

¿CUÁL ES EL DESTINO DE LA VÍA LÁCTEA?

Santiago García Burillo

*Observatorio Astronómico Nacional
Instituto Geográfico Nacional - Ministerio de Fomento*

Abstract

The recent determination of the three-dimensional motion between Andromeda (M 31) and the Milky Way has allowed astronomers to predict with high accuracy the past history and the future evolution of the encounter between both galaxies. In about 4 billion years, Andromeda is going to start a dramatic collision with the Milky Way that will disrupt the stellar disks of both systems. The most likely scenario contemplates that the two galaxies are bound to merge and eventually form a massive giant elliptical after 10 billion years from now. During this colossal event, the supermassive black holes in our two galaxies will interact, and possibly merge. And if enough material piles up around the resulting beast, maybe our Milky Way could become a quasar.

Introducción

Nuestra Galaxia (también conocida como la *Vía Láctea*, *Milky Way* (MW) en su acepción inglesa) y la galaxia Andrómeda (M 31) son las galaxias más masivas del Grupo Local de galaxias (van den Bergh 2000). Este grupo incluye una cincuentena de objetos, en su mayoría galaxias enanas poco masivas. Como en el caso de la mayoría de los grupos de galaxias, el Grupo Local está muy probablemente desacoplado del movimiento cosmológico de expansión acelerada del universo y puede, por lo tanto, considerarse como una entidad gravitacionalmente ligada, y en cierto modo, *abandonada* a su suerte. En este contexto, conocer cuál será la evolución futura del Grupo Local, reviste un gran interés astronómico.

Situada a una distancia de unos 770 kpc (2,5 millones de años luz) de la Vía Láctea, Andrómeda es la galaxia espiral más próxima a nosotros. La componente radial de la velocidad de M 31 relativa a la Galaxia, medible fácilmente por el efecto Doppler del desplazamiento de sus líneas espectrales, se conoce con precisión desde hace mucho tiempo. Dicha velocidad radial indica claramente un *inquietante* movimiento de aproximación a la Vía Láctea ($V_{\text{rad}} \simeq -120$ km/s, medida respecto al sistema de referencia galacto-céntrico; Binney & Tremaine 1987). Este movimiento hizo sospechar a los astrónomos que una colisión violenta entre Andrómeda y la Galaxia era un escenario muy probable (Dubinski et al. 1996; Peebles et al. 2001; Cox & Loeb 2008). No obstante, la determinación de la componente transversal de la velocidad relativa de Andrómeda, esencial a la hora de caracterizar completamente su órbita en el espacio, sólo ha podido lograrse más recientemente con la precisión requerida. La razón por la que dicha medida ha tardado en ser obtenida radica en la dificultad intrínseca en medir movimientos propios (*transversales*) de objetos celestes, que por definición se encuentran muy lejanos, en escalas de tiempo *humanas* (e.g., del orden de años).

A la distancia de M 31, para medir una velocidad transversal que fuese comparable a la velocidad radial de ~ 100 km/s, se requería alcanzar una precisión en la medida de los movimientos propios del orden de 0,027 milisegundos de arco por año. Dicha precisión fué utilizada recientemente por primera vez por un equipo de investigadores para medir los movimientos propios de un conjunto de estrellas de M 31. Lograr esta hazaña técnica requirió realizar observaciones con el telescopio espacial Hubble durante un periodo de siete años en la pasada década. Los resultados de estas medidas y sus implicaciones fueron desarrollados en detalle en una serie de tres publicaciones científicas de la revista *The Astrophysical Journal*, aparecidas en el año 2012 (Sohn et al., 2012; van der Marel et al., 2012a, 2012b).

En el presente artículo se describen las consecuencias fundamentales que dichas investigaciones tienen a la hora de prever la evolución futura y el destino de nuestra Galaxia en relación a su *tormentosa* interacción con Andrómeda.

Los movimientos propios de Andrómeda

Durante el periodo referido, que va desde finales del año 2002 al 2010, el telescopio espacial Hubble registró los movimientos propios de miles de estrellas en tres zonas de M 31. Los campos observados estaban situados en el halo (cerca del eje menor de la galaxia), en el disco externo (cerca del eje mayor de la galaxia), y en una cola de interacción que se encuentra ligada al sistema. Las figuras 1 y 2 ilustran las observaciones realizadas en el campo del halo de M 31.

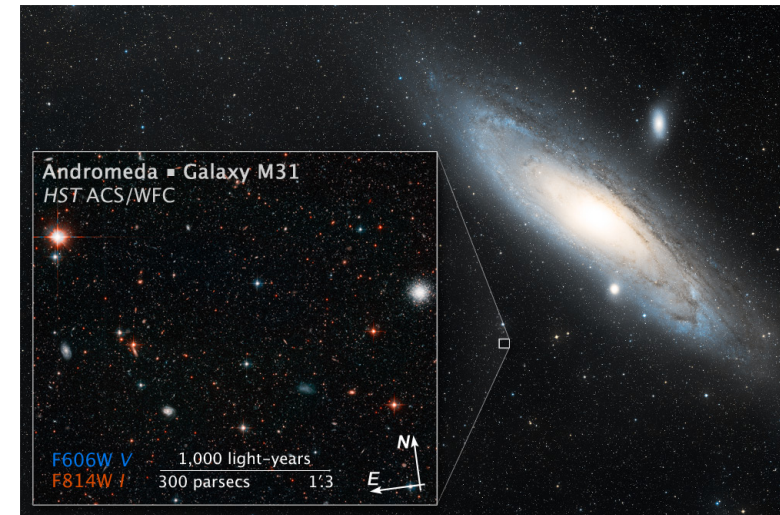


Figura 1: Una imagen óptica de la galaxia Andrómeda (M 31). Los astrónomos seleccionaron tres campos entre los que se encuentra uno situado en el halo de la galaxia, que se muestra en la figura, para que el telescopio espacial Hubble (HST) midiese los movimientos propios de sus estrellas respecto al campo profundo de galaxias, haciendo uso de la alta resolución espacial y sensibilidad del HST. Imagen cortesía de NASA, ESA, and Z. Levay (STScI).

El registro de los movimientos propios se hizo relativo a un sistema de referencia que *necesariamente* debía estar *en reposo* durante el periodo que abarcaban las medidas. Dicho sistema de referencia estuvo definido por un conjunto de centenares de galaxias compactas lejanas del fondo. Estas galaxias pudieron detectarse al mismo tiempo en cada uno de los tres campos seleccionados. Al tratarse de objetos mucho más lejanos que M 31, se puede considerar que las galaxias del fondo se encuentran *en reposo* en todas las imágenes registradas durante el periodo de tiempo en el que se midieron los movimientos propios de las estrellas de Andrómeda (ver figura 3). Aunque en principio se podían haber utilizado fuentes tipo cuásar¹ para definir el sistema de referencia en reposo, el menor número de cuásares detectables en las imágenes, en comparación con el número de galaxias del fondo, desaconsejó el uso de aquéllos en aras de lograr la mayor precisión posible en las medidas.

¹Un cuásar es una fuente astronómica de energía electromagnética, que incluye desde radiofrecuencias hasta luz visible y rayos X. En telescopios ópticos, la mayoría de los cuásares aparecen como simples puntos de luz, aunque algunos parecen ser los centros de galaxias activas. La gran cantidad de energía emitida por estas fuentes se produce durante la alimentación de los agujeros negros supermasivos que se cree se encuentran en los núcleos de estas galaxias.

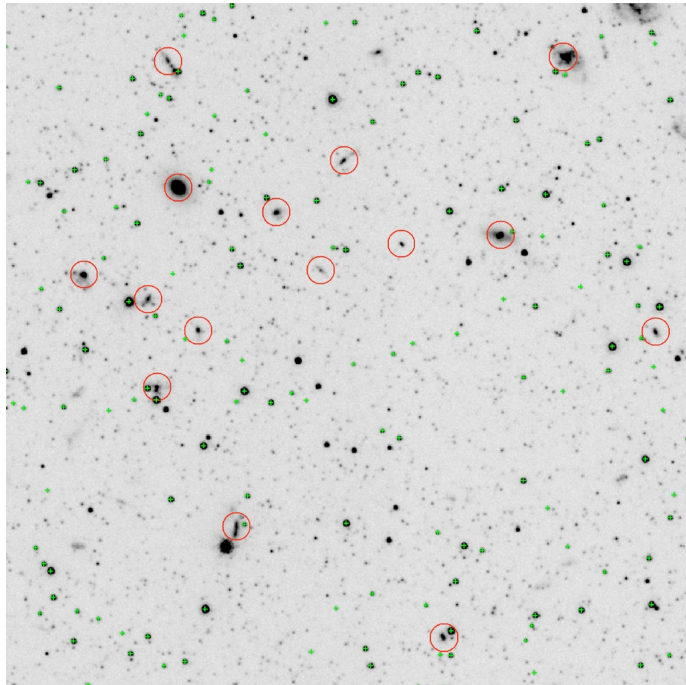


Figura 2: La figura muestra la imagen óptica de una fracción de tamaño $25'' \times 25''$ del campo observado por el telescopio espacial Hubble en el halo de la galaxia Andrómeda (M 31). Las galaxias lejanas, utilizadas como referencia para la medida de los movimientos propios de las estrellas de Andrómeda, se identifican por los círculos rojos. Las estrellas cuyos movimientos propios se registran aparecen identificadas con pequeñas cruces de color verde. Figura adaptada del artículo publicado por Sohn et al. (2012).

Como resultado de esta ambiciosa campaña de observaciones se alcanzó una precisión sin precedentes en el registro de movimientos propios: ~ 12 microsegundos de arco por año. Este record fué posible en gran medida gracias a la resolución espacial y sensibilidad del telescopio Hubble, pero también gracias a que se promediaron medidas de miles de estrellas en los tres campos seleccionados en M 31. Como prueba de la solidez del experimento, los movimientos propios que se dedujeron en los tres campos observados fueron satisfactoriamente consistentes, dentro de los límites de precisión de las medidas.

En la actualidad se está utilizando la emisión procedente de las líneas máser de agua, detectada en un número significativo de complejos en el disco de M 31 (Darling 2011), con objeto de medir los movimientos

propios de dichas regiones emisoras mediante técnicas de interferometría de muy larga base (*Very Long Base Interferometry: VLBI*). Este tipo de observaciones, que permite alcanzar precisiones de ≤ 10 microsegundos de arco por año, se estima que servirán muy pronto (sólo 4-5 años después de las primeras medidas del 2011) para corroborar los resultados obtenidos por el telescopio Hubble y, además, gracias a su mayor precisión, detectar el aumento del tamaño aparente de Andrómeda en su viaje de aproximación hacia nuestra Galaxia.

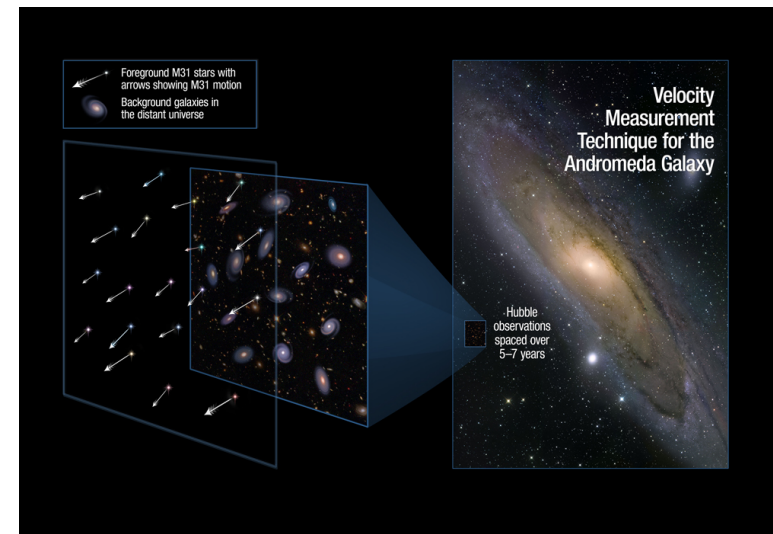


Figura 3: En esta figura se muestra una de las regiones exploradas por los astrónomos para medir los movimientos propios de las estrellas del halo de M 31 con el telescopio Hubble. Gracias a la precisión con que se registraron los movimientos transversales de las estrellas respecto a las galaxias más distantes, que permanecen fijas, durante un periodo que abarcó siete años, se pudo determinar la componente lateral del movimiento relativo global de Andrómeda respecto a la Vía Láctea. Figura cortesía de NASA, ESA, A. Feild y R. van der Marel (STScI).

Este conjunto de medidas ha permitido a los astrónomos determinar con gran fiabilidad cuál fué la historia pasada y, también, cuál será la evolución futura más probable de la interacción entre nuestra Galaxia y M 31.

La medida de la velocidad de Andrómeda

Los movimientos propios obtenidos en los tres campos de M 31 tuvieron que ser corregidos de dos efectos fundamentales con objeto de determinar

cuál es la componente transversal del movimiento propio *global* del centro de masas² de Andrómeda relativa al centro de masas de nuestra Galaxia:

- En primer lugar, hubo que corregir del movimiento de rotación interna de M 31. Gracias a la elección de los tres campos observados descritos arriba, situados a propósito en diferentes regiones de la galaxia y, por lo tanto, afectados en diferente grado por los movimientos de rotación, fué posible corregir este efecto sin añadir una excesiva incertidumbre. De hecho, se estimó que la contribución de la rotación interna era menor que la propia incertidumbre asociada a la medida de los movimientos propios efectuada por el Hubble.
- En segundo lugar, los movimientos propios en los tres campos de M 31 fueron corregidos de la distinta proyección que tiene el movimiento del sistema solar, donde se sitúa en la práctica el observador, en su rotación alrededor del centro de la Galaxia. Esta corrección se benefició del mejor conocimiento que se tenía ya en el año 2012 de la velocidad de rotación del Sol: $V_{\text{rot}} \sim 239 \pm 10 \text{ km/s}$ a una distancia radial $R_{\text{sol}} \sim 8,33 \pm 0,35 \text{ kpc}$ del centro.

Una vez efectuadas estas correcciones, se dedujo que la componente radial de la velocidad de M 31 respecto a nuestra Galaxia es $V_{\text{rad}} \sim -109 \text{ km/s}$, mientras que la componente transversal era $V_{\text{tran}} \sim 17 \text{ km/s}$. En otras palabras, se concluyó que la velocidad transversal de M 31 era mucho menor en valor absoluto que su velocidad radial: $|V_{\text{tran}}| \ll |V_{\text{rad}}|$. Estos valores de la velocidad indican que la órbita de M 31 respecto a nuestra Galaxia es *cuasi radial*. En la práctica, esto implica que la colisión violenta entre las dos galaxias en un futuro próximo es inevitable (ver figura 4).

Finalmente, asumiendo que las órbitas relativas son cuasi keplerianas, y basándose en la medida de las velocidades, se pudo estimar la masa total del sistema interactuante formado por M 31 y nuestra Galaxia ($M_{\text{tot}} \sim 3,2 \times 10^{12} M_{\odot}$, con una contribución similar de ambas galaxias), así como la masa de la principal galaxia satélite de Andrómeda, M 33 ($M_{\text{M33}} \sim 0,1 \times M_{\text{M31}}$).³

Como resultado final de este análisis, se pudieron estimar con la precisión requerida las posiciones iniciales, las velocidades y las masas del sistema formado por nuestra Galaxia, M 31 y M 33. Estos fueron los ingredientes esenciales que los astrónomos utilizaron para estudiar la evolución futura de la interacción entre estas tres galaxias, mediante simulaciones numéricas del encuentro.

²El centro de masas de un sistema físico es el lugar geométrico que se comporta dinámicamente como si se aplicara en él la resultante de las fuerzas externas sobre la masa total del sistema.

³M 33 se encuentra a una distancia de nuestra Galaxia similar a la de M 31, y forma junto a ésta un grupo gravitacionalmente ligado. Para M 33 ya se disponía de una medida fiable de sus movimientos propios desde el año 2005. Estos fueron estimados a través de las líneas de emisión máser del agua (Brunthaler et al. 2005).

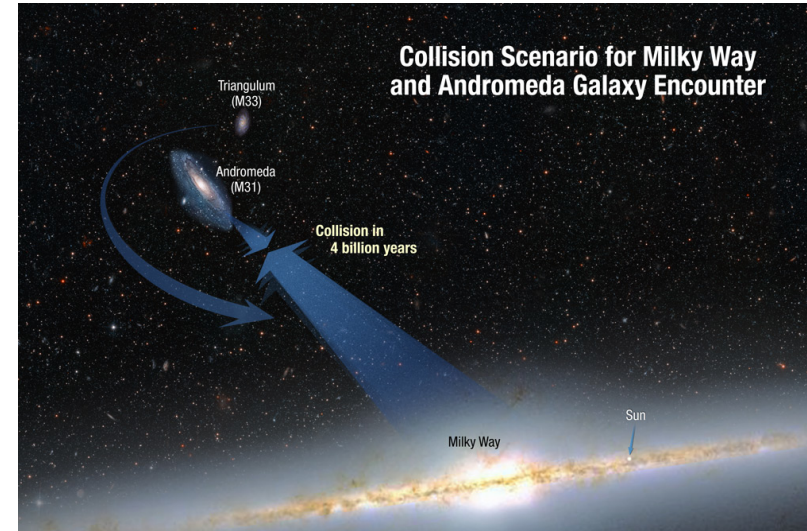


Figura 4: Esquema que muestra las tres galaxias (MW, M 31 y M 33) que se verán involucradas en un proceso de colisión en los próximos 4 Giga-años. La determinación precisa del movimiento orbital de M 31 respecto a nuestra Galaxia, ha permitido concluir que este acontecimiento ocurrirá inexorablemente. Figura cortesía de NASA, ESA, A. Feild y R. van der Marel (STScI)

La colisión entre la Vía Láctea, M 31 y M 33

Hasta que no se dispuso de una medida precisa de la componente transversal de M 31, como la que se obtuvo en el año 2012, las diferentes simulaciones numéricas publicadas hasta esa fecha, que trataban de predecir el futuro de la interacción entre Andrómeda y la Vía Láctea, eran incapaces de concluir si el encuentro podía o no resultar en la fusión completa de ambos sistemas (Dubinski et al. 1996; Peebles et al. 2001; Cox & Loeb 2008). Una fusión de dos galaxias espirales masivas, como lo son la Vía Láctea y M 31, tendría como consecuencia más probable la formación de una galaxia elíptica en escalas de tiempo de algunos Giga-años⁴.

El trabajo realizado por van der Marel et al. (2012b) permitió estudiar la evolución futura del sistema constituido por nuestra Galaxia, Andrómeda y M 33. Para ello se realizaron simulaciones numéricas que estudiaban la evolución de la componente estelar de los tres sistemas y, al mismo tiempo, se integraron, mediante una aproximación semianalítica, las órbitas de las tres galaxias durante la interacción.

⁴Un Giga-año corresponde a mil millones de años.

En las simulaciones no se incluyó el sistema formado por la Pequeña y la Gran Nube de Magallanes debido a su baja masa ($\sim 0,1 \times M_{M31}$) y, sobre todo, debido al hecho de que su órbita indica que actualmente las dos galaxias se están alejando de la Vía Láctea. En particular, se estima que dichas galaxias no volverán a encontrarse cerca de la Vía Láctea hasta dentro de muchos miles de millones de años, lo que convierte en irrelevante su influencia en la dinámica del sistema (Besla et al. 2007; Shattow & Loeb 2009). Tampoco se tuvo en cuenta en estas simulaciones el papel de la componente gaseosa, que constituye sólo un 10% de la masa de las galaxias interactuantes. De hecho es improbable que la inclusión del gas hubiera cambiado esencialmente la evolución futura de la interacción predicha por las simulaciones. Más bien se espera que el gas sufra *pasivamente* las consecuencias de la fusión.

La figura 5 muestra una serie de instantáneas correspondientes a la evolución temporal de la colisión entre las tres galaxias en la simulación numérica de van der Marel et al. (2015b). En dicha figura se aprecian tanto las órbitas relativas de los tres sistemas como los cambios que experimentan sus discos estelares, tal y como se contemplaría el evento desde un sistema de referencia centrado en el plano (X,Y) de la Vía Láctea. El instante inicial de las simulaciones u origen de tiempos $T = 0$ en el artículo de van der Marel et al. (2015b) corresponde a la configuración actual del sistema formado por la Galaxia (MW), M 31 y M 33. Para la realización de la simulación se tomó como escenario base para la configuración inicial el que se consideró como más probable, dentro de las incertidumbres de los parámetros clave, osea, las posiciones iniciales, las velocidades y las masas.

La secuencia mostrada en la figura 5 empieza en el instante $T = 3$ Giga-años. Hasta ese momento nuestra Galaxia se puede considerar como aislada y aún no ha sufrido los efectos mas visibles de la interacción. A medida que progresa el encuentro en instantes posteriores (i.e., $T > 3$ Giga-años), las galaxias M 31 y M 33 aparecen en escena. Los efectos de la interacción ya se hacen ostensibles tras $T = 3,97$ Giga-años, momento en el que los discos de M 31 y la Vía Láctea se superponen físicamente por primera vez en el espacio. Esta configuración corresponde al primer *pericentro* o primer evento de máxima aproximación en su órbita, como se ilustra en la figura 6. En ese instante la velocidad relativa de aproximación de M 31 es muy grande, del orden de 600 km/s, es decir casi seis veces el valor de la velocidad radial actual. Este hecho contribuye a que, a pesar de su cercanía, M 31 no produzca demasiados cambios en la morfología del disco de nuestra Galaxia. Sin embargo, sólo unos 500 millones de años después ($T = 4,47$ Giga-años), M 31 se frena y alcanza así su primer *apocentro* o instante de máxima lejanía en su órbita (figura 6). En ese estadio de la interacción, ya aparecen distorsiones en forma de colas de marea en los discos estelares tanto de nuestra Galaxia como de Andrómeda.

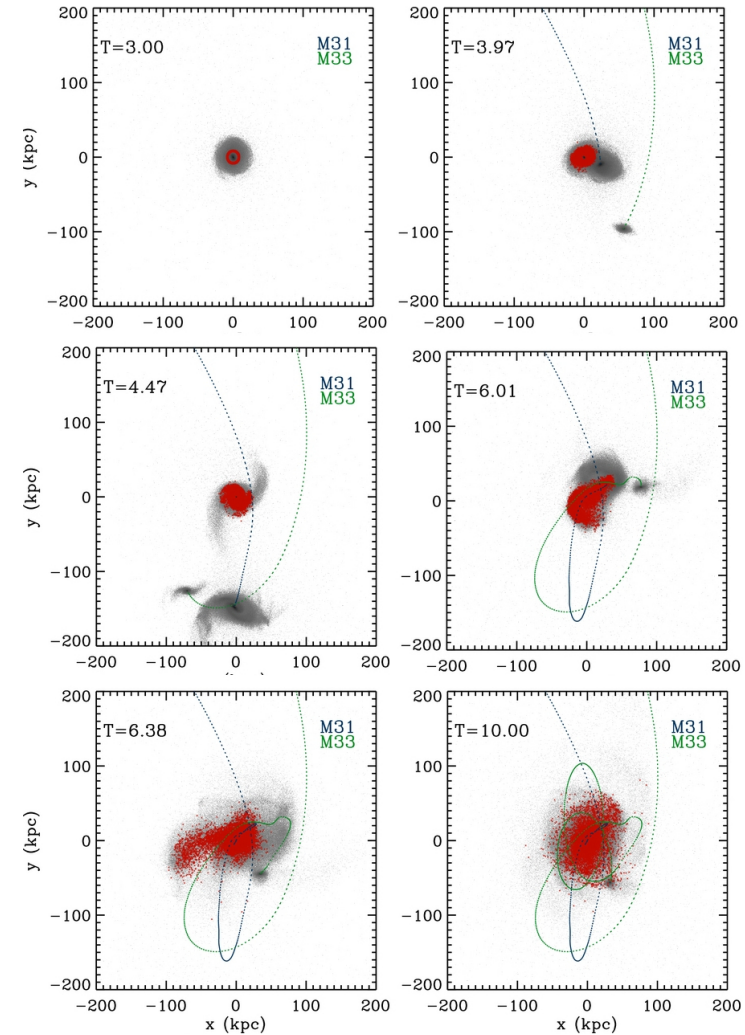


Figura 5: Instantáneas de la evolución temporal de la colisión entre la Vía Láctea (MW), Andrómeda (M 31) y M 33 vista desde la Vía Láctea. Las órbitas precedentes de M 31 (en azul) y M 33 (en verde) en cada instante ayudan a visualizar cuál es la evolución del sistema interactuante. En el panel inicial ($T = 3,00$ Giga-años) la Vía Láctea está aún aislada. En instantes posteriores ($T > 3$ Giga-años), el proceso de interacción progresa hasta cristalizar en una fusión tras un tiempo estimado de $T \sim 10$ Giga-años. Las estrellas identificadas en color rojo estarían situadas a una distancia de 8,3 Kpc del centro de la Galaxia. Figura adaptada del artículo de Van der Marel et al. (2012b).

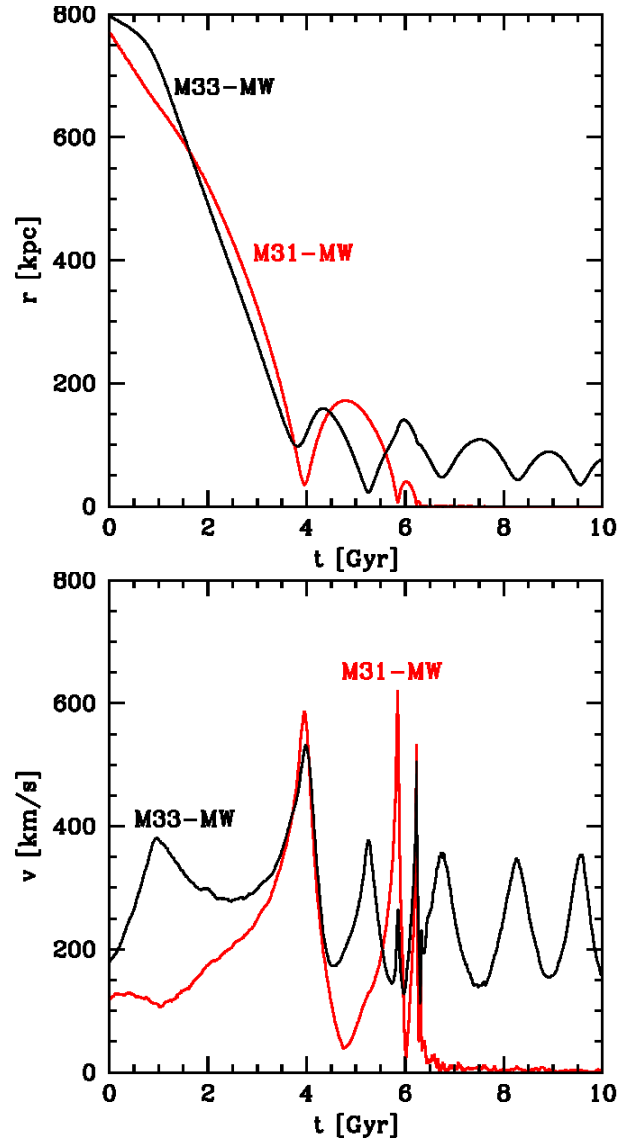


Figura 6: Las distancias (en kpc) (panel superior) y velocidades relativas (en km/s) (panel inferior) en función del tiempo (en Giga-años) entre la galaxias M 31, la Vía Láctea (MW) y M 33, tal como predice la simulación numérica de la colisión entre dichos sistemas. El origen de tiempos ($T = 0$) corresponde a la configuración actual. Figura adaptada del artículo publicado por Van der Marel et al. (2012b).

Como consecuencia de la interacción, y debido a un efecto conocido como *fricción dinámica*, la órbita de M 31 pierde progresivamente cada vez más momento angular relativo. Este hecho, común en cualquier proceso de fusión entre dos galaxias, se traduce en que los pericentros sucesivos serán cada vez más pequeños, es decir, los núcleos de ambas galaxias cada vez se acercarán más. Por la misma razón, las velocidades relativas de las dos galaxias se harán también cada vez más pequeñas (ver figura 6).

El proceso de interacción progresa hasta cristalizar en una fusión completa de M 31 con la Vía Láctea tras un tiempo estimado de $T \sim 10$ Giga-años. El resultado final más probable es la formación de una galaxia elíptica gigante que incluiría tanto a estrellas de nuestra Galaxia como de Andrómeda. Es común en la literatura referirse al sistema fusionado como *Lactómeda* (o *Milkdrameda* en su acepción inglesa). Contrariamente a M 31, lo más probable es que M 33 siga orbitando como una galaxia independiente alrededor de *Lactómeda* durante mucho tiempo después de que la fusión se haya completado. No obstante, se espera que M 33 acabe siendo engullida por *Lactómeda* a muy largo plazo, dado que su órbita ligada está destinada a decaer con el tiempo.

Lactómeda tendrá aproximadamente el doble de masa de la Vía Láctea y será mucho más extensa que ésta, como puede fácilmente apreciarse en la figura 5. De hecho el perfil radial de la densidad superficial de estrellas en la *Lactómeda* simulada sigue una ley de potencias con el radio ($\propto R^{1/4}$). Esta ley es muy similar a la observada en otras galaxias elípticas del universo.

La figura 7 muestra cuál es la distribución final de las estrellas en el sistema resultante de la fusión entre M 31 y la Vía Láctea. Aunque las estrellas de nuestra Galaxia y de M 31 aparecen mezcladas alrededor del centro de masas común de *Lactómeda*, la galaxia fusionada no parece haber alcanzado aún tras $T \sim 10$ Giga-años el estadio final de *relajación dinámica*, en el que la distribución de las estrellas procedentes de ambos sistemas sean perfectamente indistinguibles. Por el contrario, la mayor parte de las estrellas de M 33 permanecen fuera de *Lactómeda* al final de la simulación.

Uno de los escenarios más comúnmente aceptados prevé que la fusión de dos galaxias espirales produzca brotes de formación estelar (*starbursts* en su acepción inglesa). Durante la interacción, se espera que grandes cantidades de gas pierdan momento angular y se precipiten hacia las regiones centrales del sistema, donde pueden experimentar choques y un elevado grado de compresión. El resultado probable es que se generen episodios masivos de formación de nuevas estrellas que consuman gran parte del gas. Durante esta fase, previa a la formación de una galaxia elíptica, el sistema se identificaría por su intensa emisión en el rango de longitudes del infrarrojo (de ahí su denominación en inglés *Ultra-Luminous Infrared Galaxy*, ULIRG). La evolución que probablemente experimente la com-

ponente gaseosa de nuestra Galaxia y Andrómeda durante la fusión fué estudiada por Cox & Loeb (2008). Sus conclusiones sugieren que debido a que la componente gaseosa de ambos sistemas no es muy elevada, no se espera que la fusión de ambas galaxias dé lugar a un brote de formación estelar masivo. Antes al contrario, se espera que el proceso de formación de estrellas continúe a un ritmo sólo ligeramente superior al esperado en caso de que ambas galaxias hubieran estado totalmente aisladas.

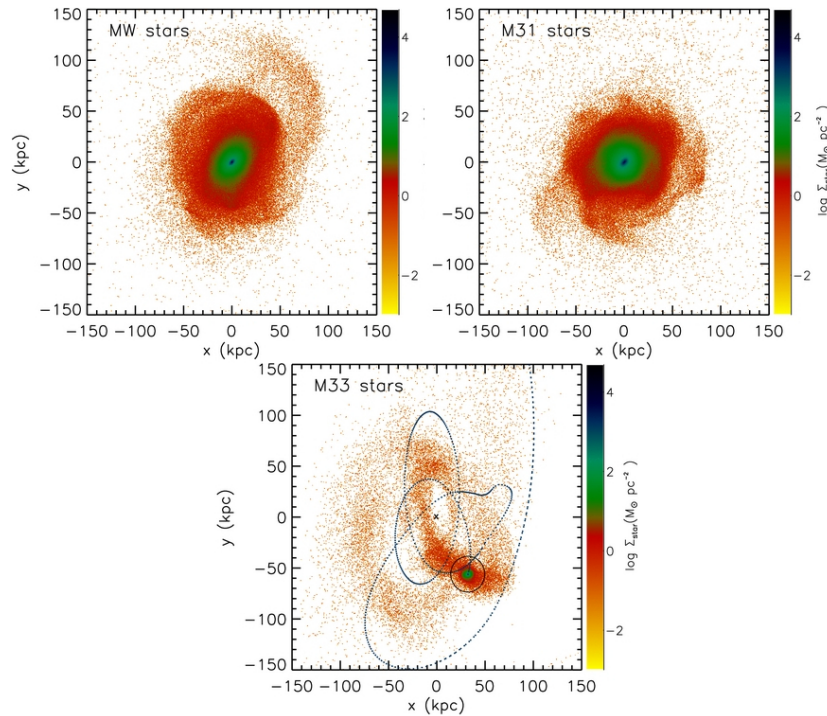


Figura 7: Distribución final de las estrellas en el sistema resultante de la fusión entre M 31 y la Vía Láctea (MW). Los tres paneles identifican cuáles son las estrellas procedentes de la Vía Láctea (MW), de M 31 y de M 33, respectivamente. Puede apreciarse que en esta simulación M 33 mantiene su propia identidad y no acaba fusionándose completamente con la Vía Láctea (MW) y M 31. Figura adaptada del artículo publicado por Van der Marel et al. (2012b).

Paralelamente al proceso de fusión de sus discos estelares, se espera que también se produzca la fusión de los agujeros negros supermasivos que se encuentran en los núcleos de nuestra Galaxia y Andrómeda. Dicho proceso producirá el nacimiento de un único agujero negro supermasivo en

el núcleo de *Lactómeda*. Es más que probable que tras la fusión quede aún suficiente gas disponible para alimentar el agujero negro central y, como indican las predicciones de los modelos teóricos (Hopkins et al. 2006), *Lactómeda* pueda convertirse en un cuásar.

¿Cuál será el destino del Sol tras la colisión?

Aunque dos galaxias colisionen violentamente y puedan acabar fusionándose en un único sistema, como es el caso de nuestra Galaxia y M 31, la probabilidad de que colisionen entre sí dos estrellas es muy pequeña. Ello se debe a la gran distancia que típicamente separa a dos estrellas, incluso en los entornos más densamente poblados de una galaxia: $\geq 1 - 2 \times 10^{11}$ km. Esa distancia promedio es siempre mucho mayor que el tamaño característico de cualquier estrella. La razón entre distancia y tamaño medios para una estrella en una galaxia típica es en cualquier circunstancia mayor que un factor $\simeq 10^5$. A la vista de estas estimaciones, es evidente que el nacimiento de *Lactómeda* no alterará en esencia la evolución interna del Sistema Solar. No obstante, sí se espera que la órbita del Sol y, por lo tanto, su posición dentro del sistema interactuante, se vean dramáticamente modificadas.

Las simulaciones de van der Marel et al. (2015b) no pudieron seguir en detalle cómo cambiaría en particular la órbita del Sol a lo largo de la interacción entre nuestra Galaxia y M 31. Sin embargo sí que permitieron predecir estadísticamente cuál será la evolución más probable de una estrella que, como el Sol, se encuentra en la actualidad a una distancia radial $R_{\text{sol}} \sim 8,33 \pm 0,35$ kpc del centro de la Galaxia y gira en torno a éste a una velocidad de rotación $V_{\text{rot}} \sim 239 \pm 10$ km/s. Dentro de esta categoría se encontraban más de 8000 estrellas en la Galaxia simulada por van der Marel et al. (2015b). Dichas órbitas, representativas de la que sigue el Sol en la práctica, fueron identificadas y monitorizadas en el transcurso de la fusión. La conclusión fundamental tras este seguimiento es que la mayor parte de las estrellas similares al Sol emigraban hacia el exterior de *Lactómeda*, es decir que su distancia radial *promedio* aumentaba hacia el final de la simulación.

Cuando se habla de radios *promedio* en el caso de las órbitas típicas descritas por las estrellas de una galaxia elíptica como *Lactómeda*, es importante señalar que el radio a lo largo de dichas órbitas cambia significativamente con el tiempo. Dichos cambios se desarrollan de acuerdo con un patrón mucho menos ordenado que el que se observa en las órbitas cuasi circulares que describen las estrellas en las galaxias tipo disco, cuyo equilibrio se establece por rotación, en claro contraste con las galaxias elípticas, donde la componente asociada con movimientos caóticos domina. Probablemente el Sol, que en la actualidad gira en una órbita cuasi circular en el plano de la Vía Láctea, acabará atrapado en una de esas órbitas estelares

abiertas (*loop orbits* en su acepción inglesa), como la que se muestra en la figura 8.

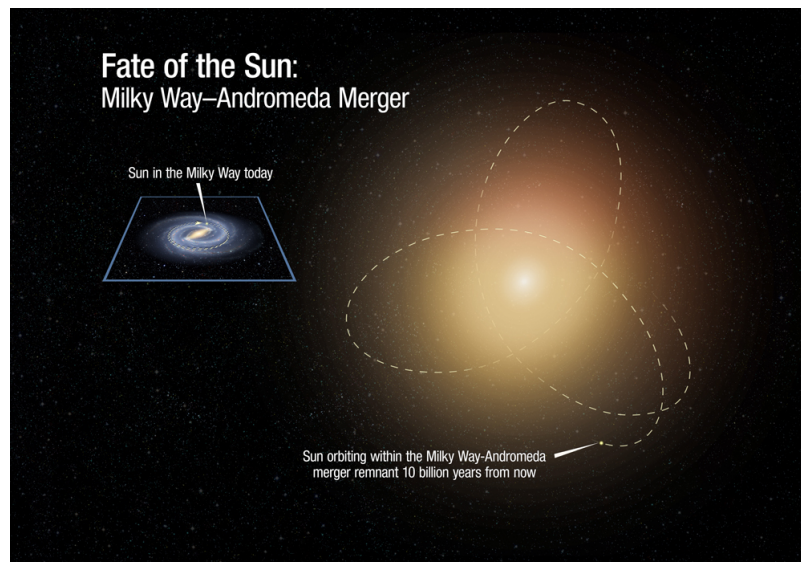


Figura 8: El destino de la Vía Láctea es convertirse, tras su fusión con Andrómeda, en una galaxia elíptica gigante una vez transcurrido un plazo de 10 Giga-años. Dentro de este sistema, el Sol acabará atrapado en una órbita estelar abierta (*loop orbit*) muy similar a la que típicamente describen las estrellas de las galaxias elípticas. Figura cortesía de NASA, ESA, A. Feild y R. van der Marel (STScI).

El resultado de estas simulaciones permite concluir, con un elevado grado de certeza, que tanto la distancia, como la velocidad y los parámetros que caracterizan el entorno inmediato del Sol (por ejemplo, la densidad estelar promedio) se modificarán debido a la interacción violenta entre nuestra Galaxia, Andrómeda y M 33. Sin embargo, eso no significa que la vida en la Tierra se vea afectada por la evolución dinámica del Grupo Local en los términos que acabamos de describir. Un evento dramático, producido por la perturbación que podría sufrir la órbita del Sol por su interacción con otra estrella que se acercara peligrosamente a nosotros, no puede formalmente excluirse. En concreto, una interacción próxima (que no colisión directa) con otra estrella podría cambiar la órbita de la Tierra al desplazar a ésta fuera de la zona de *habitabilidad*, aquella que hace posible la vida y en la que actualmente nos encontramos. Sin embargo, la probabilidad de este tipo de encuentros es, como ya hemos señalado antes, despreciable.

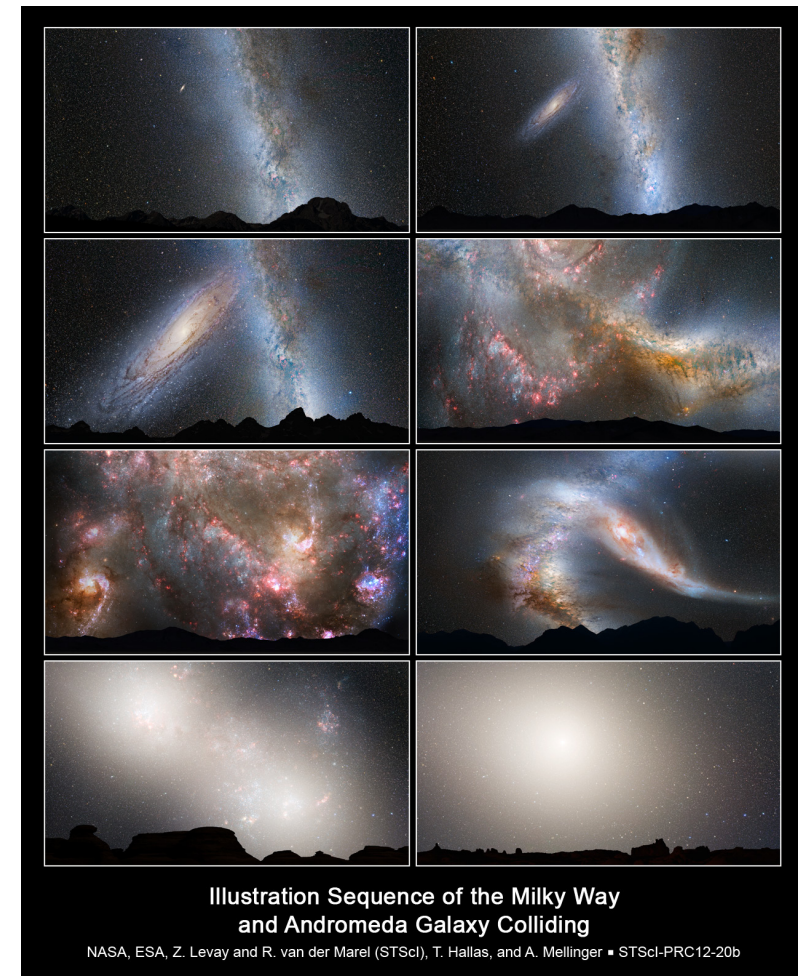


Figura 9: Imágenes ilustrativas de cómo un observador vería desde la Tierra la fusión predicha por las simulaciones numéricas entre la Vía Láctea y Andrómeda. La secuencia mostrada recorre de izquierda a derecha y de arriba a abajo el aspecto del cielo desde el instante presente, donde Andrómeda aparece al principio como una mancha difusa lejos de nuestra Galaxia, hasta la fusión final de ambos sistemas (10 Giga-años después), que da lugar a una galaxia elíptica gigante. Durante su aproximación a la Vía Láctea, Andrómeda ocupará una porción creciente del cielo, como se muestra en la secuencia de paneles, y se harán progresivamente más visibles los efectos de la interacción con la Vía Láctea. Imagen cortesía de NASA, ESA, Z. Levay, R. van der Marel (STScI), T. Hallas, y A. Mellinger.

En la práctica, nuestro porvenir en la Tierra sí se verá alterado por otro tipo de fenómenos astronómicos que nada tienen que ver con el nacimiento de *Lactómeda*. Aunque es posible imaginar cómo cambiaría durante los próximos diez mil millones de años el aspecto del cielo observable desde la Tierra debido a la colisión entre nuestra Galaxia, Andrómeda y M 33 (ver figura 9), antes de que la fusión llegue a término, el combustible necesario para que el Sol siga brillando se habrá consumido (dentro de 4.6 Giga-años; Sackmann et al 1993). Además, antes de que esto ocurra, el clima de la Tierra habrá cambiado tanto que hará imposible la vida, debido al progresivo aumento del tamaño y luminosidad del Sol, siendo ambos procesos ligados a su inexorable discurrir hacia la muerte estelar.

Siempre nos quedará el recurso de soñar que para entonces, si la civilización humana no se ha autodestruido todavía, ya sea posible la colonización de otros planetas y, por lo tanto, que ese espectáculo cósmico que refleja la figura 9 será observado por algún terrícola que haya podido escapar y sustraerse así a su *terrible* y no por ello menos cierto destino.

Referencias

- Besla, G., Kallivayalil, N., Hernquist, L., et al. 2007, “Are the Magellanic Clouds on their first passage about the Milky Way?”, *The Astrophysical Journal*, núm. 668, págs. 949-967.
- Binney, J., & Tremaine, S. 1987, “Galactic dynamics”, *Princeton, NJ, Princeton University Press*, págs. 747.
- Brunthaler, A., Reid, M. J., Falcke, H., Greenhill, L. J., & Henkel, C. 2005, “The geometric distance and proper motion of the Triangulum Galaxy (M33)”, *Science*, núm. 307, págs. 1440-1443.
- Cox, T. J. & Loeb, A., 2008, “The collision between the Milky Way and Andromeda”, *Monthly Notices of the Astronomical Society*, núm. 386, págs. 461-474.
- Dubinski, J., Mihos, J. C., & Hernquist, L. 1996, “Using tidal tails to probe dark matter halos”, *The Astrophysical Journal*, núm. 462, págs. 576-593.
- Hopkins, P. F., Hernquist, L., Cox, T. J., et al. 2006, “A Unified, Merger-driven Model of the Origin of Starbursts, Quasars, the Cosmic X-Ray Background, Supermassive Black Holes, and Galaxy Spheroids”, *The Astrophysical Journal Supplement Series*, núm. 163, págs. 1-49.
- Peebles, P. J. E., Phelps, S. D., Shaya, E. J., & Tully, R. B. 2001, “Radial and transverse velocities of nearby galaxies”, *The Astrophysical Journal*, núm. 554, págs. 104-113.
- Sackmann, I.-J., Boothroyd, A. I., & Kraemer, K. E. 1993, “Our Sun. III. Present and Future”, *The Astrophysical Journal*, núm. 418, págs. 457-468.
- Shattow, G., & Loeb, A. 2009, “Implications of recent measurements of the Milky Way rotation for the orbit of the Large Magellanic Cloud”, *Monthly Notices of the Astronomical Society*, núm. 392, págs. L21-L25.
- Sohn, S. T., Anderson, J., & van der Marel, R. P. 2012, “The M31 velocity vector. I. Hubble Space Telescope proper-motion measurements”, *The Astrophysical Journal*, núm. 753, 7, págs. 15.
- van den Bergh, S. 2000, “The galaxies of the Local Group”, *Cambridge University Press, 2000 Cambridge Astrophysics Series Series*, núm. 35, págs. 346.
- van der Marel, R. P., Fardal, M., Besla, G., et al. 2012a, “The M31 velocity vector. II. Radial orbit toward the Milky Way and implied Local Group mass”, *The Astrophysical Journal*, núm. 753, 8, págs. 14.
- van der Marel, R. P., Besla, G., Cox, T. J., Sohn, S. T., & Anderson, J. 2012b, “The M31 velocity vector. III. Future Milky Way M31-M33 orbital evolution, merging, and fate of the Sun”, *The Astrophysical Journal*, núm. 753, 9, págs. 21.