

# ESTUDIO DEL ORIGEN Y EVOLUCIÓN DE LA GALAXIA SAGITARIO MEDIANTE SIMULACIONES NUMÉRICAS DE N-CUERPOS

CARMEN ADRIANA MARTÍNEZ BARBOSA  
CÓDIGO 835154



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA  
FACULTAD DE CIENCIAS  
DEPARTAMENTO DE FÍSICA  
BOGOTÁ COLOMBIA  
2011

# ESTUDIO DEL ORIGEN Y EVOLUCIÓN DE LA GALAXIA SAGITARIO MEDIANTE SIMULACIONES NUMÉRICAS DE N-CUERPOS

CARMEN ADRIANA MARTÍNEZ BARBOSA  
CÓDIGO 835154

TESIS DE MAESTRÍA SOMETIDA COMO  
REQUISITO PARCIAL PARA OPTAR AL GRADO DE  
MAGISTER EN CIENCIAS - FÍSICA

DIRECTOR  
DR. RER.NAT. RIGOBERTO CASAS MIRANDA

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA  
FACULTAD DE CIENCIAS  
DEPARTAMENTO DE FÍSICA  
BOGOTÁ COLOMBIA  
2011

A Dios, por sus bendiciones.

A mi familia, por su amor.  
y a mi papá en su memoria.

---

---

## AGRADECIMIENTOS

Son muchas las personas que han contribuido para que este trabajo sea ahora una realidad; sin embargo, quiero agradecer especialmente a Dios porque me ha dado mucha fortaleza, templanza, entendimiento y por todas sus bendiciones, especialmente por haberme dado a mi familia: a mi mamá, Carmen, a mis tios Agustín, Samuel, Amanda, Ilse, y Jenith. A ellos quiero agradecerles por estar siempre en todos los momentos de mi vida, por su infinito amor y por sus enseñanzas. A mi novio José Celis por brindarme siempre una sonrisa, por su amor, por sus palabras de aliento en los momentos difíciles y por su ayuda incondicional. Al profesor Rigoberto Casas por compartir conmigo su gran conocimiento y a la Universidad Nacional por haber sido el lugar en donde he podido evolucionar como profesional.

También quiero agradecerle a mi papá, José Martínez, por haberme brindado su amor, su apoyo y por sus largas e interesantes charlas en donde pude aprender mucho de la vida y de la ciencia. Este trabajo es en su memoria.

---

---

## RESUMEN

Se estudió la evolución de Sagitario, una de las galaxias satélites de la Vía Láctea, mediante simulaciones numéricas de N-Cuerpos sin materia oscura y con diferentes contenidos de ésta. Con el fin de encontrar la posición y velocidad iniciales que pudo tener el progenitor de Sagitario, de tal manera que después de un intervalo de tiempo dado éste se encuentre en la posición y presente la velocidad radial (galactocéntrica) observadas de Sagitario (16 kpc y 171 km/s respectivamente), se estudió numericamente la evolución de una partícula de prueba durante 10 Gyr inmersa en el potencial rígido de la Vía Láctea. Este potencial tiene tres componentes en donde el disco es representado por un potencial de Miyamoto-Nagai, el esferoide por un potencial de Hernquist y el halo de materia oscura por un potencial logarítmico. El posible progenitor de Sagitario se construyó como una colección de partículas que obedecen a una distribución de densidad de Plummer mientras que los halos de materia oscura fueron construidos obedeciendo a un perfil Navarro Frenk & White (NFW).

La esfera de Plummer y el sistema conformado por un halo de materia oscura y una esfera de Plummer –objetos con materia oscura- se introdujeron dentro del potencial de la Vía Láctea con diferentes condiciones iniciales (órbitas) y se simuló la evolución de dichos sistemas por 10 mil millones de años (10 Gyr) usando el código de simulaciones Gadget2 en su componente Tree-code. Se analizó la evolución, el posible desmembramiento de los objetos iniciales debido a las fuerzas de marea producidas por el potencial galáctico. Adicionalmente, se estudiaron las propiedades físicas de la componente bariónica de los objetos bajo estudio tal y como serían medidas por un observador situado en la tierra, con el fin de comparar los resultados de las simulaciones con los datos de Sagitario provenientes de las observaciones.

Al realizar las simulaciones numéricas usando el software libre Gadget2 para progenitores que tienen solamente materia bariónica, se encontró que ninguno de éstos reproducen las propiedades observadas de Sagitario, por lo cual este satélite inicialmente tuvo que estar inmerso en un halo de materia oscura. Se encontró que si un satélite tiene un radio de Plummer de 0.6 kpc, al estar inmerso en un halo cuya masa inicial esté entre  $9 \times 10^6$  y  $9 \times 10^7 M_{\odot}$ , reproduce la mayoría de las propiedades físicas de Sagitario; sin embargo, debido a que todos los sistemas simulados presentan un radio de brillo medio más bajo que el observado en la galaxia enana, se concluye que su progenitor no pudo tener un radio de Plummer inicial entre 0.5 y 0.6 kpc; por el contrario, éste tuvo que ser una galaxia extendida con radio de Plummer aproximadamente mayor o igual 1.2 kpc.

---

---

# TABLA DE CONTENIDO

Índice de figuras	VIII
Indice de tablas	XI
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Componente esferoidal de la Vía Láctea . . . . .	1
1.2. Componente disco de la Vía Láctea . . . . .	2
1.3. Halo galáctico . . . . .	2
1.4. Halo de materia oscura . . . . .	3
1.5. Materia Oscura . . . . .	3
1.6. La galaxia Sagitario . . . . .	5
<b>2. Formación de la Vía Láctea</b>	<b>7</b>
2.1. Rápida y lisa . . . . .	7
2.2. Lenta y grumosa . . . . .	7
2.3. Formación del disco de nuestra galaxia . . . . .	8
2.4. Formación del halo galáctico . . . . .	9
<b>3. Estudios realizados a Sagitario</b>	<b>10</b>
3.1. Corrientes de marea asociadas a Sagitario . . . . .	11
3.1.1. Fricción dinámica . . . . .	15
3.2. Estudios generales realizados con contenido de materia oscura . . . . .	16
3.2.1. El problema de los satélites faltantes . . . . .	18
3.2.2. Fricción dinámica en halos . . . . .	19
3.2.3. Sagitario con materia oscura . . . . .	19
3.3. Posibles escenarios de formación de Sagitario . . . . .	20
<b>4. Gadget</b>	<b>23</b>
4.1. Física usada en Gadget . . . . .	24
4.1.1. Algoritmo de árbol . . . . .	24
4.1.2. Método TreePM . . . . .	25
4.1.3. Hidrodinámica . . . . .	26
4.2. Modificaciones hechas a Gadget para nuestro estudio . . . . .	26
<b>5. Modelo y condiciones iniciales</b>	<b>27</b>

5.1. Halo de materia oscura . . . . .	30
<b>6. Evolución de posibles progenitores de Sagitario sin materia oscura</b>	<b>36</b>
6.1. Corrientes de Marea asociadas a Sagitario: Simulaciones de N-cuerpos . . . . .	36
6.2. Comportamiento de galaxias enanas bajo diferentes condiciones iniciales . . . . .	37
6.2.1. Masa diferente . . . . .	37
6.2.2. Radio diferente . . . . .	38
6.2.3. Distancia apocéntrica diferente . . . . .	38
6.3. Evolución de galaxias enanas sin presencia de materia oscura . . . . .	39
6.3.1. Distancia apocéntrica de 44 kpc . . . . .	40
6.3.2. Distancia apocéntrica de 60 kpc . . . . .	56
<b>7. Evolución de posibles progenitores de Sagitario con diferentes contenidos de materia oscura</b>	<b>66</b>
7.1. Relajación de sistemas . . . . .	66
7.1.1. Para un satélite de $7 \times 10^8 M_{\odot}$ y radio de Plummer de 0.6 kpc . . . . .	66
7.1.2. Para un satélite de $1 \times 10^9 M_{\odot}$ y radio de Plummer de 1.2 kpc . . . . .	72
7.2. Evolución de un satélite de $7 \times 10^8 M_{\odot}$ y radio de Plummer de 0.6 kpc . . . . .	73
7.2.1. Halo de $8 \times 10^8 M_{\odot}$ y concentración de 10 . . . . .	73
7.2.2. Halo de $8 \times 10^8 M_{\odot}$ y concentración de 4 . . . . .	76
7.2.3. Halo de $9 \times 10^7 M_{\odot}$ y concentración de 4 . . . . .	77
7.2.4. Halo de $9 \times 10^6 M_{\odot}$ y concentración de 4 . . . . .	78
7.3. Evolución de un satélite de $1 \times 10^9 M_{\odot}$ y radio de Plummer de 1.2 kpc . . . . .	80
7.3.1. Halo de $9 \times 10^7 M_{\odot}$ y concentración de 4 . . . . .	80
<b>8. Conclusiones</b>	<b>84</b>
<b>A. Masa encerrada de un perfil NFW</b>	<b>86</b>
<b>B. Potencial asociado al perfil de NFW</b>	<b>87</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>89</b>

---



---

## ÍNDICE DE FIGURAS

1.1. Imagen de nuestra galaxia obtenida de los estudios de Hershell . . . . .	1
1.2. Imagen actual de nuestra galaxia y ubicación aproximada de Sagitario. . . . .	3
1.3. Imagen real de una galaxia espiral. La galaxia está inmersa en un halo esferoidal supermasivo de materia oscura. . . . .	4
3.1. Corrientes de marea asociadas a Sagitario obtenidas por Martínez-Delgado et. al. [1] <i>Izquierda</i> : vistas desde el centro de la galaxia. <i>Derecha</i> : vistas por un observador terrestre. Nótese que el modelo sugiere la presencia de desechos de Sagitario cubriendo una gran área del cielo. . . . .	12
3.2. Resultados de la evolución de Sagitario inmerso en materia oscura obtenido por Peñarrubia et al. [2]. . . . .	18
3.3. Imágenes de la formación de Sagitario obtenidas por Klimentowski et al. [3]. <i>Arriba</i> : Distribución de partículas a 6, 8 y 10 Gyr. <i>Abajo</i> : contornos de distribución de isodensidad. . . . .	21
3.4. Separación tentativa de todas las enanas del grupo local hecha por Ricotti & Gnedin [66]. 14 Dsph son fósiles verdaderos de los cuales 5 son de M31, 6 de la Vía Láctea y 3 (los nombres subrayados) están entre estas dos galaxias. . . . .	22
4.1. Agrupamiento empleado por Gadget en el algoritmo de árbol. . . . .	25
5.1. <i>Izquierda</i> : Condiciones iniciales de Sagitario. <i>Derecha</i> : Orbita de Sagitario en coordenadas galactocéntricas. . . . .	28
5.2. Simulación de una esfera de Plummer con diferentes distancias apocéntricas. Aquí se presentan sólo 6 de las 12 simulaciones realizadas. . . . .	30
5.3. Relaxaciones de un halo NFW mediante Gadget 2. <i>Arriba</i> : Halos de radio de 40 kpc y concentración 20 para valores de masa de $1 \times 10^6$ , $1 \times 10^7$ y $1 \times 10^8 M_\odot$ respectivamente. <i>Medio</i> : Halos de masa $1 \times 10^7 M_\odot$ y concentración de 20 para valores de radio de 20, 30 y 40 kpc respectivamente. <i>Abajo</i> : Halos con masa de $1 \times 10^7 M_\odot$ y radio de 40 kpc para valores de concentración de 10, 15 y 20 respectivamente. . . . .	33
5.4. Efectos del: <i>Izquierda</i> : Softening length y <i>Derecha</i> : ErrTolIntAcc en la inestabilidad de un halo. . . . .	34
6.1. Corrientes de marea de un satélite de $7 \times 10^8 M_\odot$ y radio inicial de 0.6 kpc. Se muestra su evolución a los 0.2, 0.6, 1, 2, 4, 5, 6 y 8 Gyr. . . . .	36
6.2. Satélites ubicados a una distancia apocéntrica de 44 kpc al centro galáctico y cuyo radio de Plummer es de 0.6 kpc. En la parte superior de todas las gráficas, la línea roja de abajo hacia arriba, representa el radio del 1% de la masa inicial del satélite. La parte inferior corresponde al movimiento del máximo de densidad del satélite. . . . .	37
6.3. Satélites ubicados a una distancia apocéntrica de 44 kpc al centro galáctico y cuyo radio inicial es de 0.5 kpc. . . . .	38

6.4. Satélites con masa inicial de $1 \times 10^9 M_\odot$ ubicados a 44 kpc del centro galáctico cuyos radios de Plummer son 0.6 y 1.2 kpc respectivamente. . . . .	38
6.5. Satélite de masa y radio inicial de $5 \times 10^8 M_\odot$ y 0.6 kpc respectivamente ubicado a 44 y 60 kpc del centro galáctico. . . . .	39
6.6. Evolución de las propiedades físicas de un satélite con masa inicial de $1 \times 10^9 M_\odot$ y radio de 0.6 kpc ubicado a 44 kpc del centro galáctico. . . . .	42
6.7. Evolución de las propiedades físicas de un satélite con masa inicial de $1 \times 10^9 M_\odot$ y radio de 1.2 kpc ubicado a 44 kpc del centro galáctico. . . . .	44
6.8. Evolución de las propiedades físicas de un satélite con masa inicial de $9 \times 10^8 M_\odot$ y radio de 0.6 kpc ubicado a 44 kpc del centro galáctico. . . . .	45
6.9. Evolución de las propiedades físicas de un satélite con masa inicial de $8 \times 10^8 M_\odot$ y radio de 0.6 kpc ubicado a 44 kpc del centro galáctico. . . . .	46
6.10. Evolución de las propiedades físicas de un satélite con masa inicial de $7 \times 10^8 M_\odot$ y radio de 0.6 kpc ubicado a 44 kpc del centro galáctico. . . . .	47
6.11. Evolución de las propiedades físicas de un satélite con masa inicial de $7 \times 10^8 M_\odot$ y radio de 0.5 kpc ubicado a 44 kpc del centro galáctico. . . . .	49
6.12. Evolución de las propiedades físicas de un satélite con masa inicial de $6 \times 10^8 M_\odot$ y radio de 0.6 kpc ubicado a 44 kpc del centro galáctico. . . . .	50
6.13. Evolución de las propiedades físicas de un satélite con masa inicial de $6 \times 10^8 M_\odot$ y radio de 0.5 kpc ubicado a 44 kpc del centro galáctico. . . . .	52
6.14. Evolución de las propiedades físicas de un satélite con masa inicial de $5 \times 10^8 M_\odot$ y radio de 0.6 kpc ubicado a 44 kpc del centro galáctico. . . . .	53
6.15. Evolución de las propiedades físicas de un satélite con masa inicial de $5 \times 10^8 M_\odot$ y radio de 0.5 kpc ubicado a 44 kpc del centro galáctico. . . . .	55
6.16. Evolución de las propiedades físicas de un satélite con masa inicial de $5 \times 10^8 M_\odot$ y radio de 0.3 kpc ubicado a 44 kpc del centro galáctico. . . . .	56
6.17. Evolución de las propiedades físicas de un satélite con masa inicial de $1 \times 10^9 M_\odot$ y radio de 0.6 kpc ubicado a 60 kpc del centro galáctico. . . . .	58
6.18. Evolución de las propiedades físicas de un satélite con masa inicial de $6 \times 10^8 M_\odot$ y radio de 0.6 kpc ubicado a 60 kpc del centro galáctico. . . . .	59
6.19. Evolución de las propiedades físicas de un satélite con masa inicial de $6 \times 10^8 M_\odot$ y radio de 0.5 kpc ubicado a 60 kpc del centro galáctico. . . . .	60
6.20. Evolución de las propiedades físicas de un satélite con masa inicial de $5 \times 10^8 M_\odot$ y radio de 0.6 kpc ubicado a 60 kpc del centro galáctico. . . . .	61
6.21. Evolución de las propiedades físicas de un satélite con masa inicial de $5 \times 10^8 M_\odot$ y radio de 0.5 kpc ubicado a 60 kpc del centro galáctico. . . . .	62
7.1. <i>Arriba:</i> Relajación durante 8.2 Gyr de un halo cuya masa es de $8 \times 10^8 M_\odot$ y concentración de 10. <i>Abajo izquierda:</i> Perfil de densidad inicial y su correspondiente ajuste. <i>Abajo derecha:</i> Perfil de densidad final y su correspondiente ajuste. Las unidades de la densidad son $10^{10} M_\odot/kpc^3$ y las del radio, kpc. . . . .	67
7.2. <i>Arriba:</i> Relajación durante 8.5 Gyr de un halo cuya masa es de $9 \times 10^7 M_\odot$ y concentración de 10. <i>Abajo izquierda:</i> Perfil de densidad inicial y su correspondiente ajuste. <i>Abajo derecha:</i> Perfil de densidad final y su correspondiente ajuste. Las unidades de la densidad son $10^{10} M_\odot/kpc^3$ y las del radio, kpc. . . . .	68

7.3.	<i>Arriba:</i> Relajación durante 8.5 Gyr de un halo cuya masa es de $8 \times 10^8 M_{\odot}$ y concentración de 4. <i>Abajo izquierda:</i> Perfil de densidad inicial y su correspondiente ajuste. <i>Abajo derecha:</i> Perfil de densidad final y su correspondiente ajuste. Las unidades de la densidad son $10^{10} M_{\odot}/kpc^3$ y las del radio, kpc. . . . .	70
7.4.	<i>Arriba:</i> Relajación durante 8.5 Gyr de un halo cuya masa es de $9 \times 10^7 M_{\odot}$ y concentración de 4. <i>Abajo izquierda:</i> Perfil de densidad inicial y su correspondiente ajuste. <i>Abajo derecha:</i> Perfil de densidad final y su correspondiente ajuste. Las unidades de la densidad son $10^{10} M_{\odot}/kpc^3$ y las del radio, kpc. . . . .	71
7.5.	<i>Arriba:</i> Relajación durante 9.8 Gyr de un halo cuya masa es de $9 \times 10^7 M_{\odot}$ y concentración de 4. <i>Abajo izquierda:</i> Perfil de densidad inicial y su correspondiente ajuste. <i>Abajo derecha:</i> Perfil de densidad final y su correspondiente ajuste. Las unidades de la densidad son $10^{10} M_{\odot}/kpc^3$ y las del radio, kpc. . . . .	72
7.6.	<i>Arriba:</i> Evolución de una galaxia de $7 \times 10^8 M_{\odot}$ y radio de 0.6 kpc sin presencia de materia oscura. <i>Abajo izquierda:</i> Evolución de un halo de $8 \times 10^8 M_{\odot}$ y concentración de 10. <i>Abajo derecha:</i> Evolución de una galaxia de $7 \times 10^8 M_{\odot}$ y radio de 0.6 kpc inmersa en este halo. . . . .	74
7.7.	Evolución de las propiedades físicas de una galaxia de $7 \times 10^8 M_{\odot}$ y radio de 0.6 kpc inmersa en un halo de $8 \times 10^8 M_{\odot}$ y concentración de 4. . . . .	74
7.8.	<i>Arriba:</i> Evolución de una galaxia de $7 \times 10^8 M_{\odot}$ y radio de 0.6 kpc sin presencia de materia oscura. <i>Abajo izquierda:</i> Evolución de un halo de $8 \times 10^8 M_{\odot}$ y concentración de 4. <i>Abajo derecha:</i> Evolución de una galaxia de $7 \times 10^8 M_{\odot}$ y radio de 0.6 kpc inmersa en este halo. . . . .	75
7.9.	Evolución de las propiedades físicas de una galaxia de $7 \times 10^8 M_{\odot}$ y radio de 0.6 kpc inmersa en un halo de $8 \times 10^8 M_{\odot}$ y concentración de 4. . . . .	76
7.10.	<i>Arriba:</i> Evolución de una galaxia de $7 \times 10^8 M_{\odot}$ y radio de 0.6 kpc sin presencia de materia oscura. <i>Abajo izquierda:</i> Evolución de un halo de $9 \times 10^7 M_{\odot}$ y concentración de 4. <i>Abajo derecha:</i> Evolución de una galaxia de $7 \times 10^8 M_{\odot}$ y radio de 0.6 kpc inmersa en este halo. . . . .	77
7.11.	Evolución de las propiedades físicas de una galaxia de $7 \times 10^8 M_{\odot}$ y radio de 0.6 kpc inmersa en un halo de $9 \times 10^7 M_{\odot}$ y concentración de 4. . . . .	78
7.12.	<i>Arriba:</i> Evolución de una galaxia de $7 \times 10^8 M_{\odot}$ y radio de 0.6 kpc sin presencia de materia oscura. <i>Abajo izquierda:</i> Evolución de un halo de $9 \times 10^6 M_{\odot}$ y concentración de 4. <i>Abajo derecha:</i> Evolución de una galaxia de $7 \times 10^8 M_{\odot}$ y radio de 0.6 kpc inmersa en este halo. . . . .	78
7.13.	Evolución de las propiedades físicas de una galaxia de $7 \times 10^8 M_{\odot}$ y radio de 0.6 kpc inmersa en un halo de $9 \times 10^6 M_{\odot}$ y concentración de 4. . . . .	79
7.14.	<i>Arriba:</i> Evolución de una galaxia de $1 \times 10^9 M_{\odot}$ y radio de 1.2 kpc sin presencia de materia oscura. <i>Abajo izquierda:</i> Evolución de un halo de $9 \times 10^7 M_{\odot}$ y concentración de 4. <i>Abajo derecha:</i> Evolución de una galaxia de $1 \times 10^9 M_{\odot}$ y radio de 1.2 kpc inmersa en este halo. . . . .	81
7.15.	Evolución de las propiedades físicas de una galaxia de $1 \times 10^9 M_{\odot}$ y radio de 1.2 kpc inmersa en un halo de $9 \times 10^7 M_{\odot}$ y concentración de 4. . . . .	82

---



---

## INDICE DE TABLAS

3.1. Propiedades físicas y cinemáticas de Sagitario. $r_{1/2}$ es el radio de brillo medio; $\sigma_0$ es la dispersión de velocidades central; $L_0$ es la luminosidad total; M/L es la relación masa-luminosidad; $\mu_{0,v}$ es el brillo superficial; $M_v$ es la magnitud absoluta. Además de estos valores, hay que tener en cuenta que Sagitario ha estado orbitando a nuestra galaxia al menos durante 6 Gyr aproximadamente [1]. $V_r$ y $V_T$ son las velocidades radial y tangencial con respecto al centro galáctico. $d_\odot$ y $R_{CG}$ son las distancias heliocéntrica y galactocéntrica de Sagitario respectivamente. . . . .	14
3.2. Tiempo de caída para algunas masas del progenitor de Sagitario. Para una distancia de 60 kpc, el tiempo es mayor. . . . .	16
5.1. Datos de la Vía Láctea tomados de [4] y [5] y detalles de la simulación. a,b,c y d son longitudes de escala de cada componente de nuestra galaxia. La posición y velocidad mostradas aquí son medidas con respecto al centro de nuestra galaxia. El valor de $\theta$ es tomando en cuenta $D_{Sg-S} = 21.47$ kpc, $D_{S-CG} = 8$ kpc y $D_{Sg-CG} = 16$ kpc. . . . .	27
5.2. Condiciones iniciales del progenitor de Sagitario usadas en las simulaciones de N-cuerpos en Gadget 2 modificado. La velocidad es la tangencial en el apocentro y $\epsilon_0$ es la excentricidad de la órbita. . . . .	29
5.3. Parámetros usados para el progenitor de Sagitario. . . . .	29
5.4. Parámetros utilizados para el halo de materia oscura . . . . .	34
5.5. Parámetros usados en Gadget 2 modificado para el halo NFW y para Sagitario. . . . .	35
6.1. Propiedades físicas para distintos satélites esferoidales cuando se encuentran a una distancia de 44 kpc del centro galáctico. La masa inicial y la medida en el tiempo t están dadas en $M_\odot$ , el radio de plummer y el de brillo medio $r_{1/2}$ , en kpc; el tiempo en Gyr; el brillo superficial central $\mu_0$ en $L_\odot/kpc^2$ ; la dispersión de velocidades central $\sigma_0$ , en km/s y la relación masa-luminosidad, en $M_\odot/L_\odot$ . . . . .	41
6.2. Propiedades físicas para distintas galaxias enanas cuando están ubicadas a 60 kpc del centro galáctico. Las masas están medidas en $M_\odot$ , el radio de plummer y el de brillo medio $r_{1/2}$ , en kpc; el tiempo en Gyr; el brillo superficial central $L_0$ en $L_\odot/kpc^2$ ; la dispersión de velocidades central $\sigma_0$ , en km/s y la relación masa-luminosidad, en $M_\odot/L_\odot$ . . . . .	57
6.3. División de las galaxias simuladas cuando parten desde 44 y 60 kpc del centro galáctico. . . . .	63
6.4. Características de cada uno de los satélites simulados. . . . .	65
7.1. Propiedades físicas de una galaxia de $7 \times 10^8 M_\odot$ y radio de 0.6 kpc cuando está inmersa en diferentes contenidos de materia oscura y parte desde una distancia de 44 kpc del centro galáctico. La tercera columna indica la masa que tiene el satélite en el tiempo t. . . . .	73
7.2. Propiedades físicas de una galaxia de $1 \times 10^9 M_\odot$ y radio de 1.2 kpc cuando está inmersa en un halo de materia oscura menos masivo. El sistema parte desde una distancia de 44 kpc del centro galáctico. La tercera columna indica la masa que tiene el satélite en t. . . . .	80

---

---

## INTRODUCCIÓN

Los primeros estudios que se realizaron para determinar la naturaleza de la Vía Láctea, se remontan al siglo XVIII, con Kant & Wright, quienes postularon que si *el sol forma parte de un sistema aislado de estrellas en forma de disco, las manchas elípticas que se ven en el cielo nocturno, pueden ser sistemas del mismo tipo*. Este principio se conoce actualmente como **teoría de los cielos**. Posteriormente, en el mismo siglo (año de 1785) Hershell, mediante la medición de las magnitudes de algunas estrellas, logró hacer una imagen de nuestra galaxia aunque no muy aproximada, debido a que en sus mediciones, no tuvo en cuenta la extinción del medio interestelar.<sup>1</sup>

Por otra parte, en 1922, Kapteyn & Van Rhijn lograron establecer en una primera aproximación, las dimensiones de nuestra galaxia, obteniendo un diámetro de 17 kiloparsecs (kpc) y un grosor de la Vía Láctea de 3 kpc. Cabe anotar que estas dimensiones no son correctas debido a que ellos al igual que Hershell, no tuvieron en cuenta la extinción del medio interestelar.

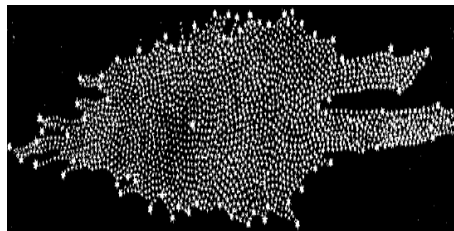


Figura 1.1: Imagen de nuestra galaxia obtenida de los estudios de Hershell

Fue hasta el año de 1980 que con el trabajo realizado por Jhon Bahcall y Raymond Soneira [6] se pudieron conocer las propiedades de la Vía Láctea. Actualmente, sabemos que la nuestra es una galaxia espiral que se compone de un esferoide, un disco, un halo galáctico y un halo de materia oscura. A continuación, se explicarán sus características en detalle.

### 1.1. Componente esferoidal de la Vía Láctea

Es la parte central de la galaxia. Consta de un núcleo que tiene un diámetro de aproximadamente 3 parsecs (pc) y un esferoide de diámetro de 3 kpc. Esta región, presenta una distribución de masa esferoidal.

---

<sup>1</sup>En una de sus hipótesis, Hershell supuso que el medio interestelar era transparente, es decir, no absorbía la luz proveniente de las estrellas.

En esta región de nuestra galaxia, las estrellas son “pobres” en contenido metálico (población tipo II), son además, subenanas; algunas estrellas son variables del tipo RR Lyrae<sup>2</sup> y todas ellas presentan una baja rotación alrededor del centro galáctico.

Esta zona también es interesante debido a que al parecer, se encuentra alojado un agujero negro de  $10^6 M_{\odot}$  que los científicos han llamado Sagitario A. Su detección fue posible a partir de la observación de un grupo de estrellas que giran en torno a un punto oscuro a más de 1500 km/s.

## 1.2. Componente disco de la Vía Láctea

Es la zona externa de la galaxia. El disco de la Vía Láctea es delgado (aproximadamente tiene 200 pc de grosor) y su diámetro oscila entre los 20 y 30 kpc. Contrario a la componente esférica, las estrellas que albergan esta zona son jóvenes y ricas en metales (población tipo I), además se aloja mucho polvo interestelar y gas el cual es el responsable de la formación estelar.

## 1.3. Halo galáctico

La Vía Láctea también contiene un halo de estrellas de aproximadamente 40 kpc de diámetro el cual está ubicado perpendicularmente al plano de nuestra galaxia y se puede decir que consta de dos partes: una componente vieja cuya distribución espacial es plana y una componente joven, de distribución esférica (se profundizará más sobre cada una de ellas en el siguiente capítulo). El halo galáctico se compone, entre otras cosas, por tres tipos diferentes de galaxias enanas satélites.

- Las ultra compactas (UCD por sus siglas en inglés)[7].
- Las ultra tenues.
- Las galaxias enanas esferoidales (Dsph por sus siglas en inglés).

Con respecto a las UCD, estos objetos son extremadamente compactos; además, son sistemas con tamaños menores a 1 kpc; sus velocidades de dispersión y su relación M/L son considerablemente mayores que cualquier cúmulo globular normal [8]. Algunos autores sugieren que estas galaxias tienen un gran contenido de materia oscura [7]. Actualmente se han encontrado algunos de estos objetos en los cúmulos de Fornax y Virgo [8].

Existe mucha información sobre las galaxias ultra tenues; sin embargo, al no ser el objeto de esta investigación, solo se mencionará que algunos de los ejemplos más conocidos son: Segue 1, Ursa Major II y Willman 1. Estos objetos se encuentran dentro de los 50 kpc internos del centro galáctico [9] .

---

<sup>2</sup>RR Lyrae es una estrella variable de la constelación de Lira. Se caracterizan por tener periodos de 0.2 a 2 días. Son población tipo II y pueden tener un rango espectral desde A2 a F6.

Algunas de las Dsph actualmente conocidas son<sup>3</sup>: Carina( $d=85 \pm 5$  kpc;  $M/L=59$ ), Draco( $d=72 \pm 3$ ;  $M/L=245$ ), Fornax( $d=120 \pm 8$  kpc;  $M/L=7$ ), LeoI( $d=198 \pm 30$  kpc;  $M/L=0.9$ ), LeoII( $d=207 \pm 10$  kpc;  $M/L=23$ ), Sculptor( $d=72 \pm 5$  kpc;  $M/L=10.9$ ), Sextans( $d=83 \pm 9$  kpc;  $M/L=0.98$ ), Ursa Minor( $d=64 \pm 5$  kpc;  $M/L=95$ ), Sagitario, Tucana, Apples 1 [11], Cetus [12] y Hercules, el satélite más recientemente descubierto [13]. En la figura 1.2 se muestra la imagen actual de nuestra galaxia y la ubicación aproximada de Sagitario.

## 1.4. Halo de materia oscura

En una primera aproximación, el modelo de formación de estructura en el universo establece que cada galaxia se forma en un halo de materia oscura, es decir, la materia bariónica queda atrapada en la barrera de potencial gravitacional de la materia oscura. Por lo tanto, es de esperarse que nuestra galaxia esté inmersa en un halo. Los estudios realizados por Majewsky et al. [14] revelan que éste puede ser descrito por un potencial esférico; sin embargo, el mejor modelo fue ajustado por Martínez-Delgado et al. [1] quien obtuvo una distribución de densidad oblata ( $q_d = 0.85$ ) para el halo.

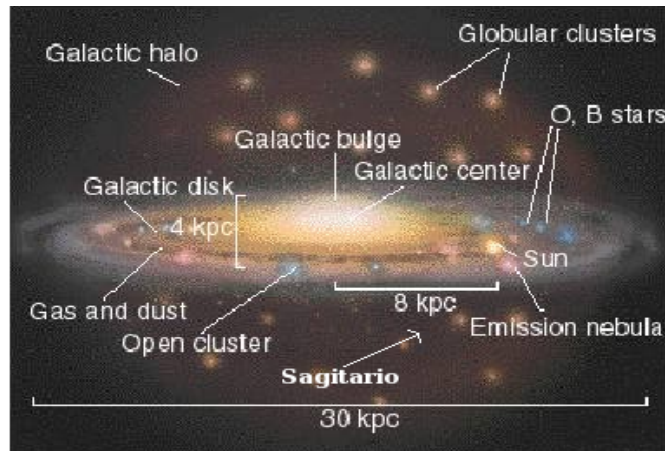


Figura 1.2: Imagen actual de nuestra galaxia y ubicación aproximada de Sagitario.

Por otra parte, debido a la gran importancia que tiene la materia oscura en la imagen actual de nuestro universo, a continuación se mencionarán las características más importantes de esta materia desconocida aún para los científicos.

## 1.5. Materia Oscura

Actualmente, el modelo de formación de estructura en el universo (ver figura 1.3) se sustenta en un ente que no se ha podido observar directamente con ningún instrumento; pero que tiene gran aceptación debido a algunos hechos observacionales que sólo se explican mediante lo que conocemos como *materia oscura*.

<sup>3</sup>Distancias al centro galáctico y relaciones de M/L tomadas de [10]

La primera evidencia de materia oscura fue encontrada por el astrónomo suizo Fritz Zwicky en 1933. Su trabajo se basó en mediciones de las velocidades radiales de galaxias pertenecientes al cúmulo Coma. El encontró que la relación masa luminosidad,  $M/L$  del cúmulo excedía la  $M/L$  de la curva de rotación por un factor de 400. Con este resultado, él concluyó que virtualmente, toda la masa del cluster está en la forma de algún tipo de materia invisible u *oscura* que es indetectable excepto a través de su fuerza gravitacional [15].

Sorprendentemente, sólo un 4 % del universo que conocemos está compuesto por materia bariónica (gas, polvo interestelar y estrellas) mientras que el 73 % está compuesto por energía oscura y el 23 % restante, de materia oscura; sin embargo, no se conoce aún su naturaleza ni tampoco su distribución espacial y no se sabe si es la misma para las galaxias o a mayores escalas; aunque existe una clasificación para esta materia tan extraña basada en el tipo de partículas que la puedan componer.

La materia oscura se clasifica en fría y caliente. La materia oscura fría está compuesta por partículas cuyas velocidades son lo suficientemente bajas como para no considerarlas relativistas y se cree que están presentes justo en la época en que las galaxias podrían empezar a formarse. Algunos candidatos para este tipo de materia son los MACHOs (MAssive Compact Halo Objects) que son enanas marrón y objetos similares. También se encuentran en esta clasificación los agujeros negros supermasivos y otros tipos de materia como por ejemplo los WIMPs (Weakly interacting Massive Particles).

La materia oscura caliente se caracteriza por tener partículas que poseen velocidades relativistas justo en el instante en que las galaxias podrían empezar a formarse. Un ejemplo de este tipo de materia serían los neutrinos con masa en reposo mayor a cero.

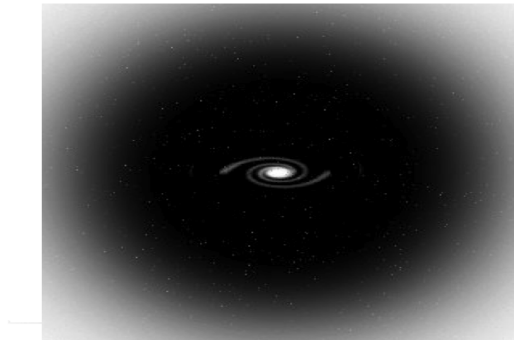


Figura 1.3: Imagen real de una galaxia espiral. La galaxia está inmersa en un halo esferoidal supermasivo de materia oscura.

La anterior clasificación es de importancia en los modelos de formación de estructura en el universo debido a que la materia oscura caliente no puede agruparse a escalas galácticas hasta tanto no se haya “enfriado” hasta velocidades no relativistas. Por lo tanto, en el paradigma de formación de estructura a gran escala en el universo, se requiere la presencia de materia oscura fría que permita la formación de estructura en un esquema jerárquico.

Aunque no se ha podido observar directamente la materia oscura, existen tres hechos observacionales que dan cuenta de su existencia: la velocidad de rotación en las galaxias de disco, el confinamiento de gas caliente en cúmulos de galaxias y los lentes gravitacionales [15].

## 1.6. La galaxia Sagitario

La galaxia enana esferoidal Sagitario es uno de los cuerpos celestes más recientemente descubiertos. Esto ocurrió en 1994 cuando Rodrigo Ibata [16] estaba haciendo un estudio del esferoide de nuestra galaxia.

Sagitario es sólo una de muchas galaxias enanas esferoidales que conforman el halo de la Vía Láctea y debido a que está siendo lentamente desgarrada, sus estrellas formarán parte de nuestra galaxia. Esto sugiere que la Vía Láctea sigue en proceso de formación. En el capítulo 2 se mencionan los procesos que han sido llevados a cabo para ello y la importancia que tiene sagitario en este marco.

Sagitario está ubicado aproximadamente a 16 kpc del centro de nuestra galaxia, esto lo hace el satélite más cercano de la Vía Láctea; además Martínez-Delgado et al. [1] encontró corrientes de marea asociadas a este satélite a  $45 \pm 5$  y  $62 \pm 6$  kpc del centro de nuestra galaxia, las cuales tienen una fuerte evidencia observacional en el SDSS (Sloan Digital Sky Survey). Los restos observados a 45 kpc, están compuestos por estrellas de carbón previamente descubiertos por Johnston et al. [4]. Este descubrimiento mantiene la idea que esos restos dejados por Sagitario al sentir una fuerte interacción con la Vía Láctea, dejan trazado en el cielo una órbita polar que envuelve a nuestra galaxia. En el capítulo 3 se menciona en más detalle los estudios realizados a esta galaxia satélite, así como las teorías actuales sobre su formación.

Martínez-Delgado también realizó simulaciones numéricas de sagitario encontrando que como su evolución ha sido lenta, éste no se destruyó en épocas tempranas. Los resultados también indican que este satélite ha estado orbitando la galaxia por más de 5 giga años (Gyrs). Esta hipótesis está soportada en las observaciones de la población estelar de Sagitario y en sus corrientes de marea asociadas [17]. Todos estos resultados hacen pensar que esta galaxia debe estar inmersa en un halo de materia oscura para poder haber sobrevivido durante todo este tiempo; sin embargo, su contenido, formación y evolución aún no se conoce bien por lo tanto, el estudio de Sagitario es bastante activo dentro de la investigación en astrofísica galáctica.

Debido a que no se conocen la masa, radio y contenido de materia oscura iniciales de Sagitario, se pretende con esta investigación encontrar las propiedades que pudo haber tenido el progenitor de éste satélite tales como su masa y radio iniciales, además del posible contenido de materia oscura en el que pudo estar alojado. Para ello, es necesario establecer un rango de posiciones y velocidades iniciales para este sistema. Estos parámetros se encuentran estudiando la órbita de una partícula de prueba sometida al potencial de la Vía Láctea durante 8 Gyr, teniendo en cuenta la posición y velocidad radial actualmente medidas. Los

parámetros encontrados se utilizan como condiciones iniciales para Gadget<sup>4</sup>. El progenitor de Sagitario se simula como una distribución esférica de partículas que obedecen a un potencial de Plummer. Los detalles del modelo utilizado y las condiciones iniciales obtenidas están en el capítulo 5.

Una vez encontradas las condiciones iniciales, se estudia la evolución de diferentes sistemas esferoidales en un rango de masas y radios iniciales sin materia oscura para encontrar las posibles características que pudo haber tenido el progenitor de Sagitario. Los resultados obtenidos se encuentran en el capítulo 6.

Posteriormente, los satélites cuyas propiedades físicas sean parecidas a las actualmente observadas, se simulan inmersos en diferentes halos que obedecen a un perfil de densidad del tipo NFW, con el fin de encontrar el posible contenido de materia oscura del progenitor de Sagitario. Esto se muestra en detalle en el capítulo 7. Estos resultados son muy importantes debido a que con ellos se podría saber la época en la que éste satélite fue formado, además se hace un aporte significativo al estudio de la formación de estructura del universo. En el capítulo 8 están las conclusiones de este proyecto de investigación.

---

<sup>4</sup>Programa de libre acceso el cual utilizaremos para hacer las simulaciones de N-cuerpos. En el capítulo 4 se explicará en detalle la física que utiliza.

# CAPÍTULO 2

---

---

## FORMACIÓN DE LA VÍA LÁCTEA

En el universo existen dos tipos morfológicos principales de galaxias: las elípticas y las espirales<sup>1</sup>. Así como estos nombres sugieren una forma bastante diferente, existe una clara diferenciación en las propiedades físicas de éstos sistemas. Por ejemplo, las galaxias elípticas están soportadas básicamente por movimientos aleatorios mientras que las espirales son discos planos soportados por rotación [18],[19]; de hecho, las observaciones indican que el momento angular en este tipo de galaxias es 10 veces mayor que el medido en galaxias esféricas [18]. Las galaxias espirales también se caracterizan por la existencia de un núcleo (esferoide) más un disco en el cual hay mucho contenido de gas y estrellas jóvenes [20]; en las galaxias elípticas, la población estelar, es vieja. Debido a estas observaciones, es natural afirmar que existen dos procesos de formación: uno violento el cual genera grandes cantidades de movimiento aleatorio y otro más ordenado que produce discos delgados rotantes con un pequeño movimiento aleatorio [19]. La Vía Láctea es una galaxia de tipo espiral y actualmente existen dos escenarios que describen su formación [21]:

### 2.1. Rápida y lisa

Este modelo fue propuesto por Eggen-Lyndell-Bell & Sandage [22] en 1962. Basados en correlaciones entre metalicidad, excentricidad orbital, momento angular y velocidad perpendicular al plano galáctico en una muestra de estrellas del halo cercanas y de alta velocidad, ellos concluyeron que la galaxia se formó del colapso rápido y monolítico de una sobre densidad en el campo primordial de densidad. Las primeras estrellas que se formaron durante el colapso heredaron la baja metalicidad y el movimiento predominante radial del gas colapsante, mientras que la conservación del momento angular y la disipación de la energía permitió la formación de un disco de gas plano y rotante. Estrellas metalmente ricas se formarían en este disco así como el medio interestelar llegó a ser enriquecido con los productos de la nucleosíntesis durante la evolución estelar. Se ha observado que este modelo no concuerda muy bien con las observaciones<sup>2</sup> [23].

### 2.2. Lenta y grumosa

Este modelo fue propuesto por Searle & Zinn [24] los cuales concluyeron que el halo fue construido en escalas de tiempo de varios Gyr de pequeños fragmentos de masa diferente. Según ellos, hubo estrellas y cúmulos que se formaron eventualmente y quedaron en equilibrio dinámico con nuestra galaxia constituyendo el halo actual, mientras que el gas perdido en estas regiones fue barrido hacia el disco galáctico.

---

<sup>1</sup>Aunque también existen las galaxias irregulares; pero en un menor porcentaje.

<sup>2</sup>Más específicamente, las propiedades del halo galáctico externo no concuerdan con este modelo.

Este escenario es atractivo debido a que se ajusta dentro del paradigma de la materia oscura fría (CDM) de formación de estructura [23].

Aunque los anteriores escenarios son muy diferentes y no explican completamente y por separado las propiedades actuales de la Vía Láctea, se cree que las partes internas de nuestra galaxia (disco grueso y delgado), se formaron mediante el primer modelo; mientras que el halo, por el segundo [21]; sin embargo, Burkert [25] propone un modelo evolutivo en el cual junta estas dos teorías. El supone que el gas se asentó en los progenitores de baja masa de la Vía Láctea. La primera población estelar tipo II se formó en su centro; procesos posteriores de feedback expulsaron el gas en forma de viento galáctico violento. Las estrellas de población II en sus centros representarían ahora la componente del halo. La formación estelar en las subestructuras fue muy ineficiente, tal que muchos de los satélites no serían fácilmente detectables. La componente caliente de gas, por otra parte, se enfrió y se posó en el plano ecuatorial a través de una fase de colapso monolítico conservando su momento angular y formando una estructura de disco con la longitud de escala observada. Durante la primera fase de la formación del disco el halo de materia oscura fue relajado violentamente con subestructuras masivas frecuentemente interactuantes con el protodisco. Durante esta fase, el disco grueso se formó; posteriormente, después de la principal época de mezcla, el gas pudo asentarse para formar el disco delgado.

Aunque esta teoría trata de explicar de una manera completa la formación de todo el sistema Vía Láctea, al observar las diferentes componentes de nuestra galaxia se podría concluir que cada una de ellas tuvo un origen distinto [26], [27], [18]. A continuación, se nombrarán algunas teorías que tratan de explicar la formación de cada uno de estos componentes.

### 2.3. Formación del disco de nuestra galaxia

Según observaciones de abundancias en el vecindario solar, el disco de nuestra galaxia se formó de un sistema que tenía momento angular inicial [28].

Con respecto al disco grueso, existen dos teorías diferentes:

1. Se formó del colapso disipativo del disco galáctico [27], [18], [29].
2. Se formó por el calentamiento del disco debido a la fricción dinámica cuando una galaxia satélite fue acreetada [27].

De estas dos hipótesis, las observaciones indican que el disco grueso tiene un gradiente vertical de metalicidad, lo cual implica que pudo haberse formado durante un colapso disipativo [27]; sin embargo, la identificación de desechos en los discos galácticos cuyo origen puede ser debido a un satélite provee pruebas al escenario de acreción; pero aún no es claro cómo este escenario difiere del calentamiento dinámico de un disco delgado previo más un evento de mezcla [30]. Aunque no se conoce cuál de estas hipótesis es la que llevó al origen de la componente disco de nuestra galaxia, se ha encontrado que el halo *viejo* o aplanado

posee propiedades iguales al disco grueso [21] como por ejemplo el tipo de estrellas (población II [31]). Esto sugiere que tanto el halo interno como el disco tuvieron el mismo origen.

## 2.4. Formación del halo galáctico

La Vía Láctea tiene dos componentes de halo. Uno *viejo* que consiste principalmente de cúmulos que se formaron durante el colapso y permitieron finalmente la formación del disco galáctico y un halo *joven* que posee cúmulos que se formaron en sistemas satélites que fueron o son actualmente acretados por la galaxia [29], entre ellos se encuentra Sagitario. Entre estos dos halos, existen diferencias marcadas no sólo en la cinemática de sus constituyentes sino también en sus propiedades físicas. El halo *viejo* tiene rotación, una velocidad de dispersión pequeña y su distribución espacial es plana [29]; además presenta un gradiente en metalicidad. A una distancia al centro galáctico  $R_{GC} < 6$  kpc,  $[\text{Fe}/\text{H}] = -1.44 \pm 0.06$ ; a  $6 < R_{GC} < 15$  kpc,  $[\text{Fe}/\text{H}] = -1.88 \pm 0.07$  y a  $15 < R_{GC} < 40$  kpc,  $[\text{Fe}/\text{H}] = -1.93 \pm 0.1$  [29]. Esta zona, como ya se había mencionado en la sección anterior, pudo haber tenido un origen por colapso disipativo<sup>3</sup> [31]. Al observar el halo *joven*, las diferencias son abismales. Su distribución espacial es esférica y no presenta un gradiente en la metalicidad; además contrario a lo que se esperaría, su rotación es retrógrada y su velocidad de dispersión es muy alta [29], [31]. Su origen está asociado a eventos de acreción [32], [33], [34], [31]; de hecho, las enanas esferoidales y los cúmulos globulares pueden contribuir a este escenario, debido a que han y pueden proveer cantidades significantes de materia bariónica al halo galáctico [35]; de hecho, algunos autores sugieren que estos satélites han contribuido al menos con  $10^9 M_{\odot}$  [36]. Un ejemplo sorprendente de esto son las corrientes de marea asociadas a Sagitario [34]. Otros hechos observacionales que dan cuenta de los distintos orígenes de los halos son los cúmulos Oosterhoff II M2 y Oosterhoff I M3. Mientras que los primeros fueron formados muy temprano en la protogalaxia, los segundos se originaron probablemente por eventos de mezcla en lugares distintos y en un tiempo posterior [37], [23]. este efecto sugiere que el halo interno evolucionó más rápido que el externo [38].

La formación de nuestra galaxia presenta un reto para la cosmología actual. Aunque se sabe que debido a la acción de la gravedad se fue acumulando materia alrededor de las perturbaciones existentes en la densidad, el modelo estándar de formación de estructura no puede explicar cómo se formaron las primeras estrellas (población III) y galaxias a partir de la condensación de gas primordial. Tampoco puede dar respuesta a los procesos físicos que dieron lugar a las diferentes morfologías (espirales, elípticas, irregulares) y la conexión existente entre el agujero negro que alberga la mayoría, si no, todas las galaxias. Un ejemplo de ello es la Vía Láctea la cual se formó mediante un proceso muy complejo que involucra no sólo el colapso monolítico de una nube protogaláctica [29], también adiciona procesos de formación jerárquica junto a violentas relajaciones y posibles deformaciones de su halo de materia oscura [39]. Esto nos permitiría afirmar que realmente se necesitan de los dos modelos (Eggen y Zinn) para explicar completamente su formación [32]; además, el desgarramiento de sistemas como Sagitario dan cuenta de que ésta aún sigue en este proceso.

---

<sup>3</sup>Algunos estudios basados en  $\Lambda$ CDM concluyen que fragmentos subgalácticos de baja masa se formaron en épocas tempranas. estos fragmentos rápidamente se fusionaron dentro de varias masas compactas las cuales se mezclaron por disipación [26].

# CAPÍTULO 3

---

---

## ESTUDIOS REALIZADOS A SAGITARIO

Sagitario es el miembro del grupo local más cercano a la Vía Láctea; pero su localización detrás del centro galáctico hizo que fuera descubierta sólo recientemente [40]. Fue hasta 1994 que durante el curso de un estudio espectroscópico del esferoide de nuestra galaxia, Rodrigo Ibata [16] descubrió esta enana satélite; desde entonces, Sagitario ha sido objeto de febril investigación, de hecho, su actual ubicación ofrece una excelente oportunidad para estudiar los efectos de las corrientes de marea en detalle, además ofrece un mejor entendimiento en los procesos de formación del halo y de la Vía Láctea [41]. Sin embargo, debido a que sólo una componente de la velocidad de ésta galaxia es conocida, no se puede saber su órbita precisa, con lo cual, no se pueden reproducir los datos observacionales con exactitud [4].

El cuerpo principal de Sagitario que se encuentra a  $16 \pm 2$  kpc del centro galáctico [42],[4],[43],[44] posee una dispersión de velocidades  $\sigma = 11.4$  km/s [42],[45],[46]; además cubre una vasta región del cielo ( $15^0 \times 7^0$ ) [47]. Las simulaciones numéricas indican que no es simétrico [40], es un objeto prolato con radios de eje  $\approx 3:1:1$  [42],[43] lo cual la hace la galaxia satélite más plana. También está orientada perpendicularmente al plano de nuestra galaxia [48],[42], a una latitud de  $b = -4^0$  a  $-26^0$  [42],[43]. Estudios cinemáticos indican que Sagitario se está moviendo hacia el norte con una velocidad transversal de  $250 \pm 90$  km/s [43],[49],[50] y que la masa de los progenitores de las galaxias enanas debe estar entre  $10^8$  y  $10^9 M_\odot$  [51].

Sagitario está catalogada como una galaxia enana esferoidal por varias razones:

1. Es una galaxia elíptica que acompaña a la Vía Láctea [52].
2. Carece de HI [53], también posee poco o nada de medio interestelar para activar la formación estelar [54].
3. Su morfología es muy simple y tiene una velocidad de rotación muy baja. [54].
4. Contiene estrellas de población vieja y ha experimentado extensas épocas de formación estelar; aunque actualmente, no [55]. De hecho, algunos estudios indican que otras enanas como Fornax, Draco y Sextans tienen en sus centros una velocidad de dispersión menor. Esto podría ser el resultado de poblaciones estelares diferentes y pobres [9].
5. Como se enunció en la introducción, al igual que otras galaxias enanas, este satélite parece tener una relación  $M/L^1$  alta [10],[45]; lo cual llevaría a concluir que estos sistemas son los objetos más dominados por materia oscura en el universo [45],[56],[57],[42],[7],[2],[58],[59].

---

<sup>1</sup>Esta cantidad se relaciona con la dispersión de velocidades, como se mostrará en el capítulo 6

Por otra parte, Sagitario es conocida por contener una variedad de poblaciones estelares con diferentes edades y metalicidades [60]. Existen estrellas muy viejas (del tipo RR-Lyrae) [61],[42] hasta de edad intermedia (estrellas de carbón)[42]; sin embargo, la edad promedio de toda la población estelar es de  $8 \pm 5$  Gyr [17]; aunque algunos autores sostienen que es de 10 Gyr [61].

Estudios realizados por Giuffrida et al. [47], muestran un sorprendente valor de metalicidad en el cuerpo principal de Sagitario con un valor muy pobre de  $[\text{Fe}/\text{H}]=-2.5$  (También encontrado por [46]); Sin embargo, Bonifacio et al. [62] encontró que algunas estrellas mostraban una metalicidad de  $[\text{Fe}/\text{H}] \leq 0.7$ . Esto puede ser el signo de una historia compleja de formación estelar caracterizada por varias explosiones de supernovas [62]; además de tener Sagitario un número sustancial de estrellas tipo M [52].

Otra característica sorprendente de este satélite es que hay cuatro cúmulos globulares asociados a él; pero probablemente, muchos otros han sido destruidos y ahora son asociados con sus corrientes de marea<sup>2</sup> [46]. Estos cuatro cúmulos son: Terzan 7, Terzan 8, Arp 2 y M54. Con respecto a los tres primeros, estudios realizados por Chaboyer et al. [64] indican que Terzan 7 tiene una edad de aproximadamente 9 Gyr; 2 Gyr menos que los otros cúmulos; además, éstos se encuentran a las afueras de Sagitario [47], contrario a M54, el cual coincide con el centro de la enana [47],[46]. Por esta razón, se sugirió que este cúmulo puede ser el núcleo actual de Sagitario [65]; sin embargo, éste y M54 tienen diferentes perfiles superficiales de brillo, lo cual sugiere que tuvieron orígenes diferentes; de hecho, simulaciones de N-cuerpos muestran que la órbita de M54 decae completamente por fricción dinámica dentro de 3 Gyr [46]. Debido a similitudes en datos cinemáticos parece que los cúmulos Berkeley 29 y Saurer 1 se originaron dentro de Sagitario, debido a que estos sistemas poseen la combinación correcta de edad y metalicidad para ajustar perfectamente dentro de la relación edad-metalicidad de Sagitario [63].

Las corrientes de marea de Sagitario son las contribuciones más grandes de la estructura del halo a radios por encima de 50 Kpc [46], es por esto que a continuación se mostrarán la mayoría de los estudios realizados en este campo.

### 3.1. Corrientes de marea asociadas a Sagitario

Las corrientes de marea son filamentos de desechos que contienen estrellas, gas y posiblemente materia oscura que han llegado a ser desgarrados de una galaxia enana satélite a lo largo de su órbita con respecto al centro de masa de una galaxia más masiva [56]. El ejemplo más espectacular es Sagitario, quien por su cercanía a la Vía Láctea está siendo desgarrado continuamente por las intensas fuerzas de marea.

Las corrientes de marea son de gran importancia porque [66]:

1. Estas proveen fuertes ligaduras para conocer la forma del halo de materia oscura en la galaxia huésped, siendo éste un mejor método que usar HI o cinemática estelar.

---

<sup>2</sup>Se ha encontrado un cúmulo globular asociado a Sagitario que está ubicado en las corrientes de marea de este satélite, se llama Whiting 1 [63].

2. Debido a que dependen de la masa y estructura interna de su progenitor, se puede conocer la relación M/L del sistema.
3. Se usan para determinar la posición del máximo de densidad del progenitor si éste no ha sido detectado.

Debido a su bajo brillo superficial, las corrientes de marea son muy difíciles de detectar por técnicas fotométricas[57]; sin embargo, estos desechos asociados a Sagitario cubren un gran área del cielo como se observa en la figura 3.1.

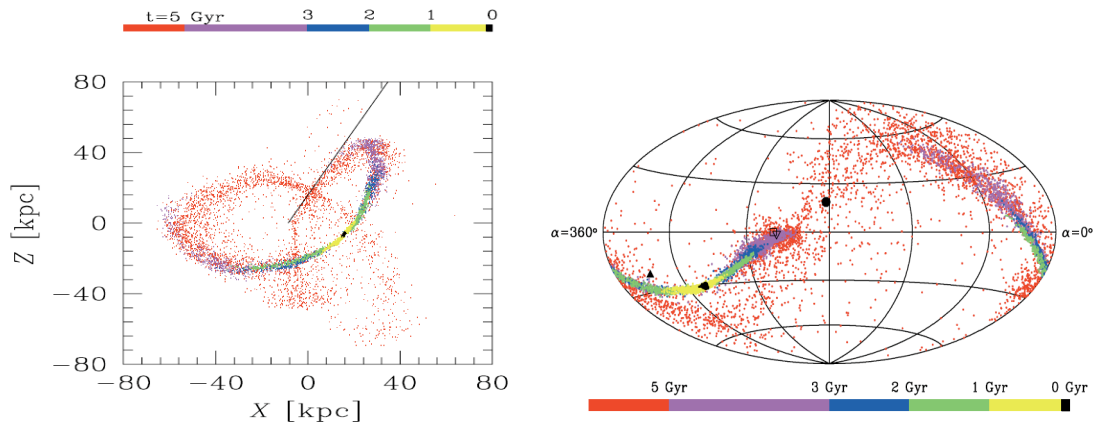


Figura 3.1: Corrientes de marea asociadas a Sagitario obtenidas por Martínez-Delgado et. al. [1] *Izquierda:* vistas desde el centro de la galaxia. *Derecha:* vistas por un observador terrestre. Nótese que el modelo sugiere la presencia de desechos de Sagitario cubriendo una gran área del cielo.

Existen tres hechos observacionales que ayudan a ligar el origen y la evolución de Sagitario: las corrientes de marea observadas, la masa actual del cuerpo principal y su relación M/L. Con respecto al primero, las corrientes de marea asociadas a sagitario están conformadas por estrellas gigantes tipo M [67] y estrellas del tipo RR-Lyrae [68], [69], [32]; aunque los estudios hechos por Newberg et al. [48] sugieren que hay estrellas tipo F y BHB (blue horizontal branch por sus siglas en inglés). Por otra parte, se ha encontrado material desgarrado de Sagitario de edad entre 3 y 6.5 Gyr atrás [60]. Helmi [57] agrupó las corrientes de marea entre dos grupos: las más jóvenes -filamentos que fueron desgarrados en un tiempo menor o igual a 1.6 Gyr [14]- y las más viejas -con una edad entre 2 y 4 Gyr-. También se han encontrado estructuras en forma de arco a través del hemisferio sur galáctico hasta una distancia aproximada de 40 kpc [52]; otros estudios encontraron además, filamentos a las distancias de 45 kpc [32],[1];  $46 \pm 12$  kpc [70] y hasta  $62 \pm 6$  kpc [1] con respecto al centro galáctico. Este último dato indica que Sagitario se ha estado desgarrando desde hace aproximadamente 6 Gyr [1]. Sin embargo, observaciones realizadas por Newberg [41] muestran excesos de densidad cuyas estrellas posiblemente pertenecen a corrientes de marea asociadas a Sagitario que están a 90 kpc del centro de la Vía Láctea. Esto indicaría que estas estructuras fueron desgarradas de Sagitario hace aproximadamente, 7 Gyr [1]. Si esto es cierto, implicaría que este satélite cambió su órbita en el pasado. La explicación más plausible es que esta galaxia fue un satélite mucho más masivo. Después de un tiempo de Hubble, la órbita decayó a una más pequeña (la actual, en donde el

peri-apocentro es 14-52 kpc). Grandes cantidades del material del progenitor fueron despojados a un radio entre 10 y 140 kpc; los filamentos localizados a 90 kpc podrían ser parte de estos desechos; sin embargo, la masa actual de Sagitario debería ser de aproximadamente,  $5 \times 10^9 M_{\odot}$  que es mucho más alta que su valor actual [33]. Un hecho importante es que el cúmulo NGC 219 aparece dentro del exceso de densidad encontrado por Newberg [41]. Esto podría indicar que en un pasado este objeto perteneció a sagitario.

Si deseáramos simular las observaciones hechas por Newberg [41], [48], se debería tener en cuenta la formación del halo de materia oscura de nuestra galaxia [1]; sin embargo, para evitar complicaciones, de la edad de la población estelar y de las corrientes de marea observadas, se puede suponer que Sagitario ha sido desgarrada desde hace 6 Gyr. En esta investigación no se tendrá en cuenta lo que suceda con este satélite en un tiempo mayor. El hecho que Sagitario hace aproximadamente 6 Gyr está orbitando alrededor de nuestra galaxia, es de gran importancia para fijar las condiciones iniciales de este sistema

Por otra parte, las corrientes de marea más cercanas que han sido encontradas están a 18 kpc del centro galáctico y pertenecen a unos filamentos que emergieron durante el último paso perigaláctico de Sagitario (aproximadamente 0.75 Gyr atrás) [69].

Con respecto a la masa actual de sagitario, los estudios indican que está entre  $(2-5) \times 10^8 M_{\odot}$  [71], [9]; sin embargo, el dato que más se ajusta a las observaciones es  $M \approx 3 \times 10^8 M_{\odot}$  [71], [67], [14]. Su relación M/L está entre  $21 M_{\odot}/L_{\odot}$  [67] y  $25 M_{\odot}/L_{\odot}$  [14]; aunque algunos autores sugieren que está entre  $14 M_{\odot}/L_{\odot}$  y  $36 M_{\odot}/L_{\odot}$  [71]. En la tabla 3.1 se resumen las propiedades físicas actuales de Sagitario. El objetivo de este estudio es calcular algunos parámetros (radio de brillo medio, velocidad de dispersión, relación masa-luminosidad) para varias galaxias estando sin materia oscura y con diferentes contenidos de ésta y compararlas con los valores que se presentan en la tabla 3.1, para así poder inferir cómo pudo haber sido el progenitor de Sagitario y si éste tuvo que tener una componente de materia oscura para poder sobrevivir hasta hoy.

Con respecto a los estudios teóricos, existen varios que predicen las características observadas de Sagitario. Law et al. [67] al simular a este satélite como una colección de  $10^5$  partículas autogravitantes que están distribuidas de acuerdo a un modelo de Plummer, encontró que las características de la órbita de Sagitario que mejor se ajustan a las observaciones obtenidas de distancia y velocidad radial de las estrellas tipo M del 2MASS, son las siguientes: Período=0.75 Gyr; apocentro= 52 kpc; pericentro= 14 kpc. Al igual que [67], Ibata & Lewis [49] encontraron que las órbitas de sagitario tienen períodos menores a 1 Gyr y son moderadamente excéntricas; los apocentros están cerca a 60 kpc y los pericentros, a 20 kpc. Ellos también concluyen que Sagitario no sólo se mueve hacia el norte con una velocidad transversal de  $250 \pm 90$  km/s, también es necesario que tenga una componente de materia oscura debido a que los modelos con sólo materia bariónica reproducen los datos cinemáticos pero no el radio de brillo medio. Otros estudios sugieren que este satélite oscila entre 10 kpc de pericentro y 50 kpc de apocentro [33]. Moviéndose en esta órbita, sagitario es objeto de una significativa distorsión por parte de la Vía Láctea [72].

Propiedades físicas de sagitario	
Extensión	$20^0 \times 8^0$ * (8.4 × 3.4) kpc $22^0 \times 8^0$ ** (9.2 × 3.4) kpc
$r_{1/2}$	0.55 kpc*** 0.52 kpc**
$\sigma_0$	11.4 km/s ***
$L_0$	$2 \times 10^7 L_\odot$ + $1.4 \times 10^7 L_\odot$ ++
M/L	10 * 14-36 ++
Masa actual	$(2.8 - 3.7) \times 10^8 M_\odot$ ++
$\mu_{0,v}$	25.4 mag/arcsec <sup>2</sup> *** ó $2.47 \times 10^6 L_\odot/\text{kpc}^2$
$M_v$	$-13.4 \pm 0.3$ mag *
Propiedades cinemáticas de sagitario	
$(l, b)^a$	$5.6^0, -14^0$ *
$V_r$	171 km/s ***
$V_T$	$250 \pm 90$ km/s **, +++
$d_\odot$	$24 \pm 2$ kpc **+
$R_{CG}$	$16 \pm 2$ kpc ***

Datos tomados de: \*[73], \*\*[49], \*\*\*[44], +[74], ++[71], +++[50], \*\*+[75]

Tabla 3.1: Propiedades físicas y cinemáticas de Sagitario.  $r_{1/2}$  es el radio de brillo medio;  $\sigma_0$  es la dispersión de velocidades central;  $L_0$  es la luminosidad total; M/L es la relación masa-luminosidad;  $\mu_{0,v}$  es el brillo superficial;  $M_v$  es la magnitud absoluta. Además de estos valores, hay que tener en cuenta que Sagitario ha estado orbitando a nuestra galaxia al menos durante 6 Gyr aproximadamente [1].  $V_r$  y  $V_T$  son las velocidades radial y tangencial con respecto al centro galáctico.  $d_\odot$  y  $R_{CG}$  son las distancias heliocéntrica y galactocéntrica de Sagitario respectivamente.

Por otra parte, los modelos teóricos también indican que Sagitario ha sobrevivido por varias órbitas alrededor de nuestra galaxia. Esto quiere decir que no es plausible que este satélite haya sido capturado recientemente por la Vía Láctea [42]. Velásquez & White [76] encontraron que un sistema estelar de  $10^8 M_\odot$  y un radio de 5 kpc no sobrevive a un paso perigaláctico antes de ser destruída la enana; sin embargo, estos autores enfatizan que Sagitario debió haber sobrevivido al menos 10 pasos por el pericentro antes de ser totalmente destruída. como el periodo que ellos encontraron en su órbita fue de 0.75 Gyr, Sagitario debe vivir al menos por 7.5 Gyr. Otros estudios realizados por Law et al. [71] muestran que una cantidad comparable de tiempo se necesita para reproducir las corrientes de marea actualmente observadas. Según estos estudios, nosotros estaríamos observando que las estrellas gigantes tipo M que forman parte de las corrientes de marea asociadas a Sagitario, fueron desgarradas de su galaxia pariente hace más de 2.5 Gyr atrás; sin embargo, ellos sustentan que estos filamentos no tienen una edad mayor a 5 Gyr. En este contexto, [4], [76] y [44] han concluído que debe existir un parámetro en el espacio que ayude para que Sagitario haya sobrevivido hasta el tiempo presente. La conclusión más plausible es que este satélite está inmerso en una cantidad significativa de materia oscura. Los estudios relacionados con ésta hipótesis se

explicarán en la próxima sección.

### 3.1.1. Fricción dinámica

Si una galaxia de masa  $M$  se mueve a través de una población de estrellas de masa individual  $m$ , sentirá una *fuerza de arrastre* dada por la fricción dinámica. Este fenómeno es descrito mediante la ecuación de Chandrasekhar:

$$\frac{dv_M}{dt} = -16\pi^2 \ln \Lambda G^2 m(m+M) \int_0^{v_m} \frac{f(v_m)}{v_m} d^3 v_m v_m. \quad (3.1)$$

Donde  $\ln \Lambda$  es el logaritmo de Coulomb que se define como [15]:

$$\Lambda = \frac{b_{max} v_0}{G(M+m)}; \quad (3.2)$$

en donde  $b_{max}$  se define como el parámetro de impacto.

Dadas las observaciones hechas por Newberg [41] y la creencia que Sagitario tiene un halo de materia oscura, algunos autores sugieren que el mecanismo natural para perder energía orbital es la fricción dinámica [33],[72]; aunque esta fuerza sólo puede ser apreciable si la masa del progenitor de Sagitario es mayor a  $10^9 M_\odot$  [71],[67],[33]. El trabajo más importante que describe este fenómeno, es el hecho por Zhao [33], en donde él indica que cuando un satélite migra hacia dentro de su galaxia huésped, la densidad del halo galáctico incrementa, con lo cual, la fricción dinámica actúa de dos maneras puestas:

1. La gravedad del satélite crea una estela de sobredensidades en la galaxia huésped y éstas a su vez lo arrastran con una fuerza proporcional a su masa al cuadrado.
2. El otro proceso es el desgarramiento del satélite, donde el objeto despoja masa con cada paso por el pericentro y los remanentes son esparcidos a lo largo de la órbita del satélite.

Con el fin de determinar la masa máxima del progenitor de Sagitario tal que éste no sienta fricción dinámica apreciable, usamos la ecuación que aparece en Binney & Tremaine [15] la cual puede ser deducida a partir de la ecuación de Chandrasekhar :

$$t_{fric} = \left( \frac{10Gyr}{\ln \Lambda} \right) \left( \frac{r}{60kpc} \right)^2 \left( \frac{\nu}{220km/s} \right) \left( \frac{2 \times 10^{10} M_\odot}{M} \right) \quad (3.3)$$

En donde tomamos el logaritmo de Coulomb,  $\ln \Lambda=3$ ; la velocidad del halo de materia oscura de la Vía Láctea,  $\nu=140$  km/s; la distancia de partida del satélite,  $r= 40-60$  kpc y  $M$  como su masa inicial  $M = 7 \times 10^8 - 3 \times 10^9 M_\odot$ . Con estos valores, al determinar el tiempo de caída o  $t_{fric}$  (ver tabla 3.2), lo que encontramos es que para una masa mayor a  $1.5 \times 10^9 M_\odot$ , el tiempo de caída es mucho menor a 10 Gyr (este tiempo es el que tomamos en nuestras simulaciones), por lo cual, estos valores los rechazamos. Por lo tanto, el valor de masa máxima que tomaremos en nuestras simulaciones, será de  $1.5 \times 10^9 M_\odot$ .

$M_{\text{sat}}(M_{\odot})$	$t_{\text{fric}} \text{ (Gyr) en 40 kpc}$
$7 \times 10^8$	26
$8 \times 10^8$	23
$9 \times 10^8$	20
$1 \times 10^9$	18
$1.5 \times 10^9$	12.5
$2 \times 10^9$	9.4
$3 \times 10^9$	6.2

Tabla 3.2: Tiempo de caída para algunas masas del progenitor de Sagitario. Para una distancia de 60 kpc, el tiempo es mayor.

### 3.2. Estudios generales realizados con contenido de materia oscura

Aunque la materia oscura es un ente que aún no se ha podido observar, algunos estudios sugieren que la mayoría de ésta no consiste en objetos compactos, pero sí sería una nueva partícula fundamental [77]; sin embargo, si esto fuera así, las interacciones entre partículas de materia oscura no serían de tipo gravitacional [9]; de hecho, algunos autores sugieren que estas interacciones pueden ser modeladas empíricamente por un acoplamiento de Yukawa entre partículas de materia oscura fermiónica  $\psi$  y un campo escalar  $\phi$  [77]. Este tipo de interacción se podría manifestar como una violación al principio de equivalencia débil el cual establece que en la misma posición todos los objetos experimentan la misma aceleración [9].

Debido a todos los enigmas que presenta la materia oscura, actualmente hay un gran número de experimentos en operación o en construcción (tal es el caso de el SIM life [78]) diseñados para buscar WIMPs [79]. Típicamente estos laboratorios se encuentran en tierra; sin embargo, sería más factible encontrar indicios experimentales afuera, de hecho, las galaxias enanas son uno de los blancos más prometedores para la búsqueda de una señal de aniquilación de WIMPs [80]. La sonda INTEGRAL encontró emisión de radiación de 511 keV en un esferoide galáctico. Algunos autores asumen que podría ser el producto de aniquilación de partículas de materia oscura livianas [81]. El proceso que ocurre es el siguiente: tales partículas podrían aniquilarse a través del esferoide galáctico en positrones y electrones, los cuales, después de perder energía, se aniquilan en rayos  $\gamma$  de 511 keV. Para verificar esta teoría, Cordiel et al. [81] sugiere usar a Sagitario puesto que se piensa contiene grandes cantidades de materia oscura, con lo cual, se podrían presentar grandes ratas de aniquilación de WIMPs. Sin embargo, ellos no detectaron ninguna emisión de 511 keV proveniente de la galaxia enana. Farnier et al. [80] usó el HESS para encontrar evidencia de aniquilación de WIMPs; ellos tampoco encontraron señal alguna de rayos  $\gamma$  en el campo de Sagitario.

A pesar de la no evidencia directa de materia oscura en las galaxias enanas, sí existen estudios que indican indirectamente su presencia. Datos cinemáticos confirman que la dispersión de velocidades de estos objetos es muy alta en comparación a su valor esperado (1-3 km/s) [82]; además estas galaxias tienen perfiles de dispersión de velocidades constantes con la distancia (planos) [51]. Estas observaciones pueden ajustarse bien bajo la suposición que las galaxias enanas son sistemas en equilibrio virial<sup>3</sup> embebidas en un halo de

<sup>3</sup>Aunque esta suposición no puede tomarse del todo como cierta, ver [83]

materia oscura [82], [51]. La dinámica de estos satélites confirma que:

1. Los halos se extienden a grandes radios.
2. Los halos más masivos rondan a las galaxias más brillantes.
3. Las galaxias de tipo temprano (esféricas) son rondadas por halos dos veces más masivos que sistemas de tipo tardío (galaxias espirales) de luminosidad similar.

Existen muchos estudios teóricos que describen las propiedades más importantes de los halos de materia oscura como son sus perfiles de densidad, su evolución dinámica de estructura e interacción con el potencial de una galaxia huésped. Algunos de ellos también analizan qué ocurre si hay expansión adiabática y feedback [84]; otros, estudian si los remanentes retienen información de sus progenitores cuando estos halos evolucionan en el tiempo [85] y qué ocurre cuando se encuentran dos galaxias que están inmersas en halos masivos [86].

Kravtsov [87] desarrolló una fórmula general que ajusta cualquier perfil de densidad de un halo de materia oscura; el perfil de NFW es un caso especial. Estudios muestran que la estructura de los halos está muy bien aproximada con este perfil [88]; de hecho, al ubicar uno de estas características en el potencial de una galaxia huésped, éste no se desgarrará tan fácilmente como sí ocurre con halos que obedezcan a otra distribución, como por ejemplo los de tipo Burkert [89]; Además, entre mayor sea su concentración<sup>4</sup>, será más lenta su destrucción [8].

Ahora bien, una pregunta fundamental para la formación y evolución de estructura en el universo es: ¿Cuál es el efecto en la evolución de una galaxia enana si está embebida en un halo de materia oscura?

En todos los estudios teóricos realizados, cuando un sistema enana y materia oscura interactúa con el potencial de una galaxia más grande, el halo es el primero en desgarrarse. El porcentaje de la masa que pierde la materia oscura antes que comience a destruirse el satélite depende de la masa inicial de éste [90] y de la excentricidad de su órbita [90],[2]. Peñarrubia et al. [88] encontró que un halo debía perder aproximadamente 90 % de su masa antes que las estrellas del satélite se vieran afectadas por las fuerzas de marea; ahora bien, con una órbita excéntrica, la materia oscura de una galaxia enana es desgarrada cerca del 98 % al pasar por el pericentro [91]. Este mismo autor analizó el comportamiento de un satélite al tener una distancia pericéntrica de  $(1/100)R_{apo}$  y  $(1/10)R_{apo}$  (donde  $R_{apo} = 180$  kpc, ver figura 3.2). En el primer caso, el halo era destruido casi en su totalidad al pasar por segunda vez por el pericentro; mientras que con la otra distancia, el halo sobrevivía intacto hasta el cuarto paso por el pericentro. Resultados similares fueron obtenidos por Sales et al. [90] cuando varió la masa y excentricidad de un satélite. Al simular galaxias enanas con una alta inclinación inmersas en halos planos, se observa que tienen tiempos mayores de supervivencia que satélites dentro de halos esféricos que posean la misma órbita [92].

---

<sup>4</sup>La concentración es un parámetro adimensional que depende de la densidad del halo. En el capítulo 5 se explicará este parámetro más extendidamente.

Otros estudios han encontrado que al modelar un halo de materia oscura con el método de Herquist [93], la enana pierde una cantidad significativa de sus dos componentes: un 99% de su contenido de materia oscura y un 91% de su masa estelar [94]. Esto se debe a que con este modelo los halos no son sistemas estables. Esto se discutirá más ampliamente en el capítulo 5.

Debido a que las partes internas del halo permanecen casi intactas [85], algunos autores concluyen que las corrientes de marea tienden a hacer de las galaxias enanas sistemas más dominados por materia oscura [2].

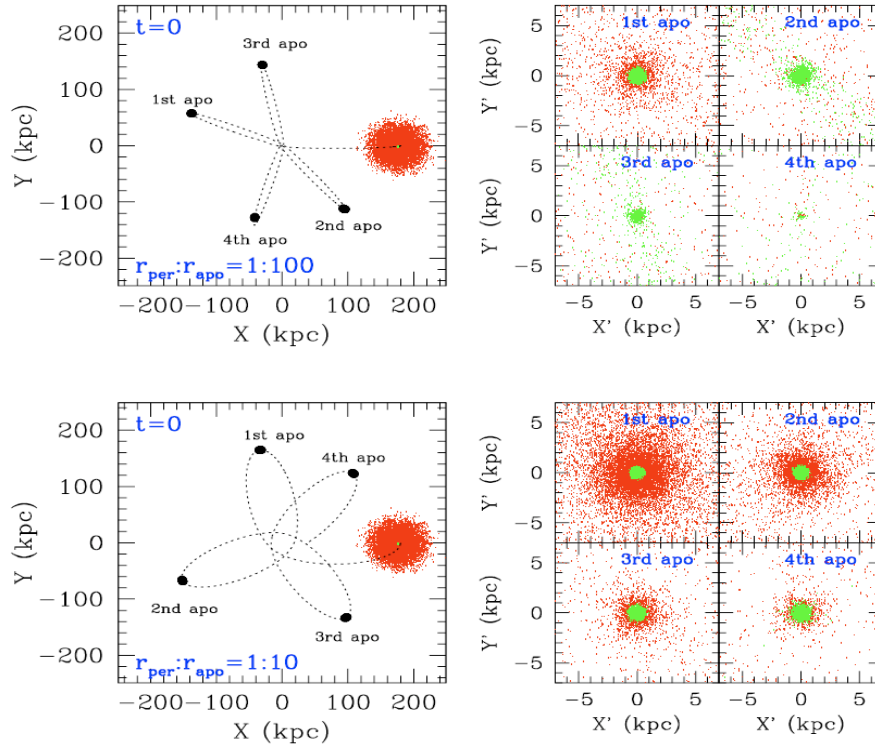


Figura 3.2: Resultados de la evolución de Sagitario inmerso en materia oscura obtenido por Peñarrubia et al. [2].

### 3.2.1. El problema de los satélites faltantes

Nada enfatiza la falta de conocimiento del origen de las enanas del grupo local más que el problema de los satélites faltantes o crisis de estructura [95]. Esta falla nació cuando al realizar simulaciones cosmológicas de N-cuerpos de materia oscura fría (CDM), éstas arrojaron como resultado que existen más subhalos que galaxias satélites en la Vía Láctea [96], [97]. Aunque no se sabe con exactitud si es un problema en la teoría o en la falta de tecnología para observar galaxias muy tenues [3], existen varios modelos de formación de enanas que tratan de arreglar este problema. Una de ellas es suponer que estos satélites son sistemas con masas superiores a  $10^7 M_{\odot}$  [98]; otro modelo supone que las galaxias enanas más luminosas habitan solo los subhalos más masivos [91] y otros suponen que la formación de estos sistemas fueron antes de la época

de reionización [99]. En la próxima sección se hablará detalladamente de este tema.

### 3.2.2. Fricción dinámica en halos

Aunque no existe mucha información sobre los efectos de la fricción dinámica en halos de materia oscura, algunos autores argumentan que éstos son suprimidos por la pérdida de masa [100]; de hecho, es más fuerte el calentamiento por marea debido a la interacción con otro halo (subestructura).

De los cálculos obtenidos en la ecuación 3.3, la masa máxima que podría tener un halo de materia oscura en nuestras simulaciones, sería de  $1.5 \times 10^9 M_{\odot}$ ; sin embargo, como nosotros deseamos simular un sistema satélite más halo, el anterior valor en la masa será la máxima cantidad que tendrá nuestro sistema.

### 3.2.3. Sagitario con materia oscura

Si bien es cierto que existen estudios que tratan de explicar el origen y evolución de galaxias enanas esferoidales sin presencia de materia oscura (ver [83]), las simulaciones ligadas a los datos cinemáticos indican que Sagitario está inmerso en ella [43]. Sin embargo, no se conoce ni el contenido exacto que alberga al cuerpo principal del satélite [52],[88] ni su extensión espacial [88] ni la forma exacta de su distribución [3]. Estas son preguntas aún abiertas, debido a que no se conoce cuál fue la masa inicial del progenitor de Sagitario y por ende, tampoco se sabe el porcentaje de la masa que ha perdido hasta hoy.<sup>5</sup> Actualmente, existen algunos estudios que indican que las galaxias enanas tienen halos muy masivos ( $10^9$ -  $10^{10} M_{\odot}$ ) [101], [102]; aunque esto no puede tomarse como una conclusión totalmente cierta debido a la falta de conocimiento en las condiciones iniciales de los progenitores. Uno de los objetivos de este trabajo será encontrar el posible contenido de materia oscura de Sagitario a partir de la suposición de diferentes masas iniciales de su progenitor sin tener en cuenta efectos de fricción dinámica.

Los estudios teóricos indican que sólo con materia oscura Sagitario ha podido sobrevivir hasta hoy [42]. Jiang & Binney [72] simularon al progenitor de Sagitario como una distribución esférica de  $r=1$  kpc y diferentes masas iniciales. El progenitor más masivo tenía una masa de  $1 \times 10^{11} M_{\odot}$  y comenzaba a una distancia de 250 kpc del centro galáctico. El menos masivo, era de masa de  $5 \times 10^9 M_{\odot}$  y estaba ubicado a 60 kpc del centro de la Vía Láctea. En todas las simulaciones, ellos encontraron que la materia bariónica de Sagitario ha sido despojada sólo recientemente cuando la mayoría de la materia oscura ha sido desgarrada. Estos estudios concuerdan con los realizados por Klimentowski et al [57]. Para dos sistemas con diferente radio e igual masa, el satélite de mayor radio es desgarrado más rápidamente y sufre menos fricción.

Por otra parte, Helmi & White [103] estudiaron dos modelos de Sagitario que orbita durante un tiempo de Hubble dentro del potencial galáctico. El satélite es representado por una distribución de King y cuya masa inicial varía entre  $7 \times 10^7 M_{\odot}$  y  $7 \times 10^8 M_{\odot}$ . En el primer modelo Sagitario es un sistema compuesto

<sup>5</sup>Esta falta de conocimiento, hace que también sea una pregunta sin resolver el tiempo que tardará Sagitario en ser totalmente destruido [88].

sólo por materia bariónica mientras que en el segundo, el satélite está embebido en materia oscura. Al evolucionar los dos tipos de sistemas, ambos presentaron la misma distribución de masa estelar en la región interna, por lo tanto, el halo no afecta la estructura final del remanente.

### 3.3. Posibles escenarios de formación de Sagitario

Al estudiar la formación y evolución de Sagitario, nacen dos preguntas importantes: cuál fue el progenitor de este satélite y en qué época comenzó la formación estelar de esta galaxia enana. Con respecto a la primera, algunos estudios sustentan que éste satélite pudo haberse formado de gas que colapsó [61]; otros creen que una galaxia enana irregular (dIrr) pudo ser su progenitor [36] y algunos argumentan que debido a su alta metalicidad en comparación a los grandes cúmulos y el hecho que éste objeto es el único caso de una galaxia con un núcleo definido como el de una enana, el progenitor debió haber sido una galaxia enana elíptica brillante [47], [46] o una galaxia disco que ha sido transformada a enana por la interacción con la Vía Láctea [46]. Este mismo escenario de formación es compartido por Klimontowski et al. [3] y Mayer et al. [58], [104], [36]. Estos autores modelaron un disco estelar embebido en un halo de materia oscura los cuales están en una órbita excéntrica dentro de un potencial estático el cual representa a nuestra galaxia. Ellos suponen que el 80% de la masa del disco es gas que está ionizado a una temperatura mayor a los  $10^4$  K, debido a esto, no tienen en cuenta formación estelar. El resultado obtenido en las simulaciones se puede observar en la figura 3.3. Después del primer paso por el pericentro, el halo pierde 60% de su masa inicial mientras que la estructura del disco se preserva; sin embargo, la perturbación alimenta una inestabilidad en forma de barra; esta se vuelve más delgada con el tiempo hasta que es disuelta después del último paso por el pericentro (10 Gyr); después de este periodo de tiempo, se forma una galaxia esferoidal. Este mismo comportamiento surge al suponer que el disco progenitor esté orientado a  $0^0$ ,  $45^0$  o  $90^0$  con respecto al plano de nuestra galaxia; sin embargo, después de 5 Gyr es mayor la pérdida de masa al tener la primera orientación. Ahora, al modelar el halo con valores de concentración<sup>6</sup> de 4, 7 y 12, se obtiene que después de pocas órbitas, el disco estelar se transforma en un sistema triaxial soportado por velocidad de dispersión, es decir, una Dsph [104]. Con respecto al final de vida de Sagitario, existe la hipótesis que el residuo del núcleo que quede después de haber sido desgarrado su halo y su componente estelar, puede constituir una UCD [8].

¿Qué procesos se llevaron a cabo para que sucediera la formación estelar en Sagitario? La respuesta fue dada por Mashchenko et al. [102] quien propone que las estrellas se forman de gas isoterma autogravitante en equilibrio hidrostático dentro de un halo extendido de materia oscura. Este modelo también supone que una fracción del gas enriquecido fue expulsado a un radio muy grande durante el primer starburst; después, fue reacretado permitiendo un segundo episodio de formación estelar. Ahora bien, este modelo, permite hacernos la segunda pregunta fundamental en la formación y evolución de Sagitario: ¿En qué época ocurrió esto?

Existen dos escenarios para la formación de Sagitario. El primero de ellos es el **escenario de reionización**, propuesto por Bullock et al. [105], Bromm & Clarke [99] y Tassis et al. [106]. En este modelo, las

<sup>6</sup>La concentración es un parámetro adimensional que define la forma del halo.

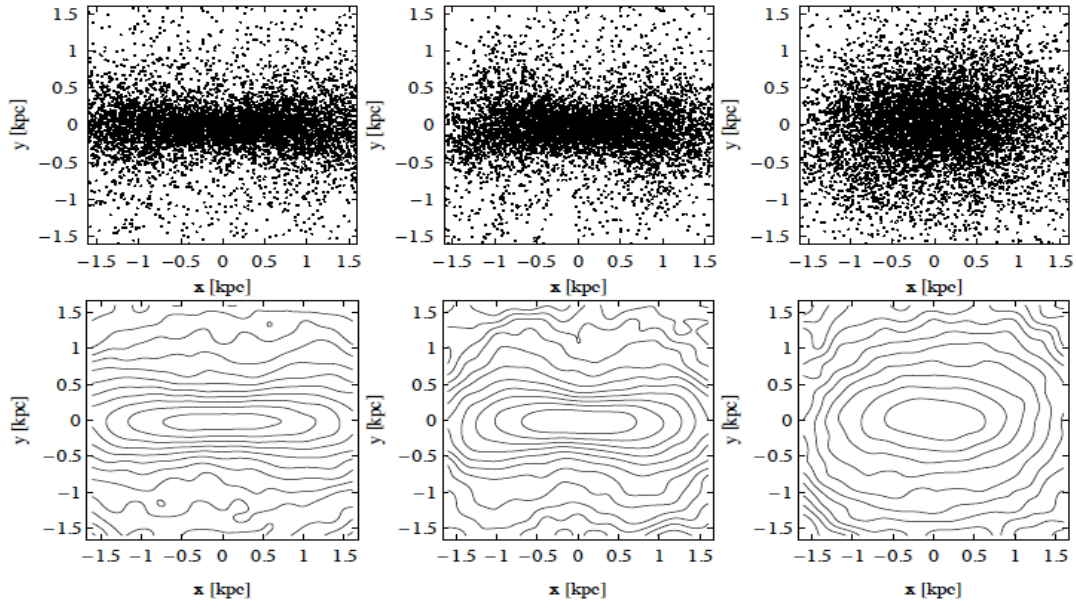


Figura 3.3: Imágenes de la formación de Sagitario obtenidas por Klimentowski et al. [3]. *Arriba*: Distribución de partículas a 6, 8 y 10 Gyr. *Abajo*: contornos de distribución de isodensidad.

enanas se formaron durante la era de preionización<sup>7</sup>; sin embargo, el fondo de radiación UV originado por la reionización, suprimió la formación estelar en estos sistemas previamente formados. Este escenario, explica el hecho que al menos todas las galaxias enanas locales exhiben población estelar vieja y un decremento en su tasa de formación estelar alrededor de los 10 Gyr atrás. Los satélites formados en esta época, se llaman *fósiles verdaderos* [66].

El otro modelo fue propuesto por Kravtsov et al. [107] y Tassis et al. [106] y se llama **escenario de marea**. En él se propone que muchas galaxias enanas fueron más masivas (en un factor mayor a 100) durante los episodios de formación de la Vía Láctea y Andrómeda, con lo cual, no fueron afectadas por el fondo de ionización. Según este modelo, la formación estelar de estos sistemas comenzó en  $z \sim 3$  (entre 10 y 11 Gyr atrás), es decir, después de la época de reionización; sin embargo, mucho de su contenido de materia oscura ha sido desgarrado durante su evolución dentro de nuestra galaxia. Las enanas que se formaron durante esta época, se llaman *sobrevivientes* [66].

Además de existir una clara diferencia en la época de formación estelar entre estos dos modelos, también existe una brecha en la cantidad de materia oscura de los progenitores de las enanas. En el escenario de reionización, los satélites pudieron haberse formado en halos con masas menores a  $10^8 M_{\odot}$ ; mientras que en el escenario de marea, las galaxias enanas tuvieron que haberse formado en halos mucho más masivos. En todo caso, el punto común entre estas dos teorías radica en el hecho que debió haber existido una masa umbral en los halos para la cual la materia bariónica haya podido quedar atrapada en su barrera de potencial. La explicación a este hecho, es la piedra angular para entender el porqué se presenta el

<sup>7</sup>es decir, aproximadamente, hace 12.5-13 Gyr atrás en  $z > 6$

problema del satélite faltante.

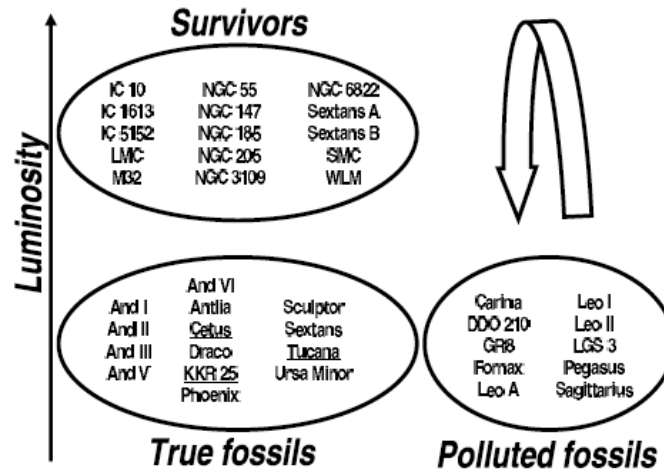


Figura 3.4: Separación tentativa de todas las enanas del grupo local hecha por Ricotti & Gnedin [66]. 14 Dsph son fósiles verdaderos de los cuales 5 son de M31, 6 de la Vía Láctea y 3 (los nombres subrayados) están entre estas dos galaxias.

Muchos procesos físicos pudieron suprimir la acreción de gas y la formación estelar en halos de materia oscura enanos ( $M \leq 5 \times 10^8 M_{\odot}$ ); uno de ellos fue la radiación cosmológica UV que reionizó el universo a  $z > 6$  calentando el gas intergaláctico a una temperatura mayor a los  $10^4$  K, con lo cual, suprimió la formación estelar en sistemas ya formados y no permitió que el gas sintiera la presencia del potencial débil del halo enano [107], [99], [54]. Otro proceso fue las explosiones de supernova, las cuales disiparon el gas que iba a formar estructuras en los halos cuya masa era menor a la umbral [54]. Con estas teorías, se puede concluir que efectivamente, pueden existir más halos de materia oscura que galaxias enanas, dando respuesta al problema del satélite faltante. Finalmente, otro escenario es el propuesto por Ricotti & Gnedin [99] en donde propone que algunas enanas se formaron entre los dos escenarios anteriores, es decir, que éstos sistemas se formaron antes de la reionización pero su formación estelar fue antes y después de ésta época. A esta clase de galaxias, las llama *fósiles contaminados*. Según estos autores, Sagitario formaría parte de esta clasificación como se puede observar en la figura 3.4.

# CAPÍTULO 4

---

---

## GADGET

**GA**laxies with **D**ark matter and **G**as int**E**ract o **G**adget es un código de libre acceso con el cual se pueden desarrollar simulaciones cosmológicas e hidrodinámicas de N-cuerpos. La fuerza gravitacional de corto alcance es hallada mediante una expansión multipolar jerárquica o lo que se conoce como algoritmo de árbol mientras que las fuerzas de largo alcance son determinadas con técnicas de Fourier a través del algoritmo TreePM (particle-mesh). Para modelar fluidos, Gadget utiliza hidrodinámica de partículas suavizadas (SPH).

Gadget es un programa versátil debido a que con él se pueden realizar un gran número de simulaciones que pueden ser newtonianas o cosmológicas en las cuales se pueden usar coordenadas físicas o comóviles y en donde opcionalmente, las condiciones de frontera podrían ser periódicas. En este trabajo se realizan simulaciones newtonianas con coordenadas físicas. Gracias a esta versatilidad, este código ha sido usado para realizar las primeras simulaciones cosmológicas de N-cuerpos con más de  $10^{10}$  partículas de materia oscura; además, un gran número de procesos físicos pueden ser estudiados gracias a que pueden implementarse en el código fuente, por ejemplo, el enfriamiento radiativo y calentamiento por fotoionización, formación estelar y procesos de feedback; se ha estudiado también el problema de la conducción térmica en un gas caliente ionizado. Una aproximación de magnetohidrodinámica puede ser agregada a Gadget 2 con el fin de investigar deflexiones de rayos cósmicos de alta energía en el universo local [108]. Springel, Di Mateo & Hernquist [109] introdujeron un modelo para el crecimiento de agujeros negros supermasivos en los centros de las galaxias y estudiaron cómo la energía del feedback proveniente de la acreción del gas hacia el agujero negro regula la actividad y la formación estelar en la actividad de los cuásares.

Por otra parte, este código tiene múltiples ventajas debido a que no sólo es eficiente en términos de consumo de memoria; también fue escrito para correr en paralelo utilizando cualquier número de núcleos; esto lo hace gracias a la interface de comunicación MPI; debido a esto, Gadget puede ser utilizado en cualquier tipo de máquina, desde super clusters hasta equipos portátiles.

## 4.1. Física usada en Gadget

La dinámica de un sistema de partículas auto-gravitantes se describe mediante el hamiltoniano [108]:

$$H = \sum_i \frac{p_i^2}{2m_i a(t)} + \frac{1}{2} \sum_{ij} \frac{m_i m_j \phi(x_i - x_j)}{a(t)} \quad (4.1)$$

Donde  $\mathbf{p}_1, \dots, \mathbf{p}_N, \mathbf{x}_1, \dots, \mathbf{x}_N$  son vectores descritos en coordenadas comóviles y el correspondiente momento canónico está dado por:  $\mathbf{p}_i = a^2 m_i \dot{\mathbf{x}}_i$ . La dependencia temporal del hamiltoniano está en la evolución del factor de escala, el cual se describe mediante el modelo de Friedman-Lemaitre.

Para analizar la dinámica de un sistema en un espacio newtoniano,  $a(t) = 1$ , con lo cual, no sólo el hamiltoniano queda independiente del tiempo, el potencial gravitacional queda simplificado de la forma usual:  $G/|\mathbf{x}|$ . La fuerza asociada a este potencial es:

$$\mathbf{F}_i = - \sum_{j \neq i} G \frac{m_i m_j (\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j)}{|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j|^3}. \quad (4.2)$$

De esta ecuación, se puede observar que independientemente del tipo de condiciones iniciales, una completa solución de la fuerza requiere una doble suma, por lo tanto el costo computacional es muy alto. Además, la fuerza gravitacional presenta una divergencia cuando la distancia entre dos partículas es 0, lo cual produciría aceleraciones muy altas. Este problema puede ser resuelto introduciendo una cantidad llamada *longitud de suavizado* o **smoothing length** ( $\epsilon$ ), la cual modifica la interacción gravitacional a pequeñas escalas, con lo cual la fuerza sería:

$$\mathbf{F}_i = - \sum_{j \neq i} G \frac{m_i m_j (\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j)}{((|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j|^2) + \epsilon^2)^{3/2}}. \quad (4.3)$$

Físicamente, se podría interpretar esta longitud de suavizado como la distancia entre los centros de dos partículas que estén “pegadas”.

Existen diversos algoritmos que resuelven la fuerza gravitacional lo más aproximado posible y con la mayor eficiencia; a continuación se explicarán los métodos que utiliza Gadget.

### 4.1.1. Algoritmo de árbol

El algoritmo de árbol divide el espacio recursivamente en celdas jerárquicas, en donde cada una de ellas contiene una o más partículas. Existen tres características importantes en este algoritmo: el tipo de agrupamiento empleado, el orden escogido para la expansión multipolar y el criterio usado.

Con respecto al tipo de agrupamiento, Gadget utiliza nodos base en forma de cubos (oct-tree) los cuales son divididos repetidamente en ocho nodos hijos de longitud igual a la mitad de la inicial. Como se

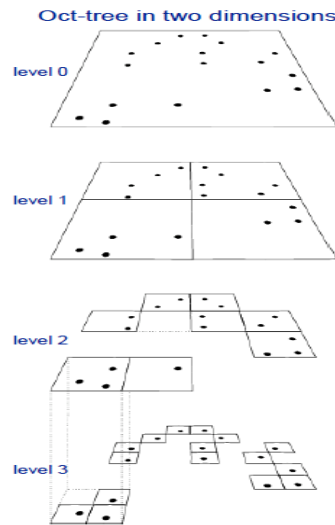


Figura 4.1: Agrupamiento empleado por Gadget en el algoritmo de árbol.  
 Imagen bajada de [www.astro.iag.usp.br/xiii/aa/talks/springel-1.pdf](http://www.astro.iag.usp.br/xiii/aa/talks/springel-1.pdf)

puede observar en la figura 4.1, esta división cesa hasta que cada nodo contenga una sola partícula. Si el nodo base de tamaño  $s$  que está a una distancia  $d$  del punto donde se desea determinar la fuerza gravitacional satisface que  $s/d < \theta$  donde  $\theta$  es el criterio usado, las partículas en esa celda son tratadas como una pseudopartícula localizada en el centro de masa de la grilla; por lo tanto se utilizará la expansión multipolar para calcular la fuerza gravitacional. Si el criterio anteriormente mencionado no se satisface, el nodo será abierto, es decir, se analizarán los nodos hijos. El criterio que utiliza Gadget está dado por:

$$\frac{GM}{r^2} \left( \frac{l}{r} \right)^2 \leq \alpha |a|,$$

en donde  $M$  es la masa del nodo,  $l$  su extensión y  $r$  su distancia.  $|a|$  es la aceleración total obtenida en el paso de tiempo anterior y  $\alpha$  es un parámetro de tolerancia.

Por otra parte, la expansión que utiliza Gadget es la monopolar; aunque sólo este término no es muy aproximado para calcular la fuerza, los nodos cúbicos con momentos monopoles pueden ser construídos con un muy bajo costo computacional. finalmente, es importante anotar que el resultado final de la fuerza gravitacional usando el algoritmo de árbol, sólo representa una aproximación de su valor verdadero. Sin embargo, este error puede ser controlado convenientemente modificando el criterio para los nodos.

#### 4.1.2. Método TreePM

Este algoritmo tiene cuatro pasos: determinación de la densidad en la grilla; computación del potencial; determinación del campo de fuerza y asignación de la fuerza a cada partícula.

Para determinar la densidad, se da a las partículas una “forma”  $S(x)$ . Entonces, para cada grilla, se asigna la fracción de masa que cae dentro de esa celda. La forma  $S(x)$  más simple asigna cada partícula a un

punto de la grilla, sin ninguna contribución de masa en ningún otro punto de la celda. En este ejemplo,  $S(x) = \delta(x)$ . Sorprendentemente, este método genera grandes errores, con lo cual el más común es el llamado *nube en la celda* (CIC), el cual utiliza 8 puntos de grilla para definir una celda cúbica la cual contenga una partícula. Esta forma trata a cada partícula como una nube cúbica de densidad uniforme. Una vez se decida la forma  $S(x)$ , se hace una convolución de esta función y se obtiene la densidad,  $\rho(\vec{k})$ . En el espacio de Fourier, el potencial gravitacional está dado por:

$$\hat{\phi}(k) = \hat{g}(k) \cdot \hat{\rho}(k), \quad (4.4)$$

donde  $\hat{g}(k)$  es la función de Green y es igual a  $-4\pi G/k^2$ . Así que una vez determinada la densidad en el espacio de Fourier, se multiplica por la función de Green para hallar el potencial. Para obtener el potencial físico  $\phi(x)$ , es necesario hacer una transformada de Fourier (FFT). Con este potencial, se determina el campo de fuerza y, finalmente, la fuerza de cada partícula.

La ventaja de este método es que es rápido y simple; sin embargo, la resolución espacial de la fuerza está limitada al tamaño de la grilla, lo cual hace que este algoritmo no sirva para algunas simulaciones cosmológicas, por ejemplo, no sería posible resolver la estructura interna de los halos a gran escala.

### 4.1.3. Hidrodinámica

Gadget utiliza SPH ó hidrodinámica de partículas lisas. Este método utiliza un conjunto señalado de partículas para describir el estado de un fluido. Las partículas con coordenadas  $\mathbf{r}_i$ , velocidades  $\mathbf{v}_i$  y masas  $\mathbf{m}_i$  son modeladas como elementos de un fluido que representan a un gas en un modo lagrangiano [108]. El estado termodinámico de cada elemento del fluido puede ser definido en términos de su energía térmica por unidad de masa o en términos de la entropía por unidad de masa. Para mirar los detalles de la técnica de simulación, referirse a [108]. Así mismo, Gadget viene con una guía de usuario en donde se explica con mucho detalle cada uno de los comandos utilizados en las simulaciones.

## 4.2. Modificaciones hechas a Gadget para nuestro estudio

En las secciones anteriores se mencionó que Gadget realiza simulaciones de N-cuerpos de estructuras autogravitantes, por lo cual en nuestro estudio es útil solamente para relajar los sistemas que investigamos; por lo tanto, se necesita modificar este programa introduciendo el potencial gravitacional de la Vía Láctea al código fuente. Esto se realizó creando un archivo extra en donde se define el potencial que sentiría una partícula debido al esferoide, disco y halo de materia oscura de nuestra galaxia. Este potencial se llama rígido, debido a que es invariante en el tiempo. Las ecuaciones y las ventajas de esta aproximación se mostrarán en el próximo capítulo. Una vez generado este archivo, se introduce en el makefile de Gadget. A este programa le llamaremos de ahora en adelante Gadget 2 modificado y es el programa que se utiliza para simular la evolución de la galaxia enana Sagitario.

# CAPÍTULO 5

## MODELO Y CONDICIONES INICIALES

Se estudia la evolución del progenitor de Sagitario al interactuar con el potencial que genera nuestra galaxia. Este sistema inicialmente está compuesto por materia bariónica; posteriormente, se analiza su comportamiento al estar inmerso en diferentes contenidos de materia oscura. La Vía Láctea, se modeló utilizando el método propuesto por Johnston et al. [4] en el cual ésta es representada como un potencial rígido de tres componentes en donde el disco es descrito por un potencial de Miyamoto-Nagai [110]; el esferoide por un potencial de Hernquist [111] y el halo por un potencial logarítmico [5]:

$$\phi_d = -\frac{GM_d}{\sqrt{R^2 + (a + \sqrt{z^2 + b^2})^2}} \quad (5.1)$$

$$\phi_e = -\frac{GM_e}{r + c} \quad (5.2)$$

$$\phi_h = \nu_h^2 \ln(r^2 + d^2) \quad (5.3)$$

Los valores de la masa de cada una de las componentes y los parámetros de la Vía Láctea usados se presentan en la tabla 5.1. Estos parámetros fueron escogidos debido a que generan una curva de rotación plana para nuestra galaxia entre 1 y 30 kpc y una altura del disco de 0.2 kpc [4], [49].

Parámetros usados	Valores
Masa disco ( $M_d$ )	$1 \times 10^{11} M_\odot$
Masa esferoide ( $M_e$ )	$3.4 \times 10^{10} M_\odot$
Velocidad circular $\nu_h$	140 km/s
a	6.5 kpc
b	0.26 kpc
c	0.7 kpc
d	12 kpc
$\Theta$	0.9876 rad
Periodo simulación T	8 Gyr
$\Delta T$	$1 \times 10^{-5}$ Gyr
$D_{CG}$	16 kpc
$V_{rad}$	170 km/s
$V_{tan}$	-325km/s - 325km/s

Tabla 5.1: Datos de la Vía Láctea tomados de [4] y [5] y detalles de la simulación. a,b,c y d son longitudes de escala de cada componente de nuestra galaxia. La posición y velocidad mostradas aquí son medidas con respecto al centro de nuestra galaxia. El valor de  $\theta$  es tomando en cuenta  $D_{Sg-S} = 21.47$  kpc,  $D_{S-CG} = 8$  kpc y  $D_{Sg-CG} = 16$  kpc.

Se modeló nuestra galaxia como un potencial rígido en vez de un conjunto de partículas auto gravitantes debido a que con esta aproximación no se tienen en cuenta los efectos de las mareas en la estructura interna y en la cinemática de la enana; además elimina los efectos de la fricción dinámica, la evolución del potencial de la galaxia huésped o las interacciones entre satélites [3] y permite hacer simulaciones más rápidamente y con menor uso de memoria que si se tuviera una colección de partículas.

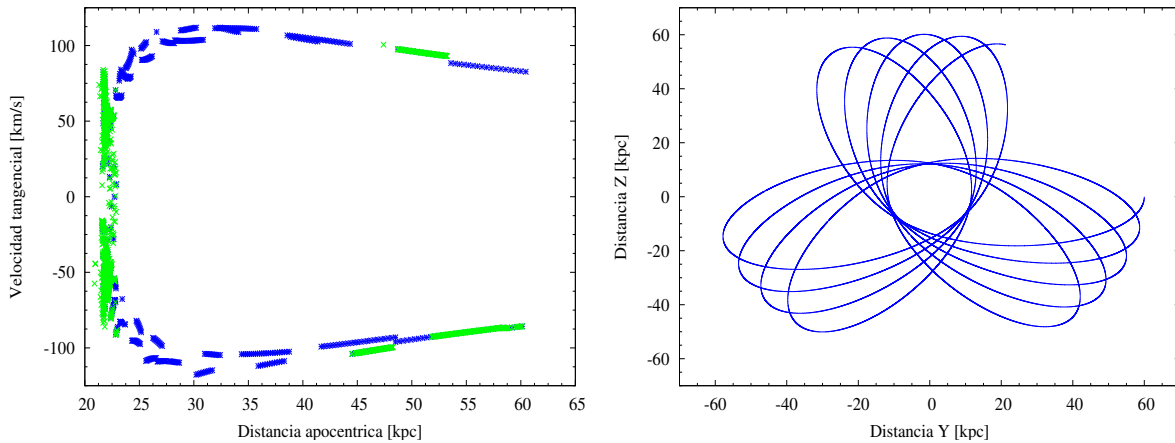


Figura 5.1: *Izquierda*: Condiciones iniciales de Sagitario. *Derecha*: Órbita de Sagitario en coordenadas galactocéntricas.

Con el fin de determinar las condiciones iniciales de las posibles órbitas del progenitor de Sagitario, se evolucionó una partícula de prueba durante 8 Gyr estando sometida a la fuerza asociada al potencial rígido de nuestra galaxia. La posición, velocidad radial y tangencial iniciales de esta partícula de prueba se muestran en la tabla 5.1 y corresponden a los valores actuales medidos de Sagitario. Nótese que la velocidad tangencial varía de  $-325$  km/s hasta  $325$  km/s; esto se debe a que sólo la componente radial de la velocidad se conoce, por lo tanto, la velocidad tangencial es un parámetro de libre ajuste.

Para cada valor de velocidad tangencial, se obtiene una órbita (ver figura 5.1 *derecha*) a la cual se le determina la máxima distancia al centro galáctico (apocentro), la velocidad tangencial en ese punto y la mínima distancia al centro de la Vía Láctea (pericentro). Cada uno de estos resultados corresponde a un conjunto de condiciones iniciales que pudo haber tenido el progenitor de Sagitario. Estos valores se presentan en la figura 5.1 *izquierda* y están representados por el color azul. Para determinar cuáles de estos valores reproducen los actualmente medidos, se ubica cada apocentro sobre el eje y, éste ahora representa la posición inicial del satélite. La velocidad tangencial en el apocentro ahora es la velocidad inicial de la enana y su dirección está en el eje z. Nótese que se hizo una rotación de los ejes; esto se hace con el fin que el progenitor de Sagitario comience a evolucionar siempre desde una sola dirección.

Nuevamente se evoluciona una partícula de prueba durante 8 Gyr bajo la interacción con el potencial rígido de nuestra galaxia y se determinan las condiciones iniciales que reproducen la posición y velocidad radial actual del satélite. Estos valores iniciales se muestran con color verde en la figura 5.1 *izquierda*; ahora bien, de los datos observacionales de las corrientes de marea, finalmente se escoge un conjunto de

condiciones iniciales para el progenitor de Sagitario, estos datos se presentan en la tabla 5.2. Al observar estos resultados, se puede apreciar que éstos concuerdan con los estudios hechos por [67] y [49], debido a que el apocentro de Sagitario está entre 44 y 60 kpc y el pericentro entre 12 y 13 kpc. Se encontró que la velocidad tangencial actual de esta galaxia satélite es de aproximadamente  $298 \pm 27$  km/s. La excentricidad de la órbita se halla teniendo en cuenta la ecuación mostrada en [112].

Apocentro(kpc)	Pericentro (kpc)	Velocidad (km/s)	$\epsilon_0$
44	12	-104	0.56
45	12	-102	0.56
46	12	-101	0.56
47	12	-100	0.57
48	12	97	0.59
49	12	96	0.59
50	12	95	0.60
51	12	94	0.60
52	12	93	0.61
53	13	-90	0.60
54	13	-90	0.60
60	13	-86	0.63

Tabla 5.2: Condiciones iniciales del progenitor de Sagitario usadas en las simulaciones de N-cuerpos en Gadget 2 modificado. La velocidad es la tangencial en el apocentro y  $\epsilon_0$  es la excentricidad de la órbita.

Por otra parte, el progenitor de Sagitario es representado como una distribución esférica de  $10^6$  partículas que obedecen a un potencial de Plummer<sup>1</sup> [115] de la forma:

$$\phi = -\frac{GM_{sat}}{\sqrt{r^2 + r_0^2}} \quad (5.4)$$

En donde  $M_{sat}$  es la masa del satélite y  $r_0$  es el radio de Plummer. En la tabla 5.3 se presentan los parámetros utilizados para esta galaxia.

Parámetros	Cantidad
Masa	$5 \times 10^8 - 1 \times 10^9 M_\odot$
Radio ( $r_0$ )	0.5-0.6 kpc

Tabla 5.3: Parámetros usados para el progenitor de Sagitario.

Se estudiarán además los casos límite de un progenitor cuya masa sea de  $5 \times 10^8$  y  $1 \times 10^9 M_\odot$  con radios de plummer de 0.3 y 1.2 kpc respectivamente. Los valores de la tabla 5.3 fueron escogidos así debido a que la masa actual de Sagitario está entre  $(2.8 - 3.7) \times 10^8 M_\odot$  [71]; además Helmi et al. [116] estimó que el radio inicial que debería tener el progenitor de Sagitario para que reprodujera las observaciones actuales estaba entre 0.5-0.6 kpc. Una vez construido el satélite, este sistema siempre se relaja bajo su propia gravedad durante 2 Gyr utilizando el programa Gadget 2 para posteriormente, ubicarlo en cada una de las distancias apocéntricas.

<sup>1</sup>Para la construcción de la esfera de Plummer se utilizó el algoritmo hecho por Aarseth [113], [114].

Con el fin de determinar las distancias apocéntricas para las cuales se hace detectable un cambio en la evolución de Sagitario, se observó el comportamiento durante 8 Gyr de un satélite de masa  $1 \times 10^7 M_{\odot}$  y radio de 0.6 kpc . Las simulaciones se presentan en la figura 5.2.

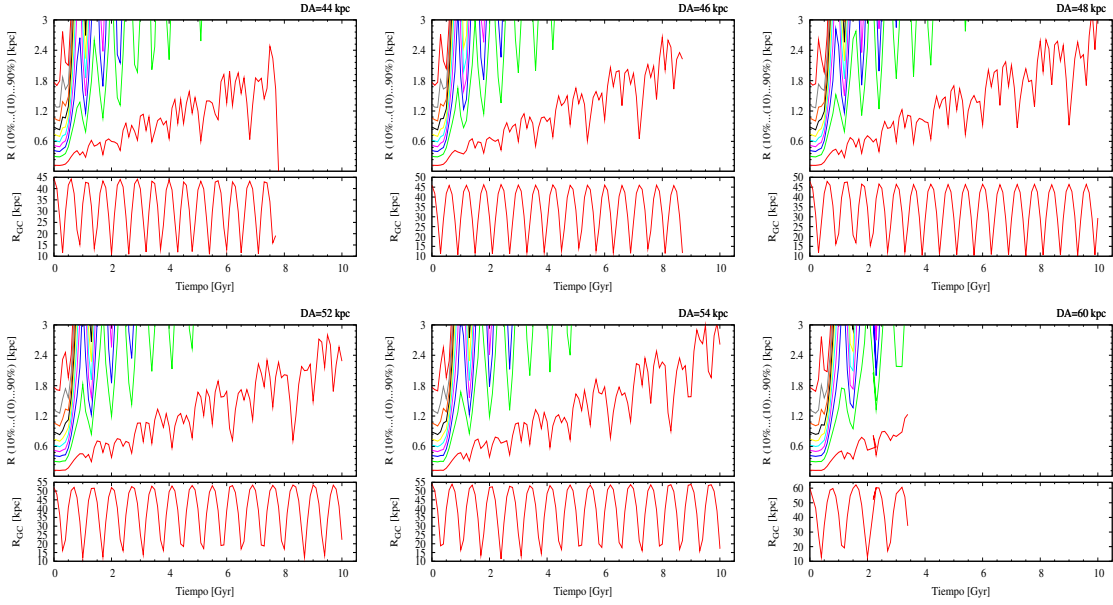


Figura 5.2: Simulación de una esfera de Plummer con diferentes distancias apocéntricas. Aquí se presentan sólo 6 de las 12 simulaciones realizadas.

Las líneas de la parte superior de las imágenes de la figura 5.2 de abajo hacia arriba representan respectivamente del 1 % hasta el 90 % de la masa inicial del satélite; mientras que la parte inferior, el movimiento del máximo de densidad. Cuando cada línea alcanza un valor mayor a 3 (radio máximo del satélite si su radio de Plummer es 0.6 kpc) se dice que el porcentaje que representa, se ha desgarrado.

Como se puede observar, aproximadamente un 10 % de la masa del satélite se desgarran aproximadamente a los 0.6 Gyr cuando éste está ubicado a una distancia apocéntrica de 44 y 46 kpc; a los 0.7 Gyr cuando está en 48, 50 y 52 kpc y a los 0.8 Gyr cuando está localizado a los 60 kpc del centro galáctico. Por lo tanto, para las simulaciones de Sagitario, supondremos que su progenitor parte desde 44 y 60 kpc del centro de nuestra galaxia.

## 5.1. Halo de materia oscura

Existen dos métodos para construir una distribución esférica de partículas de materia oscura que obedezcan a un perfil de Navarro Frenk & White (NFW) [117]. Uno de ellos es el propuesto por Hernquist [93] en el cual se utiliza la ecuación de Jeans para determinar la dispersión de velocidades en función del radio<sup>2</sup>. Una vez conocida esta cantidad, se selecciona la velocidad de cada partícula utilizando una función cuyo segundo momento sea igual a la dispersión de velocidades, es decir, una gaussiana. Aunque este método

<sup>2</sup>Soluciones de esta ecuación para diferentes valores de  $\beta$  (medida de la isotropía del medio) pueden ser encontrados en [118] y [119]

se puede implementar fácilmente [120], genera halos inestables, es decir, la velocidad de las partículas es mayor a medida que evoluciona en el tiempo, en otras palabras, los halos tienden a expandirse; por lo tanto, no es recomendable para hacer estudios sobre fuerzas de marea debido a que el halo se destruiría fácilmente y daría como resultado una tasa artificial alta de desgarramiento [89] y [120].

A diferencia del método propuesto por Hernquist [93], existe un modelo que construye halos de materia oscura estables usando funciones de distribución [120]. Para esta investigación utilizaremos este método el cual está ampliamente explicado por Mashchenko & Sills [121]. El procedimiento se explicará en detalle a continuación:

Kravtsov et al. [87] encontró una fórmula general de la forma

$$\rho = \frac{C\rho_0}{(r/r_s)^\gamma [1 + (r/r_s)^\alpha]^{(\beta-\gamma)/\alpha}}; \quad (5.5)$$

donde  $\gamma$  controla la inclinación del perfil en el interior,  $\beta$ , en el exterior y  $\alpha$  la agudeza de la transición.  $C$  es un parámetro de normalización. El perfil de NFW es un caso especial de esta expresión y corresponde al caso  $(\alpha, \beta, \gamma) = (1, 3, 1)$ ; con lo cual este perfil se expresa de la siguiente manera:

$$\rho = \frac{\rho_0}{(r/r_s)[1 + (r/r_s)]^2}. \quad (5.6)$$

con  $C=1$  [78] y  $\rho_0$  dado por [74]:

$$\rho_0 = \frac{M}{4\pi r_s^3} \left[ \ln(1+c) - \frac{c}{1+c} \right]^{-1}. \quad (5.7)$$

Aquí  $r_s$  y  $c = R_{vir}/r_s$  son el radio característico y la concentración<sup>3</sup> del halo respectivamente.  $R_{vir}$  es el radio de virialización que en este caso, también puede tomarse como el máximo radio que puede alcanzar un halo y  $M$  es la masa de éste. Ahora bien, es conveniente seleccionar las siguientes variables adimensionales [122]:  $R = r/r_s$ ;  $V = v/(4\pi G\rho_0 r_s^2)^{1/2}$  que representan la posición y velocidad adimensional de una partícula respectivamente y  $E = \epsilon/4\pi G\rho_0 r_s^2$  con  $\Psi = \phi/4\pi G\rho_0 r_s^2$  las cuales son la energía y el potencial adimensional de una partícula. Para observar el origen de estas variables, mirar los anexos A y B.

Lo primero que debe hacerse para construir un halo es generar un número aleatorio  $x \in [0, 1]$ . Con este valor, el módulo de la distancia  $R$  de una partícula puede ser obtenida usando la expresión:

$$\ln(1+R) - R/(1+R) = x[\ln(1+c) - c/(1+c)], \quad (5.8)$$

la cual representa la masa encerrada a un radio  $R$  cualquiera. Detalles de la deducción de esta ecuación se encuentran en el anexo A.

Una vez determinado  $R$ , se calcula  $\Psi$ , que es el potencial adimensional asociado al perfil de NFW:

$$\Psi = \ln(1+R)/R. \quad (5.9)$$

---

<sup>3</sup>Esta cantidad controla la forma del perfil de densidad del halo [94].

Al ser calculado el potencial, se procede a ejecutar el algoritmo de rechazo<sup>4</sup> para determinar la velocidad de cada partícula. Teniendo en cuenta que la función de distribución de probabilidad (PDF) está dada por:

$$P(E) \propto \Pi = \left( \frac{\Psi - E}{\Psi} \right)^{1/2} \frac{F(E)}{F(\Psi)}, \quad (5.10)$$

Se está ligando a que  $0 \leq \Pi \leq 1$ .  $F(E)$  es la función de distribución evaluada en  $E$  y  $F(\Psi)$  es la función de distribución evaluada en  $\Psi$ . Esta función de distribución puede ser obtenida usando la fórmula analítica de Widrow [122], la cual está dada por:

$$F(E) = F_0 E^{3/2} (1 - E)^{-\lambda} \left( \frac{-\ln E}{1 - E} \right)^q e^P. \quad (5.11)$$

Donde  $F_0 = 9.1968 \times 10^{-2}$ ;  $q = -2.7419$ ;  $\lambda = 5/2$  y  $P$  es un polinomio dado por:

$$P = \sum_i p_i E^i, \quad (5.12)$$

con  $p_1 = 0.3620$ ,  $p_2 = -0.5639$ ,  $p_3 = -0.0859$  y  $p_4 = -0.4912$ .

Se generan dos números aleatorios  $y \in [0, 1]$  y  $E \in [0, \Psi]$ . Si  $y \leq \Pi$ , se acepta el valor adimensional de la energía,  $E$ ; si la desigualdad no se satisface, se vuelven a generar dos números aleatorios.

La velocidad puede ser obtenida de la ecuación para la energía total de una partícula,  $E = V^2/2 + \Psi$ . Posteriormente, se generan cuatro números aleatorios para los ángulos  $\theta$  y  $\varphi$ . Finalmente, la posición y la velocidad físicas de las partículas serán iguales a  $r = Rr_s$  y  $\nu = V(4\pi G\rho_0 r_s)^{1/2}$ .

Una vez generado el halo, se procede a relajar este sistema usando Gadget 2. En la figura 5.3 se muestra el comportamiento de éste durante 10 Gyr. Nótese que para todas las simulaciones las capas internas (hasta el 50% de la masa inicial) son bastante estables y las externas tienden a aumentar; esto se debe a que los halos de materia oscura al ser truncados<sup>5</sup> no están en equilibrio y se expandirán. Para reducir este efecto, es necesario escoger un radio de truncamiento (concentración) bastante largo (de 10 o más). Lo que ocurre en la realidad, es que las afueras de los halos están en equilibrio dinámico con el medio, con lo cual, ellos continuamente acretan materia oscura.

Para analizar el comportamiento de un halo de materia oscura a través del tiempo, es necesario observar qué sucede cuando se varía su masa, su radio y la concentración. En la parte superior de la figura 5.3, se muestra la relajación de un halo cuando su masa inicial es diferente. Como se puede notar, un sistema de masa de  $1 \times 10^8 M_\odot$  crece en mayor proporción durante 10 Gyr que un halo cuya masa sea menor; esto quiere decir que entre más masa tenga un halo, éste será más inestable. Este mismo comportamiento sucede con halos cuyo radio sea cada vez más grande, como se observa en la figura 5.3 *medio*.

<sup>4</sup>Una explicación extensiva de este método puede encontrarse en [123] y [124]

<sup>5</sup>Al ser el perfil de densidad de NFW continuo y tendiendo a cero para radios grandes, es necesario escoger un límite para el cual toda la masa esté encerrada dentro de un radio.

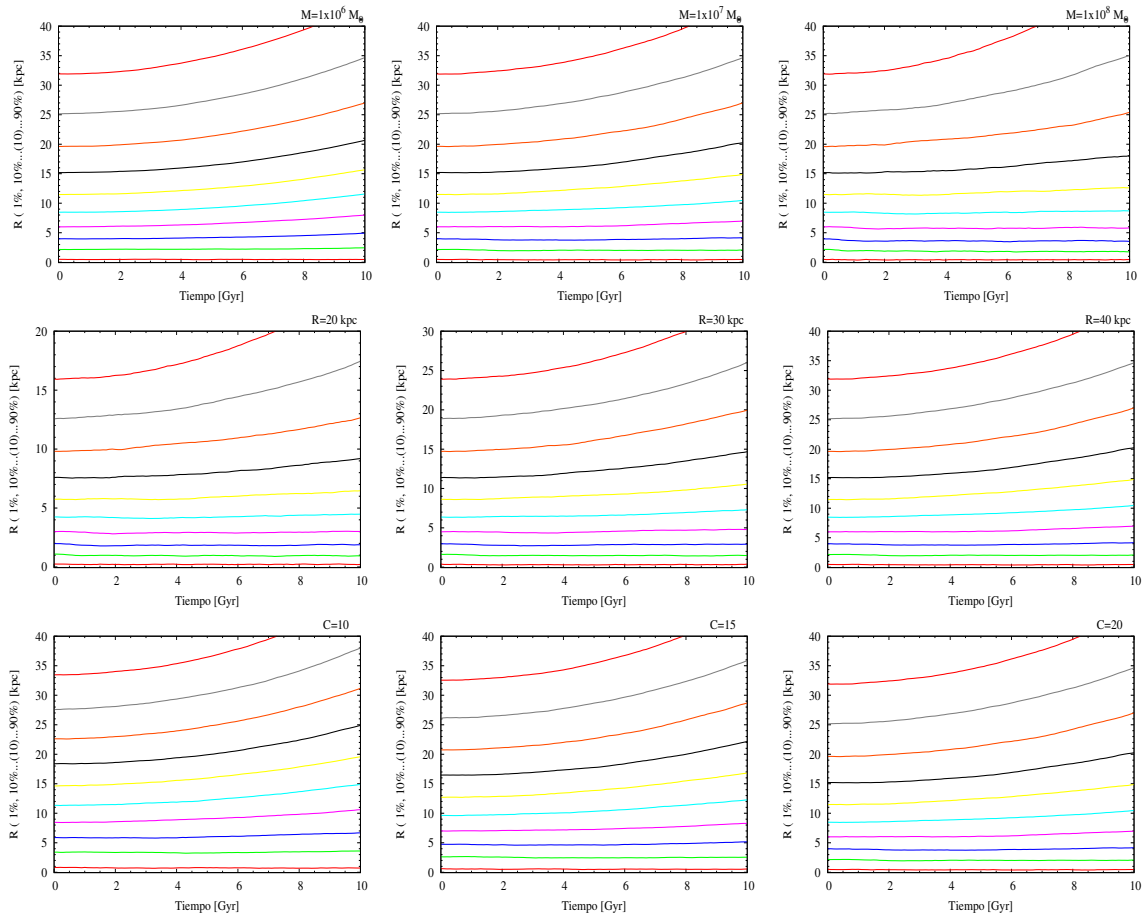


Figura 5.3: Relaxaciones de un halo NFW mediante Gadget 2. *Arriba*: Halos de radio de 40 kpc y concentración 20 para valores de masa de  $1 \times 10^6$ ,  $1 \times 10^7$  y  $1 \times 10^8 M_{\odot}$  respectivamente. *Medio*: Halos de masa  $1 \times 10^7 M_{\odot}$  y concentración de 20 para valores de radio de 20, 30 y 40 kpc respectivamente. *Abajo*: Halos con masa de  $1 \times 10^7 M_{\odot}$  y radio de 40 kpc para valores de concentración de 10, 15 y 20 respectivamente.

Con respecto a la concentración (ver en la parte inferior de la figura 5.3), como se mencionó anteriormente, un halo es más estable si su concentración es mayor. Por lo tanto, si se desea construir un halo muy estable tal que su tasa de desgarramiento ficticia sea mínima, este sistema debe tener baja masa, un radio pequeño y una alta concentración. Para simular un satélite embebido en un halo de materia oscura, se utilizaron los parámetros presentados en la tabla 5.4.

Como se mostrará en el capítulo 7, los satélites que se simulan embebidos en halos de materia oscura son aquéllos cuyas masas son  $7 \times 10^8$  y  $1 \times 10^9 M_{\odot}$ . La masa de los halos de materia oscura fue escogida teniendo en cuenta que la masa total del sistema satélite y halo no debe sobrepasar los  $1.5 \times 10^9 M_{\odot}$  (ver sección 3.1.1). En cuanto a la concentración, los estudios indican que ésta depende de la masa del halo [118], [121], de la forma del espectro de potencias inicial de las fluctuaciones de densidad [118] y del redshift [121]; debido a esto, los halos de materia oscura fría no tienen concentración menor que 3.5 [121], [?]; de hecho, estudios indican que  $4 \leq c \leq 22$  [118], donde  $c=5$  corresponde a masas de cúmulos de

Satélite	Masa halo ( $M_{\odot}$ )	$r_s$ (kpc)	Concentración
$7 \times 10^8 M_{\odot}$	$8 \times 10^8$	3	10
	$9 \times 10^7$		
	$8 \times 10^8$	7.5	4
	$9 \times 10^7$		
$1 \times 10^9 M_{\odot}$	$9 \times 10^6$	7.5	4
	$9 \times 10^7$		

Tabla 5.4: Parámetros utilizados para el halo de materia oscura

galaxias, mientras que  $c=10$  corresponde a masas de galaxias brillantes [118]. Por esta razón, se escogió para las simulaciones, una concentración de 4 y 10.

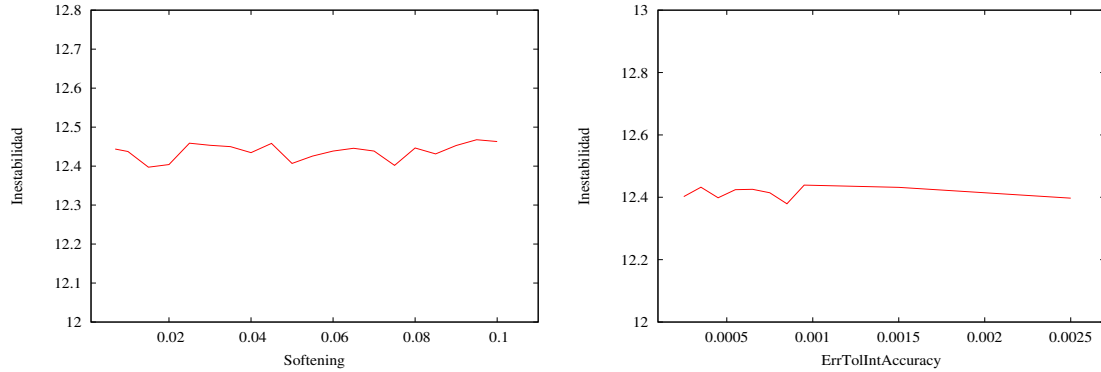


Figura 5.4: Efectos del: *Izquierda*: Softening lenght y *Derecha*: ErrToIntAcc en la inestabilidad de un halo.

Por otra parte, con el fin de lograr la mayor estabilidad<sup>6</sup> en los halos, se determinaron los valores del *softening* y del *ErrToIntAccuracy* óptimos. Recordemos que el softening lenght ó longitud de suavizado es una cantidad que se introduce a la fuerza gravitacional para que ésta no diverja al tener dos partículas en la misma posición; por lo cual, esta cantidad se podría interpretar como la distancia entre los centros de dos partículas que estén pegadas. Se puede observar en la figura 5.4 *Izquierda* que ésta no influye fuertemente en la estabilidad de un halo de materia oscura; sin embargo, se escogió el valor de 0.015 debido a que con éste, la diferencia entre el radio máximo y mínimo de este sistema era la menor<sup>7</sup>.

El ErrToIntAccuracy es un parámetro adimensional que controla la exactitud del paso de tiempo que usa Gadget. Esta cantidad tampoco influye considerablemente en la estabilidad de los halos (ver figura 5.4 *Derecha*). Se escogió el valor de 0.0025 por ser el que proporciona el menor valor en la diferencia entre los radios máximo y mínimo del halo y por ser usado en la literatura [121].

Finalmente, en la tabla 5.5 se enuncian los parámetros usados en el programa Gadget 2 modificado para

<sup>6</sup>Una medida de esta cantidad se logra hallando la diferencia entre el radio máximo y mínimo del halo.

<sup>7</sup>Según [125], el softening óptimo es de  $0.11N^{-0.20}$  para un halo cuya concentración es de 5 y de  $0.065N^{-0.26}$  para un satélite Plummer embebido en un halo con estas características.

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
ErrTolIntAccuracy	0.0025
ErrTotTheta	0.5
ErrTolForceAcc	0.05
MaxTimeStep	0.1
SofteningHalo	0.015
SofteningStars	0.01

Tabla 5.5: Parámetros usados en Gadget 2 modificado para el halo NFW y para Sagitario.

el halo y la esfera de Plummer. Una explicación detallada de éstos se encuentra en la guía del usuario que viene con el código fuente de Gadget.

## EVOLUCIÓN DE POSIBLES PROGENITORES DE SAGITARIO SIN MATERIA OSCURA

### 6.1. Corrientes de Marea asociadas a Sagitario: Simulaciones de N-cuerpos

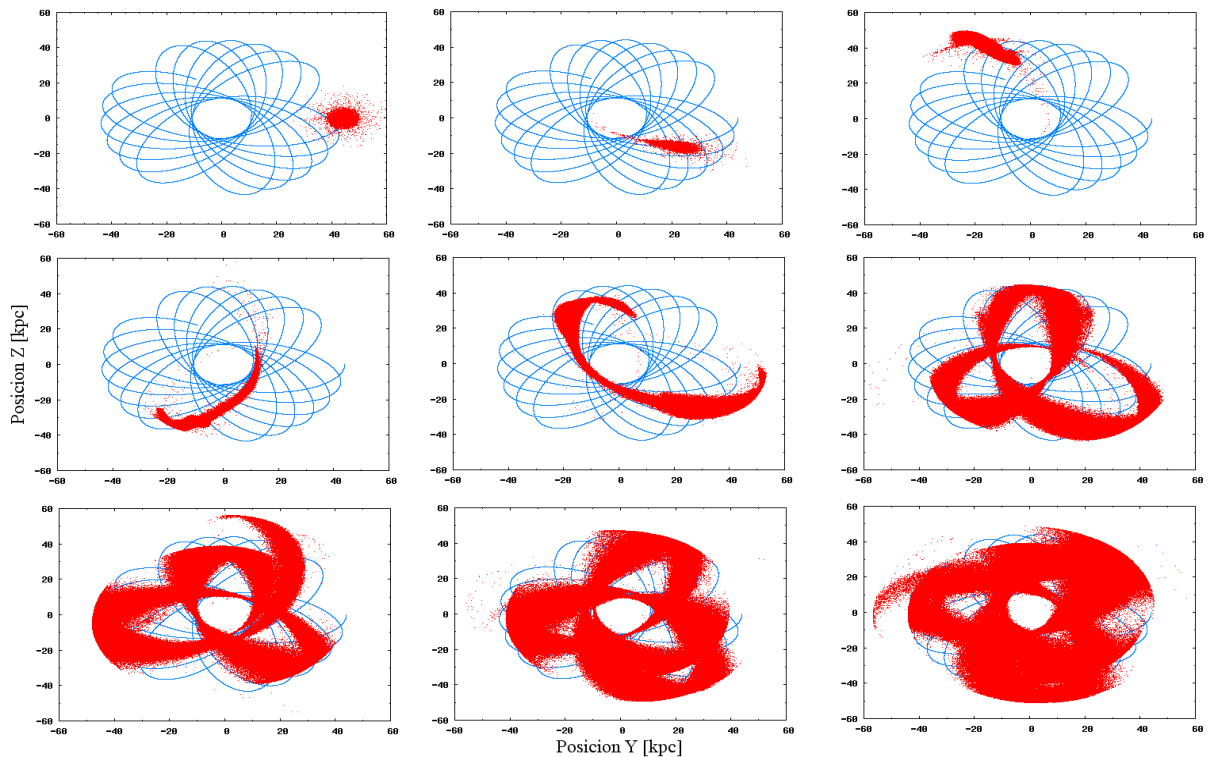


Figura 6.1: Corrientes de marea de un satélite de  $7 \times 10^8 M_{\odot}$  y radio inicial de 0.6 kpc. Se muestra su evolución a los 0.2, 0.6, 1, 2, 4, 5, 6 y 8 Gyr.

En todas las simulaciones realizadas se encontraron corrientes de marea asociadas a Sagitario, ubicadas a una distancia entre 40 y 62 kpc con respecto al centro de nuestra galaxia. En la figura 6.1 se encuentra el ejemplo de un satélite de  $7 \times 10^8 M_{\odot}$  y radio inicial de 0.6 kpc que parte desde 44 kpc del centro de la Vía Láctea. Las líneas azules indican la trayectoria que hace una partícula de prueba; mientras que las rojas, la evolución de un satélite hecho por el programa Gadget2 modificado. Como se puede apreciar, durante los primeros 0.6 Gyr la galaxia se distorsiona antes de empezar a desgarrarse debido a la fuerte

interacción con nuestra galaxia. A los 8 Gyr, éste satélite prácticamente está completamente destruido.

## 6.2. Comportamiento de galaxias enanas bajo diferentes condiciones iniciales

En esta sección se estudiará el comportamiento de galaxias enanas bajo variaciones de masa y radio inicial y distancia apocéntrica.

### 6.2.1. Masa diferente

La figura 6.2 muestra el comportamiento de un satélite cuya masa inicial se varió desde  $1 \times 10^9$  hasta  $5 \times 10^8 M_{\odot}$ . Se puede apreciar que entre más masiva sea una galaxia enana, se destruirá más lentamente. Esto puede inferirse comparando el tiempo de desgarramiento de cada uno de los radios que representan los diferentes porcentajes de la masa inicial en estos satélites. Por ejemplo, al observar el radio que corresponde al 50% de la masa del satélite (línea amarilla en todas las figuras), se puede observar este comportamiento.

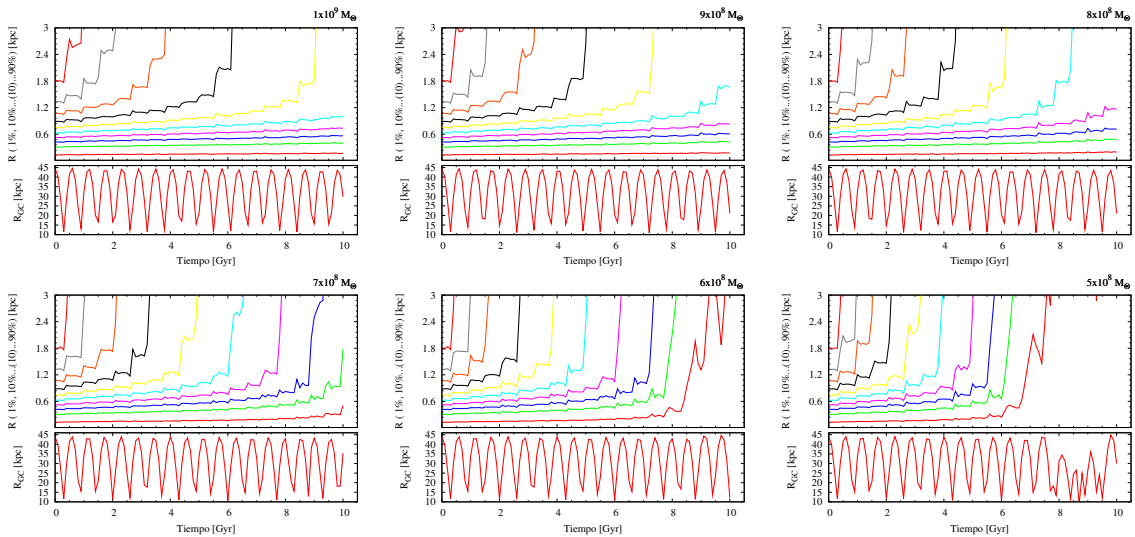


Figura 6.2: Satélites ubicados a una distancia apocéntrica de 44 kpc al centro galáctico y cuyo radio de Plummer es de 0.6 kpc. En la parte superior de todas las gráficas, la línea roja de abajo hacia arriba, representa el radio del 1% de la masa inicial del satélite. La parte inferior corresponde al movimiento del máximo de densidad del satélite.

El mismo comportamiento anterior se presenta cuando el radio de Plummer de los satélites es de 0.5 kpc (gráfica 6.3); esto es, entre mayor sea la masa de una galaxia, esta será mucho más estable. Este resultado se espera debido a que entre más compacto o denso sea un satélite, se desgarrará con mayor dificultad. De esta gráfica también se concluye que satélites con radios de plummer de 0.5 kpc pueden sobrevivir por más de 10 Gyr.

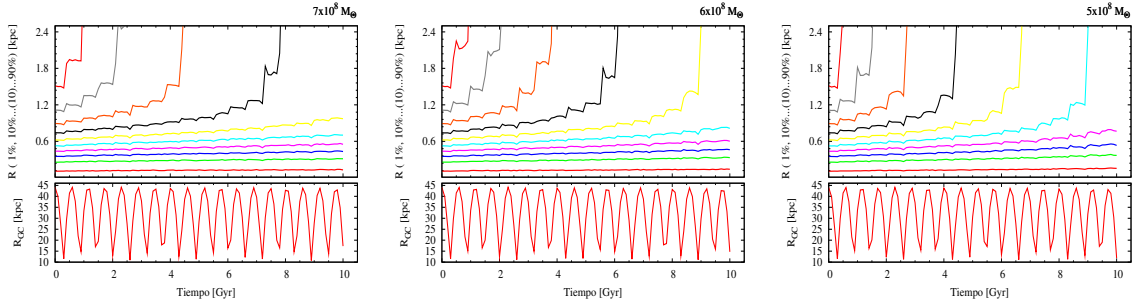


Figura 6.3: Satélites ubicados a una distancia apocéntrica de 44 kpc al centro galáctico y cuyo radio inicial es de 0.5 kpc.

### 6.2.2. Radio diferente

Un satélite cuyo radio de Plummer sea menor, será más denso que otro que contenga igual valor de masa inicial; por lo tanto, será mucho más estable y no se desgarrará tan fácilmente. Este comportamiento se muestra en la figura 6.4. Nótese que en esta gráfica, para los satélites cuyos radios de Plummer son 0.6 y 1.2 kpc respectivamente, la figura indica un radio máximo de 3 y 6 kpc. Esto se debe a que para la construcción de la galaxia, utilizamos un cutoff<sup>1</sup> de 5.

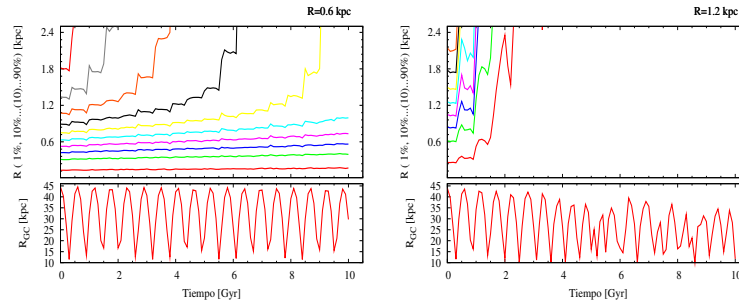


Figura 6.4: Satélites con masa inicial de  $1 \times 10^9 M_{\odot}$  ubicados a 44 kpc del centro galáctico cuyos radios de Plummer son 0.6 y 1.2 kpc respectivamente.

### 6.2.3. Distancia apocéntrica diferente

Al observar la figura 6.5 se nota que un satélite cuyo tiempo de vida es de 7.6 Gyr cuando está localizado a 44 kpc del centro de nuestra galaxia, puede sobrevivir hasta un tiempo mayor a los 10 Gyr al ser ubicado a una distancia apocéntrica de 60 kpc. Este comportamiento se presenta en todos los satélites simulados.

<sup>1</sup>Para la construcción de un satélite Plummer se procede igual que el halo.  $R_{max} = C * r_0$  donde C es el cutoff o truncamiento y  $r_0$  es el radio de Plummer de la galaxia a construir.

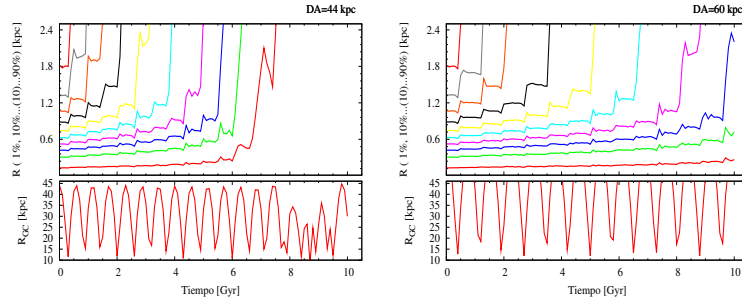


Figura 6.5: Satélite de masa y radio inicial de  $5 \times 10^8 M_{\odot}$  y 0.6 kpc respectivamente ubicado a 44 y 60 kpc del centro galáctico.

### 6.3. Evolución de galaxias enanas sin presencia de materia oscura

En esta sección se compararán las propiedades físicas de distintos satélites simulados con las actualmente observadas en Sagitario con el fin de conocer las características del posible progenitor de esta galaxia.

Las propiedades físicas que se van a determinar son: el radio de brillo medio,  $r_{1/2}$ ; el brillo superficial central,  $\mu_0$ ; la dispersión de velocidades central,  $\sigma_0$  y la relación masa-luminosidad aparente,  $(M/L)_0$ . Recordemos que los correspondientes valores actualmente medidos para Sagitario de éstas cantidades se encuentran en la tabla 3.1.

A diferencia de las estrellas las cuales se ven tan pequeñas que se pueden considerar como un punto en la mayor parte de las observaciones, una galaxia, en nuestro caso Sagitario, puede extenderse por varios segundos o minutos de arco. Es por esta razón que se define una cantidad llamada *brillo superficial*, el cual se usa para describir el brillo aparente de objetos extensos. El brillo superficial es la cantidad total de luz que llega de una galaxia o, en otras palabras, qué tan fácilmente se puede observar. Un objeto de magnitud aparente  $m$  que se extiende por un área  $A$  medida en  $arcsec^2$ , tendrá un brillo superficial que puede determinarse mediante la expresión:

$$\mu_0 = m + 2.5 \log A. \quad (6.1)$$

Ahora bien, nótese que el brillo superficial depende del área de la galaxia, con lo cual, también dependerá de su radio. El radio para el cual el brillo superficial disminuye  $0.75 \text{ mag}/pc^2$  se denomina *radio de brillo medio* [112].

Por otra parte, la *relación masa-luminosidad* se define como el cociente entre la masa total de una galaxia y su luminosidad. En el vecindario solar, esta cantidad toma valores cercanos entre 3 y 5 [15]; con lo cual, si un sistema estelar presenta una relación masa-luminosidad cercana a 10 implicaría la presencia de materia oscura [112]; de hecho, las enanas esferoidales que tienen valores de cientos es porque podrían

estar completamente dominadas por ésta [112].

En cuanto a la *dispersión de velocidades*, se define como el rango de velocidades alrededor de la velocidad promedio de un grupo de estrellas. Las galaxias esferoidales se mantienen en equilibrio debido a su dispersión.

El método para calcular teóricamente las cantidades descritas anteriormente es el hecho por Klessen & Kroupa [112] en el cual una galaxia satélite es analizada reproduciendo las propiedades físicas medidas por un observador terrestre. Se escoge un subconjunto de  $N$  partículas del satélite que se analizarán por un observador hipotético en la tierra. En un sistema cartesiano, éste observador está localizado en  $R_{\odot}=(0,-8,0)$  kpc donde el origen está en el centro galáctico. Sólo las partículas elegidas que tengan un módulo de distancia  $R$  que satisfagan

$$R_{cod} - \frac{\Delta R}{2} \leq R \leq R_{cod} + \frac{\Delta R}{2} \quad (6.2)$$

son usadas, donde  $R_{cod} = 5 \log_{10} D_{cod} - 5$  es el módulo de la distancia del máximo de densidad del satélite que permanece a una distancia  $D_{cod}$  del sol y  $\Delta R$  es el rango de magnitudes cubiertas por las observaciones. Estos autores utilizan un  $\Delta R = 0.8$  mag. El plano observacional es dividido en  $k=20$  anillos circulares dentro de una distancia radial proyectada  $r_{bin}=1.5$  kpc desde el máximo de densidad del satélite. Estos son usados para evaluar la dispersión de velocidades en la visual y el perfil de brillo superficial. La primera cantidad es calculada usando el método de Beers, Flynn & gebhardt [126]; mientras que el perfil de brillo superficial central es estimado ajustando un perfil superficial de densidad exponencial al perfil radial observado, el cual es obtenido contando el número de partículas en la muestra en los anillos radiales, en donde cada partícula tenga una relación masa-luminosidad intrínseca,  $M/L=3$ , comparable a los valores derivados para el vecindario solar. Finalmente, la relación masa-luminosidad aparente que un observador mide se determina de la relación [44], [127]:

$$\left(\frac{M}{L}\right)_0 = \frac{9\sigma_0^2}{2\pi G\mu_0 r_{1/2}} \quad (6.3)$$

### 6.3.1. Distancia apocéntrica de 44 kpc

En las gráficas que se presentarán a continuación, se muestra la evolución temporal del radio de brillo medio, la dispersión de velocidades, el brillo superficial y la relación masa-luminosidad de diferentes sistemas esferoidales durante un tiempo de 10 Gyr junto con el movimiento de su máximo de densidad. Estas propiedades físicas son determinadas por un observador en la tierra. En la parte inferior de todas las gráficas se presentan los radios del 1% , 10% , hasta el 90% de la masa inicial del satélite.

#### Satélite con masa inicial de $1 \times 10^9 M_{\odot}$ y radio de Plummer de 0.6 kpc:

En la figura 6.6 se muestra la evolución de las propiedades físicas de un satélite de masa y radio de Plummer  $1 \times 10^9 M_{\odot}$  y 0.6 kpc respectivamente ubicado a una distancia de 44 kpc del centro galáctico. En

Masa inicial	Radio plummer	t	Masa	$r_{1/2}$	$\mu_0$	$\sigma_0$	M/L
$1 \times 10^9$	0.6	0.9	$1 \times 10^9$	0.18	$8.18 \times 10^8$	33.17	2.45
$1 \times 10^9$	1.2	0.9	$4 \times 10^8$	0.32	$1.30 \times 10^8$	21.65	3.71
		7.2	—	—	—	—	—
$9 \times 10^8$	0.6	0.9	$7.2 \times 10^8$	0.18	$7.24 \times 10^8$	31.16	2.43
		8.4	$3.6 \times 10^8$	0.16	$4.85 \times 10^8$	23.35	2.25
$8 \times 10^8$	0.6	0.9	$6.4 \times 10^8$	0.18	$6.51 \times 10^8$	29.08	2.38
		8.4	$3.2 \times 10^8$	0.16	$3.92 \times 10^8$	20.15	2.14
$7 \times 10^8$	0.6	0.9	$5.6 \times 10^8$	0.18	$5.33 \times 10^8$	26.92	2.43
		8.3	$1.4 \times 10^8$	0.16	$2 \times 10^8$	16.2	2.28
		9.9	$7 \times 10^7$	0.18	$8.6 \times 10^7$	13.2	3.69
$7 \times 10^8$	0.5	0.9	$7 \times 10^8$	0.15	$7.99 \times 10^8$	30.39	2.43
$6 \times 10^8$	0.6	0.9	$4.8 \times 10^8$	0.18	$4.65 \times 10^8$	24.74	2.39
		8.3	$6 \times 10^6$	0.23	$3 \times 10^7$	10.6	5.43
		9.4	—	—	—	—	—
$6 \times 10^8$	0.5	0.9	$6 \times 10^8$	0.15	$6.85 \times 10^8$	28.16	2.44
$5 \times 10^8$	0.6	0.9	$5 \times 10^8$	0.17	$4.07 \times 10^8$	22.17	2.29
		7.7	—	—	—	—	—
$5 \times 10^8$	0.5	0.9	$4 \times 10^8$	0.15	$5.81 \times 10^8$	25.39	2.38
		9.4	$1.5 \times 10^8$	0.13	$3.5 \times 10^8$	18.01	2.28
$5 \times 10^8$	0.3	0.9	$5 \times 10^8$	0.10	$51.54 \times 10^9$	34.19	2.39
		9.6	$4 \times 10^8$	0.09	$1.62 \times 10^9$	32.73	2.28

Tabla 6.1: Propiedades físicas para distintos satélites esferoidales cuando se encuentran a una distancia de 44 kpc del centro galáctico. La masa inicial y la medida en el tiempo t están dadas en  $M_\odot$ , el radio de plummer y el de brillo medio  $r_{1/2}$ , en kpc; el tiempo en Gyr; el brillo superficial central  $\mu_0$  en  $L_\odot/kpc^2$ ; la dispersión de velocidades central  $\sigma_0$ , en km/s y la relación masa-luminosidad, en  $M_\odot/L_\odot$ .

ella se puede observar que durante los primeros 8 Gyr el radio de brillo medio disminuye muy lentamente; de hecho durante este intervalo de tiempo, su valor es de 0.18 kpc, lo que disminuye, es la tercera cifra decimal. Después de 8 Gyr, el radio de brillo medio se mantiene constante a 0.17 kpc. El anterior comportamiento se puede explicar debido a la estabilidad de la galaxia. Nótese que este satélite pierde masa lentamente hasta 9.2 Gyr. Debido a que el cuerpo principal disminuye, es de esperar que también lo haga el radio de brillo medio; cuando la galaxia deja de ser desgarrada, esta cantidad permanecerá constante.

La dispersión de velocidades también disminuye durante 10 Gyr; esto se debe al desgarramiento del satélite y a su paso por el pericentro. La galaxia al ser desgarrada va a tener un tamaño menor, con lo cual, la velocidad de las estrellas debe disminuir para que el sistema no se termine de expandir. Ahora bien, si la galaxia pasa por el pericentro pero no se desgarrar, va a sentir una fuerte atracción hacia la Vía Láctea, con lo cual el cuerpo se distorsionará aumentando su radio; el efecto es que la dispersión de velocidades debe disminuir para que el sistema se estabilice y no termine por desgarrarse. Esta galaxia empieza con

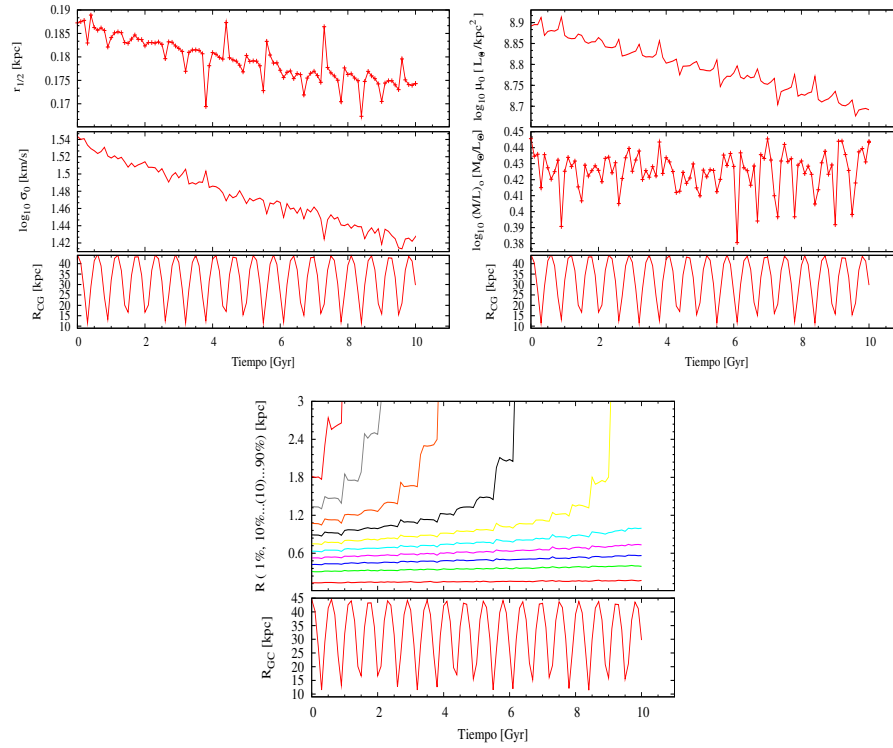


Figura 6.6: Evolución de las propiedades físicas de un satélite con masa inicial de  $1 \times 10^9 M_{\odot}$  y radio de 0.6 kpc ubicado a 44 kpc del centro galáctico.

una dispersión de velocidades de 34.95 km/s y termina con 26.7 km/s.

Por otra parte, debido a que el brillo superficial depende del área de la galaxia, es de esperar que al ser desgarrada, esta cantidad disminuya. Como se observa en la figura 6.6, precisamente este fenómeno ocurre; sin embargo como la tasa de desgarramiento es baja, el brillo superficial durante los 10 Gyr de la evolución del satélite permanece del orden de  $10^8 L_{\odot}/kpc^2$ .

Con respecto a la relación masa-luminosidad, se observan puntos donde esta cantidad es muy pequeña. Sabemos que la dispersión de velocidades disminuye a medida que la galaxia es desgarrada; sin embargo, el brillo superficial y el radio de brillo medio lo hacen en mayor proporción cuando el satélite pasa por el pericentro; con lo cual, se pensaría que la masa-luminosidad debería aumentar debido a que ésta es inversamente proporcional al producto de estas dos cantidades; sin embargo, gana su dependencia con el cuadrado de la dispersión de velocidades que hace que disminuya. Para esta galaxia los valores de relación masa-luminosidad están entre 2.6 y  $2.7 M_{\odot}/L_{\odot}$

Finalmente, al observar la última gráfica de la figura 6.6, este sistema puede sobrevivir hasta un tiempo de Hubble sin necesidad de materia oscura debido a que sólo un 50% de su masa inicial es desgarrada. Transcurridos 0.9 Gyr de evolución, este satélite se encuentra en la posición actual de Sagitario; sin

embargo, para este tiempo (ver tabla 6.1) no se ha desgarrado y su brillo superficial y dispersión de velocidades son mucho mayores que las que se observan para nuestra galaxia enana. Ahora bien, si este sistema fuera el progenitor de Sagitario, aproximadamente en 6 Gyr debería haber perdido el 65 % de su masa; se observa que este satélite por el contrario sólo ha perdido un 30 % y se encuentra a 11 kpc del centro de la Vía Láctea, es decir, más cerca de lo que se observa actualmente a Sagitario; además su brillo superficial y dispersión de velocidades en ese tiempo tienen valores de  $6.26 \times 10^8 L_{\odot}/kpc^2$  y 28.16 km/s respectivamente, mucho mayores que los valores medidos (ver tabla 3.1). Por lo tanto, si la evolución del progenitor de Sagitario empezó a 44 kpc del centro de nuestra galaxia, éste no pudo tener o una masa de  $1 \times 10^9 M_{\odot}$  o un radio de Plummer de 0.6 kpc.

### **Satélite con masa inicial de $1 \times 10^9 M_{\odot}$ y radio de Plummer de 1.2 kpc:**

La evolución de las propiedades físicas de un satélite de masa  $1 \times 10^9 M_{\odot}$  y radio de Plummer de 1.2 kpc se presentan en la figura 6.7.

Con respecto al radio de brillo medio, se puede observar que esta cantidad aumenta hasta aproximadamente 3 Gyr. Después de este tiempo, el comportamiento se podría ajustar a una constante de valor 0.7 kpc. Esta conducta se debe a que, primeramente, éste satélite se desgarrará rápidamente durante los primeros 3.2 Gyr, en los cuales queda con sólo el 1 % de su masa inicial. En este intervalo de tiempo es en donde el radio de brillo medio aumenta; después que la galaxia ha sido completamente destruida, se espera que no haya cambio en esta cantidad. A los 1.1 y 3 Gyr, cuando la galaxia sólo tiene el 30 % y 1 % de su masa inicial respectivamente, el radio de brillo medio concuerda con el de Sagitario; sin embargo, la galaxia se encuentra a 42.5 y 26.2 kpc del centro galáctico.

Al observar la evolución de la dispersión de velocidades, ésta disminuye a medida que el satélite se desgarrará; Cuando el satélite es completamente destruido a los 5 Gyr, ésta cantidad aumenta llegando a un orden de magnitud de 105 km/s. Al igual que el radio de brillo medio, a los 1.1 Gyr de evolución, éste satélite tiene una dispersión de velocidades de 11.6 km/s.

Debido al rápido desgarramiento del satélite durante los primeros 3 Gyr, el brillo superficial disminuye linealmente; es decir, por cada Gyr, esta cantidad disminuye un orden de magnitud, empezando en  $1.6 \times 10^8 L_{\odot}/kpc^2$  hasta  $7.5 \times 10^5 L_{\odot}/kpc^2$ . A los 1.9 Gyr este satélite tiene un brillo superficial que concuerda con el de Sagitario, sin embargo, la galaxia está localizada a 24.2 kpc del centro de la Vía Láctea, y su dispersión de velocidades y relación masa-luminosidad son más altas que las de nuestro sistema en estudio.

Al disminuir el brillo superficial, se espera que la relación masa-luminosidad aumente. De hecho, a los 3 Gyr, esta cantidad alcanza el orden de  $10^3 M_{\odot}/L_{\odot}$ ; llegando a un orden de magnitud más al ser completamente desgarrado el satélite. A los 1.5 Gyr la M/L del satélite es de  $16 M_{\odot}/L_{\odot}$ , es decir, está dentro del rango medido para Sagitario; sin embargo, aunque en este tiempo la galaxia tiene un radio de brillo medio de 0.57 kpc, está ubicada a 23.08 kpc del centro galáctico y su brillo superficial y dispersión de velocidades tienen valores más altos que los medidos en Sagitario.

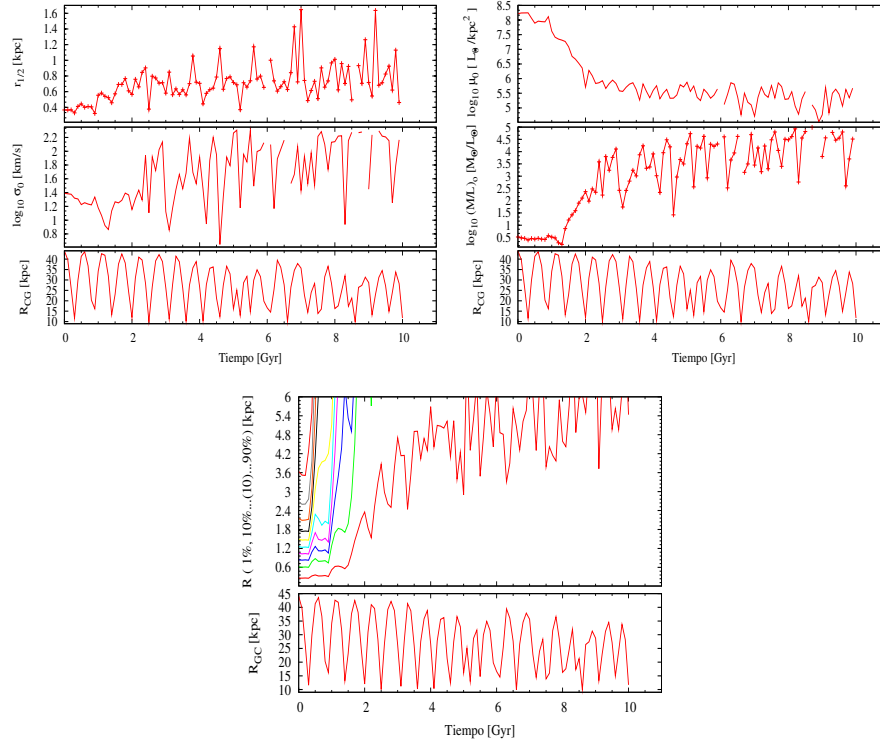


Figura 6.7: Evolución de las propiedades físicas de un satélite con masa inicial de  $1 \times 10^9 M_{\odot}$  y radio de 1.2 kpc ubicado a 44 kpc del centro galáctico.

Finalmente, se observa en la última gráfica de la figura 6.7 que este satélite es desgarrado totalmente a los 5.1 Gyr. Este sistema reproduce las coordenadas actuales de Sagitario a los 0.9 y 7.2 Gyr (ver tabla 6.1). Mientras que para el primer tiempo la masa está en el rango medido para Sagitario; el brillo superficial y la dispersión de velocidades tienen valores más altos. En el segundo tiempo, el satélite ya ha sido completamente desgarrado. Debido a que para algunos tiempos este sistema reproduce las cantidades observadas en Sagitario, se estudiará si pudiera ser un posible progenitor para esta galaxia enana al estar inmerso en un halo de materia oscura.

#### Satélite con masa inicial de $9 \times 10^8 M_{\odot}$ y radio de Plummer de 0.6 kpc:

La evolución de las propiedades físicas de este satélite es igual que en el caso de una galaxia con masa inicial de  $1 \times 10^9 M_{\odot}$ . Al observar la figura 6.8, durante 6 Gyr nuevamente el radio de brillo medio disminuye lentamente sólo hasta la tercera cifra decimal. Posterior a este tiempo, su valor es constante, siendo de 0.17 kpc.

Con respecto a la dispersión de velocidades, ésta comienza en 33.09 km/s y termina en 23.42 km/s. Nuevamente, debido a que la tasa de desgarramiento para este satélite también es baja, el brillo superficial disminuye lentamente durante los 10 Gyr de su evolución, permaneciendo del orden de  $10^8 L_{\odot}/kpc^2$ . La

relación masa-luminosidad permanece con un valor promedio de  $2.6 M_{\odot}/L_{\odot}$ .

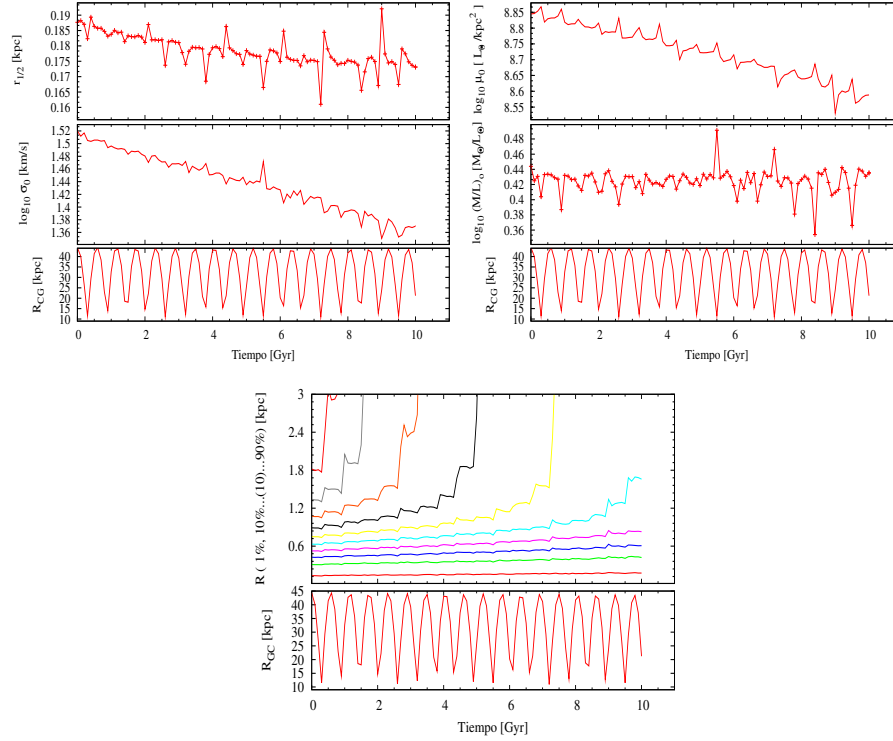


Figura 6.8: Evolución de las propiedades físicas de un satélite con masa inicial de  $9 \times 10^8 M_{\odot}$  y radio de 0.6 kpc ubicado a 44 kpc del centro galáctico.

Finalmente, se puede observar que este satélite es lo suficientemente estable como para sobrevivir durante un tiempo de Hubble sin necesidad de materia oscura. Ahora bien, la tabla 6.1 muestra que ésta galaxia reproduce la posición de Sagitario a los 0.9 y 8.4 Gyrs. Para el primer tiempo, la masa, el brillo superficial y la dispersión de velocidades son mucho más altos que los valores actuales de Sagitario. Al observar lo que sucede a los 8.4 Gyr, el satélite tiene una masa que concuerda con la actual de Sagitario y su última pérdida de masa fue a los 7.3 Gyr. Estos hechos podrían convertir a este sistema en un posible candidato a progenitor de Sagitario; sin embargo, en este tiempo su brillo superficial y dispersión de velocidades tienen valores mucho más altos; mientras que el radio de brillo medio y la relación masa-luminosidad, muy bajos; por lo cual el progenitor de Sagitario no pudo ser un satélite o con masa de  $9 \times 10^8 M_{\odot}$  o con un radio de Plummer de 0.6 kpc.

#### Satélite con masa inicial de $8 \times 10^8 M_{\odot}$ y radio de Plummer de 0.6 kpc:

Como en los satélites de masa  $1 \times 10^9$  y  $9 \times 10^8 M_{\odot}$  con radio de Plummer de 0.6 kpc, se observa en la figura 6.9 que el radio de brillo medio disminuye lentamente hasta los primeros 6 Gyr, en los cuales ésta cantidad es de 0.18 kpc; sólo disminuye la tercera cifra decimal. Después de este tiempo, el radio de brillo medio permanece constante con un valor de 0.17 kpc.

Con respecto a la dispersión de velocidades y la relación masa-luminosidad, su comportamiento también es igual que en los satélites cuyas masas iniciales son  $1 \times 10^9$  y  $9 \times 10^8 M_{\odot}$ . En el caso de ésta galaxia, la primera cantidad comienza en 33.09 km/s y termina en 23.42 km/s. La relación masa-luminosidad permanece con un valor promedio de  $2.6 M_{\odot}/L_{\odot}$ .

Nuevamente, debido a que la tasa de desgarramiento de esta galaxia es baja, el brillo superficial disminuye lentamente durante los 10 Gyr de su evolución, permaneciendo del orden de  $10^8 L_{\odot}/kpc^2$ .

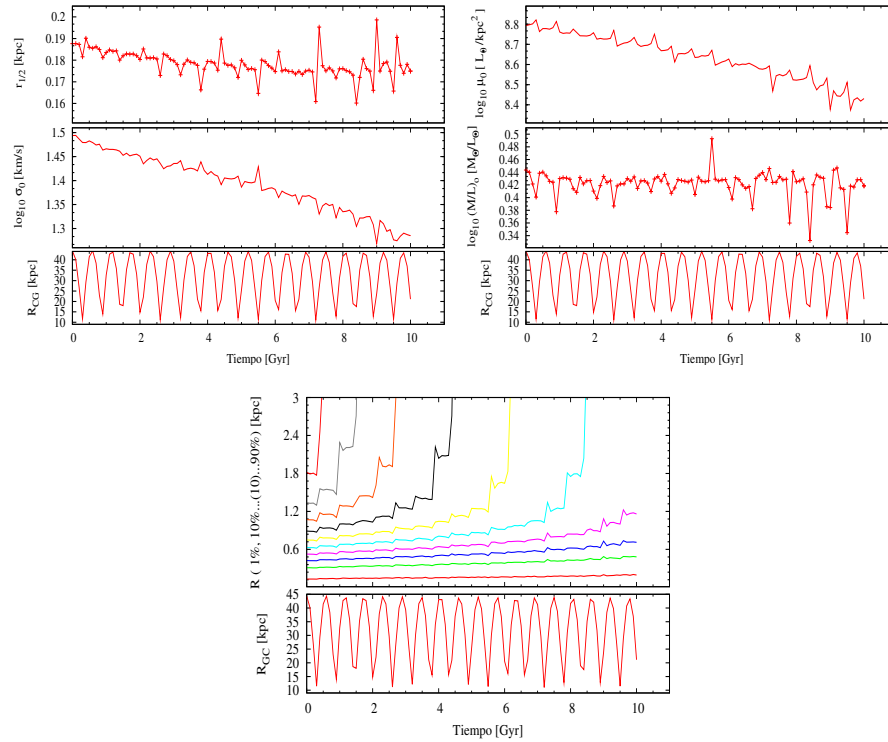


Figura 6.9: Evolución de las propiedades físicas de un satélite con masa inicial de  $8 \times 10^8 M_{\odot}$  y radio de 0.6 kpc ubicado a 44 kpc del centro galáctico.

Finalmente, se puede observar de la última gráfica de la figura 6.9 que este satélite sobrevive durante 12 Gyrs sin necesidad de materia oscura y reproduce la posición actual de Sagitario en 0.9 y 8.4 Gyr (ver tabla 6.1). En el primer tiempo la masa, brillo superficial y dispersión de velocidades tienen valores más altos mientras que el radio de brillo medio y la relación masa-luminosidad son más bajas que los medidos para Sagitario. En 8.4 Gyr este satélite tiene una masa que está dentro del rango medido para nuestra galaxia enana; sin embargo su luminosidad y dispersión de velocidades siguen siendo altas; también el radio de brillo medio y la relación masa-luminosidad permanecen más bajas. Por lo tanto, el progenitor de Sagitario no pudo tener o una masa inicial de  $8 \times 10^8 M_{\odot}$  o radio de Plummer de 0.6 kpc.

### Satélite con masa inicial de $7 \times 10^8 M_{\odot}$ y radio de Plummer de 0.6 kpc:

La evolución de las propiedades físicas de un satélite de masa  $7 \times 10^8 M_{\odot}$  y radio de Plummer de 0.6 kpc se presentan en la figura 6.10.

Con respecto al radio de brillo medio, éste permanece constante entre 0.16 y 0.18 kpc durante 8.8 Gyrs; para este tiempo, el satélite sólo queda con el 20% de su masa inicial. Posteriormente, el radio de brillo medio aumenta llegando hasta un valor de 0.3 kpc a los 10 Gyr, en donde el satélite sólo queda con el 10% de su masa inicial. Estos resultados indican que este satélite nunca reproduce el radio de brillo medio observado en Sagitario.

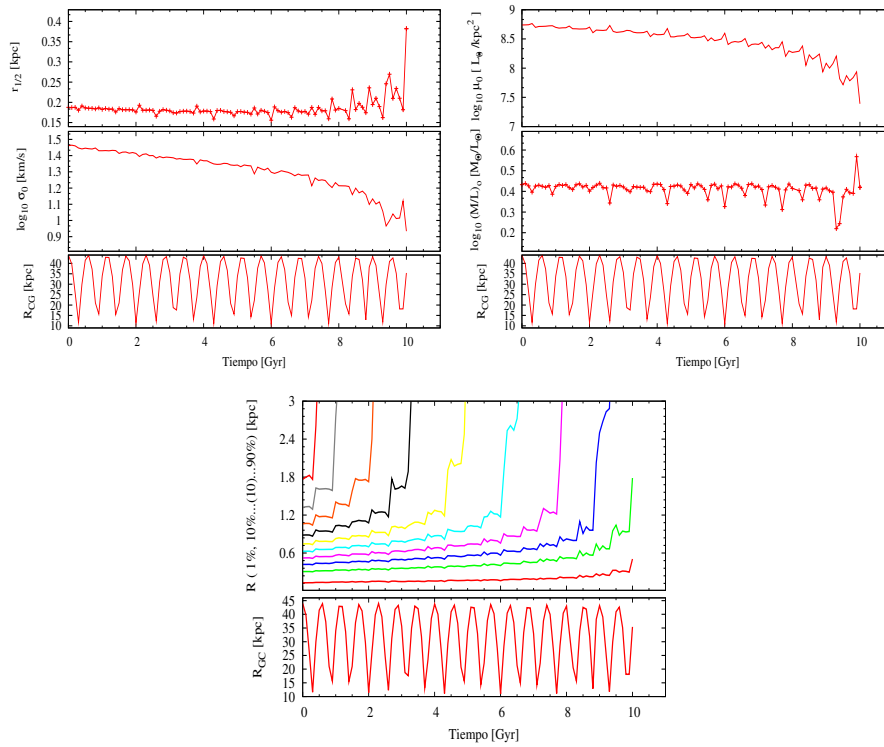


Figura 6.10: Evolución de las propiedades físicas de un satélite con masa inicial de  $7 \times 10^8 M_{\odot}$  y radio de 0.6 kpc ubicado a 44 kpc del centro galáctico.

Al observar la evolución de la dispersión de velocidades, ésta disminuye a medida que el satélite se desgarrá. Al comienzo de la evolución del satélite, esta cantidad tiene el valor de 29 km/s; a los 10 Gyrs, 8.6 km/s. A los 9.3 Gyrs, el satélite reproduce la dispersión de velocidades observada en Sagitario; esto es, 11.4 km/s.

El brillo superficial del satélite disminuye de la misma manera que lo hace la dispersión de velocidades como se observa en la figura 6.10; sin embargo, se mantiene del orden de  $10^8 L_{\odot}/kpc^2$  durante 9.3 Gyrs. Posterior a este tiempo, el brillo superficial disminuye un orden de magnitud, llegando a un valor de  $2.4 \times 10^7 L_{\odot}/kpc^2$  en 10 Gyr.

La relación masa-luminosidad del satélite se mantiene en promedio constante con valores que oscilan entre 2.4 y 2.7  $M_{\odot}/L_{\odot}$ . Este comportamiento se presenta durante 9.3 Gyrs. Posteriormente, cuando la dispersión de velocidades y el brillo superficial son muy bajos, la relación masa-luminosidad disminuye tomando valores de 1.7 y 2.3  $M_{\odot}/L_{\odot}$ .

Finalmente, al observar la última gráfica en la figura 6.10, un sistema que parte desde 44 kpc del centro galáctico y cuya masa es de  $7 \times 10^8 M_{\odot}$  y que tiene un radio de Plummer de 0.6 kpc, puede sobrevivir por 10 Gyrs; pero sólo con el 10% de su masa inicial. Ahora bien, durante este tiempo, el sistema reproduce la posición y coordenadas galactocéntricas de Sagitario a los 0.9, 8.3 y 9.9 Gyrs. Se puede apreciar en la tabla 6.1, que para estos tiempos, cuando el satélite se encuentra ubicado en la posición actual de Sagitario, la galaxia simulada nunca reproduce las propiedades físicas observadas; el radio de brillo medio y la relación masa-luminosidad siempre son más bajos; mientras que el brillo superficial y la dispersión de velocidades, son más altas. Por lo tanto, un satélite con masa y radio de Plummer de  $7 \times 10^8 M_{\odot}$  y 0.6 kpc, no reproduce al Sagitario que observamos actualmente cuando éste sólo está compuesto por materia bariónica.

#### **Satélite con masa inicial de $7 \times 10^8 M_{\odot}$ y radio de Plummer de 0.5 kpc:**

En la figura 6.11 se muestra la evolución de las propiedades físicas de un satélite con masa inicial de  $7 \times 10^8 M_{\odot}$  y radio de Plummer de 0.5 kpc. Como se puede observar, el radio de brillo medio disminuye lentamente a medida que el satélite es desgarrado. Nótese que este comportamiento es el mismo para galaxias que sobreviven sin necesidad de materia oscura durante un tiempo de Hubble. Este satélite comienza con un radio de brillo medio de 0.16 kpc; una vez este sistema no pierde más masa, esto es, a los 7.9 Gyr cuando tiene sólo el 50% de su masa inicial, el radio de brillo medio se hace igual a 0.14 kpc. Posterior a ese tiempo, ésta cantidad oscila entre 0.14 y 0.13 kpc. Es importante anotar que durante los 10 Gyr de evolución, esta galaxia no reproduce el radio de brillo medio de Sagitario.

Con respecto a la dispersión de velocidades, también se observa que esta cantidad disminuye lentamente a medida que el satélite es desgarrado. Al comienzo de la simulación es de 31.9 km/s; a los 7.9 Gyr, es igual a 26.72 km /s y a los 10 Gyr, es 25.7 km/s. Como se puede notar, durante todo el tiempo de evolución, siempre es mayor que la de Sagitario.

Tal vez la cantidad que más lentamente decrece es el brillo superficial. Como se puede apreciar en la figura 6.11, durante 10 Gyr de evolución, siempre mantiene un orden de magnitud de  $10^8 L_{\odot}/kpc^2$ . Este valor, nuevamente es más alto que el medido para Sagitario.

Ahora bien, como el radio de brillo medio y el brillo superficial disminuyen, se esperaría que la relación masa-luminosidad aumente; sin embargo la dispersión de velocidades también disminuye, con lo cual la relación masa-luminosidad debería disminuir (esto se concluye del a ecuación 6.3). Lo que ocurre en este

caso, es que los dos efectos tienen igual proporción, lo cual hace que ésta cantidad permanezca en promedio constante con un valor de  $2.45 M_{\odot}/L_{\odot}$ . Este valor es mucho menor que el correspondiente a Sagitario.

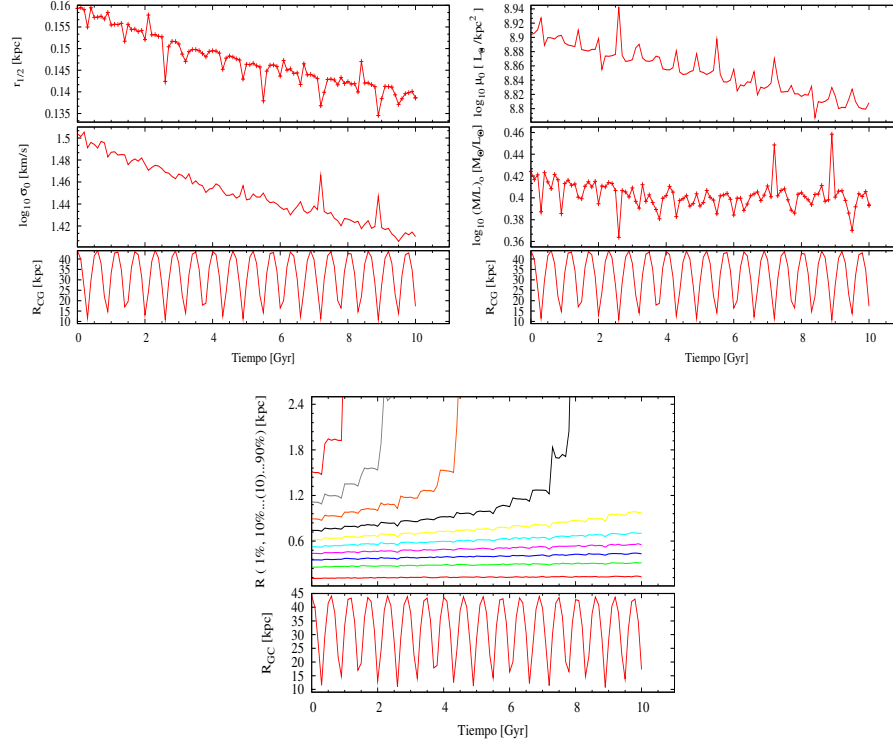


Figura 6.11: Evolución de las propiedades físicas de un satélite con masa inicial de  $7 \times 10^8 M_{\odot}$  y radio de 0.5 kpc ubicado a 44 kpc del centro galáctico.

Finalmente, la última gráfica de la figura 6.11 muestra que a diferencia del caso anterior, esta galaxia es bastante estable debido a que el 50% de su masa sobrevive por 10 Gyr por lo cual este satélite no necesita materia oscura para vivir por un tiempo de Hubble. Esta galaxia reproduce la posición actual de Sagitario a los 0.9 Gyr de su evolución, tiempo en el cual este satélite no se ha desgarrado y como se mencionó anteriormente, tanto su brillo superficial como su dispersión de velocidades son mucho más altas que los valores de Sagitario. Según estos resultados, una galaxia no pudo ser progenitor de Sagitario si su masa inicial fue  $7 \times 10^8 M_{\odot}$  o si su radio de Plummer fue de 0.5 kpc.

#### Satélite con masa inicial de $6 \times 10^8 M_{\odot}$ y radio de Plummer de 0.6 kpc:

La evolución de las propiedades físicas de la galaxia simulada se presentan en la figura 6.12. En ella, se observa que, durante 7.2 Gyrs, el radio de brillo medio del satélite simulado permanece constante oscilando entre 0.16 y 0.19 kpc. En este tiempo, el satélite se ha desgarrado a tal punto que sólo tiene el 20% de su masa inicial. Posteriormente, el radio de brillo medio aumenta hasta llegar a un valor de 0.7 kpc a los 10 Gyrs. El radio de brillo medio medido en Sagitario lo reproduce el satélite simulado a los 8.7 kpc, cuando éste tiene sólo el 1% de su masa inicial.

Como es de esperar, la dispersión de velocidades del satélite disminuye gradualmente a medida que el sistema se desgarrar. Este comportamiento se presenta durante los primeros 7.7 Gyr de evolución, en los cuales, empieza con un valor de 26.7 km/s y termina en 10.8 km/s, muy cercano al de Sagitario. Después de esos 7.7 Gyr, que es cuando la galaxia sólo tiene el 10 % de su masa inicial, la dispersión de velocidades aumenta hasta llegar a tener un valor de 32 km/s.

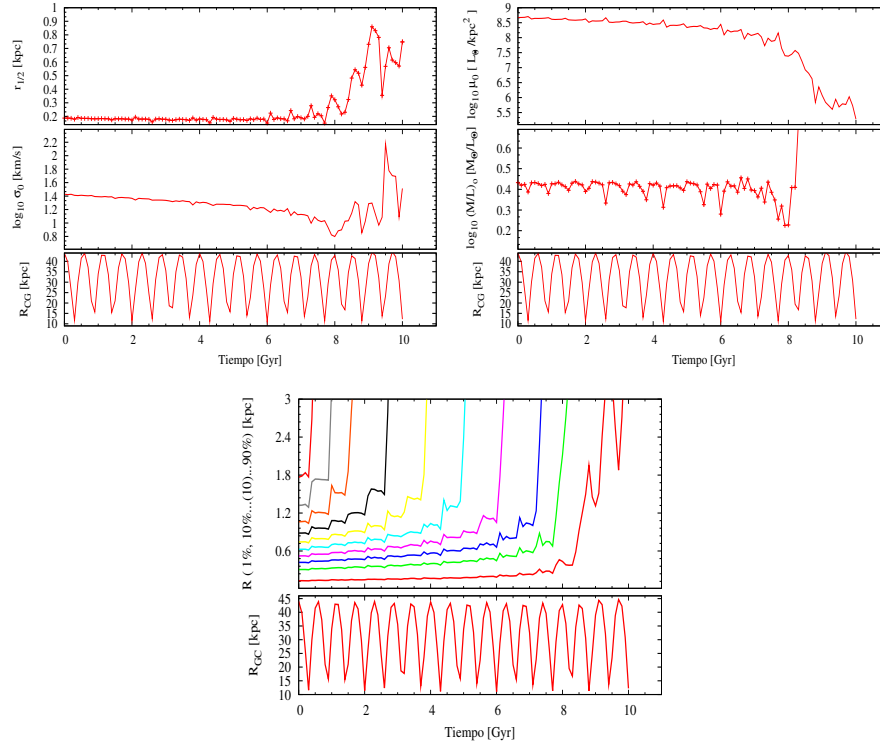


Figura 6.12: Evolución de las propiedades físicas de un satélite con masa inicial de  $6 \times 10^8 M_{\odot}$  y radio de 0.6 kpc ubicado a 44 kpc del centro galáctico.

Con respecto al brillo superficial, durante los primeros 7.2 Gyr de evolución esta cantidad disminuye lentamente aunque mantiene un orden de magnitud de  $10^8 L_{\odot}/kpc^2$ . Después de este tiempo, que es cuando la galaxia tiene el 10 % de su masa inicial, el brillo superficial disminuye hasta llegar a un valor del orden de  $10^5 L_{\odot}/kpc^2$ . Esto es de esperarse debido a que el tamaño del cuerpo principal se hace cada vez más pequeño. A los 8.9 Gyrs, el brillo superficial del satélite reproduce el observado en Sagitario.

Por otra parte, la relación masa-luminosidad de la galaxia, permanece constante durante los primeros 8.2 Gyrs, oscilando entre 2.3 y  $2.5 M_{\odot}/L_{\odot}$ . Después de ese tiempo, esta cantidad aumenta llegando en 10 Gyr hasta un valor de  $2472 M_{\odot}/L_{\odot}$ . Esto es de esperarse debido a que el brillo superficial decrece rápidamente después de los 8.5 Gyrs.

Un satélite de masa  $6 \times 10^8 M_{\odot}$  y radio de 0.6 kpc es totalmente desgarrado a los 9.3 Gyr; durante este tiempo, el satélite reproduce la posición actual de Sagitario a los 0.9, 8.3 y 9.4 Gyr. En los dos primeros tiempos, se observa en la tabla 6.1 que este satélite no reproduce ninguna de las propiedades físicas observadas en Sagitario y a los 9.4 Gyrs, éste ya fue desgarrado totalmente. Sin embargo, es importante anotar que el radio de brillo medio es igual al observado cuando la galaxia tiene sólo el 1% de su masa inicial; además, a los 8.9 Gyrs, este satélite reproduce la mayoría de las propiedades físicas observadas; sin embargo, tiene una masa menor que la actual y no está localizado en la posición de Sagitario. Por lo tanto, el progenitor de Sagitario no pudo ser una galaxia compuesta sólo de materia bariónica que tuviera o una masa inicial de  $6 \times 10^8 M_{\odot}$  o un radio de Plummer de 0.6 kpc.

#### **Satélite con masa inicial de $6 \times 10^8 M_{\odot}$ y radio de Plummer de 0.5 kpc:**

En la figura 6.13 se muestra la evolución de las propiedades físicas de un satélite con masa inicial de  $6 \times 10^8 M_{\odot}$  y radio de Plummer de 0.5 kpc. Como se puede apreciar, el radio de brillo medio disminuye a medida que el satélite es desgarrado. Nótese que este comportamiento es el mismo que el de una galaxia de masa de  $5 \times 10^8 M_{\odot}$  e igual radio. Para el caso que estamos estudiando, la galaxia comienza con un radio de brillo medio de 0.15 kpc; una vez este sistema no pierde más masa, esto es, a los 9 Gyr cuando tiene el 40% de su masa inicial, el radio de brillo medio se hace igual a 0.13 kpc. Posterior a ese tiempo, ésta cantidad no cambia de valor. Como se puede observar, durante los 10 Gyr de evolución, este satélite no reproduce el radio de brillo medio de Sagitario.

Con respecto a la dispersión de velocidades, también se observa que esta cantidad disminuye a medida que el satélite es desgarrado. Al comienzo de la simulación es de 29.56 km/s; a los 9 y 10 Gyr, es igual a 22.6 km/s. Como se puede notar, durante todo el tiempo de evolución, siempre es mayor que la de Sagitario.

Así como las propiedades físicas descritas anteriormente, el brillo superficial también decrece. Como se puede apreciar en la figura 6.13, durante 10 Gyr de evolución, siempre mantiene un orden de magnitud de  $10^8 L_{\odot}/kpc^2$ . Este valor, nuevamente es más alto que el medido para Sagitario.

La relación masa-luminosidad para este sistema permanece en promedio constante con un valor de 2.45  $M_{\odot}/L_{\odot}$ . Este valor es mucho menor que el correspondiente a Sagitario.

Finalmente, en la última gráfica de la figura 6.13 se observa que este satélite es lo suficientemente estable para sobrevivir por un tiempo de Hubble sin necesidad de estar inmerso en un halo de materia oscura; de hecho, el 40% de su masa inicial ( $2.4 \times 10^8 M_{\odot}$ ) queda intacta durante 12 Gyr de evolución.

Esta galaxia reproduce la posición actual de Sagitario a los 0.9 Gyr, tiempo en el cual, este sistema no se ha desgarrado y su brillo superficial y dispersión de velocidades tienen valores más altos que los observados en Sagitario. Ahora bien, cuando el satélite pierde el 33% de su masa (esto es, el tiempo para el cual este sistema tendría una masa dentro del rango medido para Sagitario) que es en 3.3 Gyr, éste se encuentra

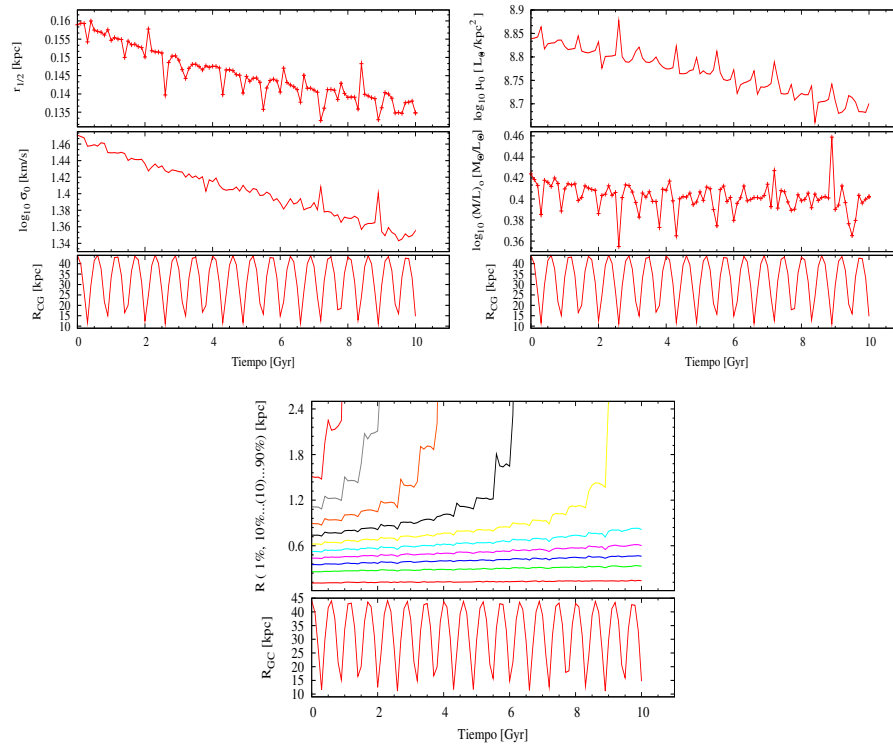


Figura 6.13: Evolución de las propiedades físicas de un satélite con masa inicial de  $6 \times 10^8 M_{\odot}$  y radio de 0.5 kpc ubicado a 44 kpc del centro galáctico.

a 33 kpc del centro galáctico, mucho más lejos que la posición actual de Sagitario y nuevamente su brillo superficial y dispersión de velocidades tienen valores respectivamente de  $6.2 \times 10^8 L_{\odot}/kpc^2$  y 26.5 km/s, los cuales siguen siendo mucho más altos; por lo tanto, el progenitor de nuestra galaxia satélite no pudo haber tenido o una masa inicial de  $6 \times 10^8 M_{\odot}$  o radio de Plummer de 0.5 kpc.

#### Satélite con masa inicial de $5 \times 10^8 M_{\odot}$ y radio de Plummer de 0.6 kpc:

Las propiedades físicas de este satélite tienen la misma evolución que las de una galaxia de  $6 \times 10^8 M_{\odot}$ ; de hecho, durante el mismo intervalo de tiempo se desgarran los mismos porcentajes de masa.

Durante los primeros 6 Gyr de evolución, el radio de brillo medio de este satélite permanece entre 0.17 y 0.19 kpc; posteriormente, aumenta linealmente. A los 7.1 Gyr la galaxia reproduce el radio de brillo medio de Sagitario; sin embargo, para este tiempo la masa encerrada es tan sólo el 1% de la inicial, esto es,  $5 \times 10^6 M_{\odot}$ .

Con respecto a la dispersión de velocidades, ésta disminuye desde 24.7 km/s hasta 10.6 km/s durante los primeros 6 Gyr de evolución; luego, cuando el satélite tiene sólo el 10% de su masa inicial, la dispersión de velocidades varía considerablemente en cada tiempo. Nuevamente, en 7.1 Gyr esta galaxia representa la dispersión de velocidades de sagitario.

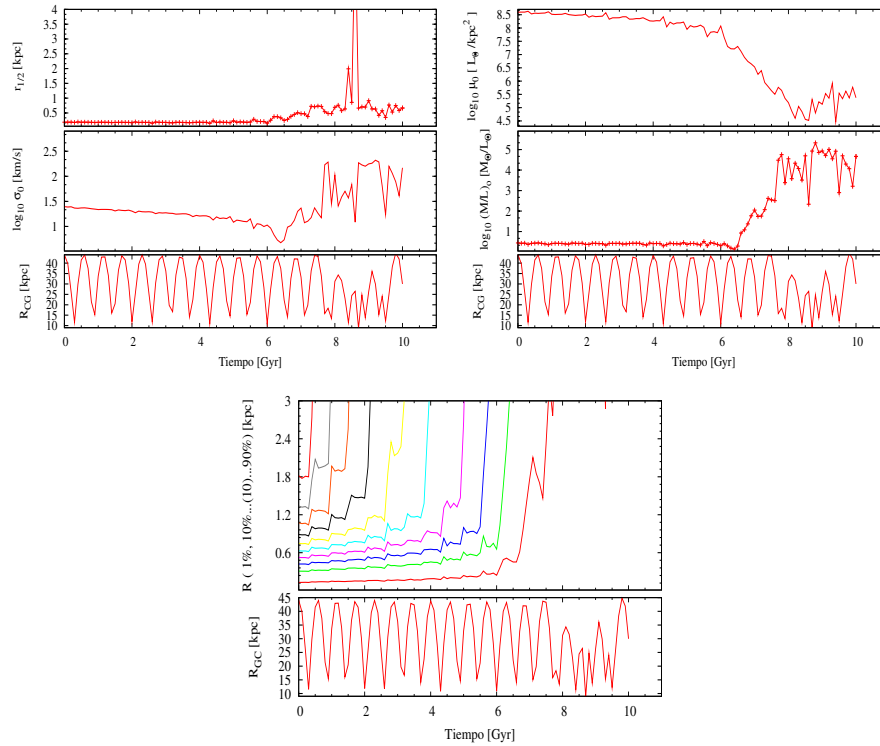


Figura 6.14: Evolución de las propiedades físicas de un satélite con masa inicial de  $5 \times 10^8 M_{\odot}$  y radio de 0.6 kpc ubicado a 44 kpc del centro galáctico.

Al analizar nuevamente los primeros 6 Gyr, el brillo superficial del satélite permanece con un valor del orden de  $10^8 L_{\odot}/kpc^2$ . Posteriormente, ésta cantidad disminuye un orden de magnitud cada Gyr, llegando hasta  $1.5 \times 10^5 L_{\odot}/kpc^2$  cuando la galaxia es completamente destruida. Como en las cantidades anteriores, el sistema llega a tener un brillo superficial como el de Sagitario a los 7.1 Gyr.

Por otra parte, la relación masa-luminosidad de esta galaxia durante los primeros 6 Gyr está entre 2 y 3  $M_{\odot}/L_{\odot}$ ; después de este tiempo, su valor aumenta exponencialmente hasta llegar a  $350 M_{\odot}/L_{\odot}$  en donde el satélite es completamente desgarrado. A diferencia de los casos anteriores, la M/L que está entre los valores de sagitario es reproducida a los 6.7 Gyr en donde la galaxia está a 32 kpc del centro galáctico.

Finalmente se puede observar en la última gráfica de la figura 6.14 que el tiempo de vida de este satélite es de 7.6 Gyr. A los 0.9 y 7.7 Gyr (ver tabla 6.1) éste reproduce la posición actual de sagitario; sin embargo, para el primer tiempo, tanto la masa actual como el brillo superficial y la dispersión de velocidades son más altos que los valores medidos para Sagitario. En 7.7 Gyr, el satélite ya ha sido totalmente destruido. Ahora bien, para un tiempo de 7.1 Gyr, este satélite está localizado a 15.04 kpc del centro galáctico, su radio de brillo medio es igual a 0.47 kpc y su brillo superficial es de  $1.79 \times 10^6 L_{\odot}/kpc^2$ , un valor muy cercano al de Sagitario. Al igual que una galaxia de  $6 \times 10^8 M_{\odot}$ , con estos resultados, se podría decir

que éste satélite podría ser un posible progenitor de Sagitario sin materia oscura; sin embargo, la masa encerrada para este tiempo es de tan sólo de  $5 \times 10^6 M_{\odot}$ ; la relación masa-luminosidad es de  $55 M_{\odot}/L_{\odot}$  y las coordenadas galactocéntricas no son las mismas de Sagitario. Ahora bien, al introducir un halo de materia oscura, tanto la dispersión de velocidades como el brillo superficial aumentarían, por lo tanto, si una galaxia tuvo una masa inicial de  $5 \times 10^8 M_{\odot}$  o si su radio de Plummer tuvo un valor de 0.6 kpc, ésta no pudo haber sido el progenitor de Sagitario.

#### **Satélite con masa inicial de $5 \times 10^8 M_{\odot}$ y radio de Plummer de 0.5 kpc:**

En la figura 6.15 se muestra la evolución de las propiedades físicas de un satélite con masa inicial de  $5 \times 10^8 M_{\odot}$  y radio de Plummer de 0.5 kpc. Como se puede apreciar, durante los 10 Gyr de la evolución de este satélite, el radio de brillo medio se puede ajustar como una constante de valor 0.14 kpc; sin embargo, el radio de brillo medio inicial en esta galaxia es 0.15 kpc; una vez este sistema no pierde más masa, esto es, a los 9.1 Gyr cuando tiene el 30% de su masa inicial, el radio de brillo medio es igual a 0.14 kpc. A los 10 Gyr, ésta cantidad es igual a 0.13 kpc. Estos resultados indican que este satélite no reproduce el radio de brillo medio de Sagitario.

Al analizar la dispersión de velocidades, se observa que esta cantidad disminuye a medida que el satélite es desgarrado. Al comienzo de la simulación, tiene un valor de de 26.9 km/s; a los 9.1 Gyr, es igual a 18.3 km /s; y a los 10 Gyr, disminuye hasta 17.9 km/s. Como se puede notar, durante todo el tiempo de evolución, la dispersión de velocidades siempre es mayor que la de Sagitario.

Al igual que el radio de brillo medio y la dispersión de velocidades, el brillo superficial también decrece; sin embargo, siempre mantiene un orden de magnitud de  $10^8 L_{\odot}/kpc^2$ . Este valor, nuevamente es más alto que el medido para Sagitario.

Con respecto a la relación masa-luminosidad, para este sistema permanece en promedio constante con un valor de  $2.4 M_{\odot}/L_{\odot}$ . Este valor es mucho menor que el correspondiente a Sagitario.

Finalmente, un satélite con masa de  $5 \times 10^8 M_{\odot}$  y radio de 0.5 kpc sobrevive hasta un tiempo de Hubble con el 30% de su masa inicial. En 0.9 y 9.4 Gyr este sistema está ubicado en la posición actual de Sagitario; sin embargo su brillo superficial y dispersión de velocidades son más altas que nuestra galaxia enana; además mientras que en el primer tiempo la masa es mayor, para el segundo tiempo, mucho menor que la de Sagitario. Por estas razones se descarta la posibilidad que el progenitor hubiera tenido o una masa inicial de  $5 \times 10^8 M_{\odot}$  o un radio de Plummer de 0.5 kpc.

#### **Satélite con masa inicial de $5 \times 10^8 M_{\odot}$ y radio de Plummer de 0.3 kpc:**

En la figura 6.16 se muestra la evolución de las propiedades físicas de un satélite con masa inicial de  $5 \times 10^8 M_{\odot}$  y radio de Plummer de 0.3 kpc. Al observar el radio de brillo medio, se tendería a pensar que ésta cantidad disminuye; sin embargo, al observar la escala, se puede apreciar que se mantiene con un

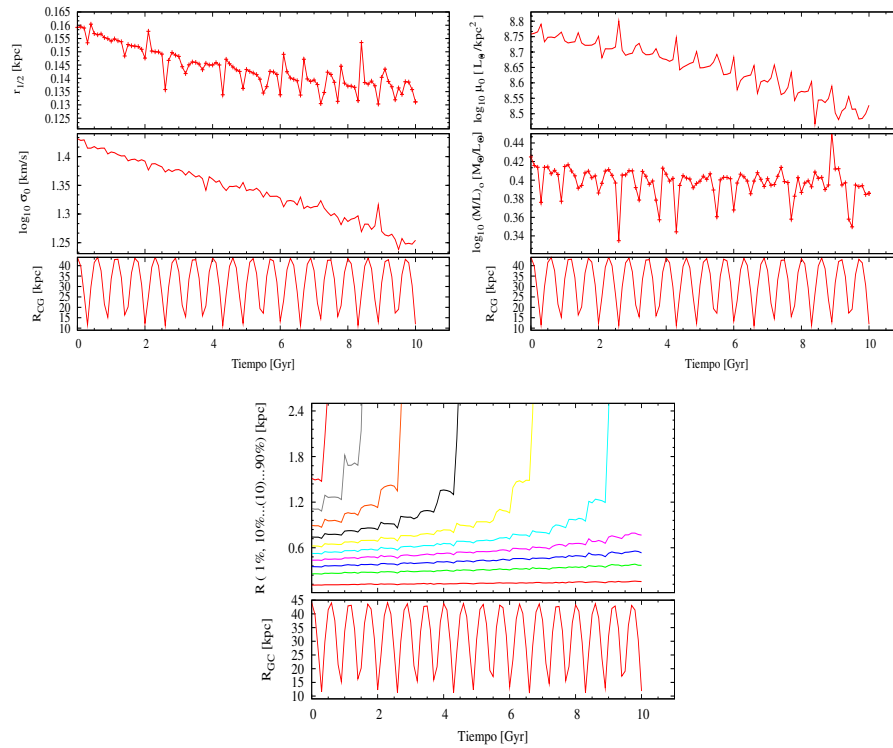


Figura 6.15: Evolución de las propiedades físicas de un satélite con masa inicial de  $5 \times 10^8 M_{\odot}$  y radio de 0.5 kpc ubicado a 44 kpc del centro galáctico.

valor de 0.1 kpc durante 10 Gyr. Esto se debe a que sólo el 9% de la masa del satélite es desgarrada. El anterior resultado indica que este satélite no reproduce el radio de brillo medio de Sagitario.

Al analizar la dispersión de velocidades del satélite, se nota que ésta disminuye lentamente, comenzando en 34.5 km/s y terminando con 32.6 km/s. A los 4.5 Gyr, cuando el satélite pierde el 9% de su masa inicial, la dispersión de velocidades es de 33.7 km/s. Como se puede observar, esta galaxia nunca reproduce el valor de la dispersión de velocidades actualmente medida para Sagitario.

En cuanto al brillo superficial, ésta cantidad permanece constante durante los 10 Gyr con valores entre  $1.4 \times 10^9$  y  $1.6 \times 10^9 L_{\odot}/kpc^2$ . La relación masa-luminosidad varía entre 2.5 y  $2.3 M_{\odot}/L_{\odot}$ . Como se observa, ninguna de estas cantidades concuerdan con los valores medidos en Sagitario.

Finalmente, este satélite es extremadamente estable, debido a que el 80% de su masa inicial no se desgarrada durante 12 Gyr. Este sistema en 0.9 y 9.6 Gyr reproduce la posición actual de Sagitario; sin embargo, en estos dos momentos, tanto el brillo superficial como la dispersión de velocidades son más altos que los valores actuales medidos. Nótese en la tabla 6.1 que este satélite es tres órdenes de magnitud más brillante que sagitario y su radio de brillo medio es extremadamente bajo. De los anteriores resultados se concluye que el progenitor de sagitario no pudo haber tenido o un radio un radio de 0.3 kpc o una masa inicial de

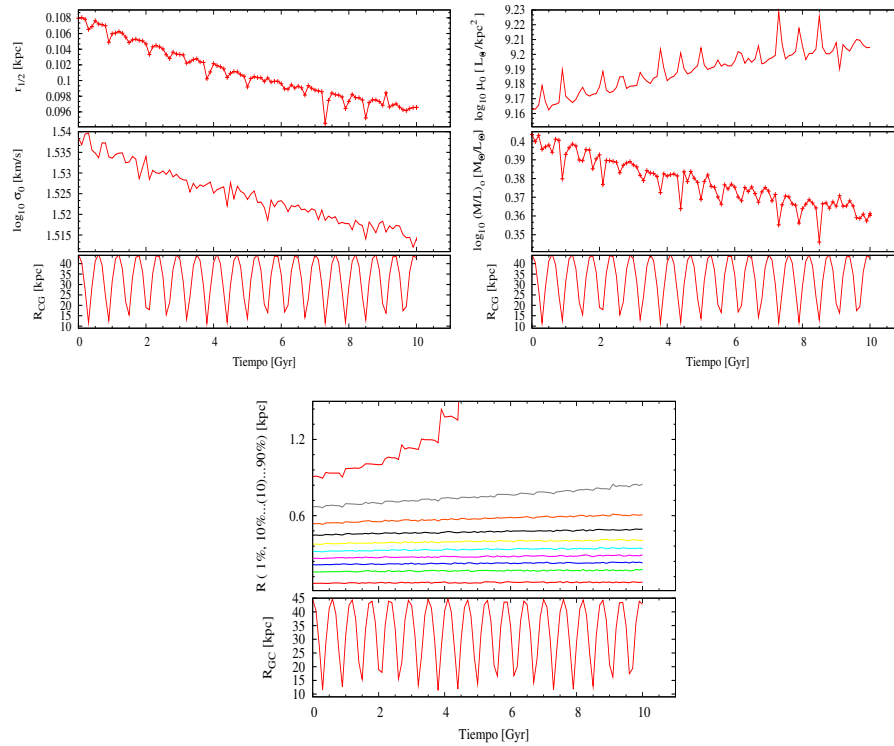


Figura 6.16: Evolución de las propiedades físicas de un satélite con masa inicial de  $5 \times 10^8 M_{\odot}$  y radio de 0.3 kpc ubicado a 44 kpc del centro galáctico.

$5 \times 10^8 M_{\odot}$ .

### 6.3.2. Distancia apocéntrica de 60 kpc

En la tabla 6.2 se muestran los resultados obtenidos para diferentes satélites cuando parten desde una distancia de 60 kpc al centro galáctico. Al igual que en la sección anterior, estos valores se comparan con las observaciones, las cuales se presentan en la tabla 3.1.

#### Satélite con masa inicial de $1 \times 10^9 M_{\odot}$ y radio de Plummer de 0.6 kpc:

Al comparar la evolución de un satélite de masa de  $1 \times 10^9 M_{\odot}$  y radio de Plummer de 0.6 kpc cuando parte desde 44 kpc (figura 6.6) y 60 kpc (figura 6.17), se puede observar que mientras para el primer caso sobrevive el 40% de su masa inicial, para el segundo caso, el 60%. Además, la evolución de las propiedades físicas es la misma.

El radio de brillo medio del satélite durante los 10 Gyr de evolución oscila entre 0.175 y 0.18 kpc; por lo tanto, no reproduce el medido para Sagitario.

En cuanto a la dispersión de velocidades, éste satélite empieza con 34.9 km/s y después de 10 Gyr, su

Masa inicial	Radio plummer	t	Masa actual	$r_{1/2}$	$\mu_0$	$\sigma_0$	M/L
$1 \times 10^9$	0.6	1.2	$1 \times 10^9$	0.18	$7.8 \times 10^8$	33.69	2.58
$6 \times 10^8$	0.6	1.2	$4.8 \times 10^8$	0.19	$4.3 \times 10^8$	25.11	2.53
$6 \times 10^8$	0.5	1.2	$6 \times 10^8$	0.16	$6.63 \times 10^8$	28.5	2.62
		3.5	$4.8 \times 10^8$	0.15	$6.61 \times 10^8$	27.05	2.41
$5 \times 10^8$	0.6	1.2	$4 \times 10^8$	0.18	$3.81 \times 10^8$	22.44	2.38
$5 \times 10^8$	0.5	1.2	$5 \times 10^8$	0.15	$5.56 \times 10^8$	25.6	2.47
		3.5	$3.5 \times 10^8$	0.14	$5.49 \times 10^8$	23.96	2.32

Tabla 6.2: Propiedades físicas para distintas galaxias enanas cuando están ubicadas a 60 kpc del centro galáctico. Las masas están medidas en  $M_\odot$ , el radio de plummer y el de brillo medio  $r_{1/2}$ , en kpc; el tiempo en Gyr; el brillo superficial central  $L_0$  en  $L_\odot/kpc^2$ ; la dispersión de velocidades central  $\sigma_0$ , en km/s y la relación masa-luminosidad, en  $M_\odot/L_\odot$ .

valor se ha reducido hasta 29.5 km/s; esto quiere decir, que ésta galaxia durante el tiempo de simulación tampoco reproduce la dispersión de velocidades de Sagitario. Lo mismo ocurre con su brillo superficial, el cual, así disminuya lentamente a medida que el satélite se desgarrar, se mantiene del orden de  $10^8 L_\odot/kpc^2$ .

Con respecto a la relación masa-luminosidad, ésta oscila entre 2.5 y 2.7  $M_\odot/L_\odot$  durante 10 Gyr; al igual que las demás propiedades físicas, éste valor no concuerda con el medido para Sagitario.

Finalmente, la última gráfica de la figura 6.17 indica que éste satélite es bastante estable debido a que el 60% de su masa inicial sobrevive durante 10 Gyr; esto indica que no será desgarrado en su totalidad en un tiempo de Hubble y por lo tanto no necesitaría de materia oscura. La tabla 6.2 indica que esta galaxia reproduce la posición actual de Sagitario a los 1.2 Gyr; tiempo en el cual, el satélite no se ha desgarrado y su brillo superficial y dispersión de velocidades son mucho más altas que los valores medidos en Sagitario; contrario a lo que ocurre con el radio de brillo medio y la relación masa-luminosidad, los cuales tienen valores más bajos. Debido a esto y al hecho que esta galaxia durante 10 Gyr de evolución no reproduce ninguna de las propiedades físicas medidas así parta desde 44 ó 60 kpc, se sigue pensando que el progenitor de Sagitario no pudo tener o una masa de  $1 \times 10^9 M_\odot$  o un radio de Plummer de 0.6 kpc.

#### Satélite con masa inicial de $6 \times 10^8 M_\odot$ y radio de Plummer de 0.6 kpc:

Al comparar el comportamiento de un satélite cuya masa inicial es  $6 \times 10^8 M_\odot$  y que tiene un radio de Plummer de 0.6 kpc cuando parte desde 44 kpc (figura 6.12) y 60 kpc (figura 6.18), se puede observar que para esta última distancia apocéntrica, el 30% de la masa inicial de la galaxia sobrevive durante 10 Gyr; por lo tanto, este sistema no necesitaría de materia oscura para poder vivir durante un tiempo de Hubble.

Al observar el comportamiento del radio de brillo medio para este satélite, se observa que se mantiene constante entre 0.16 y 0.18 kpc. Nótese que durante todo el tiempo de simulación, éste satélite no reproduce el radio de brillo medio de Sagitario.

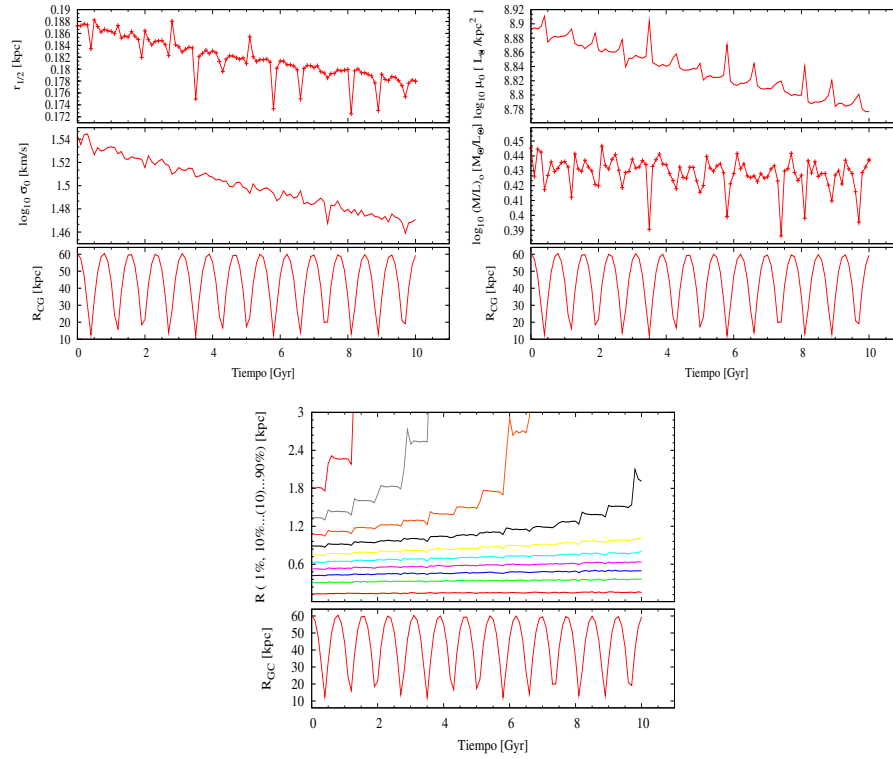


Figura 6.17: Evolución de las propiedades físicas de un satélite con masa inicial de  $1 \times 10^9 M_{\odot}$  y radio de 0.6 kpc ubicado a 60 kpc del centro galáctico.

Con respecto a la dispersión de velocidades, ésta disminuye lentamente comenzando en 26.7 km/s y después de 10 Gyrs de evolución, este valor es igual a 16.4km/s.

Al igual que la dispersión de velocidades, el brillo superficial disminuye pero lentamente, permaneciendo del orden de magnitud de  $10^8 L_{\odot}/\text{kpc}^2$ .

Con respecto a la relación masa-luminosidad, ésta permanece en promedio constante durante 10 Gyr de evolución, oscilando entre 2.5 y 2.7  $M_{\odot}/L_{\odot}$ . Como se aprecia, esta galaxia tiene una relación masa-luminosidad menor que la medida en Sagitario.

Finalmente, al apreciar la tabla 6.2, a los 1.2 Gyr de evolución este sistema se encuentra en la posición actual de Sagitario. Durante este tiempo, la masa, brillo superficial y dispersión de velocidades del satélite tienen valores más altos que los medidos en Sagitario; mientras que el radio de brillo medio y la relación masa-luminosidad son menores. De estos resultados, se concluye que una galaxia cuya masa sea de  $6 \times 10^8 M_{\odot}$  o cuyo radio de Plummer sea de 0.6 kpc, no pudo ser el progenitor de Sagitario.

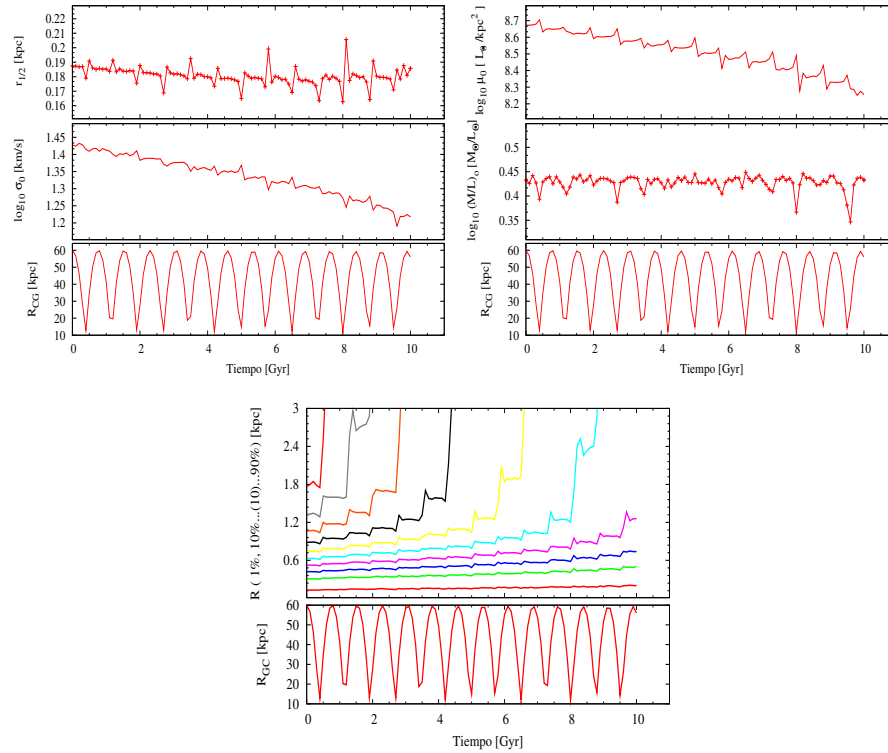


Figura 6.18: Evolución de las propiedades físicas de un satélite con masa inicial de  $6 \times 10^8 M_{\odot}$  y radio de 0.6 kpc ubicado a 60 kpc del centro galáctico.

### Satélite con masa inicial de $6 \times 10^8 M_{\odot}$ y radio de Plummer de 0.5 kpc:

Al comparar el comportamiento de un satélite cuya masa inicial es  $6 \times 10^8 M_{\odot}$  y que tiene un radio de Plummer de 0.5 kpc cuando parte desde 44 kpc (figura 6.13) y 60 kpc (figura 6.19), se puede observar que para esta última distancia apocéntrica, el 60 % de la masa inicial de la galaxia sobrevive durante 10 Gyr; por lo tanto, este sistema vive durante un tiempo de Hubble sin necesidad de estar inmerso en un halo de materia oscura.

Al observar el comportamiento del radio de brillo medio para este satélite, se aprecia que disminuye muy lentamente durante todo el tiempo de la simulación. Ésta cantidad va desde 0.158 kpc hasta 0.148 kpc. Esta disminución tan lenta se debe a la gran estabilidad de la galaxia. Estos resultados indican que éste satélite tiene un radio de brillo medio siempre menor que el medido en Sagitario.

La dispersión de velocidades también disminuye muy lentamente a medida que la galaxia es desgarrada. Este satélite empieza con 29.5 km/s y a los 10 Gyr, disminuye hasta los 24.7 km/s. Como se aprecia, este sistema no reproduce la dispersión de velocidades de Sagitario.

En cuanto al brillo superficial, ésta cantidad también disminuye lentamente ; sin embargo, siempre permanece del orden de magnitud de  $10^8 L_{\odot}/kpc^2$ , siendo mayor al brillo superficial actual de Sagitario. Con

respecto a la relación masa-luminosidad, permanece en promedio constante durante 10 Gyr de evolución, con un valor de  $2.5 M_{\odot}/L_{\odot}$ . Como se aprecia, siempre es menor que el medido en Sagitario.

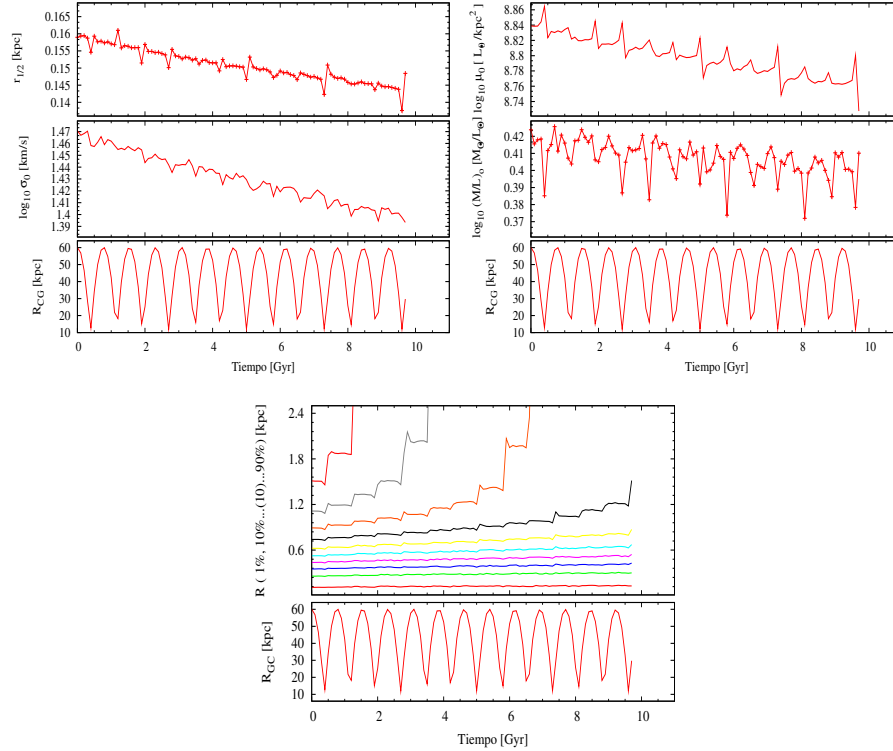


Figura 6.19: Evolución de las propiedades físicas de un satélite con masa inicial de  $6 \times 10^8 M_{\odot}$  y radio de 0.5 kpc ubicado a 60 kpc del centro galáctico.

Finalmente, la tabla 6.2 muestra que el satélite se encuentra en la posición actual de Sagitario a los 1.2 y 3.5 Gyr. Para los dos tiempos, la masa actual del satélite siempre es mayor que la actual de Sagitario; además, puesto que la galaxia nunca reproduce las propiedades físicas observadas, se concluye que una galaxia cuya masa o radio inicial sea de  $6 \times 10^8 M_{\odot}$  o 0.5 kpc, no pudo haber sido el progenitor de Sagitario.

#### Satélite con masa inicial de $5 \times 10^8 M_{\odot}$ y radio de Plummer de 0.6 kpc:

Al comparar el comportamiento de un satélite cuya masa inicial es  $5 \times 10^8 M_{\odot}$  y que tiene un radio de Plummer de 0.6 kpc cuando parte desde 44 kpc (figura 6.14) y 60 kpc (figura 6.20), se puede observar que para esta última distancia apocéntrica, el 20% de la masa inicial de la galaxia sobrevive durante 10 Gyr; por lo tanto, este sistema no necesitaría estar inmerso en un halo de materia oscura para poder vivir durante un tiempo de Hubble.

Con respecto a la evolución del radio de brillo medio, se observa que disminuye muy lentamente hasta los 8.8 Gyr. Durante este tiempo, ésta cantidad va desde 0.18 kpc hasta 0.17 kpc. Posteriormente, cuando el

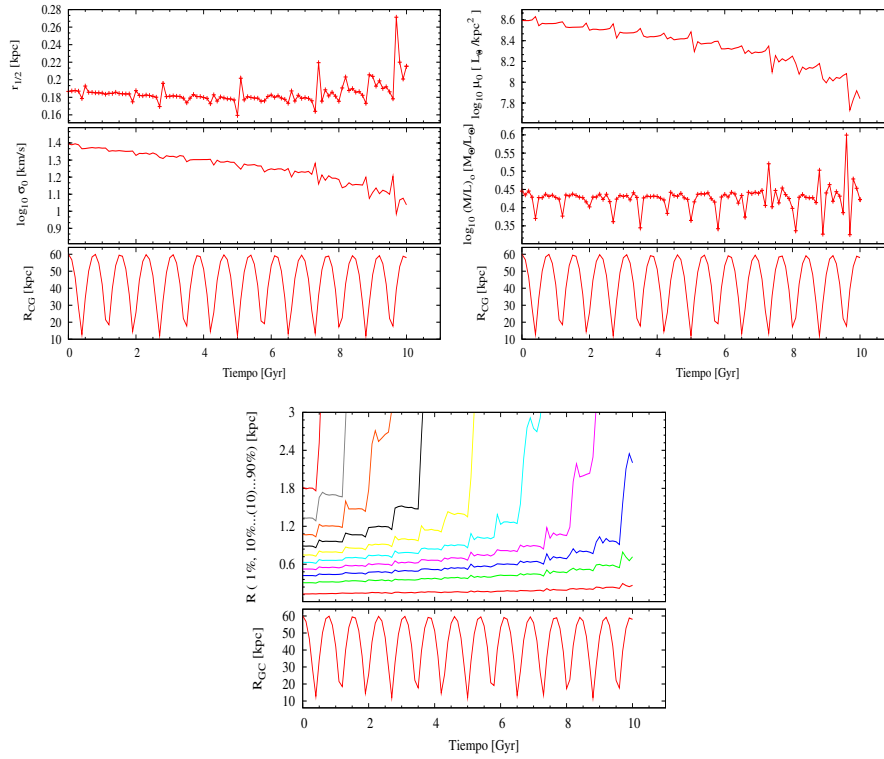


Figura 6.20: Evolución de las propiedades físicas de un satélite con masa inicial de  $5 \times 10^8 M_{\odot}$  y radio de 0.6 kpc ubicado a 60 kpc del centro galáctico.

radio del 20 % de la masa inicial comienza a aumentar, el radio de brillo medio, también, llegando hasta un valor final de 0.215 kpc. Según estos resultados, éste satélite no reproduce el radio de brillo medio de Sagitario.

Como es de esperarse, la dispersión de velocidades de la galaxia disminuye a medida que ésta es desgarrada. Este satélite empieza con 24.7 km/s y cuando queda el 20 % de su masa inicial a los 10 Gyr, su dispersión de velocidades disminuye hasta los 10.9 km/s. A los 9.8 Gyr, ésta cantidad tiene un valor de 11.6 km/s; sin embargo, el satélite está localizado a 52.7 kpc del centro galáctico.

Al igual que las propiedades físicas anteriormente descritas, el brillo superficial disminuye; sin embargo, durante los primeros 9.6 Gyr, muy lentamente, permaneciendo del orden de magnitud de  $10^8 L_{\odot}/kpc^2$ . Después de este tiempo, el brillo superficial disminuye un orden más de magnitud, llegando a  $6.94 \times 10^7 L_{\odot}/kpc^2$  a los 10 Gyr. Como se puede apreciar, ésta galaxia siempre tiene un brillo superficial más alto que Sagitario.

Con respecto a la relación masa-luminosidad, ésta permanece en promedio constante durante 10 Gyr de evolución con un valor de  $2.7 M_{\odot}/L_{\odot}$ . Esta cantidad, siempre es menor que la medida en Sagitario.

Finalmente, se observa en la tabla 6.2, que a los 1.2 Gyr de evolución este sistema se encuentra en la posición actual de Sagitario. Durante este tiempo, aunque la masa esté en el rango medido para esta galaxia enana, el brillo superficial y dispersión de velocidades del satélite tienen valores más altos que los de Sagitario; el radio de brillo medio y la relación masa-luminosidad, son menores. De estos resultados, se concluye que una galaxia que haya empezado su evolución a 60 kpc del centro de la Vía Láctea, cuya masa o radio de Plummer sean  $5 \times 10^8 M_\odot$  o 0.6 kpc, no pudo ser el progenitor de Sagitario.

### Satélite con masa inicial de $5 \times 10^8 M_\odot$ y radio de Plummer de 0.5 kpc:

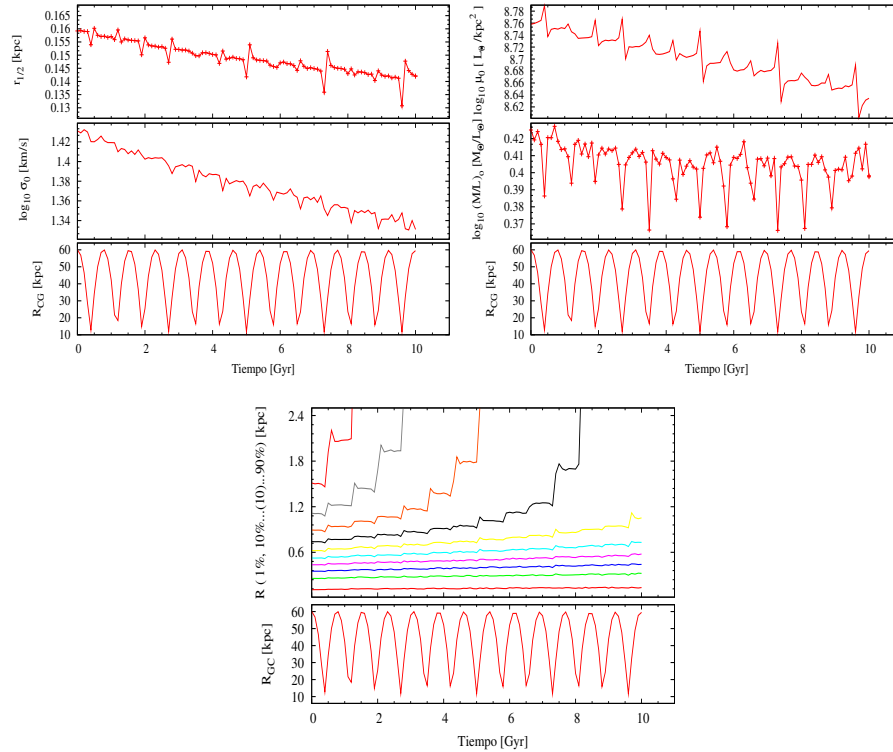


Figura 6.21: Evolución de las propiedades físicas de un satélite con masa inicial de  $5 \times 10^8 M_\odot$  y radio de 0.5 kpc ubicado a 60 kpc del centro galáctico.

Al comparar el comportamiento de un satélite cuya masa inicial es  $5 \times 10^8 M_\odot$  y que tiene un radio de Plummer de 0.5 kpc cuando parte desde 44 kpc (figura 6.15) y 60 kpc (figura 6.21), se puede observar que para esta última distancia apocéntrica, el 50% de la masa inicial de la galaxia sobrevive durante 10 Gyr; por lo tanto, este sistema no necesitaría de materia oscura para poder vivir durante un tiempo de Hubble.

Al observar el comportamiento del radio de brillo medio para este satélite, se aprecia que disminuye muy lentamente durante todo el tiempo de la simulación. Ésta cantidad va desde 0.16 kpc hasta 0.14 kpc. Este último valor permanece constante después de los 8 Gyr, cuando la galaxia deja de ser desgarrada. Nótese que durante todo el tiempo de simulación, éste satélite tiene un radio de brillo medio siempre menor que

el medido en Sagitario.

La dispersión de velocidades también disminuye a medida que la galaxia es desgarrada. Este satélite empieza con 26.9 km/s y cuando queda el 50 % de su masa inicial a los 10 Gyr, esta cantidad disminuye hasta los 21.42 km/s. De estos resultados se concluye que este sistema no reproduce la dispersión de velocidades de Sagitario.

En cuanto al brillo superficial, ésta cantidad también disminuye; sin embargo, siempre permanece del orden de magnitud de  $10^8 L_{\odot}/kpc^2$ , siendo siempre mayor al brillo superficial actual de Sagitario. Con respecto a la relación masa-luminosidad, permanece en promedio constante durante 10 Gyr de evolución, con un valor de  $2.5 M_{\odot}/L_{\odot}$ . Como se aprecia, siempre es menor que el medido en Sagitario.

Finalmente, la tabla 6.2 muestra que el satélite se encuentra en la posición actual de sagitario a los 1.2 y 3.5 Gyr. Mientras que para el primer tiempo el satélite no se ha desgarrado, para el segundo, éste posee la masa actual de Sagitario. Ahora bien, puesto que la galaxia nunca reproduce las propiedades físicas observadas, se concluye que una galaxia cuya masa o radio inicial sea de  $5 \times 10^8 M_{\odot}$  o 0.5 kpc, no pudo haber sido el progenitor de Sagitario.

DA	Lento desgarramiento		Continuo desgarramiento		Rápido desgarramiento	
	M [ $M_{\odot}$ ]	$R_p$ [kpc]	M [ $M_{\odot}$ ]	$R_p$ [kpc]	M [ $M_{\odot}$ ]	$R_p$ [kpc]
44 kpc	$1 \times 10^9$	0.6	$7 \times 10^8$	0.6	$1 \times 10^9$	1.2
	$9 \times 10^8$	0.6	$6 \times 10^8$	0.6		
	$8 \times 10^8$	0.6	$5 \times 10^8$	0.6		
	$7 \times 10^8$	0.5				
	$6 \times 10^8$	0.5				
	$5 \times 10^8$	0.5				
	$5 \times 10^8$	0.3				
60 kpc	$1 \times 10^9$	0.6	$5 \times 10^8$	0.6	—	
	$6 \times 10^8$	0.6				
	$6 \times 10^8$	0.5				
	$5 \times 10^8$	0.5				

Tabla 6.3: División de las galaxias simuladas cuando parten desde 44 y 60 kpc del centro galáctico.

De las secciones 6.2 y 6.3, se aprecia que la evolución de las propiedades físicas de algunos satélites es la misma; debido a esto, se agruparon en tres grupos a saber: Las galaxias de *lento*, *continuo* y *rápido desgarramiento*.

Las galaxias de lento desgarramiento corresponden a los satélites más densos. Estas galaxias se caracterizan porque el 30 % o más de su masa inicial puede sobrevivir hasta 10 Gyrs; debido a esta gran estabilidad, no necesitan de un halo de materia oscura para sobrevivir durante un tiempo de Hubble; además, como su nombre lo indica, se desgarran lentamente a medida que evolucionan dentro del potencial rígido que representa a nuestra galaxia.

Las galaxias de continuo desgarramiento tienen tiempos de vida diferentes. Mientras que para algunas, entre el 10 % y 20 % de su masa inicial sobrevive durante 10 Gyrs; otras tienen un tiempo de vida entre 7 y 9 Gyrs.

Con respecto a las las galaxias de rápido desgarramiento, éstas se caracterizan porque su tiempo de vida no sobrepasa los 6 Gyrs. En esta clasificación sólo se encuentra la galaxia de masa inicial de  $1 \times 10^9 M_{\odot}$  y radio de Plummer de 1.2 kpc. En la tabla 6.3 se muestran los satélites que pertenecen a cada división cuando parten desde 44 y 60 kpc del centro galáctico y en la tabla 6.4 se muestran sus características más significativas.

Como se pudo observar a lo largo de las secciones 6.2 y 6.3 se tienen dos criterios para determinar las posibles características iniciales que pudo tener el progenitor de Sagitario: la masa y el radio de Plummer. Nótese que la evolución de un satélite de masa  $1 \times 10^9 M_{\odot}$  es diferente cuando tiene un radio de Plummer de 0.6 kpc (galaxia muy densa, de lento desgarramiento) a cuando tiene un radio de 1.2 kpc (galaxia de rápido desgarramiento); esto hace que nuestro criterio sea el radio de Plummer y no la masa inicial. Por lo tanto, al observar la evolución de las galaxias más densas, notamos que éstas nunca reproducen al Sagitario físico, debido a que estos sistemas, son mucho más estables que lo que estamos observando; y teniendo en cuenta que dentro de estos sistemas se encuentran galaxias cuyos radios de Plummer son 0.5 kpc, se concluye que el progenitor de esta galaxia enana no pudo haber tenido un radio de Plummer menor o igual a 0.5 kpc.

Todas las simulaciones presentadas en este capítulo, indican que no es posible reproducir las propiedades físicas actuales de Sagitario con sistemas cuya materia sea únicamente bariónica; por lo tanto, ésta galaxia tuvo que haberse formado en un halo de materia oscura; sin embargo, su progenitor no pudo ser un sistema muy denso; es decir, no pudo tener un radio menor o igual a 0.5 kpc. Ahora bien, en el caso que el progenitor hubiera tenido una gran masa inicial, su radio debería ser mayor a 0.6 kpc. En el próximo capítulo estudiaremos el comportamiento de galaxias en diferentes contenidos de materia oscura y con base a ello, miraremos si el progenitor de Sagitario pudo tener un radio de 0.6 kpc ó mayor y cuál pudo ser su posible contenido de materia oscura inicial.

Tipo de galaxia	Características
Galaxias de lento desgarramiento	<p><b>Radio de brillo medio:</b> Se mantiene constante oscilando entre 0.17 y 0.19 kpc y sólo disminuye hasta la tercera cifra decimal. Si el radio de Plummer inicial es de 0.5 kpc, ésta cantidad toma valores entre 0.13 y 0.16 kpc y para el caso límite en el que el radio de Plummer sea de 0.3 kpc, el radio de brillo medio permanece constante con valor de 0.1 kpc.</p> <p><b>Dispersión de velocidades:</b> Esta cantidad puede tomar valores entre 23.4 hasta 34.9 km/s. Entre más denso sea un satélite sobreviviente, su dispersión de velocidades será mayor.</p> <p><b>Brillo superficial:</b> Su valor es <math>10^8 L_{\odot}/kpc^2</math> para cualquiera que sea el radio de plummer; sin embargo toma el valor de <math>10^9 L_{\odot}/kpc^2</math> para el caso límite de un satélite de radio de plummer de 0.3 kpc.</p> <p><b>Relación masa-luminosidad:</b> Ésta toma valores entre 2.3 y 2.7 <math>M_{\odot}/L_{\odot}</math> dependiendo de el radio de plummer y la distancia inicial a la cual parta la galaxia.</p>
Galaxias de continuo desgarramiento	<p><b>Radio de brillo medio:</b> Este permanece en promedio constante entre 0.16 y 0.19 kpc; sin embargo, ésta cantidad aumenta hasta 0.2, 0.3 ó 0.7 kpc, dependiendo de la masa inicial de la galaxia, cuando ésta queda con el 10 % ó 20 % de su masa inicial.</p> <p><b>Dispersión de velocidades:</b> Ésta disminuye gradualmente a medida que los satélites son desgarrados y sus valores van desde 29 km/s hasta 10 km/s.</p> <p><b>Brillo superficial:</b> Esta cantidad disminuye lentamente, tomando valores desde <math>10^8</math> hasta <math>10^5 L_{\odot}/kpc^2</math> durante la evolución de los sistemas. En algunos casos, ésta cantidad disminuye sólo en un orden de magnitud.</p> <p><b>Relación masa-luminosidad:</b> Se presenta en promedio constante tomando valores entre 2.4 y 2.7 <math>M_{\odot}/L_{\odot}</math>. Cuando queda el 10 ó 20 % de la masa inicial, ésta cantidad aumenta.</p>
Galaxias de rápido desgarramiento	<p><b>Radio de brillo medio:</b> Éste aumenta rápidamente debido a que estas galaxias son desgarradas en un tiempo muy corto, llegando hasta el valor de 0.7 kpc cuando son completamente destruidas.</p> <p><b>Dispersión de velocidades:</b> Disminuye rápidamente en el periodo de tiempo en el que el satélite es destruido.</p> <p><b>Brillo superficial:</b> Presenta el mismo comportamiento de la dispersión de velocidades.</p> <p><b>Relación masa-luminosidad:</b> Se mantiene en promedio constante en el periodo de tiempo en el que la galaxia es desgarrada.</p>

Tabla 6.4: Características de cada uno de los satélites simulados.

## EVOLUCIÓN DE POSIBLES PROGENITORES DE SAGITARIO CON DIFERENTES CONTENIDOS DE MATERIA OSCURA

En este capítulo se muestra la evolución de satélites cuya masa inicial es de  $7 \times 10^8$  y  $1 \times 10^9 M_\odot$  con radios de 0.6 y 1.2 kpc respectivamente. Se simulan estas galaxias inmersas en diferentes contenidos de materia oscura, se analiza su comportamiento y nuevamente como en el capítulo anterior, se comparan las propiedades físicas de estos sistemas con las correspondientes cantidades observadas de Sagitario (ver tabla 3.1) con el objetivo de conocer las características que pudo haber tenido su progenitor y cómo pudo ser el halo de materia oscura inicial. Los sistemas siempre parten desde una distancia de 44 kpc al centro galáctico.

### 7.1. Relajación de sistemas

#### 7.1.1. Para un satélite de $7 \times 10^8 M_\odot$ y radio de Plummer de 0.6 kpc

##### Halo de $8 \times 10^8 M_\odot$ y concentración de 10

La figura 7.1 muestra la relajación de un halo de  $8 \times 10^8 M_\odot$  y concentración de 10. En ella se puede observar que durante los primeros 2 Gyr, éste se contrae. Posteriormente, los radios que corresponden del 60% al 90% de la masa inicial del halo, se expanden hasta llegar a su estado de equilibrio. Este comportamiento se debe a que en el centro del halo hay una distribución de masa adicional debida al satélite que no es materia oscura y obedece a otro perfil de densidad.

Al inicio de la relajación de todo el sistema halo y satélite, el halo describe un perfil de densidad del tipo NFW (ver figura 7.1 *Abajo izquierda*) con los siguientes parámetros:

$$\begin{aligned} \rho_0 &= 1.11 \times 10^{-4} \quad 10^{10} M_\odot / kpc^3 \\ r_s &= 3.73 \quad kpc \end{aligned}$$

Debido a que todo el halo se contrae, el perfil de densidad de éste después de 8.2 Gyr de evolución no es del tipo NFW; sin embargo, recordemos que la ecuación 5.1 describe la forma general del perfil de densidad de un halo. Al ajustar el perfil del halo cuando han pasado 8.2 Gyr, la función que mejor se ajusta es la dada por los siguientes parámetros:

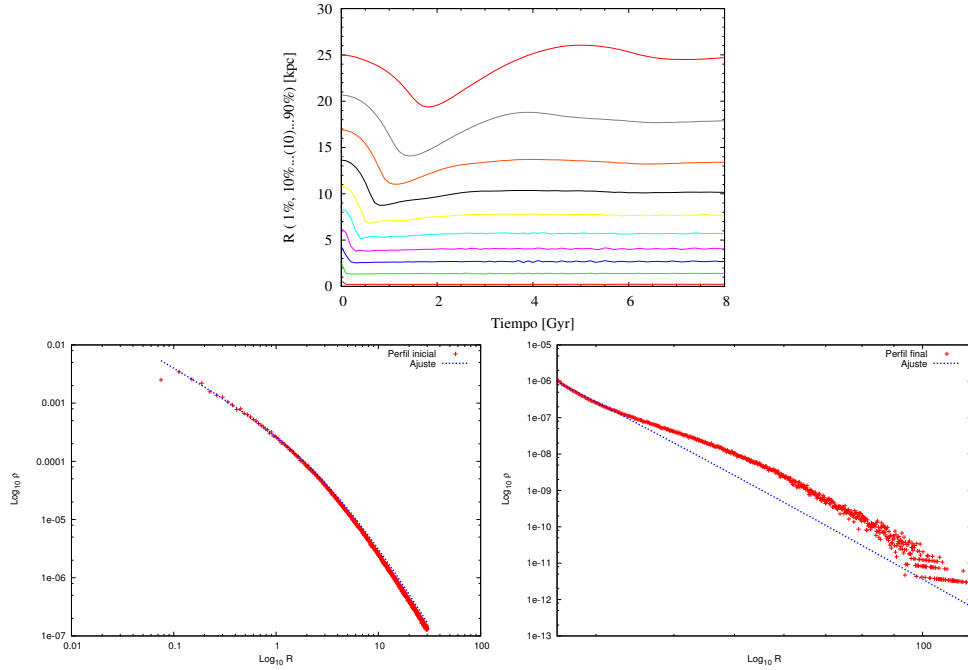


Figura 7.1: *Arriba:* Relaxación durante 8.2 Gyr de un halo cuya masa es de  $8 \times 10^8 M_{\odot}$  y concentración de 10. *Abajo izquierda:* Perfil de densidad inicial y su correspondiente ajuste. *Abajo derecha:* Perfil de densidad final y su correspondiente ajuste. Las unidades de la densidad son  $10^{10} M_{\odot}/kpc^3$  y las del radio, kpc.

$$\rho_0 = 0.41 \times 10^{-6} \quad 10^{10} M_{\odot}/kpc^3$$

$$r_s = 8.15 \quad kpc$$

$$\gamma = 5$$

$$\alpha = 1$$

$$\beta = 10$$

Por lo tanto, el perfil de densidad final del halo está dado por:

$$\rho_f = \frac{0.41 \times 10^{-6}}{\left(\frac{x}{8.15}\right)^5 \left(1 + \left(\frac{x}{24.07}\right)^5\right)^5} \quad (7.1)$$

Las condiciones iniciales de nuestro sistema serán las de su relajación hasta 8.5 Gyr, las cuales se simulan en Gadget2 modificado.

Se realizó también una simulación de un sistema con un halo de  $9 \times 10^7 M_{\odot}$  y concentración de 10. La figura 7.2 muestra su relajación. En ella se puede observar que aproximadamente durante los primeros 1.7 Gyr los radios que pertenecen del 60% hasta el 90% de la masa inicial del halo se contraen. Posteriormente, los radios que corresponden al 70%, 80% y 90% de la masa inicial del halo, sufren pequeñas

contracciones y expansiones hasta llegar a su estado de equilibrio. Este comportamiento se debe a que en el centro del halo hay una distribución de masa adicional debida al satélite. Nótese que los radios que corresponden del 1 % hasta el 50 % de la masa inicial del halo, permanecen inalterados; lo cual quiere decir que las capas internas de éste son muy estables.

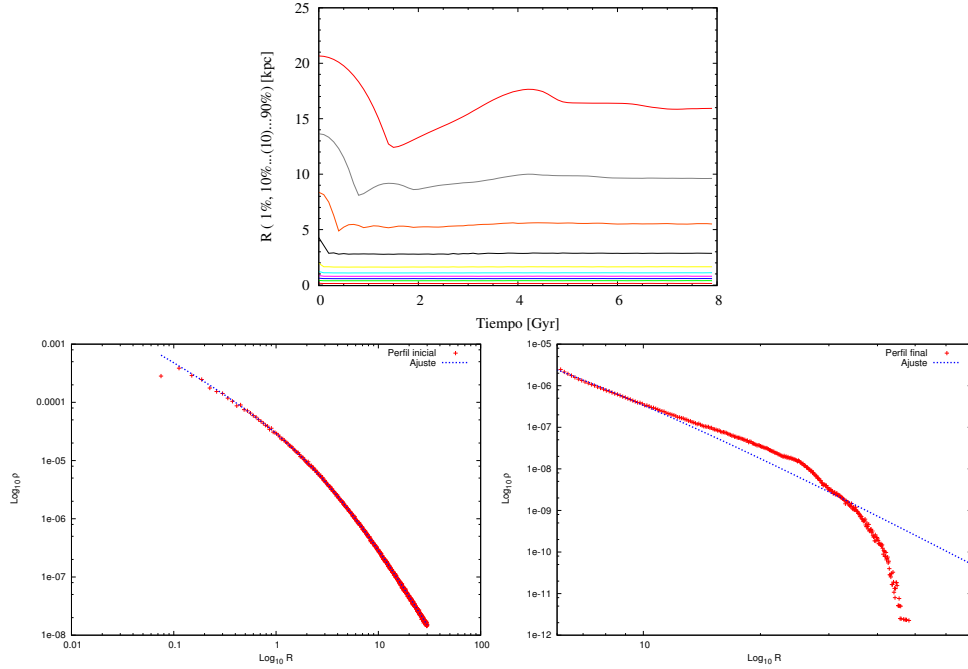


Figura 7.2: *Arriba:* Relajación durante 8.5 Gyr de un halo cuya masa es de  $9 \times 10^7 M_{\odot}$  y concentración de 10. *Abajo izquierda:* Perfil de densidad inicial y su correspondiente ajuste. *Abajo derecha:* Perfil de densidad final y su correspondiente ajuste. Las unidades de la densidad son  $10^{10} M_{\odot}/kpc^3$  y las del radio, kpc.

Al inicio de la relajación de todo el sistema halo y satélite, el halo describe un perfil de densidad del tipo NFW (ver figura 7.2 *Abajo izquierda*) con los siguientes parámetros:

$$\rho_0 = 1.64 \times 10^{-5} \quad 10^{10} M_{\odot}/kpc^3$$

$$r_s = 3.11 \quad kpc$$

Debido a que aproximadamente un 40 % de la masa del halo se contrae, el perfil de densidad de éste después de 8.5 Gyr de evolución no es del tipo NFW; sin embargo, recordemos que la ecuación 5.1 describe la forma general del perfil de densidad de un halo. Al ajustar el perfil del halo cuando han pasado 8.5 Gyr, la función que mejor se ajusta es la dada por los siguientes parámetros:

$$\begin{aligned}
\rho_0 &= 3.37 \times 10^{-4} \quad 10^{10} M_\odot / kpc^3 \\
r_s &= 3.13 \quad kpc \\
\gamma &= 1 \\
\alpha &= 1 \\
\beta &= 5
\end{aligned}$$

Por lo tanto, el perfil de densidad final del halo está dado por:

$$\rho_f = \frac{3.37 \times 10^{-4}}{\left(\frac{x}{3.13}\right) \left(1 + \frac{x}{3.13}\right)^4} \quad (7.2)$$

#### **Halo de $8 \times 10^8 M_\odot$ y concentración de 4**

La figura 7.3 muestra la relajación de un halo de  $8 \times 10^8 M_\odot$  y concentración de 4. En ella se puede observar que durante los primeros 2 Gyr, los radios que pertenecen del 60 % hasta el 90 % de la masa inicial del halo, se contraen. Posteriormente, sólo los radios que corresponden al 80 % y 90 % de la masa inicial del halo, se expanden hasta llegar a su estado de equilibrio. Como en la sección anterior, este comportamiento se debe a que en el centro del halo hay una distribución de masa adicional debida al satélite. Nótese que las capas internas del halo, esto es, hasta el 50 % de su masa inicial, permanecen inalteradas; lo cual quiere decir que éstas son muy estables.

Al inicio de la relajación de todo el sistema halo y satélite, el halo describe un perfil de densidad del tipo NFW (ver figura 7.3 *Abajo izquierda*) con los siguientes parámetros:

$$\begin{aligned}
\rho_0 &= 1.75 \times 10^{-5} \quad 10^{10} M_\odot / kpc^3 \\
r_s &= 7.74 \quad kpc
\end{aligned}$$

Debido a que aproximadamente un 40 % de la masa del halo se contrae, el perfil de densidad de éste después de 8.5 Gyr de evolución no es del tipo NFW; sin embargo, recordemos que la ecuación 5.1 describe la forma general del perfil de densidad de un halo. Al ajustar el perfil del halo cuando han pasado 8.5 Gyr, la función que mejor se ajusta es la dada por los siguientes parámetros:

$$\begin{aligned}
\rho_0 &= 1.91 \times 10^{-6} \quad 10^{10} M_\odot / kpc^3 \\
r_s &= 24.07 \quad kpc \\
\gamma &= 4 \\
\alpha &= 7 \\
\beta &= 11
\end{aligned}$$

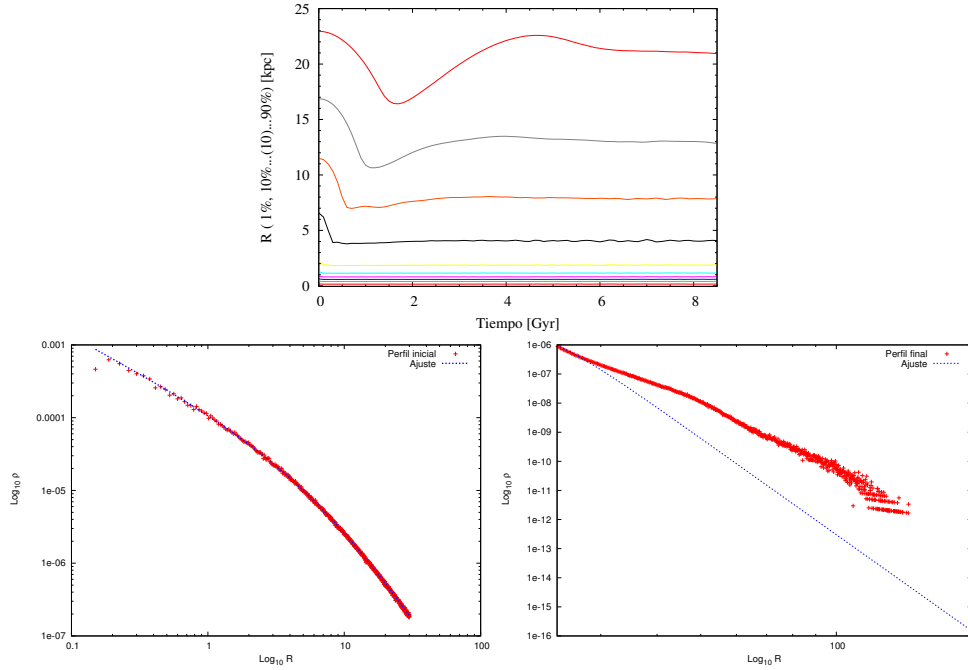


Figura 7.3: *Arriba*: Relajación durante 8.5 Gyr de un halo cuya masa es de  $8 \times 10^8 M_{\odot}$  y concentración de 4. *Abajo izquierda*: Perfil de densidad inicial y su correspondiente ajuste. *Abajo derecha*: Perfil de densidad final y su correspondiente ajuste. Las unidades de la densidad son  $10^{10} M_{\odot}/kpc^3$  y las del radio, kpc.

Por lo tanto, el perfil de densidad final del halo está dado por:

$$\rho_f = \frac{1.91 \times 10^{-6}}{\left(\frac{x}{24.07}\right)^4 \left(1 + \left(\frac{x}{24.07}\right)^7\right)} \quad (7.3)$$

Las condiciones iniciales de nuestro sistema serán las de su relajación hasta 8.5 Gyr, las cuales se simulan en Gadget2 modificado.

#### Halo de $9 \times 10^7 M_{\odot}$ y concentración de 4

La figura 7.4 muestra la relajación de un halo de  $9 \times 10^7 M_{\odot}$  y concentración de 4. En ella se puede observar que aproximadamente durante los primeros 1.8 Gyr, los radios que pertenecen del 60 % hasta el 90 % de la masa inicial del halo, se contraen. Posteriormente, los radios que corresponden al 70 %, 80 % y 90 % de la masa inicial del halo, sufren pequeñas expansiones y contracciones hasta llegar a su estado de equilibrio. Este comportamiento nuevamente se debe a que en el centro del halo hay una distribución de masa adicional debida al satélite. Nótese que las capas internas del halo, esto es, hasta el 50 % de su masa inicial, permanecen inalteradas; lo cual quiere decir que éstas son muy estables.

Al inicio de la relajación de todo el sistema halo y satélite, el halo describe un perfil de densidad del tipo

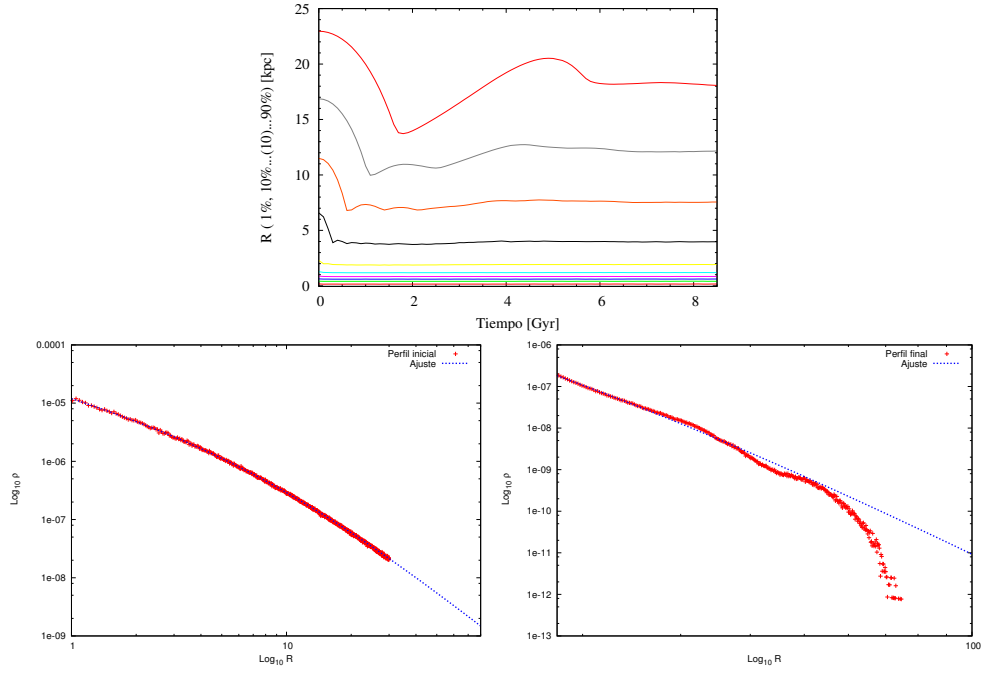


Figura 7.4: *Arriba*: Relajación durante 8.5 Gyr de un halo cuya masa es de  $9 \times 10^7 M_{\odot}$  y concentración de 4. *Abajo izquierda*: Perfil de densidad inicial y su correspondiente ajuste. *Abajo derecha*: Perfil de densidad final y su correspondiente ajuste. Las unidades de la densidad son  $10^{10} M_{\odot}/kpc^3$  y las del radio, kpc.

NFW (ver figura 7.4 *Abajo izquierda*) con los siguientes parámetros:

$$\begin{aligned}\rho_0 &= 1.97 \times 10^{-6} \quad 10^{10} M_{\odot}/kpc^3 \\ r_s &= 7.74 \quad kpc\end{aligned}$$

Debido a que aproximadamente un 40 % de la masa del halo se contrae, el perfil de densidad de éste después de 8.5 Gyr de evolución no es del tipo NFW; sin embargo, recordemos que la ecuación 5.1 describe la forma general del perfil de densidad de un halo. Al ajustar el perfil del halo cuando han pasado 8.5 Gyr, la función que mejor se ajusta es la dada por los siguientes parámetros:

$$\begin{aligned}\rho_0 &= 2.61 \times 10^{-5} \quad 10^{10} M_{\odot}/kpc^3 \\ r_s &= 13.08 \quad kpc \\ \gamma &= 2 \\ \alpha &= 1 \\ \beta &= 7\end{aligned}$$

Por lo tanto, el perfil de densidad final del halo está dado por:

$$\rho_f = \frac{2.61 \times 10^{-5}}{\left(\frac{x}{13.08}\right)^2 \left(1 + \frac{x}{13.08}\right)^5} \quad (7.4)$$

Las condiciones iniciales de nuestro sistema serán las de su relajación hasta 8.5 Gyr, las cuales se simulan en Gadget2 modificado.

### 7.1.2. Para un satélite de $1 \times 10^9 M_\odot$ y radio de Plummer de 1.2 kpc

#### Halo de $9 \times 10^7 M_\odot$ y concentración de 4

La figura 7.5 muestra la relajación de un halo de  $9 \times 10^7 M_\odot$  y concentración de 4. En ella se puede observar que aproximadamente durante los primeros 2 Gyr, los radios que pertenecen del 70 % hasta el 90 % de la masa inicial del halo, se contraen; mientras que los otros radios, aumentan. Contrario a lo que ocurre con los halos de los sistemas explicados en secciones anteriores, éste se caracteriza porque sus capas internas se expanden y contraen durante 9.8 Gyr de relajación, lo cual indica que este sistema no es tan estable.

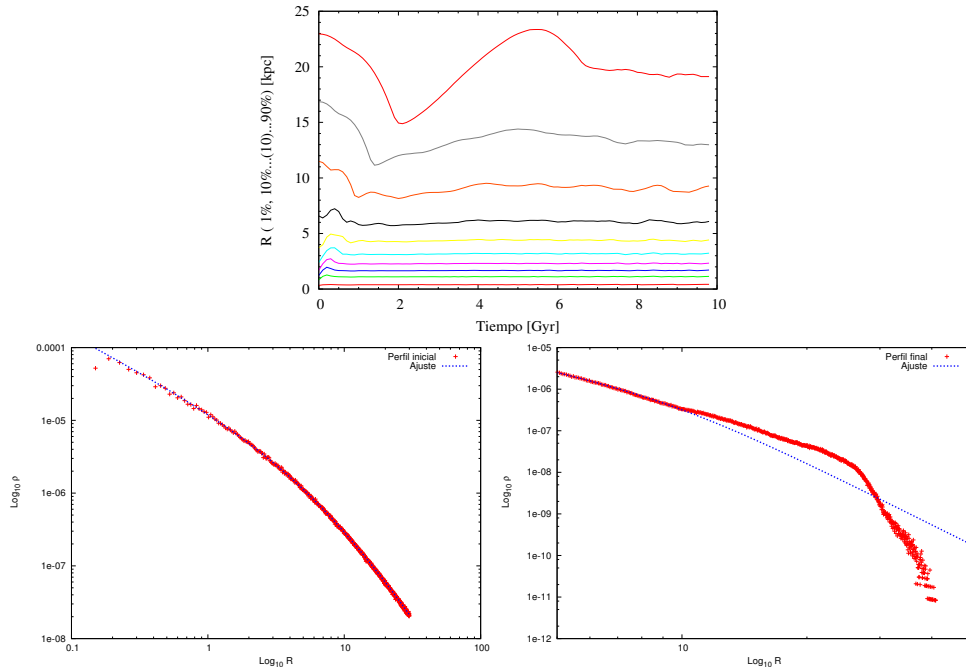


Figura 7.5: *Arriba:* Relajación durante 9.8 Gyr de un halo cuya masa es de  $9 \times 10^7 M_\odot$  y concentración de 4. *Abajo izquierda:* Perfil de densidad inicial y su correspondiente ajuste. *Abajo derecha:* Perfil de densidad final y su correspondiente ajuste. Las unidades de la densidad son  $10^{10} M_\odot/kpc^3$  y las del radio, kpc.

Al inicio de la relajación de todo el sistema halo y satélite, el halo describe un perfil de densidad del tipo NFW (ver figura 7.5 *Abajo izquierda*) con los siguientes parámetros:

$$\rho_0 = 1.96 \times 10^{-6} \quad 10^{10} M_\odot/kpc^3$$

$$r_s = 7.74 \quad kpc$$

Debido a que todo el halo se contrae y expande durante 9.8 Gyr de relajación, el perfil de densidad final de éste no es del tipo NFW; sin embargo, al ajustarlo a la fórmula general dada por Kravtsov (ecuación 5.1), la función que mejor se ajusta es la dada por los siguientes parámetros:

$$\rho_0 = 8.62 \times 10^{-7} \quad 10^{10} M_\odot / \text{kpc}^3$$

$$r_s = 9.18 \quad \text{kpc}$$

$$\gamma = 2$$

$$\alpha = 3$$

$$\beta = 5$$

Por lo tanto, el perfil de densidad final del halo está dado por:

$$\rho_f = \frac{8.62 \times 10^{-7}}{\left(\frac{x}{9.18}\right)^2 \left(1 + \left(\frac{x}{9.18}\right)^3\right)} \quad (7.5)$$

Como se puede observar en todas las relajaciones de los sistemas, luego de un tiempo de simulación, un halo de materia oscura describe un perfil de densidad muy diferente al NFW. Esto se debe a que estos objetos albergan en su centro galaxias de materia bariónica cuya distribución de densidad es del tipo Plummer; sin embargo, el perfil de densidad final de cada uno de los halos aquí estudiados, puede ajustarse a una función que está descrita por la fórmula general de Kravtsov [87].

## 7.2. Evolución de un satélite de $7 \times 10^8 M_\odot$ y radio de Plummer de 0.6 kpc

Halo		t [Gyr]	Masa [ $M_\odot$ ]	$r_{1/2}$ [kpc]	$\mu_0$ [ $L_\odot/\text{kpc}^2$ ]	$\sigma_0$ [km/s]	M/L [ $L_\odot/M_\odot$ ]	
M [ $M_\odot$ ]	$r_s$ [kpc]	C						
$8 \times 10^8$	3	10	0.9	$7 \times 10^8$	0.17	$7.62 \times 10^8$	31.02	2.35
			6.5	$3.5 \times 10^8$	0.15	$5.57 \times 10^8$	22.62	1.96
			9.2	$2.1 \times 10^8$	0.14	$4.71 \times 10^8$	20.20	1.95
$8 \times 10^8$	7.5	4	0.9	$5.6 \times 10^8$	0.18	$6.36 \times 10^8$	28.77	2.30
			6.5	$2.8 \times 10^8$	0.16	$4.1 \times 10^8$	20.31	2.05
			9.2	$1.4 \times 10^8$	0.15	$2.74 \times 10^8$	15.3	1.82
$9 \times 10^7$	7.5	4	0.9	$5.6 \times 10^8$	0.19	$6.53 \times 10^7$	27.31	19.56
			8.2	$1.4 \times 10^8$	0.16	$2.72 \times 10^7$	15	16.9
$9 \times 10^6$	7.5	4	0.9	$5.6 \times 10^8$	0.18	$7.18 \times 10^6$	27.27	184
			7.7	$2.1 \times 10^8$	0.16	$3.68 \times 10^6$	16.9	160

Tabla 7.1: Propiedades físicas de una galaxia de  $7 \times 10^8 M_\odot$  y radio de 0.6 kpc cuando está inmersa en diferentes contenidos de materia oscura y parte desde una distancia de 44 kpc del centro galáctico. La tercera columna indica la masa que tiene el satélite en el tiempo t.

### 7.2.1. Halo de $8 \times 10^8 M_\odot$ y concentración de 10

En la figura 7.6 se muestra la evolución de un satélite de  $7 \times 10^8 M_\odot$  y radio de 0.6 kpc sin presencia de materia oscura e inmersa en un halo de  $8 \times 10^8 M_\odot$  y concentración de 10. Se puede apreciar que cuando

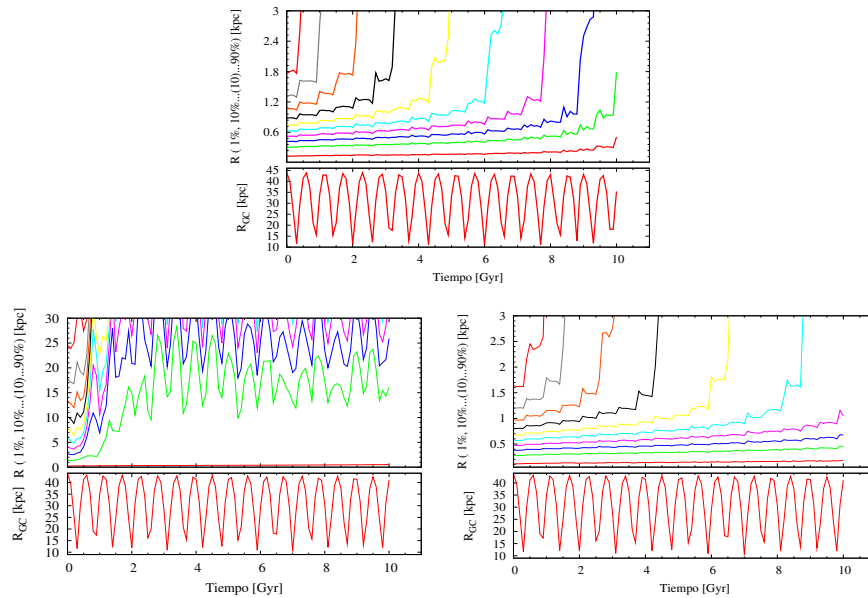


Figura 7.6: *Arriba*: Evolución de una galaxia de  $7 \times 10^8 M_{\odot}$  y radio de 0.6 kpc sin presencia de materia oscura. *Abajo izquierda*: Evolución de un halo de  $8 \times 10^8 M_{\odot}$  y concentración de 10. *Abajo derecha*: Evolución de una galaxia de  $7 \times 10^8 M_{\odot}$  y radio de 0.6 kpc inmersa en este halo.

el satélite es evolucionado sólo con materia bariónica, sobrevive sólo el 10 % de su masa inicial durante 10 Gyrs; al tener un halo de materia oscura, el 30 % de su masa inicial se mantiene durante este mismo intervalo de tiempo. Esto quiere decir, que, efectivamente, el halo de materia oscura actúa como un escudo protector que evita que la galaxia sea desgarrada fácilmente.

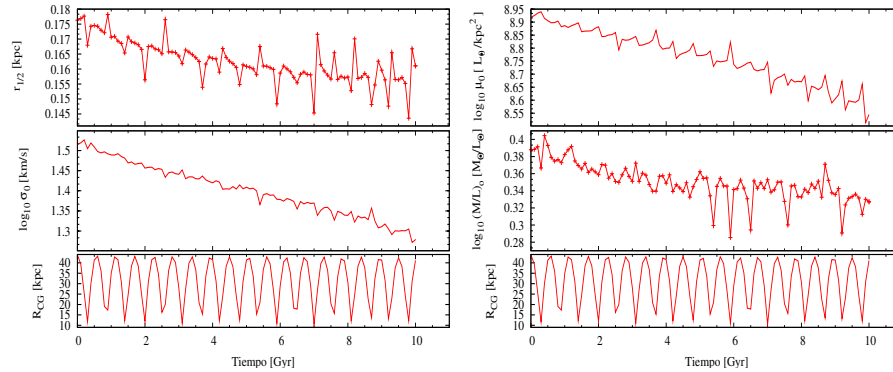


Figura 7.7: Evolución de las propiedades físicas de una galaxia de  $7 \times 10^8 M_{\odot}$  y radio de 0.6 kpc inmersa en un halo de  $8 \times 10^8 M_{\odot}$  y concentración de 4.

Con respecto a la evolución del halo de materia oscura, éste pierde el 40 % de su masa 1 Gyr después que el sistema comienza a evolucionar; en este tiempo, el 10 % de la masa de la galaxia es desgarrada. A los 2.2 Gyr, el halo queda solamente con el 10 % de su masa, esto es,  $8 \times 10^7 M_{\odot}$ ; mientras que el satélite sólo ha perdido el 20 %. Posterior a este tiempo, se observa que la galaxia es desgarrada muy lentamente.

En cuanto a las propiedades físicas de este sistema, se observa en la figura 7.7 que éstas disminuyen lentamente a medida que el satélite es desgarrado. Esta galaxia empieza con un radio de brillo medio de 0.17 kpc y después de 10 Gyr de evolución, esta cantidad disminuye hasta 0.16 kpc. En cuanto a la dispersión de velocidades, ésta va desde 32.7 km/s hasta 18.97 km/s. El brillo superficial, también disminuye pero se mantiene siempre del orden de  $10^8 L_{\odot}/kpc^2$ . La relación masa-luminosidad se mantiene prácticamente constante aproximadamente en  $2.4 M_{\odot}/L_{\odot}$ .

A los 0.9, 6.5 y 9.2 Gyr, la galaxia se encuentra en la posición actual de Sagitario (ver tabla 7.1); sin embargo, el radio de brillo medio y la relación masa-luminosidad siempre son más bajas que las observadas y el brillo superficial y la dispersión de velocidades tienen valores más altos. Por lo tanto, si el progenitor de Sagitario tuvo un radio de plummer de 0.6 kpc, éste no pudo haber estado inmerso en un halo de  $8 \times 10^8 M_{\odot}$  y concentración de 10.

Con respecto a la simulación de un sistema cuyo halo tiene  $9 \times 10^7 M_{\odot}$  y concentración de 10, fue sólo hasta 4 Gyr debido a que para este tiempo demoró un mes. El radio de brillo medio y brillo superficial se mantienen en promedio constantes; la primera cantidad, con un valor de 0.11 kpc y la segunda, de  $2 \times 10^8 L_{\odot}/kpc^2$ . La dispersión de velocidades es muy alta para esta galaxia, ésta toma valores entre 47 y 53 km/s. En cuanto a la relación masa-luminosidad, ésta oscila entre 30 y  $37 M_{\odot}/L_{\odot}$ . Estos resultados indican que, si el progenitor de Sagitario tuvo un radio de Plummer inicial de 0.6 kpc, éste no pudo haber tenido un halo de materia oscura de  $9 \times 10^7 M_{\odot}$  y concentración de 10.

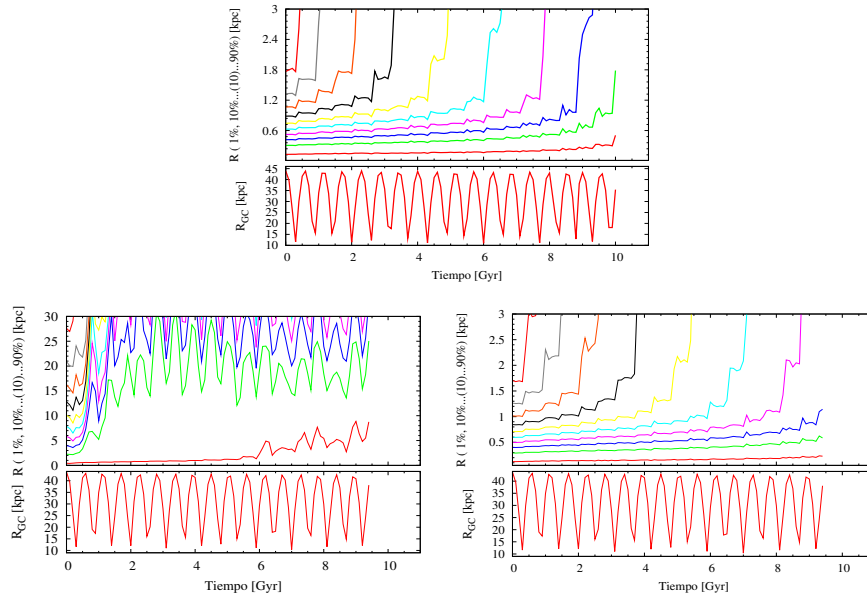


Figura 7.8: *Arriba:* Evolución de una galaxia de  $7 \times 10^8 M_{\odot}$  y radio de 0.6 kpc sin presencia de materia oscura. *Abajo izquierda:* Evolución de un halo de  $8 \times 10^8 M_{\odot}$  y concentración de 4. *Abajo derecha:* Evolución de una galaxia de  $7 \times 10^8 M_{\odot}$  y radio de 0.6 kpc inmersa en este halo.

### 7.2.2. Halo de $8 \times 10^8 M_{\odot}$ y concentración de 4

Como se observa en la figura 7.8 el 20 % de la masa inicial de una galaxia de masa de  $7 \times 10^8 M_{\odot}$  y radio de 0.6 kpc sobrevive durante 10 Gyrs cuando está inmersa en un halo de  $8 \times 10^8 M_{\odot}$  y concentración de 4.

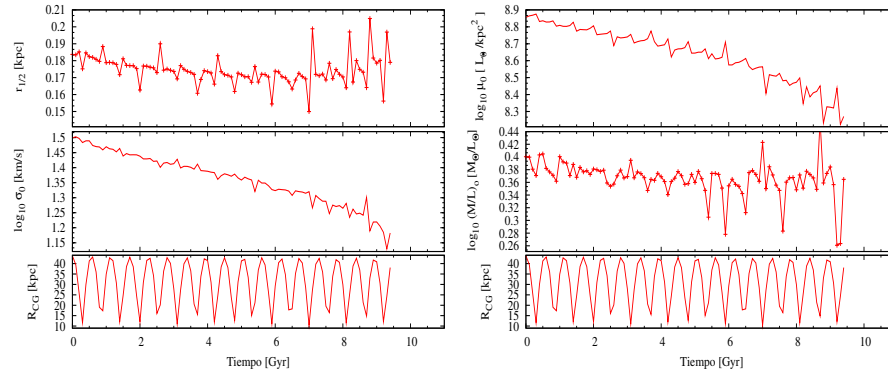


Figura 7.9: Evolución de las propiedades físicas de una galaxia de  $7 \times 10^8 M_{\odot}$  y radio de 0.6 kpc inmersa en un halo de  $8 \times 10^8 M_{\odot}$  y concentración de 4.

A los 0.5 Gyr, cuando el halo ha perdido sólo el 10 % de su masa, el satélite empieza a desgarrarse. Para este tiempo, la galaxia tiene el 80 % de su masa inicial. Posteriormente, a 2.8 Gyr de evolución, cuando el halo queda solamente con el 1 % de su masa inicial, esto es  $8 \times 10^6 M_{\odot}$ , el satélite sólo ha perdido aproximadamente el 30 % de su masa; después de este tiempo, se puede observar que su desgarramiento es lento hasta los 10 Gyr, en donde esta galaxia queda con el 20 % de su masa inicial; un 10 % menos que al estar inmersa en un halo de igual masa pero con concentración 10. Al comparar ahora la evolución de nuestro sistema con el de la sección 7.2.1, se puede observar que durante los primeros 3 Gyr la evolución de los satélites es muy parecida, debido a que para tiempos similares, pierden el mismo porcentaje de masa. Posterior a este tiempo, el desgarramiento de una galaxia cuyo halo tenga concentración de 10 es más lento que el de una con halo de concentración de 4. Esto puede verse observando el tiempo para el cual los satélites pierden el 50 % de su masa inicial; mientras que para el primer caso es a los 6.6 Gyr, para el segundo, es a los 5.5 Gyr.

Por otra parte, al observar la figura 7.9, el radio de brillo medio, la dispersión de velocidades y el brillo superficial disminuyen lentamente a medida que el satélite es desgarrado; mientras que la relación masa-luminosidad se puede ajustar como una constante. En la tabla 7.1 se muestra que ésta galaxia reproduce la posición actual de Sagitario a los 0.9, 6.45 y 9.2 Gyr; sin embargo, el radio de brillo medio y la relación masa-luminosidad siempre son más bajos que los observados y el brillo superficial y la dispersión de velocidades, más altos. Nótese que en las simulaciones realizadas donde la masa del halo es de  $8 \times 10^8 M_{\odot}$ , no se reproducen las propiedades físicas actuales de Sagitario; entonces, se podría pensar que su progenitor no pudo estar en un halo de esa masa; sin embargo, hay que tener en cuenta que la galaxia tiene un radio de Plummer de 0.6 kpc, con lo cual no se puede concluir por ahora nada en cuanto a las características del halo de materia oscura que tuvo inicialmente Sagitario.

### 7.2.3. Halo de $9 \times 10^7 M_\odot$ y concentración de 4

Al observar la evolución de un satélite de  $7 \times 10^8 M_\odot$  y radio de 0.6 kpc inmerso en un halo de  $9 \times 10^7 M_\odot$  y concentración de 4 (ver figura 7.10), se aprecia que tan sólo el 1% de la masa de la galaxia sobrevive durante 10 Gyr; con lo cual es menos estable que si estuviera sólo compuesta por materia bariónica.

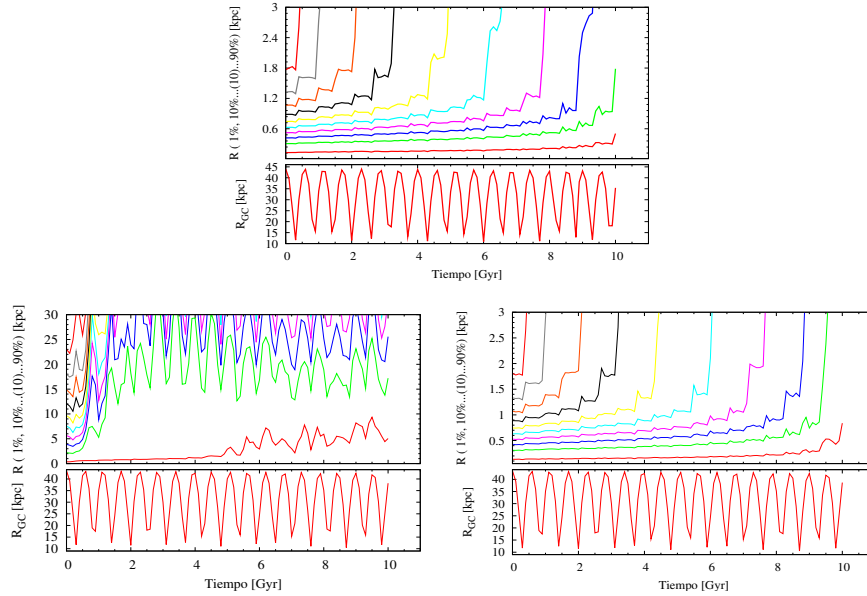


Figura 7.10: *Arriba*: Evolución de una galaxia de  $7 \times 10^8 M_\odot$  y radio de 0.6 kpc sin presencia de materia oscura. *Abajo izquierda*: Evolución de un halo de  $9 \times 10^7 M_\odot$  y concentración de 4. *Abajo derecha*: Evolución de una galaxia de  $7 \times 10^8 M_\odot$  y radio de 0.6 kpc inmersa en este halo.

A los 0.5 Gyr cuando el halo de materia oscura aún no se ha desgarrado, el satélite pierde el 10% de su masa inicial; el halo empieza a destruirse a los 0.6 Gyr. Posteriormente, a los 2.7 Gyr, al igual que el sistema descrito en la sección 7.2.2, el halo queda sólo con el 1% de su masa inicial, esto es  $9 \times 10^5 M_\odot$  y la galaxia, con el 60% de su masa inicial; sin embargo, a diferencia del sistema con halo de mayor masa, después de este tiempo la galaxia es desgarrada continuamente.

Nótese en la figura 7.11 que cuando el satélite queda con el 1% de su masa inicial a los 9.6 Gyr, el radio de brillo medio y la relación masa-luminosidad aumentan rápidamente; mientras que la dispersión de velocidades y el brillo superficial, disminuyen.

La tabla 7.1 muestra que a los 0.9 y 8.2 Gyr este sistema reproduce la posición actual de Sagitario. Para el primer tiempo, el satélite tiene una masa, brillo superficial y dispersión de velocidades más altos que los medidos en Sagitario; mientras que el radio de brillo medio es menor. A los 8.2 Gyr, su brillo superficial continúa siendo alto y el radio de brillo medio, bajo; sin embargo, la dispersión de velocidades tiene un

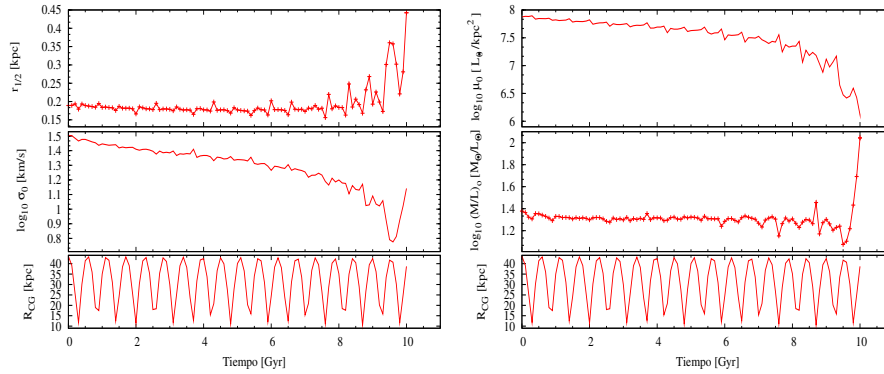


Figura 7.11: Evolución de las propiedades físicas de una galaxia de  $7 \times 10^8 M_{\odot}$  y radio de 0.6 kpc inmersa en un halo de  $9 \times 10^7 M_{\odot}$  y concentración de 4.

valor cercano al medido. Con respecto a la relación masa-luminosidad, está dentro del rango medido por law et al. [71]. Debido a que para un tiempo posterior las propiedades físicas de la galaxia simulada son cercanas a los valores medidos en Sagitario, se simuló un satélite inmerso en un halo con masa de  $9 \times 10^6 M_{\odot}$ ; los resultados, se muestran en la próxima sección. Si el progenitor de Sagitario tuvo un radio inicial de 0.6 kpc, pudo estar inmerso en un halo con masa menor a  $9 \times 10^7 M_{\odot}$  y concentración de 4.

#### 7.2.4. Halo de $9 \times 10^6 M_{\odot}$ y concentración de 4

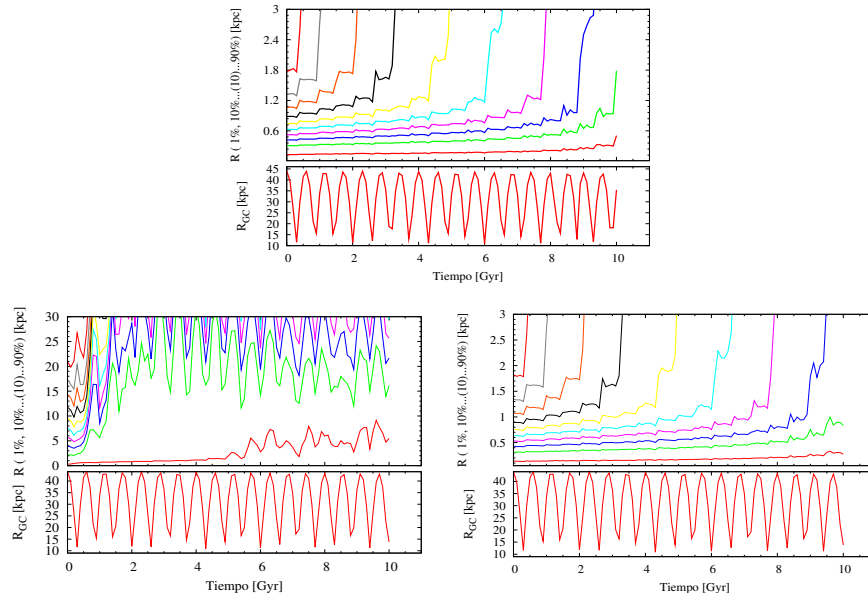


Figura 7.12: *Arriba:* Evolución de una galaxia de  $7 \times 10^8 M_{\odot}$  y radio de 0.6 kpc sin presencia de materia oscura. *Abajo izquierda:* Evolución de un halo de  $9 \times 10^6 M_{\odot}$  y concentración de 4. *Abajo derecha:* Evolución de una galaxia de  $7 \times 10^8 M_{\odot}$  y radio de 0.6 kpc inmersa en este halo.

Al observar la evolución de un satélite de  $7 \times 10^8 M_{\odot}$  y radio de 0.6 kpc inmerso en un halo de  $9 \times 10^6 M_{\odot}$  y concentración de 4 (ver figura 7.12), se aprecia que el 10% de la masa inicial de la galaxia sobrevive

durante 10 Gyr; igual a lo que ocurre cuando este satélite evoluciona sin presencia de materia oscura.

A los 0.5 Gyr cuando el halo de materia oscura aún no se ha desgarrado, el satélite pierde el 10 % de su masa inicial; el halo empieza a destruirse a los 0.7 Gyr. Posteriormente, a los 2.8 Gyr, el halo queda sólo con el 1 % de su masa inicial, esto es  $9 \times 10^5 M_{\odot}$  y la galaxia, con el 60 %. Al igual que el sistema descrito en la sección anterior, después de este tiempo la galaxia es desgarrada continuamente.

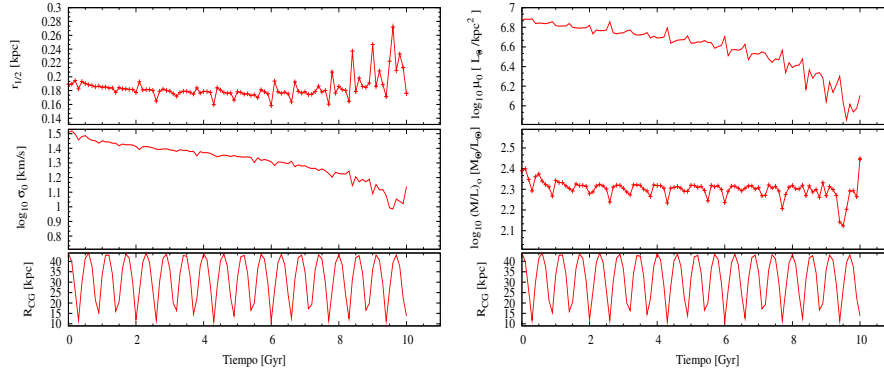


Figura 7.13: Evolución de las propiedades físicas de una galaxia de  $7 \times 10^8 M_{\odot}$  y radio de 0.6 kpc inmersa en un halo de  $9 \times 10^6 M_{\odot}$  y concentración de 4.

En cuanto al radio de brillo medio de este sistema se puede apreciar en la figura 7.13, que éste alcanza un valor máximo de aproximadamente 0.28 kpc durante todo el tiempo de simulación, el cual es mucho menor que el de Sagitario. La dispersión de velocidades y el brillo superficial disminuyen lentamente. Es importante mencionar que esta última cantidad es del mismo orden de magnitud que el medido en Sagitario.

Con respecto a la relación masa-luminosidad, ésta es de cientos debido a que el brillo superficial es del orden de  $10^6 L_{\odot}/kpc^2$ . La tabla 7.1 muestra que a los 0.9 y 7.7 Gyr este sistema reproduce la posición actual de Sagitario. Para el primer tiempo, este satélite no reproduce las propiedades físicas actuales de Sagitario; sin embargo, el brillo superficial que exhibe tiene el mismo orden de magnitud encontrado en esta galaxia enana. A los 7.7 Gyr (tiempo muy cercano a la edad que ha estado orbitando Sagitario a nuestra galaxia), la dispersión de velocidades tiene un valor cercano al medido al igual que el brillo superficial. Estos resultados indican que el halo de materia oscura que pudo albergar al progenitor de Sagitario, pudo tener una masa mayor  $9 \times 10^6 M_{\odot}$  siempre y cuando, el radio de plummer de la componente bariónica haya sido de 0.6 kpc.

Las simulaciones realizadas a un satélite de  $7 \times 10^8 M_{\odot}$  y radio de plummer de 0.6 kpc, indican que el halo inicial de materia oscura que tuvo el progenitor de Sagitario pudo tener una masa inicial entre  $9 \times 10^6$  y  $9 \times 10^7 M_{\odot}$  y su concentración, posiblemente fue 4. Esto indicaría que Sagitario, al principio de su evolución, no fue un sistema completamente dominado por materia oscura; sin embargo, al observar el

radio de brillo medio de todos los sistemas (ver tabla 7.1) éstos siempre son menores que el valor actual medido en sagitario; por ende, su progenitor debió haber sido una galaxia extensa, es decir, éste objeto debió haber tenido un radio de plummer mucho mayor a 0.6 kpc. Ahora bien, con este resultado no se puede concluir que la masa inicial del halo de materia oscura que albergó al progenitor de Sagitario, estuvo entre  $9 \times 10^6$  y  $9 \times 10^7 M_{\odot}$ ; es necesario hacer muchísimas más simulaciones ahora con satélites en todos los rangos y con un radio de plummer mayor o igual a 1.2 kpc.

El hecho que Sagitario al comienzo de su evolución haya sido una galaxia extendida, tiene grandes implicaciones en la teoría de formación y evolución del universo.

### 7.3. Evolución de un satélite de $1 \times 10^9 M_{\odot}$ y radio de Plummer de 1.2 kpc

Se estudió la evolución de un satélite de  $1 \times 10^9 M_{\odot}$  y radio de 1.2 kpc inmerso en un halo de materia oscura menos masivo y con un radio tan sólo 6.2 kpc más grande.

Halo			t [Gyr]	Masa [ $M_{\odot}$ ]	$r_{1/2}$ [kpc]	$\mu_0$ [ $L_{\odot}/kpc^2$ ]	$\sigma_0$ [km/s]	M/L [ $L_{\odot}/M_{\odot}$ ]
M [ $M_{\odot}$ ]	$r_s$ [kpc]	C	0.9	$1 \times 10^8$	0.45	$5.8 \times 10^5$	17.86	406
$9 \times 10^7$	7.5	4	2.7	$1 \times 10^7$	0.52	$1.6 \times 10^5$	183	1300
			5.9	—	—	—	—	—
			5.5	—	—	—	—	—
			6.2	—	—	—	—	—

Tabla 7.2: Propiedades físicas de una galaxia de  $1 \times 10^9 M_{\odot}$  y radio de 1.2 kpc cuando está inmersa en un halo de materia oscura menos masivo. El sistema parte desde una distancia de 44 kpc del centro galáctico. La tercera columna indica la masa que tiene el satélite en t.

#### 7.3.1. Halo de $9 \times 10^7 M_{\odot}$ y concentración de 4

Con respecto a la evolución de este sistema, se observa en la figura 7.14 que aunque un satélite de  $1 \times 10^9 M_{\odot}$  esté con un halo de  $9 \times 10^7 M_{\odot}$  y concentración de 4, sobrevive por solamente 5.5 Gyr -0.4 Gyr más que uno sin materia oscura-. Esto se debe a que el halo es menos masivo que el satélite y su radio es sólo 6.3 kpc mayor; este sistema se comporta como una galaxia muy extensa. Desde el principio, el satélite pierde el 10% de su masa inicial. A los 5.6 Gyr, cuando el satélite ha sido completamente destruido, el halo tiene el 20% de su masa inicial; Nótese que en este sistema, hay más materia oscura que bariónica; esto se puede concluir del tiempo de vida tanto del satélite como del halo; sin embargo, este último en vez de servir como escudo protector, debido a su masa inicial y concentración, hace que el sistema se comporte como una galaxia extensa que no está inmersa en materia oscura.

La evolución de las propiedades físicas del sistema se muestran en la figura 7.15. Aunque el satélite es desgarrado rápidamente, El radio de brillo medio aumenta gradualmente. éste va desde 0.4 hasta 0.6 kpc. Como podemos observar, ésta es la única simulación en la que el radio de brillo medio está dentro del valor actualmente medido en Sagitario, lo cual confirma que su progenitor pudo haber sido una galaxia con

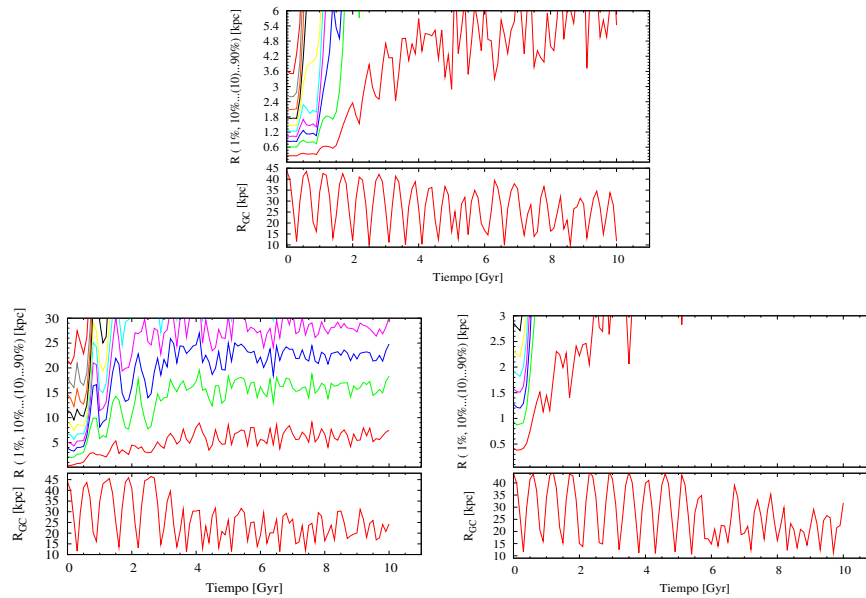


Figura 7.14: *Arriba*: Evolución de una galaxia de  $1 \times 10^9 M_{\odot}$  y radio de 1.2 kpc sin presencia de materia oscura. *Abajo izquierda*: Evolución de un halo de  $9 \times 10^7 M_{\odot}$  y concentración de 4. *Abajo derecha*: Evolución de una galaxia de  $1 \times 10^9 M_{\odot}$  y radio de 1.2 kpc inmersa en este halo.

radio de plummer mayor a 0.6 kpc. .

Con respecto a la dispersión de velocidades, durante el primer Gyr la galaxia tiene valores que oscilan entre 11.5 y 17.6 km/s. Posterior a ese tiempo, esta cantidad aumenta rápidamente hasta llegar a valores de 163 km/s.

Durante los primeros 0.6 Gyr de evolución, la galaxia tiene un brillo superficial del orden de  $10^6 L_{\odot}/kpc^2$ ; posteriormente, ésta cantidad disminuye rápidamente alcanzando dos órdenes menos de magnitud cuando el satélite es completamente destruido.

Finalmente, la relación masa-luminosidad aumenta rápidamente, estando entre 15 y 22  $M_{\odot}/L_{\odot}$  durante los primeros 0.3 Gyr y llegando hasta 188045  $M_{\odot}/L_{\odot}$  cuando es completamente desgarrada la galaxia.

Debido a que en el primer Gyr de evolución este sistema reproduce la mayoría de las propiedades físicas medidas en Sagitario, el progenitor de éste debió ser una galaxia extendida cuyo radio de plummer fue de 1.2 kpc ó mayor. Esta simulación también indica que el halo de materia oscura inicial que tuvo el progenitor de Sagitario debió haber tenido una masa mayor a  $9 \times 10^7 M_{\odot}$  y una concentración mayor a 4. Este hecho implica que el progenitor de Sagitario fue un sistema dominado por materia oscura.

Las conclusiones más importantes de este capítulo son las siguientes:

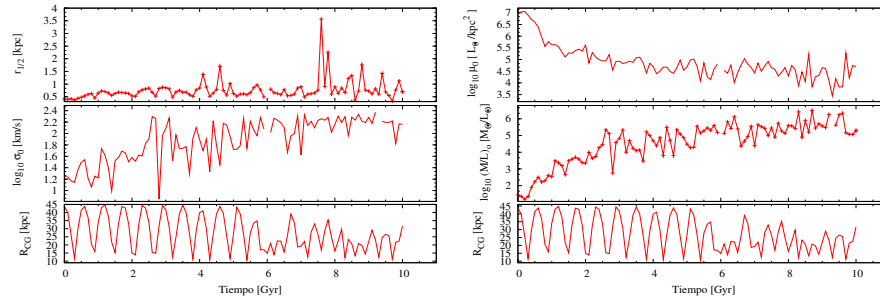


Figura 7.15: Evolución de las propiedades físicas de una galaxia de  $1 \times 10^9 M_{\odot}$  y radio de 1.2 kpc inmersa en un halo de  $9 \times 10^7 M_{\odot}$  y concentración de 4.

- Se simularon galaxias inmersas en diferentes contenidos de materia oscura. Se encontró que al relajar los sistemas halo y galaxia, el perfil de densidad que describen los halos luego que el sistema alcanza su posición de equilibrio no es del tipo NFW; sin embargo, se ajusta muy bien a otra función que esté descrita por la fórmula general de Kravtsov [87].
- El desgarramiento de un halo de materia oscura depende tanto de su concentración como de su masa. Esto se ve evidenciado al tener dos halos, uno con  $8 \times 10^8 M_{\odot}$  y otro con  $9 \times 10^7 M_{\odot}$ <sup>1</sup>. Mientras que el primero debe perder aproximadamente un 40 % de su masa inicial para que una galaxia empiece a ser desgarrada, el segundo, no necesita perder masa. Ahora bien, si se tienen dos halos de igual masa pero con concentración diferente, pueden ocurrir dos cosas: o que ambos no necesiten ser desgarrados para que un satélite empiece a destruirse<sup>2</sup> o que aquél cuya concentración sea menor, pierda más masa<sup>3</sup>. También se observa que durante los primeros 2 ó 3 Gyr de evolución de los sistemas, los halos de materia oscura pierden casi toda su masa quedando sólo con un 10 o un 1 % de sus masas iniciales. Algo completamente diferente pasa con los satélites, los cuales pierden entre un 20 y 30 % de sus masas durante este mismo periodo de tiempo. Posteriormente, se observa que las galaxias son desgarradas gradualmente a medida que pasa el tiempo. La mayoría de estos sistemas evolucionan como si la componente bariónica fuera una galaxia muy densa (debido a que el halo de materia oscura la protege de los efectos de las fuerzas de marea); sin embargo, lo anterior no ocurre al tener un sistema cuyo halo de materia oscura posea un radio característico tan sólo 6.2 kpc más grande que la galaxia que alberga (simulación cuya componente bariónica es de  $1 \times 10^9 M_{\odot}$ ). Para este caso, la galaxia es desgarrada los 5.5 Gyr; lo cual sugiere que el halo de materia oscura debe ser mucho más masivo y con una concentración mayor.
- Al simular una galaxia inestable cuyo radio de Plummer es de 0.6 kpc, se observa que ésta reproduce la mayoría de las propiedades físicas observadas en Sagitario si está inmersa en un halo cuya masa inicial está entre  $9 \times 10^6$  y  $9 \times 10^7 M_{\odot}$ ; sin embargo, en todas las simulaciones realizadas para este tipo de galaxia, se encontró que el radio de brillo medio era siempre menor al medido en Sagitario;

<sup>1</sup>Estos halos tienen una concentración de 10.

<sup>2</sup>este es el caso si los halos tienen  $9 \times 10^7 M_{\odot}$

<sup>3</sup>este es el caso si los halos tienen  $8 \times 10^8 M_{\odot}$

por lo cual concluimos que su progenitor tuvo que haber sido una galaxia extensa, con un radio de Plummer mayor a 0.6 kpc. Este hecho fue confirmado al simular un satélite de  $1 \times 10^9 M_{\odot}$  con radio inicial de 1.2 kpc. Durante el primer Gyr de su evolución, éste reprodujo el radio de brillo medio de Sagitario. Ahora bien, debido a que este sistema estaba inicialmente inmerso en un halo de  $9 \times 10^7 M_{\odot}$  y concentración de 4 y fue desgarrado a los 5.5 Gyr, descartamos la posibilidad que la masa inicial del halo estuviera entre  $9 \times 10^6$  y  $9 \times 10^7 M_{\odot}$ ; por el contrario, el progenitor de Sagitario tuvo que estar inmerso en un halo con masa y concentración mayor, lo cual sugiere que fue inicialmente un sistema dominado por materia oscura.

---



---

## CONCLUSIONES

Se estudió la evolución de la galaxia satélite Sagitario tomando a la Vía Láctea como un potencial rígido; por lo tanto, en este estudio no se tuvieron en cuenta los efectos que podría producir la fricción dinámica, los cuales se minimizaron al simular sistemas cuya masa total no fuera mayor a  $1.5 \times 10^9 M_{\odot}$ .

Sagitario describe una órbita en forma de roseta la cual está siempre perpendicular al plano de nuestra galaxia. Su apocentro está entre 44 y 60 kpc y el pericentro, entre 12 y 13 kpc. Estos resultados concuerdan con los estudios hechos por [67], [5] y [49]. Se encontró que la excentricidad de la trayectoria toma valores entre 0.56 y 0.63. En cuanto a la velocidad tangencial actual del satélite, ésta es de  $298 \pm 27$  km/s, la cual está dentro del rango encontrado por [43], [49] y [50]. Con respecto al periodo de movimiento de Sagitario, algunos estudios encuentran que es de 0.85 Gyr [103]; mientras que otros concluyen que es de 0.75 Gyr [76], [5]. En todas las simulaciones realizadas, se encontró que si una galaxia parte desde 44 y 60 kpc, el periodo de su movimiento es de 0.6 y 0.8 Gyr respectivamente.

Se estudió la evolución de Sagitario sin materia oscura construyendo un satélite de un millón de partículas que obedece a un potencial de Plummer cuya masa inicial se varió desde  $5 \times 10^8$  hasta  $1 \times 10^9 M_{\odot}$ . Los satélites construidos tenían radio de Plummer de 0.5 ó 0.6 kpc; sin embargo, se estudiaron los casos límite de galaxias con radio de Plummer de 0.3 y 1.2 kpc. Se encontraron corrientes de marea asociadas a cada uno de los satélites simulados a distancias de 50 y hasta 64 kpc con respecto al centro de la Vía Láctea. Al realizar la evolución de estos sistemas en el código Gadget2 modificado, se observó que las galaxias más densas o de lento desgarramiento se caracterizan porque con respecto a las propiedades físicas medidas en Sagitario, el radio de brillo medio y la M/L son más bajas; mientras que la dispersión de velocidades y el brillo superficial, son más altos. Dentro de este tipo de galaxias están los satélites cuyo radio de Plummer es menor o igual a 0.5 kpc; si este radio es de 0.6 kpc, también están en esta clasificación aquellos cuya masa sea mayor a  $7 \times 10^8 M_{\odot}$ . Se encontraron también galaxias cuyo tiempo de vida estaba entre 7 y 9 Gyrs y otras las cuales el 10 ó 20 % de su masa inicial sobrevivía durante 10 Gyrs. Estos satélites, llamados *de continuo desgarramiento*, se caracterizan porque su radio de brillo medio y M/L permanecen en promedio constantes durante su evolución; sin embargo, cuando queda el 10 ó 20 % de la masa inicial del satélite, éstas cantidades aumentan. La dispersión de velocidades y el brillo superficial por el contrario, disminuyen gradualmente a medida que estos satélites son desgarrados. Las galaxias que pertenecen a esta clasificación son aquellas cuyas masas están entre  $7 \times 10^8$  y  $5 \times 10^8 M_{\odot}$  y que tienen un radio de Plummer de 0.6 kpc. Finalmente, los satélites que tienen un *rápido desgarramiento* se caracterizan porque en el tiempo en el que este tipo de galaxias son desgarradas, el radio de brillo medio aumenta rápidamente mientras que la

dispersión de velocidades y el brillo superficial, disminuyen. La  $M/L$  se mantiene en promedio constante. El satélite cuya masa inicial es  $1 \times 10^9 M_{\odot}$  y que tiene un radio de Plummer de 1.2 kpc está dentro de esta clasificación.

La evolución de los satélites sin materia oscura indican que el progenitor de Sagitario no pudo haber tenido un radio de plummer menor o igual a 0.5 kpc; además necesariamente tuvo que estar inmerso en un halo de materia oscura; puesto que de otra manera, no es posible reproducir las propiedades físicas actuales observadas.

Posteriormente, se simularon algunas galaxias en diferentes contenidos de materia oscura y se compararon sus propiedades físicas con las medidas en Sagitario. Se encontró que contrario a lo que argumenta [49], el radio de brillo medio de un satélite no aumentará al estar inmerso en un halo de materia oscura. En todas las simulaciones realizadas, esta cantidad siempre tuvo un valor entre 0.19 y 0.11; el único sistema que reprodujo el radio de brillo medio de Sagitario durante 10 Gyr de evolución fue aquél cuya componente bariónica tenía un radio de Plummer de 1.2 kpc, lo cual hace concluir que el progenitor de Sagitario fue una galaxia extendida; es decir, ésta no pudo tener un radio de Plummer inicial entre 0.5 ó 0.6 kpc como lo sugiere [116].

El brillo superficial, la dispersión de velocidades y la relación masa-luminosidad sí dependen de la masa y concentración del halo que envuelva a la galaxia. Entre mayor sean estas cantidades, el brillo superficial y la dispersión de velocidades de un satélite serán mayores a las observadas; mientras que la relación masa-luminosidad será menor.

Cuando un sistema galaxia y halo se relaja hasta llegar a su equilibrio, el perfil de densidad de la materia oscura no es del tipo NFW debido a que hay una componente bariónica; sin embargo, puede ser ajustado a una función que obedezca la fórmula general de Kravtsov [87].

Además de descubrir mediante esta investigación que Sagitario inicialmente fue una galaxia extensa, las simulaciones con diferentes contenidos de materia oscura revelan que el progenitor de Sagitario pudo haber estado inmerso en un halo con una masa mayor a  $9 \times 10^7 M_{\odot}$  y su concentración tuvo que ser mayor a 4. Aunque para conocer el contenido exacto de materia oscura inicial de este sistema sería necesario hacer muchas más simulaciones y tener en cuenta los efectos de la fricción dinámica, los resultados obtenidos sugieren que inicialmente Sagitario fue un sistema dominado por materia oscura; además de ser una galaxia extensa. Esto tiene grandes implicaciones en la teoría de formación de estructura en el universo y en la formación de nuestra galaxia.

MASA ENCERRADA DE UN PERFIL NFW

La masa encerrada a un radio  $r$  de una distribución esférica de partículas que obedezcan un perfil de densidad NFW, está dada por:

$$\begin{aligned}
 M(r) &= \int_0^r \rho(r) dV \quad , \text{ donde } \rho(r) \text{ es el perfil NFW} \\
 M(r) &= \int_0^r \rho(r) r^2 dr \sin \theta d\theta d\phi \\
 M(r) &= 4\pi\rho_0 \int_0^r \frac{r^2}{\left(\frac{r}{r_s}\right) \left(1 + \frac{r}{r_s}\right)^2} dr. \tag{A.1}
 \end{aligned}$$

Al hacer el cambio de variable,  $u = 1 + r/r_s$  el lado derecho de la ecuación A.1 queda:

$$\begin{aligned}
 M(u) &= 4\pi\rho_0 \int \frac{(u-1)^2}{(u-1)u} r_s^3 du \\
 M(u) &= 4\pi\rho_0 r_s^3 \int \frac{(u-1)}{u^2} du \\
 M(u) &= 4\pi\rho_0 r_s^3 \left[ \ln u + \frac{1}{u} \right] \\
 M(r) &= 4\pi\rho_0 r_s^3 \left[ \ln \left( 1 + \frac{r}{r_s} \right) + \frac{1}{1 + \frac{r}{r_s}} \right] \Bigg|_0^r \\
 M(r) &= 4\pi\rho_0 r_s^3 \left[ \ln \left( 1 + \frac{r}{r_s} \right) + \frac{1}{1 + \frac{r}{r_s}} - 1 \right].
 \end{aligned}$$

Teniendo en cuenta la ecuación 5.7 se obtiene la expresión:

$$M(r) = M \left[ \ln(1 + C) - \frac{C}{1 + C} \right]^{-1} \left[ \ln \left( 1 + \frac{r}{r_s} \right) - \frac{r}{r_s + r} \right].$$

Si el último término de la ecuación anterior se multiplica y divide por  $r_s$ ,

$$M(r) \left[ \ln(1 + C) - \frac{C}{1 + C} \right] = M \left[ \ln \left( 1 + \frac{r}{r_s} \right) - \frac{r/r_s}{1 + r/r_s} \right].$$

Ahora, si escalamos la masa del halo a que sea igual a la unidad y elegimos una variable adimensional para la posición,  $R = r/r_s$ , la masa encerrada de una esfera de radio  $r$  que obedece a un perfil de NFW se presenta a continuación.  $M(r)$  es el número aleatorio  $x \in [0, 1]$  mencionado en el capítulo 5.

$$M(r) \left[ \ln(1 + C) - \frac{C}{1 + C} \right] = \left[ \ln(1 + R) - \frac{R}{1 + R} \right], \tag{A.2}$$

# APÉNDICE B

## POTENCIAL ASOCIADO AL PERFIL DE NFW

Como se mencionó en el capítulo 5, el perfil de NFW se comporta de acuerdo a la función:

$$\rho = \frac{\rho_0}{\left(\frac{r}{r_s}\right) \left(1 + \frac{r}{r_s}\right)^2}.$$

En donde  $r_s$  es el radio característico y  $\rho_0$  es una constante que está dada por:

$$\rho_0 = \frac{M}{4\pi r_s^3} \left[ \ln(1 + C) - \frac{C}{1 + C} \right]^{-1},$$

siendo M la masa del halo y C su concentración.

Con el fin de determinar cuál es el potencial asociado a este perfil de densidad, se usa la ecuación de Poisson:

$$\nabla^2 \phi = 4\pi G \rho. \tag{B.1}$$

En donde, haciendo uso de las coordenadas esféricas, el laplaciano queda determinado de la forma:

$$\nabla^2 \phi = \frac{1}{r} \frac{\partial^2}{\partial r^2} (r\phi),$$

con lo cual se tiene,

$$\begin{aligned} \frac{1}{r} \frac{\partial^2}{\partial r^2} (r\phi) &= 4\pi G \frac{\rho_0}{\left(\frac{r}{r_s}\right) \left(1 + \frac{r}{r_s}\right)^2} \\ \int \frac{d^2}{dr^2} (r\phi) dr &= 4\pi G \rho_0 \int \frac{r dr}{\left(\frac{r}{r_s}\right) \left(1 + \frac{r}{r_s}\right)^2}. \end{aligned} \tag{B.2}$$

Para desarrollar la integral del lado derecho de la ecuación B.2, se realiza el siguiente cambio de variable:

$$u = 1 + \frac{r}{r_s}, \quad du = \frac{dr}{r_s};$$

entonces,

$$\begin{aligned}
\frac{d}{dr}(r\phi) &= 4\pi G\rho_0 \int \frac{(u-1)r_s^2}{(u-1)u^2} du \\
\frac{d}{dr}(r\phi) &= 4\pi G\rho_0 r_s^2 \int \frac{du}{u^2} \\
\frac{d}{dr}(r\phi) &= 4\pi G\rho_0 r_s^2 \left[ -\frac{1}{u} \right] \\
\frac{d}{dr}(r\phi) &= 4\pi G\rho_0 r_s^2 \left[ -\frac{1}{\left(1 + \frac{r}{r_s}\right)} \right] \\
\int \frac{d}{dr}(r\phi) dr &= -4\pi G\rho_0 r_s^2 \int \frac{dr}{\left(1 + \frac{r}{r_s}\right)}. \tag{B.3}
\end{aligned}$$

Al hacer el mismo cambio de variable realizado anteriormente:

$$\begin{aligned}
r\phi &= -4\pi G\rho_0 r_s^3 \int \frac{du}{u} \\
r\phi &= -4\pi G\rho_0 r_s^3 \ln u \\
r\phi &= -4\pi G\rho_0 r_s^3 \ln \left( 1 + \frac{r}{r_s} \right). \tag{B.4}
\end{aligned}$$

Si dividimos B.4 a ambos lados por  $r_s$  obtenemos que:

$$\frac{r}{r_s} \phi = -4\pi G\rho_0 r_s^2 \ln \left( 1 + \frac{r}{r_s} \right),$$

con lo cual, finalmente:

$$\phi = -4\pi G\rho_0 r_s^2 \left[ \frac{\ln \left( 1 + \frac{r}{r_s} \right)}{\frac{r}{r_s}} \right]. \tag{B.5}$$

Ahora bien, por conveniencia, elegimos las variables adimensionales para la posición y potencial respectivamente:  $R = r/r_s$  y  $\Psi = -\phi/4\pi G\rho_0 r_s^2$ , con lo cual, tenemos que:

$$\Psi = \frac{\ln(1+R)}{R} \tag{B.6}$$

---

---

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] David Martínez-Delgado, Angeles Gómez-Flechoso, Antonio Aparicio, and Ricardo Carrera. *ApJ*, 601:242–259, 2004.
- [2] Jorge Peñarrubia, Julio F. Navarro, and Alan W. McConnachie. *ApJ*, 673:226–240, 2008.
- [3] Jaroslaw Klimentowski, Ewa L. Lokas, Stelios Kazantzidis, Lucio Mayer, and Gary A. Mamon. *MNRAS*, 397:2015K, 2009.
- [4] Kathryn V Johnston., David N. Spergel, and Lars Hernquist. *ApJ*, 451:598–606, 1995.
- [5] Johnston K.V., Majewsky S.R., Siegel M.H., Reid I.N., and Kunkel W.E. *AJ*, 118:1719–1726, 1999.
- [6] John N. Bahcall and Raymond M. Soneira. *ApJSS*, 44:73–110, 1980.
- [7] Tobias Goerdts, Ben Moore, Stelios Kazantzidis, Tobias Kaufmann, Andrea V. Macciò, and Joachim Stadel. *MNRAS*, 385:2136G, 2008.
- [8] Stelios Kazantzidis, Ben Moore, and Lucio Mayer. *ASPC*, 327:155, 2004.
- [9] Michael Kesden. 2009. PhRvD 80h3530K.
- [10] Irwin M. and Hatzidimitriou D. *MNRAS*, 277:1354–1378, 1995.
- [11] Pasquali A., Larsen S., Ferreras I., Gnedin O.Y., Malhotra S., Rhoads J.E., Pirzkal N., and Walsh J.R. *AJ*, 129:148, 2005.
- [12] Lewis G.F., Ibata R.A., Chapman S.C., McConnachie A., Irwin M.J., Tolstoy E., and Tanvir N.R. *MNRAS*, 375:1364, 2007.
- [13] Coleman M.G et al. *ApJ*, 668:L43, 2007.
- [14] Steven R. Majewski, David R. Law, Kathryn V. Johnston, Michael F. Skrutskie, and Martin D. Weinberg. *IAUS*, 220:189–194, 2004.
- [15] James Binney and Scott Tremaine. *Galactic Dynamics*. Princeton University Press., 1994.
- [16] Rodrigo A. Ibata, Gerard Gilmore, and Michael J. Irwin. *MNRAS*, 277:781–800, 1995.
- [17] Bellazini M., Correnti M., Ferraro F.R., Monaco L., and Montegrifo P. *A&A*, 446:L1–L4, 2006.
- [18] Peter J.Quinn. *ASPC*, 48:754, 1993.
- [19] Richard B. Larson. *PASP*, 102:709–722, 1990.
- [20] Larson R.B., Tinsley B.M., and Caldwell N. *ApJ*, 237:692–707, 1980.
- [21] Majewski S.R. *IAUS*, 179:199, 1998.
- [22] Eggen O.J., Lynden-Bell D., and Sandage A.R. *ApJ*, 136:748, 1962.

- [23] Miceli A., Rest A., Stubbs C.W., Hawley S.L., Cook K.H., Magnier E.A., Krisciunas K., Boewll E., and Koehn B. *ApJ*, 678:865, 2008.
- [24] Leonard Searle and Robert Zinn. *ApJ*, 225:357–379, 1978.
- [25] Burkert A. *coev.conf.*, 245B, 2001.
- [26] Carollo D., Beers T.C., Lee Y., Chiba M., Norris J.E., Wilhelm R., Sivarani T., Marsteller B., Munn J.A., Bailer-Jones C.A.L., Re Fiorentin P., and York D.G. *Nature*, 450:1020, 2007.
- [27] Heather Morrison. *ASPC*, 48:334, 1993.
- [28] Larson R.B. *IAUS*, 69:247, 1975.
- [29] Robert Zinn. *ASPC*, 48:334, 1993.
- [30] Helmi A., Navarro J.F., Nordstrom B., Holmberg J., and Steinmetz M. *MNRAS*, 365:1309–1323, 2006.
- [31] Steven R. Majewski. *ASPC*, 165:76, 1999.
- [32] Stefan C. Keller, Simon Murphy, Sayuri Prior, Gary DaCosta, and Brian Schmidt. *ApJ*, 678:851, 2008.
- [33] HongSheng Zhao. *MNRAS*, 351:891–902, 2004.
- [34] Lemon D.J., Wyse F.G. Rosemary., Liske J., Driver S.P., and Keith Horne. *MNRAS*, 347:1043–1054, 2004.
- [35] James Hesser. *ASPC*, 48:1–13, 1993.
- [36] Lucio Mayer, Fabio Governato, Monica Colpi, Ben Moore, Thomas quinn, James Wadsley, Joachim Stadel, and George Lake. *ApJ*, 559:754–784, 2001.
- [37] Jae-Woo Lee and Bruce W. Carney. *AJ*, 118:1373–1389, 1999.
- [38] Robert Zinn. *ASPC*, 48:302–313, 1993.
- [39] Anatoly Klypin, HongSheng Zhao, and Rachel S. Somerville. *ApJ*, 573:597–613, 2002.
- [40] Cseresnjes P., Alard C., and Guibert J. *A&A*, 357:871–880, 2000.
- [41] Heidi Jo Newberg, Brian Yanni, eva K. Grebel, Grag Hennessy, Zeljko Ivezić, David Martinez-Delgado, Michael Odenkirchen, Hans-Walter Rix, Jon Binkmann, Don Q. Lamb, Donald P. Schneider, and Donald G. York. *ApJ*, 596:L191–L194, 2003.
- [42] Rodrigo A. Ibata, Rosemary F.G. Wyse, Gerard Gilmore, Michael J. Irwin, and Nicholas B. Suntzeff. *AJ*, 113:634L, 1997.
- [43] Ibata R.A. *IAUS*, 186:39I, 1999.
- [44] Gómez-Flechoso M.A., Fux R., and Martinet L. *A&A*, 347:77–91, 1999.
- [45] R. Casas-Miranda, V. Arias, Y. Camargo, and K. Peña. *RCF*, 40:229–232, 2008.
- [46] Bellazzini M., Ibata R.A., Chapman S.C., Mackey A.D., Monaco L., Irwin M.J., Martin N.F., Lewis G.F., and Dalessandro E. *AJ*, 136:1147–1170, 2008.
- [47] Giuffrida G., Sbordone L., Zaggia S., Marconi G., Bonifacio P., Izzo C., Szeifert T., and Buonanno R. *A&A*, 513A:62G, 2010.

- [48] Nate Cole Timothy C. Beers Paola Re Fiorentin Donald P. Schneider Ron Wilhelm Heidi Jo Newberg, Brian Yanni. *ApJ*, 668:221–235, 2007.
- [49] Ibata R.A. and Lewis G.F. *ApJ*, 500:575–590, 1998.
- [50] Irwin M., Ibata R., Gilmore G., Wyse R., and Suntzeff N. *ASPC*, 92:84, 1996.
- [51] Matthew G. Walker, Mario Mateo, Edward W. Olszewski, Oleg Y. Gnedin, Xiao Wang, Bodhisattva Sen, and Michael Woodroffe. *ApJ*, 667:L53–L56, 2007.
- [52] Steven R. Majewski, Skrutskie M.F., Martin D. Weinberg, and James C. Ostheimer. *ApJ*, 599:1082–1115, 2003.
- [53] Burton W. B. and Lockman F.J. *A&A*, 349:7–10, 1999.
- [54] Till Sawala, Cecilia Scannapieco, Umberto Maio, and Simon white. *MNRAS*, 402:1599S, 2010.
- [55] Mateo M., Udalski A., Szymanski M., Kaluzny J., Kubiak M., and Krzeminski W. *AJ*, 109:588M, 1995.
- [56] Seabroke G.M., Gilmore G., Siebert A., Bienaymé J., Binney J., Bland-Hawthorn J., Campell R., Freeman K.C., Gibson B., Grebel E.K., Helmi A., Munari U., Navarro J.F., Parker Q.A., Siviero A., Steinmetz M., Watson F.G., Wyse R.F.G., Zwitter T., Peñarrubia J., Smith M.C., and Williams M. *MNRAS*, 384:11–32, 2008.
- [57] Jaroslaw Klimontowski, Ewa L. Lokas, Stelios Kazantzidis, Lucio Mayer, Gary A. Mamon, and Francisco Prada. *MNRAS*, 400:2162–2168, 2009.
- [58] Mayer L., Kasantzidis S., Mastrogiuseppe C., and Wadsley J. *Nature*, 445:738–740, 2007.
- [59] Edward w. Olsewski. *ASPC*, 136:70–77, 1998.
- [60] Belokurov V., Zucker D.B., Evans N.W., Gilmore G., Vidrih S., Bramich D.M., Newberg H.J., Wyse R.F.G., Irwin M.J., Fellhauer M., Hewett P.C., Walton N.A., Wilkinson M.I., Cole N., Yanny B., Rockosi C.M., Beers T.C., Bell E.F., Brinkmann J., Ivezić Z., and Lupton B. *ApJ*, 642:L137–L140, 2006.
- [61] Andrew C. Layden and Ata Sarajedini. *AJ*, 119:1760–1792, 2000.
- [62] Bonifacio P., Pasquini L., Molaro P., and Marconi G. *Astrophys.Space Sci*, 265:541–544, 1999.
- [63] Carraro G. and Bensby T. *MNRAS*, 397:106, 2009.
- [64] Chaboyer B., Demarque P., and Sarajedini A. *ApJ*, 459:558–569, 1996.
- [65] Bassino L.P. and Muzzio F.C. *Obs.*, 115:265, 1995.
- [66] Jorge Peñarrubia, Andrew J. Benson, David Martinez-Delgado, and Hans Walter Rix. *ApJ*, 645:240–255, 2006.
- [67] David R. Law., Steven R. Majewski., Michael F. Skrutskie, and Kathryn V Johnston. *ASPC*, 327:239L, 2004.
- [68] Watkins L.L., Evans N.W., Belokurov V., Smith M.C., Hewett P.C., Bramich D.M., Gilmore G.F., Irwin M.J., Vidrih S., and Zucker D.B. *MNRAS*, 398:1757–1770, 2009.
- [69] Dana I. Dinescu, Steven R. Majewski, Terrence M. Gilard, Réne A. Méndez, Allan Sandage, Michael H. Siegel, william E. Kundel, Jhon P. Subasavage, and Jamie Ostheimer. *ApJ*, 575:L67–L70, 2002.
- [70] David Martinez-Delgado and Antonio Aparicio. *ASPC*, 245:352M, 2001.

- [71] David R. Law, Kathryn V. Johnston, and Steven R. Majewsky. *ApJ*, 619:807, 2005.
- [72] Ing-Guey Jiang and James Biney. *MNRAS*, 314:468–474, 2000.
- [73] Mario Mateo, Edward W. Olszewski, and Heather L. Morrison. *ApJ*, 508:L55–L59, 1998.
- [74] Mateo M., Mirabal N., Udalski A., Szymanski M., Kaluzny J., Kubiak M., Krzeminski W., and Stanek Z. *ApJ*, 458:L13–L16, 1996.
- [75] Alard C. *ApJ*, 458:L17–L20, 1996.
- [76] Héctor Velázquez and Simon D.M. White. *MNRAS*, 323:529–536, 1995.
- [77] Michael Kesden and Marc Kamionkowski. 2006. PhRvD 74h3007K.
- [78] Steven R. Majewski, James Bullock, Andreas Burkert, Brad Gibson, Eva Grebel, Oleg Y. Gnedin, Puragra Guhathakurta, Amina Helmi, Kathryn V. Johnston, Pavel Kroupa, Manuel Metz, Ben Moore, Richard J. Patterson, Edward Shaya, Louis E. Strigari, and Roeland van der Marel. *ApJ*, 641:647–664, 2009.
- [79] Lawrence M. Widrow and John Dubinski. *ApJ*, 504:12–26, 1998.
- [80] Farnier C. *SF2A*, pages 1–6, 2007.
- [81] Cordier B., Attié D., Cassé M., Paul J., Schanne S., Sizun P., Jean P., Roques J.P., and Vedrenne G. *ESASP*, 552:581C, 2004.
- [82] Mario Mateo. *ASPC*, 116:259M, 1997.
- [83] Pavel Kroupa. 1998, egdg.conf ... 243K.
- [84] Oleg Y. Gnedin and HongSheng Zhao. *MNRAS*, 333:299–306, 2002.
- [85] Stelios Kazantzidis, Andrew R. Zentner, and Andrey V. Kravtsov. *ApJ*, 641:647–664, 2006.
- [86] John Dubinski, Christopher Mihos J., and Lars Hernquist. *ApJ*, 462:576–593, 1996.
- [87] Andrey V. Kravtsov and Anatoly A. Klypin. *ApJ*, 502:48–58, 1998.
- [88] Jorge Peñarrubia, Alan W. McConnachie, and Julio Navarro. *ApJ*, 672:904–913, 2008.
- [89] Sergey Mashchenko and Alison Sills. *ApJ*, 619:258–269, 2005.
- [90] Laura V. Sales, Julio F. Navarro, Mario G. Abadi, and Matthias Steinmetz. *MNRAS*, 379:1464S, 2007.
- [91] Jorge Peñarrubia, Julio F. Navarro, Alan W. McConnachie, and Nicolas F. Martin. *ApJ*, 698:222–232, 2009.
- [92] Jorge Peñarrubia, Pavel Kroupa, and Christian M. Boily. *MNRAS*, 333:779–790, 2002.
- [93] Lars Hernquist. *ApJS*, 86:389–400, 1993.
- [94] Jaroslaw Klimentowski, Ewa L. Lokas, Stelios Kazantzidis, Francisco Prada, Lucio Mayer, and Gary A. Mamon. *MNRAS*, 378:353–368, 2007.
- [95] Massimo Ricotti and Nicolay Y. Gnedin. *ApJ*, 629:259–267, 2005.
- [96] Anatoly Klypin, Andrey V. Kravtsov, Octavio Valenzuela, and Francisco Prada. *ApJ*, 522:82–92, 1999.
- [97] Ben Moore, Sebastiano Ghigna, Favio Governato, George Lake, Thomas Quinn, Joachim Stadel, and Paolo Tozzi. *ApJ*, 524:L19–L22, 1999.

- [98] Sergey Mashchenko, Couchman H.M.P., and Alison Sills. *nfc.d.conf*, 198:92–96, 2005.
- [99] Volker Bromm and Cathie J. Clarke. *ApJ*, 566:L1–L4, 2002.
- [100] Jorge Peñarrubia and Andrew J. Benson. *MNRAS*, 364:977–989, 2005.
- [101] Ricardo R. Muñoz, Steven R. Majewski, and Kathryn V. Johnston. *ApJ*, 679:346–372, 2008.
- [102] Sergey Mashchenko, H.M.P. Couchman, and Alison Sills. *ApJ*, 624:726–741, 2005.
- [103] Amina Helmi and Simon D.M. White. *MNRAS*, 323:529–536, 2001.
- [104] Lucio Mayer, Ben Moore, Thomas Quinn, Fabio Governato, and Joachim Stadel. *MNRAS*, 336:119–130, 2002.
- [105] Bullock J.S., Kravtsov V., and Weinberg D.H. *ApJ*, 548:33–46, 2001.
- [106] Konstantinos Tassis, Andrey Kravtsov, and Nickolay Y. Gnedin. *ApJ*, 672:888–903, 2008.
- [107] Andrey V. Kravtsov, Oleg Y. Gnedin, and Anatoly A. Klypin. *ApJ*, 609:482–407, 2004.
- [108] Volker Springel. *MNRAS*, 364:1105–1134, 2005.
- [109] Volker S., Di Mateo T., and Hernquist L. *MNRAS*, 362:776–794, 2005.
- [110] Masanori Miyamoto and Ryuzaburo Nagai. *PASP*, 27:533–543, 1975.
- [111] Lars Hernquist. *ApJ*, 356:359–364, 1990.
- [112] Klessen R.S. and Kroupa P. *ApJ*, 498:143–155, 1998.
- [113] Aarseth S.J., Hénon M., and Wielen R. *A&A*, 37:183–187, 1974.
- [114] Sverre J. Aarseth. *Gravitational N-Body simulations*. Cambridge University Press., 2003.
- [115] Plummer M.A. *MNRAS*, 71:460P, 1911.
- [116] Helmi A, White S.D.M., de Zeeuw P.T., and Zhao H. *Nature*, 402:53, 1999.
- [117] Julio F. Navarro, Carlos S. Frenk, and Simon D.M. White. *ApJ*, 462:563–575, 1996.
- [118] Ewa L. Lokas and Gary A. Mamon. *MNRAS*, 321:155–166, 2001.
- [119] Ewa L. Lokas, Gary A. Mamon, and Francisco Prada. *MNRAS*, 363:918–928, 2005.
- [120] Stelios Kazantzidis, John Magorrian, and Ben Moore. *ApJ*, 601:37–46, 2004.
- [121] Sergey Mashchenko and Alison Sills. *ApJ*, 619:243–257, 2005.
- [122] Lawrence M. Widrow. *ApJS*, 131:39–46, 2000.
- [123] Konrad Kuijken and John Dubinski. *MNRAS*, 269:13–23, 1994.
- [124] William H. Press, Saul A. Teukolsky, William T. Vetterling, and Brian P. Flannery. *Numerical Recipes the art of scientific computing*. Cambridge University Press. Third edition, Cambridge CB2 8RU, UK, 2007.
- [125] Hu Zhan. *ApJ*, 639:617–620, 2006.
- [126] Beers T.C., Flynn K., and Gebhardt K. *AJ*, 100:32B, 1990.
- [127] Richstone D.O. and Tremaine S. *AJ*, 92:72R, 1986.

- [128] Amina Helmi, Zeljko Ivezić, Francisco Prada, Laura Pentericci, Constance M. Rockosi, Donald P. Schneider, Eva K. Grebel, Daniel Harbeck, Robert H. Lumpton, James E. Gunn, Gillian R. Knapp, Michael A. Strauss, and Jonathan Brinkmann. *ApJ*, 586:195, 2003.
- [129] Amina Helmi. *ApJ*, 610:L97–L100, 2004.
- [130] Giuseppe Tormen, François R. Bouchet, and Simon D.M. White. *MNRAS*, 286:865–884, 1997.
- [131] Peebles P. J. E. *ApJ*, 277:470–477, 1984.