

a) Resultados más importantes obtenidos en la tesis

En esta tesis nos hemos propuesto abordar un problema fundamental: la comprensión de la evolución cinemática y dinámica del disco Galáctico. Para ello tratamos de contestar tres preguntas clave: 1) ¿Cuáles son las propiedades de los grupos cinemáticos del entorno solar en el espacio de velocidad-edad-metalicidad? 2) ¿Son algunos de estos grupos originados por la presencia de los brazos espirales y la barra de la Vía Láctea (VL)? y, en caso afirmativo, 3) ¿Pueden utilizarse estos grupos para restringir los parámetros que definen el potencial de los brazos y la barra de la VL?

La base observacional de la tesis ha consistido en la compilación de datos astrométricos, fotométricos y espectroscópicos de precisión para un total de 24000 estrellas del entorno solar, la más grande hasta la fecha. El análisis de los datos se ha llevado a cabo con técnicas estadísticas multiescala basadas en la transformada wavelet (“denoising”, Starck & Murtagh 2002) que nos han permitido detectar las estructuras a distintas escalas de forma estadísticamente robusta. Nuestros resultados muestran que el plano cinemático UV está dominado por estructuras alargadas (“ramas”) formadas, cada una de ellas, por estrellas con un gran rango de edades y metalicidades, lo que supone la confirmación de su origen dinámico u orbital. También encontramos propiedades de estas estructuras que aportan claves sobre su origen. Por ejemplo, constatamos que para las ramas de Sirius, Coma Berenices y Hyades-Pleiades, mientras más negativa es su velocidad media de rotación, mayor es su metalicidad promedio, y establecemos que la rama de Hércules no sigue este comportamiento y tiene una dispersión de metalicidades mayor que el resto.

La confirmación del origen dinámico de estas estructuras, más allá de lo que los datos observacionales sugieren, requiere modelar los efectos de la barra y los brazos espirales sobre la cinemática del disco. Para ello, hemos desarrollado un código de simulaciones con partículas test que permite caracterizar la distribución de velocidades en cualquier posición del disco Galáctico. Hemos puesto especial énfasis en disponer de un potencial realista para la VL que incluye, además de halo, bulbo y disco, distintos potenciales para los brazos y/o la barra por primera vez diseñados acorde a los rangos observados recientemente. Barriendo el espacio de parámetros libres y estudiando en cada caso las huellas cinemáticas inducidas, nuestra simulaciones demuestran que tanto la barra como los brazos espirales crean fuertes grupos cinemáticos, y que éstos dependen de propiedades como la velocidad angular y la orientación respecto a la dirección Sol-Centro Galáctico. Un resultado importante es la comprobación de que cuando brazos y barra actúan a la vez, seguimos identificando las huellas de cada una de las componentes. También demostramos por primera vez que: a) los brazos crean ramas cinemáticas comparables a las observadas; b) los brazos, y no únicamente la barra como se había propuesto (Dehnen 1998), pueden poblar la región cinemática de Hércules; c) unos brazos auto-gravitantes (Pichardo et al 2004) generan más estructuras que los brazos derivados de la *Tight-winding Approximation* (TWA); d) las propiedades observadas para la estructura espiral de la VL dudosamente pueden satisfacer las condiciones de auto-consistencia del TWA; e) los efectos de la barra sobre una población con alta dispersión de velocidades ofrece una novedosa interpretación del origen de grupos de bajo momento angular como Arcturus, en consonancia con sus abundancias químicas recientemente derivadas (Williams et al. 2009), diferente de su origen extragaláctico. Debemos citar que, si bien estos son resultados novedosos que demuestran que los grupos cinemáticos de origen dinámico restringen el potencial de la VL, este trabajo nos ha llevado a demostrar también que los grupos de la pequeña esfera que supone el entorno solar pueden reproducirse con diferentes combinaciones de parámetros de los modelos; es decir, la solución es degenerada. Dicha degeneración podrá resolverse tan sólo con datos observacionales más profundos.

b) Posible impacto de estos resultados en su campo de especialidad

Mientras que estudios anteriores afirman que el impacto de los brazos espirales en la distribución de velocidades es débil (Chakrabarty 2007), nuestras simulaciones muestran, por vez primera, que modelos realistas de los brazos espirales de la VL inducen notable subestructura en el espacio de las velocidades. Éste es un resultado muy relevante ya que indica que la cinemática de la esfera que observará el satélite Gaia de ESA, puede utilizarse para reducir parte de la gran ambigüedad, no solo sobre la barra de la Galaxia, sino sobre la estructura espiral (ángulo de enrollamiento, velocidad angular). Los resultados también urgen a emprender el debate sobre la validez del modelo TWA para el caso particular de la VL.

Las simulaciones realizadas en esta tesis están siendo utilizadas actualmente para la selección de los campos a observar en el proyecto Gaia - ESO Survey, para el estudio del disco Galáctico. Nuestras simulaciones permiten predecir qué direcciones del disco Galáctico son óptimas para la detección de alta subestructura y dan mayor información sobre los brazos y sobre la barra. Con ellas también podemos estimar el número de estrellas y precisiones necesarias para detectar la cinemática trazadora de la estructura a gran escala. Estamos también usando las simulaciones de la tesis, para la definición de los casos científicos de futuros instrumentos como WEAVE, espectrómetro multiobjeto para el William Herchel Telescope, parcialmente dedicado a la obtención de velocidades radiales para complementar la astrometría de Gaia.

Habiendo visto que un disco con alta dispersión de velocidades siente la influencia de la barra, sugerimos que, si existe un disco de materia oscura en la VL como predicen algunas simulaciones cosmológicas recientes (Read et al. 2008), el disco oscuro también se verá igualmente afectado, apareciendo corrientes oscuras cerca del Sol. Un estudio detallado en esta línea puede tener impacto en experimentos planeados para la detección de materia oscura ya que permitiría establecer cuál es la amplitud del señal de estas corrientes y si ésta puede ser detectable.

c) Futuras líneas de actuación

- Para romper la degeneración mencionada arriba y restringir las propiedades de los brazos y la barra proponemos caracterizar los grupos cinemáticos en distintas posiciones del disco de la VL y compararlas con las predicciones de nuestros modelos. En el marco del consorcio RAVE estamos aplicando las técnicas estadísticas optimizadas en la tesis a este *survey* (Antoja & Helmi, en prep.). Hemos podido obtener por primera vez la distribución de velocidades a 1.5 kpc del Sol (hasta ahora limitada a 0.5 kpc) y vemos trazas de grupos cinemáticos diferentes. Esperamos, a largo plazo, ampliar el estudio a una porción mucho más significativa de la MW con los datos de Gaia. Estamos planeando la futura explotación de los datos de Gaia a través de redes con esta finalidad como REG y GREAT (WG1). RAVE, Gaia, y *surveys* espectroscópicos ad-hoc que empiezan ahora su andadura, permitirán también que determinemos las propiedades químicas y edades de los grupos, claves para desentrañar su origen.
- Consideraciones dinámicas apuntan hacia la existencia de una sola barra en la VL (Romero-Gomez et al. 2011), pero observaciones en el IR cercano de gigantes del *red clump* revelan la existencia de una segunda barra (Hammersley et al. 2000). Estamos explorando si existen huellas cinemáticas de segundo orden que permitirían distinguir un sistema de dos barras del de una sola barra.
- ¿Puede la evolución que han experimentado a lo largo del tiempo la barra o los brazos espirales de la MW influir en las estructuras cinemáticas, haciendo posible acotar los tiempos de formación de barra y brazos o su evolución reciente? Incluiremos en el código de las simulaciones fenómenos como la variación de velocidad o fuerza de la barra con el tiempo. Actualmente, estamos también utilizando simulaciones N-cuerpos que, aunque más difíciles de sintonizar con la VL, incluyen esta evolución de forma natural (colaboración con S. Roca, O. Valenzuela, P. Colín).
- Otros mecanismos pueden dar lugar a estructura en el espacio de las fases, como las corrientes de marea de galaxias satélite. Existen dudas sobre el origen de grupos como Arcturus. Estamos realizando simulaciones, por primera vez, en 3 dimensiones para estudiar los grupos inducidos por la barra en el disco grueso. Conjuntamente con simulaciones de N-cuerpos que siguen la descomposición de galaxias satélite, cuantificaremos cuál es la importancia relativa de unas y otras estructuras cinemáticas, y cómo distinguir las (colaboración con G. Monari y A. Helmi).
- ¿Somos capaces de distinguir efectos cinemáticos de la barra y/o los brazos en otras galaxias? Con el código de las simulaciones estamos estudiando cuáles son los efectos más fuertes que esperamos (por ejemplo, cambios en la dispersión de velocidad o desviación del vértice cerca de las resonancias) en las galaxias que han sido observadas en el DiskMass Survey u otros (colaboración con K. Westfall).

d) Publicaciones derivadas de la tesis (en preparación, enviadas o publicadas)

En revistas de *referee*:

1. T. Antoja, F. Figueras, M. Romero-Gómez, B. Pichardo, O. Valenzuela, and E. Moreno.
Understanding the spiral structure of the Milky Way using the local kinematic groups.
Accepted for publication in MNRAS, June 2011 (en prensa)
2. T. Antoja, F. Figueras, J. Torra, O. Valenzuela, and B. Pichardo.
The Origin of Stellar Moving Groups.
Lecture Notes and Essays in Astrophysics, 4:13–31, December 2010
3. T. Antoja, O. Valenzuela, B. Pichardo, E. Moreno, F. Figueras, and D. Fernández.
Stellar Kinematic Constraints on Galactic Structure Models Revisited: Bar and Spiral Arm Resonances.
ApJ, 700:L78–L82, August 2009
4. T. Antoja, F. Figueras, D. Fernández, and J. Torra.
Origin and evolution of moving groups. I. Characterization in the observational kinematic-age-metallicity space.
A&A, 490:135–150, October 2008

Artículos de conferencias:

1. T. Antoja, F. Figueras, and M. Monguió.
Gaia capability of constraining the MW spiral arms from the disc velocity distribution.
In EAS Publications Series, volume 45 of EAS Publications Series, pages 309–312, February 2011
2. T. Antoja, D. Fernández, F. Figueras, E. Moreno, B. Pichardo, J. Torra, and O. Valenzuela.
Origin of the Moving Groups and Their Contribution to the Determination of the Large-scale Galactic Potential.
In J. M. Diego, L. J. Goicoechea, J. I. González-Serrano, & J. Gorgas, editor, Highlights of Spanish Astrophysics V, pages 370–+, 2010
3. T. Antoja, O. Valenzuela, F. Figueras, B. Pichardo, and E. Moreno.
Connecting Moving Groups to the Bar and Spiral Arms of the Milky Way.
Highlights of Astronomy, 15:192–192, November 2010
4. T. Antoja, F. Figueras, B. Pichardo, D. Fernández, E. Moreno, J. Torra, and O. Valenzuela.
Local stellar kinematic constraints on the Galactic potential.
In J. Andersen, J. Bland-Hawthorn, & B. Nordström, editor, IAU Symposium, volume 254 of IAU Symposium, pages 4P–+, March 2009
5. T. Antoja, J. Torra, F. Figueras, and C. Jordi.
Midiendo la Vía Láctea con Gaia.
Revista Española de Física, 23:18–21, 2009
6. T. Antoja, F. Figueras, and D. Fernández.
Dominant mechanisms in the evolution of the kinematic structures.
In F. Figueras, J. M. Girart, M. Hernanz, & C. Jordi, editor, Highlights of Spanish Astrophysics IV, 2007
7. T. Antoja, F. Figueras, and D. Fernández.
Wavelet transform to characterise moving groups: observations versus dynamic effects.
Astronomical data analysis IV, 2006

REFERENCIAS

Chakrabarty, D. 2007, A&A, 467, 145
Hammersley, P.L., Garzón, F., Mahoney, T.J., López-Corredoira, M., Torres, M.A.P. 2000, MNRAS, 317, L45
Pichardo, B., Martos, M., & Moreno, E. 2004, ApJ, 609, 144
Read, J. I., Lake, G., Agertz, O., & Debattista, V. P. 2008, MNRAS, 389, 1041
Romero-Gómez, M., Athanassoula, E., Antoja, T., Figueras, F., 2011, accepted for publication in MNRAS
Starck, J.L., Murtagh, F. 2002, Astronomical Image and data Analysis (Springer)
Williams, M.E.K., Freeman, K.C., Helmi, A. 2009, IAUS, 254, 139