

La formación de la Vía Láctea

Emilio J. Alfaro Navarro

emilio@iaa.es

*Instituto de Astrofísica de Andalucía -CSIC
Camino Bajo de Huétor 24, Granada 18008*

Abstract

In this review paper I summarize the most salient features of the galactic subsystems that compose the Milky Way. A set of questions are posed, which should be solved before asking 'how was the Galaxy formed?'. Some answers are sketched as well as a potential formation scenario that shows, at least, a certain degree of internal coherence.

Resumen

En este artículo resumo las propiedades más características de los subsistemas galácticos que forman la Vía Láctea, planteo el conjunto de cuestiones que deberían ser respondidas antes de poder dar una respuesta clara a la pregunta ¿cómo se formó la Galaxia?, esbozo algunas respuestas y apunto un escenario de formación que muestra, al menos, un cierto grado de coherencia interna.

Introducción

Desde mediados de este siglo tenemos pruebas observacionales (en longitudes de onda visible y radio) de que la Vía Láctea es una galaxia espiral y, por lo tanto, pertenece al grupo morfológico más numeroso del universo (al menos en un tiempo cósmico cercano). Si nos planteamos estudiar el origen de nuestro sistema estelar, esta clasificación es un dato necesario pero no suficiente aunque, de por sí, sea ya una buena pista. El hecho de que la estructura básica de la Vía Láctea sea compartida por un gran número de sistemas externos permite abordar, al menos conceptualmente, el estudio de la formación del sistema desde un punto de vista ergódico. No parece descabellado pensar que la estructura, evolución y origen de nuestra Galaxia comparta algunos aspectos con aquellos sistemas morfológicamente similares. Esta aproximación al problema nos provee de datos básicos que, de otra forma, debido a nuestra posición en la Galaxia, no serían accesibles.

El hecho de que la luz tenga una velocidad finita nos permite utilizar la variable espacio (o mejor, corrimiento al rojo) como un parámetro temporal en la evolución de los sistemas galácticos. Si extrapolamos esta idea, observando cada vez más lejos obtendríamos la evolución de la población de galaxias hasta, en el mejor de los casos, llegar a captar a las protogalaxias en su proceso de formación. Tres años atrás esta idea no dejaba de ser una hipótesis atractiva pero infructuosa, ya que el tiempo cósmico observable con la tecnología disponible no permitía el acceso a la época de formación. El desarrollo de nuevas técnicas de observación,

mayores telescopios y la capacidad de colocar observatorios fuera de nuestra atmósfera han roto gran parte de las barreras que hacían inviable esta aproximación al problema. Hoy en día es posible observar galaxias en tiempos cósmicos superiores al 90 % de la edad del universo. No obstante, parafraseando a Steidel (1999), la cuestión es ¿hasta qué punto comprendemos lo que estamos viendo? Obviamente necesitamos un marco teórico desde el cual diseñar nuestras observaciones y analizar los resultados; necesitamos de la Cosmología.

Hace unos 20 años White & Rees (1978) propusieron un escenario para la formación de galaxias que todavía permanece como el marco teórico más aceptado. Este modelo consta de tres ingredientes básicos: un espectro inicial de fluctuaciones, la gravedad como motor de la evolución del espectro de masas y la materia invisible (MI). Esta última da nombre al escenario que suele denominarse modelo de la Materia Invisible Fría (MIF). Una descripción detallada, pero amable, de esta teoría puede verse en el número anterior de esta revista (Miralda-Escudé 1999). Argumentos teóricos y algunas observaciones recientes apoyan la idea de que las condiciones iniciales originadas en el universo primitivo, junto con las inestabilidades gravitacionales, darían lugar a un universo donde las fluctuaciones de masa más pequeñas colapsarían y, posteriormente, se agregarían formando estructuras de orden superior. El problema reside en la escala de tiempo necesaria para la formación de las mayores estructuras y este factor es dependiente de los parámetros básicos del modelo cosmológico. Los primeros trabajos de la teoría MIF (Blumenthal et al. 1984; Davis et al. 1985) predicen una formación tardía de las grandes galaxias (para unos valores dados de Ω y H_0), aunque esta conclusión no parece estar apoyada por recientes trabajos observacionales (Bahcall & Cen 1992; Lilly et al. 1995; Cowie et al. 1996; Ellis 1997) y es vista con cierto escepticismo por la comunidad astronómica. Sin embargo, el escenario de formación jerárquica está aún vivo y algunas versiones con los mismos ingredientes pero diferentes parámetros cosmológicos dan lugar a una gran gama de historias de formación para las grandes estructuras. Obviamente estos problemas no invalidan el escenario sino que acicatean la búsqueda de ligaduras observacionales que permitan afinar mejor los parámetros cosmológicos.

El estudio de las poblaciones estelares de la Vía Láctea y galaxias cercanas es una forma clásica pero vigente de abordar el problema y durante muchos años ha sido la única base sobre la que descansaban los modelos de formación de la Galaxia. Esta última aproximación metodológica conforma el esqueleto básico de este artículo, aunque seré oportunista con la utilización de teorías y resultados derivados de otras formas de abordar esta cuestión, como las citadas anteriormente. Es del todo imposible que haga referencia a las múltiples aportaciones que han contribuido de manera relevante al estado actual del conocimiento sobre el origen de la Galaxia, las limitadas páginas y mis propias limitaciones me lo impiden. Incluso el estado actual del problema debe ser entendido como mi visión *objetiva* del mismo, cualquier otra interpretación sería errónea.

He estructurado el resto del artículo en tres grandes apartados: el primero da una breve descripción de los principales subsistemas que forman la Galaxia y apunta brevemente las claves observacionales que deberían ser integradas en un modelo de formación; el segundo discute y selecciona los datos actuales más relevantes acerca de las piezas fundamentales del rompecabezas y, por último, en el tercer apartado, se expone el escenario que parece explicar de una forma más amplia y coherente las observaciones seleccionadas.

Propiedades globales de los subsistemas galácticos

Antes de intentar entender la formación y evolución de la Galaxia debemos conocer qué subsistemas galácticos o poblaciones estelares conforman nuestro sistema galáctico. Entendemos por *población* aquellos sistemas estelares que muestran haber tenido el mismo origen e historia, suficientemente separada en el tiempo de la de otros sistemas para producir diferencias observacionales. Para distinguir entre dos poblaciones utilizaré tantas de las siguientes características como sea posible: estructura espacial, metalicidad, cinemática y edad. De acuerdo a estas propiedades la Galaxia puede considerarse constituida por cuatro subestructuras fundamentales: disco, bulbo, halo y corona de materia invisible.

El disco contiene el 90 % del material visible de la Galaxia, con una escala de altura en la vecindad solar de alrededor de 300 pc. Una de las características fundamentales de esta componente es que la casi totalidad del gas galáctico (en sus diferentes fases) está localizado en el disco. Por otro lado, el disco muestra una curva de rotación variable que para el radio solar es de 210 km s^{-1} y se mantiene alrededor de este valor en sus regiones externas. La metalicidad de la componente estelar parece tener un límite inferior en $[\text{Fe}/\text{H}] = -0.5$ y no muestra una correlación significativa con la edad. La mayoría de los objetos del disco son más jóvenes que 10 Gaños, aunque algunos cúmulos estelares tienen dataciones más viejas (12 Gaños). La característica fundamental del disco galáctico es su alto grado de estructura y ordenación. La existencia de un gradiente de metalicidad radial (al menos para las regiones internas de la Galaxia), la estructura espiral, la rotación diferencial, el alto momento angular por unidad de masa, y el hecho de ser la reserva principal de gas hacen de este subsistema una pieza clave en la teorías de formación de galaxias.

Desde hace 15 años existen evidencias observacionales de un denominado *disco grueso*, aunque su detección en galaxias externas fue anunciada anteriormente (Tsikoudi 1977). Su existencia vino sugerida por la necesidad de utilizar dos funciones exponenciales diferentes para ajustar la distribución con la altura de un campo estelar en la vecindad del Sol (Gilmore & Reid 1983). Esta segunda estructura tiene una escala de altura tres veces superior a la del disco delgado ($z_0 \approx 1 \text{ kpc}$). Estudios posteriores mostraron que las estrellas que se ajustan a esta distribución tienen

una velocidad de rotación menor ($V_{\text{rot}} = 190 \text{ km s}^{-1}$), una metalicidad promedio inferior ($[\text{Fe}/\text{H}] = -0.6$) y una edad comprendida entre 12 y 15 Gaños. La masa determinada para el disco grueso es de un 5% de la masa total del disco. Sin embargo no debemos olvidar que nuestro conocimiento de esta estructura proviene de una región galáctica próxima al Sol y que debemos ser cautos cuando extrapolamos estos resultados a toda la Galaxia. La única evidencia de que el disco grueso podría extenderse hasta otras regiones galácticas proviene del estudio de los cúmulos globulares de alta metalicidad, $[\text{Fe}/\text{H}] > -1$, (Armandroff 1989) que parecen formar un sistema aplanado, mantenido por rotación, en la región interna de la Galaxia.

El bulbo es, quizás, la componente galáctica peor conocida. Desde los primeros indicios de su presencia (Baade 1951) ha existido una gran controversia acerca de su individualidad como subsistema galáctico o su pertenencia al disco o al halo. La mejor prueba de la existencia del bulbo fue proporcionada por el experimento DIRBE del satélite *COBE*. La imagen en infrarrojo muestra una estructura con forma de cacahuete y un radio de aproximadamente 1 kpc claramente separada de la componente más vieja del disco. Su posición en la región interna de la Galaxia hace muy difícil su observación y resulta chocante pensar que el disco y el halo tengan un agujero en su centro, aunque recientes trabajos consideran esta posibilidad (ver Freudenreich 1998). Por lo tanto, al menos tres poblaciones diferentes podrían coexistir en ese volumen espacial.

Rich (1996) analizó la estructura cinemática, química, temporal y espacial del bulbo, llegando a la conclusión de que forma un subsistema con características bien diferenciadas del disco y del halo. Una masa de $2 \times 10^{10} M_{\odot}$ (aproximadamente el 10 % de la masa visible de la Galaxia) y una velocidad de rotación de 100 km s^{-1} , marcan claramente la diferencia con el halo. Su edad parece ser superior a la del disco y similar a la de los cúmulos globulares más viejos del halo (Ortolani et al. 1995). Este resultado contradice la abundante presencia de variables Mira de largo periodo (Rich 1992) con una edad considerablemente inferior. Respecto a su metalicidad, la cuestión no es menos controvertida. Parece definitivamente asentado que el rango de metalicidades es de 1 dex, centrado alrededor de $[\text{Fe}/\text{H}] = -0.25$ (McWilliam & Rich 1994). Este valor es similar a la metalicidad de las gigantes K en la vecindad solar, sin embargo la razón de elementos α (Mg y Ti) difiere claramente de la solar.

La fuente más importante (y utilizada) de información acerca del origen de la Vía Láctea es precisamente la componente menos densa del sistema: el halo galáctico. Su masa no sobrepasa el 0.2 % de la masa total de la Galaxia pero se extiende hasta aproximadamente 100 kpc del centro. Podemos distinguir dos grupos de objetos en el halo: la componente estelar y el sistema de cúmulos globulares. Ambos grupos comparten algunas propiedades pero difieren en otras. La estructura en densidad parece seguir una ley de potencia para ambos grupos, con un exponente $\alpha = -3.5$, pero la distribución en metalicidad sigue patrones difer-

entes y tiene límites inferiores distintos: $[Fe/H] > -2.5$ para los cúmulos y $[Fe/H] > -4$ para las estrellas aisladas (Freeman 1996). El histograma de metalicidad de los cúmulos globulares muestra dos picos bien diferenciados centrados alrededor de -0.5 y -1.5 . Una separación en dos poblaciones gaussianas permite comprobar que ambos grupos tienen propiedades espaciales y cinemáticas diferentes. Los cúmulos de alta metalicidad muestran una distribución achatada, una velocidad media de rotación de $153 \pm 29 \text{ km s}^{-1}$ y una dispersión de velocidades a lo largo de la línea de visión de $\sigma = 71 \pm 11 \text{ km s}^{-1}$ típica de un sistema mantenido por rotación. Como ya comentamos anteriormente, estos objetos son asociados al disco grueso (Majewski 1995). Por el contrario, la población de baja metalicidad muestra una distribución más esférica, una velocidad de rotación media nula y una alta dispersión de velocidades ($\sigma = 150 \text{ km s}^{-1}$), a la vez que contiene a los objetos más viejos de la Galaxia con una edad centrada alrededor de los 15 Gaños y una dispersión de 3 Gaños (sin entrar en discusiones más detalladas tomo como edad de la Galaxia el valor de 15 Gaños). Atendiendo a la estructura de la rama horizontal de los cúmulos pobres en metales, Zinn (1993) propuso la existencia de dos subgrupos que se han venido en llamar *jóven* y *viejo*. Los denominados *viejos* están concentrados en las regiones internas al radio galactocéntrico solar, parecen mostrar indicios de un gradiente en metalicidad y tienen una velocidad de rotación prógrada de $\approx 50 \text{ km s}^{-1}$. Por el contrario, los cúmulos *jóvenes* no parecen tener una estructura espacial bien definida y presentan una velocidad neta retrógrada de $\approx -46 \pm 8 \text{ km s}^{-1}$. La denominación de *jóvenes* y *viejos* está basada en la hipótesis de que el segundo parámetro que controla la morfología de la rama horizontal es la edad (el primero es la metalicidad) (Lee 1992), sin embargo esta interpretación es contestada por otros autores (Buonanno et al. 1997) que consideran que la edad no es el único segundo parámetro y que el entorno ambiental del cúmulo podría también modificar la apariencia de la rama horizontal.

Poco se puede decir acerca de la corona de materia invisible, aunque quizás sea la clave fundamental en la formación de la Galaxia. De la curva de rotación galáctica se deduce que la distribución de materia invisible varía con R como $M(R) = 10^{10} \times R \text{ (kpc)} M_{\odot}$ hasta un radio de al menos 100 kpc ¿Cómo está distribuida esta materia? El descubrimiento de la galaxia enana de Sagitario abre interesantes perspectivas acerca de la localización de la materia invisible en el halo de la Galaxia (Ibata et al. 1994). Estos autores obtienen que la dispersión de velocidades en Sagitario es muy superior a la explicable por su masa luminosa si la galaxia estuviera en equilibrio virial y que estas galaxias podrían ser las grandes reservas de materia invisible en el universo. El estudio de otras galaxias enanas en el Grupo Local (ej. Antlia) parece apuntar, también, en esta dirección (Martínez-Delgado 1999).

Otra aproximación al problema proviene del estudio del elipsoide de velocidad de los cúmulos globulares. Mientras que los cúmulos situados en las regiones externas de la galaxia muestran un elipsoide prácticamente

alineado con los ejes de simetría del disco, los cúmulos internos presentan un elipsoide altamente inclinado con respecto al eje de rotación galáctico. A su vez, la orientación de la distribución cinemática de este último grupo coincide aproximadamente con la distribución espacial de las galaxias satélites (Hartwick 1996). Este autor postula que la distribución de galaxias satélites dibuja la estructura espacial de la MI y que el potencial galáctico de la corona dejó su huella en las órbitas de los objetos que se originaron en las primeras etapas de formación del halo. La existencia del *alabeo* del gas en las regiones externas del disco es interpretado por algunos autores (ver Binney 1992) como efecto del par generado por un halo masivo no alineado con los ejes principales del disco.

Este es un primer esquema sobre el que empezar a trabajar, aunque también discutiré en los siguientes apartados la existencia de otras poblaciones, en el sentido de la definición operativa dada a este concepto en la introducción. El problema fundamental es colocar estas piezas en un esquema temporal que esté de acuerdo con nuestros conocimientos actuales sobre los procesos de formación y evolución estelar, dinámica de sistemas estelares, evolución química, naturaleza y estructura de la MI, y modelos cosmológicos; es decir, con la Astrofísica.

Sandage (1989) describió esta tarea como *el arte de obtener conclusiones significativas a partir de evidencias insuficientes*, apuntando también cómo la ciencia de los orígenes se mueve en la frontera del método científico, cuando no la traspasa. Obviando estas consideraciones epistemológicas cabe preguntarse cuál podría ser el conjunto de cuestiones claves que uno debería responder antes de poder proporcionar un escenario global del origen de la Galaxia. Carney (1995) propuso 20 preguntas que, a su juicio, delimitan el estado del problema. Utilizando como base este cuestionario he confeccionado la siguiente lista:

- Materia invisible: ¿Cuáles son sus efectos sobre las escalas temporales dinámicas en la formación de la Galaxia? Si la MI fuera bariónica ¿qué efectos tendría sobre la evolución química de la Galaxia?
- Momento angular: ¿Quién ordenó esto? ¿Podemos establecer un diagrama momento angular–edad?
- Acreción: ¿Sucedio o está sucediendo? ¿Pocos eventos muy masivos o muchos a pequeña escala? ¿Cuánto gas ha acretao el disco desde su formación? ¿Qué hechos observacionales implican necesariamente la existencia de eventos de acreción o captura?
- Colapso: ¿Qué observaciones pueden ser asociadas inequívocamente con un colapso disipativo? ¿Se puede establecer la existencia de un reloj químico, o nos enfrentamos a varios procesos con distintos tiempos de enriquecimiento?
- Edad: ¿Podemos establecer una edad, al menos relativa, de las componentes galácticas? ¿y una absoluta?

Antes de entrar a responder algunas de estas cuestiones me gustaría esbozar los escenarios extremos donde nos movemos. Estos van desde un colapso monolítico de una nube protogaláctica a la acreción de

segmentos protogalácticos más pequeños que han podido sufrir diferentes grados de evolución y que aún pueden estar ocurriendo. El primer paradigma corresponde al modelo propuesto por Eggen, Lynden-Bell & Sandage (1962) y posteriormente desarrollado por Sandage (1969) (de aquí en adelante ELS), que estructura la formación del halo en la fase inicial del colapso mientras que el disco adquiriría su rotación y su actual metalicidad a través de un proceso de asentamiento del remanente gaseoso del halo enriquecido vía nucleosíntesis estelar. En su forma original este modelo proponía una escala de tiempo para el colapso inicial inferior a unos pocos 10^8 años y la existencia de una relación monotónica entre cinemática y metalicidad. Por el contrario, el modelo de Searle & Zinn (1978) (SZ) considera que la formación del halo fue un proceso más caótico. Estos autores proponen que lo que hoy es el halo se formó a partir de fragmentos que evolucionaron aisladamente de la región central de la Galaxia, sufriendo sus propios procesos de enriquecimiento y que sólo posteriormente entraron en equilibrio dinámico con las regiones internas de la Galaxia. Este proceso no conduce a ninguna dependencia metalicidad–cinemática y admite escalas de tiempo de varios Gaños. Quizás los dos modelos no sean más que simplificaciones de un fenómeno más complejo que da lugar a observaciones interpretables en ambos escenarios.

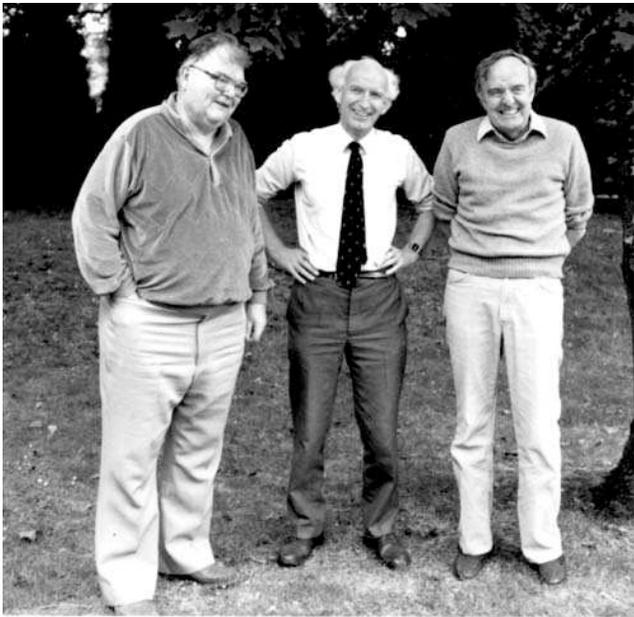


Fig. 1. Olin Eggen, Donald Lynden-Bell y Allan Sandage, pioneros de la cosmogonía de la Vía Láctea

Algunas respuestas

Obviamente no hay respuestas para todas las cuestiones planteadas anteriormente y a veces, cuando las hay, no son únicas. Aquí he seleccionado algunas de las ideas, modelos, experimentos y observaciones que la comunidad astronómica ha elaborado en los últimos años y

que intentan responder a la cuestión básica del origen de la Vía Láctea.

Una de las aproximaciones más interesantes al estudio de la formación de la Vía Láctea proviene del análisis del momento angular específico de los diversos subsistemas. Gilmore (1996) argumenta que para considerar que la relación metalicidad–cinemática sea representativa de un colapso disipativo es necesario que la mayor parte del gas que contribuye a la evolución química esté presente durante todo el proceso. Desde este punto de vista la formación del disco no parece estar conectada a la formación del halo. Dos factores apoyan este aserto: el radio a mitad de masa del halo es inferior al radio a mitad de masa del disco y, por otro lado, la necesidad de un alto factor de colapso para crear un disco mantenido por rotación a partir del material primordial (incluso si la corona de MI es tenida en cuenta). Una explicación alternativa a la existencia de esta correlación es que el halo se formara en un colapso monolítico, y que el gas perdido en este colapso fuera a parar a una región más pequeña que el disco: el bulbo. Ibata & Gilmore (1995) apoyan esta hipótesis con la estimación del momento angular específico para cada componente galáctica. Mientras que el halo y el bulbo parecen estar mantenidos por presión, con una rotación de sólo $25 \text{ km s}^{-1} \text{ kpc}^{-1}$ para esta última componente, el disco grueso y el disco delgado muestran un alto momento angular específico. Estos autores mantienen que el halo pobre en metales y el bulbo han podido ser originados en el mismo colapso disipativo, mientras que el disco grueso y el disco delgado, ambos con un alto momento angular específico, han sido formados posteriormente.

Aunque la formación del bulbo en la fase del colapso disipativo inicial tiene suficientes apoyos, existen otras alternativas que conectan la formación de esta estructura con el disco. En los últimos años han aparecido varios artículos que propugnan la similitud del bulbo con el disco interno de las galaxias espirales (de Jong 1995, 1996; Peletier & Balcells 1996). Estos trabajos se basan principalmente en el análisis de la fotometría integrada de banda ancha que parece mostrar un alto grado de continuidad entre el disco y el bulbo. Si interpretamos estos colores como representativos de una cierta edad y metalicidad, la conclusión es que el disco y el bulbo son, en relación a estos parámetros, similares. Por otro lado, el pico de abundancia química de las gigantes K en la ventana de Baade (la única región del bulbo accesible a través del rango óptico) concuerda con las del mismo tipo espectral en la vecindad solar (McWilliam & Rich 1994). Estos datos sugieren la posibilidad de que el bulbo se haya formado por inestabilidades del disco estelar. Simulaciones de n -cuerpos en tres dimensiones (Combes et al. 1990; Raha et al. 1991; Norman et al. 1996; Bouwens et al. 1999) apoyan la formación de estructuras, similares a los bulbos observados en otras galaxias, que se originan por la presencia de una barra o por inestabilidades dentro de la propia barra; y nuestra galaxia parece contener una barra.

La principal objeción teórica a este escenario ha sido planteada recientemente por Wyse (1998) analizan-

do el espacio-fase de un bulbo originado a partir de inestabilidades, sin colisiones, en un disco estelar. Su principal resultado es que los máximos de densidad en el espacio-fase, tanto del bulbo como del disco, deben ser similares. Sin embargo, la estimación de estos máximos en la Galaxia muestra un valor para el bulbo al menos 5 veces mayor que el calculado para el disco interno. Para solventar esta contradicción tenemos que acudir de nuevo a un flujo de gas alimentando el bulbo, o a la captura, ya de galaxias satélites, ya de cúmulos globulares. Si el aporte gaseoso corresponde a la fase inicial del colapso debemos invocar un mecanismo que pare o ralentice la formación estelar en el bulbo hasta que ésta fuera contemporánea a la formación del disco, o un proceso que seleccione aquellos eventos de acreción con edades y metalicidades similares a las observadas actualmente. Ambos mecanismos parecen implausibles.

Otra cuestión fundamental, implícita en ambos modelos, pero que deliberadamente ha sido omitida en la discusión anterior es la edad del bulbo. Las estimaciones de este parámetro oscilan entre 8 y 15 Gaños, dependiendo del tipo de objeto y la metodología utilizada en su determinación. El límite superior (más viejo) se ha derivado a partir de la datación de dos cúmulos globulares, supuestamente miembros del bulbo, con metalicidad similar a la solar (Ortolani et al. 1995). Un resultado similar se obtiene a partir de la distribución de metalicidades de las RR Lyrae asociadas al bulbo, si nos atenemos al modelo evolutivo de rama horizontal desarrollado por el grupo de Yale (Lee 1992). Sin embargo la presencia de variables Miras de largo período y la fotometría integral del bulbo y disco en galaxias externas sugieren una edad más próxima a los 10 Gaños. Dado que la región central de la Galaxia contiene elementos del disco, halo interno y bulbo, nos encontramos con un problema de difícil solución: *separar objetos conforme a propiedades estimadas a partir de la propia clasificación*. La incertidumbre también afecta a la determinación de la velocidad rotacional, el único dato cinemático disponible es la velocidad radial y la componente rotacional estimada es producto de la aplicación de diferentes modelos cinemáticos (Frenk & White 1982; Kent 1992) plenos de hipótesis simplificadoras.

El sistema de cúmulos globulares ha sido, durante muchos años, la principal fuente de información acerca de la formación de la Vía Láctea y sus primeros estadios evolutivos. La extrema edad de sus miembros lo convierten en el conjunto fósil más viejo y homogéneo disponible. Sin embargo, al igual que en Paleontología, los yacimientos fósiles sufren perturbaciones catastróficas que pueden alterar la historia de su formación. A lo largo de la evolución galáctica el sistema de cúmulos globulares (SCG) ha sufrido un proceso de destrucción y la muestra actual no es más que el conjunto superviviente filtrado a través de los mecanismos de destrucción. Estos dependen principalmente de la masa, estructura interna, y posición del cúmulo en el espacio-fase en el momento de su formación. La función de luminosidad de los cúmulos globulares muestra una distribución con un pico centrado alrededor de $M_V = -7.5$, muy diferente a las distribuciones observadas en otros tipos de objetos tales como estrellas en

cúmulos abiertos, nubes moleculares, etc. La explicación actual más atractiva considera que la función inicial de masa del SCG es similar a la observada en otros objetos galácticos, una ley potencial con un exponente próximo al de Salpeter, siendo su estado actual el resultado de los procesos de destrucción acaecidos durante la evolución dinámica de la Galaxia (Elmegreen & Efremov 1997).

Otro punto de interés a la hora de analizar el SCG es su número. Un total de 150 cúmulos globulares están catalogados actualmente (Harris 1996), aunque se estima que inicialmente fueron alrededor de 200 (Surdin 1979). En el catálogo de Harris (1996) se puede ver como alrededor de 30 variables diferentes han sido observadas o estimadas para cada cúmulo. Esto que, obviamente, es un dato positivo encierra también una sutil trampa: *las posibilidades de practicar la taxonomía se desbordan*. De hecho, al menos seis diferentes subsistemas se han propuesto en los últimos diez años, sin contar con las correlaciones de dos variables estimadas para los diferentes grupos (ver, por ejemplo, van den Bergh 1995). Estos seis subsistemas pueden describirse como *disco* y *halo* (basado principalmente en la bimodalidad de la distribución en metalicidad del SCG) (Armandroff 1989). A su vez el subsistema halo ha sido clasificado en *jóven* y *viejo* atendiendo a la morfología de la rama horizontal (Zinn 1993). Por otro lado, los cúmulos del subsistema *disco* interiores a $R < 3$ kpc han sido considerados como miembros del *bulbo* (Minitti 1995) y a su vez, clasificando por luminosidad y cinemática, Burkert & Smith (1997) dividen al subsistema *disco* en tres componentes: (i) una condensación central de cúmulos del halo con alta masa (luminosidad), (ii) una barra de cúmulos de baja masa, y (iii) un grupo de cúmulos de baja masa en rotación rápida que parece formar un estructura toroidal con un radio entre 4 y 6 kpc. Sin olvidarnos de que cuatro cúmulos del halo parecen haberse formado en la galaxia enana de Sagitario y posteriormente acretaos por nuestro sistema galáctico. Dos de estos cúmulos habían sido clasificados como *halo joven* y los otros dos como *halo viejo*. Este pequeño grupo de fósiles admite demasiadas clasificaciones.

Quizás la cuestión más controvertida en la relación del halo y disco sea la presencia de material con metalicidad $[Fe/H] < -1$, alta velocidad de rotación y una estructura espacial aplanada con parámetros estructurales próximos a los del disco grueso: la cola de baja metalicidad. Las primeras indicaciones de la existencia de esta subpoblación tienen casi quince años; se remontan a un estudio de Norris et al. (1985) donde analizan una muestra de enanas y gigantes pobres en metales, encontrando que aproximadamente el 20 % tienen excentricidades inferiores a 0.4, típicas de órbitas del disco. Posteriormente Carney & Latham (1986) publicaron que entre el 5 y el 8 % de una muestra de gigantes con $[Fe/H] < -1.5$ presentan las mismas propiedades.

Morrison et al. (1990) abundan en este hecho, encontrando que alrededor del 80 % de una muestra de gigantes rojas con metalicidades entre $-1.6 < [Fe/H] < -1$ tienen velocidades de rotación compatibles con las

del disco grueso. El estudio más completo (2000 estrellas) debido a Beers & Sommer-Larsen (1995) requiere una mención especial. Estos autores encuentran la existencia de estrellas con alta velocidad de rotación hasta valores de $[Fe/H] = -2.5$.

El análisis de los cúmulos globulares también proporciona algunas pistas en este sentido. Dos cúmulos con medidas de movimientos propios y metalicidades alrededor de -1.5 muestran velocidades espaciales que los asocian al disco (Cudworth & Hanson 1993; Dinescu et al. 1999). Alfaro et al. (1995) llegaron a similares conclusiones, incluso para metalicidades más bajas, a partir del análisis cinemático del SCG. En resumen, existen claras evidencias en favor de la existencia de una población pobre en metales (similar a la del halo) con características cinemáticas y espaciales típicas del disco grueso.

Una de las preguntas claves planteadas anteriormente es ¿qué tipo de observaciones irían asociadas inequívocamente a fenómenos de acreción habidos anteriormente en nuestra galaxia? Algunos autores han sugerido que la existencia de cúmulos globulares con velocidades retrógradas es representativa de eventos de acreción. Sin duda, un colapso monolítico se muestra incapaz de cambiar de signo el momento angular inicial y la presencia de cúmulos con velocidad retrógrada apunta en la dirección de un escenario a la SZ. Sin embargo, un *colapso más ruido*, en la definición de Sandage (1989), podría haber dado lugar a una distribución de velocidades más aleatoria donde la componente rotacional presentaría en algunos casos un valor negativo. Así pues, si queremos fijar sin ninguna duda la huella de eventos de acreción anteriores deberíamos acudir a otra fenomenología. En este aspecto, la existencia de grupos móviles en un campo del Polo Norte galáctico, detectada por Majewski et al. (1996), representa la prueba más fehaciente de que el halo galáctico no es un sistema dinámicamente relajado y que aún podría guardar huellas de la acreción de subsistemas más pequeños. No obstante, este resultado puede ser interpretado como la ruptura de un cúmulo globular, previamente formado en un colapso disipativo, sin necesidad de acudir a eventos extragalácticos.

Cuando no hay datos cinemáticos disponibles, la presencia de estructuras espaciales formando principalmente grandes círculos o arcos de círculos se interpreta también como huella de acreción. De hecho se ha demostrado, a partir de simulaciones numéricas, que los residuos del encuentro de una galaxia satélite con el halo galáctico pueden mantenerse alineados formando extensas estructuras durante toda la edad de la Galaxia (Johnston et al. 1995). Otros autores han detectado la presencia de varias estructuras espaciales, interpretables como remanentes de encuentros previos (Lynden-Bell & Lynden-Bell 1995).

Algunos modelos dinámicos y cinemáticos de la Galaxia comparten la idea de que si el halo galáctico se formó en un colapso monolítico de una nube protogaláctica, el elipsoide de velocidad del halo debe tener su máxima dispersión en la dirección radial (la dirección del colapso; van Albada 1982). Sin embargo las medidas

efectuadas por Sommer-Larsen et al. (1997) en varios campos del halo galáctico obtienen una variación significativa de σ_R con la distancia galactocéntrica. Mientras en las zonas internas del halo la dispersión radial es máxima, las regiones externas ($R > 20\text{kpc}$) muestran una dispersión tangencial superior a la radial. Estos autores sostienen que este resultado favorece la idea de que el halo externo fue originado por acreción.

Utilizando técnicas de cartografía automática, Alfaro et al. (1993) trazaron un mapa de metalicidad del halo a partir de los cúmulos globulares pobres en metales. Esta cartografía presenta un mínimo de metalicidad en una región próxima al Sol. Los autores interpretaron esta mancha de baja metalicidad como la huella de la acreción de un sistema estelar, probablemente una galaxia enana. Los cúmulos globulares originalmente formados en esta galaxia podrían haber contaminado una extensa región del halo bajando la metalicidad media estimada de la zona.

La mejor evidencia de que han sucedido y están sucediendo fenómenos de acreción es el descubrimiento de la galaxia esferoidal enana de Sagitario (Ibata et al. 1994) y su herencia de, al menos, cuatro cúmulos globulares (Da Costa & Armandroff 1995). Este hecho no deja lugar a dudas de que la interacción entre la Vía Láctea y algunas de sus galaxias satélites está dejando material en el halo que, durante algún tiempo, ha sido considerado originario de nuestra Galaxia. Otros resultados observacionales, como la detección del denominado *Leading Arm* (Putman et al. 1998), que no es más que una banda de HI conectando la Nube Grande de Magallanes con nuestra Galaxia, refuerzan la idea de que la Vía Láctea no es un sistema cerrado y que, incluso, los diferentes subsistemas galácticos están interactuando con intercambio de material. Algunos autores han considerado que las Nubes de Alta Velocidad (NAV), cuyo origen está todavía en discusión, podrían estar modificando la estructura espacial, metalicidad y tasa de formación estelar en el disco galáctico (ver Alfaro & Efremov 1996 y sus referencias).

El paradigma actual

Después de apuntar algunas de las observaciones que delimitan el estado actual del problema no nos queda más que esbozar un esquema de formación de la Galaxia que al menos explique las principales características de nuestro sistema galáctico. En los últimos diez años ha emergido un modelo que, como no podía ser de otra manera, adopta una visión intermedia entre un puro ELS y una formación más caótica a la SZ.

Un halo interno, pobre en metales, mostrando indicios de un gradiente de metalicidad tanto cinemático como espacial (Norris 1996), junto con un elipsoide de velocidades anisotrópicamente radial (Sommer-Larsen et al. 1997), parece haberse formado durante un colapso disipativo, probablemente corto en términos de escala de tiempo dinámica. No son descartables algunos procesos de acreción después del colapso que hayan dejado algún material en el halo interno. El halo externo parece, por el contrario, mostrar características típicas

de un proceso de formación originado por acreción y encuentro de subsistemas más pequeños. La ausencia de un gradiente de metalicidad y sus propiedades cinemáticas así lo sugieren. Por otro lado este modelo jerárquico (al menos parcial) es perfectamente compatible con los modelos de formación de galaxias derivados del escenario MIF (ver Blumenthal et al. 1984 para una discusión más amplia) y viene reforzado por algunos resultados observacionales que muestran como un grupo de galaxias con alto corrimiento al rojo parecen estar en proceso de acreción formando un sistema de orden superior (Pascarelle et al. 1996).

Los argumentos respecto a la distribución del momento angular son, a mi entender, los más convincentes a la hora de explicar la formación del bulbo (Ibata & Gilmore 1995). Si tanto el halo como el bulbo muestran un bajo momento angular específico, no es descabellado pensar que el gas participante en el colapso inicial, que no fué capaz de formar estrellas, finalizara en las regiones internas de la Galaxia donde el pozo de potencial es más profundo. Además, ya que la densidad de la Galaxia incrementa hacia el centro, uno debería esperar que las regiones nucleares de la Vía Láctea colapsaran antes que las regiones externas, basándose simplemente en la dependencia del tiempo de colapso con la densidad. Un argumento adicional viene dado por el análisis de los procesos de formación estelar en regiones densas, efectuado por Elmegreen (1999), que concluye que la formación estelar en el bulbo tuvo lugar de forma rápida ($< 10^8$ años). Aunque el proceso de acreción del gas fuera más largo, la formación de la componente estelar del halo fue extremadamente rápida una vez alcanzada la densidad crítica.

Probablemente la formación del disco galáctico no esté relacionada ni con la del bulbo ni la del halo, aunque algunas estrellas con cinemática de disco grueso presenten metalicidades comparables a la de la componente estelar del halo (Beers & Sommer-Larsen 1995). Se plantean aquí dos cuestiones fundamentales: ¿de dónde vino el gas que formó el disco? y ¿cómo alcanzó el alto momento angular observado actualmente? La respuesta más plausible es que este gas proviene de subsistemas difusos y poco metálicos que conformaban el halo externo y que fueron destruidos por efectos de marea, fricción dinámica, etc (ver Freeman 1996). Estos sistemas transmitieron su alto momento angular orbital al disco a través del asentamiento lento y continuado de su componente gaseosa en un periodo inferior, aunque comparable, a la edad del disco (Gilmore 1996; Sommer-Larsen et al. 1997). Es decir, al contrario que en un puro ELS, el disco no es el resultado final del colapso, sino un subproducto de la evolución del halo externo inicialmente formado por agrupaciones de gas inestables frente a la fricción dinámica con la corona de materia invisible.

Se han barajado varias opciones para explicar el origen de la componente gruesa del disco (ver Majewski 1992). Nos limitaremos aquí a discutir brevemente dos posibilidades. La primera considera que el disco grueso es el resultado del calentamiento del disco delgado tras su encuentro con uno de los fragmentos a la SZ. El alto

valor de la escala de altura para estrellas con metalicidad del orden de $[Fe/H] = -0.6$ parece apoyar esta hipótesis. Por otro lado algunos modelos de simulación de encuentros entre sistemas estelares de distinta masa demuestran que un disco estelar puede sobrevivir al encuentro con una galaxia satélite sin destruirlo, originando la formación de un disco grueso (Quinn et al. 1993). La segunda alternativa invoca de nuevo al colapso disipativo, y considera que este se originó por el mismo mecanismo que el halo interno en las primeras fases de la formación de la Vía Láctea. Sin embargo, atendiendo de nuevo al argumento del momento angular específico, podemos darle menos peso a esta hipótesis.

Este tipo de artículos se suele finalizar indicando una serie de acciones futuras encaminadas a desvelar algunas de las incógnitas planteadas. En el caso de la formación de la Galaxia son tantas las preguntas que una relación de líneas a seguir, tanto teóricas como observacionales, necesitaría al menos otro artículo como éste. Sin embargo, si alguien me ofreciera la oportunidad de elegir un único conjunto de datos que pudiera darme la máxima información acerca de estos problemas, elegiría, sin duda, los datos cinemáticos. Afortunadamente no uno sino muchos están trabajando para que esta información esté pronto disponible. Las misiones espaciales *GAIA* y *FAME*, cada una en diferente estado de desarrollo y con distinto modo de operación, nos proveerán con datos de movimientos propios para un amplio y lejano conjunto de estrellas. *GAIA* proporcionará también datos fotométricos y espectroscópicos que permitirán la observación directa de la evolución química y cinemática de los distintos subsistemas. Si *Hipparcos* ha cambiado nuestra visión de la vecindad solar, *GAIA* y *FAME* abren la posibilidad de que alguna vez entendamos cómo se originó el sistema estelar donde vivimos.

Agradecimientos

Muchas de las ideas expuestas en este artículo no son patrimonio del autor. De algunas de ellas sí se me puede juzgar responsable, pero, gracias a Dios, puedo repartir culpas con dos colaboradores y amigos sin los cuales mi interés y visión de la formación de la Vía Láctea sería muy diferente. A Jesús Cabrera-Caño y Antonio J. Delgado, gracias. Antxon Alberdi, Enrique Pérez y Pepe Vilchez se tomaron la molestia de leer el manuscrito y sugerirme algunas mejoras. Francesca Figueras arbitró el artículo podando inexactitudes y proponiendo algunos puntos de gran interés. A todos ellos, mi agradecimiento.

Bibliografía

- Alfaro, E. J., & Efremov, Yu. N. 1996, *RMA&A* (Conference Serie), 4, 1
- Alfaro, E. J., Cabrera-Caño, J., & Delgado, A. J. 1993, *ApJ*, 402, L53
- Alfaro, E. J., Cabrera-Caño, J., Delgado, A. J., & Janes, K. A. 1995, en "The Formation of the Milky

- Way”, eds. E. J. Alfaro, A. J. Delgado, p. 261 (Cambridge: Cambridge University Press)
- Armandroff, T. E. 1989, *AJ*, 93, 375
- Baade, W. 1951, *Pub. Obs. Univ. Mich.*, 10, 7
- Bahcall, N. A., & Cen, R. 1992, *ApJ*, 398, L81
- Beers, T. C., & Sommer-Larsen, J. 1995, *ApJS*, 96, 175
- Binney, J. J. 1992, *ARA&A*, 30, 51
- Blumenthal, G. R., Faber, S. M., Primack, J. R., & Rees, M. J. 1984, *Nature*, 311, 517
- Bouwens, R., Cayón, L., & Silk, J. 1999, *ApJ*, 516, 77
- Buonanno, R., Corsi, C., Bellazzini, M., Ferraro, F. R., & Fusi-Pecci, F. 1997, *AJ*, 113, 706
- Burkert, A., & Smith, G. H. 1997, *ApJ*, 474, L15
- Carney, B. W. 1995, en “The Formation of the Milky Way”, eds. E. J. Alfaro, A. J. Delgado, p. 347 (Cambridge: Cambridge University Press)
- Carney, B. W., & Latham, D. W. 1986, *AJ*, 92, 60
- Combes, F., Debbasch, F., Friedli, D., & Pfenninger, D. 1990, *A&A*, 233, 282
- Cowie, L. L., Songaila, A., Hu, E. M., & Cohen, J. G. 1996, *AJ*, 112, 839
- Cudworth, K. M., & Hanson, R. B. 1993, *AJ*, 105, 168
- Da Costa, G. S., & Armandroff, T. E. 1995, *AJ*, 109, 2533
- Davis, M., Efstathiou, G., Frenk, C. S., & White, S. D. M. 1985, *ApJ*, 292, 371
- de Jong, R. 1995, Tesis Doctoral, Universidad de Groningen
- de Jong, R. 1996, *A&A*, 313, 45
- Dinescu, D. I., Girard, T. M., & van Altena, W. F. 1999, *AJ*, 117, 1792
- Eggen, O., Lynden-Bell, D., & Sandage, A. 1962, *ApJ*, 136, 748
- Ellis, R. S. 1997, *ARA&A*, 35, 389
- Elmegreen, B. G. 1999, *ApJ*, 517, 103
- Elmegreen, B. G., & Efremov, Yu. N. 1997, *ApJ*, 480, 235
- Freeman, K. C. 1996, en “Formation of the Galactic Halo ... Inside and Out”, eds. H. L. Morrison, A. Sarajedini, *ASP Conf. Ser.*, 92, 3 (San Francisco)
- Frenk, C. S., & White, S. D. M. 1982, *MNRAS*, 198, 173
- Freudenreich, H. T. 1998, *ApJ*, 492, 495
- Gilmore, G. 1996, en “Formation of the Galactic Halo ... Inside and Out”, eds. H. L. Morrison, A. Sarajedini, *ASP Conf. Ser.*, 92, 161 (San Francisco)
- Gilmore, G., & Reid, N. 1983, *MNRAS*, 202, 1025
- Harris, W. E. 1996, *AJ*, 112, 1487
- Hartwick, F. D. A. 1996, en “Formation of the Galactic Halo ... Inside and Out”, eds. H. L. Morrison, A. Sarajedini, *ASP Conf. Ser.*, 92, 444 (San Francisco)
- Ibata, R. A., & Gilmore, M. J. 1995, *MNRAS*, 275, 605
- Ibata, R. A., Gilmore, M. J., & Irwin, M. J. 1994, *Nature*, 370, 194
- Johnston, K. V., Spergel, D. N., & Hernquist, L. 1995, *ApJ*, 451, 598
- Kent, S. 1992, *ApJ*, 387, 181
- Lee, Y.-W. 1992, *AJ*, 104, 1780
- Lilly, S. J., Tresse, L., Hammer, F., Crampton, D., & Le Fèvre, O. 1995, *ApJ*, 455, 108
- Lynden-Bell, D., & Lynden-Bell, R. M. 1995, *MNRAS*, 275, 429
- Majewski, S. R. 1992, *ApJS*, 78, 87
- Majewski, S. R. 1995, en “The Formation of the Milky Way”, eds. E. J. Alfaro, A. J. Delgado, p. 199 (Cambridge: Cambridge University Press)
- Majewski, S. R., Munn, J. A., & Hawley, S. L. 1996, *ApJ*, 459, L73
- Martínez-Delgado, D. 1999, Tesis Doctoral, Universidad de La Laguna
- McWilliam, A., & Rich, R. M. 1994, *ApJS*, 91, 749
- Minniti, D. 1995, *AJ*, 109, 106
- Miralda-Escudé, J. 1999, *Boletín SEA*, 2, 1
- Morrison, H. L., Flynn, C. M., & Freeman, K. C. 1990, *AJ*, 100, 1191
- Norman, C., Sellwood J., & Hasan, H. 1996, *ApJ*, 462, 114
- Norris, J. 1996, en “Formation of the Galactic Halo ... Inside and Out”, eds. H. L. Morrison, A. Sarajedini, *ASP Conf. Ser.*, 92, 14 (San Francisco)
- Norris, J., Bessell, M. S., & Pickles, A. J. 1985, *ApJS*, 58, 463
- Ortolani, S., Renzini, A., Gilmozzi, R., Marconi, G., Barbuy, B., Bica, E., & Rich, M. R. 1995, *Nature*, 377, 701
- Pascarelle, S. M., Winddhorst, R. A., Keel, W. C., & Odewahn, S. C. 1996, *Nature*, 383, 45
- Peletier, R., & Balcells, M. 1996, *AJ*, 111, 2238
- Putman, M. E., et al. 1998, *Nature*, 394, 752
- Quinn, P. J., Hernsquit, L., & Fullagar, D. P. 1993, *ApJ*, 403, 74
- Raha, N., Sellwood, J. A., James, R. A., & Kahn, F. D. 1991, *Nature*, 352, 411
- Rich, R. M. 1992, en “The Center, Bulge, and Disk of the Milky Way”, ed. L. Blitz, p. 47 (Dordrecht: Kluwer)
- Rich, R. M. 1996, en “Formation of the Galactic Halo ... Inside and Out”, eds. H. Morrison, A. Sarajedini, *ASP Conf. Ser.*, 92, 24 (San Francisco)
- Sandage, A. 1969, *ApJ*, 158, 1115
- Sandage, A. 1989, *JRASC*, 84, 70
- Searle, L., & Zinn, R. 1978, *ApJ*, 225, 357
- Sommer-Larsen, J., Beers, T. C., Flynn, C., Wilhelm, R., & Christensen, P. R. 1997, *ApJ*, 481, 775
- Steidel, C. C. 1999, *PNAS*, 96, 4232
- Surdin, V. G. 1979, *Soviet Ast.*, 23, 648
- Tsikoudi, V. 1977, Tesis Doctoral. Universidad de Texas
- van Albada, T. S. 1982, *MNRAS*, 201, 939
- van den Bergh, S. 1995, *AJ*, 110, 1171
- White, S. M. D., & Rees, M. J. 1978, *MNRAS*, 183, 341
- Wyse, R. F. G. 1998, *MNRAS*, 293, 429
- Zinn, R. 1993, in “The Globular Cluster-Galaxy Connection”, eds. G. Smith, J. Brodie, *ASP Conf. Ser.*, 48, 38 (San Francisco)