Revista Colombiana de Física, Vol. 42, No. 2 de 2010.

Estudio de la Evolución de un Satélite Esferoidal que Orbita la Vía Láctea

Study of the Evolution of a Satellite Orbiting the Milky Way

R. A. Casas [*] [a]

[a] *Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.*

Recibido 31.03.10; Aceptado 23.11.10; Publicado en línea 17.01.11.

Resumen

La evolución y deformación de un satélite de la Vía Láctea es estudiada mediante el uso de de simulaciones de N-Cuerpos. Los satélites iniciales contienen un millón de partículas y son simulados como una esfera de Plummer carente de materia oscura. Dado que la masa del satélite es mucho menor que la masa de la galaxia nodriza, se desprecian los efectos de fricción dinámica y por lo tanto se puede modelar la Vía Láctea a través de un potencial rígido. El potencial para la Vía Láctea está conformado por tres componentes: un potencial de Miyamoto-Nagai para el disco, un potencial de Hernquist para el esferoide y un potencial logarítmico para el halo de materia oscura. Muchos satélites permanecen deformados durante un tiempo largo (1 Gyr) y podrían ser identificados con satélites observados de la Vía Láctea. Se han realizado las proyecciones sobre la esfera celeste de algunos de los satélites deformados, para mostrar cómo dichos objetos serían vistos por un observador situado en la Tierra. Se muestra que es posible obtener relaciones masa–luminosidad altas a partir de un satélite perturbado carente de materia oscura.

Palabras Clave: Grupo local: galaxias enanas, Materia oscura, Vía Láctea.

Abstract

The evolution of a satellite galaxy of a Milky Way like galaxy has been studied using a large set of N-Body simulations. The initial satellites, containing one million particles, have been simulated by a Plummer sphere without dark matter. Since the mass of the satellite is much smaller than the mass of the Galaxy, dynamical friction effects can be neglected. Thus, the potential of the host galaxy is modeled by a three-component rigid potential: a Miyamoto-Nagai potential for the disc, a Hernquist potential for the bulge and a Logarithmic potential for the dark matter halo. It has been found that several initial conditions for the orbit of the satellite allow for the existence, for about 1 Gyr or more, of a disrupted, out of equilibrium, body that could be interpreted as a dwarf spheroidal satellite galaxy of the Milky Way as observed from the position of the Earth. For a couple of disrupted objects several projections have been performed, in order to show how the object would appear to an observer located at Earth's position. It has been shown that it is possible to obtain high mass to light ratios from a perturbed satellite without dark matter.

Keywords: Local group: Dwarf galaxies, Dark Matter, Milky Way.
PACS: 98.56.Wm, 95.35.+d, 98.35.-a.

©2010. Revista Colombiana de Física. Todos los derechos reservados.

[*] racasasm@unal.edu.co

1. Introducción

Uno de los interrogantes más importantes de la cosmología actual es el problema de la materia oscura. El contenido de materia en el universo está dominado por una componente que no se puede detectar directamente y que se denomina materia oscura. La materia oscura solo se puede detectar a través de métodos indirectos, es decir, observando sus efectos gravitacionales sobre la materia luminosa. En general, la distribución espacial de la materia oscura no presenta una relación lineal con la distribución espacial de la materia bariónica.

El término enana esferoidal (dSph, por su nombre en inglés) se usa para denominar a las galaxias elípticas enanas de baja luminosidad que acompañan a la Vía Láctea y a sistemas similares acompañantes de M31 (Galaxia de Andrómeda). Los satélites tipo dSph de la Vía Láctea tienen masas estelares similares a las masas de los cúmulos globulares aunque son espacialmente mucho más extendidos. Estas características hacen de los sistemas dSph las galaxias con las menores densidades luminosas conocidas. A partir del trabajo de [1], [8], se logró determinar que las dispersiones de velocidad de las galaxias dSph exceden los $7\,km\,s^{-1}$ ocasionando múltiples interpretaciones sobre el origen y naturaleza de este tipo de sistemas.

Si se supone que las galaxias enanas esferoidales son objetos que se encuentran en equilibrio virial, los altos valores en la dispersión de velocidades indicarían la presencia de cantidades considerables de materia oscura. Estimativos de razones de masa–luminosidad M/L en unidades solares basados en la consideración del equilibrio conducen a valores $M/L \sim 5 - 100$ para varios satélites dSph de la Vía Láctea [8]. Bajo este panorama, se cree entonces que las galaxias dSph son los sistemas más pequeños y cercanos que residen en el interior de halos de materia oscura contribuyendo como prueba a los modelos de formación de estructura por materia oscura fría. Alternativamente a este punto de vista varios autores ([7], [6],[5]), proponen explicar los altos valores de dispersiones de velocidad como la posible evidencia de que los sistemas dSph sufren de una fragmentación a medida que interactúan con el potencial de la Vía Láctea. De acuerdo con esta interpretación, los sistemas dSph podrían estar lejos del equilibrio dinámico y por lo tanto las masas establecidas bajo la hipótesis de equilibrio no estarían estimadas correctamente. Si las dispersiones de velocidad estelares observadas pueden ser atribuidas a la fragmentación del satélite proyectado a lo largo de la linea de visión, la necesidad de invocar el argumento de la presencia de materia oscura para explicar la cinemática de las galaxias dSph se desvanece. Simulaciones de N–cuerpos realizadas hasta ahora muestran que este tipo de sistemas pueden existir a partir de galaxias esféricas satélites con 10^6 partículas y masas típicas de $10^7 - 10^8\,M_\odot$: progenitores masivos libres de materia oscura [3]. Desde hace más de una década las dSph han recibido especial atención por su importancia en el estudio de la abundancia local de la materia oscura.

El principal problema en la interpretación de las dispersiones de velocidad observadas en las galaxias dSph es determinar si están o no en equilibrio dinámico. Si estos sistemas están en equilibrio, una componente dominante de materia oscura se requiere para la gran mayoría de las dSph. A pesar de numerosos esfuerzos observacionales para evidenciar la presencia de grandes cantidades de materia oscura en las dSph aún es una idea no totalmente aceptada. A raíz de esto surgen teorías alternativas a la aparición de altos valores de M/L en los sistemas dSph; uno de estos esquemas sugiere que estos sistemas podrían no estar en equilibrio virial sino que resultan de una perturbación significativa en su estructura debida a la interacción del sistema con la Vía Láctea. De esta forma, una galaxia enana orbita la Vía Láctea y es repetidamente perturbada por mareas durante sus pasos perigalácticos conduciendo a la fragmentación del sistema. Antes de que el satélite se desintegre totalmente, es posible que esté lejos del equilibrio virial, de forma que un observador podría estar asumiendo erróneamente su masa a partir de sus mediciones de dispersión de velocidades y por lo tanto se estaría estimando una razón masa–luminosidad equivocada.

En este artículo se presenta un estudio de la evolución temporal de dos satélites que orbitan una galaxia como la Vía Láctea. En especial se muestra la evolución de variables relacionadas con la estructura y cinemática del satélite, como aparecerían a un observador situado en la Tierra.

2. Modelo para la Galaxia

La masa de los satélites usados en las simulaciones (10^6 $M_\odot$) es mucho menor que la masa total de la galaxia nodriza, por lo tanto los posibles efectos de fricción dinámica sobre la órbita del satélite se pueden despreciar y el potencial gravitacional de la galaxia se puede modelar como un potencial rígido.

El potencial gravitacional de la Vía Láctea es modelado por medio de tres componentes. Para el disco se usa un potencial de Miyamoto–Nagai:

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

donde G es la contante de gravitación universal, M_d la masa total del disco y a, b son constantes que determinan la geometría del disco.

El halo de materia oscura de la Galaxia es descrito a

través del potencial logarítmico:

$$\phi_{halo}(R,z) = \frac{1}{2}v_0^2 ln\left[R_c^2 + R^2 + \frac{z^2}{q_\phi^2}\right], \qquad (2)$$

donde R_c y v_0 son constantes y $q_\phi < 1$. La tercera componente corresponde a un potencial de Hernquist, que representa al esferoide central de la Galaxia:

$$\phi_{esf}(R) = -\frac{GM_b}{R + R_H} \qquad (3)$$

donde M_b es la masa del esferoide y R_H es un parámetro que garantiza que 90 % de la masa se encuentra a un radio menor de $18R_H$. Los valores de los parámetros del potencial que mejor se ajustan a la Vía Láctea están dados por [4].

3. Modelo para el satélite

Los satélites iniciales se modelan como esferas de Plummer con masa total de $1 \times 10^7\ M_\odot$, cuya densidad es:

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

y con la forma para el potencial:

$$\phi_{Pl}(r) = \frac{GM}{\sqrt{r^2 + b^2}}, \qquad (5)$$

donde M es la masa total de la galaxia satélite y b es un parámetro que se conoce como radio de Plummer y determina un radio característico dentro del cual se encuentran la mayor parte de las partículas.

Los satélites iniciales están conformados por 10^6 partículas con un radio de Plummer de 0,3 kpc y cutoff a 1,5 kpc. Para la construcción de los satélites se ha usado el algoritmo propuesto por [2], el cual utiliza números aleatorios para asignar posiciones y velocidades a las partículas, obedeciendo al perfil de densidad dado en la ecuación 4 y teniendo en cuenta que se trata de un sistema en equilibrio virial. El objeto obtenido usando el algoritmo de Aarseth no necesariamente se encuentra en completo equilibrio y por lo tanto es necesario permitir que el objeto se relaje bajo su propia gravedad hasta alcanzar el equilibrio. Para esto la esfera de Plummer se deja relajar bajo su propia gravedad por un par de miles de millones de años (Gyr) usando el código GADGET–2 [11].

4. Las Simulaciones

Las diferentes órbitas que puede describir el satélite alrededor de la Vía Láctea están completamente determinadas por su excentricidad y su distancia apocéntrica. El satélite, inicialmente esférico, se introduce dentro del potencial gravitacional de la Vía Láctea a la distancia apocéntrica de la órbita seleccionada, con velocidad perpendicular al plano de la órbita. La magnitud de la velocidad de entrada del satélite depende de la órbita a simular y, naturalmente, del potencial de la galaxia nodriza.

Se realizaron varias decenas de simulaciones de la evolución del objeto inicial en diferentes órbitas alrededor de la Vía Láctea. Las simulaciones numéricas son realizadas mediante el código de simulaciones Gadget–2 , usando únicamente el algoritmo de tree-code. Ya que la forma de la órbita determina la evolución temporal del objeto, denominaremos por *el satélite* al objeto que describe una órbita dada.

Cada satélite se simuló ya sea hasta que el objeto inicial fue completamente destruido o durante 12 giga-años. Cada 0.1 giga-años (Gyr) se guarda la información de la posición y velocidad de todas las partículas del satélite. Con esta información se determinan varias cantidades estructurales y cinemáticas del satélite y se estudió su evolución temporal. Las cantidades que se analizaron son: los radios de las esferas que contienen diferentes porcentajes de la masa total del satélite, el número de partículas que permanecen ligadas dentro del satélite, el espín específico del núcleo del satélite, la densidad superficial de brillo central, el radio de media luminosidad y la dispersión de velocidades central sobre la visual. Estas tres últimas cantidades se obtienen proyectando el satélite como si fuese observado desde la posición de la Tierra.

5. Resultados

A continuación se presentan los resultados del análisis de los datos arrojados por las simulaciones de dos satélites con órbitas caracterizadas por: $d_{apo} = 30$ kpc y $e = 0{,}55$, en adelante Sat-1; y $d_{apo} = 40$ kpc y $e = 0{,}65$ en adelante Sat-2.

5.1. Radios

En la figura 1 se muestra la evolución de dos satélites con $d_{apo} = 30$ kpc y $e = 0{,}55$ (Sat-1), y $d_{apo} = 40$ kpc y $e = 0{,}65$ (Sat-2), respectivamente. En la parte superior de cada gráfica se muestran los radios que contienen 1 %, 10 %,..,90 % de la masa inicial. En la parte inferior de cada panel se muestra la distancia del máximo de densidad del remanente al centro de la galaxia.

De la figura se puede apreciar que después del primer paso perigaláctico el satélite ha perdido entre 10 % y 20 % de su masa inicial. El despoblamiento del satélite continúa en los pasos perigalácticos posteriores. En el intervalo de

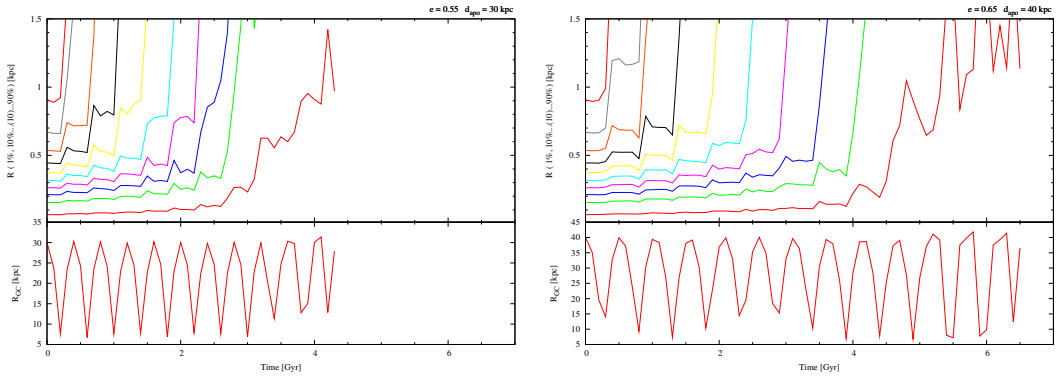

Fig. 1: Evolución de dos satélites con $d_{apo} = 30$ kpc y $e = 0{,}55$ y $d_{apo} = 40$ kpc y $e = 0{,}65$. En la parte superior de cada gráfica se muestran los radios que contienen 1 %, 10 %,..,90 % de la masa inicial, mientras que en la parte inferior se muestra la distancia del máximo de densidad del remanente al centro de la galaxia.

tiempo entre $\sim$ 2.3 – $\sim$4.0 giga-años, para el satélite Sat-1, y $\sim$3.5 – $\sim$5.3 giga-años, para el satélite Sat-2, tan solo menos del 10 % de las partículas del objeto inicial se mantienen ligadas. Después del paso perigaláctico en el tiempo 4 giga-años (Sat-1) y 5.5 giga-años (Sat-2) se puede considerar que el satélite ha sido destruido.

5.2. Número de Partículas Ligadas

El número de partículas que permanecen dinámicamente ligadas al satélite se aproxima mediante el conteo del número de partículas que se encuentran en una esfera de radio $r < 0{,}8$ kpc centrada en el máximo de densidad del satélite. Si bien este conteo puede estar contaminado por partículas no ligadas que instantáneamente se encuentran dentro de la esfera, se espera que dicha contaminación sea despreciable debido a las altas velocidades de dichas partículas.

En la figura 2 se presenta el número de partículas ligadas a los dos satélites bajo estudio. Para ambos satélites se puede apreciar que el número de partículas ligadas decrece lentamente hasta el paso perigaláctico en el que se ha sustraído cerca del 90 % de la masa inicial del objeto. Después de esto el número de partículas ligadas decrece muy rápidamente, debido a la baja energía de cohesión del remanente.

5.3. Espín

El campo de marea gravitacional hace que el satélite aumente su rotación, debido a un despoblamiento preferencial del satélite [9]. En la figura 3 se muestra el espín específico de los satélites Sat-1 y Sat-2, para un conjunto de partículas que se encuentran a una distancia menor a 1.0 kpc del máximo de densidad del satélite. En la gráfica se puede apreciar que los satélites aumentan su rotación a medida que se desplazan por su órbita y son despoblados. No es claro si el espín inducido depende apreciablemente de la excentricidad de la órbita.

5.4. Satélite Proyectado

Para el cálculo de las propiedades del objeto proyectado sobre el cielo del observador se analizó un área proyectada de 1.5 kpc de radio y se restringió el conjunto de partículas a tener en cuenta a aquellas que se encuentran dentro de un cierto rango de observación

$$M_{cod} - \frac{\Delta M}{2} \leq M \leq M_{cod} + \frac{\Delta M}{2}, \qquad (6)$$

que se puede convertir en un rango de distancias de la partícula al observador:

$$d_{cod} \times 10^{-\Delta M/10} \leq d_p \leq d_{cod} \times 10^{\Delta M/10}, \qquad (7)$$

donde d_{cod} es la distancia del centro del satélite al observador y d_p es la distancia de la partícula al observador. ΔM es el rango de magnitudes observables. En este caso se ha usado $\Delta M = 0{,}8$ mag.

En la figura 4 se presenta el radio de media luminosidad que sería medido por un observador en la Tierra. Se puede observar que dicho radio permanece aproximadamente constante hasta que el satélite se encuentra fuertemente deformado y que crece en la etapa final del satélite, alcanzando valores cercanos a los reportados en la literatura [7] La razón masa–luminosidad *observada* del satélite proyectado se obtiene mediante la expresión [7]:

$$\left(\frac{M}{L}\right)_{obs} = \frac{9}{2\pi\, G} \frac{\sigma_0^2}{\mu_0 r_{1/2}}, \qquad (8)$$

donde G es la constante de gravitación universal, σ_0 es la dispersión de velocidades central del objeto proyectado, μ_0 es la densidad central superficial de brillo proyectada y $r_{1/2}$ es el radio de media luminosidad.

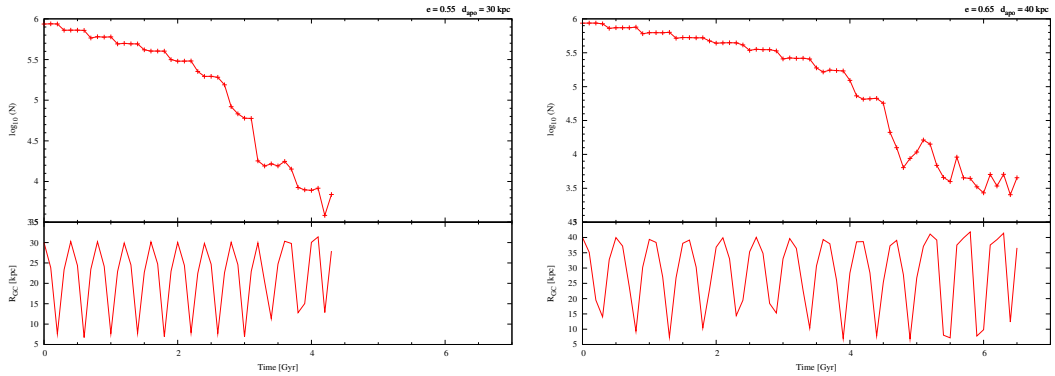

Fig. 2: Número de partículas ligadas al satélite Sat-1 (izquierda) y al satélite Sat-2 (derecha). La masa de las partículas es de $10M_{\odot}$. En la parte inferior se muestra la distancia del máximo de densidad del remanente al centro de la galaxia.

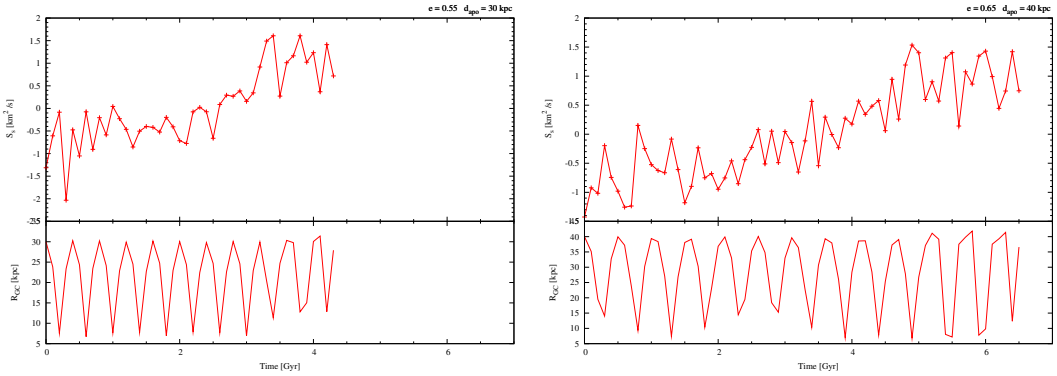

Fig. 3: Espín específico de los satélites Sat-1 (izquierda) y Sat-2 (derecha). En la parte inferior se muestra la distancia del máximo de densidad del remanente al centro de la galaxia.

En la figura 5 se presenta la razón masa-luminosidad para los dos satélites bajo estudio. Allí se puede apreciar que la razón masa-luminosidad del objeto proyectado se mantiene relativamente constante hasta que el satélite se encuentra deformado. Después de esto la razón masa–luminosidad aumenta apreciablemente, alcanzando valores cercanos a la razón masa–luminosidad reportados en la literatura [7].

6. Conclusiones

Se ha mostrado que los satélites son deformados en cada paso perigaláctico y que en algunos casos éstos son desgarrados completamente cambiando algunas de sus propiedades cinemáticas y estructurales en su fase final de evolución. En la etapa final de su evolución los satélites desgarrados presentan una razón masa–luminosidad (M/L) aumentada considerablemente. Estos valores de la razón M/L son cercanos a los valores aceptados que se asignan a algunas galaxias enanas esferoidales de la Vía Láctea, bajo el supuesto de ser objetos en equilibrio y dominados por materia oscura. Esto permite concluir que los valores altos de la razón M/L obtenidos observacionalmente para algunas enanas esferoidales de la Vía Láctea bien podrían corresponder a satélites sin materia oscura que se encuentran fuera del equilibrio. Durante la fase no perturbada del satélite se requeriría de una razón M/L intrínseca muy alta para explicar la diferencia entre la razón M/L observada y el valor observacional. Es importante recalcar que los resultados obtenidos en este estudio no permiten concluir acerca de la existencia o no de la materia oscura y que se requiere de estudios más profundos sobre las enanas esferoidales de nuestra galaxia. Este estudio muestra que existe una especie de *degeneración* en las razones M/L de algunas enanas esferoidales, ya que los mismos valores se pueden obtener para sistemas en equilibrio dinámico dominados por materia oscura y para sistemas perturbados, fuera del equilibrio, carentes de materia oscura. Por lo tanto el valor de la razón M/L en estos objetos no es suficiente para cuantificar su contenido de materia oscura.

Los resultados presentados en este artículo confirman y amplían algunos de los resultados mostrados por [7], los cuales fueron obtenidos con simulaciones con 10^5 partículas y usando el algoritmo de *Particle Mesh*.

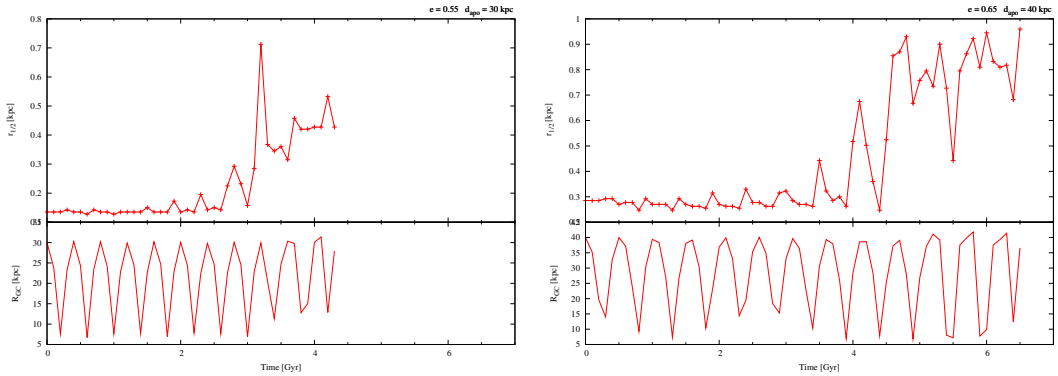

Fig. 4: Radio de media luminosidad medido por un observador en la Tierra, para los satélites Sat-1 (izquierda) y Sat-2 (derecha). En la parte inferior se muestra la distancia del máximo de densidad del remanente al centro de la galaxia.

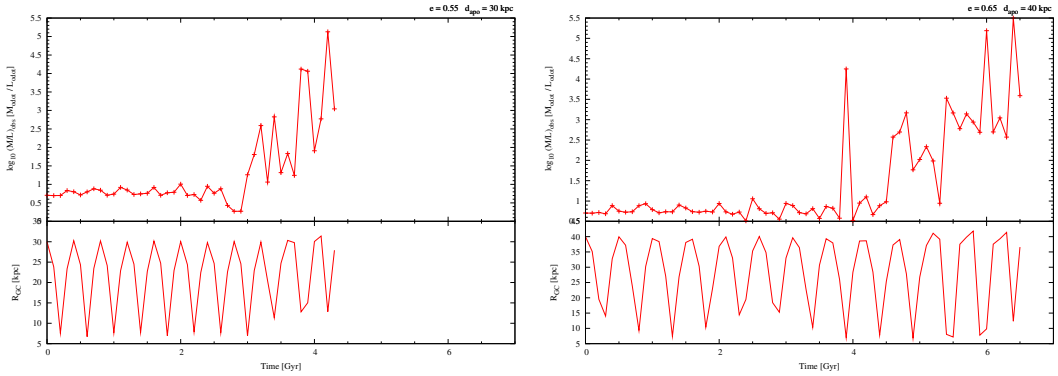

Fig. 5: Razón de masa–luminosidad que se observaría desde la Tierra, para los satélites Sat-1 (izquierda) y Sat-2 (derecha). En la parte inferior se muestra la distancia del máximo de densidad del remanente al centro de la galaxia.

7. Agradecimientos

Este trabajo fue realizado con el apoyo de la Dirección de Investigaciones de la Sede Bogotá de la Universidad Nacional de Colombia, mediante la Convocatoria Nacional de Investigación 2008.

Referencias

[1] Aaronson M., Accurate radial velocities for carbon stars in Draco and Ursa Minor - The first hint of a dwarf spheroidal mass-to-light ratio, ApJLetters, 266:L11 - L15, March 1983.

[2] Aarseth S. J., Henon M., Wielen, R., A comparison of numerical methods for the study of star cluster dynamics, Astronomy and Astrophysics, 1974, 37, 183-187.

[3] Casas–Miranda R., Arias V., Camargo Y., Peña K., Revista Colombiana de Física, Vol. 40, No. 1, 2008.

[4] Johnston K., Spergel D., Hernquist L., ApJ. 451, 598 (1995).

[5] Fleck J. J. and Kuhn R., Parametric Dwarf Spheroidal Tidal Interaction, Ap J, 2003, 592, 147-160.

[6] R. S. Klessen and P. Kroupa. Dwarf Spheroidal Satellite Galaxies without Dark Matter: Results from Two Different Numerical Techniques. ApJ, 498:143â+, May 1998.

[7] Kroupa P., New Astronomy 2, 139–164 (1997).

[8] Mateo. M, *Dwarf Galaxies of the Local Group, Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 36; 435 - 506, 1998.

[9] Piatek S. and Pryor C., 1995, AJ, 100, 127.

[10] Smith R., *Observational Astrophysics*, Cambridge University Press (1995).

[11] Springel V., Mon. Not. R. Astron. Soc. 364 1105–1134 (2005).