que ésta pueda considerarse perteneciente al Grupo Local.

2.3. Distribución Espacial

Es un hecho bien conocido que las galaxias enanas del grupo local tienden a acumularse y formar subgrupos [1, 4, 13]. Un buen ejemplo de ello corresponde al subgrupo conformado por Andrómeda, M32, NGC205, M33, NGC147 y NGC185 [2]. En la figura 1 se muestra un mapa esquemático de las galaxias del grupo local en coordenadas galácticas. Allí se pueden apreciar la Vía Láctea con algunos de sus satélites, Andrómeda con algunos de sus satélites y otras galaxias enanas aisladas como Tucana y Antlia.

Con base en una proyección estereográfica del Grupo Local realizada por Karashentsev [9] a través de la cual se evidencian algunas acumulaciones de galaxias enanas cerca de las galaxias dominantes del grupo, Mateo [13] estableció un diagrama comparativo entre la densidad de galaxias observadas y una distribución uniforme de 40 cuerpos para el grupo local y de 12 cuerpos para la Vía Láctea. Los resultados obtenidos por Mateo revelan que hasta el momento hay un número inferior de galaxias detectadas en comparación con las predicciones teóricas. En particular, se espera que el número de galaxias satélite de la Vía Láctea sea muy superior al detectado hasta ahora.

2.4. Historias de Evolución Química

Las galaxias enanas del grupo local tienden a presentar bajas metalicidades [13]. Así las galaxias enanas esferoidales de baja luminosidad, inmersas en el grupo local, representan un ejemplo de galaxias que están principalmente compuestas por materiales primordiales [4, 5].

Es importante mencionar que las características de las galaxias satélite mencionadas anteriormente estos no son los únicos criterios de selección aplicables a galaxias que pretenden catalogarse como miembros del grupo local. Actualmente la medición de parámetros espectroscópicos [13, 15] y fotométricos [13, 14] constituye un escenario propicio para el estudio estructural del grupo local. En la sección 4 se evaluará una característica adicional para examinar y catalogar galaxias en un marco geométrico dado por el disco de

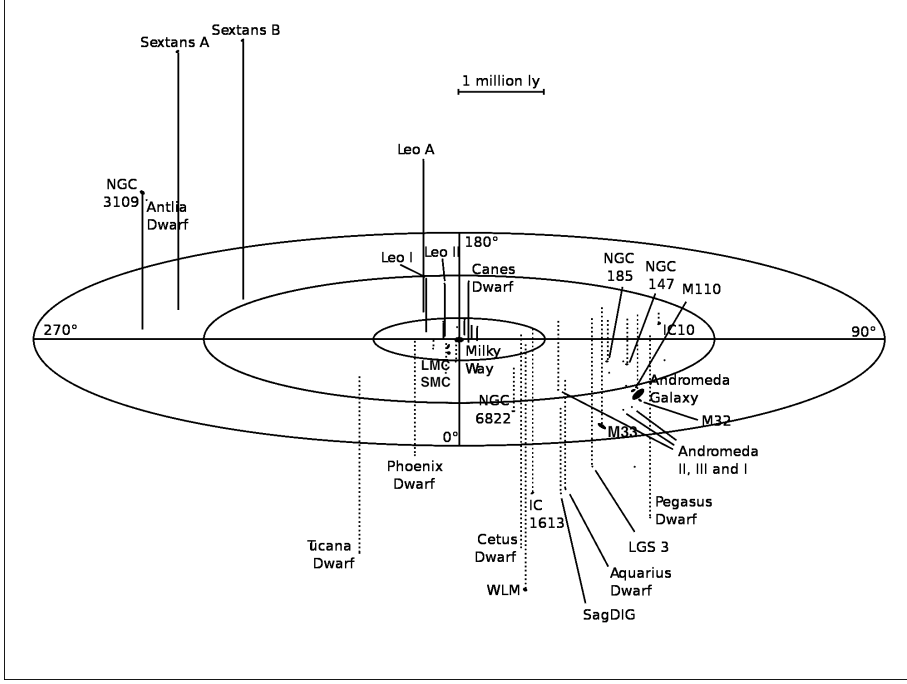


FIGURA 1. Ubicación de las galaxias del Grupo Local con respecto a la Vía Láctea. El ancho de la imagen corresponde a 10.000.000 años luz. Las líneas continuas indican que el objeto se encuentra arriba del plano galáctico, mientras que las líneas punteadas indican objetos por debajo del plano galáctico. Imagen creada por Richard Powell y usada bajo la licencia: *Creative Commons Attribution-ShareAlike 2.5 License*

satélites. En el cuadro 1 se agrupan algunas de las galaxias representativas del grupo local. Para mayor información ver [13].

3. Galaxias Satélite de la Vía Láctea

Como se mencionó anteriormente la dinámica del grupo local está dominada por la Vía Láctea y la galaxia de Andrómeda. Estas galaxias exhiben un conjunto de galaxias menores ligadas por interacción gravitacional denominadas galaxias satélite. En esta sección se enumeran las galaxias satélite de la Vía Láctea y de Andrómeda, señalando algunas de sus principales propiedades [18]. Se hace especial énfasis en las galaxias satélite de la Vía Láctea.

Galaxia	Tipo	Subgrupo
Andrómeda (M31)	SbI	Andrómeda
M32	E2	Andrómeda
Galaxia del Triángulo (M33)	ScII	Andrómeda
Vía Láctea	Sbc	Vía Láctea
Pequeña Nube de Magallanes (SMC)	Irr	Vía Láctea
Gran Nube de Magallanes (LMC)	Irr	Vía Láctea
Tucana	dSph	—

CUADRO 1. Algunas galaxias representativas del grupo local, el subgrupo hace referencia a la galaxia dominante con la cual la interacción es mayor.

Las galaxias enanas del grupo local junto con las galaxias satélite de la Vía Láctea y de Andrómeda ofrecen un marco de referencia único para estudiar de manera detallada las propiedades más comunes de las galaxias que componen el universo. En particular se sabe actualmente que la Vía Láctea cuenta con 17 galaxias enanas satélite de tipo esferoidal (dSph) y dos irregulares (dIrr) [18]. En el cuadro 2 se muestra el sistema de satélites de la Vía Láctea junto con su diámetro medido en *pc*.

Por otra parte se conoce actualmente que la galaxia de Andrómeda posee 14 enanas esferoidales como satélites [13] (Ver cuadro 3).

4. El Disco de Satélites

Desde hace más de tres décadas es un hecho observacional bien conocido que las galaxias satélite más luminosas de la Vía Láctea presentan una distribución espacial anisotrópica [2, 18]. 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 [14, 15, 17, 18]. Este disco es una construcción geométrica a través de la cual las enanas satélite de la Vía Láctea orbitan. Metz, Kroupa y Jerjen [15] demostraron con base en datos observacionales que el disco de satélites se encuentra inclinado 67,3 grados respecto al plano galáctico inducido por el disco de la Vía Láctea.

Galaxia	Diámetro
Sagitario (Sgr)	20.000
Ursa Major (UMaII)	1.000
Coma Berenices (CBe)	1.000
Gran Nube de Magallanes* (LMC)	25.000
Pequeña Nube de Magallanes* (SMC)	15.000
Bootes (Boo)	2.000
Ursa Minor (UMi)	2.000
Sculptor (Scl)	3.000
Draco (Dra)	2.000
Sextans (Sex)	3.000
Ursa Major I (UMaI)	3.000
Carina (Car)	2.000
Fornax (For)	5.000
Hercules (Her)	4.000
Canes Venatici II (CVnII)	2.000
Leo IV	2.000
Leo II	3.000
Canes Venatici I (CVnI)	6.000
Leo I	3.000

CUADRO 2. Sistema de galaxias satélite para la vía láctea, estas galaxias presentan morfología esferoidal (dSph) con excepción de las nubes de Magallanes (*) cuya morfología es irregular (dIrr). Los diámetros están dados en pc.

A partir del disco de satélites es posible establecer parámetros de selección sobre éste último que modelen las condiciones básicas para obtener posibles nuevos candidatos en el sistema de satélites ya establecido. El problema consiste en definir una función de distribución que mida la probabilidad de encontrar galaxias satélite en las vecindades del disco [18], o de otra manera, definir un límite espacial a partir del cual la certeza de encontrar sistemas de satélites sea nula para un plano de referencia dado. La estrategia anteriormente descrita reduce las opciones espaciales de encontrar galaxias a regiones que están en correspondencia directa con el disco de satélites.

Galaxia	Distancia
M 32	2.48
M 110	2.69
NGC 185	2.01
NGC 147	2.2
Andrómeda I	2.43
Andrómeda II	2.13
Andrómeda III	2.44
Andrómeda V	2.52
Pegasus	2.55
Casiopea	2.49
Andrómeda VIII	2.9
Andrómeda IX	2.5
Andrómeda X	2.9
Triangulum (M33)	2.59

CUADRO 3. Sistema de satélites para la galaxia de Andrómeda. Las distancias corresponden a la ubicación respecto al sol medida en millones de años luz.

5. Nuevas Galáxias Satélite

En los últimos años más galaxias han entrado a formar parte del sistema de satélites de la Vía Láctea [14, 15, 17, 18] y la lista tiende a extenderse proporcionalmente de acuerdo con los avances en los dispositivos de observación y medición astronómicos. Durante los últimos cuatro años un nuevo conjunto de galáxias satélite ha sido detectado alrededor de la Vía Láctea a través del catálogo generado por **SDSS**²[18]. Estas galaxias se caracterizan por tener muy poca luminosidad comparadas con sus compañeras más luminosas y son denominadas galaxias enanas ultra ténues (*Ultra Faint Dwarf Galaxies* - *UFDG*). El catálogo fotométrico *SDDS-DR6* ha revelado que estas nuevas galaxias enanas obedecen también a una distribución espacial dada por el disco de satélites. En el cuadro 4 se

²El catálogo de galáxias SDSS (Sloan Digital Sky Survey) se encarga de recopilar y detectar imágenes de objetos astronómicos a gran resolución. Durante el último conjunto de mediciones se obtuvo el espectro de más de 675,000 galaxias, 90,000 quasars y 185,000 estrellas.

enumeran las siete galaxias (UFDG) reportadas en los últimos tres años y cuatro candidatos adicionales (*UMa II*, *Wilman I*, *CBe*, *Boo II*) cuya incorporación a este nuevo conjunto de satélites está aún por definirse.

Galaxia	ℓ [°]	b [°]	R [kpc]	d_{DoS} [kpc]
UMa II	159.6	+30.0	36.5	18.5
Wil 1	164.7	+47.7	43.0	12.7
CBe	201.8	+75.1	45.2	9.8
Boo II	348.1	+78.4	47.6	27.7
Boo	356.6	+77.5	57.6	32.0
UMa	162.0	+50.8	104.9	38.3
Her	30.9	+38.8	134.2	87.2
CVn II	132.7	+80.9	150.7	19.8
Leo IV	260.0	+56.2	160.6	56.7
Leo V	256.8	+58.1	180.8	57.3
CVn	86.9	+80.2	219.8	43.4

CUADRO 4. Coordenadas galactocéntricas de las *UFDG* y los posibles candidatos a formar parte del sistema de satélites de la Vía Láctea [16]

Con la aparición de las nuevas galaxias enanas de la Vía Láctea y su automática incorporación al disco de satélites han tomado vigencia el estudio del disco de satélites y la posible reestructuración de los miembros asociados al mismo, pues aún permanece sin establecerse el número exacto de galaxias asociadas al sistema de satélites de la Galaxia. Por otra parte, a partir del estudio del disco de satélites es posible encontrar de manera concreta (i.e. con parámetros físicos y geométricos) los rangos galácticos que permiten definir nuevas galaxias satélite. Estudios realizados con base en modelos con materia oscura fría (CDM) revelan que hay un déficit de galaxias satélite después de 100 kpc desde la Vía Láctea.

6. Estado Actual del Problema de Formación

A continuación se mencionan, a modo de contextualización histórica, los resultados mas relevantes que han enriquecido la investigación acerca de la formación del Grupo Local y en particular de las galaxias enanas satélite de la Vía Láctea.

En 1998 Mateo [13] contempla la posibilidad de que el halo galáctico se hubiese formado por la acreción de galaxias enanas esferoidales basándose en la comparación de poblaciones estelares, cúmulos globulares y contenido de materia oscura de las galaxias enanas y del halo.

En el 2000 Okazaki y Taniguchi [19], adoptando un escenario de interacción galáctica mostraron que si solo unas pocas galaxias enanas se forman en cada colisión galáctica es posible explicar las relaciones entre la morfología y la densidad tanto de las galaxias enanas como de las gigantes. Posteriormente Grebel [7] discute las propiedades de las galaxias enanas cercanas, encontrando variaciones en las historias de formación estelar para luego concluir que los factores determinantes en dicha evolución son las masas de las galaxias y el medio interestelar. También analiza, entre otras cosas, los tipos de galaxias enanas desde las espirales, pasando por las enanas de marea hasta las esferoidales y el cómo una galaxia enana de algún tipo morfológico puede evolucionar a otro.

Durante la primera década del siglo XXI Ricotti y Gnedin [20], considerando las historias de formación de las enanas en el grupo local y comparando sus propiedades con las de galaxias simuladas que formaron todas sus estrellas antes de la reionización cosmológica, proponen que las galaxias enanas del grupo local y todas las otras enanas del universo se formaron en tres diferentes trayectorias de evolución, a saber: *fósiles verdaderos* que formaron la mayor parte de sus estrellas en la época de pre-reionización del universo y tuvieron poca formación estelar; *fósiles contaminados* que comienzan como fósiles verdaderos, pero tienen un episodio importante de formación de estrellas en el que continúan acreitando masa; y *sobrevivientes* que comenzaron a formar estrellas después de la reionización. Estos autores encontraron también que las galaxias simuladas son muy parecidas a un subgrupo de enanas del grupo local. Simultáneamente Mashchenko y colaboradores [12] proponen un modelo de formación para las galaxias esferoidales enanas en el cual se supone que las estrellas se formaron a partir de un gas isotérmico y en equilibrio hidrostático dentro de halos de materia oscura extendidos, encontrando que dicho modelo describe adecuadamente las

propiedades de tres galaxias esferoidales satélite (Draco, Sculptor y Carina).

En 2006 Tully y colaboradores [22] identificaron cinco asociaciones de galaxias enanas que presentan similitudes con las enanas del grupo local. Estos autores realizaron una revisión de los grupos y asociaciones de galaxias mas cercanos identificados por medio del catálogo NGB, analizando sus masas y localización.

En el 2008 Salvadori y colaboradores [21] proponen un escenario para la formación y evolución de galaxias enanas esferoidales satélites de la Vía Láctea, en el que se plantea que las dSph representan objetos fósiles que entraron en equilibrio virial a $z = 7,2 \pm 0,7$ (es decir, en la era de pre-reionización), usando una versión semi analítica del código GAMETE, donde aparte del modelo analizan las propiedades observacionales como metalicidad, diagramas de color magnitud y contenido de materia oscura entre otras. Durante el mismo año, Casas Miranda y colaboradores [3], estudian la evolución de satélites pertenecientes a una galaxia como la Vía Láctea usando simulaciones de N-cuerpos mostrando preliminarmente la región de condiciones iniciales que permite la formación de remanentes que podrían ser interpretados como galaxias enanas esferoidales de la Vía Láctea carentes de materia oscura. Al mismo tiempo D’Onghia y Lake [6] suponen un modelo en el que la gran nube de Magallanes es el miembro más grande de un grupo de galaxias enanas que fue acretado dentro del halo de la Vía Láctea, dando explicación a como las nuevas enanas formadas dentro de este grupo (gran Magallánico) brillan más que las que no se crearon dentro y a como las galaxias enanas aisladas podrían llegar a tener compañeras.

Algunos autores [10, 11] sostienen que los integrantes del sistema de satélites de la Vía Láctea no ingresaron de manera individual y aleatoria en el halo de nuestra Galaxia. En lugar de ello, argumentan que si una o dos agrupaciones cayeron en el halo la Vía Láctea esto podría explicar la distribución del sistema de satélites a través del disco de satélites [15, 18] hecho que permanece sin explicación y ha sido únicamente observado en las galaxias dominantes del grupo local. Otros autores [4, 5] sugieren que la distribución inducida por el disco de satélites fue generada por la colisión de dos galaxias pertenecientes al grupo local y que la geometría del disco de satélites

es causada por fuerzas de marea que aparecieron como efecto de la colisión.

7. Anotaciones Finales

El Grupo Local es un área fértil para la investigación en Astrofísica. El problema de la materia oscura en las galaxias enanas se encuentra actualmente en el centro de la discusión académica, así como el problema de la formación del disco de satélites de la Vía Láctea, y por ende el origen de las galaxias satélite.

Este problema ha sido objeto de discusiones en diversos campos de aplicación del conocimiento astrofísico, astronómico y cosmológico. En particular, durante los últimos años el escenario propuesto para estudiar las galaxias enanas satélite se ubica en la forma en la que estas galaxias entraron en el halo de la Vía Láctea. Desde el punto de vista astrofísico y cosmológico el problema de la conformación del disco de satélites daría respuesta a preguntas como ¿Qué parámetros definen la selección de galaxias que podrían ser eventualmente miembros del sistema de satélites? o por otra parte bajo qué condiciones espaciales se definen posibles progenitores asociados a las galaxias satélite?, además de contribuir al avance del conocimiento en el área de formación y evolución de galaxias en general.

Referencias

- [1] M. Aaronson. The older stellar population of dwarf galaxies. In D. Kunth, T. X. Thuan, J. Tran Thanh Van, J. Lequeux, & J. Audouze , editor, *Star-forming Dwarf Galaxies and Related Objects*, pages 125–143, 1986.
- [2] L. A. Anchordoqui. Lectures on Astronomy, Astrophysics, and Cosmology. *ArXiv e-prints*, June 2007.
- [3] R. Casas-Miranda, V. Arias, Y. Camargo, and K. Pena. *Revista Colombiana de Física*, 40 1:1, 2008.

- [4] G. S. Da Costa. Dwarf Spheroidal Galaxies. In B. Barbuy & A. Renzini, editor, *The Stellar Populations of Galaxies*, volume 149 of *IAU Symposium*, pages 191–+, 1992.
- [5] G. S. Da Costa. Dwarf Galaxies. In A. Aparicio, A. Herrero, & F. Sánchez, editor, *Stellar astrophysics for the local group: VIII Canary Islands Winter School of Astrophysics*, pages 351–+, 1998.
- [6] E. D’Onghia and G. Lake. The Magellanic Group and the Seven Dwarfs. In J. T. van Loon & J. M. Oliveira, editor, *IAU Symposium*, volume 256 of *IAU Symposium*, pages 473–478, March 2009.
- [7] E. K. Grebel. Star Formation Histories of Nearby Dwarf Galaxies. *Astrophysics and Space Science Supplement*, 277:231–239, 2001.
- [8] P. W. Hodge. Dwarf Galaxies. *ARA&A*, 9:35–+, 1971.
- [9] I. Karachentsev. The Local Group in comparison with other nearby groups of galaxies. *A&A*, 305:33–+, January 1996.
- [10] Y.-S. Li and A. Helmi. Infall of substructures on to a Milky Way-like dark halo. *MNRAS*, 385:1365–1373, April 2008.
- [11] Y.-S. Li, A. Helmi, G. De Lucia, and F. Stoeckl. On the common mass scale of the Milky Way satellites. *MNRAS*, 397:L87–L91, July 2009.
- [12] S. Mashchenko, H. M. P. Couchman, and A. Sills. Modeling Star Formation in Dwarf Spheroidal Galaxies: A Case for Extended Dark Matter Halos. *ApJ*, 624:726–741, May 2005.
- [13] M. L. Mateo. Dwarf Galaxies of the Local Group. *ARA&A*, 36:435–506, 1998.
- [14] M. Metz and P. Kroupa. Dwarf spheroidal satellites: are they of tidal origin? *MNRAS*, 376:387–392, March 2007.

- [15] M. Metz, P. Kroupa, and H. Jerjen. The spatial distribution of the Milky Way and Andromeda satellite galaxies. *MNRAS*, 374:1125–1145, January 2007.
- [16] M. Metz, P. Kroupa, and H. Jerjen. Discs of satellites: the new dwarf spheroidals. *MNRAS*, 394:2223–2228, April 2009.
- [17] M. Metz, P. Kroupa, and N. I. Libeskind. The Orbital Poles of Milky Way Satellite Galaxies: A Rotationally Supported Disk of Satellites. *ApJ*, 680:287–294, June 2008.
- [18] M. Metz, P. Kroupa, C. Theis, G. Hensler, and H. Jerjen. Did the Milky Way Dwarf Satellites Enter The Halo as a Group? *ApJ*, 697:269–274, May 2009.
- [19] T. Okazaki and Y. Taniguchi. Dwarf Galaxy Formation Induced by Galaxy Interactions. *ApJ*, 543:149–152, November 2000.
- [20] M. Ricotti and N. Y. Gnedin. Formation Histories of Dwarf Galaxies in the Local Group. *ApJ*, 629:259–267, August 2005.
- [21] S. Salvadori, A. Ferrara, and R. Schneider. Life and times of dwarf spheroidal galaxies. *MNRAS*, 386:348–358, May 2008.
- [22] R. B. Tully, L. Rizzi, A. E. Dolphin, I. D. Karachentsev, V. E. Karachentseva, D. I. Makarov, L. Makarova, S. Sakai, and E. J. Shaya. Associations of Dwarf Galaxies. *AJ*, 132:729–748, August 2006.
- [23] S. M. Walsh, H. Jerjen, and B. Willman. A Pair of Boötes: A New Milky Way Satellite. *ApJL*, 662:L83–L86, June 2007.