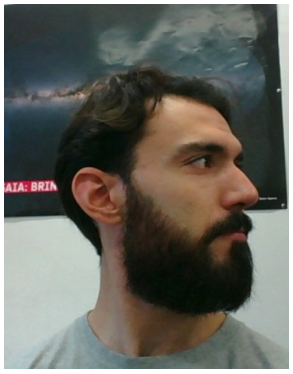
GAIA: UNA ESCALERA (DE CARACOL)

Ya sospechábamos que los datos de la misión Gaia de la Agencia Espacial Europea revolucionarían la Astrofísica Galáctica. Al fin y al cabo, esta misión de la Agencia Espacial Europea fue diseñada justamente para esto. La cantidad de datos recolectados por este satélite es, sin duda alguna, inaudita dentro del campo de la astronomía. La excelente calidad de las medidas tampoco tiene precedentes. Todo esto ha permitido grandes avances en diversas áreas de la astrofísica, desde el estudio de las enanas blancas, la detección de cientos de cúmulos abiertos nuevos, el descubrimiento de un evento de acreción de una galaxia satélite masiva en el pasado de la Galaxia, hasta la re-calibración de la escala cósmica de distancias y las fuertes implicaciones sobre la constante de Hubble que esto ha conllevado.



Teresa Antoja
Institut de Ciències del Cosmos,
Universidad de Barcelona, IEEC-UB
tantoja@fqa.ub.edu

Pau Ramos
Observatoire astronomique de Strasbourg,
Université de Strasbourg, CNRS
p.ramos@unistra.fr

No obstante, en este artículo nos centramos en los hallazgos de Gaia sobre el disco de la Galaxia. Todos estos apuntan a que vivimos en un disco Galáctico muy complejo, perturbado por múltiples mecanismos y que está en un estado de claro no-equilibrio.

Pero empecemos desde el principio. Antes de Gaia sólo se habían podido medir posiciones y velocidades para unas 300000 estrellas de la Vía Láctea (un 0,0003% de las cerca de 10^{11} que se calcula que podría tener en total), todas ellas muy cercanas al Sol. El satélite Gaia, lanzado en diciembre de 2013 gracias a la participación de unos 500 científicos e ingenieros de toda Europa, y con una importante contribución española (por ejemplo, las aportaciones en diseño y fabricación del satélite por parte de empresas españolas del sector espacial es de un 11,5%, además de la participación de decenas de científicos e ingenieros directamente involucrados en distintas unidades del proceso y validación de los datos), consiguió aumentar esa cifra más allá del millar de millones (alcanzando un 1% del total) con la publicación de datos astrofísicos que tuvo lugar en abril de 2018 (segundo data release, Gaia DR2). Para 7 millones de estas estrellas, una muestra pequeña en comparación pero inmensa de todas formas, se obtuvieron distancias, velocidades radiales y movimientos propios, permitiendo una determinación de todas las coordenadas del espacio de fases (3 posiciones y 3 velocidades, muestra 6d). La muestra 6d se extendía mucho más lejos que cualquier catálogo anterior, permitiendo la exploración de regiones lejanas al Sol que nunca antes habían sido investigadas, y contaba además con precisiones en la velocidad del orden de 1 km/s, un orden de magnitud inferior a los errores de la mayoría de medidas anteriores.

UN DISCO QUE NO ESTÁ EN EQUILIBRIO, RETO PARA LA DINÁMICA GALÁCTICA

Este aumento del número de estrellas y de la precisión de las velocidades medidas por Gaia permitieron detectar unas subestructuras sorprendentes en el espacio de fases que nos eran desconocidas. En primer lugar se descubrió una *forma espiral* (Antoja et al. 2018, Nature, Figura 1) que aparece en el espacio de fases vertical, es decir, cuando graficamos la altura de las estrellas sobre el disco contra sus velocidades verticales. Esta forma espiral indica que las estrellas están en una situación de no equilibrio

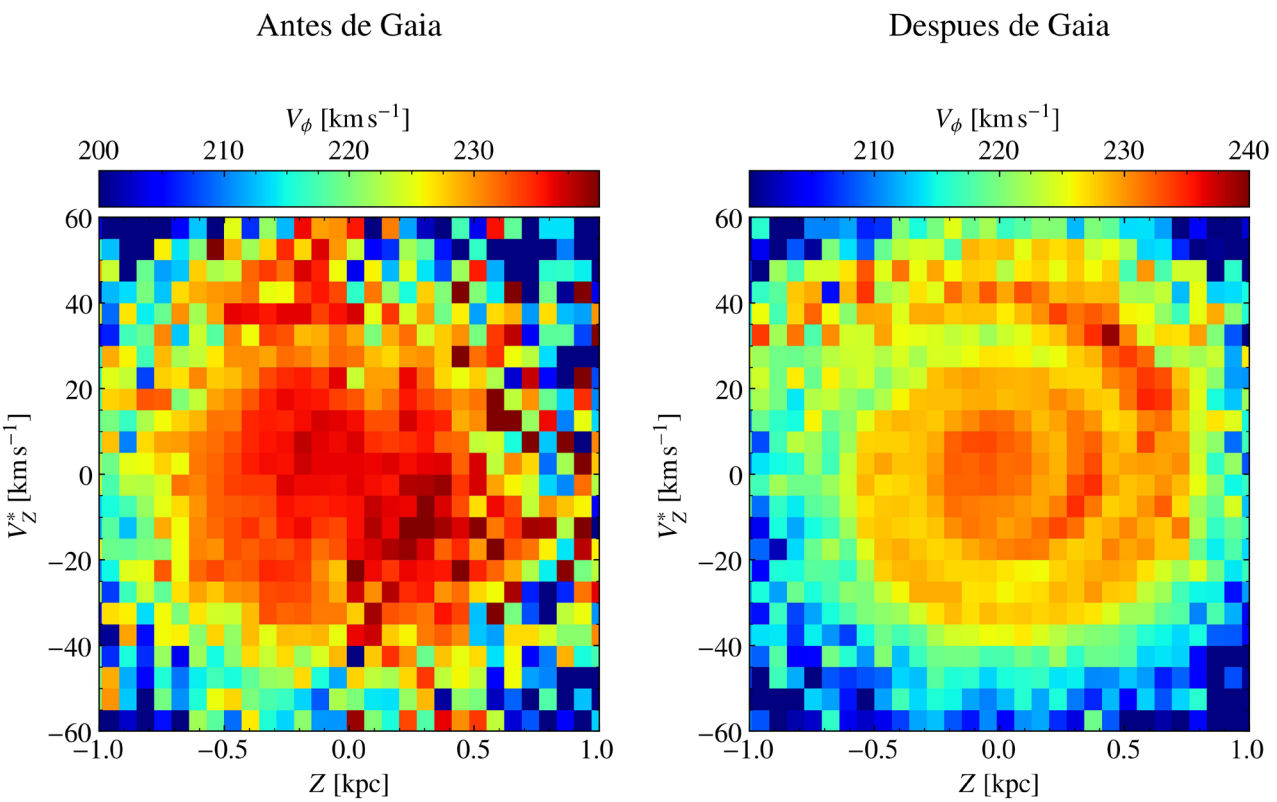


Figura 1: Forma espiral en el espacio de fases vertical. Las figuras muestran la altura sobre el disco (eje horizontal) y la velocidad vertical (eje vertical) de las estrellas, medidas antes (izquierda) y después (derecha) de la llegada de los datos de Gaia DR2. La forma espiral era indistinguible antes de Gaia y nos indica que el disco sufrió una perturbación hace unos 300-900 millones de años. El color de las figuras muestra la velocidad de rotación de las estrellas alrededor del centro galáctico, lo que implica una correlación entre las velocidades verticales y las de rotación. La espiral fue descubierta con datos de DR2 de Gaia (Antoja et al. 2018, Nature) pero aquí se muestra con los nuevos datos de Gaia EDR3.

dinámico posiblemente debido a una significativa perturbación que tuvo lugar en el pasado.

En esta proyección del espacio de fase cada estrella gira alrededor del centro en sentido horario trazando un óvalo, alcanzando su máxima velocidad cuando pasa por el plano Galactico (Z=0) y velocidad nula (VZ=0) cuando está en su altura máxima por encima o por debajo del plano. Sin embargo, cada estrella puede tener una frecuencia de oscilación en Z diferente: en particular las estrellas con oscilaciones más pequeñas giran en esta proyección más rápidamente. Si en algún momento una perturbación sitúa todas las estrellas en una región particular de este diagrama, las estrellas reiniciarán sus oscilaciones, cada una con su frecuencia vertical particular, y la distribución global evolucionará hacia una forma espiral que se va enrollando más y más con el tiempo. Un animación de este fenómeno, llamado mezclado de fases, se puede consultar online.

Así como los anillos del árbol nos indican su edad, un modelado de estas observaciones nos permitió determinar que la perturbación ocurrió hace unos

300-900 millones de años y que, posiblemente, la causante de tal alteración fue la galaxia enana de Sagitario (Antoja et al. 2018 Nature; Binney & Schonrich 2018 MNRAS; Laporte et al 2019 MNRAS). Se cree que alrededor de ese tiempo Sagitario se encontraba en el punto de su órbita más cercano a la Vía Láctea, lo cual haría que las estrellas del disco sintieran con intensidad las fuerzas de marea inducidas por la gran masa de este satélite.

Por un lado, el descubrimiento da esperanzas a poder conocer mejor esta perturbación pasada ya que con el estudio detallado de la forma espiral y la comparación con simulaciones deberíamos poder poner límites a la masa de Sagitario y a su órbita. Algunos estudios posteriores (Laporte et al. 2019, MNRAS) han especulado que incluso podríamos buscar señales de perturbaciones todavía más antiguas inducidas por otras galaxias en la proyección Z-V_z a radios galactocéntricos más alejados.

«Gaia-EDR3 descubre nuevas sobredensidades en el espacio posición-velocidad en los confines del disco galáctico, a distancias de 18 kpc del centro.»

Por otro lado, otra de las implicaciones del hallazgo de la forma espiral es que el disco de la Vía Láctea cambia con el tiempo y es más sensible a las perturbaciones externas de lo que antes se creía. De esta forma se pone en cuestión el equilibrio dinámico del disco que suele asumirse en la mayoría de modelos. Para poner un ejemplo, se ha demostrado que las ecuaciones de Jeans que se utilizan para medir la cantidad de materia oscura local, y en las que se asume precisamente equilibrio dinámico, pueden dar medidas erróneas, en particular sobreestimadas, cuando se aplican a un disco con una perturbación parecida a la que observamos (Haines et al., 2019, ApJ).

UN DISCO MUY COMPLEJO: DEBATE SOBRE PERTURBACIONES INTERNAS O EXTERNAS

Otro tipo de subestructura del espacio de fases que nos desveló Gaia DR2 fueron unas líneas diagonales o crestas (Figura 2) que aparecen cuando graficamos las velocidades de rotación de las estrellas alrededor del centro Galáctico en función de su distancia al centro (Antoja et al. 2018, Nature; Kawata et al 2018, MNRAS; Ramos et al 2018, A&A). Estas líneas indican que algunas estrellas tienden a agruparse en ciertas órbitas preferentes. Sorprendentemente, los modelos han demostrado que tanto procesos internos (resonancias orbitales debidas

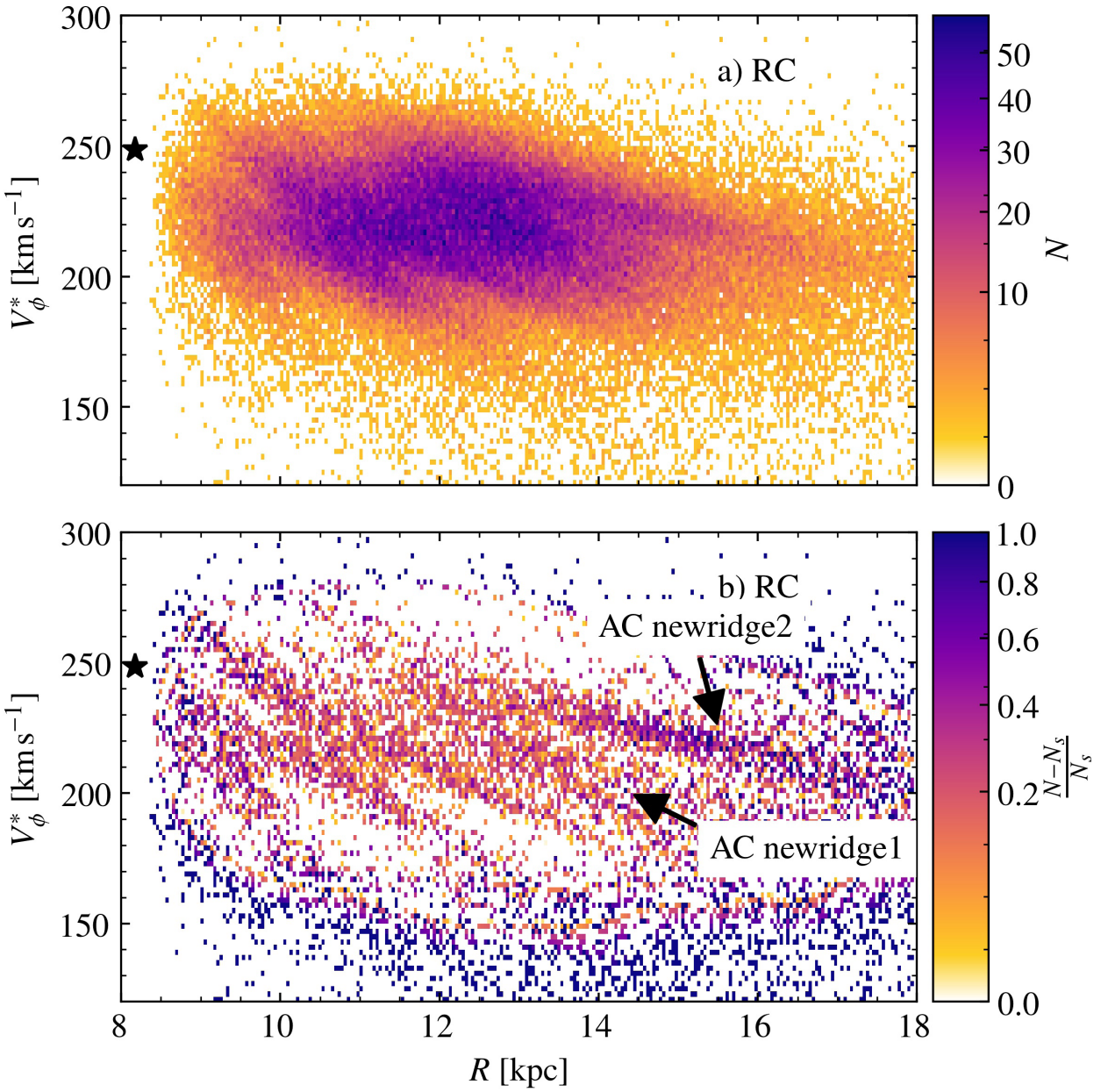


Figura 2: Crestas en el espacio de fases. Las figuras muestran el radio Galactocéntrico de las estrellas (eje horizontal) y sus velocidades de rotación alrededor del centro Galáctico (eje vertical). La estrella negra marca la posición del Sol en este diagrama. Todavía no se sabe del cierto qué mecanismo produce estas crestas, aunque se barajan distintas hipótesis: causadas por brazos espirales transitorios de la Galaxia, debidas a las resonancias de la barra o de los brazos espirales, o bien resultado de la perturbación de la galaxia satélite de Sagitario. Estas estructuras fueron detectadas por primera vez con Gaia DR2 (Antoja et al. 2018, Nature) pero aquí se muestran con nuevos datos de Gaia de EDR3 (Antoja et al, enviado a A&A), donde se pueden apreciar extendiéndose mucho más lejos y se han descubierto crestas nuevas (indicadas con flechas

a los brazos espirales y/o barra o brazos espirales transitorios, Antoja et al. 2018 Nature; Frangkoudi et al 2019 MNRAS; Hunt et al. 2019 MNRAS) como procesos externos (interacción con galaxias satélite, Antoja et al. 2018 Nature; Laporte et al. 2019 MNRAS; Khanna et al. 2019 MNRAS) pueden producir estas crestas. Así pues no está claro qué procesos son exactamente los causantes de estas subestructuras observadas. La situación aún es más compleja, pues algunos estudios han planteado que la barra y los brazos espirales podrían estar causados por una perturbación de otra galaxia, con lo que en realidad estaríamos hablando de un acoplamiento entre mecanismos internos y externos difícil de desentrañar observacionalmente.

«La forma espiral que mostró Gaia-DR2 desvela un disco galáctico cambiante con el tiempo posiblemente debido a una perturbaciones externa.»

SIN TIEMPO PARA DETENERNOS: NUEVOS Y MEJORES DATOS YA DISPONIBLES

Después del gran impacto de Gaia DR2, el tercer release de la misión (Gaia Early DR3, EDR3), publicado el día 3 de diciembre, sigue desvelando nuevos aspectos del disco de la Galaxia. Ya la primera exploración básica presentada en uno de los artículos de verificación de los datos (Antoja et al. 2020, enviado a A&A), que acompañan siempre las publicaciones de los catálogos de Gaia, ha permitido, de nuevo, desvelar complejos y hasta hoy desconocidos comportamientos cinemáticos de las estrellas que conforman el disco. Esta vez, gracias a los 12 meses extra de observaciones, se ha obtenido una muestra mucho más extensa y con mejores precisiones astrométricas en la dirección del anticentro (4 millones comparado con los 3 millones de DR2 en esta dirección) y con errores reducidos a un factor 0.7 y 0.5 para paralajes y movimientos propios, respectivamente (ver artículo sobre Gaia EDR3 en este mismo boletín). Con estas mejoras ha sido posible explorar los confines de dicho disco en la dirección del anticentro, confirmando que éste se extiende más allá de lo que se creía (al menos hasta 18 kpc del centro galáctico). No solo eso, sino que los nuevos datos muestran cómo las crestas mencionadas anteriormente siguen estando presentes en radios galactocéntricos donde, en principio, las resonancias de la barra no deberían existir (Figura 2), apuntando a otros fenómenos causantes. También se han podido detectar unas evidentes asimetrías en las componentes verticales del espacio de fases para las que todavía no se tiene una clara explicación.

Sin duda la excepcionalidad de los datos de Gaia y las posibilidades que las simulaciones más modernas nos ofrecen, nos sitúan en el momento de máxima esplendor para los estudios de la formación y evolución de la Galaxia, en lo que muchos consideran una nueva era: la era de Gaia. Los primeros datos de la misión Gaia nos han ayudado a realizar avances significativos pero, lejos de servirnos para la determinación definitiva de la estructura y del pasado del disco de nuestra Galaxia, han hecho surgir nuevas dudas e incluso un cambio de paradigma en la dinámica galáctica. En el futuro, se esperan más catálogos de la misión Gaia, con más datos y más precisos: dado el buen funcionamiento de la misión, ésta ya ha sido extendida 4 años adicionales y se prevén más extensiones, hasta agotar el combustible que mantiene la nave en funcionamiento. También contaremos con datos de otros surveys como WEAVE, un proyecto con una alta participación española, que medirá millones de velocidades radiales estelares (datos previstos para 2021) con las que esperamos poder seguir descifrando la complejidad del disco de nuestra Galaxia.

REFERENCIAS:

Antoja, T., Helmi, A., Romero-Gómez, M., et al. 2018, Nature, 561, 360

Antoja, T., McMillan, P., Kordopatis, G., et al. 2020, enviado a A&A

Binney, J. & Schönrich, R. 2018, MNRAS, 481, 1501

Fragkoudi, F., Katz, D., Trick, W., et al., 2019, MNRAS, 488,3324

Haines, T., D'Onghia, E., Famaey, B., et al., 2019, ApJ, 879, 15

Hunt, J. A. S., Bub, M. W., Bovy, J., et al., 2019, MNRAS, 490,1026

Kawata, D., Baba, J., Ciuca, I., et al. 2018, MNRAS, 479, L108

Khanna, S., Sharma, S., Tepper-Garcia, T., et al. 2019b, MNRAS, 489, 4962

Laporte, C. F. P., Minchev, I., Johnston, K. V., & Gómez, F. A. 2019b, MNRAS, 485, 3134

Ramos, P., Antoja, T., & Figueras, F. 2018, A&A, 619, A72

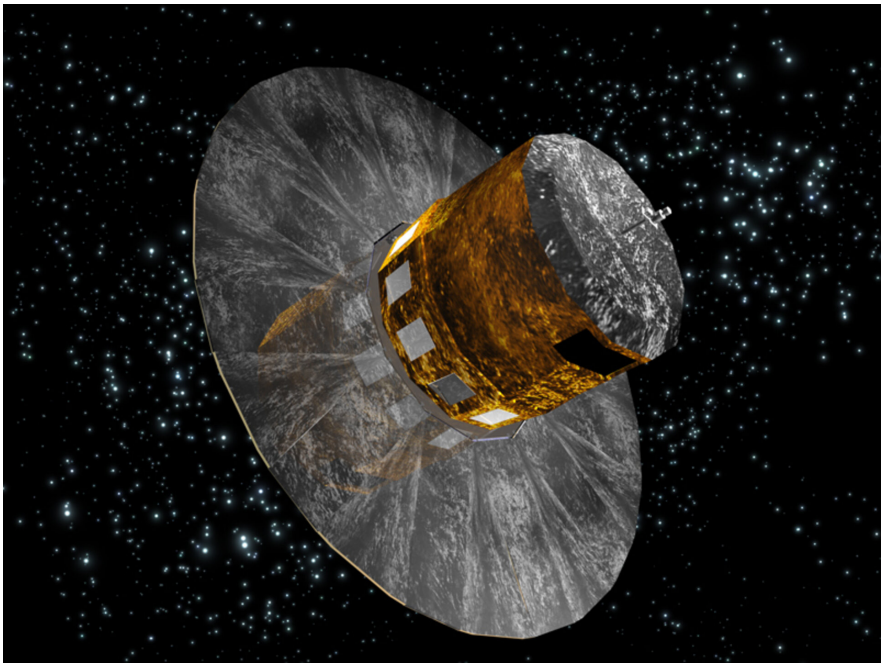



Figura 3: Impresión artística de Gaia. Créditos: ESA/ATG medialab.