

# Estudio de la dinámica de sistemas binarios de cúmulos abiertos con LP-Visuite: el cúmulo doble de Perseo

A. Granada<sup>1,2</sup>, F. Zoppetti<sup>2,3,4</sup>, N.P. Maffione<sup>1,2</sup> & M. Orellana<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> *Laboratorio de Investigación Científica en Astronomía, UNRN, Argentina*

<sup>2</sup> *Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Argentina*

<sup>3</sup> *Instituto de Astronomía Teórica y Experimental, CONICET-UNC, Argentina*

<sup>4</sup> *Observatorio Astronómico de Córdoba, UNC, Argentina*

Received: 09 February 2024 / Accepted: 29 April 2024

©The Authors 2024

**Resumen** / En este trabajo se lleva a cabo una investigación sobre la dinámica de los cúmulos NGC 869 y NGC 884, conocido como el cúmulo doble de Perseo con el fin de evaluar posibles aproximaciones pasadas o futuras entre ellos y su impacto potencial en la formación de estrellas Be. Se emplea LP-VICODE para realizar las simulaciones, mientras que el modelo HYDRA 2.0 se utiliza para representar el potencial de la Vía Láctea. Los resultados sugieren que no se puede descartar que un acercamiento máximo en el pasado pueda haber influido en la formación de estrellas Be, aunque el máximo de probabilidad para este máximo acercamiento corresponde a un tiempo futuro. Se propone extender este análisis a otros cúmulos dobles de la literatura para obtener una comprensión más amplia de su dinámica, y para aquellos que albergan estrellas Be evaluar si la dinámica de los cúmulos pudo haber influenciado la formación de estrellas Be.

**Abstract** / In this work, we carry out an investigation of the dynamics of the clusters NGC 869 and NGC 884, known as the Double Cluster in Perseus in order to assess possible past or future approaches between them, and its potential impact on Be star formation. LP-VICODE is used to perform the numerical simulations, while the HYDRA 2.0 model is used to represent the Milky Way potential. We find that it cannot be ruled out that a maximum approach in the past may have influenced Be star formation, although the maximum probability for this maximum approach corresponds to a future time. We propose to extend this analysis to other double clusters in the literature to gain a broader understanding of their dynamics, and for those harbouring Be stars to assess whether the dynamics of the clusters may have influenced the formation of Be stars.

**Keywords** / Galaxy: kinematics and dynamics — open clusters and associations: individual (NGC 869, NGC 884) — stars: emission-line, Be

## 1. Introducción

Una de las líneas de investigación del Laboratorio de Investigación Científica en Astronomía (LICA) de la Universidad Nacional de Río Negro propone contribuir a mejorar el conocimiento de diferentes aspectos vinculados a las estrellas Be. Se trata de estrellas B de secuencia principal que rotan en promedio más rápido que el grueso de las estrellas B y que forman eventualmente discos circunestelares a partir del material eyectado (Rivinius et al., 2013). Estas estrellas se observan con mayor frecuencia en cúmulos abiertos (CA) de entre 10 y 50 Ma, algunos de ellos con fracción de estrellas Be sobre el total de las B cercana al 50%. Tal es el caso del Cúmulo doble de Perseo, que consiste en un par de cúmulos abiertos con una elevada fracción de estrellas Be. Proponemos investigar con datos de la literatura (Tarricq et al., 2021) y utilizando la LP-VISUITE, si este par de cúmulos se está acercando o alejando entre sí, para poder evaluar si una mayor cercanía en épocas de formación estelar pudo haber favorecido la formación de estrellas Be.

## 2. LP-VISUITE

LP-Visuite (Carpintero et al., 2022) es un paquete de códigos para trabajar en dinámica, particularmente diseñado para operar con indicadores de caos. Entre las componentes del paquete, para el presente trabajo utilizamos dos: (a) LP-VICODE es el código principal del paquete que calcula hasta 10 indicadores de caos dado un potencial, las aceleraciones y las ecuaciones variacionales asociadas al mismo. También ofrece el cálculo de cantidades físicas vinculadas a la órbita, entre otra información relevante (Carpintero et al., 2014). (b) MILKYWAYHYDRA, es un archivo que contiene el potencial, aceleraciones y ecuaciones variacionales para modelos de galaxia variados, ajustado particularmente para galaxias tipo Vía Láctea. Este archivo está en el formato de entrada del LP-VICODE, para poder utilizarlo directamente para el análisis de dinámica galáctica. En este trabajo hacemos uso del modelo MILKYWAYHYDRA de Vía Láctea conocido como HYDRA 2.0. Más información de la suite en: <http://lp-vicode.fcaglp.unlp.edu.ar/>.

HYDRA 2.0 es un modelo representativo de potencial de galaxia tipo Vía Láctea, con valores de los parámetros

ajustados para representar la dinámica en vecindades tipo solar. Sus componentes son:

- Zona nuclear donde se tiene al agujero negro supermasivo;
- Bulbo modificado por el efecto de la barra;
- Discos fino y grueso de perfiles exponenciales;
- Cuatro brazos espirales que representan, desde el interior hacia el exterior, los brazos Scutum-Centaurus, Local (límite exterior) más los de Sagittarius (límite interior), Perseus y Cygnus;
- Halo de materia oscura bi-triaxial.

Tanto la barra como los brazos espirales son componentes dependientes del tiempo que tienen diferentes velocidades angulares. Las demás componentes son estáticas. Por otro lado, cabe aclarar que si bien es posible realizar con el código una introducción adiabática de la barra y los brazos, en este estudio consideramos que en  $t = 0$ , que corresponde al inicio de la simulación, tanto brazos como barra ya han alcanzado su configuración final.

### 3. Metodología

Dado el modelo de potencial de Vía Láctea mencionado, y dadas las posiciones y velocidades observadas de los cúmulos NGC 869 y NGC 884 respecto al centro galáctico obtenidas de la literatura con sus correspondientes errores (Tarricq et al., 2021), buscamos conocer las posibles separaciones mínimas entre los cúmulos y las fechas donde estas ocurrieron u ocurrirán. Para ello, seguimos los pasos descritos en las siguientes subsecciones.

#### 3.1. Generación de condiciones iniciales

Para NGC 869 y NGC 884, tomamos los valores observados de las posiciones y velocidades junto con sus errores del artículo de Tarricq et al. (2021). Luego, modelamos cada cúmulo a partir de elipsoides 6D, en el espacio de fases, con distribuciones normales de partículas sintéticas alrededor de las posiciones y velocidades medias. Para ello distribuimos aleatoriamente alrededor de los valores medios observados una cantidad de partículas sintéticas compatible con una densidad media de  $0.0002387 \text{ pc}^{-3}$  en el espacio de configuraciones. Este valor, que fue elegido arbitrariamente con el único objetivo de definir el número de partículas en cada elipsoide, tiene su origen en el orden de magnitud de tamaño típico de cúmulos abiertos jóvenes, y es de unos 10 pc de radio (Piskunov et al., 2007). Es decir, corresponde a una partícula por esfera de radio de 10 pc. Considerando tal densidad, el elipsoide que representa a NGC 869 tiene 1197 partículas y el que representa a NGC 884, 863 partículas. Cabe recordar que estas partículas no representan estrellas individuales de cada cúmulo, sino posibles estados actuales en el espacio de configuraciones. Luego, en cada elipsoide 6D, estas partículas son distribuidas siguiendo una distribución normal que tiene por  $\sigma$  a un tercio del valor de desviación estándar que brinda la literatura para las posiciones y velocidades de estos cúmulos (Tarricq et al., 2021). Esto asegura que, fuera de los errores observacionales, prácticamente no

**Tabla 1.** Desviaciones estándar utilizadas para definir los elipsoides en torno a NGC 869 y NGC 884.

Cúmulo NGC	$\sigma_X$ kpc	$\sigma_Y$ kpc	$\sigma_Z$ kpc	$\sigma_{vX}$ $\text{km s}^{-1}$	$\sigma_{vY}$ $\text{km s}^{-1}$	$\sigma_{vZ}$ $\text{km s}^{-1}$
869	0.06347	0.06428	0.00569	1.84027	1.84497	0.7613
884	0.05826	0.05814	0.00494	0.99897	0.99730	0.6793

haya partículas. Por completitud, en la Tabla 1 detallamos las dispersiones de posiciones y velocidades que hemos utilizado. Entre las partículas de cada cúmulo, hemos considerado a aquel que tiene como condiciones iniciales a las posiciones y velocidades medias del cúmulo (Tarricq et al., 2021). Nos referiremos a tales partículas como “nominales”.

#### 3.2. Integración de órbitas

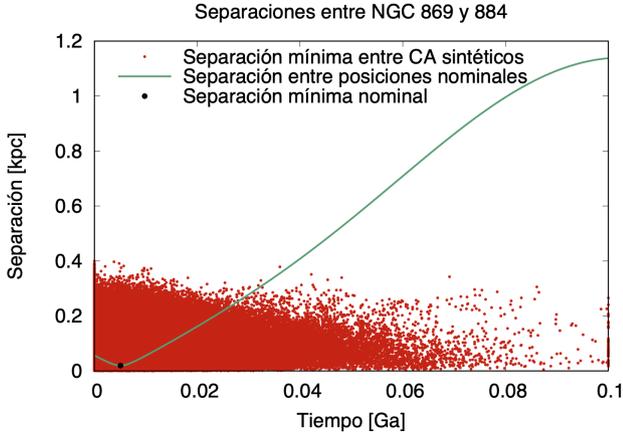
Integramos las órbitas de todas las partículas sintéticas en cada elipsoide, representativas de ambos cúmulos en la Vía Láctea, utilizando el modelo HYDRA 2.0 en LP-VICODE sin habilitar el cómputo de los indicadores de caos, sólo integración de las trayectorias. Aquí debemos mencionar que hacemos una simplificación, y es que consideramos que ambos cúmulos son solamente afectados por el potencial de la galaxia y no interactúan entre sí. Cabe destacar que entre las órbitas calculadas están incluidas aquellas que tienen como posiciones y velocidades iniciales los valores observados de NGC 869 y NGC 884, es decir, las denominadas “nominales”.

#### 3.3. Cálculo de separaciones mínimas entre los cúmulos

Con todas las trayectorias integradas, incluidas las nominales, calculamos la separación mínima para todos los pares posibles. Es decir, para cada partícula dentro del elipsoide representativo de NGC 869, calculamos su separación mínima con cada partícula dentro del elipsoide representativo de NGC 884, y registramos el momento de mínima separación. En la Fig. 1 mostramos parte del método en un gráfico de tiempo y separaciones. Con línea sólida verde tenemos la evolución de la separación entre las posiciones nominales de NGC 869 y NGC 884, con un círculo negro el resultado de buscar el mínimo en la evolución temporal de esta separación. En puntos rojos, las separaciones mínimas para todos los demás pares de las distribuciones, calculados de igual manera que en el caso de las posiciones nominales arriba descriptas.

### 4. Descripción de los experimentos numéricos

Dados los resultados anteriores, queremos investigar qué tan probable es que los cúmulos NGC 869 y NGC 884 se hayan encontrado o estén por encontrarse en el futuro. Esto puede verse en la Fig 2, donde se tiene un gráfico separación/tiempo dividido en una grilla de  $100 \times 100$  celdas. Cada celda tiene una extensión temporal de 1 Ma ( $0.001\text{Ga}$ ) y en separación de 0.012 kpc (12 pc). Este valor surge de dividir en 100 partes al máximo de



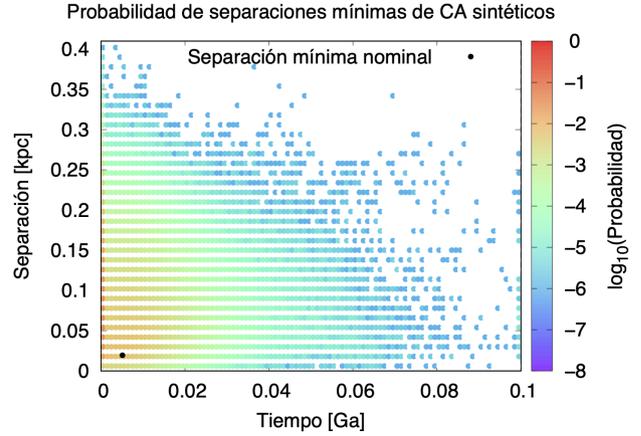
**Fig. 1.** Ubicación de cada par de posibles separaciones mínimas de los cúmulos en el plano separación-tiempo. La curva verde indica la evolución temporal esperada para los cúmulos según sus velocidades y posiciones nominales.

separación de las posiciones nominales de NGC 869 y 884 durante los primeros 100 Ma. Luego contamos el número de “separaciones mínimas” entre pares representativos que se dieron en cada celda, y dividimos por la cantidad de pares totales ( $1197 \times 863$ ) para obtener una probabilidad de separación mínima en cada celda. Los colores de la figura indican probabilidades de cada celda en escala logarítmica.

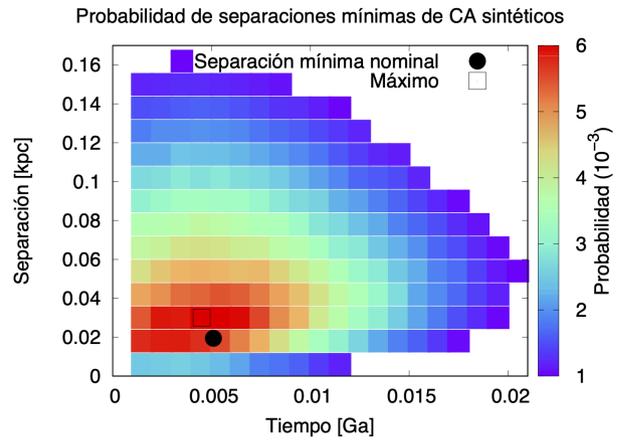
Entonces, en la Fig. 2, se puede observar cómo la región de mayor probabilidad, de 0.32 en color rojo oscuro, en realidad se encuentra en la primera columna de celdas, que corresponde a que la separación mínima entre NGC 869 y NGC 884 pueda haber ocurrido antes del final del primer Ma de integración. Cálculos complementarios donde integramos exclusivamente el primer Ma pero con un paso temporal 100 veces más chico que el original, muestran que hay dos máximos de probabilidad en ese primer Ma. Un máximo con probabilidad 0.0248 ocurre en el primer intervalo de integración (correspondiente al primer 0.01 Ma), representativo de mínimas separaciones ocurridas en tiempos anteriores al intervalo de integración. Otro máximo, con probabilidad 0.0526 ocurre en el último intervalo temporal (correspondiente al intervalo entre 0.09 Ma y 1 Ma), y que asociamos a mínimas separaciones ocurridas luego del primer Ma. Es decir que al refinar la grilla temporal más gruesa en el primer Ma, encontramos dos máximos de probabilidad: uno que sigue representando una mínima separación ocurrida en tiempos anteriores al de integración (y que por los tanto no podemos descartar con nuestros argumentos estadísticos) y otro, más relevante, que apoya la hipótesis de que el máximo sucede luego del primer Ma.

En este sentido, también, en la Fig. 2, vemos que la separación mínima entre posiciones nominales que está señalada con un círculo negro en 19.4 pc a los 5.1 Ma también se encuentra dentro de una región de alta probabilidad.

Para observar esto con mayor detalle, descartamos la primera columna, dado que representa la probabilidad



**Fig. 2.** Ubicación de cada par de posibles separaciones mínimas de los cúmulos en el plano separación-tiempo. El símbolo negro corresponde a los valores nominales. La paleta de colores indica la probabilidad de que ocurra cada separación mínima al tiempo correspondiente.



**Fig. 3.** Ídem Fig. 2, pero descartando las probabilidades de que el evento haya ocurrido antes del primer Ma y también toda probabilidad inferior a 0.001.

asociada a encuentros ocurridos exclusivamente antes del primer Ma como detallamos previamente, y también toda probabilidad inferior a 0.001 (notemos que la probabilidad acumulada de todas las celdas con valores menores a 0.001, es de 0.13). De esta manera buscamos detallar mejor la región alrededor de la separación nominal. En la Fig. 3 repetimos el gráfico de la Fig. 2, pero en este caso con las restricciones mencionadas. Además establecemos una escala de colores lineal. En este nuevo gráfico señalamos el máximo de probabilidad con un cuadrado negro vacío. Observamos finalmente que la separación mínima nominal entre los cúmulos NGC 869 y NGC 884 está muy cerca de ese máximo de probabilidad.

## 5. Conclusiones

Calculamos una probabilidad de 0.32 para que la aproximación máxima entre los cúmulos NGC 869 y NGC 884 haya ocurrido en algún momento antes del primer

Ma de integración, y 0.28 para que ocurra antes del primer 0.01Ma de integración. Debido a que estos cúmulos tienen gran cantidad de estrellas Be, no podemos descartar que un máximo acercamiento pasado pueda haber contribuido al desarrollo de esta población estelar en particular. Por otro lado, el máximo de probabilidad en algún momento en el futuro coincide muy bien con la aproximación máxima de los cúmulos abiertos para sus posiciones nominales, es decir: a 19.4 pc dentro de unos 5.1 Ma. Finalmente, tenemos una probabilidad de 0.685 de que la separación mínima no se dé más allá de los próximos 9 Ma. Siguiendo la metodología del presente trabajo para el cúmulo doble de Perseo, proponemos hacer el mismo análisis para todos los cúmulos abiertos dobles de la literatura, ya que el número de cúmulos binarios detectados ha crecido en los últimos tiempos (Song et al., 2022) pero no se ha determinado su dinámica en la Galaxia. Para aquellos que tuvieran estrellas Be podríamos investigar si ya ha ocurrido la máxima aproximación y explorar si las separaciones mínimas en eda-

des jóvenes se correlacionan con la presencia numerosa de estrellas Be.

*Agradecimientos:* Este trabajo es Auspiciado por el Programa de Estadías Nacionales de la Asociación Argentina de Astronomía (PEN) 2023, F. Zoppetti – N. Maffione. A.G. agradece al proyecto PIBAA 28720210100879CO. Agradecemos a la/el referí del artículo por su detallada lectura de nuestro manuscrito.

## Referencias

- Carpintero D.D., Maffione N., Darriba L., 2014, *Astronomy and Computing*, 5, 19  
Carpintero D.D., Maffione N.P., Gómez F.A., 2022, *Astronomy and Computing*, 40, 100592  
Piskunov A.E., et al., 2007, *A&A*, 468, 151  
Rivinius T., Carciofi A.C., Martayan C., 2013, *A&A Rv*, 21, 69  
Song F., et al., 2022, *A&A*, 666, A75  
Tarricq Y., et al., 2021, *A&A*, 647, A19