

Galaxias Anilladas Colisionales

Erich Wenderoth Binimelis | Académico e Investigador

01. GENERALIDADES Y CONTEXTO HISTÓRICO

A pesar de que el Hombre ha observado el cielo desde tiempos prehistóricos, y desde los inicios de la historia ha tratado de descubrir sus leyes y su relación con el Hombre mismo, las galaxias son un descubrimiento bastante reciente en la historia de la Humanidad. La razón de esto es que, debido a su bajo brillo, solo unas pocas, las más brillantes y cercanas, pueden verse a simple vista o con telescopios de poco aumento.

Durante los siglos XVIII y XIX buscadores de cometas, como Charles Messier y otros, catalogaron ciertos objetos nebulosos para que no fueran confundidos con cometas, los que fueron descubiertos y clasificados como galaxias recién a comienzos del siglo XX cuando, por una parte, la tecnología de los grandes telescopios aumentó la capacidad de observación y, por otra parte, el conocimiento de la Física acumulado por siglos de investigación y desarrollo nos abrió a la comprensión de la masa, el espacio y el tiempo de una forma absolutamente revolucionaria.

El primero en proponer la existencia de las galaxias fue el filósofo alemán Immanuel Kant, quien en 1755 en su libro "Historia Natural Universal y Teoría de los Cielos", propuso que algunos de los puntos nebulosos de luz que se estaban descubriendo eran, en verdad, "Universos- Islas", como él los llamó, similares al sistema al que pertenecía el Sistema Solar, que hoy conocemos como Vía Láctea. Esta idea resultaba tan revolucionaria que fue rechazada, no solo por la gente común, sino que por la mayoría de los científicos y filósofos contemporáneos de Kant.

Recién 170 años después de Kant, Edwin Hubble logró determinar la distancia a la entonces conocida como Nebulosa de Andrómeda, utilizando la Relación Período-Luminosidad, que había sido descubierta por Henrietta Levitt observando estrellas Variables Cefeidas en las Nubes de Magallanes tan solo 20 años antes de los trabajos de Hubble.

Hubble descubre, así, que a mayor distancia, mayor es la velocidad de recesión de las nebulosas. Es decir, sus velocidades de alejamiento son proporcionales a sus distancias:

$$V = H_0 \cdot D \text{ [Km/s]}$$

Con esta relación, hoy conocida como Ley de Hubble, se pudo configurar una escala de distancias de estos objetos, se pudo deducir sus tamaños, y se pudieron clasificar de acuerdo a su morfología. Desde entonces, estas estructuras pasaron a llamarse Galaxias, las que están formadas por estrellas, cúmulos estelares, nebulosas gaseosas, nubes moleculares y polvo interestelar.

Las observaciones de Edwin Hubble y su hoy famosa ley, vinieron a respaldar el marco teórico que daba la Teoría Cosmológica de Albert Einstein de 1917, basada en su Teoría de la Relatividad General (1915), la que predecía un Universo dinámico en expansión, que el mismo Einstein modificó, inicialmente, agregando su famosa Constante Cosmológica para que sus ecuaciones describieran un Universo estático. Desde 1998 en adelante, la Constante Cosmológica resulta de vital importancia para explicar la existencia de la Energía Oscura y el Universo Acelerado. Por lo tanto, Hubble descubrió la expansión del Universo observacionalmente, demostrando la validez de las predicciones, de una década antes, de la teoría de Einstein.

Ya bien avanzado el siglo XX, se descubre que las galaxias no están distribuidas de manera aleatoria en el espacio. Las galaxias son las unidades básicas con las que está construido el Universo en gran escala, y se agrupan en Cúmulos de Galaxias, los que, a su vez, forman Super-Cúmulos y grandes filamentos, todos sujetos a su interacción gravitacional mutua y a la expansión del Universo. Hoy se tienen clasificadas más de cien mil millones (10^{11}) de galaxias y se calcula que dentro del radio del Universo observable, trece mil setecientos millones (13.7×10^9) de años-luz, existen más de siete billones (7×10^{12}) de galaxias, agrupadas en veinticinco mil millones (25×10^9) de Cúmulos de Galaxias, los que, a su vez, se agruparían en diez millones (10^7) de Super-Cúmulos.

De acuerdo a sus características morfológicas, las galaxias se clasifican en tres grandes grupos: espirales, elípticas e irregulares. Cada uno de estos tres grupos se subdivide en varios tipos de acuerdo a: su geometría, la actividad de sus núcleos, su masa, su luminosidad, y su interacción con otras vecinas. Es en este contexto donde, entre muchos tipos de galaxias, aparecen las Galaxias Anilladas, las que también se subdividen en subclases, de acuerdo a sus morfologías o al tipo de interacción que estén sufriendo.

El prototipo de estas galaxias fue presentado, por primera vez, por Fritz Zwicky en 1941, cuando mostró una imagen de la hoy famosa galaxia "Cartwheel" (Rueda de Carreta), en la constelación Sculptor, distante quinientos millones (5×10^8) de años-luz, obtenida con el telescopio Schmidt de 45 cm de Monte Palomar. La Cartwheel fue redescubierta por Lü en 1971, y es también conocida por sus clasificaciones ESO 350-40 y A0035-33. En la Figura se presenta una imagen de la Cartwheel tomada por el telescopio espacial Hubble.

FIGURA



02. DEFINICIONES Y CLASIFICACIÓN DE GALAXIAS ANILLADAS

Las Galaxias Anilladas se clasifican bajo modelos de galaxias interactuantes o colisionales, en las cuales ondas de densidad cuasi-simétricas se desplazan a través del disco galáctico producto, probablemente, de una colisión contra otra galaxia enana. De su nombre en inglés, Ring Galaxies, las Galaxias Anilladas se abrevian en la literatura como RG o pRG para el caso de las Galaxias Anilladas Peculiares.

Las RGs pertenecen a la clase morfológica 6 en el Catálogo de Galaxias y Asociaciones Peculiares del Sur de Arp & Madore (1977). Las pRGs, a su vez, se clasifican en distintas clases dependiendo de su morfología. Los estudios morfológicos realizados por Faúndez-Abans & de Oliveira-Abans en 1998 (de aquí en adelante FAOA-98) clasifican a las pRGs en cinco familias distintas y en ocho sub-divisiones, siendo hasta hoy el catálogo de mayor profundidad y detalles para las pRGs.

Es importante destacar que hay casos en que no es fácil dar con la mejor clasificación de una galaxia anillada por una simple inspección visual (imagen directa), por cuanto depende de su orientación en el cielo, es decir, de su ángulo de visión desde la Tierra (en realidad desde cualquier punto del Sistema Solar!). Por esta razón, en la literatura se pueden encontrar RGs clasificadas en clases erróneas, las que solo se han puesto en el lugar correcto luego de detallados estudios fotométricos y espectroscópicos, como los realizados por Faúndez-Abans et al. (2002), quienes realizaron un estudio cinemático en H-alfa, [S II] y [N II] (líneas prohibidas de azufre y nitrógeno ionizados) de algunos candidatos a RG en el hemisferio sur.

Entre la pRGs están aquellas que muestran una estructura encorvada, otras con núcleo excéntrico, otras con anillo elíptico y otras con anillos fracturados o incompletos, características todas que pueden ser el resultado de tres tipos de interacciones: Colisiones, galaxias que pasan una a través de la otra; Fuerzas de Marea (tidal o harassment), galaxias que pasan muy cerca una de la otra, fenómeno también conocido como "hostigamiento o asedio galáctico"; y Fusiones (merging), en que una galaxia se traga a otra, fusionándose en un solo objeto, fenómeno también conocido como "canibalismo galáctico", como fue bautizado por Hausmann & Ostriker (1978).

Para el caso en que la interacción es una colisión y se produce una galaxia anillada, se observa, generalmente, que se trata de una galaxia de disco en rotación (galaxia blanco), que es colisionada por una galaxia enana compacta (galaxia proyectil), normalmente de tipo elíptica o esferoidal, con un bajo momentum angular orbital. Esta hipótesis fue presentada por primera vez en dos trabajos, a mediados de los años '70, por Lynds & Toomre (1976) y por Theys & Spiegel (1976, 1977).

03. ¿POR QUÉ ESTUDIAR LAS GALAXIAS ANILLADAS COLISIONALES?

Además de los pocos catálogos de RGs y de algunas páginas WEB dedicadas a coleccionar una amplia base de datos sobre galaxias y cúmulos de galaxias en general, la información sobre las RGs es bastante incompleta. Más aún, no hay en la literatura astronómica ningún reporte sobre galaxias interactuantes en etapa temprana de formación del anillo, tipo morfológico "Solitaire", siendo el trabajo ya mencionado de FAOA-98 el primero en definirlo, y nuestro grupo de investigación el primero en publicar dos investigaciones originales sobre este tipo de RGs. Ver Wenderoth et al. (2011) y Faúndez-Abans et al. (2013b).

Las RGs ofrecen una amplia variedad de problemas astrofísicos abiertos, los que se constituyen en ricas áreas de investigación, tanto teóricas como experimentales, como las que se presentan a continuación.

La presencia de anillos en galaxias constituye una pista importante para el estudio de la historia de la dinámica galáctica. En particular, ¿están los anillos en equilibrio? Y si así fuere, ¿es este equilibrio estable o los anillos son un fenómeno relativamente efímero?

Las RGs representan una clase de galaxias en colisión en la cual el disco de una de ellas permanece suficientemente intacto después de la colisión, como para permitir el estudio en detalle, tanto de su estructura como de las propiedades de su formación estelar dentro y a lo largo del anillo.

Las RGs permiten hacer estudios sobre la hidrodinámica del disco de la galaxia blanco (anfitriona), correlacionándola con el tamaño de la galaxia proyectil.

Estas galaxias contienen un brillante anillo azul, constituyéndose en una prueba visible de los lugares de formación estelar inducida (Higdon 1995; Appleton & Marston 1997; Appleton 1999); y son las regiones donde se forman las estrellas más masivas que se pueden encontrar en el Universo. Por esta razón, las RGs constituyen un laboratorio ideal para poner a prueba los modelos teóricos de evolución estelar de estrellas masivas.

Los colores, los espectros y las extremadamente luminosas regiones H II (hidrógeno ionizado) de los anillos de las RGs, sugieren la presencia de un gran número de estrellas de tipo espectral O y B, que se están formando a una tasa muy alta en la cresta de la onda de densidad. Al crearse estas estrellas casi simultáneamente, las diferencias observadas en las propiedades de los nudos que conforman el anillo, deben ser variaciones intrínsecas en sus propiedades.

Como las ondas de densidad se mueven radialmente hacia afuera, los modelos teóricos predicen que ellas deben ir dejando atrás rastros de estrellas masivas y cúmulos estelares (Appleton & Struck-Marcell 1987). Por lo tanto, la acción de la onda de densidad también sirve para hacer un mapeo radial de la evolución estelar a lo largo de la cara de la galaxia anfitriona (Marcum, Appleton & Higdon 1992).

La formación estelar está fuertemente ligada con otros problemas de gran interés astrofísico: síntesis de elementos químicos pesados en el Universo, formación de sistemas planetarios, producción y distribución de rayos cósmicos galácticos, exceso UV, entre los más importantes.

Las RGs presentan un alto contenido de gas molecular debido al aumento de densidades locales, lo que produce un aumento en la cantidad de enlaces químicos. Dado que el H I (hidrógeno ionizado) es el elemento más abundante en los discos galácticos, el aumento en la densidad del gas induce una fuerte formación de hidrógeno molecular (H₂), el que constituye, por lejos, el gas molecular más abundante en las RGs, aunque también es posible encontrar moléculas basadas en el carbono, silicio y otras combinaciones, pero en abundancias mucho menores.

Las RGs tienen, generalmente, una alta luminosidad y temperatura de color en el infrarrojo lejano, comparadas con las galaxias de disco normales, lo que se debe a la presencia de polvo que es calentado, al igual que el gas, por las ondas de densidad, teniendo el máximo de emisión de radiación electromagnética en el infrarrojo térmico, de acuerdo a la Ley del Desplazamiento de Wien.

Debido a su simple geometría, comparada con la compleja dinámica en la fusión de galaxias de masas comparables, las RGs permiten estudiar las diferencias de comportamiento entre el gas y las estrellas en colisión.

Dado que las RGs se forman por algún tipo de colisión, las fuerzas de marea pueden desmembrar grandes cantidades de materia de las galaxias involucradas, inyectando material interestelar químicamente procesado al espacio intergaláctico, contaminándolo hasta distancias diez veces mayores que el diámetro de las galaxias interactuantes (Dottori et al. 1997).

Un rompimiento colisional junto a disipación de gas puede alimentar toda clase de actividad nuclear, lo que ha llevado a toda una línea de investigación, observacional y teórica, para buscar la conexión entre la interacción de galaxias y los Núcleos Activos de Galaxias (Active Galactic Nuclei o AGN) en las últimas décadas.

04. INTERACCIÓN DE GALAXIAS

En Dinámica Galáctica nos enfrentamos a las siguientes interesantes preguntas, entre muchas otras: ¿qué procesos dinámicos manejan la evolución de una galaxia?; ¿cuál es la importancia relativa de la interacción por fuerzas de marea, de la acreción de materia y de las grandes fusiones en la estructuración de los distintos tipos de galaxias?; ¿cuál es la fracción de estrellas de una galaxia formadas "pacíficamente" versus las formadas bajo episodios violentos a lo largo de la vida de una galaxia?; ¿cuán rápido se estructura la forma de una galaxia al formarse?; y ¿cómo ha evolucionado en el tiempo la mezcla de los distintos tipos de galaxias?

En la formación de galaxias elípticas, ¿qué fracción de ellas se formó a través de fusiones mayores de dos galaxias espirales?; ¿se formaron las galaxias elípticas en un solo colapso o son producto de múltiples fusiones menores dentro de un cúmulo de galaxias?; y ¿cuál es la distribución de edades en las galaxias elípticas?

En la formación de galaxias espirales, ¿pueden formarse sus bulbos a través de fusiones menores?; ¿qué fracción de sus bulbos se ha formado de esta manera?; y ¿cuán frágiles son los discos de las galaxias espirales? Los discos galácticos son muy frágiles y pueden romperse fácilmente si una galaxia enana cayera sobre una espiral. Toth & Ostriker (1992) demostraron teóricamente, mediante simulaciones numéricas, que los discos galácticos pueden sobrevivir a fusiones menores de hasta $m/M \sim 0.3$, aunque aumentando la masa del bulbo y disminuyendo el espesor del disco, donde m es la masa de la galaxia "proyector" y M es la masa de la galaxia "blanco" espiral que es colisionada por la más pequeña.

Modelos teóricos de galaxias S0 con anillo polar, predicen que el anillo de gas es acretado durante la fusión con otra galaxia de menor masa y, observacionalmente, se demuestra que el contenido de H I del anillo polar es extendido y típico de galaxias de disco de tipo tardío (late-type). Los modelos teóricos se han visto perfeccionados por las observaciones de las últimas décadas, y hoy podemos afirmar que es el centro de las galaxias S0 (más que el anillo polar) el que pudo haberse formado por la caída de una compañera rica en gas sobre los polos de una galaxia espiral. Así, los cuerpos centrales de las galaxias S0 vendrían a ser como bulbos fallidos Schweizer 1995; Arnaboldi 1997).

Una poderosa señal cinemática de antiguas fusiones de galaxias es la existencia de una sub-población de estrellas que rotan en sentido contrario al disco galáctico en galaxias de los tipos S0-Sb. El mejor ejemplo es el de NGC 4550, una galaxia del tipo E/S0, en que la mitad de sus estrellas del disco rotan en un sentido y la otra mitad lo hace en sentido contrario, como fue descubierto por Rubin et al. (1992). El efecto es muy notorio en el material estelar, pero menos importante en el material gaseoso del disco galáctico.

Resumiendo, de la estadística observacional, de las simulaciones numéricas y de los modelos teóricos, se puede concluir que 40%-70% de todas las galaxias S0 ha experimentado algún tipo de fusión con alguna compañera de menor masa.

Un caso de fusión de dos galaxias de diferentes clases lo constituye la galaxia perturbada FM 287-14, reportada en la literatura astronómica como miembro de un grupo de galaxias fuertemente interactuantes, pero sin estudios astrofísicos previos. El primer estudio fotométrico y espectroscópico de esta galaxia con doble núcleo y anillo elíptico fue realizado, observacionalmente, por nuestro grupo de investigación y publicado en Faúndez-Abans et al. (2013). La espectroscopía se realizó con el telescopio Gemini Sur de 8.1 m y el instrumento GMOS, mientras que la fotometría se realizó con el telescopio de 1.6 m del Observatorio Pico dos Dias, en Minas Gerais, Brasil.

La mayor parte de los estudios sobre fusión e interacción de galaxias se concentra en las regiones centrales, debido a que se ven afectadas dramáticamente por una colisión, por cuanto el gas del disco galáctico pierde momentum angular y cae hacia el núcleo, generando explosiones estelares masivas (starbursts) en las zonas centrales y provocando, allí, la formación de cúmulos estelares.

En las partes exteriores de una galaxia de disco, en cambio, las fuerzas de marea producidas por una interacción del tipo "hostigamiento galáctico", que tienen un menor índice de impacto, pueden expulsar tanto estrellas como gas hacia el medio intergaláctico, formando anillos de gas, puentes y filamentos de material estelar y gaseoso. Las formas de estas largas colas de esos materiales son muy útiles para extrapolar hacia atrás las huellas dejadas por fusiones mayores o menores entre miembros de un cúmulo de galaxias, así como para acotar los parámetros en los modelos numéricos de colisiones de galaxias, incluyendo la determinación de la masa de la materia oscura de las galaxias primigenias. La masa del material perdido por una galaxia debido a una interacción por fuerzas de marea puede ser tan alto como 1/3 de su masa original.

Otra poderosa herramienta para el estudio de las interacciones de galaxias, es la observación del hidrógeno neutro (H I). Las colisiones de galaxias a gran velocidad, la interacción por fuerzas de marea, o la fusión de galaxias, producen distintas características observacionales sobre su contenido de H I. Tanto es así que interacciones y fusiones ocurridas en el pasado reciente han podido ser descubiertas sólo por estructura y la cinemática del H I. Dado que el H I se extiende mucho más afuera de una galaxia que su contenido estelar, es el componente más afectado en las rupturas producidas por fuerzas de marea. Un ejemplo de galaxia anillada con una notoria estructura de H I asociada a una colisión es la galaxia Arp 143.

Una revisión más reciente de la demografía y propiedades de galaxias espirales, lenticulares, elípticas y galaxias en proceso de fusión, ha sido presentado por Blanton & Moustakis (2009). Para un estudio más detallado de las propiedades de las interacciones de galaxias por fuerzas de marea, ver Wallin (1990); Schombert et al. (1990); Barnes & Hernquist (1992). Para una revisión de todas las observaciones realizadas (hasta esa fecha) para estudiar el comportamiento del gas en las partes exteriores de galaxias interactuantes y los procesos de acreción del gas, ver Combes (1999).

05. GALAXIAS ANILLADAS COLISIONALES

Theys & Spiegel (1976) publicaron el primer intento de clasificación de galaxias anilladas, basado sólo en datos observacionales, en el que presentan un simple esquema de tres categorías, sustentado en aspectos morfológicos, y que denominaron RE, RN y RK. Las anilladas de tipo RE correspondían a anillos puros sin núcleo central (al menos fotográficamente) y de forma aproximadamente elíptica. Ejemplos de tipo RE son las galaxias anilladas Arp 146 y VII Zw466. Las anilladas de tipo RN son similares a las RE pero con núcleo excéntrico. El mejor ejemplo de anillada RE es, justamente, la Cartwheel. Las anilladas de tipo RK son galaxias tipo anillo, pero con un nudo prominente embebido en una distribución asimétrica de luz. Ejemplo de anillada tipo RK es la galaxia II Zw28.

Theys & Spiegel (1976) notaron que la elipticidad de los anillos era creciente a través de las categorías RE, RN y RK, así como también que unas pocas galaxias anilladas presentaban estructura de dos o más anillos, como por ejemplo la Cartwheel (ver Figura), que presenta un anillo azul exterior y un anillo interior muy bien definido en infrarrojo cercano. Theys y Spiegel también notaron que todas ellas, excepto la galaxia II Zw28, tenían una galaxia enana muy cercana, y a pocos grados de la proyección del eje polar del anillo, lo que llevó a pensar que la galaxia enana era como un proyectil que había colisionado a la galaxia que generó el anillo en tiempos recientes.

Basado en lo anterior y en el extenso *Catalog of Southern Peculiar Galaxies and Associations* de Arp & Madore (1977), Few & Madore (1986) presentaron una nueva clasificación de galaxias anilladas, aunque menos detallada que la de Theys & Spiegel (1977), era estadísticamente más significativa, en la que escogen 69 galaxias anilladas del anterior Catálogo y las agrupan en sólo dos clases principales, O y P. Las anilladas tipo-O tenían un núcleo central y un anillo regular, mientras que las del tipo-P tenían un núcleo excéntrico y un anillo con nudos. Few y Madore argumentaron que si las RGs eran causadas por una colisión, entonces debería encontrarse galaxias vecinas a la del anillo con una mayor frecuencia que la esperada. La principal conclusión de su estadística fue que las anilladas tipo-P mostraban un exceso de galaxias vecinas con distancias menores a dos veces el diámetro del anillo, mientras que las anilladas del tipo-O no mostraban ningún exceso estadístico de vecinas cercanas. De esta manera, Few y Madore concluyeron que las anilladas tipo-P eran buenas candidatas a haberse generado por una colisión.

El primer modelo teórico sobre el concepto de Galaxia Anillada fue presentado por Lynds & Toomre (1976), el cual aún es la base del conocimiento sobre estos objetos. Este modelo plantea lo siguiente: una galaxia de baja masa (galaxia proyectil) se mueve a lo largo del eje de simetría de una galaxia de disco mucho más masiva (galaxia blanco), pasando la primera a través del centro del disco de la segunda. El modelo presupone que las órbitas de las estrellas del disco galáctico son circulares antes de

la colisión. Al momento del impacto las estrellas del disco sienten un intenso "empujón" hacia el centro, producto de la acción gravitacional que ejerce la galaxia proyectil. Este movimiento hacia el centro es "corto", en términos de la vida de una galaxia, ya que la acción gravitacional de la galaxia proyectil disminuirá rápidamente cuando se aleje, una vez que haya cruzado a través de la galaxia blanco, siendo el material interior expulsado hacia afuera por la fuerza centrífuga que se genera para restablecer el equilibrio inicial. Lo anterior genera oscilaciones del material perturbado en torno a su órbita circular inicial.

La principal consecuencia de este escenario es la generación de ondas de densidad expandiéndose radialmente hacia afuera, producidas por la compresión (agrupamiento) de estrellas en el disco galáctico. En su forma más simple y para no complicar al lector, este modelo considera que al ser el tiempo de colisión muy corto, las estrellas del disco de la galaxia blanco no tienen tiempo para acomodarse al repentino impulso que las empuja hacia el centro galáctico. Mecánicamente esto significa que las posiciones estelares son las mismas inmediatamente antes y después de la colisión, pero después de la colisión cada estrella ha adquirido una velocidad radial hacia el centro. En la medida que la perturbación no sea demasiado grande, las órbitas estelares resultantes pueden aproximarse a oscilaciones radiales en epiciclo en torno a un centro en movimiento, el que, por supuesto, corresponde a la órbita antes de la colisión. Y como se considera que la fuerza perturbadora afecta a las estrellas del disco por muy corto tiempo, todos los movimientos posteriores son sólo cinemáticos. Esto constituye la así llamada Aproximación Cinemática, la cual despreziona los efectos producidos por la gravedad propia de la perturbación. Esto se cumple, especialmente, en colisiones con velocidades muy altas, propias de los masivos y extensos cúmulos de galaxias. Estas oscilaciones tienen un período que crece con el radio del disco de la galaxia blanco (Período proporcional al Radio) y la Frecuencia es proporcional a v/r (cuociente entre la Velocidad Tangencial u Orbital y el Radio). De esta manera, cuando las estrellas que están más cerca del punto de colisión ya comenzaron su rebote radialmente hacia afuera, hay estrellas más alejadas que aún vienen "cayendo" hacia el centro, las que, al encontrarse, producen un fuerte aumento de la densidad en algunos puntos del disco galáctico. Un ejemplo de esto con simulaciones numéricas es presentado en el trabajo teórico de Appleton & Struck-Marcell (1996).

De fundamental importancia para poner a prueba este modelo teórico es analizar las consideraciones de simetría de la colisión de las dos galaxias. Lynds & Toomre (1976) y Toomre (1978), basados en experimentos numéricos con discos de partículas de prueba, llegaron a dos resultados definitivos:

1. Impactos centrales a lo largo de trayectorias inclinadas 30 grados y hasta 45 grados respecto al eje de rotación del disco de la galaxia blanco, todavía producen anillos bastante simétricos; 2. Las restricciones sobre el parámetro de impacto resultan ser mucho más estrictas, por cuanto la galaxia proyectil debe colisionar a la galaxia blanco dentro del 15% de su radio central, lo que debido a la acción gravitacional es de una probabilidad bastante alta.

En todo el análisis hasta aquí de este modelo teórico, sólo hemos considerado la acción perturbadora de la galaxia proyectil sobre el material del plano galáctico de la galaxia blanco. Pero vale preguntarnos por el material fuera del plano, que podría ser atraído a lo largo del eje de rotación (dirección -z) a medida que la galaxia proyectil se acerque, y luego en dirección +z, cuando la galaxia proyectil se aleje por el otro lado del plano. Como estamos considerando una colisión a gran velocidad, este efecto a lo largo del eje z de rotación es solo de segundo orden, por cuanto el efecto de primer orden es siempre a lo largo del radio del plano galáctico. Este efecto de segundo orden pasaría a ser importante solo en el caso de una colisión con una galaxia proyectil muy masiva y de muy baja velocidad. Sin embargo, en este caso, las consecuencias dinámicas son considerablemente distintas, por cuanto la lenta colisión, en vez de producir anillos, las fuerzas de marea involucradas producen puentes de material entre ambas galaxias y deformaciones geométricas de largo plazo en el plano galáctico. Lo anterior nos lleva a que, desde un punto de vista estadístico, los encuentros entre galaxias dentro de un cúmulo de galaxias, incluso aquellos acercamientos a velocidad parabólica, producen, en la mayoría de los casos, interacciones por fuerzas de marea, generando colas en las galaxias interactuantes, o puentes temporales entre ellas. Tan sólo 1/300 de los encuentros galácticos intra-cúmulos son colisiones como las aquí descritas. Más aún, la densidad espacial de las RGs es menor en un factor 1000 respecto a otras galaxias peculiares.

Poco es conocido sobre Galaxias Anilladas que provienen de objetos elípticos, esféricos ó de un progenitor tipo S0 (todas, en principio, pobres en gas y polvo). Tampoco es frecuente observar la formación de anillos en este tipo de objetos en sus primeras etapas. Este tipo de Galaxias Anilladas Peculiares fueron denominadas como "Solitaire" por FAOA-98 y sus características y propiedades no son bien conocidas. Estos objetos tienen el bulbo sobre el anillo, o muy cercano a éste, siendo el anillo muy enredado. Sin embargo, el anillo se ve muy suave y delgado en el lado opuesto al bulbo. A pesar de la, aún, pobre estadística sobre estos objetos, la galaxia con la que la Solitaire interactúa, resulta ser casi siempre una de tipo elíptico. Hoy se toma como arquetipo de pRG tipo Solitaire a la galaxia FM 047-02, también clasificada como AM 2021-724 y ESO 046-IG10, luego que haya sido profundamente estudiada por nuestro equipo de investigación, cuyos resultados se publicaron en Faúndez-Abans et al. (2013a). Otras dos pRG de tipo Solitaire son las galaxias FM 188-15 y AM 0436-472. Un estudio preliminar y otro estadístico sobre objetos tipo "Solitaire", están pronto a ser publicados por nuestro grupo de investigación, los que incluyen a estas dos galaxias.

06. REFERENCIAS

Appleton, P.N.: 1999, "Collisional Ring Galaxies", IAU Symposium Nr. 186 on Galaxy Interactions at Low and High Redshifts, p. 97.

Appleton, P.N. & Marston, A.P.: 1997, *The Astronomical Journal (AJ)*, Vol. 113, p. 201.

Appleton, P.N. & Struck-Marcell, C.: 1987, *The Astrophysical Journal (ApJ)*, Vol. 318, p. 103.

Appleton, P.N. & Struck-Marcell, C.: 1996, "Collisional Ring Galaxies", in *Fundamentals of Cosmic Physics*, Vol. 16, p. 111, Overseas Publisher Association, The Netherlands.

Arnaboldi, M.: 1997, *The Astronomical Journal (AJ)*, Vol. 113, p. 585.

Arp, H.C. & Madore, B.F.: 1977, *Catalogue of Southern Peculiar Galaxies and Associations*, Vol. I, Positions and Descriptions, Clarke-Irwin, Toronto.

Barnes, J.E. & Hernquist, L.E.: 1992, *Annual Review of Astronomy & Astrophysics*, Vol. 30, p. 705.

Blanton, M.R. & Moustakis, J.: 2009, *Annual Review of Astronomy & Astrophysics*, Vol. 47, p. 159.

Combes, F.: 1999, "Extended Gas in Interacting Systems", IAU Symposium Nr. 186 on Galaxy Interactions at Low and High Redshifts, p. 89.

Dottori, H., Mirabel, I.F. & Rodríguez, I.: 1997, "Formation of Dwarf Galaxies in Tidal Tails and the Contamination of the Intergalactic Medium", *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, Vol. 114, p. 71.

Faúndez-Abans, M. & de Oliveira-Abans, M.: 1998, *Astronomy & Astrophysics Supplement Series (A&AS)*, Vol. 129, p. 357 (FAOA-98).

Faúndez-Abans, M., de Oliveira-Abans, M., Reshetnikov, V.: 2002, 2002noao.prop..112F.

Faúndez-Abans, M., de Oliveira-Abans, M., Krabbe, A.C., da Roche-Poppe, P.C., Fernandes-Martin, V.A. & Fernandes, I.F.: 2013a, *Astronomy & Astrophysics (A&A)*, Vol. 558, p. A13.

Faúndez-Abans, M., da Roche-Poppe, P.C., Fernandes-Martin, V.A., de Oliveira-Abans, M., Fernandes, I.F., Wenderoth, E. & Rodríguez-Ardila, A.: 2013b, *Astronomy & Astrophysics (A&A)*, Vol. 559, p. A8.

Few, J.M. & Madore, B.F.: 1986, Monthly Notice of the Royal Astronomical Society (MNRAS), Vol. 222, p. 673.

Hausmann, M.A. & Ostriker, J.P.: 1978, The Astrophysical Journal (ApJ), Vol. 224, p. 320.

Higdon, J.L.: 1995, The Astrophysical Journal (ApJ), Vol. 455, p. 524.

Lynds, R. & Toomre, A.: 1976, The Astrophysical Journal (ApJ), Vol. 209, p. 320.

Marcum, P.M., Appleton, P.N. & Higdon, J.L.: 1992, The Astrophysical Journal (ApJ), Vol. 399, p. 57.

Rubin, V.C., Graham, J.A. & Kenney, J.D.P.: 1992, The Astrophysical Journal Letters (ApJL), Vol. 714, p.L290.

Schombert, J.M., Wallin, J.F. & Struck-Marcell, C.: 1990, The Astronomical Journal (AJ), Vol. 99, p. 497.

Schweizer, F.: 1995, "Stellar Populations", Kluwer, Dordrecht, p. 275.

Theys, J.C. & Spiegel, E.A.: 1976, The Astrophysical Journal (ApJ), Vol. 208, p. 650.

Theys, J.C. & Spiegel, E.A.: 1977, The Astrophysical Journal (ApJ), Vol. 212, p. 616.

Toomre, A.: 1978, "Interacting Systems", IAU Symposium on The Large Scale Structure of the Universe, p. 109.

Toth, G. & Ostriker, J.P.: 1992, The Astrophysical Journal (ApJ), Vol. 389, p. 5.

Wallin, J.F.: 1990, The Astronomical Journal (AJ), Vol. 100, p. 1477.

Wenderoth, E., Faúndez-Abans, M., Krabbe, A.C., de Oliveira-Abans, M. & Cuevas, H.: 2011, Astronomy & Astrophysics (A&A), Vol. 529, p.A157.

Zwicky, F.: 1941, en "Theodore von Karman Anniversary Volume, Contribution to Applied Mechanics and Related Subjects", CALTECH, Pasadena, USA, p. 137