

Las estrellas masivas desempeñan un papel crucial en nuestra Galaxia y algunas se desplazan a altas velocidades respecto a su entorno, conocidas como estrellas fugitivas. Gracias a la precisión de los datos de *Gaia*, hemos identificado 175 estrellas O y Be fugitivas, la mitad de ellas nuevos descubrimientos, cruzando estos datos con catálogos de estrellas masivas. Nuestro método detecta tanto estrellas fugitivas como "caminantes" sin definir un umbral en velocidad. Este trabajo, primer artículo de mi tesis, aporta una visión sobre los mecanismos de eyección estelar y ha sido galardonado con el Tercer Premio de "La Vanguardia de la Ciencia 2024".



Autora: Mar Carretero-Castrillo
Institut de Ciències del Cosmos (ICCUB),
Universitat de Barcelona (IEEC-UB)
mcarretero@fqa.ub.edu

ESTRELLAS MASIVAS Y FUGITIVAS

Las estrellas masivas, nacidas con $M > 8M_{\odot}$ e impulsadas por intensos vientos estelares, desempeñan un papel crucial en la formación del Universo. Son motores cósmicos que impulsan la evolución de las galaxias y la producción de elementos pesados. La mayoría de las estrellas masivas se encuentran en sistemas binarios, en los que las interacciones con sus compañeras influyen en gran medida en su evolución. Sin embargo, su escasez y corta vida dificultan la comprensión de su formación y evolución. A pesar de ello, son responsables de la mayor parte de la producción de energía de las galaxias [1].

Algunas estrellas masivas de tipo O y B son fugitivas, viajando a velocidades sorprendentemente altas, de hasta 200 km/s, en comparación con sus vecinas estelares. Estas estrellas ofrecen así una oportunidad única para estudiar estrellas masivas en distintos entornos galácticos. Respecto a su origen como fugitivas, se han propuesto dos escenarios: el escenario de eyección dinámica [2], en el que una estrella es expulsada dinámicamente de un cúmulo; y el escenario de supernova en un sistema binario [3], en el que la estrella compañera o todo el sistema binario gana velocidad tras la explosión de la supernova. También podría darse un proceso de aceleración en dos etapas que combine ambos escenarios [4]. Sin embargo, las contribuciones relativas de estos escenarios en la Galaxia siguen siendo inciertas.

Además, las estrellas masivas que albergan objetos compactos son de especial interés debido a su asociación con sistemas binarios de rayos X y rayos gamma. Estos sistemas binarios de alta energía presentan una emisión en múltiples longitudes de onda, desde radio hasta rayos gamma de muy alta energía. Sin embargo, la población de estas exóticas binarias de rayos gamma es escasa, con sólo nueve fuentes conocidas.

Curiosamente, algunos de estos sistemas binarios de alta energía son fugitivos, probablemente producto de explosiones de supernova. Por lo tanto, la caracterización precisa de las estrellas masivas fugitivas no sólo aborda cuestiones importantes en el campo de las estrellas masivas, sino que también contribuye a los estudios de población de fuentes de alta energía en nuestra Galaxia.

DE LAS ESTRELLAS FUGITIVAS DE LA GALAXIA

BÚSQUEDA DE FUGITIVAS CON GAIA

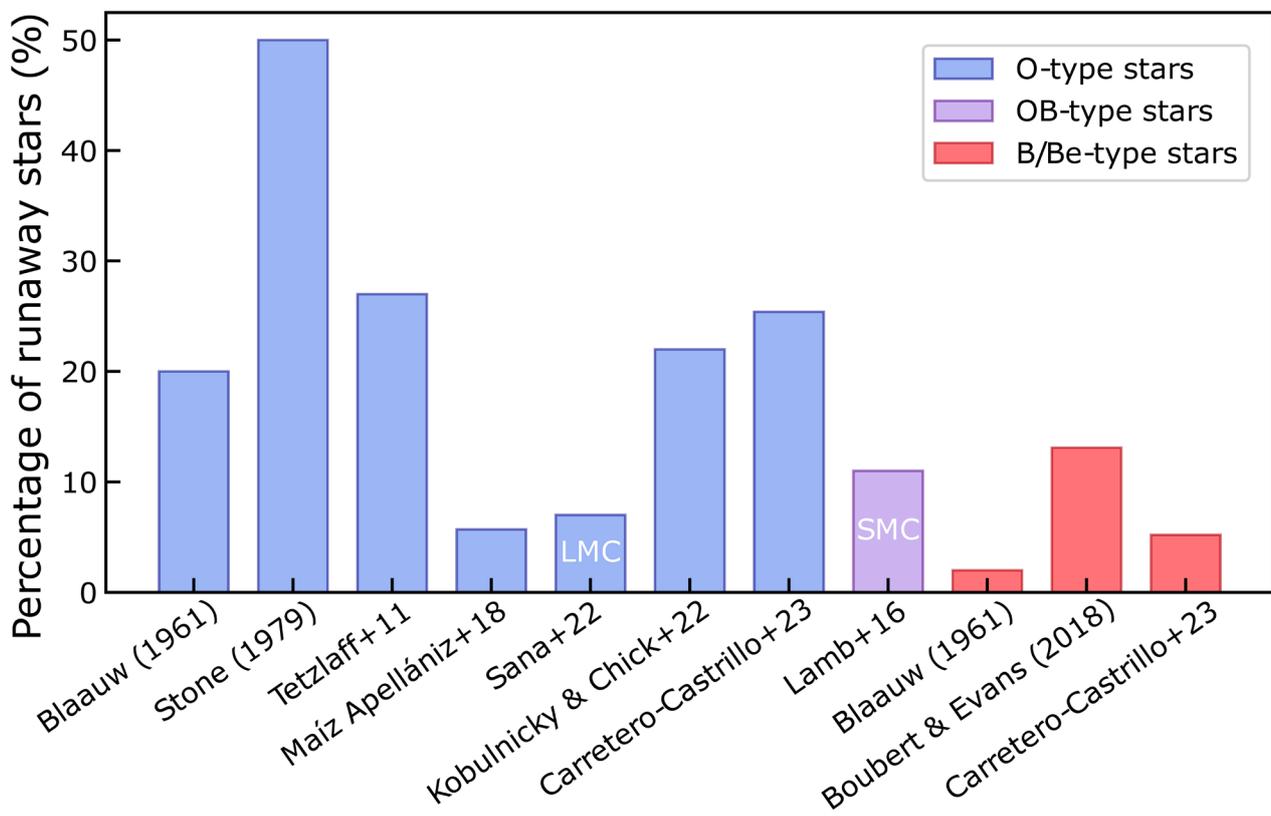
Los últimos datos de *Gaia* DR3 [5] ofrecen una oportunidad única para identificar estrellas fugitivas. La excepcional calidad de estos datos astrométricos hace posible poder calcular distancias y velocidades de estrellas con una precisión sin precedentes. Además, estudios previos sobre estrellas fugitivas encuentran una dispersión significativa en las fracciones de fugitivas, pues utilizan muestras, métodos y criterios diferentes, que no permiten una identificación unificada (ver Fig.1).

En el primer artículo de mi tesis, Carretero-Castrillo et al. 2023 [11], realizado en colaboración con mis supervisores Marc Ribó y Josep Maria Paredes, buscamos estrellas fugitivas en nuestra Galaxia

utilizando datos de *Gaia* DR3, y catálogos de estrellas masivas, con un método nuevo y autoconsistente de velocidad espacial en 2 dimensiones (2D). En particular, usamos el catálogo de estrellas O “Galactic O-star catalog” (GOSC) [14], y la base de datos de estrellas Be, “Be Star Spectra” (BeSS) Database [15], que cruzamos con los datos de *Gaia* DR3. Tras aplicar algunos filtros de calidad a los datos, acabamos construyendo el catálogo GOSC-*Gaia* DR3, con 417 estrellas tipo O, y el BeSS-*Gaia* DR3, con 1335 estrellas tipo Be.

Para identificar las estrellas fugitivas, primero calculamos distancias precisas de estrellas masivas aplicando una corrección para las paralajes de *Gaia* DR3 [16], y después velocidades, teniendo en

Figura 1. Histograma del porcentaje de estrellas fugitivas encontrados por diferentes trabajos en la Vía Láctea, y en el Large y el Small Magellanic Cloud, LMC y SMC, respectivamente. Referencias: [3], [6], [7], [8], [9], [10], [11], [12], [13].



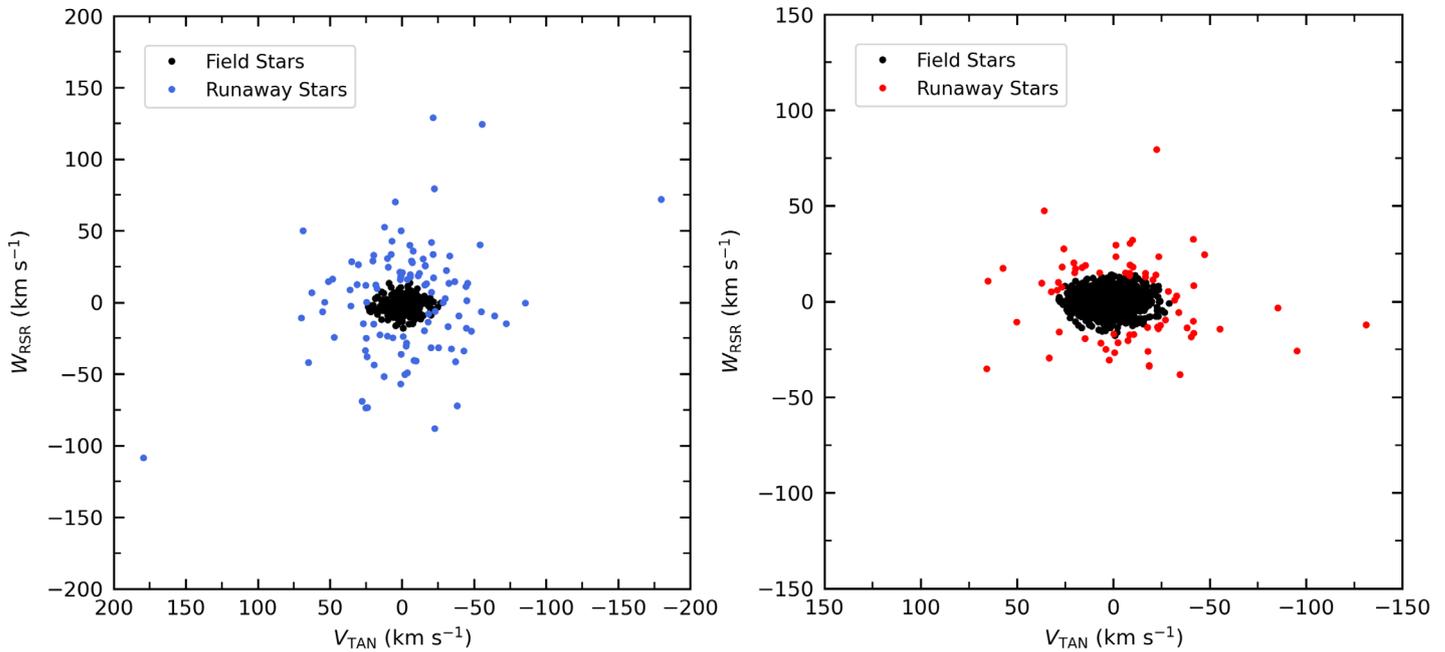


Figura 2. Espacio de velocidades en dos dimensiones usado en este trabajo para las estrellas GOSC-Gaia DR3 (izquierda) y el BeSS-Gaia DR3 (derecha). Las estrellas de campo se representan en negro y las estrellas fugitivas en azul y rojo, dependiendo del catálogo. Fuente: Carretero-Castrillo et al. (2023) [11].

cuenta una curva de rotación galáctica [17]. Finalmente, caracterizamos las estrellas basándonos en la significancia de sus velocidades 2D respecto a la curva de rotación. Este enfoque evita el uso de umbrales de velocidad, a diferencia de trabajos anteriores, y permite la identificación coherente de tanto de estrellas de movimiento lento (caminantes) como de estrellas fugitivas.

UNA NUEVA POBLACIÓN DE ESTRELLAS FUGITIVAS EN LA GALAXIA

Así, hemos identificamos 106 estrellas fugitivas de tipo O, y 69 fugitivas de tipo Be, siendo la mitad de ellas descubiertas como fugitivas por primera vez. Estos números representan un 25,4% de estrellas fugitivas de tipo O y un 5,2% de estrellas de tipo Be en nuestros catálogos. Las estrellas fugitivas muestran altas dispersiones de velocidad de 20-40 km/s, mientras que las estrellas de campo, tienen dispersiones de 5-9 km/s, con las estrellas de tipo Be presentando mayor dispersión debido a la difusión de la velocidad galáctica en el disco.

La Fig. 2 muestra las distribuciones de velocidad 2D para las estrellas de los catálogos GOSC- y BeSS-Gaia DR3, incluyendo una distinción por colores entre estrellas fugitivas y de campo. Las estrellas de campo se agrupan en torno a (0,0), mientras que las fugitivas presentan velocidades más altas. En particular, las velocidades de las estrellas fugitivas O son mayores que las de las fugitivas Be. Asimismo, las menores desviaciones estándar en la componente perpendicular de la velocidad junto con las mayores incertidumbres en la tangencial, implican que se identifican más fugitivas en la componente perpendicular.

En la Fig. 3 se muestran las posiciones de las estrellas fugitivas O y Be (círculos amarillos) en coordenadas galácticas (l, b), junto con el mapa de la Vía Láctea de Gaia DR3 en el fondo. Las flechas muestran las direcciones y sentidos de los movimientos propios de estas estrellas, escaladas considerando un tiempo de 3 Myr en el futuro. Las estrellas fugitivas presentan 2-3 veces más dispersión

en b que las estrellas de campo (no mostradas en esta figura), lo que es de esperar dado que han sido expulsadas de sus lugares de nacimiento durante su formación como fugitivas.

También clasificamos las fugitivas en distintos intervalos de tipos sub-espectrales y encontramos que el porcentaje de fugitivas disminuye a medida que nos desplazamos a tipos espectrales más tardíos, como se puede apreciar en la Fig. 4. Los porcentajes más altos y las velocidades más altas obtenidas para las estrellas de tipo O en comparación con las estrellas de tipo Be favorecen el dominio del escenario de las eyecciones dinámicas en cúmulos sobre el de las de supernova en sistemas binarios.

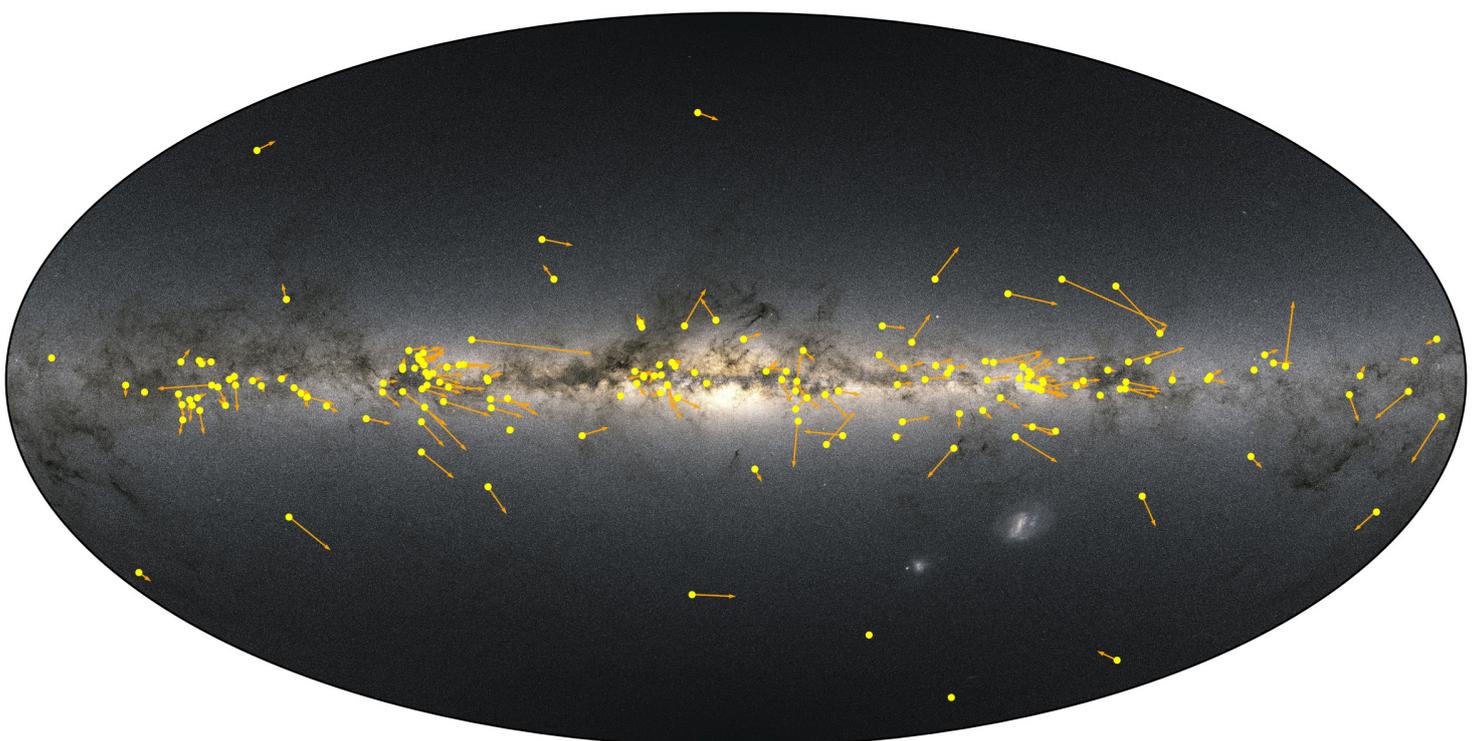
¿Y QUÉ MÁS VENDRÁ?

Dada su alta velocidad, las estrellas fugitivas nos ofrecen una oportunidad única de estudiarlas a través de diferentes ambientes en la Galaxia. Además, si son masivas y fugitivas, éstas interactúan especialmente con el medio interestelar formando choques de proa, con-

ocidos como “bow shocks” en inglés, donde pueden ocurrir fenómenos de aceleración de partículas a velocidades relativistas. Finalmente, en el escenario supernova en un sistema binario, se pueden crear sistemas binarios fugitivos que contengan objetos compactos, siendo éstos muy peculiares e interesantes.

Para investigar los choques de proa de nuestras estrellas fugitivas, hemos colaborado con la experta en radioastronomía, Paula Benaglia (Instituto Argentino de Radioastronomía). A través de los datos en infrarrojo de WISE [18] y de *Gaia* DR3, hemos obtenido nuevas identificaciones de estas estructuras alrededor de nuestras fugitivas. Por otro lado, para buscar sistemas binarios de alta energía, estamos estudiando y caracterizando el catálogo de fugitivas en diferentes longitudes de onda (radio, rayos X, rayos gamma), incluyendo además información sobre binariedad. Esta búsqueda nos podría ayudar a encontrar nuevos sistemas binarios de rayos gamma en nuestra Galaxia, y servir para la futura explotación científica del Cherenkov Telescope Array Observatory (CTAO).

Figura 3. Posiciones (círculos amarillos) y direcciones y sentidos de los movimientos propios (flechas naranjas) de las estrellas fugitivas descubiertas en este trabajo con el mapa del cielo Gaia DR3 de la Vía Láctea. Crédito del mapa del cielo: ESA/Gaia/DPAC.



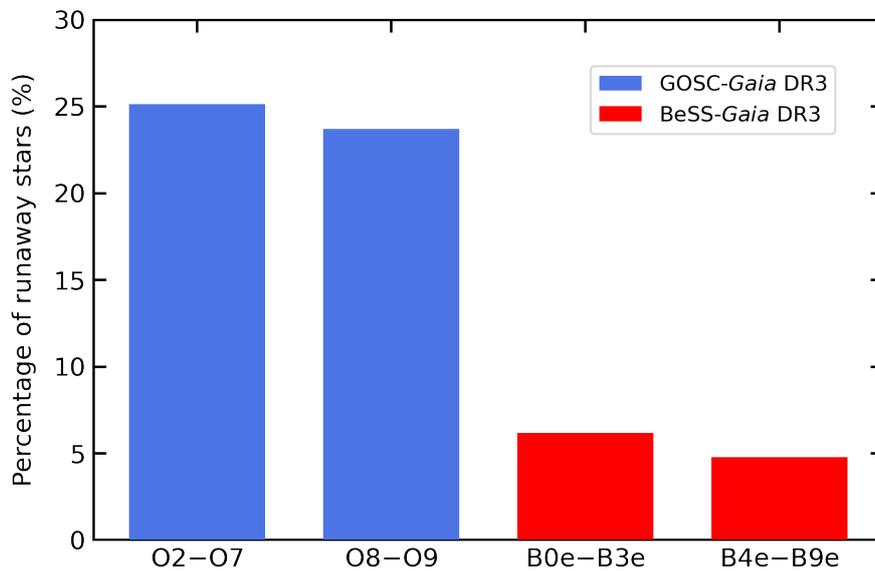


Figura 4. Porcentaje de estrellas fugitivas en función del tipo espectral. Los colores azul y rojo corresponden a las estrellas GOSC- y BeSS-Gaia DR3, respectivamente. Fuente: Carretero-Castrillo et al. (2023) [11].

Vale la pena destacar, que estos son sólo algunos ejemplos de casos científicos que se pueden explotar a través de las estrellas fugitivas, tanto desde el punto de vista teórico como observacional. Por ello, hemos publicado en VizieR los catálogos de las estrellas fugitivas que hemos encontrado. De esta forma, están accesibles a la comunidad científica, para maximizar así la explotación de los resultados científicos que se puedan obtener de estas estrellas.

SOBRE EL PREMIO “VANGUARDIA DE LA CIENCIA 2024”

El premio “[Vanguardia de la Ciencia 2024](#)”, organizado por La Vanguardia y la Fundació Catalunya La Pedrera, está dirigido a investigaciones lideradas por mujeres durante 2023. Este premio tiene como objetivo visibilizar la investigación de excelencia que se realiza en España y contribuir a reducir la brecha de género en el ámbito de la ciencia.

[Recibir este tercer premio](#) representa mucho más que el reconocimiento a una investigación sobre estrellas fugitivas y *Gaia*. Es una oportunidad tanto para visibilizar la investigación en astrofísica y sus contribuciones en el contexto científico español, como para enfatizar la importancia de iniciativas que

apoyan la igualdad y la diversidad de género en ciencia. En particular, la visibilidad otorgada por un medio de amplia difusión como La Vanguardia añade mucho valor a este premio, promoviendo la presencia de referentes científicas en un ámbito donde aún estamos poco representadas.

Una de las lecciones más valiosas que he aprendido durante este proceso ha sido reconocer la importancia que tiene el entorno profesional en las carreras de las científicas. Gracias al respaldo de mis supervisores de tesis, la comisión de Diversidad, Equidad e Inclusión (DEI) del Instituto de Ciències del Cosmos (ICCUB), y el programa de mentoría de la SEA, encontré el apoyo necesario para optar a este premio. Descubrir que cuento con tanto apoyo ha sido realmente la parte más importante de todo este proceso. Esta experiencia me ha hecho ver lo fundamental que es tener un entorno profesional positivo para que las carreras de las mujeres científicas prosperen y se construya una ciencia más inclusiva y diversa.

Así que ojalá que estas últimas líneas sirvan para recordarnos la importancia que pueden llegar a tener las diferentes iniciativas y comités que fomenten la Diversidad, la Equidad y la Inclusión en ciencia.

REFERENCIAS

- [1] Marchant, P. and Bodensteiner, J. (2024) The Evolution of Massive Binary Stars. *ARA&A*, 62 (1), 21–61.
- [2] Poveda, A., Ruiz, J. and Allen, C. (1967) Run-away Stars as the Result of the Gravitational Collapse of Proto-stellar Clusters. *Boletín de los Observatorios Tonantzintla y Tacubaya*, 4, 86–90.
- [3] Blaauw, A. (1961) On the origin of the O- and B-type stars with high velocities (the “run-away” stars), and some related problems. *Bull. Astron. Inst. Netherlands*, 15, 265.
- [4] Pflamm-Altenburg, J. and Kroupa, P. (2010) The two-step ejection of massive stars and the issue of their formation in isolation. *MNRAS*, 404(3), 1564–1568.
- [5] *Gaia* Collaboration (Vallenari, A., et al.) 2023a, *A&A*, 674, A1.
- [6] Stone, R. C. (1979) Kinematics, close binary evolution, and ages of the O stars. *ApJ*, 232, 520–530.
- [7] Tetzlaff, N., Neuhäuser, R. and Hohle, M. M. (2011) A catalogue of young runaway Hipparcos stars within 3 kpc from the Sun. *MNRAS*, 410 (1), 190–200.
- [8] Maíz Apellániz, J., Pantaleoni González, M., Barbá, R. H., et al. (2018) Search for Galactic runaway stars using *Gaia* Data Release 1 and HIPPARCOS proper motions.
- [9] Sana, H., Ramírez-Agudelo, O. H., Hénault-Brunet, V., et al. (2022) The VLT-FLAMES Tarantula Survey. Observational evidence for two distinct populations of massive runaway stars in 30 Doradus. *A&A*, 668, L5.
- [10] Kobulnicky, H. A. and Chick, W. T. (2022) Kinematics of the Central Stars Powering Bowshock Nebulae and the Large Multiplicity Fraction of Runaway OB Stars. *AJ*, 164(3), 86.
- [11] Carretero-Castrillo, M., Ribó, M. and Paredes, J. M. (2023b) Galactic runaway O and Be stars found using *Gaia* DR3. *A&A*, 679, A109.
- [12] Lamb, J. B., Oey, M. S., Segura-Cox, D. M., et al. (2016) The Runaways and Isolated O-Type Star Spectroscopic Survey of the SMC (RIOTS4). *ApJ*, 817(2), 113.
- [13] Boubert, D. and Evans, N. W. (2018) On the kinematics of a runaway Be star population. *MNRAS*, 477(4), 5261–5278.
- [14] Maíz Apellániz, J., Sota, A., Morrell, N. I., et al. (2013) First whole-sky results from the Galactic O-Star Spectroscopic Survey. In *Massive Stars: From alpha to Omega*, p. 198.
- [15] Neiner, C., de Batz, B., Cochard, F., et al. (2011) The Be Star Spectra (BeSS) Database. *AJ*, 142 (5), 149.
- [16] Maíz Apellániz, J. (2022) An estimation of the *Gaia* EDR3 parallax bias from stellar clusters and Magellanic Clouds data. *A&A*, 657, A130.
- [17] Reid, M. J., Menten, K. M., Brunthaler, A., et al. (2019) Trigonometric Parallaxes of High-mass Star-forming Regions: Our View of the Milky Way. *ApJ*, 885(2), 131.
- [18] Wright, E. L., Eisenhardt, P. R. M., Mainzer, A. K., et al. (2010) The Wide-field Infrared Survey Explorer (WISE): Mission Description and Initial On-orbit Performance. *AJ*, 140(6), 1868–1881.

ARTÍCULOS LA VANGUARDIA RELACIONADOS CON EL PREMIO

- <https://www.lavanguardia.com/vanguardia-de-la-ciencia/20240922/9955058/vuelve-premio-vanguardia-ciencia.html>
- <https://www.lavanguardia.com/vanguardia-de-la-ciencia/20240922/9946901/buscando-estrellas-fugitivas-lactea.html>
- <https://www.lavanguardia.com/ciencia/20241019/10029898/busco-estrellas-fugitivas-desafian-fisica-conocemos.html>
- <https://www.lavanguardia.com/ciencia/20241027/10050088/investigacion-cancer-infantil-gana-premio-vanguardia-ciencia.html>

AGRADECIMIENTOS

Este artículo científico, con el consecuente premio de La Vanguardia, no hubiera sido posible sin mis supervisores de tesis, Marc Ribó y Josep Maria Paredes, quienes me guían y apoyan en el camino científico, y más allá.