

Informe final publicable de proyecto

Desentrañando las poblaciones más antiguas de la Vía Láctea con estrellas variables RR Lyrae

Código de proyecto ANII: FCE_1_2021_1_167524

Fecha de cierre de proyecto: 01/11/2024

MATEU JIMENEZ, Cecilia Elena (Responsable Técnico - Científico)

CABRERA GADEA, Mauro (Becario)

UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA. FACULTAD DE CIENCIAS (Institución Proponente) \\\

INSTITUTO DE ASTRONOMÍA, UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO \\\ NATIONAL ASTRONOMICAL OBSERVATORY OF JAPAN

\\ INSTITUTO DE CIENCIAS DEL COSMOS, UNIVERSIDAD DE BARCELONA \\\ UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA. FACULTAD DE CIENCIAS

Resumen del proyecto

Las estrellas variables han tenido un rol definitorio en la visión del Universo que tenemos actualmente. Su uso como estándares de luminosidad en la medida de distancia ha permitido establecer desde la posición del Sol en la Vía Láctea, la naturaleza misma de las galaxias, hasta las primeras medidas de la recesión de las galaxias como evidencia de la expansión del Universo.

Las estrellas RR Lyrae, en particular, son un tipo de estrella fácilmente reconocible por su distintiva variabilidad fotométrica y que se encuentran en un estadio evolutivo que, tradicionalmente, sólo está presente en poblaciones estelares viejas (>10 mil millones años), casi tan antiguas como la edad del Universo (13.4 mil millones de años). Así pues, son marcadores ideales para estudiar las poblaciones más antiguas de nuestra Galaxia, reliquias de las épocas más tempranas de la formación de la Vía Láctea.

En este trabajo utilizamos estrellas RR Lyrae para estudiar la estructura, subestructura y cinemática del disco galáctico, una de las componentes más antiguas de nuestra Galaxia. Al combinar su potencial como medidores de distancia con los datos cinemáticos de la reciente misión astrométrica Gaia, tenemos una oportunidad sin precedentes de estudiar la estructura y la cinemática de componentes que son en sí mismas un registro fósil del proceso de formación de nuestra galaxia.

Ciencias Naturales y Exactas / Ciencias Físicas / Astronomía / Astronomía Galáctica

Palabras clave: Vía Láctea / Estrellas Variables / /

Antecedentes, problema de investigación, objetivos y justificación.

Nuestra galaxia, la Vía Láctea, es la piedra Rosetta de la dinámica y los procesos de formación de galaxias espirales. Estando inmersos en ella, la cercanía de sus estrellas nos permite estudiar su estructura, composición química y dinámica a un nivel de detalle inalcanzable en cualquier otra galaxia (Bland-Hawthorn 2016). Sus poblaciones estelares más viejas, casi tan antiguas como la edad del Universo (13 mil millones de años = 13 Gaños), son en sí mismas un registro fósil de las etapas más tempranas de la formación galáctica. Ellas constituyen un ejemplo local que podemos estudiar en gran detalle de los procesos que ocurren en el Universo temprano, que sólo podemos estudiar observando las galaxias más distantes.

En este trabajo nos concentramos en la componente más antigua del disco de la Vía Láctea. El disco es la componente más importante en términos de masa bariónica, en éste reside la amplia mayoría (>90%) de las estrellas de la Galaxia. Su componente más vieja es el disco grueso, una componente cinemáticamente más caliente que el disco delgado en el que residen las estrellas recién formadas. Aunque fue descubierto hace casi 40 años, todavía no es claro si es realmente una componente distinta y no una extensión del disco delgado o cómo se relaciona con otras componentes como el halo estelar o el bulbo central (Kawata & Chiappini 2016).

Como trazador utilizaremos estrellas variables de tipo RR Lyrae. Las estrellas RR Lyrae, en particular, son fácilmente reconocibles por su distintiva variabilidad fotométrica y se encuentran en un estadio evolutivo que sólo está presente en poblaciones estelares viejas (>10 Gaños). Al igual que otras estrellas variables son "estándares de luminosidad": su brillo intrínseco es conocido y al compararlo con su brillo aparente se puede conocer su distancia. Esto ha permitido utilizarlas para hacer mapas 3D de la estructura de la Vía Láctea, principalmente del Halo, una componente extensa y de baja densidad de estrellas dentro de la cual está embebido el disco (e.g. Kinemuchi et al. 2006).

Las estrellas RR Lyrae son, pues, un trazador ideal para caracterizar la estructura de una población vieja como el disco grueso galáctico. Sin embargo, debido a las dificultades inherentes a estudiar estrellas muy cerca del disco - alta densidad estelar y extinción por polvo- han sido pocos los estudios de este tipo realizados hasta ahora. Las

primeras determinaciones de la distribución espacial de estrellas RR Lyrae en el disco se enfocaron en el estudio en la dirección vertical (Layden, 1995; Kinemuchi et al., 2006), debido a su limitada cobertura radial. En Mateu & Vivas (2018) realizamos el primer estudio del perfil de densidad estelar de RR Lyrae en el disco grueso ofreciendo la primera medida simultánea de las escalas vertical y radial. Este estudio se pudo realizar combinando el primer catálogo de cobertura radial extensa en el disco, que publicamos en Mateu et al. (2012) con otros dos catálogos públicamente disponibles (Layden, 1995 y Sesar et al. 2010). Además, reportamos el primer indicio de que el disco grueso no parece sufrir un “acampanamiento” importante, i.e. su escala vertical permanece aproximadamente constante con el radio.

Muchas otras interrogantes referentes a la estructura del disco grueso permanecen abiertas. Por ejemplo, se desconoce si éste presenta el alabeo observado en las poblaciones jóvenes y de edad intermedia del disco delgado. El alabeo es la inclinación del plano medio del disco que aumenta con la distancia radial, dándole al disco la forma del ala de un sombrero, un fenómeno bien conocido en la componente estelar del disco delgado de la Vía Láctea (Lopez-Corredoira et al. 2002, Romero-Gómez 2019). Tampoco está claro si hay traslape entre las distribuciones de edad del disco grueso y el delgado; de haberlo, el disco delgado podría ser lo suficientemente viejo como para contener estrellas RR Lyrae. Comprobar si existen o no estrellas RR Lyrae en el disco delgado ofrecería un importante discriminante entre diferentes modelos de formación del disco galáctico (e.g. Clarke et al. 2019). Por otra parte, trabajos más recientes (Sarbadhicary et al. 2021, Iorio & Belokurov 2021) han ofrecido evidencia de la posible asociación de estrellas RR Lyrae con poblaciones de edad intermedia (2 a 5 mil millones de años). La existencia de estas estrellas no puede ser explicada por los modelos canónicos de evolución estelar de estrellas aisladas, por lo que la confirmación de su existencia es de gran importancia tanto para estudios de la estructura galáctica, como de evolución estelar. En vista de este nuevo panorama, cabe la posibilidad de que haya una población de RR Lyrae con cinemática y propiedades de disco delgado, que no necesariamente sea tan vieja como suelen serlo estas estrellas. Como las edades de las RR Lyrae no pueden ser estimadas de forma individual, la evidencia disponible hasta la fecha que apunta a la existencia de estas estrellas es indirecta.

Para responder estas interrogantes es necesario contar con un catálogo de RR Lyrae con cobertura espacial amplia del disco galáctico, con información cinemática y cuya completitud pueda ser conocida para poder estimar el cambio real de la densidad en el disco, sin sesgos observacionales. La misión astrométrica Gaia nos brinda la oportunidad sin precedentes de contar con un catálogo con estas características. La misión Gaia de la Agencia Espacial Europea (ESA) fue lanzada en 2013 (Brown et al. 2018) y se encuentra realizando un sondeo astrométrico profundo de todo el cielo obteniendo información de posición y velocidad, fotometría multi-época y espectroscopía de baja resolución para un millardo de estrellas. La segunda remesa de datos (Gaia DR2), publicada en 04/2018, fue la primera en publicar datos cinemáticos y está revolucionando nuestro conocimiento de la estructura y, sobre todo, de la dinámica de la Vía Láctea. La cobertura espacial y profundidad de este sondeo inédito nos está permitiendo realizar estudios dinámicos globales de la Vía Láctea, antes limitados a la vecindad solar. Además, Gaia DR3 publicó el que actualmente es el mayor catálogo de RR Lyrae en la galaxia (Clementini et al. 2022), cubriendo todo el cielo, incluyendo la mayor parte del disco Galáctico.

DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

En el presente proyecto nos propusimos utilizar los datos de la misión astrométrica Gaia y su catálogo de estrellas RR Lyrae para estudiar el disco de la Vía Láctea y desarrollar métodos para potenciar el desempeño de las estrellas RR Lyrae como indicadores de distancia a partir de observaciones ópticas. Utilizar estrellas variables RR Lyrae implica considerables ventajas: combinar la información cinemática de Gaia con las distancias fotométricas precisas de las RR Lyrae es la estrategia óptima para maximizar la cobertura del disco, con la mejor precisión posible en distancia.

Como parte del proyecto nos enfocamos en potenciar a las estrellas RR Lyrae como indicadores de distancia en el óptico. Utilizando una calibración alternativa de las distancias de las RR Lyrae, podemos alcanzar una precisión y exactitud en distancia aún mejores, al minimizar efectos evolutivos, de extinción y de metalicidad. Esto nos permitirá

hacer un uso óptimo de estas estrellas en el estudio del disco y es un aporte útil para la gran cantidad de estudios que tradicionalmente utilizan a las RR Lyrae como trazadores en otras componentes galácticas.

Con el catálogo de RR Lyrae y las herramientas que hemos desarrollado, estudiamos la distribución espacial de estas estrellas en el disco galáctico. La extensa cobertura espacial nos permitirá explorar principalmente si el disco está alabeado, si existen estrellas RR Lyrae en el disco delgado y qué edad tienen. El estudio del alabeo arrojará una determinación independiente de la intensidad alabeo de la población estelar del disco usando un trazador cuyas distancias son altamente confiables (errores $<8\%$), con efectos de selección mínimos y exhaustivamente caracterizados, y abundantes en la población más vieja (>10 Gaños); todas considerables ventajas frente a los trazadores que han usado trabajos previos basados en estrellas gigantes rojas mayoritariamente, para las que las distancias son mucho menos confiables (errores $>30\%$), están sujetas a degeneraciones que dificultan la asociación más clara a una población con un límite de edad determinado y tienen funciones de selección mucho más difíciles de caracterizar que afectan sensiblemente la inferencia de las propiedades del alabeo. Nuestros resultados presentan una fuerte evidencia observacional que podrá ser contrastada con las predicciones de diferentes mecanismos de formación propuestos para el alabeo y que afectan de forma diferente poblaciones de distintas edades.

Estudiar estos problemas usando estrellas RR Lyrae ofrece una perspectiva complementaria a la de trabajos previos y se traducirá en un aporte significativo tanto en el estudio de la población vieja del disco, como en su utilidad como indicadores de distancia en el óptico.

En las distintas etapas del proyecto estuvieron involucrados estudiantes de postgrado y de grado (Licenciatura en Astronomía, Facultad de Ciencias, Udelar). Esto nos ha permitido visibilizar aún más la Astronomía Galáctica como una línea de investigación nueva en Uruguay, lo que está siendo un aporte significativo y radicalmente nuevo en el desarrollo de esta área en el país.

Metodología/Diseño del estudio

- La calibración de luminosidad de estrellas RR Lyrae en el óptico

Utilizaremos una muestra de >50 mil RR Lyrae cercanas y brillantes para calibrar el método de cálculo de luminosidad y distancia que hemos propuesto. Exploraremos la calibración de la luminosidad como función del corrimiento en período como alternativa a la tradicional calibración como función del período. Kunder et al. 2010 hizo una exploración inicial con una muestra de <20 estrellas, que ofreció resultados prometedores. En este trabajo utilizaremos una muestra >300 veces mayor y con distancias conocidas mucho más fiables. Utilizaremos los cúmulos globulares con mayor número de estrellas RR Lyrae conocidas para validar los resultados y confirmar la calidad de la corrección de los efectos evolutivos que esperamos minimizar con esta calibración.

El método que desarrollaremos utilizará la información en varias bandas fotométricas para inferir la extinción a cada estrella de forma individual. La independencia del uso de mapas de extinción ofrece una ventaja considerable en el cálculo de distancias a estrellas en el disco galáctico, donde la extinción es alta y depende fuertemente de la distancia.

- La estructura y cinemática del alabeo del disco galáctico

Para estudiar la estructura del disco galáctico desarrollamos un método de descomposición de Fourier que permite describir la estructura del disco tomando en cuenta la presencia del alabeo y otras perturbaciones conocidas como corrugaciones. Este método fue validado con estrellas Cefeidas Clásicas, una clase de estrellas variables que son trazadoras del disco delgado joven y comparten muchas de las ventajas ofrecidas por las RR Lyrae: permiten un cálculo preciso de la distancia ($<5\%$); al ser luminosas pueden ser observadas en la mayor parte del disco y no tienen contaminación por otras componentes galácticas como el halo, lo que simplifica su análisis. Usando los catálogos públicos de estrellas Cefeidas y RR Lyrae de la misión Gaia podremos caracterizar la estructura y cinemática del alabeo del disco con dos trazadores robustos de edades diferentes.

- La existencia de estrellas RR Lyrae de edad intermedia

Para evaluar de forma directa la existencia de estrellas RR Lyrae asociadas a poblaciones de edad intermedia haremos un modelo probabilístico para estudiar la asociación de estrellas RR Lyrae a cúmulos de edad intermedia en las Nubes Grande y Pequeña de Magallanes. En base a la distancia a lo largo de línea de visión, distancia angular y movimientos propios modelamos la probabilidad de membresía de estrellas RR Lyrae a un listado de 44 cúmulos estelares con edades, masas, distancias y movimientos propios bien conocidos. De esta forma se puede obtener un listado de estrellas RR Lyrae con alta probabilidad de estar asociadas a estos cúmulos y, además, cuantificar la "delay time distribution", i.e. la tasa de formación de RR Lyrae por unidad de masa solar inicial de la población, una cantidad que cuantifica qué tan eficientemente se formarán estas estrellas un cierto tiempo después de ocurrido un brote de formación estelar de una masa dada.

Resultados, análisis y discusión

A continuación se detallan los resultados obtenidos en el proyecto, subdivididos de acuerdo a cada uno de los objetivos específicos planteados.

- La calibración de luminosidad de estrellas RR Lyrae en el óptico

Se desarrolló un método novedoso para obtener distancias a estrellas RR Lyrae en el óptico, no sólo corrigiendo efectos evolutivos, como planteamos originalmente, sino además prescindiendo del uso de metalicidades fotométricas y derivando extinciones individuales. En una exploración inicial evaluamos calibrar la luminosidad de estrellas RR Lyrae en función del corrimiento en período ($\Delta \log P$), siguiendo el trabajo de Kunder et al. 2010 y los trabajos de Sandage et al. 1981. Esta calibración se realizó con un modelo estadístico sencillo y con una muestra de >450 estrellas del trabajo de Muraveva et al. 2008, un conjunto de estrellas con medidas precisas de paralaje y de metalicidad espectroscópica. La validación de esta calibración inicial realizada con cúmulos globulares mostró que la técnica da resultados competitivos, ofreciendo una precisión similar a la obtenida con el mismo catálogo de estrellas por Muraveva et al. 2008 y más recientemente por Garofalo et al. 2022. Parte de este estudio se hizo en el marco de las Pasantías de Investigación de PEDECIBA y constituyó el trabajo de Iniciación a la Investigación de Jorge Ibáñez, estudiante de la Licenciatura en Astronomía, asociado al proyecto.

Habiendo sido exitosa esta exploración inicial, se plantearon dos mejoras sustanciales: i) realizar la calibración de la luminosidad como función del Período y la Amplitud, en lugar del corrimiento en Período y ii) utilizar un modelo probabilístico más sofisticado. El trabajo con el corrimiento en período nos llevó a darnos cuenta de que la calibración de la luminosidad en términos de esa cantidad es equivalente y se puede reducir a una relación Período-Amplitud-Luminosidad (PAL). Hacer la calibración en este espacio, en lugar de calibrar el locus de cálculo del corrimiento en período y luego calibrar la luminosidad en función de éste, es mucho más directo y por lo tanto propaga menos incertidumbres a la calibración. Además, mediante argumentos sencillos pudimos demostrar desde primeros principios que una relación PAL debe existir para este tipo de estrellas. La calibración en términos de amplitud y período tiene dos ventajas considerables: primero, depende únicamente de observables fotométricos directos, haciendo prescindible la metalicidad, una propiedad costosa de medir y, segundo, permite corregir efectos evolutivos que una relación tradicional Período-Luminosidad-Metalicidad no puede tomar en cuenta y que se traducen en errores sistemáticos en la inferencia de la distancia. En cuando al modelo probabilístico, desarrollamos un modelo jerárquico de inferencia que nos permite modelar los errores en paralaje y elimina la necesidad de limitar la muestra a las estrellas con errores menores al 10%, que constituyen sólo un 2% de la muestra total de más de 300 mil RR Lyrae. Adicionalmente incluimos un modelo de la extinción de manera que ésta se puede inferir individualmente para cada estrella. Esto también representa una ganancia sustancial pues los métodos tradicionales dependen del conocimiento de la extinción a través de mapas de polvo que tienen un alcance limitado. Poder obtener medidas individuales de distancia y extinción implica que estos resultados pueden ser usados para construir un mapa 3D de extinción, que gracias al alcance de las RR Lyrae, tiene una cobertura en volumen mucho mayor que la de los mapas disponibles actualmente y que puede ser usado para corregir los efectos del polvo en cualquier tipo de estrella, no sólo RR Lyrae.

Los resultados preliminares del proyecto fueron presentados como poster en el congreso internacional IAU 376 "At the cross-roads of astrophysics and cosmology: Period-Luminosity relations in the 2020s" en Budapest, 2023. Los últimos resultados de la calibración de la relación PAL están siendo resumidos en una publicación (Mateu & Price-Whelan, en preparación) y serán presentados como charla en el congreso internacional "RR Lyrae and Cepheids 2024" a realizarse en Marrakesh en noviembre 2024.

- La estructura y cinemática del alabeo del disco galáctico

En este proyecto estudiamos la estructura y cinemática del disco galáctico, en particular del alabeo, con dos trazadores estelares: Cefeidas Clásicas y RR Lyrae.

Primero desarrollamos un método de descomposición de Fourier que aplicamos a estrellas Cefeidas Clásicas para describir la estructura espacial y la cinemática del alabeo del disco joven. La aplicación del método de Fourier a Cefeidas nos permitió entender mejor la firma cinemática del alabeo del disco, ya que esta población es más simple que la de estrellas RR Lyrae, por no tener contaminación de otras componentes galácticas. Los resultados que obtuvimos en cuanto a la cinemática son novedosos: i) encontramos que el alabeo del disco, tanto espacial como cinemáticamente, requiere de ondas con dos frecuencias o modos azimutales (modos 1 y 2) para ser descrito correctamente ii) encontramos que la velocidad máxima del alabeo ocurre a lo largo de una línea que tiene igual forma que línea de los nodos (línea de altura nula sobre el disco) pero está atrasada con un desfase constante de 25° respecto de la rotación estelar, y ambas están curvadas a favor de la rotación estelar, y iii) la línea de nodos y de máxima velocidad curvadas, conocidas como twist, producen los llamados "arcos" de velocidad vertical como función del radio, que también han sido observados en otras poblaciones.

Además, desarrollamos un método de análisis conjunto de las series de Fourier espacial y cinemáticas para inferir, de forma general, los parámetros de la evolución temporal del alabeo. Obtuvimos que el cambio de amplitud del alabeo del disco joven es casi nulo hasta las partes más externas del disco donde comienza a crecer levemente. Obtuvimos también la velocidad de precesión del modo dominante del alabeo y demostramos que éste precesa a favor de la rotación estelar.

Estudiando estrellas RR Lyrae en el anticentro galáctico y usando el conocimiento que adquirimos a través de las Cefeidas sobre la firma cinemática del alabeo, logramos obtener la primera detección del alabeo del disco con estrellas RR Lyrae. Esto constituye un aporte importante porque representa la primera detección del alabeo en una población estelar de mayor edad que las Cefeidas, con un trazador que cuenta con distancias precisas y una función de selección bien entendida. En este trabajo encontramos que las RR Lyrae siguen un alabeo ligeramente más pronunciado que el de las Cefeidas y su firma cinemática, observada en los arcos de velocidad vertical, comienza a radios más internos que el alabeo de las Cefeidas. Obtuvimos también un primer estimado de la velocidad de precesión del alabeo de RR Lyrae, cuyo sentido y magnitud coincide dentro de las incertidumbres con los obtenidos para las Cefeidas. Finalmente, la cinemática observada para estas estrellas es mucho más fría que la observada para poblaciones viejas del disco y coincide con la de poblaciones de edad intermedia, dando una nueva evidencia que apoya la posible juventud de las RR Lyrae de disco.

Estos resultados fueron publicados en un artículo arbitrado aceptado (Cabrera-Gadea, Mateu et al. 2024, MNRAS, 528, 4409) y otro que se encuentra en proceso de arbitraje (Cabrera-Gadea, Mateu & Ramos 2024, en arbitraje en Astronomy & Astrophysics). Todos estos resultados fueron obtenidos como parte del proyecto de tesis de maestría de Mauro Cabrera, estudiante becario del proyecto quien lideró el desarrollo de las estrategias para inferir la evolución temporal del alabeo y para su detección con estrellas RR Lyrae. Como parte de este proyecto se publicó también una versión actualizada de la función de selección de las RR Lyrae del catálogo Gaia DR3 (Mateu 2024).

- La existencia de estrellas RR Lyrae de edad intermedia

Con el fin de obtener la primera evidencia directa de la existencia de estrellas RR Lyrae de edad intermedia (<8 Gaños), estudiamos la asociación de estas estrellas a cúmulos en ese rango de edad en las Nubes de Magallanes. Mediante un modelo probabilístico de membresía en base a la distancia (angular y radial) al cúmulo y sus movimientos propios, obtuvimos un listado de 23 estrellas RR Lyrae con alta probabilidad de asociación a 10 cúmulos de edad intermedia, que apoyan la posible existencia de RR Lyrae relativamente jóvenes propuesta por Sarbadhicary et al. 2021 e Iorio & Belokurov 2021. Además, a partir del conocimiento de las edades y masas de los cúmulos pudimos inferir la “delay time distribution”, i.e. la tasa de producción de estrellas RR Lyrae por unidad de masa estelar inicial, en tres rangos de edad 1-2 Gaños, 2-8 Gaños y >8 Gaños. Esta medida es de gran importancia para poder predecir en qué cantidades se esperaría encontrar este tipo de estrellas en otros sistemas estelares, como galaxias enanas con historias de formación estelar extendida o el propio disco de la Vía Láctea. Asimismo, modelos de evolución estelar que pretendan encontrar canales evolutivos que expliquen la existencia de estos objetos deberán ser capaces de reproducir este observable. Una futura confirmación de la membresía de estas estrellas a los cúmulos de edad intermedia proveerá la primera evidencia directa de la existencia de estrellas RR Lyrae de edad intermedia.

Los resultados de este trabajo fueron remitidos para su publicación y se encuentran en proceso de arbitraje (Cuevas-Otahola, Mateu, et al. 2024, en arbitraje en *Astronomy & Astrophysics*)

Conclusiones y recomendaciones

En este proyecto nos propusimos estudiar la estructura de la Vía Láctea mediante el uso de estrellas variables RR Lyrae. Las investigaciones realizadas en el marco del proyecto nos han permitido potenciar el desempeño de las estrellas RR Lyrae como marcadores de distancia; usarlas por primera vez como trazadoras del alabeo del disco de la Vía Láctea y asociarlas a una población de edad intermedia, tanto en nuestra Galaxia como en las Nubes de Magallanes. Como parte del proyecto se desarrolló un nuevo método para la calibración de luminosidad de estrellas RR Lyrae en base a observaciones ópticas, que nos permitirá calcular distancias para todas las RR Lyrae conocidas de manera homogénea, tomando en cuenta efectos de extinción y, por primera vez, corrigiendo efectos evolutivos, ofreciendo exactitud y una excelente precisión ($<5\%$). Esto sumado al mapa actualizado de completitud de los catálogos disponibles de estrellas RR Lyrae son herramientas clave para futuros estudios de la Galaxia, particularmente del disco, hechos con este trazador. Hemos logrado una caracterización del alabeo del disco y su cinemática con estrellas pulsantes jóvenes (Cefeidas) y de edades más avanzadas (RR Lyrae) y desarrollado un método para inferir su evolución temporal. La detección del alabeo con estrellas RR Lyrae es la primera en su tipo y nos ha permitido observar con trazadores confiables que el alabeo de las poblaciones jóvenes difiere del trazado por las poblaciones de edad más avanzada, un resultado que contribuirá en estudios futuros a dilucidar el origen del alabeo. Finalmente, hemos obtenido una lista de RR Lyrae candidatas a ser miembros de cúmulos de edades intermedias en las Nubes de Magallanes y las hemos usado para predecir la tasa a la que poblaciones de edad intermedia producen estas estrellas por unidad de masa; acercándonos a contar con una evidencia directa de la existencia de estrellas en un rango de edades que no puede ser explicado por mecanismos normales de evolución estelar aislada.

Los resultados de este proyecto amplían el abanico de estudios realizables con este tipo de estrellas y abren nuevas perspectivas hacia la comprensión de su formación mediante nuevos caminos evolutivos.

Productos derivados del proyecto

Tipo de producto	Título	Autores	Identificadores	URI en repositorio de Silo	Estado
Artículo científico	Structure, kinematics, and time evolution of the Galactic warp from Classical Cepheids	Cabrera-Gadea, Mauro; Mateu, Cecilia; Ramos, Pau; Romero-Gómez, Mercé; Antoja, Teresa; Aguilar, Luis	10.1093/mnras/stae308	https://hdl.handle.net/20.500.12381/3665	Finalizado
Presentación en evento	Calibrating RR Lyrae absolute magnitudes as a function of period shift to correct post-ZAHB evolution systematics	Cecilia Mateu, Jorge Ibáñez		https://hdl.handle.net/20.500.12381/3664	Finalizado
Tesis de maestría	Estudio de ondulaciones en el disco galáctico con estrellas variables	Mauro Cabrera, Cecilia Mateu (tutor)			En proceso
Resumen de conferencia publicado	Structure, kinematics and time evolution of the Galactic Warp revealed by Classical	Mauro Cabrera, Cecilia Mateu y Pau Ramos		https://hdl.handle.net/20.500.12381/3665	Finalizado

Tipo de producto	Título	Autores	Identificadores	URI en repositorio de Silo	Estado
	Cepheids				
Artículo científico	The Selection Function of Gaia DR3 RR Lyrae	Cecilia Mateu	DOI 10.3847/2515-5172/ad3540	https://hdl.handle.net/20.500.12381/3666	Finalizado
Artículo científico	RR Lyrae Stars in Intermediate-age Magellanic Clusters: Membership Probabilities and Delay Time Distribution	Bolivia Cuevas-Otahola, Cecilia Mateu, Ivan Cabrera-Ziri, Gustavo Bruzual, Fabiola Hernández-Pérez, Gladis Magris, Holger Baumgardt			En proceso
Artículo científico	RR Lyrae stars trace the Milky Way warp	Mauro Cabrera-Gadea, Cecilia Mateu, Pau Ramos		https://hdl.handle.net/20.500.12381/3669	En proceso

Referencias bibliográficas

*Abedi, H., Mateu, C., Aguilar, L. A., Figueras, F., & Romero-Gomez, M. 2014, Characterizing the Galactic warp with Gaia - I. The tilted ring model with a twist, Monthly Notices RAS, 442, 3627

Bland-Hawthorn, J., & Gerhard, O. 2016, The Galaxy in Context: Structural, Kinematic, and Integrated Properties, Annual Review in Astronomy & Astrophysics, 54, 529

Braga, V. F. et al. 2015, On the Distance of the Globular Cluster M4 (NGC 6121) Using RR Lyrae Stars. I. Optical and Near-infrared Period-Luminosity and Period-Wesenheit Relations, The Astrophysical Journal, 799, 165

***Cabrera-Gadea, Mateu et al. 2024, MNRAS, 528, 4409

***Cabrera-Gadea, Mateu & Ramos 2024, A&A, en arbitraje

Casertano, S., Sackett, P. D., & Briggs, F. H., eds. 1991, *Warped Disks and Inclined Rings around Galaxies*

Catelan, M., & Smith, H. A. 2014, *Pulsating Stars* (John Wiley & Sons)

Clarke, A. J. et al. 2019, The imprint of clump formation at high redshift - I. A disc α -abundance dichotomy, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 484, 3476

Clementini, G. et al. 2019, Gaia Data Release 2. Specific characterisation and validation of all-sky Cepheids and RR Lyrae stars, *Astronomy and Astrophysics*, 622, A60

***Cuevas-Otahola, Mateu et al. 2024, *A&A*, en arbitraje

Dambis, A. K., Rastorguev, A. S., & Zabolotskikh, M. V. 2014, Mid-infrared period-luminosity relations for globular cluster RR Lyrae, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 439, 3765

Kawata, D., & Chiappini, C. 2016, Milky Way's thick and thin disk: Is there a distinct thick disk?, *Astro- nomische Nachrichten*, 337, 976

Kinemuchi, K., Smith, H. A., Woz η niak, P. R., & McKay, T. A. 2006, Analysis of RR Lyrae Stars in the Nort- hern Sky Variability Survey, *The Astronomical Journal*, 132, 1202, (c) 2006: The American Astronomical Society

Kunder, A., Chaboyer, B., & Layden, A. 2010, The Determination of Reddening from Intrinsic VR Colors of RR Lyrae Stars, *The Astronomical Journal*, 139, 4152

Layden, A. C. 1995, The Metallicities and Kinematics of RR Lyrae Variables.II. Galactic Structure and Formation from Local Stars, *Astronomical Journal* v.110, 110, 2288

López-Corredoira, M., Cabrera-Lavers, A., Garzo η n, F., & Hammersley, P. L. 2002, Old stellar Galactic disc in near-plane regions according to 2MASS: Scales, cut-off, flare and warp, *Astronomy and Astrophysics*, 394, 883

**Mateu, C., Bruzual, G., Aguilar, L., Brown, A. G. A., Valenzuela, O., Carigi, L., Vela η zquez, H., & Herna η ndez, F. 2011, Detection of satellite remnants in the Galactic Halo with Gaia - II. A modified great circle cell method, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 415, 214

**Mateu, C., & Vivas, A. K. 2018, The Galactic thick disc density profile traced with RR Lyrae stars, *Monthly Notices RAS*, 479, 211

**Mateu, C., Vivas, A. K., Downes, J. J., Briceño, C., Zinn, R., & Cruz-Díaz, G. 2012, The QUEST RR Lyrae Survey - III. The low Galactic latitude catalogue, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 427, 3374

**Mateu, C., Holl, B., de Ridder, J., Rimoldini, L., 2020, Empirical completeness assessment of the \Gaia~DR2, Pan-STARRS~1 and ASAS-SN-II RR Lyrae catalogues, *Monthly Notices Royal Astronomical Society*, in press

Muraveva, T., Delgado, H. E., Clementini, G., Sarro, L. M., & Garofalo, A. 2018, RR Lyrae stars as standard candles in the Gaia Data Release 2 Era, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 481, 1195

*Romero-Gomez, M., Mateu, C., Aguilar, L., Figueras, F., & Castro-Ginard, A. 2019, Gaia kinematics reveal a complex lopsided and twisted Galactic disc warp, *Astronomy and Astrophysics*, 627, A150

Iorio, G. & Belokurov, V. Chemo-kinematics of the Gaia RR Lyrae: the halo and the disc. 2021, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 502, 5686

Sarbadhicary, Sumit K.; Heiger, Mairead; Badenes, Carles; Mateu, Cecilia; Newman, Jeffrey A.; Ciardullo, Robin; Hallakoun, Na'ama; Maoz, Dan; Chomiuk, Laura, 2021, The RR Lyrae Delay-time Distribution: A Novel Perspective on Models of Old Stellar Populations, *The Astrophysical Journal*, 912, 140.

Sesar, B. et al. 2016, Machine-Learned Identification of RR Lyrae Stars from Sparse, Multi-band Data: the PS1 Sample, *arXiv*, arXiv:1611.08596

Sesar, B., Vivas, A. K., Duffau, S., & Ivezić η , Z η . 2010, Halo Velocity Groups in the Pisces Overdensity, *The Astrophysical Journal*, 717, 133

Licenciamiento

Reconocimiento-NoComercial-Compartir Igual 4.0 Internacional. (CC BY-NC-SA)

