

Los datos proporcionados por *Gaia* están revolucionando la física estelar, la física galáctica y por ende la astrofísica en general. El demonio está en los detalles y la información proporcionada por *Gaia* es extremadamente detallada. Así, nuestra vecindad solar, con un escrutinio riguroso, está deparando numerosas sorpresas. En este artículo mostramos cómo hicimos investigación y astronomía recreativa en un taller de las jornadas «Lerín, Tierra Estrella» de 2019, utilizando un catálogo representativo de esta región de la Galaxia y las herramientas accesibles desde el Observatorio Virtual.

Emilio J. Alfaro Navarro

Lerín, *Gaia* Estrella

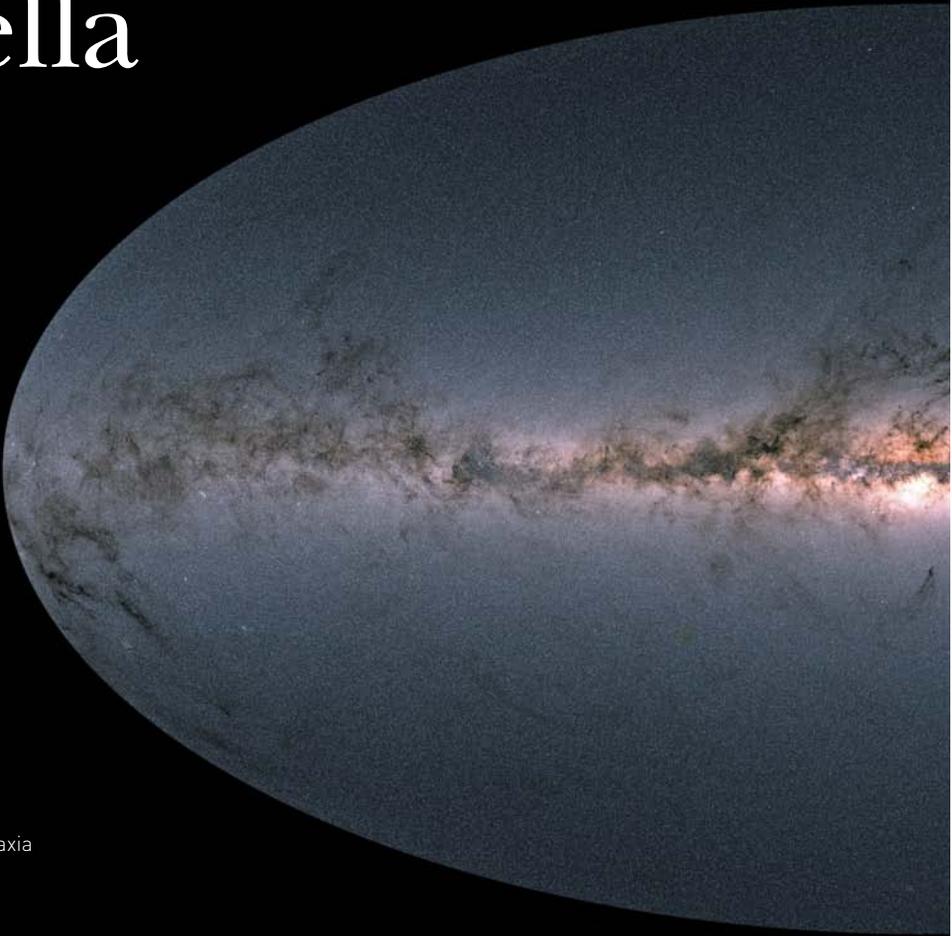


FIGURA 1. Mapa de la Galaxia realizado a partir de datos de *Gaia*. [ESA/*Gaia*/DPAC, A. Moitinho/A. F. Silva/M. Barros/C. Barata, University of Lisbon/H. Savietto, Fork Research]

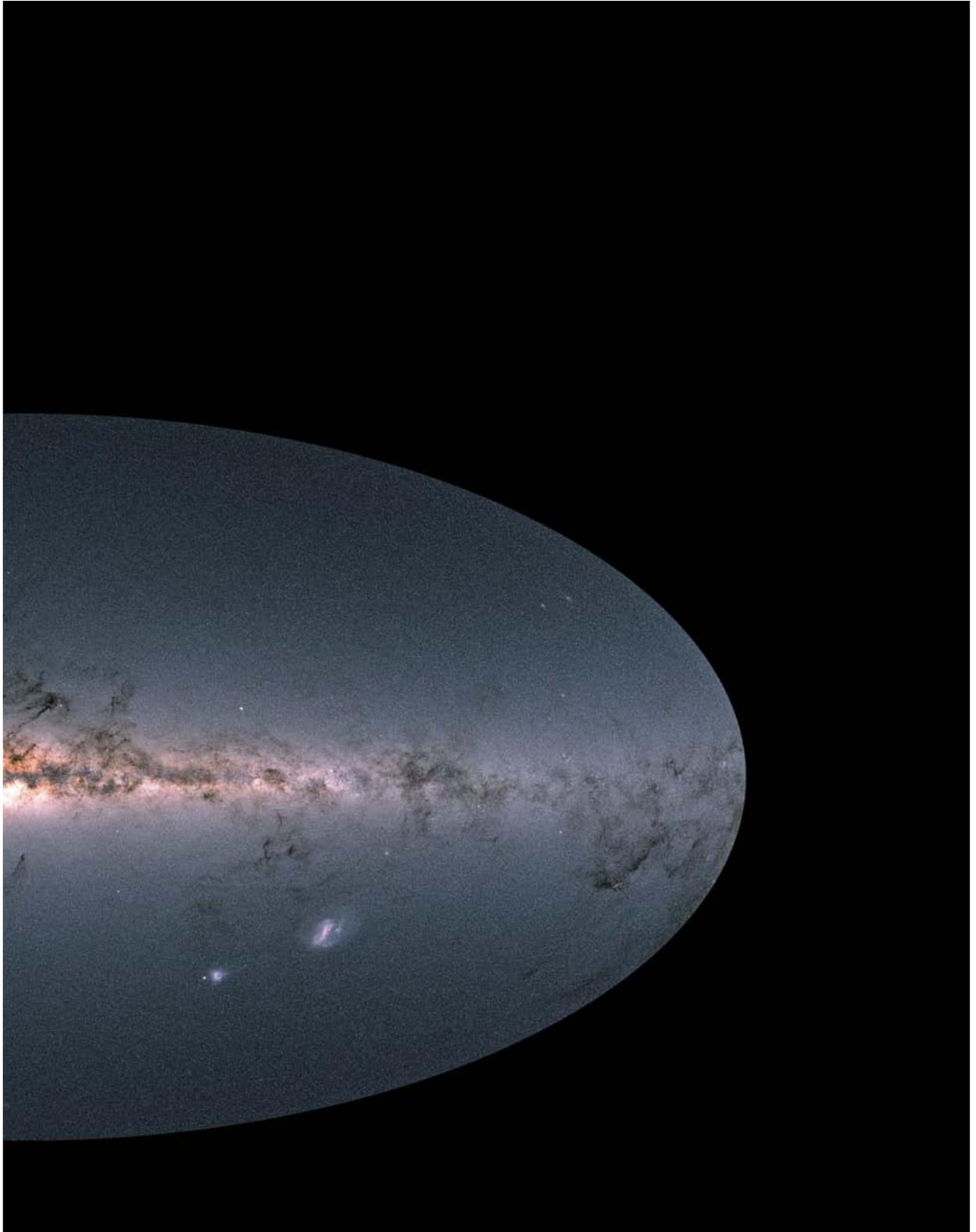




FIGURA 2. Mesa redonda «Mirando al cielo», moderada por Gustavo Ochoa (Centro Cívico de Lerín; primero por la izquierda) y con la participación, de izquierda a derecha, de Pepe Vilchez (IAA-CSIC), Blanca Troughton (Federación de Asociaciones Astronómicas de España) y Javier Armentia (Planetario de Pamplona). [Excepto donde se indique, todas las imágenes son cortesía del autor]

Al acercarse el día de Santiago, «en la época en que la gente siente el ansia de peregrinar, y los piadosos viajeros desean visitar tierras y distantes santuarios»¹, un entusiasta y alegre grupo de peregrinos, en su mayoría sureños, pone rumbo al norte siguiendo el brillo de la Polar. No se dirigen a Finisterre, a la llamada del Santo; sus pasos se encaminan un poco más al este, al reino de Navarra, a Lerín. Allí, desde hace tres años, científicos y divulgadores de la ciencia se reúnen durante cuatro días, con sus respectivas noches, para confraternizar con una gente amable, hospitalaria, emprendedora e inteligente que vio muy pronto que la ciencia es provocadora y divertida y, como la poesía, un arma cargada de futuro.

El comienzo de esta aventura fue astronómico y femenino, y tiene nombres propios. Teresa Cruz, directora de la Fundación Descubre², y Consuelo Ochoa, alcaldesa de Lerín, estaban considerando la idea de introducir el turismo astronómico como motor cultural, social y económico de su pueblo. Es evidente que cualquier actividad astronómica que se realice en Navarra debe contar con la ayuda y asesoramiento del Planetario de Pamplona. Se lo han cu-

rrado. Desde 1993 este centro se encarga de dar a conocer la belleza de los cielos y de motivar en el estudio y observación de estos a los navarros y foráneos que visitan sus instalaciones. Son ya muchos años y mucha experiencia acumulada como para no incorporarlo a cualquier aventura astronómica desarrollada en Navarra que tenga voluntad de perdurar.

En 2017 yo era responsable de la EADA (Estrategia Andaluza de Divulgación de la Astronomía) dentro de la Fundación Descubre, y como tal me puse en contacto con Fernando Jaúregui para presentarle una idea global del proyecto y pedirle su colaboración, apuntándole a la vez el apoyo que el Instituto de Astrofísica de Andalucía (CSIC) daba a esta iniciativa. Ahí acabó mi papel. Las entrevistas posteriores entre Consuelo, Teresa y la dirección del Planetario debieron ir bien porque en 2020 ya estamos a punto de celebrar la cuarta edición de lo que se llamó «Lerín, Tierra Estrella», y tanto Javier Armentia como Fernando Jaúregui y otros colegas del Pamplonetario, son cómplices habituales y necesarios del montaje de este tinglado. Cabe decir que lo que comenzó como una actividad básicamente astronómica tuvo una natural ex-

FIGURA 3. Distribución de la muestra de estrellas jóvenes del catálogo de Zari sobre la esfera celeste. Las coordenadas angulares están en el sistema galáctico, donde el plano de la Vía Láctea está centrado en $b = 0^\circ$. Las líneas rojas muestran los contornos de isodensidad superficial. Las mayores concentraciones se encuentran cerca de $l \sim 200^\circ$ (Orión y Monoceros) y $l \sim 260^\circ$ (Vela). Los máximos de densidad de la distribución parecen estar separados del plano $b = 0^\circ$ formando una estructura alabeada conocida como el Cinturón de Gould.

pansión y acogió otras ramas del conocimiento humano generando colaboraciones entre diferentes disciplinas y saberes. Matemáticos, informáticos, geólogos, biólogos, historiadores del arte, astrónomos —en el amplio sentido de la palabra: profesionales y no profesionales—, divulgadores y hasta exploradores, forman la *troupe* que se encarga cada verano de recrear un club científico y cultural que abarca a un pueblo entero en su extensión física y emocional. Una Barraca científica del siglo XXI.

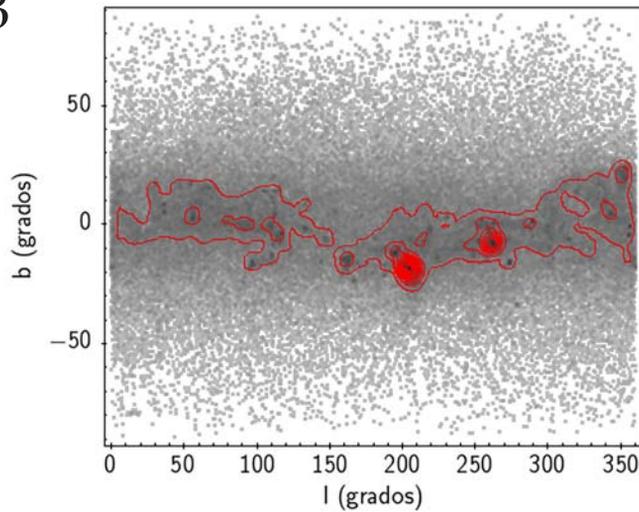
LERÍN Y GAIA

La vertiente astronómica de la edición de 2019 tuvo un cartel de lujo (ver Figura 2) con la par-

¹G. Chaucer, *Cuentos de Canterbury*. Ed. y trad. P. Guardia Massó. Madrid. Cátedra, 1991. p. 65.

² La Fundación Descubre, dependiente de la Junta de Andalucía, fue fundada en 2010 y tiene como misión fundamental la divulgación de la Innovación y el Conocimiento.

3



ticipación de numerosos astrónomos y un amplio programa de actividades que incluían conferencias, mesas redondas, observaciones nocturnas y talleres. Para un astrónomo galáctico como el que suscribe, *Gaia* y sus programas asociados como *Gaia ESO Survey*, LAMOST, RAVE o APOGEE, en el campo de los cartografiados espectroscópicos, y J-PLUS, J-PAS, GALANTE o PANStarrs, en el de los relevamientos fotométricos es el mejor regalo que pudiera imaginar para el final de una carrera dedicada al estudio de los sistemas estelares, con especial devoción por los cúmulos abiertos y la estructura espacial y cinemática del trozo de Galaxia que denominamos vecindad solar. Así que lo tuve claro: el taller astronómico de ese año se dedicaría a *Gaia*.

Pero ¿qué es *Gaia*? Para los lectores habituales de *Astronomía* no creo que haya que extenderse demasiado en la descripción de esta misión espacial de la ESA y del catálogo estelar resultante, cuya tercera entrega se habrá hecho pública (o estará a punto de pu-

blicarse) cuando estas líneas salgan a la luz. Para hacerlo breve, *Gaia* es un satélite que alberga un sofisticado instrumental, muy compacto, capaz de proporcionarnos datos astrométricos (coordenadas angulares, movimientos propios y paralajes), espectroscópicos (velocidad radial, contenido en metales y, para una muestra más reducida, abundancia de diferentes elementos químicos), junto a la fotometría en tres bandas anchas (G, B, R) que cubren el rango visible del espectro electromagnético y que definen un nuevo sistema fotométrico. Este variado conjunto de datos se obtendrá, casi en su totalidad³, para una muestra de más de 1600 millones de objetos celestes.

Tenemos a la Galaxia –bueno, a un 1 % de la Galaxia– en un petabyte⁴, y lo que es verdaderamente importante, a disposición de cualquier usuario que tenga acceso a la red y la voluntad y el entendimiento para ponerse a estudiar la ingente cantidad de problemas astronómicos a los que los datos de *Gaia* pueden dar respues-

ta. Los astrónomos comenzamos a analizarlos en septiembre de 2016 cuando se hizo pública la primera entrega, limitada en aquel momento a las estrellas en común con las del catálogo Tycho-2 (TGAS)⁵. Desde entonces la investigación basada en datos de *Gaia* se ha disparado. A mediados de abril de 2020 el número de artículos con árbitro en cuyo título o resumen aparece la palabra *Gaia* asciende a más de 870⁶.

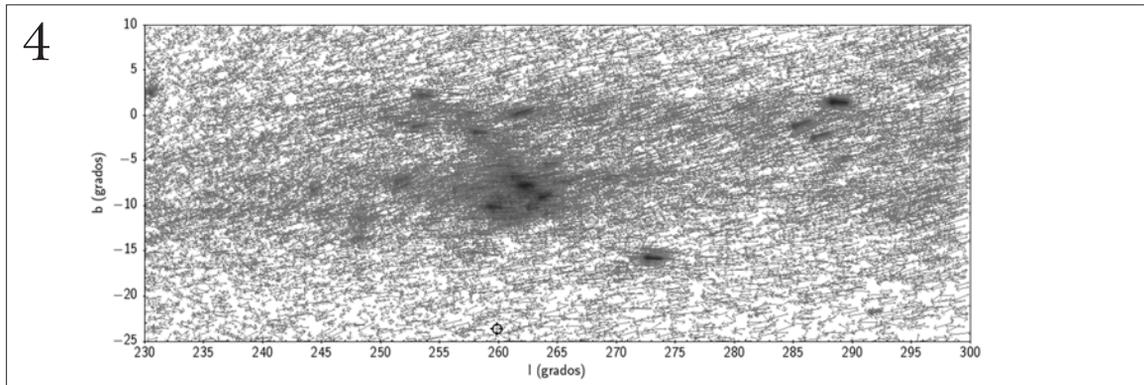
Uno de estos trabajos, publicado en 2018, se basa en un conjunto de estrellas jóvenes, con edades inferiores a 30 millones de años, dentro de un radio de 500 parsecs alrededor del Sol que denominaremos desde ahora el catálogo de

³ El número de espectros obtenidos está limitado a un rango de magnitudes estelares inferiores a 17 en la banda G y a un intervalo determinado de colores. La segunda entrega de datos (*Gaia* DR2) cataloga más de siete millones de velocidades radiales. Un buen número si comparamos con los datos disponibles en 2016, pero lejos de los más de 1600 millones de objetos que conforman el catálogo global. GES, LAMOST, RAVE, APOGEE y el cartografiado WEAVE, cuya puesta en marcha se espera para finales de 2020, son relevamientos espectroscópicos que cubrirán algunos de los huecos dejados por la espectroscopia de *Gaia*, tanto en extensión del muestreo como en una mejor cobertura y resolución espectral.

⁴ La Red Española de explotación de *Gaia* (REG), organizó un congreso, allá por 2009, con este mismo nombre, «La Galaxia en un Petabyte», que se celebró en Menorca.

⁵ Tycho-2 es un catálogo fotométrico y astrométrico basado en datos de *Hipparcos*, y TGAS fue la primera entrega de datos de *Gaia* que utilizó la astrometría de Tycho-2 como primera época para la determinación de los movimientos propios. vizier.u-strasbg.fr/viz-bin/VizieR?-source=I/259

⁶ Fuente NASA-ADS. Resultados a 15 de abril de 2020.



Zari⁷. Esta región de la Vía Láctea tiene un especial interés no solo porque es nuestro barrio dentro de la gran ciudad galáctica, sino porque permite un análisis más pormenorizado de sus propiedades físicas y estructurales que pueden ser extrapoladas, con la debida cautela, a otras regiones menos accesibles desde el Sol, donde la información es más pobre e incompleta. El estudio de la vecindad solar nos abre las puertas al conocimiento de nuestra Galaxia en su totalidad.

Pero el catálogo de Zari no solo permite adentrarnos en la investigación de la componente estelar joven en las cercanías del Sol, sino que representa un excelente recurso didáctico y divulgativo que, con las adecuadas herramientas informáticas, nos permite visualizar con datos reales los conceptos, estructuras y objetos de la física galáctica; elementos que hemos aprendido durante años en los libros de texto y que ahora se pueden materializar fácilmente en la pantalla de nuestro ordenador. Las herramientas matemáticas y computacionales para realizar los cálculos necesarios y sus representaciones gráficas están también al alcance de todos en el Observatorio Virtual (VO en sus siglas inglesas), que desde hace años Enrique Solano y su grupo

(SVO; *Spanish Virtual Observatory*) llevan enriqueciendo y difundiendo a toda la comunidad española desde su base en CAB-ESAC. En particular, para el taller de Lerín, utilicé el programa TopCat que incluye diferentes paquetes gráficos y estadísticos y que en sus últimas versiones ha incorporado funciones específicas para el análisis de datos de *Gaia*.

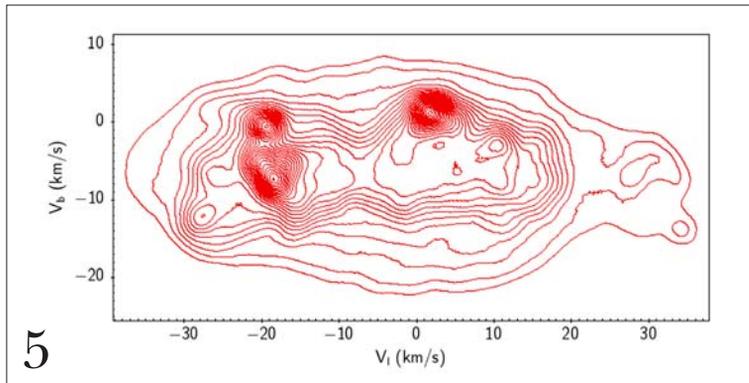
LA VECINDAD SOLAR

El catálogo de Zari contiene cerca de 130 000 estrellas, entre objetos masivos y calientes que pueblan la zona superior de la Secuencia Principal y los de menor masa, todavía en formación, que denominamos estrellas de Pre-Secuencia Principal. La distribución de este conjunto estelar en la esfera celeste se muestra en la Figura 3, donde se distinguen las regiones de Orión y Vela con una alta densidad superficial de objetos. Las zonas más densas y oscuras representan la proyección sobre el cielo de las regiones de formación estelar reciente, que incluyen agrupamientos, asociaciones y cúmulos estelares en una distribución jerárquica de tamaños y edades que asemeja una gran *matrioshka* celeste. Cómo es esta distribución, cuál es su geometría espacial y cinemática y cómo se conecta esta infor-

mación con los mecanismos físicos que transforman el gas en estrella, es toda una rama de la astronomía moderna y un objetivo científico de vanguardia para cuya consecución la misión *Gaia* parece haber sido especialmente diseñada.

Tanto las asociaciones como los cúmulos estelares muestran no solo una concentración espacial, sino que comparten a su vez una misma velocidad, que se pone de manifiesto como un agrupamiento en la distribución de los movimientos propios de las estrellas. Las estrellas recién nacidas adquieren la velocidad promedio de la nube molecular, pero con una dispersión inicial característica de las propiedades físicas del gas donde se han formado. Por lo tanto, estos objetos celestes deben aparecer como concentraciones más o menos densas (más densas los cúmulos, y quizás con una densidad menor y más extensas las asociaciones) en

⁷ La confección de este catálogo y el análisis de la distribución de la formación estelar en la vecindad solar forman parte de la tesis doctoral de Eleonora Zari, que defendió su trabajo en la Universidad de Leiden, en 2019, bajo la dirección de los profesores A. Brown y P. T. de Zeeuw. El artículo ha sido publicado en *Astronomy & Astrophysics* 2018, vol. 620, p. 172 y los datos pueden bajarse de vizier.u-strasbg.fr/viz-bin/VizieR?-source=J/A+A/620/A172



el espacio de cuatro dimensiones formado por las coordenadas angulares y las velocidades en el plano del cielo. Pero ¿cómo podemos visualizar un espacio de cuatro dimensiones? Fácil. Las dos velocidades espaciales correspondientes a las coordenadas angulares elegidas se asocian a un vector fijo anclado en la posición de la estrella sobre la esfera celeste y de esta forma mostramos el campo de la velocidad tangencial de la muestra. Cuatro dimensiones sobre el plano. Este tipo de representación está incluido en las funciones gráficas disponibles en TopCat, y la Figura 4 muestra el campo de velocidades asociado a una extensa región de la Galaxia centrada en la constelación de Vela. Cada flecha representa al vector velocidad en el plano del cielo y se puede observar como hay agrupamientos estelares sobre los que se superpone una flecha bien delimitada y contrastada, formada por la acumulación de pequeños vectores con el mismo módulo y dirección: estamos observando un cúmulo estelar. Hay regiones más extensas que muestran a su vez diversos agrupamientos espaciales en su interior con velocidades ligeramente diferentes sobre un fondo más difuso: son grandes regiones de formación estelar o superasociaciones.

Incluso el grosor o difuminado de estas flechas nos proporciona información acerca de la dispersión interna de velocidades y el tamaño del cúmulo.

CORRIENTES ESTELARES Y GRUPOS MÓVILES

El análisis de estas cinco variables astrométricas (no olvidemos que hemos introducido la paralaje para calcular las velocidades lineales) pueden permitirnos encontrar otros tipos de sistemas estelares quizás más elusivos, pero no menos interesantes: las corrientes estelares y los grupos móviles. La imagen de una extensa, aunque más tenue, concentración estelar proyectada en el cielo como una estructura tubular o filiforme y compartiendo una misma velocidad promedio o mostrando un campo de velocidad que se modifica de una forma continua y coherente, puede ser la primera pista de que estamos observando una corriente estelar, quizás vestigio de los filamentos de las nubes donde se formaron estas estrellas. Invito al lector a considerar si alguna de estas corrientes pudiera estar presente en la Figura 4, así como a identificar los cúmulos que aparecen en este gráfico.

Los grupos móviles son conocidos desde 1869 cuando Proctor

FIGURA 4. Campo de velocidad tangencial en la región de la vecindad solar centrada en Vela. Las componentes de la velocidad se han estimado como $V_i = 4,74 \cdot (PM_i / Pl_x)$ donde los movimientos propios (PMs) y la paralaje (Plx) están medidos en miliarcosegundos (mas)/año y mas, respectivamente, y la velocidad resultante en km/s. Los vectores velocidad están escalados para que las flechas sean visibles y útiles (escalado automático).

FIGURA 5. Plano de velocidades en el sistema móvil. $V_i = 4,74 \cdot PM_i / Pl_x$, donde el subíndice i indica las coordenadas galácticas l y b . Las líneas rojas muestran los lugares geométricos de igual densidad de puntos. Las concentraciones de isodensidades representan a los Grupos Móviles más representativos de la vecindad solar.

presentó a la *Royal Society* el descubrimiento de dos conjuntos estelares que mostraban, cada uno de ellos, un movimiento similar, pero cuyas estrellas podían estar separadas en el cielo por varios grados. Su naturaleza y origen son todavía materia de debate. El catálogo de Zari nos permite analizar este tipo de agrupaciones en la vecindad solar, e incluso ir un poco más lejos al tener una estimación de la distancia para cada estrella.

Si sobre el plano de velocidades definidas a lo largo de los ejes de coordenadas galácticas dibujamos el entramado de las líneas de igual densidad de puntos, deberían aparecer, como concentraciones de isodensidades, los grupos móviles más conspicuos. La Figura 5 muestra el resultado de este ejercicio, donde destaca claramente la distribución de la componente más joven de los grupos móviles en la vecindad solar. La apariencia de este mapa de isodensidades depende de tres parámetros libres: la cota inferior, el número de isodensidades que queremos representar y el fac-

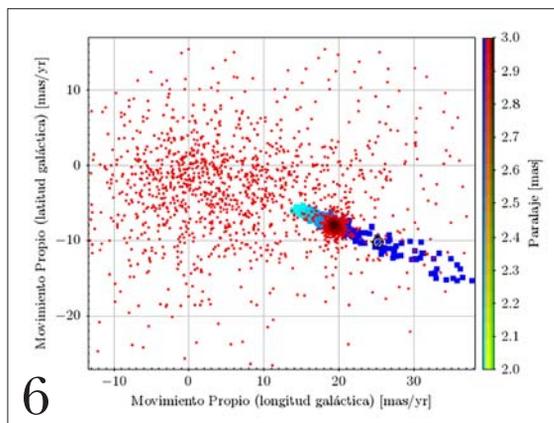


FIGURA 6. Plano de movimientos propios donde la muestra de estrellas en el campo de Stock 2 se representa por cuadrados rojos pequeños. El cúmulo se manifiesta con una alta concentración de puntos alrededor de (19, -8). Las estrellas asociadas al Grupo Móvil Lerín 1 están representadas por cuadrados coloreados más grandes. Los tonos azules codifican las paralajes de la muestra de acuerdo con la gama de colores representada en la banda vertical derecha.

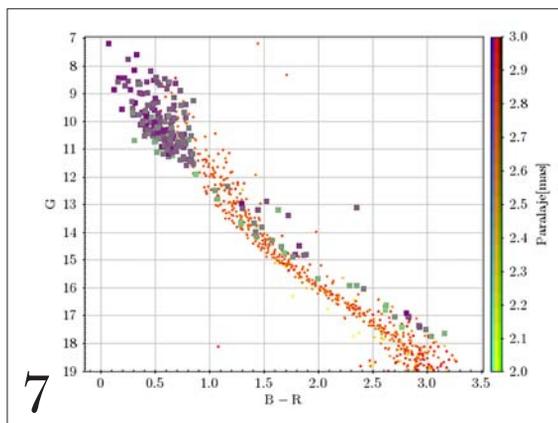


FIGURA 7. Diagrama color-magnitud en el sistema fotométrico de *Gaia* para las estrellas en el campo de Stock 2, y asociadas a la concentración en el plano de movimientos propios (cuadrados pequeños). Los cuadrados más grandes representan a las estrellas de Lerín 1 cuya posición en el diagrama de movimientos propios coincide con la de Stock 2. Los colores indican las paralajes de acuerdo con el código establecido en la barra vertical derecha.

tor de suavizado. Hemos elegido la combinación adecuada para que la figura se viera así, en particular para que una pequeña concentración localizada a aproximadamente (35, -15) se manifestara con claridad. Si admitimos que la gráfica se parece a una vaca –diseñada por una comisión– este grupo estaría en el hocico del animal. Hemos seleccionado a mano las estrellas asociadas a este máximo local. La selección presenta tres características bien definidas:

- a) Forma una franja inclinada en el plano de los movimientos propios, con un máximo de densidad bien localizado (ver Figura 6).
- b) Las estrellas de la selección ocupan una extensión de varios grados cuadrados sobre la esfera celeste, pero también presenta una concentración alrededor de ($l = 133,4^\circ$, $b = -1,9^\circ$).
- c) Las concentraciones del Grupo Móvil (GM), que llamaremos Lerín 1, tanto en el espacio de coordenadas angulares como en el de movimientos propios, parecen coincidir con las del cúmulo estelar Stock 2.

Hemos extraído las estrellas asociadas al cúmulo Stock 2 del catálogo *Gaia* DR2 desde el repositorio de datos VizieR. En la Figura 6 mostramos el plano de los movimientos propios para ambos objetos: a) Stock 2 (cuadrados rojos pequeños) que presenta una alta concentración (alrededor de [19, -8]) típica de un cúmulo estelar, frente a una estructura elíptica menos densa, representativa de las estrellas de campo en la región, y b) Lerín 1 (cuadrados grandes coloreados) que se expande a lo largo de una franja inclinada cuyos diferentes tonos de azul indican diferen-

tes paralajes y por ende diferentes distancias, de acuerdo al código de colores que se muestra en la banda vertical derecha. Sobre este diagrama hemos elegido a las estrellas pertenecientes al núcleo de Stock 2 y a las de Lerín 1 cuyos movimientos propios son coincidentes.

Los cúmulos estelares se caracterizan por presentar una secuencia bien definida en el diagrama color-magnitud, donde la magnitud está relacionada directamente con la masa de las estrellas y el color con la temperatura efectiva de las mismas. Dado que todas las estrellas de un cúmulo están a la misma distancia y han nacido casi simultáneamente, la secuencia definida por el lugar geométrico de la distribución de estrellas representa una isócrona en ese espacio fotométrico. Esta ha sido y es una de las herramientas más utilizadas para determinar las edades de los cúmulos estelares: comparar modelos de isócronas en diferentes sistemas fotométricos con los diagramas color-magnitud observacionales. En la Figura 7 hemos dibujado las estrellas seleccionadas en el espacio de movimientos propios de Stock 2 con cuadrados pequeños y las de Lerín 1 con cuadrados más grandes, donde la gama

de colores indica también la paralaje de estos objetos. Mientras que la mayoría de las estrellas de Stock 2 muestran tener la misma paralaje, las estrellas de Lerín 1 presentan una mayor dispersión y sobre todo están concentradas en la región superior del diagrama correspondiente a las estrellas más masivas, calientes y jóvenes: las estrellas OB. Que las estrellas de Lerín 1 se sitúen en esa zona del diagrama fotométrico no debe extrañarnos, se han extraído del catálogo de Zari cuyos criterios de selección fijaban una edad para estos objetos inferior a 30 millones de años, lo que sí resulta más sorprendente es que los miembros de Stock 2 compartan posición, distancia y cinemática con los de Lerín 1, teniendo en cuenta que la edad de Stock 2 es

casi ¡¡diez veces mayor que la de la muestra de Zari!!

¿Qué está ocurriendo? Podemos plantear varias hipótesis: a) La muestra de Zari está contaminada con estrellas más viejas, b) en una misma región del espacio coexisten una asociación de estrellas OB con un cúmulo más viejo (propuesta por Zari y colaboradores en su artículo) y c) estamos observando una porción de un complejo estelar, con un rango de edades de unos pocos cientos de millones de años, asociado al Brazo Local. La respuesta, si tenemos alguna, en un próximo número. (A)

Agradecimientos: Quiero agradecer a Tatiana Cazorla (UGR) su colaboración en el análisis posterior de los datos. Tengo una deuda importante con Teresa Cruz, di-

rectora de la Fundación Descubre, por hacerme partícipe, desde el principio, de esta aventura en tierras navarras. No menos le debo al equipo organizador local, personificado en Consuelo, la alcaldesa, y Esther, la responsable del Área de Cultura del Ayuntamiento, que tienen la habilidad de convertir cualquier problema en una solución. Mis compañeros de la Barraca consiguen que ir a Lerín en julio sea una ilusión anual que nunca es defraudada. Por último, quiero agradecer al pueblo de Lerín la hospitalidad, cariño y complicidad con que nos reciben.

Emilio J. Alfaro Navarro, astrónomo del Instituto de Astrofísica de Andalucía, CSIC. Colaborador de la Fundación Descubre.



Equipos para Astrónomos

Alpha Cygni
ASTRONOMÍA

www.alphacygni.com

676264538

Envíos gratuitos. Consulte condiciones.