

**BÚSQUEDA DE POSIBLES PROGENITORES SIN
MATERIA OSCURA DE LA GALAXIA ENANA
ESFEROIDAL CARINA A TRAVÉS DE
SIMULACIONES DE N-CUERPOS**

**LOOKING FOR POSSIBLE DARK MATTER FREE
PROGENITORS OF THE CARINA DWARF
SPHEROIDAL GALAXY USING N-BODY
SIMULATIONS**

Diego F. Castellanos, Rigoberto A. Casas-Miranda

Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá, Facultad de Ciencias, Departamento de Física, Colombia.

(Recibido: 02/2017. Aceptado: 06/2017)

Resumen

Se presenta un estudio de la evolución de diferentes posibles progenitores sin materia oscura de la galaxia enana esferoidal Carina, una de las galaxias satélites de la Vía Láctea, mediante simulaciones numéricas Newtonianas de N-Cuerpos. No fue posible reproducir completamente las propiedades observacionales de Carina, y por consiguiente no se pudo determinar un posible progenitor sin materia oscura para la misma; sin embargo, progenitores con masa inicial $1 \times 10^7 M_{\odot}$ y radios de Plummer 0.5 y 0.6 kpc, reprodujeron los valores observacionales de Carina para tres de las cinco variables estudiadas (radio de brillo medio, dispersión de velocidades sobre la visual y distancia galactocéntrica). Por lo tanto estos progenitores podrían ser la base para posteriores trabajos sobre el origen de la galaxia enana Carina.

Palabras clave: Galaxias: Carina, Galaxias: enanas, Galaxias: formación, Materia oscura.

Abstract

We present a study of the evolution of several different dark matter free possible progenitors of the Carina dSph galaxy, one of the satellites of the Milky Way, using Newtonian numerical N-body simulations. It was not possible to reproduce all the observed properties of Carina, therefore a possible dark matter free progenitor of it was not found; nevertheless, progenitors with initial mass $1 \times 10^7 M_{\odot}$ and Plummer radii 0.5 and 0.6 kpc reproduced the observational values of Carina for three of the five studied variables (half light radius, line-of-sight velocity dispersion and galactocentric distance). Thus, those satellites could be the starting point for further work about the origin of the Carina dwarf galaxy.

Keywords: Galaxies: Carina, Galaxies: dwarf, Galaxies: formation, Dark matter.

Introducción

Un debate permanente en la cosmología actual es el problema de la materia oscura. Este tipo de materia da cuenta muy bien de la distribución de masa a grandes escalas, pero según las observaciones todavía existen discrepancias en la conformación de la masa en el grupo local [1–3]. A escalas locales cobra importancia entender la cinemática y la dinámica de sistemas que podrían estar dominados por materia oscura.

En diferentes estudios se han medido las luminosidades de las galaxias enanas esferoidales (dSph). Los altos valores registrados en la razón de masa-luminosidad (M/L) observacional, hacen pensar que son objetos dominados por materia oscura. Sin embargo, algunos autores sugieren que las dSph al interactuar con el potencial gravitacional de la Vía Láctea se deforman y fragmentan [4–7], explicando así la alta razón M/L observada. De acuerdo con esta interpretación, los sistemas dSph podrían estar lejos del equilibrio dinámico y por lo tanto las masas establecidas bajo la hipótesis de equilibrio no estarían estimadas correctamente. Si las dispersiones de velocidad estelares observadas pueden ser atribuidas

a la fragmentación del satélite proyectado a lo largo de la línea de visión, la necesidad de invocar el argumento de la presencia de materia oscura para explicar la cinemática de las galaxias dSph se desvanece. [4, 5] muestran que las dSph se pueden concebir a partir de objetos esféricos autogravitantes en cuasi-equilibrio y reproducen la gran mayoría de sus propiedades y características. Angus *et al.* [8] realizaron simulaciones de N-cuerpos de enanas esferoidales usando dinámica de Newton modificada (MOND) y encontraron que si bien las enanas son estables bajo fuerzas de marea durante un tiempo de Hubble, las dispersiones de velocidades de las enanas no son amplificadas lo suficiente por las fuerzas de marea como para aumentar artificialmente la razón masa-luminosidad. Haghi and Amiri [9] usa las dispersiones de velocidades de algunas enanas esferoidales de la Vía Láctea para probar modelos de gravedad modificada.

El problema de la existencia y cantidad de materia oscura en galaxias enanas continúa en discusión. Por lo tanto se hace necesario continuar con la investigación acerca de la posibilidad de que las galaxias enanas esferoidales de la Vía Láctea puedan ser remanentes deformados de objetos libres de materia oscura.

En este artículo se presenta un estudio de la evolución de diferentes posibles satélites progenitores sin materia oscura de la galaxia enana esferoidal Carina, mediante simulaciones numéricas Newtonianas de N-Cuerpos. Se tiene en cuenta la disponibilidad de datos observacionales de cinemática y fotometría, para verificar si es posible reproducir a partir de las galaxias simuladas las características observacionales de Carina.

1. La galaxia esferoidal enana Carina

Carina es una de las galaxias dSph más conocidas gracias al estudio de sus complejas poblaciones estelares [10]. Carina presenta múltiples poblaciones estelares de edades alrededor de 11, 5 y 1 Gyr [11] Por medio de la observación de los movimientos propios de las dSph, es posible rastrear su órbita, conociendo la velocidad transversal a la línea de visión. Los componentes angulares detectados por corrimiento al rojo, dan indicios sobre la órbita que siguió Carina en su paso por la Vía Láctea [12, 13].

Algunos parámetros observacionales básicos de Carina se muestran en la tabla 1.

Características	Carina
AR	$06^h 41^m 36.7^s$ [14]
dec	$-50^d 57^m 58^s$ [14]
Posición l	260.1° [14]
Posición b	-22.2° [14]
Masa total M_\odot	6.3×10^6 [14], $(2 - 20) \times 10^7$ [15], 2.73×10^8 [16]
Razón $\frac{M_\odot}{L_\nu \odot}$	67 ± 31 [17]
Luminosidad $L_\nu \odot$	$0.72 \times 10^6 L_*$ [16], $2.4 \times 10^5 L_*$ [18]
σ_0 (km/s)	11.7 ± 0.1 [10], 6.6 [14]
μ_0	25.5 (mag/arcsec ²) ó $2.47 \times 10^6 L_\odot/kpc^2$ [14]
t_{acr} (Gyr)	$7 - 9$ [19]
V_r (km/s)	220.4 ± 0.1 [10], 113 ± 52 [20], 20 ± 24 [19]
V_T (km/s)	46 ± 54 [20], 85 ± 39 [19]
R_{gc} (kpc)	101 ± 5 [17]
$r_{1/2}$	$0.210 kpc$ [5], $0.334 kpc$ [14]

TABLA 1. *Propiedades de la galaxia enana Carina: la ascensión recta (AR), la declinación (dec), longitud y latitud en coordenadas galácticas (l , b), la razón (M/L), la dispersión de velocidades sobre la visual (σ_0), el brillo superficial central (μ_0), el tiempo de acreción (t_{acr}), la velocidad radial y tangencial (V_r , V_T), la distancia galactocéntrica (R_{gc}) y el el radio de brillo medio ($r_{1/2}$).*

2. Modelo y condiciones iniciales de la simulación

2.1. Condiciones orbitales

Para determinar las posibles órbitas del progenitor de Carina, se tuvo en cuenta las posiciones y velocidades del satélite en diferentes pasos perigalácticos durante 10 Gyr. La excentricidad y las distancias pericéntrica y apocéntrica corresponden a los valores de la galaxia enana Carina reportados en la literatura. Para establecer las condiciones iniciales de las órbitas del progenitor de Carina se integró la trayectoria de una partícula de prueba para 10 Gyr, realizando un cálculo hacia atrás en el tiempo iniciando con los valores actuales reportados por [12]. En la tabla 2 se muestran las condiciones iniciales usadas para las simulaciones.

Parámetros iniciales	Valor
Partículas	10^5
Masa Carina	$10^6 - 10^8 M_\odot$
Radio de Plummer	$0.2 - 0.8$ kpc
V_T	86 km/s
V_r	220 km/s
Posición $((x_0, y_0, z_0))$	(86.1, 36.6, -35.3) kpc
Velocidad (v_{0x}, v_{0y}, v_{0z})	(71.3, -40.3, 26.1) km/s

TABLA 2. *Condiciones iniciales para la galaxia enana Carina. Las posiciones (x, y, z) están en coordenadas galactocéntricas.*

2.2. Modelo para la Vía Láctea

La Vía Láctea se modela usando un potencial rígido con tres componentes: un potencial Miyamoto Nagai para el disco

$$\phi_{disk}(R, z) = -\frac{GM_d}{\sqrt{R^2 + (a + \sqrt{z^2 + b^2})^2}}, \quad (1)$$

un potencial esférico de Hernquist para el núcleo

$$\phi_{sph}(R) = -\frac{GM_e}{R + c} \quad (2)$$

y un potencial logarítmico para el halo de materia oscura

$$\phi_{halo}(R, z) = v_c^2 \ln[R^2 + d^2], \quad (3)$$

donde M_d es la masa del disco, M_e es la masa del esferoide central, v_c es la velocidad circular del halo y a , b , c y d son parámetros de longitud de escala de la galaxia. Los potenciales y los parámetros correspondientes se han elegido ya que se asemejan a las condiciones de la Vía Láctea [21].

2.3. Modelo para el satélite

El satélite progenitor inicial de Carina se modela como una esfera de Plummer con 10^5 partículas:

$$\phi_{Pl}(r) = \frac{GM_{sat}}{\sqrt{r^2 + R_{pl}^2}}, \quad (4)$$

donde M_{sat} es la masa del satélite y R_{pl} es el radio de Plummer. Se utilizan tres masas del objeto inicial s: $10^6 M_\odot$, $10^7 M_\odot$ y $10^8 M_\odot$, con radios de Plummer en el rango de 0.2 – 1 kpc. Los satélites han sido construídos utilizando el algoritmo propuesto por [22] y las simulaciones fueron realizadas con GADGET2 [23].

3. Comparación con Carina

Para una distancia apocéntrica de 100 kpc, se desarrollaron varias simulaciones de satélites con masas iniciales de 10^6 a $10^8 M_\odot$ y se variaron los radios de Plummer $R_p = 0.2$ kpc a $R_p = 0.8$ kpc.

Para realizar la comparación de las propiedades del satélite simulado con las de la enana Carina se empieza por buscar los intervalos de tiempo en los cuales la razón M/L simulada se encuentra dentro de los valores reportados en la literatura, si esta condición se cumple, entonces se revisa si las demás propiedades bajo estudio ($r_{1/2}$, σ_0 , μ_0 y R_{gc}) también presentan coincidencia entre lo simulado y su contraparte observacional.

En las gráficas contenidas en la figura 1, se muestra la evolución temporal durante 10 Gyr de las propiedades físicas M/L , los radios de Lagrange, R_{gc} , $r_{1/2}$, μ_0 y σ_0 para dos satélites con masa inicial de $10^6 M_\odot$ y radio de Plummer de 0.2 y 0.3 kpc, respectivamente. Estas propiedades físicas son determinadas para un observador ubicado en la tierra.

Al revisar la razón M/L para la figura 1(a) se puede apreciar que se incrementa a partir de los 2 Gyr y fluctúa durante la evolución del satélite. Adicionalmente esta variable alcanza los correspondientes valores observacionales (ver líneas horizontales en las figuras) aproximadamente a los 5 Gyr y en intervalos tales como: 6.5-7 Gyr, 8-8.5 Gyr y 9.5-10 Gyr.

Para los radios de Lagrange, se puede observar que durante los primeros 2 Gyr, el satélite pierde el 50% de su masa en la interacción con la Vía Láctea. Por otro lado, en cuanto a la distancia galactocéntrica coincide con los valores observacionales en los puntos 6 y 7 Gyr, en comparación con los otros intervalos de M/L , en donde no coincide.

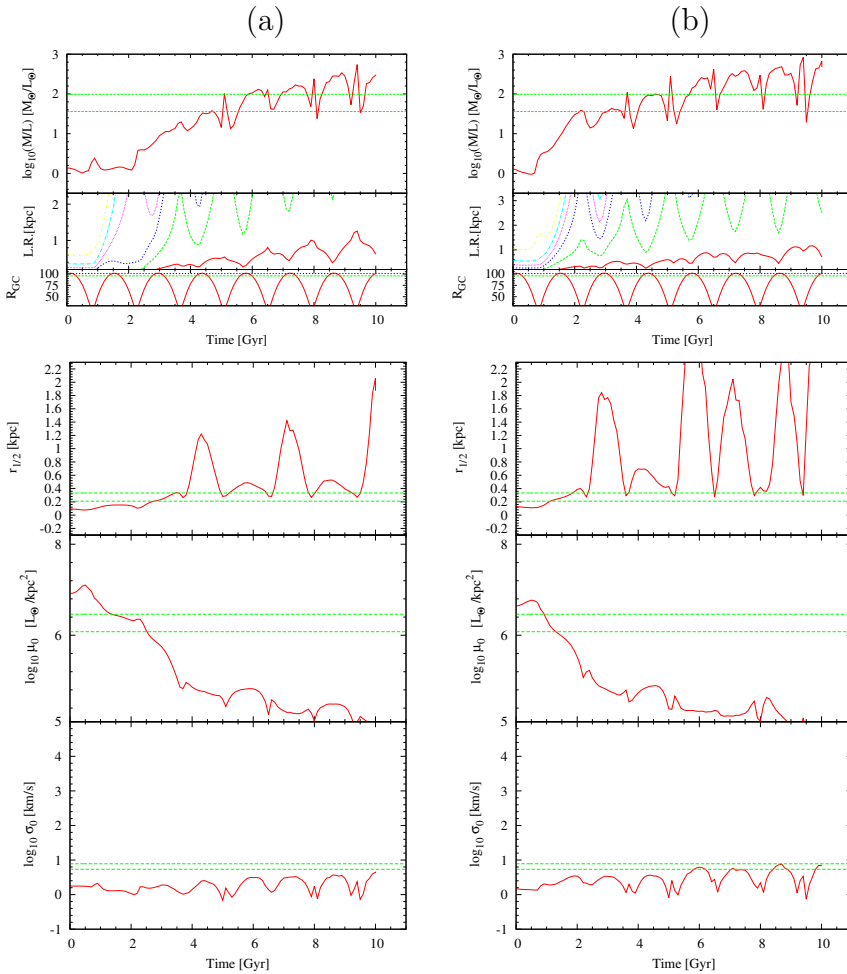


FIGURA 1. Evolución de las propiedades de un satélite con masa inicial de $10^6 M_{\odot}$. (a) con un radio de Plummer de 0.2 kpc, (b) con un radio de Plummer de 0.3 kpc

Se puede observar que la gráfica del brillo superficial central decae rápidamente y toma valores observacionales de 1.5 a 2.5 Gyr aproximadamente, dicho comportamiento es similar para el mismo parámetro evaluado en la figura 1(b). Estos decaimientos en ambas gráficas del brillo superficial central, podrían estar asociados con la fluctuación del radio medio donde se concentra la masa del satélite. La dispersión de velocidades, presenta un comportamiento casi constante y los valores observacionales no son alcanzados en ningún momento para este satélite.

En la tabla 3 se registran las propiedades de Carina obtenidas del análisis de la Figura 1(a), para las cuales se reproducen los valores observacionales en el mismo intervalo de tiempo (en la tabla aparece como “si”), mientras las variables que no reproducen los valores observacionales están marcadas con la línea (-).

	5 Gyr	(6.5-7) Gyr	(8-8.5) Gyr	(9.5-10) Gyr
M/L_{\odot}	si	si	si	si
$r_{1/2}(kpc)$	-	-	si	-
$\mu_0 (L_{\odot}/kpc^2)$	-	-	-	-
$\sigma_0(km/s)$	-	-	-	-
$R_{gc}(kpc)$	-	si	-	-

TABLA 3. Variables que reproducen los valores observacionales para el satélite con $R_p = 0.2kpc$ y una masa de $1 \times 10^6 M_{\odot}$

En el primer intervalo de coincidencia de la razón M/L (a los 5 Gyr) ninguno de los parámetros coincide con el valor observacional de Carina. Por su parte en el intervalo de 6.5-7 Gyr coinciden solo la variable R_{gc} . En el tercer intervalo de 8-8.5 Gyr sólo coincidió una variable $r_{1/2}$; y para el último intervalo de 9.5-10 Gyr ninguna de las variables coincidió con los valores observacionales de Carina. Este satélite con estas características no puede ser el progenitor de Carina, puesto que para que se pueda considerar como un posible progenitor de la galaxia Carina, todos los parámetros (σ_0 , μ_0 , $r_{(1/2)}$, M/L y R_{gc}) del satélite simulado deben coincidir en el mismo intervalo observacional de la razón M/L independientemente del valor individual que tome cada uno.

De manera similar, al analizar la gráfica 1(b) se puede observar que la razón M/L alcanza valores observacionales aproximadamente en los intervalos: 3-3.6 Gyr, 4-5Gyr y en los tiempos 6.5 Gyr, 8 Gyr y 9 Gyr. En la tabla 4, se registran las variables estudiadas de Carina para las cuales se reproducen los valores observacionales en el mismo intervalo de tiempo. Estos satélites no podrían ser los posibles progenitores de la galaxia enana de Carina, ya que de todas las características del satélite sólo algunas de ellas coinciden en el mismo intervalo de tiempo con los valores observados para la galaxia Carina.

Este proceso de comparación entre las cantidades obtenidas de las simulaciones y las correspondientes cantidades observacionales se repitió para todos los satélites simulados.

Los satélites con radios de Plummer 0.2 y 0.3 kpc y masa inicial de $10^8 M_{\odot}$ no mostraron evidencia de cambio alguno de sus variables, que en ningún momento coinciden con las cantidades observacionales de Carina. Por lo tanto se descartan como posibles progenitores.

En las tablas 5 y 6, se muestra un resumen de los diferentes intervalos de tiempo para las cuales diferentes variables de cada una de las simulaciones se ajusta con los valores observacionales. Es importante notar que cada intervalo es diferente tanto para la masa y radio de Plummer de cada simulación. Se pueden observar las propiedades físicas de posibles progenitores de Carina, los valores están ya mencionados en cada simulación e intervalo de tiempo; el símbolo “si”, hace referencia a que ese parámetro medido se ajusta a los valores observacionales de la galaxia Carina para ese intervalo de tiempo. Donde no hay valor, no significa que no lo tenga, sino que no se ajusta con estos parámetros en ese mismo tiempo. La palabra “otro” significa que toma un valor observacional, pero no en el mismo intervalo de tiempo de Carina.

Al revisar la tabla 4, nos podemos dar cuenta que las simulaciones para la masa $10^6 M_{\odot}$ y el radio de Plummer 0.2 kpc existen dos variables de cinco que reproducen los valores observacionales de Carina en el intervalo II, estas son $r_{1/2}$ y R_{gc} . Para el radio de Plummer 0.3 kpc, se puede ver que hay dos variables, $r_{1/2}$ y σ_0 que reproducen los valores observacionales de Carina en ese mismo

intervalo de tiempo. Al revisar el radio de Plummer 0.4 kpc con la misma masa sólo en el intervalo IV (6.5 Gyr), las variables que se ajustan en el mismo intervalo de tiempo son: $r_{1/2}$ y σ_0 . Para el radio de Plummer 0.8 kpc, en cada uno de los intervalos sólo una variable reproduce los valores observacionales de Carina, se puede afirmar según lo visto en cada uno de los radios, que para esta masa no existen posibles progenitores de la galaxia enana de Carina.

Al observar la masa $10^7 M_\odot$, el radio de Plummer de 0.4 kpc hay coincidencia de dos variables comparadas con los valores

Variables	I	II	III	IV	V	VI
$R_p = 0.2 \text{ kpc}$ $t(M/L) \text{ Gyr}$	5	(6.5-7)	(8-8.5)	(9.5-10)		
$r_{1/2}$	otro	si	si	–		
μ_0	otro	–	–	–		
σ_0	–	–	–	–		
R_{gc}	–	si	–	–		
$R_p = 0.3 \text{ kpc}$ $t(M/L) \text{ Gyr}$	(3-3.6)	(4-5)	6.5	8	9	
$r_{1/2}$	si	–	si	si	si	
μ_0	otro	–	–	–	–	
σ_0	–	–	otro	si	si	
R_{gc}	si	si	–	–	–	
$R_p = 0.4 \text{ kpc}$ $t(M/L) \text{ Gyr}$	(2-2.5)	(3-3.7)	(4-5)	6.5	8	9.5
$r_{1/2}$	si	–	–	si	–	si
μ_0	otro	–	–	–	–	–
σ_0	–	–	–	si	otro	–
R_{gc}	–	si	si	–	–	–
$R_p = 0.8 \text{ kpc}$ $t(M/L) \text{ Gyr}$	(2-2.5)	(3-3.7)	(4.2-4.7)	6.7	8.2	
$r_{1/2}$	otro	otro	otro	si	–	
μ_0	otro	–	–	–	–	
σ_0	–	–	–	otro	otro	
R_{gc}	–	si	si	–	–	

TABLA 4. Resultado de la comparación entre las propiedades simuladas y observacionales de Carina para todos los satélites con diferentes radios de Plummer y masa $10^6 M_\odot$, en los intervalos de tiempo con coincidencia en la razón M/L .

observacionales de Carina, para los intervalos II (6-6.5 Gyr), III (7-8 Gyr) y IV (8.5 Gyr) σ_0 y R_{gc} . Para el radio de Plummer 0.5 kpc, se alcanza valores observacionales con Carina para las variables σ_0 y R_{gc} en los intervalos II (4.5 Gyr) y IV (6-8 Gyr). Revisando los intervalos III y VI no coinciden la mayoría de variables. Considerando el radio de Plummer 0.6 kpc, existe coincidencia en dos variables de cuatro, estas son: σ_0 y R_{gc} ; en los intervalos II(4.2-5 Gyr), el intervalo IV (5.7-6.5 Gyr), V y VI. Por lo tanto estos satélites no pueden ser progenitores de Carina.

Al observar la tabla 6, satélites con masa de $10^8 M_\odot$ y el radio de Plummer 0.7 kpc sólo dos variables de cuatro del satélite corresponden a los valores observacionales de la galaxia Carina; μ_0 y σ_0 se ajustan en el primer intervalo. Para el radio de Plummer de 0.8 kpc, las variables que coinciden para el intervalo I y IV son R_{gc} y σ_0 .

Variables	I	II	III	IV	V	VI
$R_p = 0.4 \text{ kpc}$						
$t(M/L) \text{ Gyr}$	5	(6-6.5)	(7-8)	8.5	9.5	
$r_{1/2}$	otro	otro	–	–	–	
μ_0	otro	–	–	–	–	
σ_0	–	si	si	si	–	
R_{gc}	–	si	si	si	–	
$R_p = 0.5 \text{ kpc}$						
$t(M/L) \text{ Gyr}$	3.6	4.5	5	(6-8)	8.5	9.5
$r_{1/2}$	otro	otro	–	–	–	–
μ_0	otro	–	–	–	–	
σ_0	–	si	–	si	si	–
R_{gc}	–	si	–	si	–	–
$R_p = 0.6 \text{ kpc}$						
$t(M/L) \text{ Gyr}$	3.7	(4.2-5)	5.2	(5.7-6.5)	(8-8.5)	(9-9.5)
$r_{1/2}$	otro	otro	–	–	–	–
μ_0	otro	–	–	–	–	
σ_0	otro	si	si	si	si	si
R_{gc}	–	si	–	si	si	si

TABLA 5. Resultado de la comparación entre las propiedades simuladas y observacionales de Carina para todos los satélites con diferentes radios de Plummer y masa $10^7 M_\odot$, en los intervalos de tiempo con coincidencia en la razón M/L .

Por lo que después de comparar estos radios de Plummer, se puede afirmar que para esta masa no es posible obtener un progenitor de la galaxia enana Carina.

Finalmente, se ha encontrado que la órbita que siguen los satélites, permite la existencia de los mismos cuando tenemos una distancia apocéntrica de 100 kpc y una excentricidad de 0.68 conseguidas en este estudio. [24] predice que las condiciones para los posibles parámetros de Carina, deben ajustarse considerando las interacciones de marea y una órbita que puede tener una excentricidad entre 0.3 y 0.7. También en simulaciones hechas en el año 2011 [15] muestran los valores contenidos de cada uno de los elementos de nuestra galaxia con simulaciones que contienen fricción dinámica y otras condiciones iniciales.

En este trabajo en las interacciones que se dan a través de las simulaciones numéricas, sólo intervienen la Vía Láctea y el satélite, mientras que en otros trabajos hechos en los años 2003 [7] y 2009 [25] se incluyen cúmulos de galaxias enanas con modelos CDM para la revisión de la formación estelar y luminíca de estas galaxias. La masa mínima utilizada en otros estudios es de $10^7 M_\odot$ incluyendo

Variables	I	II	III	IV
$R_p = 0.7kpc:$				
$t(M/L_\odot)$ Gyr	6.5	(7.5-8)	(8.5-9)	(9.5-10)
$r_{1/2}$	otro	–	–	–
μ_0	si	–	–	–
σ_0	si	si	–	si
R_{gc}	–	si	si	–
$R_p = 0.8kpc:$				
$t(M/L_\odot)$ Gyr	(6-6.5)	(7-7.5)	(7-7.8)	(9.2-9.7)
$r_{1/2}$	otro	–	–	–
μ_0	otro	–	–	–
σ_0	si	–	si	si
R_{gc}	si	si	–	si

TABLA 6. Resultado de la comparación entre las propiedades simuladas y observacionales de Carina para todos los satélites con diferentes radios de Plummer y masa $10^8 M_\odot$, en los intervalos de tiempo con coincidencia en la razón M/L .

las interacciones de marea y mecanismos para la formación de grandes galaxias. El trabajo hecho por [26] revela que el presente trabajo no se aleja de estas predicciones, ya que los satélites que coincidieron con los valores observacionales de la razón M/L tienen masa de $10^7 M_\odot$. La ausencia de materia oscura en los satélites progenitores simulados permite la reproducción de la razón M/L durante diferentes intervalos de tiempo, lo cual apoya la hipótesis de que las galaxias enanas esferoidales no están dominadas por materia oscura. Sin embargo, el hecho de no poder reproducir simultáneamente las demás propiedades estudiadas, aún variando en un amplio rango tanto la masa inicial, como el radio de Plummer de los satélites progenitores indica que probablemente estos tendrían una componente importante de materia oscura.

Conclusiones

Se realizaron catorce simulaciones newtonianas de N-cuerpos, para la distancia apocéntrica de 100 kpc, con el fin de buscar los posibles progenitores sin materia oscura de la galaxia Carina. Cuatro simulaciones correspondieron a una masa inicial de $1 \times 10^6 M_\odot$ y un rango de radio de Plummer entre 0.2-0.8 kpc; cinco correspondieron a una masa inicial de $1 \times 10^7 M_\odot$ y radio de Plummer entre 0.2-0.6 kpc; cinco correspondieron a una masa inicial de $1 \times 10^8 M_\odot$ y radio de Plummer entre 0.4-0.8 kpc.

De acuerdo con el análisis de las simulaciones realizadas, no fue posible reproducir completamente las propiedades observadas de la galaxia enana esferoidal Carina, y por consiguiente no se pudo determinar un posible progenitor libre de materia oscura para la misma; sin embargo, para la masa $1 \times 10^7 M_\odot$ y radio de Plummer 0.5 y 0.6 kpc tres de las cinco variables estudiadas $r_{1/2}$, σ_0 y R_{gc} tomaron valores observacionales de la galaxia Carina (en el intervalo de tiempo IV (6-8 Gyr) y (5.7-6.5 Gyr) respectivamente), por lo cual se puede afirmar que esta masa puede ser la base para posteriores trabajos sobre el origen de la galaxia enana Carina.

La ausencia de materia oscura en los satélites progenitores simulados permite la reproducción de la razón M/L durante diferentes intervalos de tiempo, lo cual apoya la hipótesis de que las

galaxias enanas esferoidales no están dominadas por materia oscura. Sin embargo, al no poder reproducir simultáneamente las demás propiedades estudiadas, aún variando en un amplio rango la masa inicial y el radio de Plummer de los satélites progenitores indica que probablemente estos tendrían una componente importante de materia oscura.

Una continuación de este trabajo, sería repetir el presente estudio, pero considerando la materia oscura para el progenitor de Carina, ya que es relevante en otros trabajos hechos para la formación de galaxias dSph y ultraténues. Por otro lado, Angus *et al.* [8] realizaron simulaciones de N-cuerpos de enanas esferoidales usando dinámica de Newton modificada (MOND) y encontraron que si bien las enanas son estables bajo fuerzas de marea durante un tiempo de Hubble, las dispersiones de velocidades de las enanas no son amplificadas lo suficiente por las fuerzas de marea como para aumentar artificialmente la razón masa-luminosidad. Sería muy interesante realizar un estudio similar al presente usando modelos de gravedad modificada.

Referencias

- [1] A. Klypin, A. V. Kravtsov, O. Valenzuela, and F. Prada, *Astrophys. J.* **522**, 82 (1999).
- [2] B. Moore, S. Ghigna, F. Governato, G. Lake, T. Quinn, J. Stadel, and P. Tozzi, *Astrophys. J. Lett.* **524**, L19 (1999).
- [3] M. Boylan-Kolchin, J. S. Bullock, and M. Kaplinghat, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **422**, 1203 (2012).
- [4] R. A. Casas, V. Arias, K. Peña Ramírez, and P. Kroupa, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **424**, 1941 (2012).
- [5] P. Kroupa, *New Astron.* **2**, 139 (1997).
- [6] R. S. Klessen and P. Kroupa, *Astro. J.* **498**, 143 (1998).
- [7] J.-J. Fleck and J. R. Kuhn, *Astrophys. J.* **592**, 147 (2003).
- [8] G. W. Angus, G. Gentile, A. Diaferio, B. Famaey, and K. J. v. d. Heyden, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **440**, 746 (2014).
- [9] H. Haghi and V. Amiri, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **463**, 1944 (2016).

- [10] M. Fabrizio, M. Nonino, G. Bono, I. Ferraro, P. Francois, G. Iannicola, M. Monelli, F. Thévenin, P. B. Stetson, A. R. Walker, R. Buonanno, F. Caputo, C. E. Corsi, M. Dall' Ora, R. Gilmozzi, C. R. James, T. Merle, L. Pulone, and M. Romaniello, *Publ. Astron. Soc. Pac.* **123**, 384 (2011).
- [11] M. Monelli, L. Pulone, C. E. Corsi, M. Castellani, G. Bono, A. R. Walker, E. Brocato, R. Buonanno, F. Caputo, V. Castellani, M. Dall' Ora, M. Marconi, M. Nonino, V. Ripepi, and H. A. Smith, *Astron. J.* **126**, 218 (2003).
- [12] S. Piatek, C. Pryor, E. W. Olszewski, H. C. Harris, M. Mateo, D. Minniti, and C. G. Tinney, *Astron. J.* **126**, 2346 (2003).
- [13] M. G. Walker, M. Mateo, and E. W. Olszewski, *Astrophys. J. Lett.* **688**, L75 (2008).
- [14] A. W. McConnachie, *Astron. J.* **144**, 4 (2012).
- [15] Pasetto, S., Grebel, E. K., Berczik, P., Chiosi, C., and Spurzem, R., *Astron. Astrophys.* **525**, A99 (2011).
- [16] Revaz, Y., Jablonka, P., Sawala, T., Hill, V., Letarte, B., Irwin, M., Battaglia, G., Helmi, A., Shetrone, M. D., Tolstoy, E., and Venn, K. A., *Astron. Astrophys.* **501**, 189 (2009).
- [17] E. L. Lokas, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **394**, L102 (2009).
- [18] Breddels, Maarten A. and Helmi, Amina, *Astron. Astrophys.* **558**, A35 (2013).
- [19] M. Rocha, A. H. G. Peter, and J. Bullock, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **425**, 231 (2012).
- [20] G. W. Angus, A. Diaferio, and P. Kroupa, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **416**, 1401 (2011).
- [21] K. V. Johnston, D. N. Spergel, and L. Hernquist, *Astrophys. J.* **451**, 598 (1995).
- [22] S. J. Aarseth, M. Hénon, and R. Wielen, *Astron. Astrophys.* **37**, 183 (1974).
- [23] V. Springel, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **364**, 1105 (2005).
- [24] J. Goodman and P. Hut, *Dynamics of Star Clusters: Proceeding of the 113th Symposium of the International Astronomical Union, held in Princeton, New Jersey, U.S.A, 29 May – 1 June, 1984*, International Astronomical Union

Symposia (Springer Netherlands, 2012) pp. 77–79.

- [25] J. Klimentowski, E. L. Lokas, S. Kazantzidis, L. Mayer, and G. A. Mamon, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **397**, 2015 (2009).
- [26] M. Irwin and D. Hatzidimitriou, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **277**, 1354 (1995).