

# CAÍDA DE ASOCIACIONES DE GALAXIAS ENANAS AL HALO DE LA VÍA LÁCTEA

**José Antonio Benavides Blanco<sup>1</sup>**

&

**Rigoberto Casas Miranda<sup>2</sup>**

Grupo de Astrofísica

<sup>1</sup>Universidad Antonio Nariño

<sup>2</sup>Universidad Nacional de Colombia

*Julio de 2017, San José-Costa Rica*

# Grupo y área de trabajo

Grupos de investigación



## Grupo de astrofísica

---

[Presentación](#) | [Líder](#) | [Sedes](#) | [Dependencias](#) | [Planes de estudio](#) | [Agendas de conocimiento](#) | [Áreas OCDE](#) | [Líneas de Investigación](#) | [Enfoque estratégico](#) | [Prioridades](#) | [Perspectiva interdisciplinaria](#) | [Integrantes](#) | [Proyectos](#) | [Productos](#)

### Presentación

El grupo de Astrofísica estudia la formación y evolución de galaxias en un contexto cosmológico. Dentro de los problemas que se estudian en el grupo se encuentra la formación y evolución de estructura en el Universo, la formación y evolución de galaxias y la materia oscura en diferentes escalas, entre otros.

# Grupo y área de trabajo

## Enfoque estratégico

Trabajo de investigación en Ciencias Básicas - Astronomía y Astrofísica. Se estudian problemas que nos acercan a conocer mejor el origen y evolución del universo como un todo y el origen y evolución del Grupo Local, en particular. Se atacan problemas como la cantidad de materia oscura en el Grupo Local, La distribución de materia en el Universo y la interacción entre la Vía Láctea y sus galaxias satélites.

---

## Prioridades de investigación

Investigación básica en Astronomía y Astrofísica. Formación de capital humano en ciencias. Completar un conjunto de herramientas computacionales, software y hardware, para el desarrollo de simulaciones numéricas.

---

## Perspectiva interdisciplinaria

Intedisciplinarietà: el tema de investigación que se trabaja en el Grupo requiere de diversos conocimientos, como son: programación, física y observaciones astronómicas entre otros. Trabajo en red: se cuenta con colaboraciones nacionales con grupos de investigación de la Universidad de los Andes y de la Universidad de Antioquia Internacionalización: Los resultados de las investigaciones se publican en revistas internacionales especializadas, se presentan en eventos científicos nacionales e internacionales. Adicionalmente se cuenta con una colaboración con un grupo de investigación de la Universidad de Bonn.

# Grupo y área de trabajo

- ✓ YEYMY DALLANA CAMARGO CAMARGO
- ✓ OMAR ALFONSO BOHORQUEZ PACHECO
- ✓ DIEGO FERNANDO CASTELLANOS TORRES
- ✓ JOSE ANTONIO BENAVIDES BLANCO
- ✓ JORGE ENRIQUE GARCIA FARIETA
- ✓ RIGOBERTO ANGEL CASAS MIRANDA

# Galaxias en el universo



Fig.1 Imagen del cielo tomada por el telescopio espacial Hubble SDSS J11004+4112, muestra de la abundancia de las galaxias en el universo. Tomado de [<http://hubblesite.org/>] consultado el 23 de marzo de 2015.



# Simulaciones cosmológicas

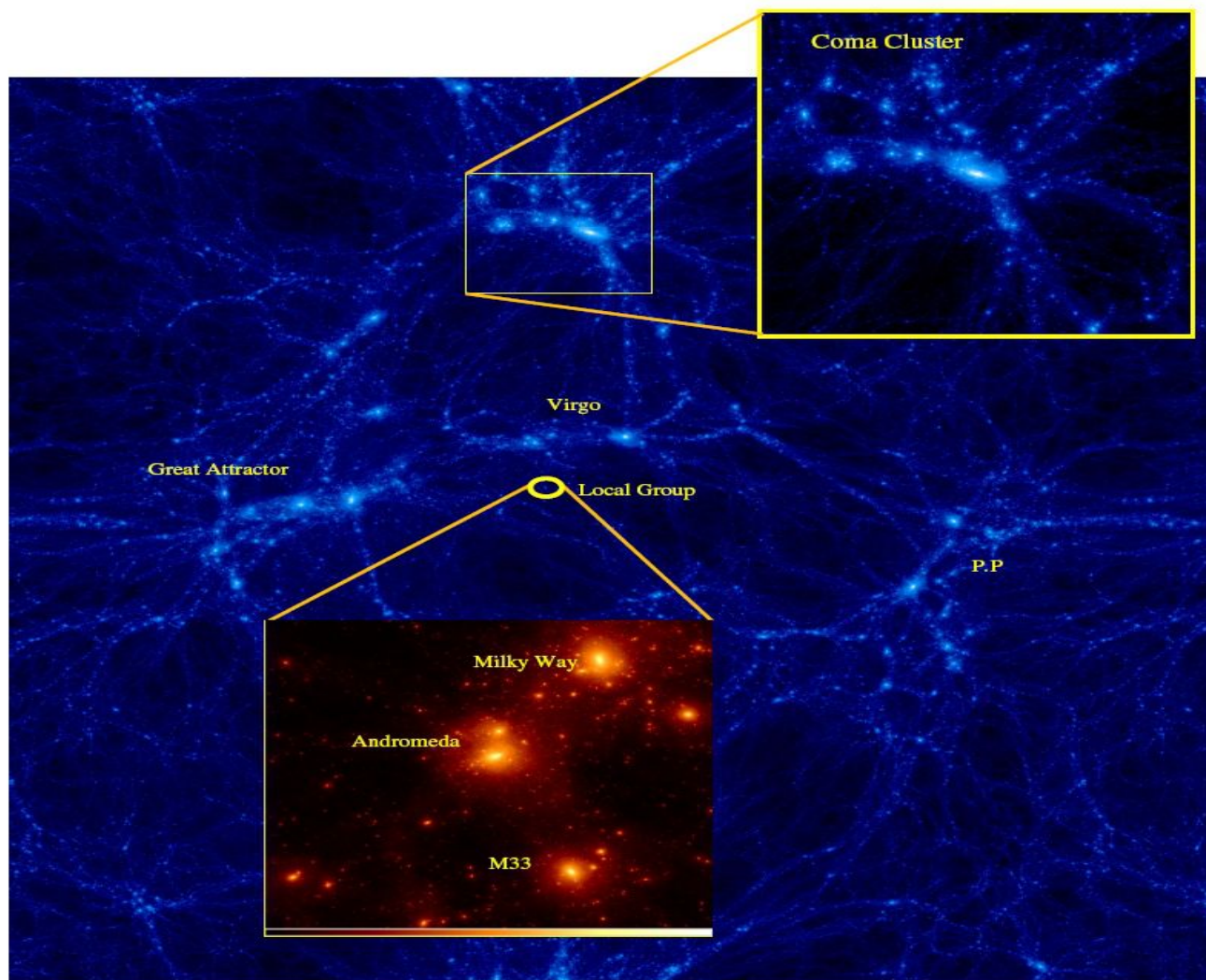


Fig.2 Imagen obtenida de una simulación del universo a gran escala donde se muestra la densidad de materia oscura en el universo. [Tomada de <http://www.clues-project.org/> consultado el 7 de febrero de 2015].



# El Grupo Local

En trabajos realizados por Hodge P. (1971) consideraba 24 miembros para el Grupo Local de las cuales 21 son galaxias enanas, Van den Bergh S. (2000) reconoce 35 miembros, con las observaciones actuales ya se sobrepasa los 40 miembros para la conformación del Grupo Local.

Por otro lado, Klypin et. al. (1999) en “Where are the missing galactic satellites?” mencionan que el modelo cosmológico se predice la presencia del orden de 300 satélites dentro de un radio de 1.5 Mpc en comparación con los ~40 satélites reportados.

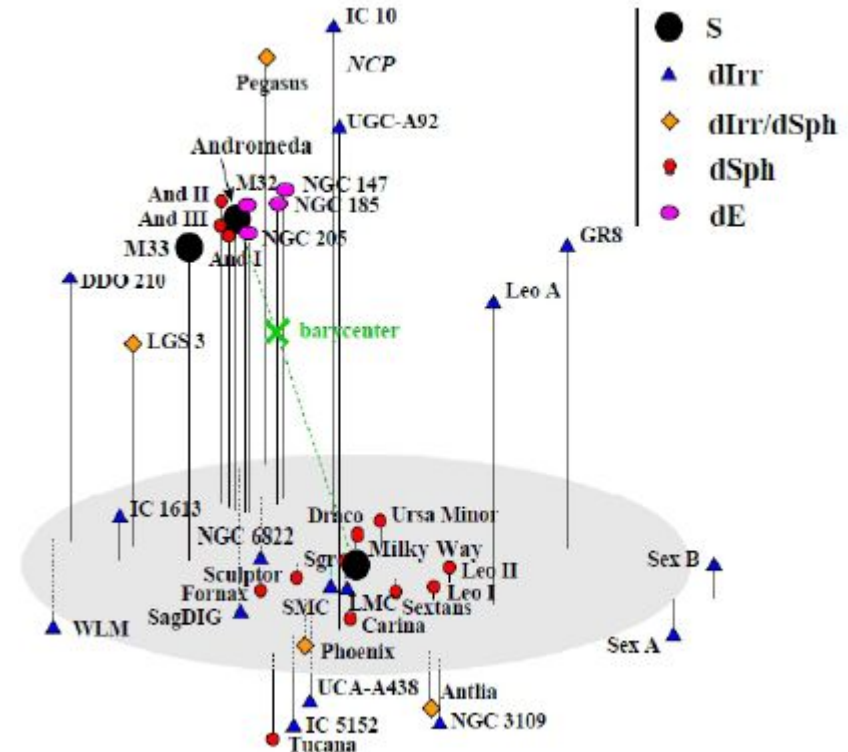


Fig. 4. El esquema ilustra las galaxias pertenecientes al Grupo Local haciendo énfasis en la ubicación y la morfología de los objetos que contiene. Tomado de: Grebel, E.K, Star Formation Histories of Local Group Dwarf Galaxies. 1998



# Distribución de satélites de la Vía Láctea

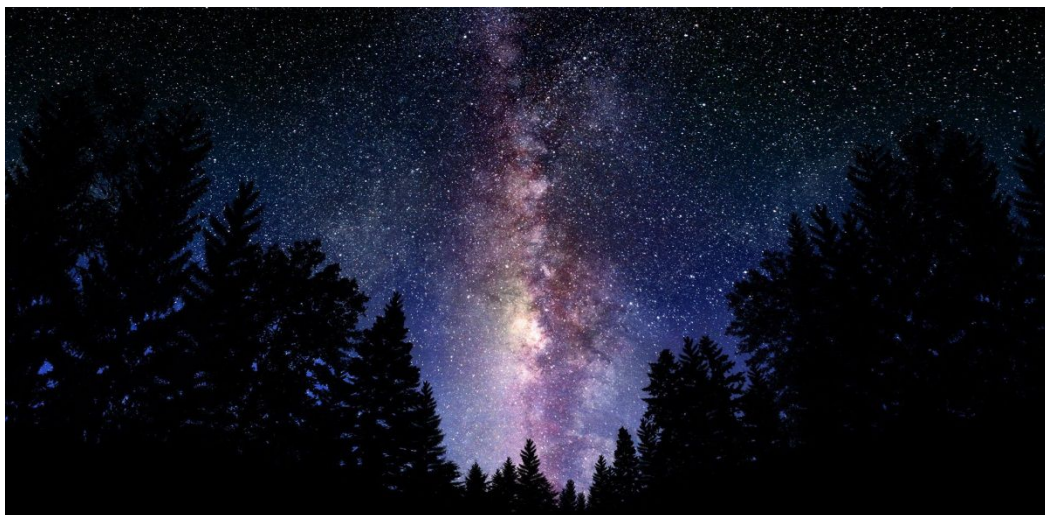


Fig 5. Gráfico del número de objetos contra distancia (kpc) para los objetos que pertenecen a las estructuras de disco de satélites de la Vía Láctea y la M31 (Pawloski, Kroupa & Jerjen 2013).

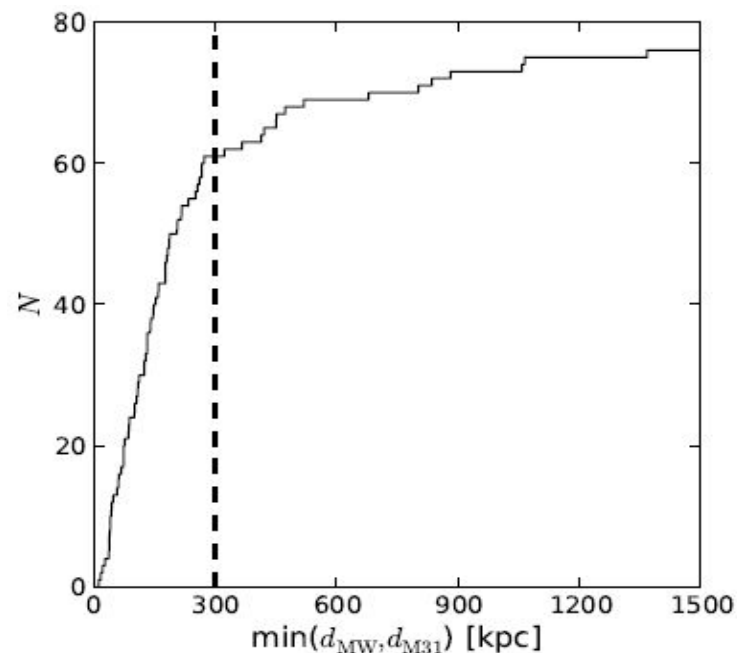
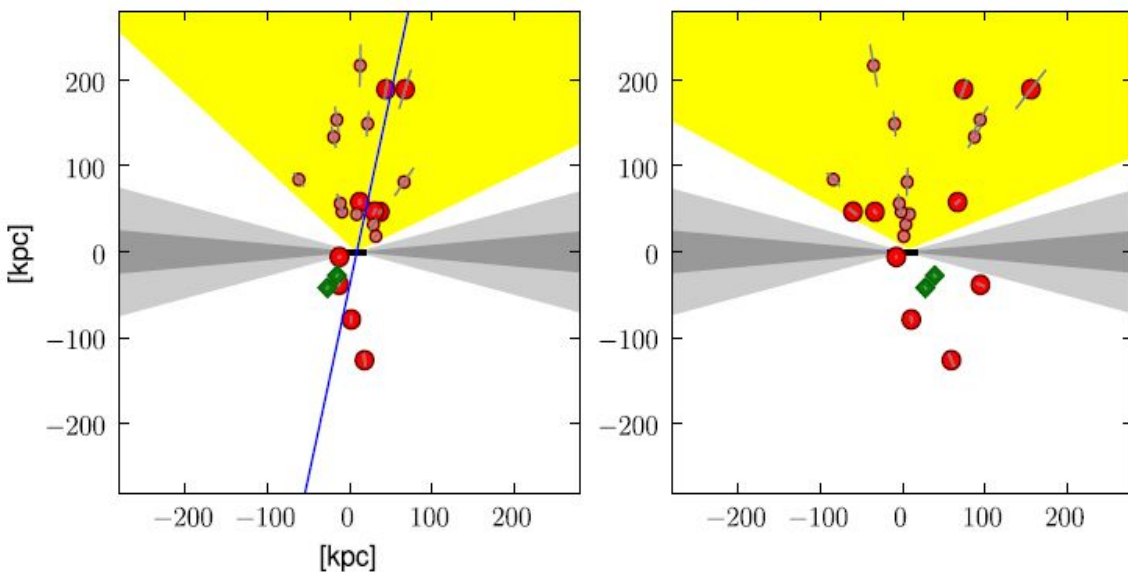
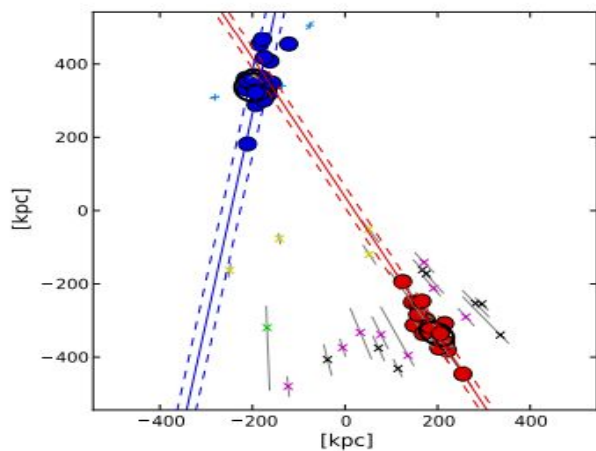
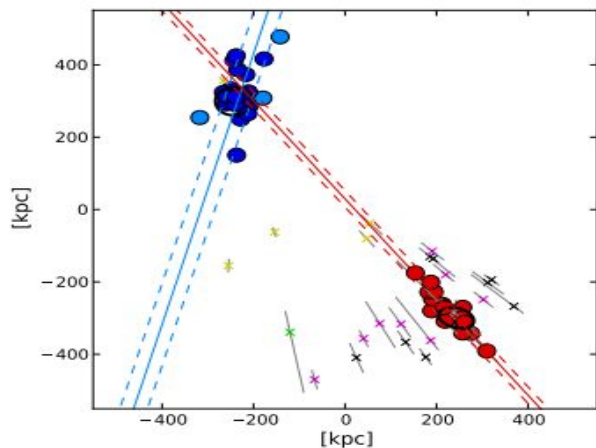


Fig. 6 Distribución espacial de algunas de las galaxias enanas (círculos rojos) y Ultra Feint (círculos purpura) respecto al disco de la Vía Láctea (barra central de color negro) en un rango de 300 kpc (Metz M. et al. 2009).



# Galaxias satélites



## TWO PLANES OF SATELLITES IN THE CENTAURUS A GROUP

R. BRENT TULLY<sup>1</sup>, NOAM I. LIBESKIND<sup>2</sup>, IGOR D. KARACHENTSEV<sup>3</sup>, VALENTINA E. KARACHENTSEVA<sup>4</sup>, LUCA RIZZI<sup>5</sup>, AND EDWARD J. SHAYA<sup>6</sup>

<sup>1</sup>Institute for Astronomy, University of Hawaii, 2680 Woodlawn Drive, Honolulu, HI 96822, USA

<sup>2</sup>Leibniz-Institut für Astrophysik Potsdam, An der Sternwarte 16, D-14482, Potsdam

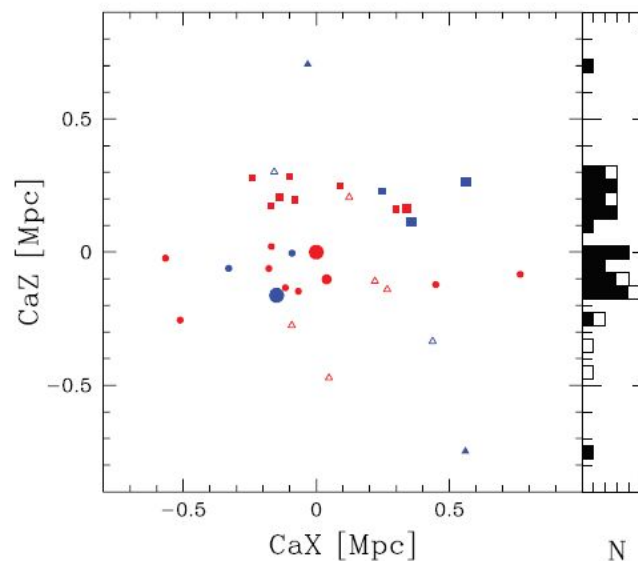
<sup>3</sup>Special Astrophysical Observatory, Nizhnij Arkhyz, Karachai-Cherkessian Republic, 369167 Russia

<sup>4</sup>Main Astronomical Observatory, National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev, 03680 Ukraine

<sup>5</sup>W. M. Keck Observatory, 65-1120 Mamalahoa Hwy., Kamuela, HI 96743, USA and

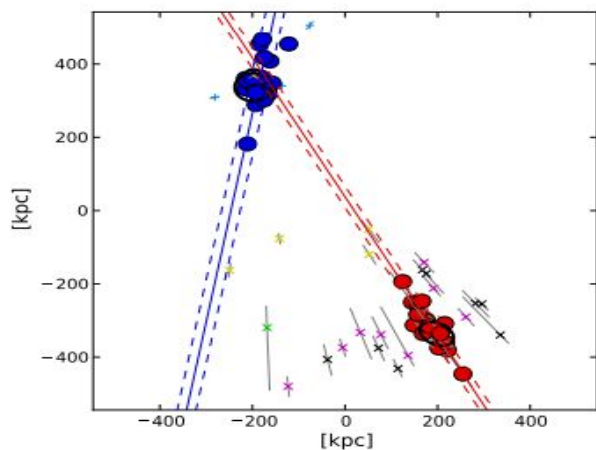
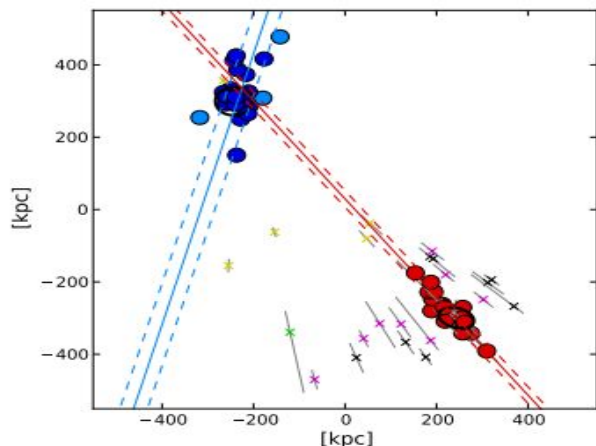
<sup>6</sup>Astronomy Dept., University of Maryland, College Park, MD 20743, USA

Draft version March 20, 2015



Pawlowski, M., Kroupa P. & Jerjen H. (2013). *Dwarf galaxy planes: the discovery of symmetric structures in the Local Group.*

# Galaxias satélites



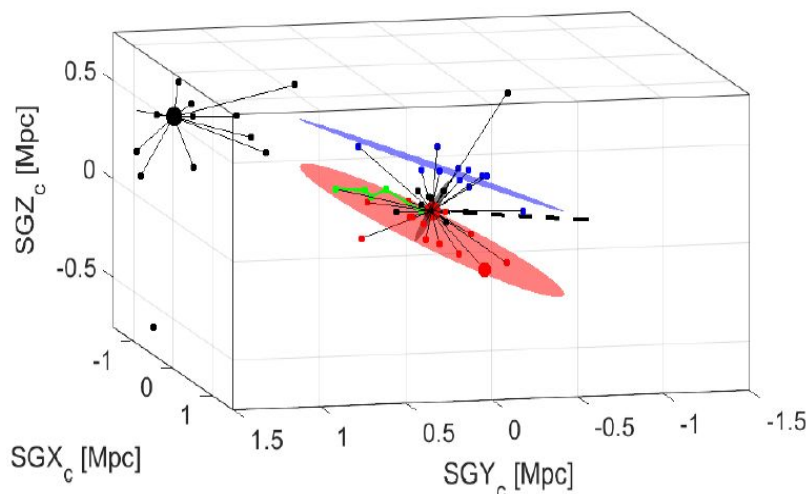
## Testing the two planes of satellites in the Centaurus Group

Oliver Müller<sup>1</sup>, Helmut Jerjen<sup>2</sup>, Marcel S. Pawlowski<sup>3</sup>, and Bruno Binggeli<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Department Physik, Universität Basel, Klingelbergstr. 82, CH-4056 Basel, Switzerland  
e-mail: [oliver89.mueller@unibas.ch](mailto:oliver89.mueller@unibas.ch); [bruno.binggeli@unibas.ch](mailto:bruno.binggeli@unibas.ch)

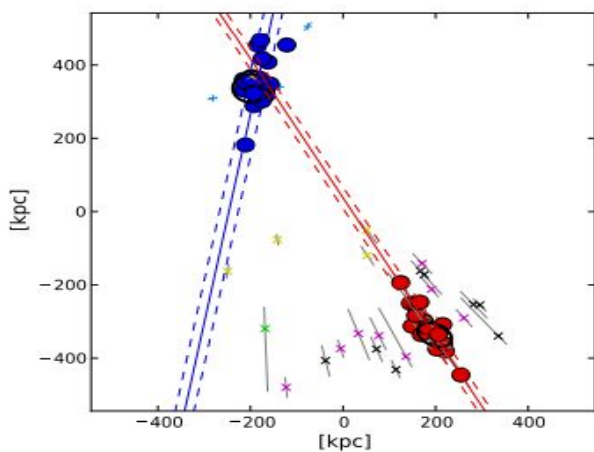
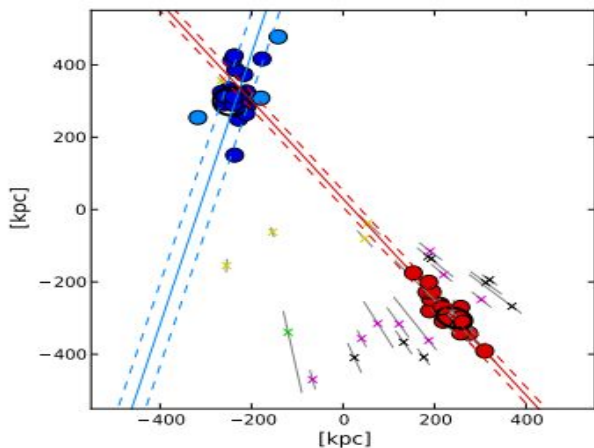
<sup>2</sup> Research School of Astronomy and Astrophysics, Australian National University, Canberra, ACT 2611, Australia  
e-mail: [helmut.jerjen@anu.edu.au](mailto:helmut.jerjen@anu.edu.au)

<sup>3</sup> Department of Astronomy, Case Western Reserve University, 10900 Euclid Avenue, Cleveland, OH 44106, USA  
e-mail: [marcel.pawlowski@case.edu](mailto:marcel.pawlowski@case.edu)



Pawlowski, M., Kroupa P. & Jerjen H. (2013). *Dwarf galaxy planes: the discovery of symmetric structures in the Local Group.*

# Galaxias satélites



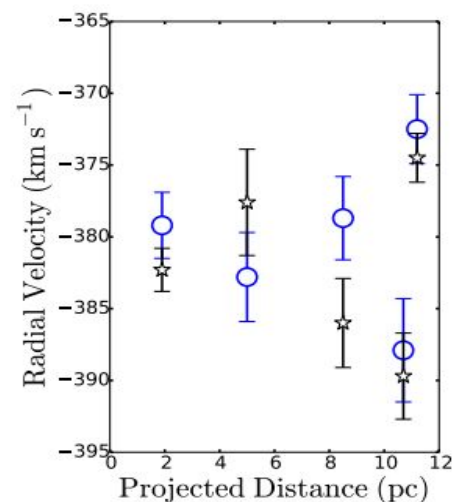
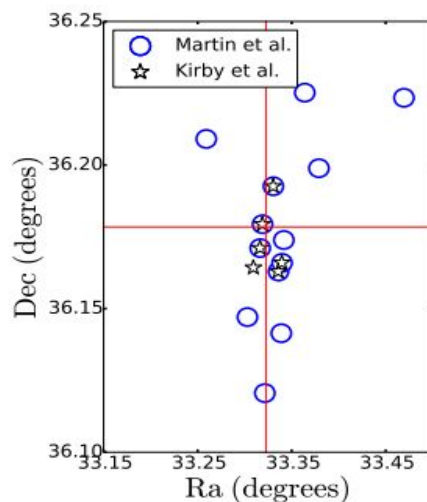
MNRAS **000**, 1–7 (2016)

Preprint 13 September 2016

Compiled using MNRAS L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X style file v3.0

## The Potential of the Dwarf Galaxy Triangulum II for Dark Matter Indirect Detection

Anna Genina <sup>\*</sup> Malcolm Fairbairn <sup>†</sup>  
*Physics, King's College London, Strand, London WC2R 2LS*



Pawlowski, M., Kroupa P. & Jerjen H. (2013). *Dwarf galaxy planes: the discovery of symmetric structures in the Local Group.*

# Hipótesis de formación de DoS

- Formación por acreción (Caída de asociaciones)
- Encuentros cercanos (Colisión galáctica)



# Modelo propuesto: Acreción de galaxias enanas

En este trabajo se propuso un modelo en el cual se considera que las galaxias enanas que conforman el disco de satélites de la Vía Láctea fueron acretadas por interacción gravitacional. Estas se encontraban en asociaciones de galaxias que se hallaban en regiones periféricas al Grupo Local. Al ingresar al halo de materia oscura de la Vía Láctea las enanas experimentan efectos de fricción dinámica y fuerzas de marea que generan decaimientos en su órbita y deformaciones en la estructura de la asociación, permitiéndole a las enanas evolucionar en forma individual.

# Generación e interacción de los objetos

## ZENO

Para la generación de los objetos astrofísicos iniciales del modelo se utilizó el paquete de programas ZENO desarrollado por Barnes J. de la universidad de Hawaii

Parámetro	ZENO	Astronómicas
Masa	1	$5 \times 10^{10} M_{\odot}$
Longitud	1	3.5 kpc

**Tabla 1** Relaciones entre unidades astronómicas y unidades ZENO

### Joshua Edward Barnes

I am a faculty member at the [Institute for Astronomy \(IfA\)](#), which is part of the [University of Hawaii](#).

[What's New Here?](#)

[Research](#)

[Teaching](#)

[Astronomy Laboratory](#)

[Publications](#)

[Talks](#)

[Resume](#)

[Astronomy Education](#)

[Virtual Photo Album](#)

#### Fall 2015 Schedule

Mon. IfA: 9:00—18:00  
*Astr 241: 10:30—11:20, Wat 144*

Tue. IfA: 9:00—18:45


Wed. IfA: 8:15—18:30  
*Astr 241: 10:30—11:20, Wat 144*

Thu. IfA: 12:00—18:45


Fri. IfA: 8:15—17:00  
*Astr 241: 10:30—11:20, Wat 144*

Office hours Mon. 9:30—10:20,  
Thu. 14:30—15:20, Wat 423

Travel none planned



Joshua E. Barnes ([barnes@ifa.hawaii.edu](mailto:barnes@ifa.hawaii.edu))  
 Updated: 28 October, 2015  
<http://www.ifa.hawaii.edu/~barnes/barnes.html>



# Generación e interacción de los objetos



## GADGET - 2

A code for cosmological simulations of structure formation



ELSEVIER

New Astronomy 6 (2001) 79–117

New Astronomy

www.elsevier.nl/locate/newast

GADGET: a code for collisionless and gasdynamical cosmological simulations

Volker Springel<sup>a,b,\*</sup>, Naoki Yoshida<sup>a</sup>, Simon D.M. White<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Max-Planck-Institut für Astrophysik, Karl-Schwarzschild-Straße 1, 85740 Garching bei München, Germany

<sup>b</sup>Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics, 60 Garden Street, Cambridge, MA 02138, USA

Received 13 March 2000; received in revised form 19 December 2000; accepted 29 January 2001

Communicated by K. Nomoto

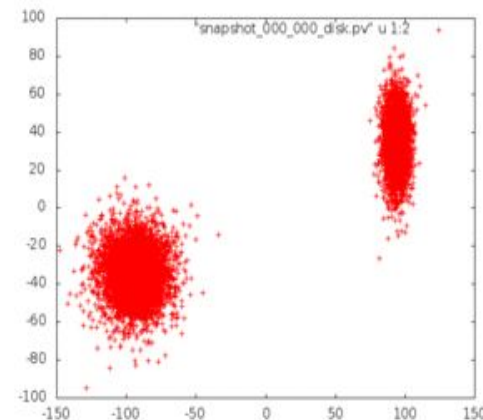
## User guide for GADGET-2

Volker Springel

volker@mpa-garching.mpg.de

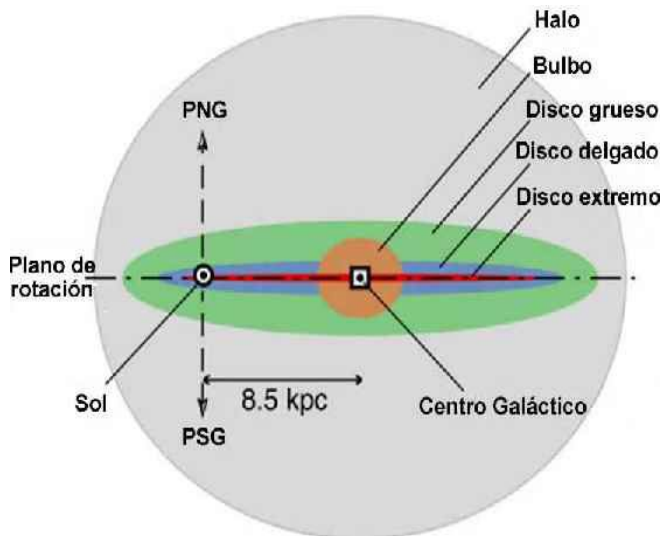
Max-Planck-Institute for Astrophysics, Garching, Germany

May 1, 2005



**Fig. 10** Ejemplo de simulación para la interacción de dos galaxias de disco realizado en GADGET-2

# Componentes de una galaxia de disco



**Fig. 11** (Izquierda) representación de las componentes de la Vía Láctea [ilustración de Maksim 2006, tomado de: <http://red-estelar.webcindario.com/Via-Lactea.html> consultado el 22 de Noviembre de 2014], (derecha) posible forma que podría tener la Vía Láctea a partir de la observación de investigación de otras galaxias de disco [tomado de: <http://www.blogodisea.com/galaxias-via-lactea-materia-oscura.html> consultado el 22 de noviembre de 2014].

# Componentes de una galaxia de disco

## Perfil de Hernquist (Halo de materia oscura y bulbo)

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

$$a = r_s \sqrt{2[\ln(1+c) - c/(1+c)]}$$

$$c = \frac{r_{200}}{r_s}$$

(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)

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

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

$$\frac{M_d}{2\pi R_d^2} = \Sigma_0$$

(Springel and White, 1999)

Donde:

$M_d$ : Es la masa del disco.

$R_d$ : La longitud escala radial.

$z_0$ : longitud de escala vertical.

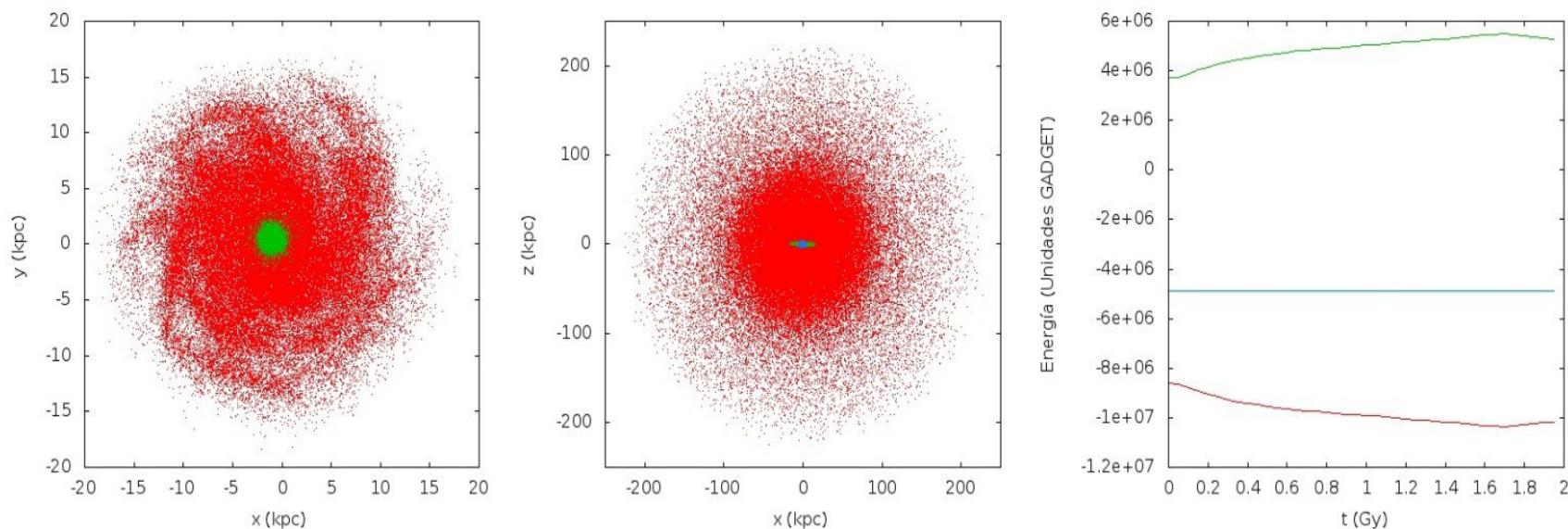


# Condiciones iniciales para la Vía Láctea

Parámetro	Símbolo	Valor reportado	Valor asignado
Masa del esferoide	$M_b$	$4.5 \pm 1.5 \times 10^9 M_\odot$	$5 \times 10^9 M_\odot$
Longitud de escala del esferoide	$a_b$	0.3 kpc	0.3 kpc
Masa del disco	$M_d$	$4.5 \pm 0.5 \times 10^{10} M_\odot$	$5 \times 10^{10} M_\odot$
Longitud de escala radial del disco	$R_d$	$2.5 \pm 0.5$ kpc	3.0 kpc
Longitud de escala vertical del disco	$z_d$	0.3 a 1 kpc	1 kpc
Masa del halo	$M_h$	$2_{-1.8}^{+3} \times 10^{12} M_\odot$	$1 \times 10^{12} M_\odot$
Longitud de escala de halo	$a_h$	12.96 kpc	12.96 kpc

**Tabla 2.** Valores asignados para el modelo de una galaxia de disco con las características de la Vía Láctea (Binney J. & Tremaine S., 2008)..

# Condiciones iniciales para la Vía Láctea

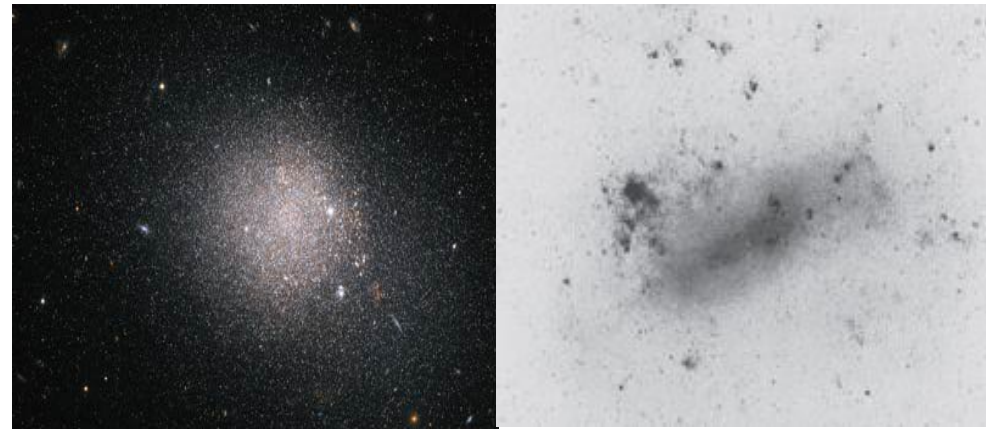
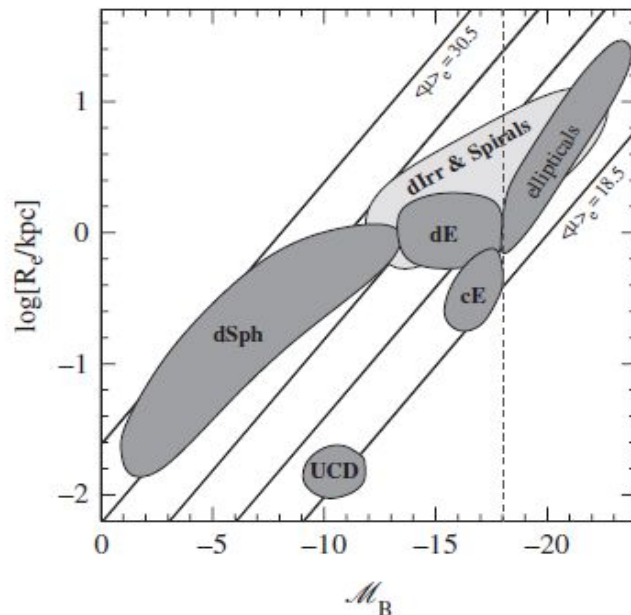


**Figura 12** Resultados de la virialización de una galaxia de disco con las propiedades de la Vía Láctea. A la izquierda disco y esferoide, en el centro se muestra la galaxia envuelta en el halo de materia oscura y a la derecha la curva de energía en unidades de GADGET ( $10^{10} M_{\odot} km^2/s^2$ ) en función del tiempo.

# Galaxias Enanas

Las galaxias enanas presentan algunas de las siguientes propiedades:

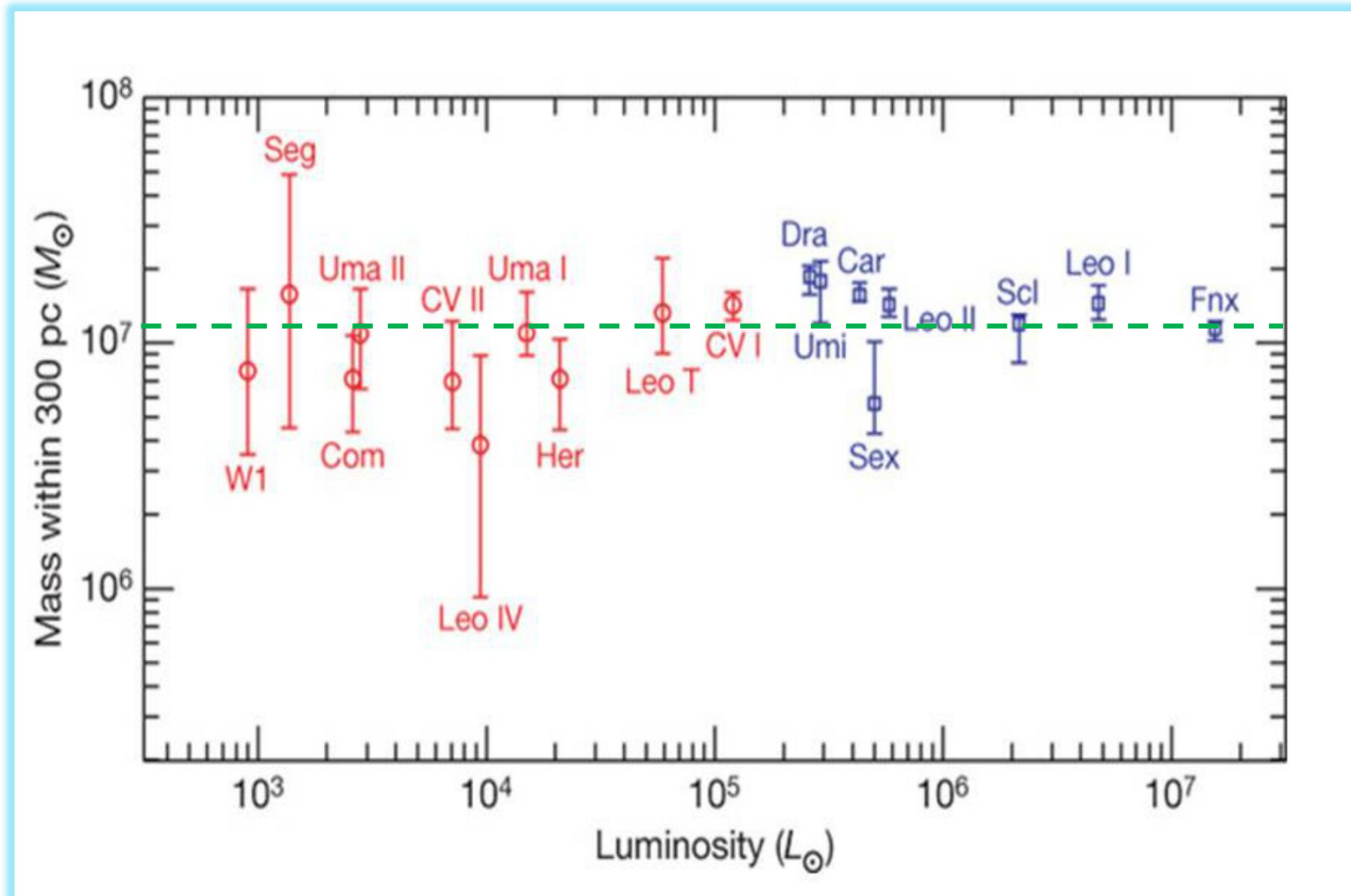
- Compuestas principalmente por estrellas viejas
- Poca composición de metales
- Bajo brillo



**Fig 13** Muestra de dos galaxias enanas: NGC 4163 (izquierda) una galaxia esferoidal (dSph) y la Gran Nube de Magallanes (LMC) (derecha) una galaxia irregular (dIrr). [Tomado de los archivos de la NASA].

**Fig 14** Esquema de distribución de galaxias relacionando sus radios efectivos con su magnitud absoluta: Enanas Esféricas (dSph), Enanas Elípticas (dE), Enanas Irregulares (dIrr), Enanas Ultra Compactas (UCD), Espirales, Elípticas, Elípticas Compactas (cE) (Mo H., 2010)

# Galaxias enanas del Grupo Local



**Fig 15.** Escala de masa frecuente para algunas galaxias enanas del grupo local, (Strigari et al. 2008).

# Generación de una galaxias enana

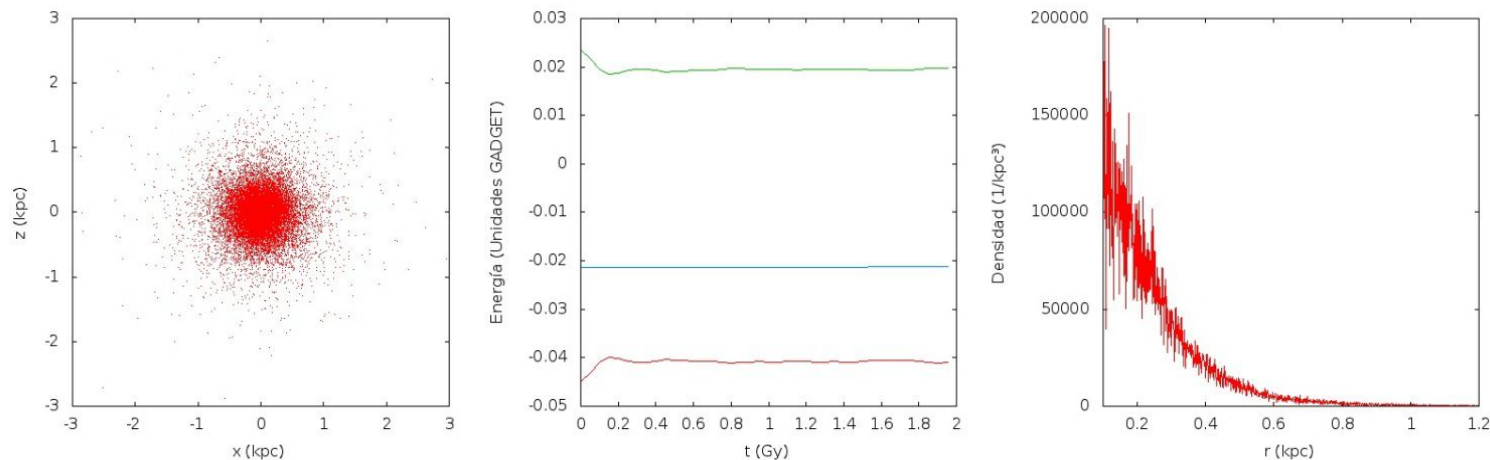


## Perfil de Plummer (esferoidal)

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

Parámetro	Valor asignado
Masa Estelar	$1.002 \times 10^7 M_{\odot}$
Radio de Plummer	0.3 kpc

Tabla 3. Parámetros iniciales para la generación de una galaxia enana sin materia oscura



**Fig. 16.** Resultados obtenidos de la virialización de una galaxia enana libre de materia oscura

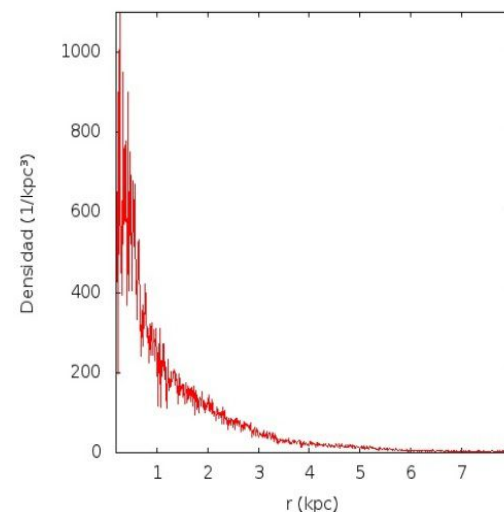
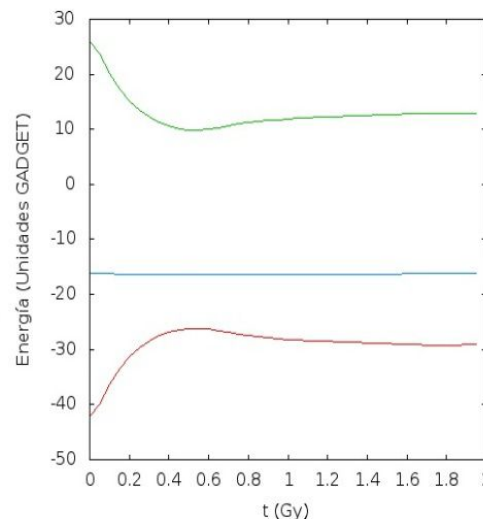
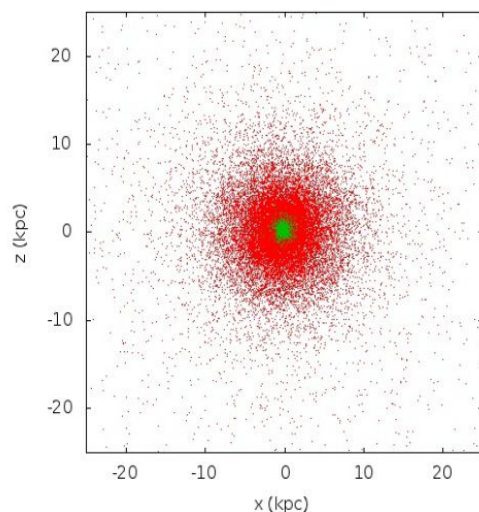


# Generación de una galaxias enana



Parámetro	Valor asignado
Masa Estelar	$1.002 \times 10^7 M_{\odot}$
Radio de Plummer	0.3 kpc
Masa Halo	$9.22 \times 10^8 M_{\odot}$
Factor de escala del Halo	0.585
Softening length stars	0.007 kpc

Tabla 4. Parámetros iniciales para la generación de una galaxia enana con halo de materia oscura



**Fig. 17.** Resultados obtenidos de la virialización de una galaxia enana envuelta en un halo de materia oscura

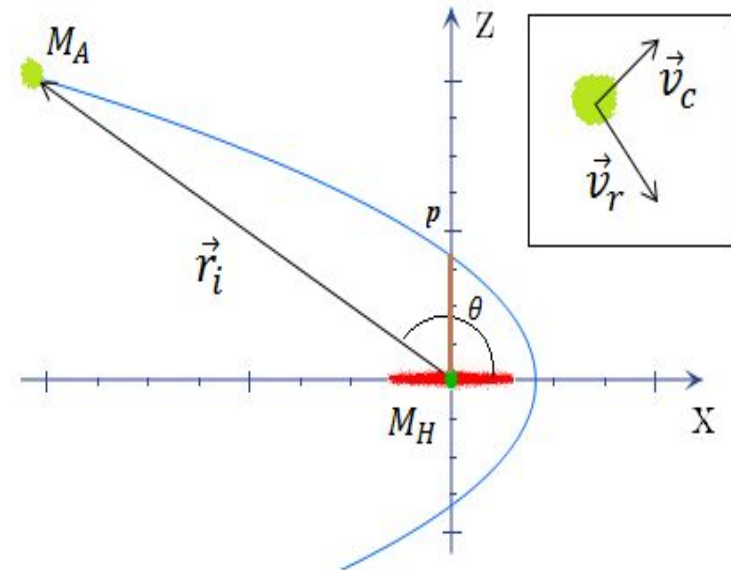
# Condiciones orbitales del modelo

$$r = \frac{p}{1 + \varepsilon \cos(\theta)}$$

$$v_r = \frac{dr}{dt} = \sqrt{\frac{\mu}{p}} \operatorname{sen}(\theta)$$

$$v_c = \frac{d\theta}{dt} = \sqrt{\frac{\mu}{p}} [1 + \cos(\theta)]$$

$$\mu = G(M_1 + M_2)$$



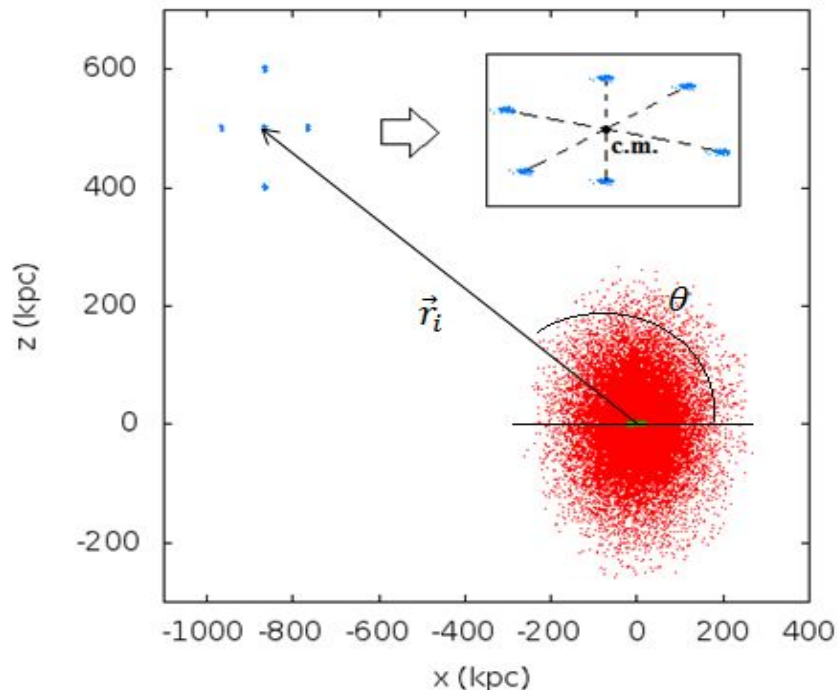
**Fig. 18** Esquema del modelo cinemático de la asociación ( $M_A$ ) en su caída hacia la Vía Láctea ( $M_H$ ) siguiendo una órbita parabólica.

# Asociaciones de galaxias enanas

Grupo	Galaxia principal	No	Distancia (Mpc)	$R_I^{3D}$ (Mpc)	$V_r$ (km/s)	$L_B$ ( $10^{11} L_\odot$ )	$M_{pm}$ ( $10^{11} M_\odot$ )	$M_{vir}$ ( $10^{11} M_\odot$ )	$M_{pm}/L$ ( $M_\odot/L_\odot$ )	$M_{vir}/L$ ( $M_\odot/L_\odot$ )	$M/L_B^{old}$ ( $M_\odot/L_\odot$ )	$t_x H_0$
14+12	NGC 3109	5	1.37	0.35	18	3.7	1.9	1.4	510	360	1220/300	0.86
14+13	NGC 55	5	2.07	0.28	36	40.7	3.8	6.5	90	160	13/17	0.33
		6 <sup>c</sup>		0.45	36	43.2	6.7	8.4	160	190		0.54
14+7	NGC 4212	6	2.94	0.32	42	13.7	5.5	8.: <sup>a</sup>	400	590 <sup>a</sup>		0.30
14+8	UGC 8760	4	3.06	0.30	11	1.4	0.4	0.5	300	380	250/945	1.2
14+6	NGC 784	4	5.2	0.26	17	10.5	1.3	1.7	120	160	330/1110	0.68
14+14	ESO 154-23	3	5.8	0.38	35	10.0	7.3	10.4	730	1040		0.48
14+19	UGC 3974	3	7.9	0.31	26	6.6	4.0	2.: <sup>a</sup>	600	300 <sup>a</sup>		0.52
		4 <sup>b</sup>		0.67	22	7.7	3.5	2.: <sup>a</sup>	450	300 <sup>a</sup>	1060/2040	1.3
Dregs	DDO 155	4	2.28	0.57	37	0.3	13	16	44000	56000		0.66

Tabla 5. Asociaciones de galaxias pertenecientes al grupo local con algunas características similares para los miembros de cada asociación (Tully B. et. al 2006).

# Asociación de enanas para el modelo



**Fig 19** Vía Láctea y una asociación de seis galaxias idénticas y ubicadas simétricamente respecto al centro de masa de la asociación.

Para el modelo de acreción se propuso utilizar:

una asociación compuesta por seis (6) galaxias enanas idénticas ubicadas de forma simétrica respecto al centro del grupo que seguirá una trayectoria parabólica hacia el halo de la Vía Láctea.

Propiedad	Valor asignado
Posición	1 a 4 Mpc
Masa Total	$5.592 \times 10^9 M_{\odot}$
Número de elementos	6
Radio de grupo	100 kpc
Dispersión de velocidades	15.5 km/s

Tabla 6. Valores promedio asignados a la posible asociación progenitora a usar en el modelo.

# Condiciones iniciales para enanas sin materia oscura

$$p = r[1 + \cos(\theta)]$$

$$v_r = \frac{dr}{dt} = \sqrt{\frac{\mu}{p}} \sin(\theta)$$

$$v_c = \frac{d\theta}{dt} = \sqrt{\frac{\mu}{p}} [1 + \cos(\theta)]$$

$$\mu = G(M_1 + M_2)$$

Parámetro	Valor asignado		
Distancia inicial (Mpc)	4	2	1
Ángulo	150°	150°	150°
Masa asociación ( $M_{\odot}$ )	$6 \times 10^7$	$6 \times 10^7$	$6 \times 10^7$
Parámetro de impacto (kpc)	536	268	134
Posición (x,z) (kpc)	(-3464.1, 2000)	(-1732, 1000)	(-866, 500)
Velocidad Radial (km/s)	44.2	62.6	88.5
Velocidad Circular (km/s)	11.9	16.8	23.7

Tabla 7. Condiciones iniciales para la caída de una asociación de galaxias enanas libres de materia oscura



# Resultados sin materia oscura para 1 Mpc

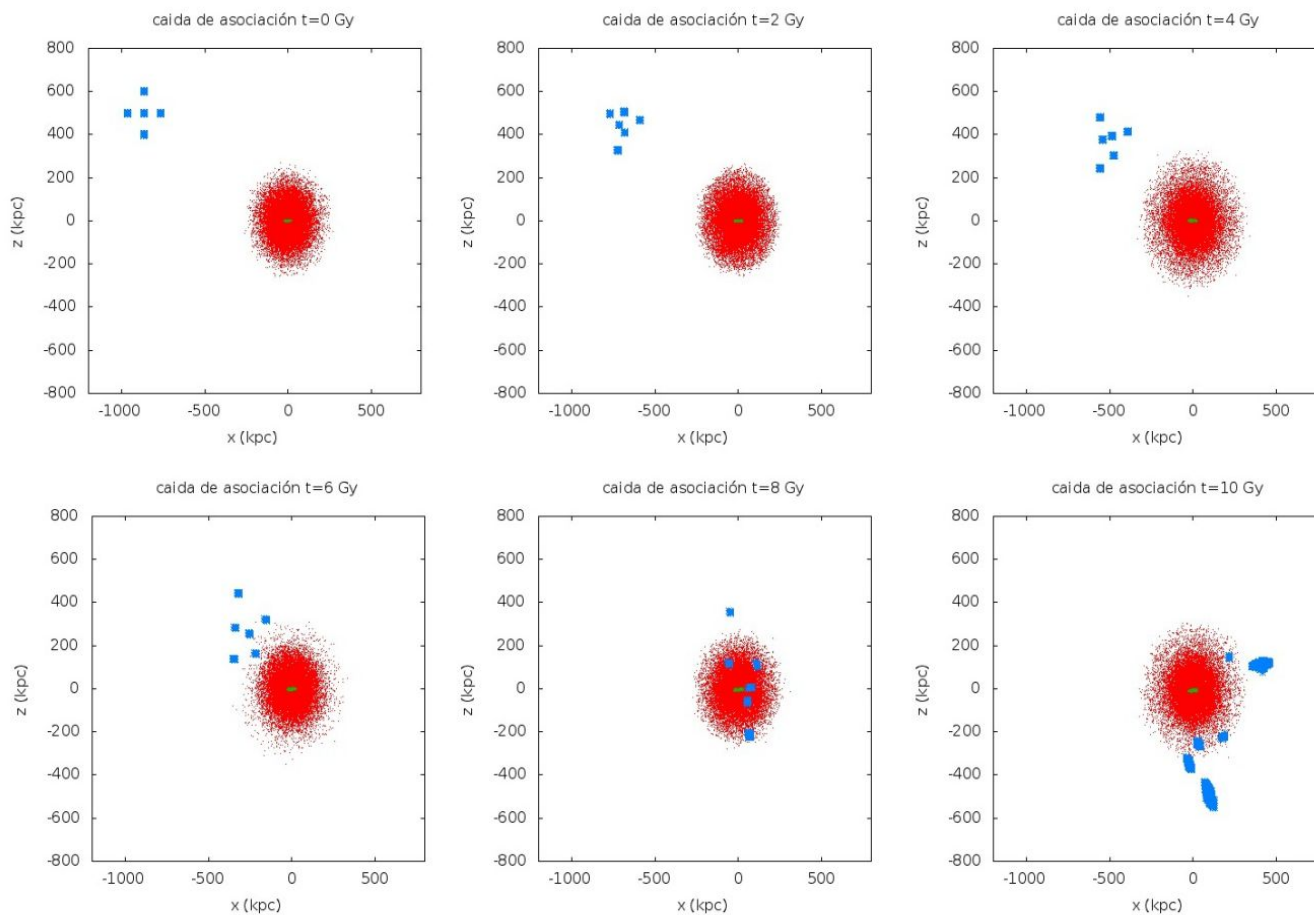
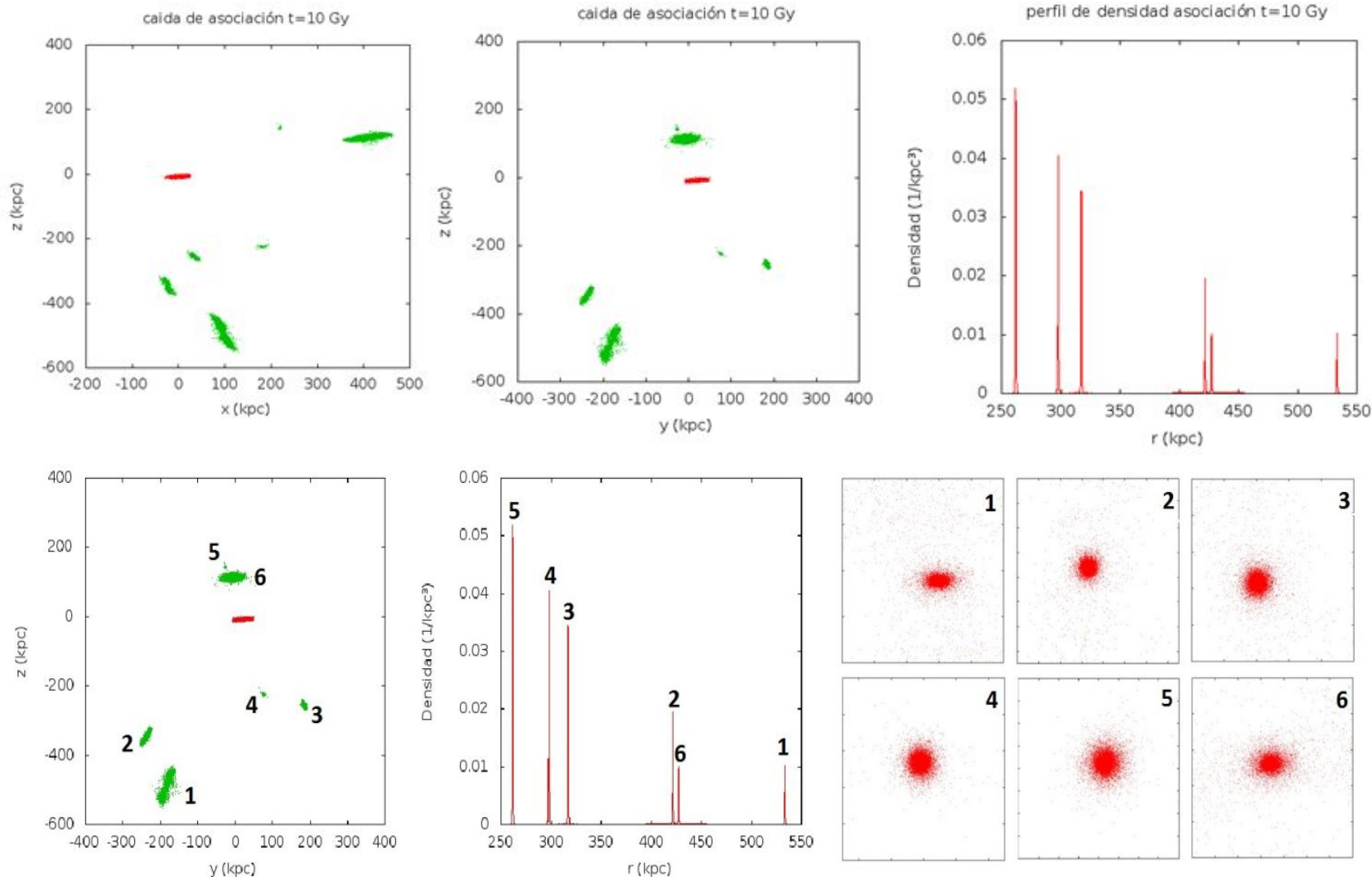
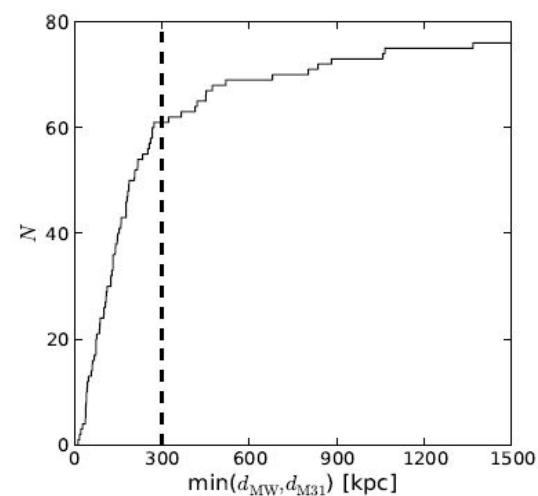
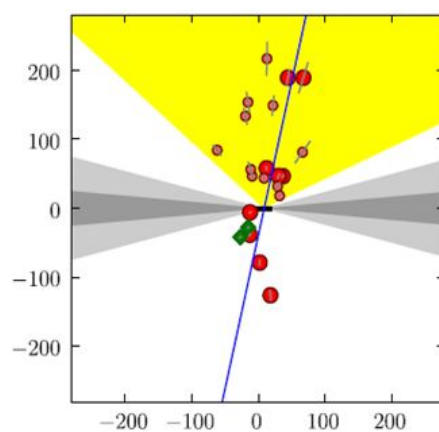
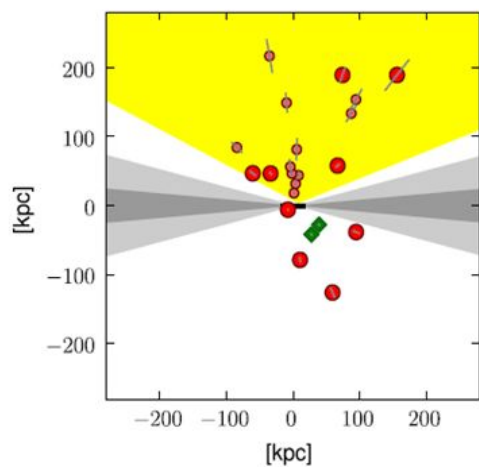
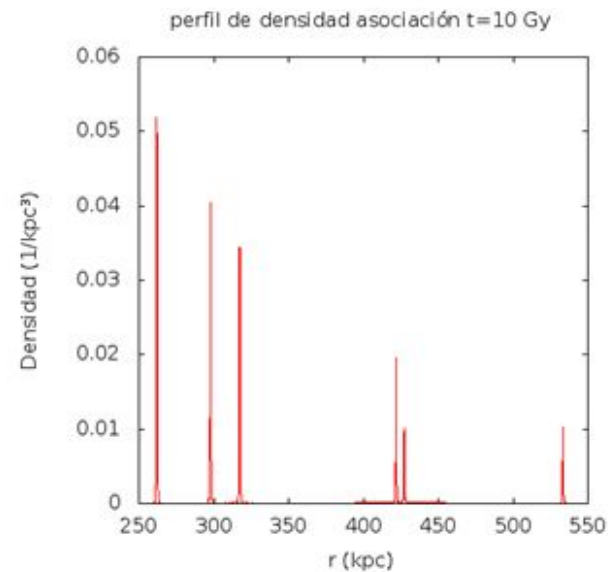
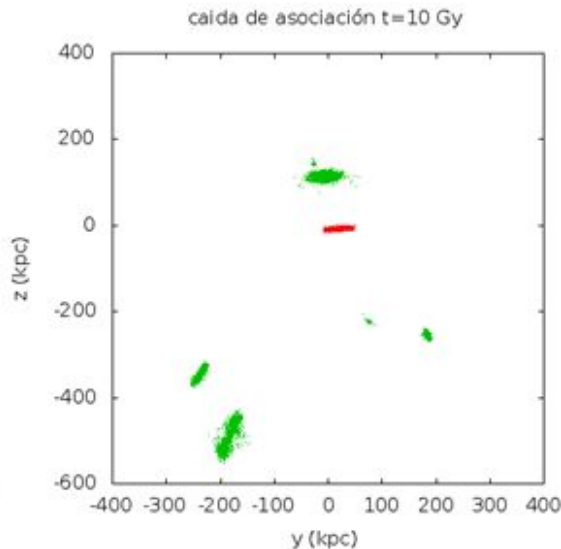
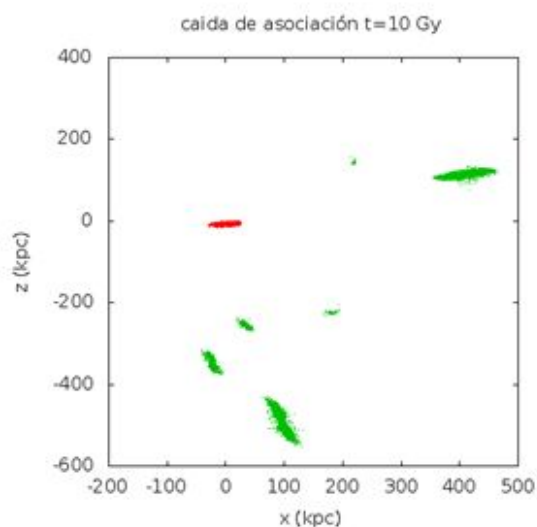


Figura 22. Muestra de snapshots cada 2 Gy para la caída de una asociación de galaxias enanas libres de materia oscura ubicadas inicialmente a 1 Mpc.

# Resultados sin materia oscura para 1 Mpc



# Resultados sin materia oscura para 1 Mpc



# Condiciones iniciales para enanas con materia oscura

$$p = r[1 + \cos(\theta)]$$

$$v_r = \frac{dr}{dt} = \sqrt{\frac{\mu}{p}} \sin(\theta)$$

$$v_c = \frac{d\theta}{dt} = \sqrt{\frac{\mu}{p}} [1 + \cos(\theta)]$$

$$\mu = G(M_1 + M_2)$$

Parámetro	Valor asignado	
Distancia inicial (Mpc)	2	1
Ángulo	150°	150°
Masa asociación ( $M_{\odot}$ )	$5.59 \times 10^9$	$5.59 \times 10^9$
Parámetro de impacto (kpc)	268	134
Posición (x,z) (kpc)	(-1732, 1000)	(-866, 500)
Velocidad Radial (km/s)	62.8	88,7
Velocidad Circular (km/s)	16.8	23,8

Tabla 8. Condiciones iniciales para la caída de una asociación de galaxias enanas con materia oscura

# Resultados con materia oscura para 1 Mpc

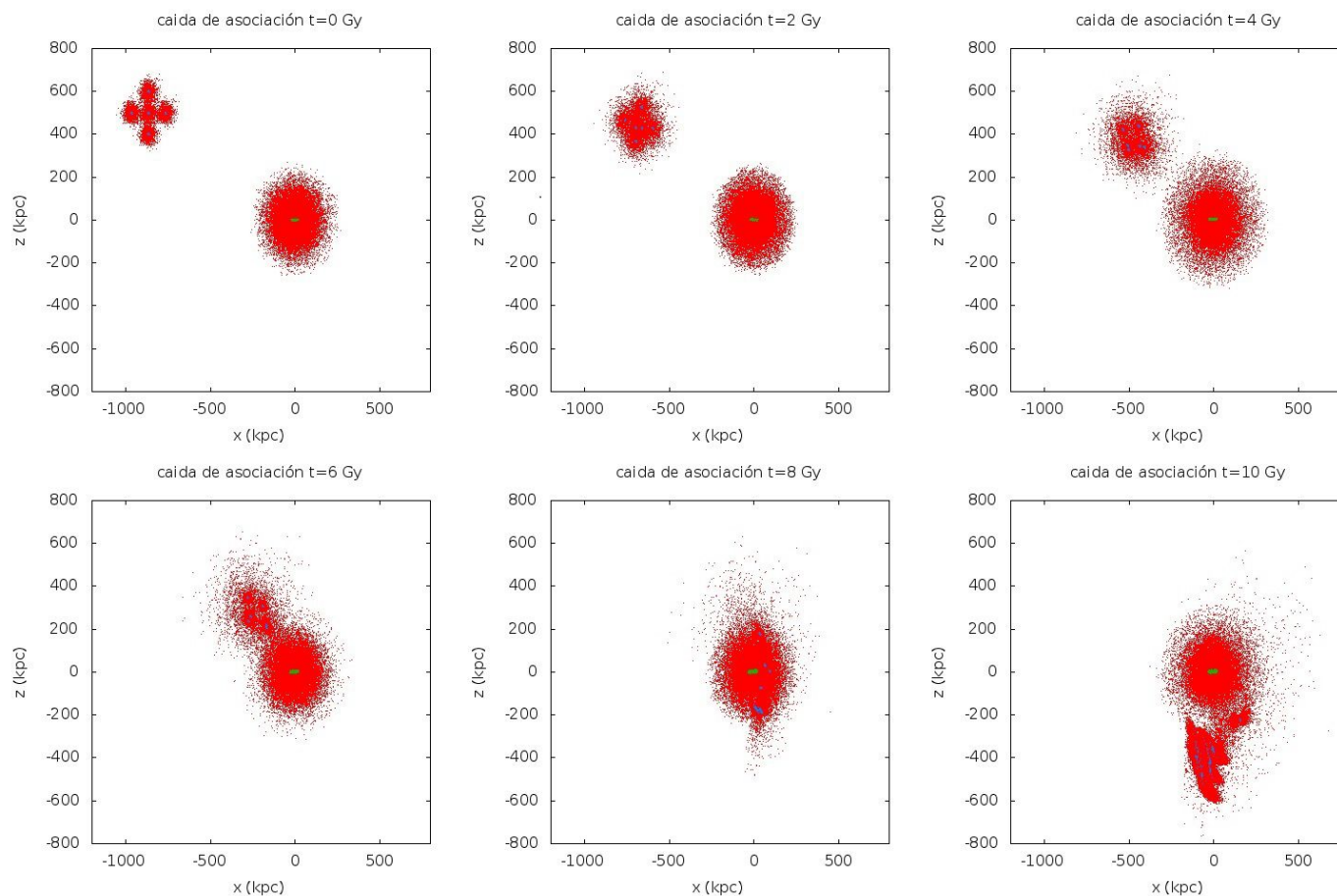
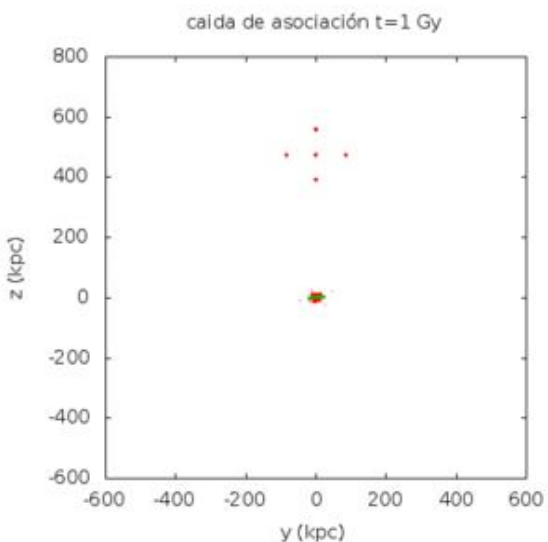
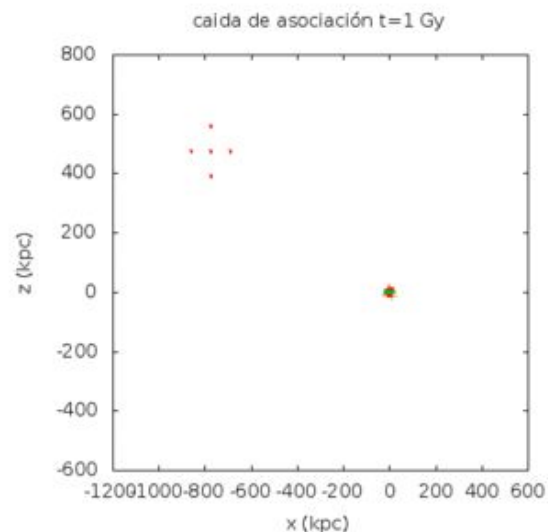


Figura 28. Muestra de snapshots cada 2 Gy para la caída de una asociación de galaxias enanas con materia oscura ubicadas inicialmente a 1 Mpc.

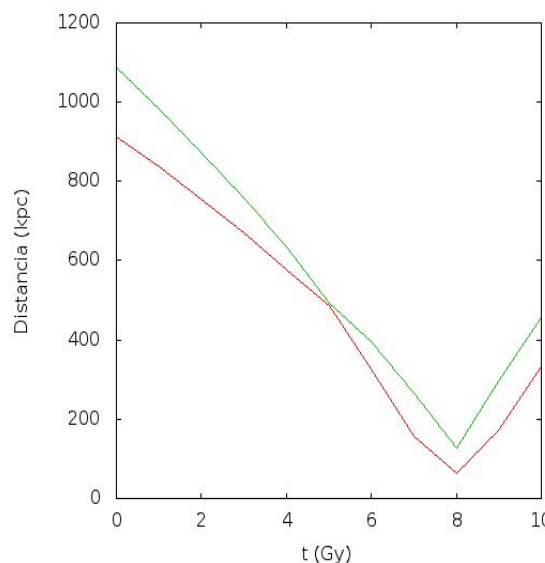


# Condiciones iniciales para enanas con materia oscura



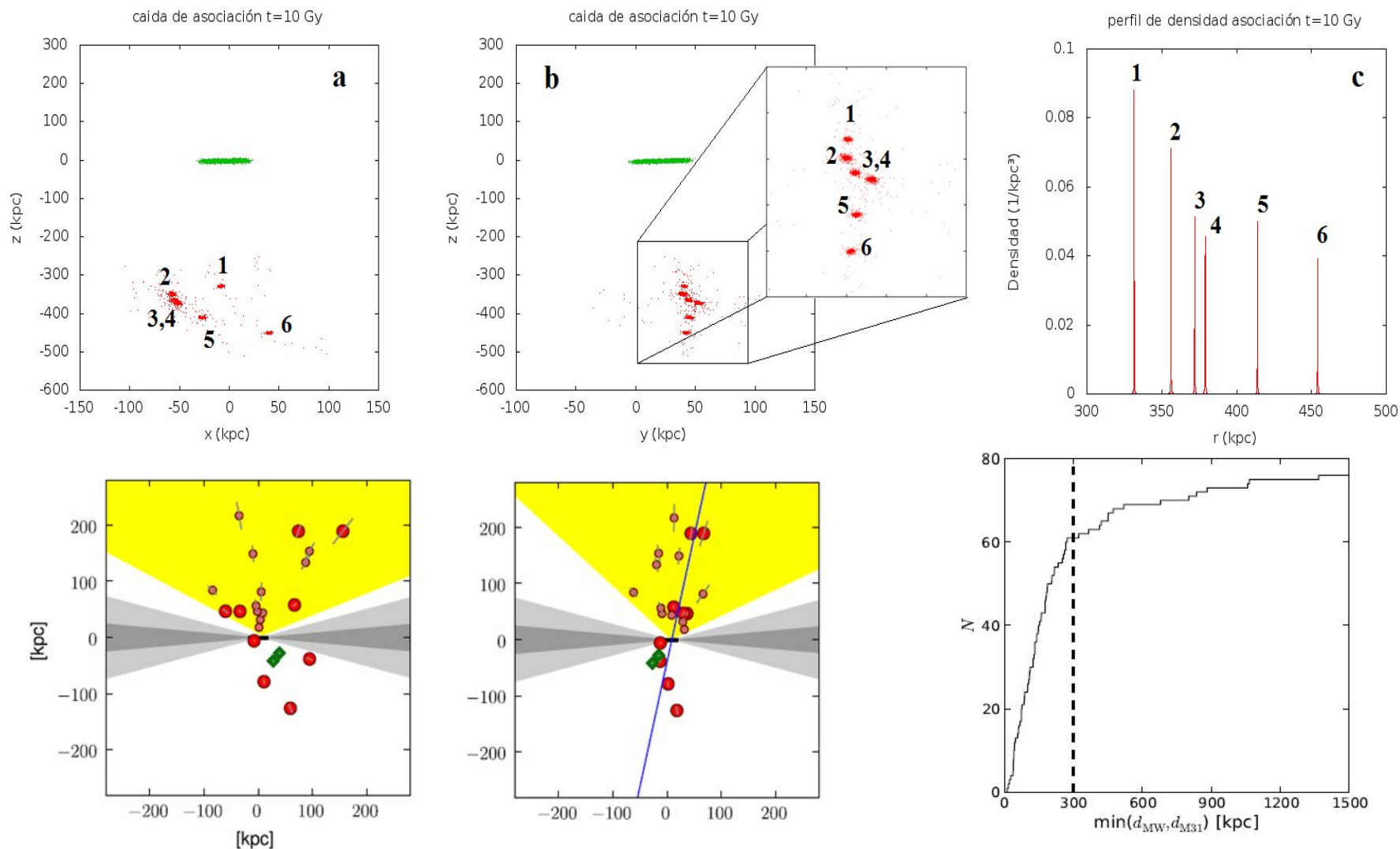
Parámetro	Valor asignado
Distancia inicial	1 Mpc
Ángulo	150°
Masa asociación	$5.59 \times 10^9 M_{\odot}$
Parámetro de impacto	134 kpc
Posición (x,z)	(-866, 500) kpc
Velocidad Radial	88,7 km/s
Velocidad Circular	23,8 km/s
Dispersión de velocidades	15,5 km/s

Tabla 8. Condiciones iniciales para la caída de una asociación de galaxias enanas con materia oscura ubicada a 1 Mpc de la Vía Láctea.



**Fig. 32.** Distancia de la asociación en función del tiempo, la línea roja hace referencia a la enana que se encuentra más cerca de la Vía Láctea y la línea verde a la más lejana. Sobre los 8 Gy se presenta la distancia pericéntrica de la órbita de la asociación.

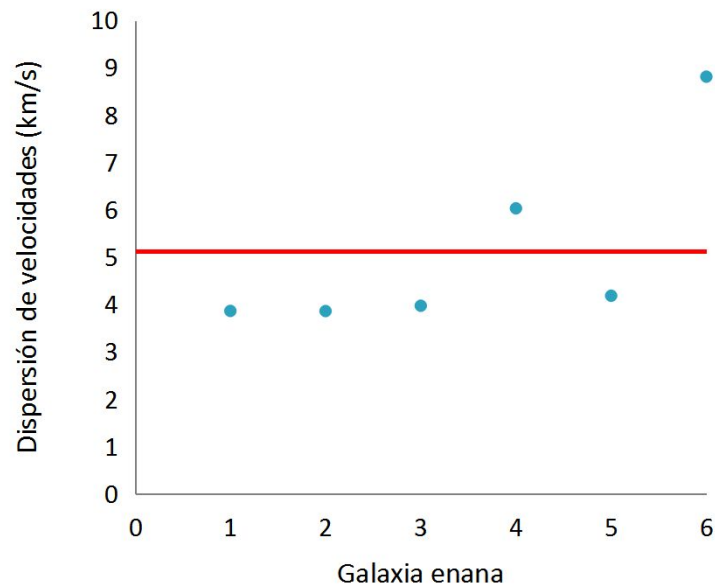
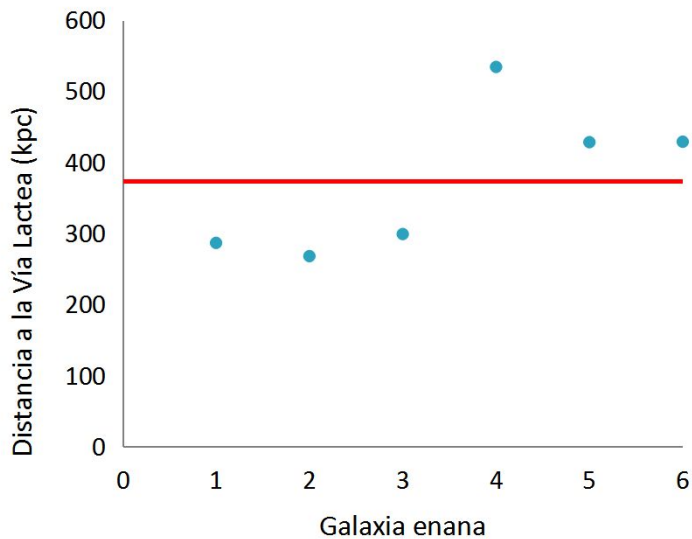
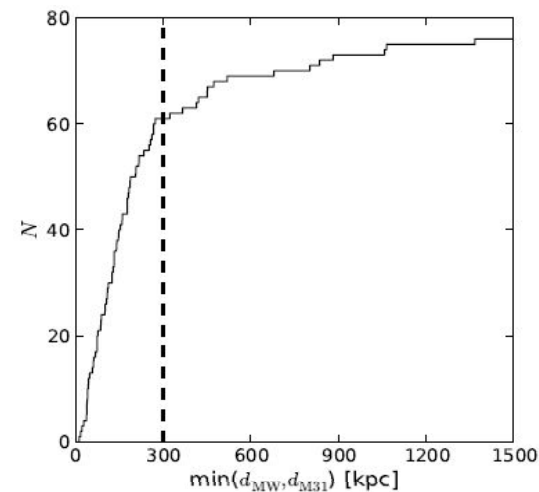
# Simulaciones y resultados con materia oscura



# Resultados sin y con materia oscura

Sin halo de materia oscura:

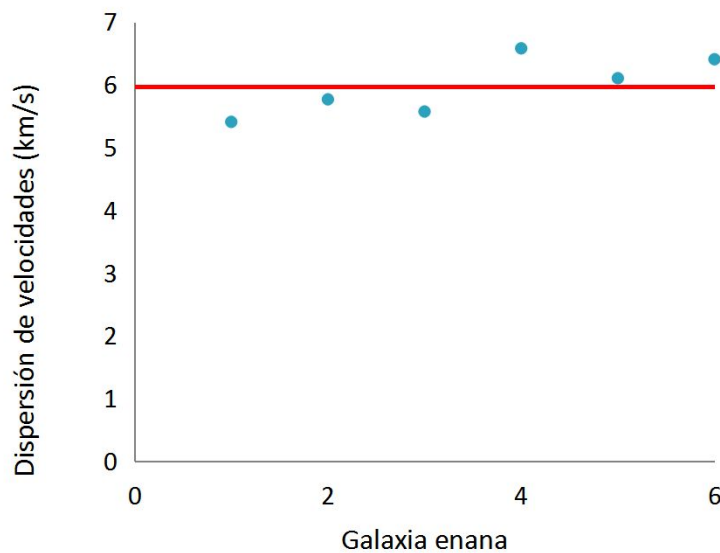
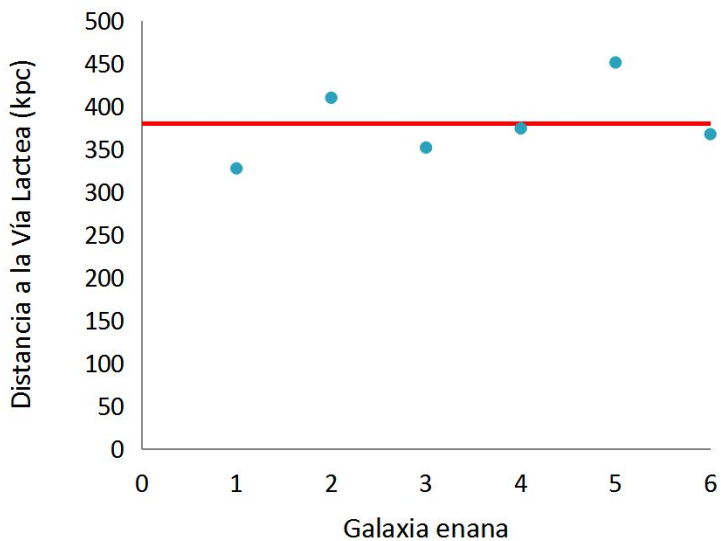
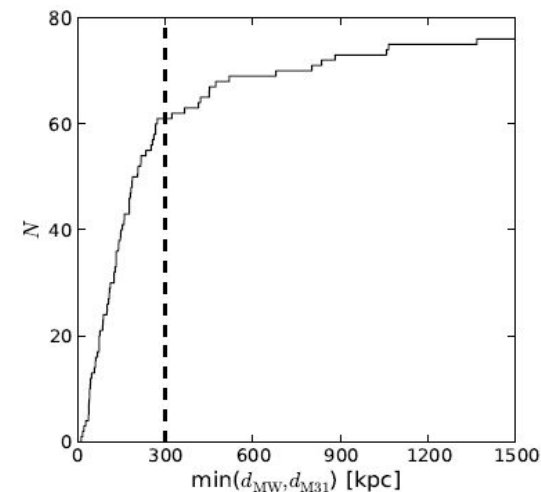
	distacia Via Láctea $R_{eg}$ (kpc)	distacia desde el Sol $R_{es}$ (kpc)	dispersión de velocidades $\sigma$ (km/s)	Velocidad radial media $v_r$ (km/s)
enana1	286.60	288.26	3.87	104.25
enana2	267.97	266.67	3.86	1.89
enana3	299.02	303.47	3.98	155.85
enana4	534.17	531.14	6.03	128.22
enana5	428.31	423.51	4.19	138.78
enana6	428.96	428.53	8.81	128.50
<b>promedios</b>	<b>374.17</b>	<b>373.60</b>	<b>5.12</b>	<b>131.12</b>



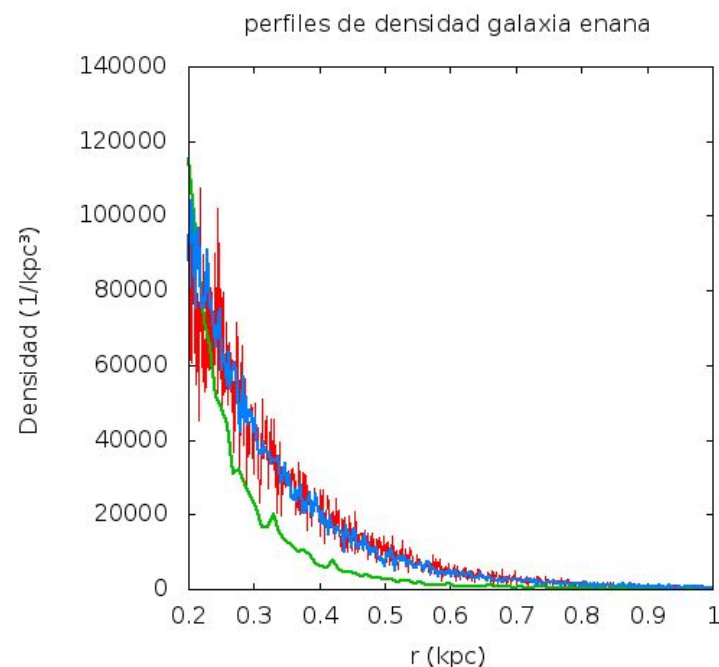
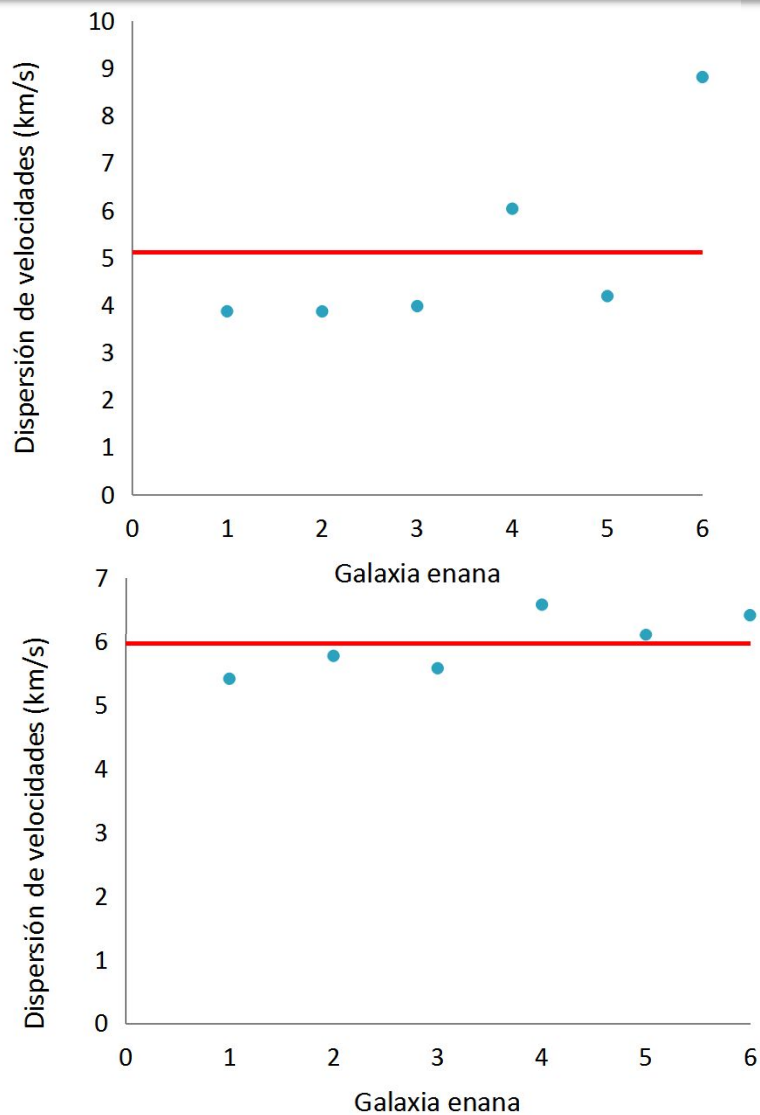
# Resultados sin y con materia oscura

Con halo de materia oscura:

	distacia Vía Láctea $R_{eg}$ (kpc)	distacia desde el Sol $R_{es}$ (kpc)	dispersión de velocidades $\sigma$ (km/s)	Velocidad radial media $v_r$ (km/s)
enana1	327.40	327.97	5.41	146.41
enana2	409.80	410.34	5.77	119.47
enana3	351.71	352.21	5.57	126.06
enana4	374.08	374.82	6.58	132.01
enana5	450.93	451.37	6.10	149.28
enana6	367.35	367.93	6.41	143.15
<b>promedios</b>	<b>380.21</b>	<b>380.77</b>	<b>5.97</b>	<b>136.06</b>



# Resultados sin y con materia oscura



**Figura superior izquierda:** Dispersión de velocidades para galaxias enanas sin halo de materia oscura.  
**Figura inferior izquierda:** Dispersión de velocidades para galaxias enanas con halo de materia oscura.  
**Figura superior derecha:** Perfiles de densidad de las galaxias enanas antes (rojo) y después sin materia oscura (azul) y con halo de materia oscura (verde).



# 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 con las condiciones iniciales mencionadas en cada una de ellas:

- Sobre la formación del disco de satélites de la Vía Láctea: descartamos asociaciones de galaxias enanas que se encontraran en distancias iguales o mayores a 2 Mpc debido a que su tiempo de caída es superior a un tiempo de Hubble. Así mismo, se puede afirmar que asociaciones de galaxias periféricas al Grupo Local ubicadas a estas distancias no podrían ser considerados como objetos que en un futuro pudiesen hacer parte de esta estructura del disco de satélites siguiendo este tipo de órbitas.

# Conclusiones

Partiendo de los resultados de las simulaciones desarrolladas para las galaxias enanas con y sin halo de materia oscura se observan aspectos favorables y desfavorables para el problema del disco de satélites de la Vía Láctea con respecto a sus propiedades morfológicas, la distribución espacial y distancias de ubicación.

- En cuanto a la morfología de las galaxias enanas: luego de 10 Gy de interacción con la Vía Láctea se observa que cuando se encuentran envueltas por un halo de materia oscura estas se mantienen más compactas pese a los efectos de fuerzas de marea. Esto contribuye al hecho de considerar que la presencia de halos de materia oscura para las galaxias enanas.

# Conclusiones

Partiendo de los resultados de las simulaciones desarrolladas para las galaxias enanas con y sin halo de materia oscura se observan aspectos favorables y desfavorables para el problema del disco de satélites de la Vía Láctea con respecto a sus propiedades morfológicas, la distribución espacial y distancias de ubicación.

- En cuanto a distancias de ubicación que presentan las galaxias enanas alrededor de la Vía Láctea: las distancias en las que se ubican se ajusta mejor para el modelo libre de materia oscura teniendo en cuenta que la mayoría de las galaxias se encuentran a distancias entre 280 kpc y 500 kpc.

# Referencias bibliográficas

- Angus G. et. al. (2011). Using dwarf satellites proper motions to determine their origin. MNRAS, 416: 1401-1409
- Binney J. & Tremaine S. (2008). *Galactical Dynamics*, Princeton University U.K. Second Edition. ISBN: 987-0691130279 p. 904
- Bournaud, F. and Duc, P. A. *From tidal dwarf galaxies to satellite galaxies*. Astronomy & Astrophysics manuscript no. TDG, 2013, p. 17
- Casallas A. (2012). *Estudio de la formacion del disco de satelites de la Vía Láctea (DoS) como un grupo de progenitores que entra al halo de la Galaxia*. Trabajo final de Maestría, Facultad de Ciencias, Departamento de Física. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá.
- Casas R., Arias V., Peña K. & Kroupa P. (2012) *Dwarf spheroidal satellites of the Milky Way from dark matter free tidal dwarf galaxy progenitors: maps of orbits*. arXiv:1205.5029v1 Astro-ph. 22 de mayo de 2012.
- Casas R., Arias V., Camargo Y. & Peña K. (2008). Satélites esferoidales enanos de la Vía Láctea desde progenitores masivos libres de materia oscura. RCF, 40:229.
- Cubillos D. (2013). *Estudio de la formación de galaxias enanas esferoidales satélite de la Vía Láctea mediante la simulación de colisión de dos galaxias*. Trabajo final de Maestría, Facultad de Ciencias, Departamento de Física. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá.
- Da Costa G. (1999). *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.
- Esquivel O. & Fuchs B. (2008). *Dynamical friction force exerted on spherical bodies*. RevMexAA, 34, 83-86.
- Forero J. et al. (2013). *The kinematics of the Local Group in a cosmological context*. ApJ. Vol. 767, 6 pp.
- Henriksen L. (1990). *An analytical model for spherical galaxies and bulges*. ApJ. vol. 356, p. 359-364
- Hodge P. (1971). *Dwarf Galaxies*. Annual Review of Astronomy and Astrophysics. Vol. 9 p. 35.
- Iafrate G. et al. (2010). *La secuencia de Hubble*. INAF- Astronomical Observatoru of Trieste.
- Kahn F. & Woltjer L. (1959). *Intergalactic Matter and the Galaxy*. ApJ Vol. 130 p 705

# Referencias bibliográficas

- Klessen R. & Kroupa P. (1998). *Dwarf Spheroidal Satellite Galaxies without Dark Matter: Results from two different numerical techniques*. The astrophysical journal, 498: 143-155, mayo 1 1998.
- Klypin A., Kravtsov A. & Valenzuela O. (1999). "Where are the missing galactic satellites?". ApJ. Vol 522, p. 82-92
- Klypin A., Zhao H. & Somerville R. (2002).  *$\Lambda$ CDM-based Models for the Milky Way and M31 I: Dynamical Models*. ApJ 573: 597-613.
- Kroupa P. Theis C. & Boily C. (2005). *The great disk of Milky-Way satellites and cosmological sub-structures*. Astronomy and Astrophysics. Vol. 431, o 517-521.
- Lokas, E. L. (2011). *Dark matter in dwarf galaxies of the Local Group*, arXiv: 1112.0438v1.
- Longair M. (1998). *Galaxy formation*. University of Cambridge. United Kingdom. p. 536. ISBN: 978-3540734772
- Martínez C. (2011). *Estudio del origen y evolución de la galaxia sagitario mediante simulaciones numéricas de N-Cuerpos*. Tesis de Maestría, Facultad de Ciencias, Departamento de Física. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá.
- Mateo, M. (1998). *Dwarf Galaxies of the Local Group*. Annual Review of Astronomy & Astrophysics, 36:435–506.
- Mayer L. (2010). *Environmental Mechanisms Shaping the Nature of Dwarf Spheroidal Galaxies: The View of Computer Simulations*. Institute for Theoretical Physics, University of Zürich, Vol. 2010 Article ID, 278434, p. 21
- Metz, M., Kroupa, P., Jerjen, H. (2007). *The spatial distribution of the Milky Way and Andromeda satellite galaxies*. MNRAS. 374, 1125
- Metz, M., Kroupa, P., Jerjen, H. (2009). *Discs of satellites: the new dwarf spheroidals*, MNRAS, 394, 2223
- Metz, M., Kroupa, P., Libeskind, N. (2008). *The Orbital Poles of Milky Way Satellite Galaxies: A Rotationally Supported Disc-of-Satellites*, ApJ, Vol 680, pp. 287-294
- Mo H., Van den Bosch F. & White S. (2010). *Galaxy Formation an evolution*. Cambridge University Press. ISBN-13 978-0-521-85793-2.
- Navarro J., Frenk C. & White S. (1997). *A Universal Density Profile from Hierarchical Clustering*. ApJ, Vol. 490 pp. 493-508



# Referencias bibliográficas

- Pawlowski, M., Kroupa P. & Jerjen H. (2013). *Dwarf galaxy planes: the discovery of symmetric structures in the Local Group*. MNRAS, 435, 1928
- Pawlowski, M. et al. (2014). *Co-orbiting satellite galaxy structures are still in conflict with the distribution of primordial dwarf galaxies*. MNRAS, 442, 2362-2380.
- Plummer H. (1911). *On the problem of distribution in globular star clusters*. MNRAS. Vol 71 p. 460-470
- Russel L. & Kenneth M. (1992). *A new member of the Local Group - The Tucana dwarf galaxy*. Astronomical Journal. Vol. 103 p. 81-83.
- Sawala T. (2011). *Simulation of Dwarf Galaxy Formation*. An der Fakultät für Physik, Ludwig Maximilians Universität-München, 07-01-2011.
- Springel V. and White S. (1999). *Tidal tails in cold dark matter cosmologies*. MNRAS. Vol. 307, pp. 162-178
- Springel et al. (2005). *Modelling feedback from stars and black holes in galaxy mergers*. MNRAS. Vol. 361, pp. 776-794
- Springel V. (2005). *The cosmological simulation code GADGET-2*. MNRAS, 365: 1105-1134.
- Tully B. et. al. (2006). *Association of Dwarf Galaxies*. ApJ, 132: 729-748
- Van de Kamp P. (1963). *Elements of Astromechanics*. H. Freeman, San Francisco, California.
- Van den Bergh S. (2000). *The Galaxies of the Local Group*. Cambridge University, UK. Cambridge Astrophysics Series Vol. 35. ISBN: 0521651816
- Whiting A et. al. (1992). *A new galaxy in the local group: The antlia dwarf galaxy*. Astronomical Journal. Vol. 114 p 996-1001
- Yahil A. and Vidal N. (1977). *The Velocity Distribution of Galaxies in Clusters*. ApJ, Vol. 214, p 347-350.
- Zhao H. (2004). *Dynamical friction for dark halo satellites: effects of tidal mass loss and growing host potential*. MNRAS Vol. 351 pp. 891-902.

# Gracias



jose.benavides@uan.edu.co  
joabenavidesbl@unal.edu.co