

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICO-MATEMÁTICAS



DETECCIÓN DE SISTEMAS BINARIOS DE
ESTRELLAS TIPO YOUNG ALPHA RICH Y BLUE
STRAGGLERS USANDO INTERFEROMETRÍA
SPECKLE

POR

TANIA NOHELY BENADALID PACARI

COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRÍA EN ASTROFÍSICA PLANETARIA Y TECNOLOGÍAS
AFINES

ASESOR DE TESIS: DR. CARLOS ALBERTO GUERRERO PEÑA

FEBRERO 2026

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI), dependencia del Gobierno de México encargada de impulsar la política nacional en materia de ciencia, humanidades, tecnología e innovación, por el apoyo otorgado a través de su programa de becas, el cual permitió mi formación de posgrado y el desarrollo del presente trabajo de investigación.

Expreso mi más sincero agradecimiento a mi asesor, el Dr. Carlos Alberto Guerrero Peña, por su guía, acompañamiento y valiosas observaciones a lo largo de la realización de este trabajo.

Agradezco también a mis maestras y maestros de la maestría, quienes contribuyeron de manera fundamental a mi formación académica y científica.

De igual forma, agradezco a la coordinación del programa por todo el apoyo brindado durante mis estudios, así como a mis compañeras y compañeros de maestría por el compañerismo, el apoyo mutuo y la experiencia compartida durante mi estancia en un país extranjero.

DEDICATORIA

A mis padres, que han estado pendientes de mí, aún a la distancia, gracias por todo el apoyo que me han dado.

A mi hijo, que con las llamadas, ha sido mi fortaleza en mis momentos más débiles. Te quiero y te extraño mucho.

A mis mejores amigos, Leo y José, siempre me han sacado una sonrisa e intentaban alegrarme en mis días más estresantes.

RESUMEN

En este trabajo se investigó la presencia de binariedad en estrellas young alpha-rich y blue stragglers mediante interferometría speckle, técnica desarrollada por Labeyrie en 1970 para conseguir alta resolución angular superando las distorsiones atmosféricas mediante el análisis de patrones de “speckle” en imágenes cortas.

Las observaciones se realizaron en dos instalaciones mexicanas: el Observatorio Astrofísico Guillermo Haro, en Cananea, Sonora, con el telescopio principal de 2.12 m de diámetro, y el Observatorio Astronómico Nacional San Pedro Mártir, donde se empleó el telescopio 2.1 m para obtener datos de alta resolución.

Se procesaron y analizaron los datos interferométricos para obtener magnitudes y parámetros astrométricos de los posibles sistemas binarios dentro de la muestra. A partir de diagramas color–magnitud se evaluó la posición de las componentes una vez resueltas, comparándolas con las posiciones fotométricas integradas.

De los candidatos observados, 21 sistemas mostraron indicios de binariedad y fue posible resolver sus componentes de manera individual. Sin embargo, en 20 de ellos la componente secundaria se detectó de forma tenue, situándose cerca del límite de detección de los telescopios utilizados, por lo que se presentan en este trabajo como candidatos a sistemas binarios. En contraste, uno de los sistemas se detectó de forma clara en las imágenes, correspondiente a Gaia DR3 1648467826128759424, cuyas dos componentes fueron identificadas y separadas mediante el método de interferometría speckle empleado.

El resto de las estrellas analizadas no mostró evidencia observable de binariedad con el método utilizado. Esto puede deberse a que no presentan naturaleza binaria o bien a limitaciones instrumentales y a la calidad variable de las noches de observación.

Palabras clave: Speckle, Young Alpha Rich, Blue Stragglers.

ABSTRACT

This study investigated the presence of binary systems in young alpha-rich stars and blue stragglers using speckle interferometry, a technique developed by Labeyrie in 1970 to achieve high angular resolution by overcoming atmospheric distortions through the analysis of speckle patterns in short-exposure images.

Observations were conducted at two Mexican facilities: the Guillermo Haro Astrophysical Observatory in Cananea, Sonora, using its main 2.12 m diameter telescope, and the San Pedro Mártir National Astronomical Observatory, where the 2.1 m telescope was used to obtain high-resolution data.

The interferometric data were processed and analyzed to derive photometric magnitudes and astrometric parameters for the possible binary systems in the sample. The positions of the resolved components were evaluated using color–magnitude diagrams and compared with the integrated photometric positions.

Of the observed candidates, 21 systems showed indications of binarity, and their individual components could be resolved. However, in 20 of these systems, the secondary component was detected only faintly, lying close to the detection limit of the telescopes used; therefore, they are presented in this work as binary candidates. In contrast, one system was clearly detected in the images, corresponding to Gaia DR3 1648467826128759424, whose two components were identified and separated using the speckle interferometry method employed.

The remaining stars analyzed showed no observable evidence of binarity with

the method used. This may be due either to the absence of binarity or to instrumental limitations and the variable quality of the observing nights.

Keywords: speckle interferometry, young alpha-rich stars, blue stragglers.

ÍNDICE GENERAL

| | |
|---|----------|
| Agradecimientos | I |
| Dedicatoria | II |
| Resumen | III |
| Abstract | V |
| Lista de Figuras | XI |
| Lista de Tablas | XIV |
| 1. Introducción | 1 |
| 1.1. Planteamiento del problema | 3 |
| 1.2. Hipótesis | 3 |
| 1.3. Motivación del trabajo | 4 |
| 1.4. Objetivo General | 5 |
| 1.4.1. Objetivos específicos | 5 |

| | |
|--|-----------|
| 2. Diagramas Color–Magnitud y Poblaciones Estelares | 6 |
| 2.1. Evolución Estelar | 6 |
| 2.1.1. Fases principales de evolución | 8 |
| 2.1.2. Colapso y explosiones estelares | 11 |
| 2.2. Diagrama Color-Magnitud | 12 |
| 2.3. Poblaciones estelares en la Vía Láctea | 14 |
| 2.3.1. Bulbo | 14 |
| 2.3.2. Disco delgado | 15 |
| 2.3.3. Disco Grueso | 15 |
| 2.3.4. Halo | 16 |
| 2.4. Estrellas binarias | 16 |
| 2.4.1. Tipos de estrellas binarias | 16 |
| 3. Evolución química estelar y determinación de edades | 18 |
| 3.1. Evolución química del disco galáctico | 18 |
| 3.1.1. Evolución de $[Fe/H]$ | 19 |
| 3.1.2. Evolución de $[\alpha/Fe]$ | 19 |
| 3.1.3. Secuencia química del disco delgado y grueso | 20 |
| 3.2. Espectroscopía para detección de abundancia de elementos α | 21 |
| 3.2.1. Edades típicas según abundancias alfa | 21 |
| 3.3. Astrosismología para determinar edades estelares | 22 |

| | |
|--|-----------|
| <i>ÍNDICE GENERAL</i> | IX |
| 3.3.1. Relación $[\alpha/\text{Fe}]$ -Edad | 22 |
| 4. Estrellas Blue Stragglers y Young Alpha Rich | 24 |
| 4.1. Blue Stragglers | 24 |
| 4.2. Descubrimiento: anomalías en las CMD | 25 |
| 4.2.1. Propiedades Físicas | 26 |
| 4.2.2. Hipótesis de formación | 26 |
| 4.3. Estrellas Young Alpha Rich | 28 |
| 4.3.1. Descubrimiento | 28 |
| 4.3.2. Propiedades químicas y físicas | 29 |
| 4.3.3. Hipótesis de formación | 29 |
| 5. Interferometría Speckle | 32 |
| 5.1. Fundamentos | 32 |
| 5.2. Espectro de potencias | 33 |
| 5.3. Función de autocorrelación | 34 |
| 5.4. Magnitud diferencial | 34 |
| 5.5. Límites y sensibilidad del método | 34 |
| 6. Datos Observacionales | 36 |
| 6.1. Selección de las muestras YAR y BS | 36 |
| 6.2. Observatorio Astronómico Guillermo Haro - INAOE | 37 |

| | |
|--|-----------|
| <i>ÍNDICE GENERAL</i> | x |
| 6.3. Observatorio Astronómico Nacional de San Pedro Mártir | 37 |
| 6.4. Observaciones | 38 |
| 6.5. Reducción de datos | 39 |
| 6.6. Obtención de Magnitud Diferencial | 42 |
| 6.7. Datos complementarios | 43 |
| 6.7.1. GAIA: Astrometría | 43 |
| 7. Resultados y Discusión | 45 |
| 7.1. Astrometría de nuevos pares | 45 |
| 7.2. Pares interesantes | 47 |
| 8. Conclusiones | 52 |
| 8.1. Síntesis | 52 |
| 8.2. Limitaciones | 53 |
| 8.3. Trabajo a futuro | 53 |
| Referencias | 54 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| 2.1. Diagrama Hertzsprung-Russell [Althaus et al., 2010] | 7 |
| 2.2. Diagrama Color-Magnitud del cúmulo NGC 2682. El MSTO (que está relacionado con el turn-off) es la letra A indicado en el diagrama [Jadhav and Subramaniam, 2021]. | 9 |
| 2.3. Diagrama color-magnitud del cúmulo estelar LMC NGC 2173. Las estrellas que pertenecen a RGB están marcados como cuadrados naranjas [Grijs et al., 2018]. | 10 |
| 2.4. Diagrama color-magnitud del cúmulo globular M5. Se puede ver la región de la fase de AGB que está casi separada de la RGB [Davis et al., 2022] | 11 |
| 2.5. Fases de una supernova tipo II | 12 |
| 2.6. (Izquierda) Diagrama HR y (derecha) CMD del modelo P300, generado a partir del código PETAR (véase Figura 2 del trabajo de Wang et al. [2023]) | 13 |
| 2.7. Impresión artística de la Vía Láctea. Créditos: ESA, NASA/JPL-Caltech | 14 |

| | |
|--|----|
| 3.1. Comportamiento de $[O/Fe]$ versus $[Fe/H]$ para el 3IM (Modelo de tres entradas)(línea continua roja, línea discontinua negra y línea discontinua azul) y el 2IM (Modelo de dos entradas) (línea continua verde). Figura extraída de Micali et al. [2013]. | 20 |
| 4.1. Diagrama color-magnitud de M3. Se Puede observar la región donde aparecen las BSS, por encima del TO (Figura estraída de Sandage [1953]). | 25 |
| 4.2. Izquierda: Diagrama HR del Cúmulo M3. Los círculos azules indican la posición de las BSS. Derecha: Imagen ilustrativa de dos tipos de la formación de BSS: arriba, por colisiones, abajo, por transferencia de masa. Figura extraída del trabajo de Ferraro et al. [2020]. | 27 |
| 5.1. Ejemplo ilustrativo del método de interferometría speckle. (<i>Izquierda</i>) Imagen speckle obtenida mediante exposiciones cortas, donde la turbulencia atmosférica se encuentra congelada. (<i>Centro arriba</i>) Espectro de potencias promedio, que muestra el patrón de franjas característico de un sistema binario. (<i>Abajo centro</i>) Función de autocorrelación resultante, en la que los picos laterales simétricos respecto al centro corresponden a la separación angular de las componentes. (<i>Abajo izquierda</i>) Imagen de alta resolución generada con el método shift-and-add. | 33 |
| 6.1. Escala de placa (arcsec/píxel) para el filtro V de SPM-2025. La gráfica muestra la conversión de píxeles a segundos de arco obtenida a partir de las soluciones astrométricas. | 40 |
| 6.2. Escala de placa (arcsec/píxel) para el filtro R de SPM-2025. La gráfica muestra la conversión de píxeles a segundos de arco obtenida a partir de las soluciones astrométricas. | 40 |

| | |
|---|----|
| 6.3. Escala de placa (arcsec/píxel) para el filtro I de SPM-2025. La gráfica muestra la conversión de píxeles a segundos de arco obtenida a partir de las soluciones astrométricas. | 41 |
| 7.1. CMD de las poblaciones de YAR y Blue Stragglers observadas. Las isócronas se muestran de distintos colores, que corresponden a edades diferentes | 46 |
| 7.2. CMD de 5 objetos más prometedores ya resueltos por binariedad. Los puntos indican del sistema binario sin resolver, las cruces son de la estrella primaria resuelta y los diamantes de la estrella secundaria resuelta. Los colores indican la correspondencia de su resolución. Se muestran las isócronas de color gris, solo para visualización de la dispersión de las estrellas. | 48 |
| 7.3. Gaia DR3 1648467826128759424. Imagen izquierda es el ACF, mientras que la imagen derecha es el HIGH. Se puede notar la componente binaria. | 49 |
| 7.4. CMD del sistema binario resuelto Gaia DR3 1648467826128759424 con escalado de error para mejor visualización. | 50 |
| 7.5. Curva de luz del objeto Gaia DR3 1648467826128759424 obtenida por TESS. | 51 |

LISTA DE TABLAS

- 7.1. Astrometría en la banda V de las estrellas con indicios de binariedad 47
- 7.2. Metalicidades reportadas de la estrella Gaia DR3 1648467826128759424 49

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

Las estrellas con abundancias elevadas en elementos α suelen asociarse a poblaciones estelares antiguas, tanto en galaxias masivas de formación temprana como en el disco grueso de la Vía Láctea. Su composición química indica que se formaron en épocas dominadas por supernovas tipo II, cuando la tasa de formación estelar era alta y el enriquecimiento químico estaba apenas comenzando (Walcher et al. [2015]; Chiappini et al. [2015]). Sin embargo, en la última década se ha identificado un conjunto de gigantes rojas con abundancias α elevadas, pero con edades sísmicas bajas, denominándolas Young α -Rich stars ($Y\alpha R$). Este comportamiento contradice los modelos de evolución química galáctica.

En el estudio de Martig et al. [2015], basado en la muestra APOKASC, se detectaron catorce estrellas con enriquecimiento en α cuyos valores de masa implican edades menores a 6 Gyr, e incluso menores a 3 Gyr en los casos más extremos. Como su composición química sugiere que deberían ser estrellas antiguas, este hallazgo representa una discrepancia entre la edad química y la edad sísmica. Trabajos posteriores, como el de Jofré et al. [2023], encontraron que muchas de estas estrellas muestran indicios indirectos de haber ganado masa, pero sin evidencia clara de binariedad en velocidades radiales. Por su parte, Grisoni et al. [2024] propuso que estas estrellas no son realmente jóvenes, sino productos de evolución binaria (transferencia de masa o fusión) que han alterado su masa aparente.

Estos objetos hacen recuerdo a otro tipo de estrellas particulares, llamadas Blue Straggler Stars (BSS). Descubiertas en diagramas color-magnitud de cúmulos globulares y abiertos, las BSS aparecen más azules y luminosas que el turno de la secuencia principal, como si hubieran rejuvenecido dentro de una población vieja. En

décadas recientes se ha demostrado que muchas BSS obtienen su masa adicional a través de mecanismos binarios: transferencia de masa, acreción por desbordamiento de lóbulo de Roche, fusiones inducidas por colisiones bajas en densidad; escenarios que les permiten volver a la secuencia principal con masas significativamente mayores. Estudios recientes, como por ejemplo de Carrasco-Varela, Francisco F. et al. [2025], analizaron 41 cúmulos globulares y 42 cúmulos abiertos con datos de Gaia DR3, identificando 4399 BSS y mostrando que, en promedio, estas estrellas son más masivas que el MSTO (del inglés Main Sequence Turn Off) de sus cúmulos progenitores, lo que respalda su origen a través de procesos binarios o de fusión.

La similitud entre las BSS y las $Y\alpha R$ es notoria. Ambas poblaciones presentan masas bastante altas comparadas con la población circundante. Ambas parecen “más jóvenes” de lo que permiten sus entornos o composiciones químicas. Y, en ambos casos, los estudios recientes sugieren que la evolución binaria podría ser la clave para explicar su rejuvenecimiento aparente. Por este motivo, las BSS representan un marco conceptual ya establecido para interpretar fenómenos similares en estrellas de campo, como las $Y\alpha R$. Sin embargo, mientras que la duplicidad en BSS ha sido detectada y caracterizada en numerosos contextos, para las $Y\alpha R$ la evidencia es aún incompleta.

Dado que los métodos tradicionales de detección de binariedad (como velocidades radiales o astrometría) pueden pasar por alto sistemas con separaciones pequeñas o razones de masa elevadas, es necesario recurrir a técnicas con alta resolución espacial. La interferometría speckle ofrece justamente esa capacidad: resolver sistemas binarios muy cerrados, difíciles para métodos más convencionales. Si una fracción significativa de las $Y\alpha R$ muestra duplicidad mediante speckle, ello proporcionaría una evidencia directa para vincular su origen con los mecanismos de rejuvenecimiento binario que explican las BSS.

Por tanto, este trabajo busca encontrar la binariedad en las $Y\alpha R$ desde un análisis observacional de alta resolución, con el objetivo de determinar si los procesos de transferencia de masa o fusión que producen a las BSS también pueden explicar la naturaleza de las $Y\alpha R$. Este estudio busca afianzar la hipótesis evolutiva de estas estrellas y, a la vez, mejorar nuestra comprensión de la evolución química y dinámica de la galaxia.

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Como mencionó [Martig et al. \[2015\]](#), la abundancia de elementos α , se utiliza como un indicador de edad en este tipo de estrellas, encontrando estrellas que aparentan ser jóvenes según su estudio. Sin embargo, en su trabajo no se toma en cuenta que muchas de estas estrellas podrían formar parte de sistemas binarios, lo cual afectaría las estimaciones de edad basadas en las masas detectadas.

Por otro lado, [Jofré et al. \[2023\]](#) destaca que no es del todo seguro relacionar la masa estelar de estos objetos con su edad. Según la teoría, las estrellas con abundancia en elementos α deberían ser más antiguas, pero esto no sucede con las estrellas jóvenes ricas en α ($Y\alpha R$), lo que complica aún más la interpretación.

Además, [Grisoni et al. \[2024\]](#) argumenta que estas $Y\alpha R$ no deberían considerarse estrellas jóvenes, sino que son el resultado de procesos de evolución binaria, ya que no encajan en los modelos clásicos de evolución química. En su trabajo, utilizando datos de su base de datos [2023](#), concluyó que estas estrellas no son realmente jóvenes. Esto refuerza la necesidad de llevar a cabo estudios más detallados para determinar con precisión las edades de estos objetos.

1.2 HIPÓTESIS

Según [Chiappini et al. \[2015\]](#), una posible explicación es que estas estrellas sean azules rezagadas que han evolucionado posteriormente. Otra hipótesis plantea que podrían haberse formado a partir de una acumulación reciente de gas. Una propuesta adicional sugiere que la región cercana a la corrotación de la barra galáctica sería un entorno propicio para la formación de este tipo de estrellas. No obstante, existen casos que no se ajustan a estas ideas: a) [Davies et al. \[2009\]](#) identificó supergigantes con baja metalicidad en el extremo de la barra galáctica, b) [Cunha et al. \[2007\]](#) observó estas estrellas en las proximidades del centro galáctico, y c) [Luck and Lambert \[2011\]](#) señaló que la estrella joven Cepheid BC Aql muestra un enriquecimiento en $[\alpha/Fe]$.

Por ello, es fundamental resolver los sistemas binarios que influyen en las curvas isócronas, ya que éstas son clave para determinar las edades de ese grupo específico de estrellas.

1.3 MOTIVACIÓN DEL TRABAJO

A pesar de los avances realizados en estudios recientes, como los de [Cerqui et al. \[2023\]](#) y [Jofré et al. \[2023\]](#), aún no se ha logrado identificar la binariedad en las estrellas jóvenes ricas en α ($Y\alpha R$). Ambos trabajos destacan que, si bien estas estrellas presentan características químicas particulares, como altos valores de $[\alpha/Fe]$, no se han detectado evidencias claras de que pertenezcan a sistemas binarios, lo que complica las explicaciones sobre su origen y evolución. Además, las discrepancias en las masas y edades estimadas para estas estrellas, comparadas con los modelos clásicos de evolución estelar, han generado interrogantes significativas sobre la validez de los métodos actuales de análisis.

A partir de esto, [Martig et al. \[2015\]](#) y [Grisoni et al. \[2024\]](#) subrayan que las $Y\alpha R$ podrían no ser intrínsecamente jóvenes, sino más bien el resultado de interacciones en sistemas binarios. En sí, [Grisoni et al. \[2024\]](#) propone que estas estrellas podrían haber evolucionado a través de transferencia de masa o procesos de fusión estelar, hipótesis que se refuerzan por las grandes masas observadas en este tipo de objetos. Sin embargo, hasta ahora, no se han realizado estudios específicos que combinen técnicas de alta resolución espacial, como la interferometría speckle, con análisis espectroscópicos detallados para confirmar o descartar la binariedad en estas estrellas.

Por ende, el presente trabajo busca abordar estos problemas empleando interferometría speckle. Este método me permitirá obtener observaciones precisas y detalladas de las estrellas $Y\alpha R$ y BS, con el objetivo de buscar sistemas binarios que no se han detectado en los estudios pasados.

De este modo, este trabajo pretende aclarar en parte que algunas (si no la gran mayoría) de las $Y\alpha R$ y BS son el producto de sistemas binarios, además de contribuir a una comprensión más precisa de dichos sistemas dentro de la evolución química y dinámica de la galaxia. Esto permitirá redefinir los modelos de evolución estelar, aportando nueva información al campo de la evolución estelar y a los modelos de evolución química de la galaxia.

1.4 OBJETIVO GENERAL

Determinar binariedad en muestras de objetos catalogados como Young Alpha Rich y Blue Stragglers, con el método de interferometría speckle.

1.4.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Hallar las componentes individuales de estrellas sospechosas de binariedad.
- Determinar sus magnitudes absolutas en el sistema fotométrico Johnson-Cousins: RVI.
- Analizar los desplazamientos de las estrellas resueltas por binariedad, que afecten en la edad reportada en la bibliografía.

CAPÍTULO 2

DIAGRAMAS COLOR–MAGNITUD Y POBLACIONES ESTELARES

2.1 EVOLUCIÓN ESTELAR

La evolución estelar describe el conjunto de transformaciones físicas que experimenta una estrella desde su formación en una nube molecular hasta su estado final como enana blanca, estrella de neutrones o agujero negro. Estos cambios siguen secuencias bien definidas, determinadas principalmente por la masa inicial, la composición química, y los mecanismos de transporte de energía en su interior. Como se describe en [Karttunen et al. \[2017\]](#), la masa controla la temperatura y presión del núcleo, y con ello el tipo y la eficiencia de las reacciones de fusión nuclear que pueden sostenerse.

El diagrama de Hertzsprung–Russell (HR) es una herramienta básica para visualizar esta evolución. Relaciona la luminosidad con la temperatura efectiva de una estrella, lo cual permite representar en una sola figura tanto su estado actual como la trayectoria evolutiva que seguirá. Esta relación se apoya de manera directa en la ley de Stefan–Boltzmann,

$$L = 4\pi R^2 \sigma T_{eff}^4 \tag{2.1}$$

que conecta el radio estelar con su luminosidad y temperatura. Una representación típica del diagrama HR, como se muestra en la [Figura 2.1](#), permite visualizar

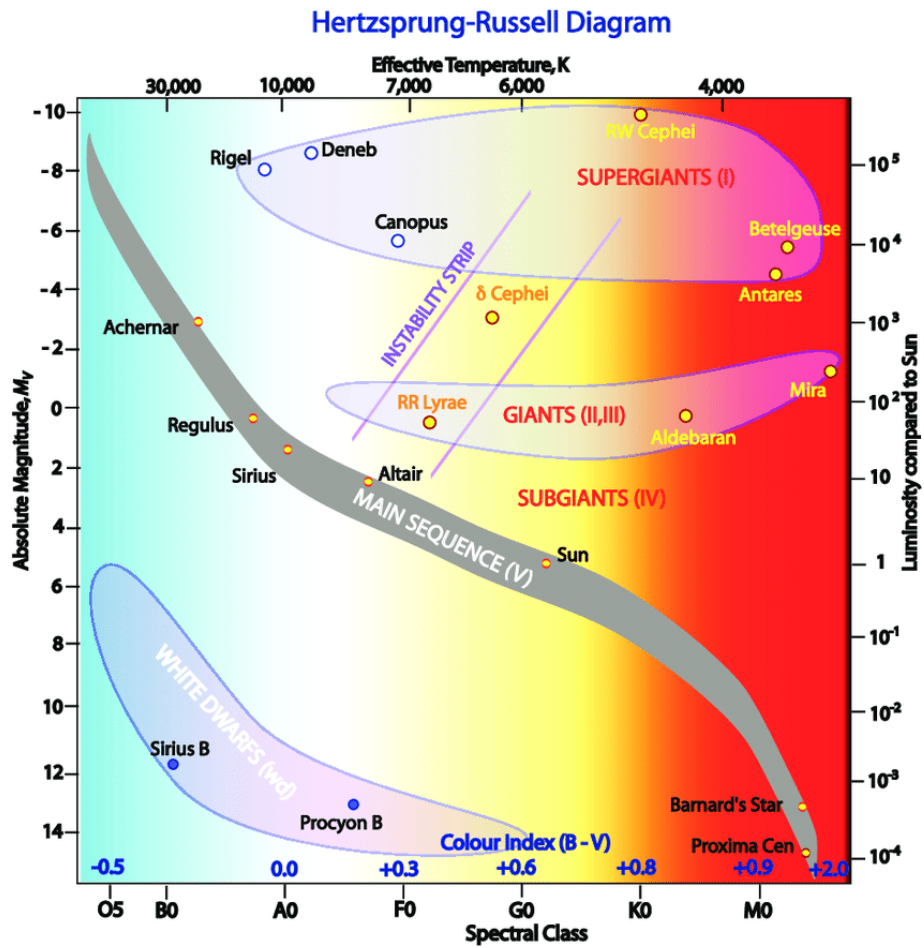


FIGURA 2.1: Diagrama Hertzsprung-Russell [Althaus et al., 2010]

dónde se ubican las diferentes fases evolutivas y cómo una estrella se desplaza a lo largo del diagrama conforme cambia su estructura interna.

Comprender las fases estándar es especialmente importante al estudiar poblaciones estelares en cúmulos abiertos y globulares, donde suelen encontrarse objetos que se desvían del patrón evolutivo esperado.

2.1.1 FASES PRINCIPALES DE EVOLUCIÓN

2.1.1.1 LA SECUENCIA PRINCIPAL

La Secuencia Principal (SP) es la fase en la que la estrella fusiona hidrógeno en helio en su núcleo y mantiene equilibrio hidrostático. La duración en la SP es una función decreciente de la masa: estrellas de mayor masa consumen su combustible más rápido y abandonan la SP antes que las de menor masa [Karttunen et al., 2017]. En el diagrama HR, la SP aparece como la banda diagonal desde las estrellas calientes y luminosas hacia las estrellas frías y poco luminosas (Figura 2.1). La masa determina también la luminosidad aproximada por la relación de masa-luminosidad $L \propto M^\alpha$ en la SP (con $\alpha \sim 3-4$ para secuencias principales intermedias), relación que explica la dependencia temporal de la fase.

2.1.1.2 TURN OFF POINT

El turn-off point corresponde al punto del diagrama HR donde una estrella deja la secuencia principal tras agotar el hidrógeno en el núcleo. Observacionalmente, en un diagrama color–magnitud (CMD) este punto se denomina Main Sequence Turn-Off (MSTO). En la práctica ambos términos describen el mismo fenómeno físico: la transición fuera de la secuencia principal; pero “MSTO” se usa cuando se trabaja con datos fotométricos y “turn-off point” cuando se discute el diagrama HR teórico. Para evitar confusiones, en este texto se usarán como equivalentes, especificando MSTO al referirnos al CMD.

El MSTO permite determinar la edad de un cúmulo: a mayor edad, el punto aparece desplazado hacia temperaturas efectivas más bajas y luminosidades menores, pues solo sobreviven en la secuencia principal estrellas de menor masa. Este cambio de dirección de la secuencia se aprecia claramente en la Figura 2.2, donde el MSTO marca el inicio de la evolución hacia la fase de gigantes rojas.

Desde el punto de vista evolutivo, una vez agotado el hidrógeno central, el núcleo se contrae y las capas externas se expanden, desplazando a la estrella hacia regiones más frías y luminosas del diagrama HR. Esta transición será esencial en capítulos posteriores para discutir la naturaleza anómala de las Blue Stragglers, que

se encuentran por encima del MSTO y aparentan ser más jóvenes que el resto de la población del cúmulo.

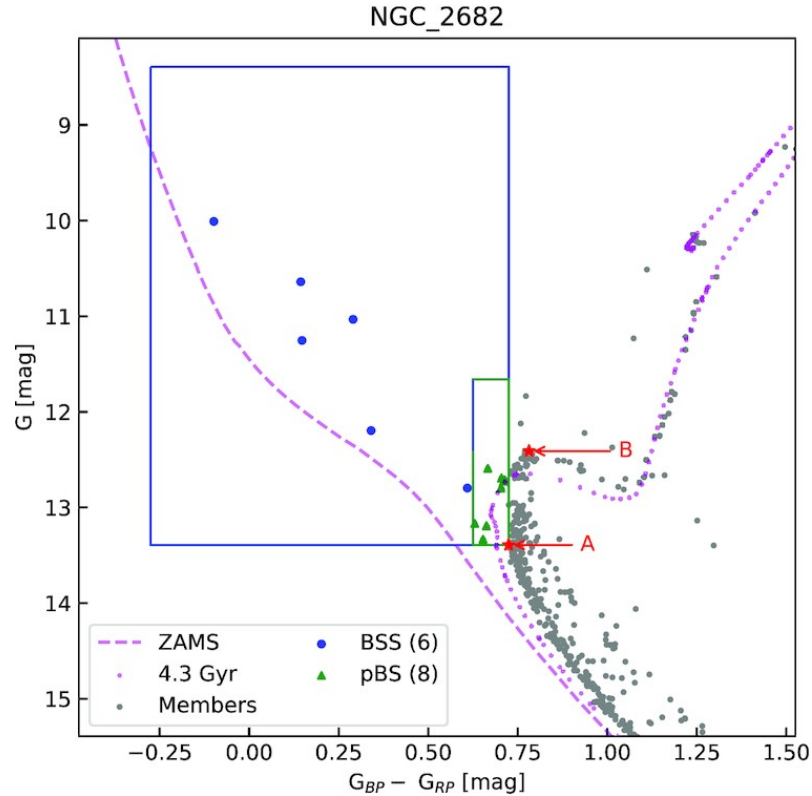


FIGURA 2.2: Diagrama Color-Magnitud del cúmulo NGC 2682. El MSTO (que está relacionado con el turn-off) es la letra A indicado en el diagrama [Jadhav and Subramaniam, 2021].

2.1.1.3 GIGANTES ROJAS (RGB)

Una vez que el hidrógeno central se agota, la fuente principal de energía desaparece y el núcleo comienza a contraerse. Este incremento de temperatura activa la fusión en una capa delgada que rodea al núcleo inerte de helio, lo que provoca una expansión de las capas externas. Como consecuencia, la estrella aumenta su radio y su luminosidad, desplazándose en el diagrama HR hacia regiones de menor temperatura efectiva y mayor brillo. Este recorrido hacia la rama de gigantes rojas puede verse en la Figura 2.3, donde se observa el cambio de dirección respecto al MSTO.

En estrellas de baja masa, el núcleo que se forma durante esta fase es mayormente degenerado, lo que influye en la manera en la que continúa su evolución

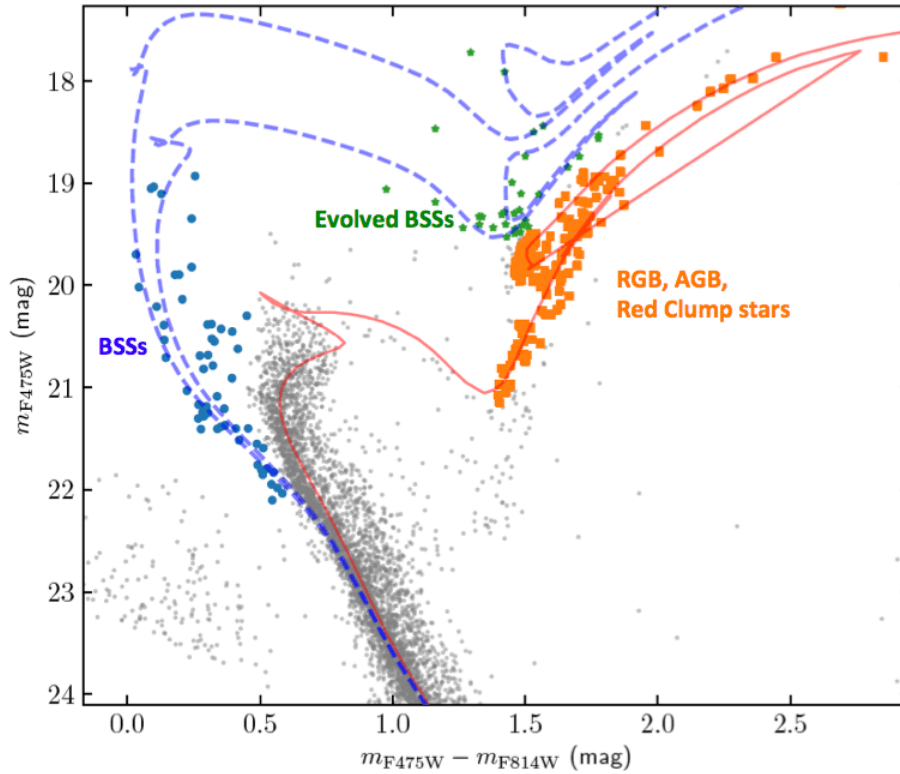


FIGURA 2.3: Diagrama color-magnitud del cúmulo estelar LMC NGC 2173. Las estrellas que pertenecen a RGB están marcados como cuadrados naranjas [Grijs et al., 2018].

posterior. Entonces, la fase de gigantes rojas puede describirse de manera general como el resultado del desequilibrio entre la contracción del núcleo y la expansión de la envoltura. Su presencia en el diagrama HR es uno de los rasgos más visibles de una población estelar envejecida.

2.1.1.4 FASE AGB

Tras la combustión central de helio, muchas estrellas de baja y media masa evolucionan hacia la fase asintótica de gigantes (AGB). En esta etapa la estructura interna está compuesta por un núcleo degenerado de carbono-oxígeno y dos zonas de combustión en cáscara: una de helio y otra de hidrógeno. Estas capas alternan momentos de inestabilidad nuclear, produciendo pulsaciones térmicas que modifican la luminosidad y la estructura de la envoltura. Al mismo tiempo, la fusión en cáscara aporta energía suficiente para que el radio de la estrella aumente de forma considerable y su temperatura efectiva disminuya.

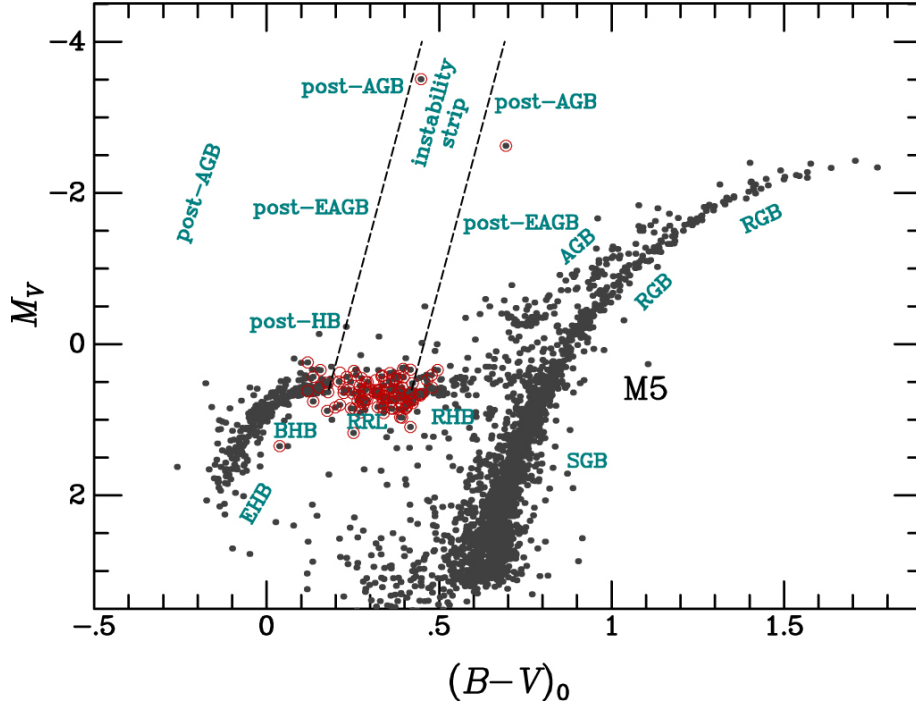


FIGURA 2.4: Diagrama color-magnitud del cúmulo globular M5. Se puede ver la región de la fase de AGB que está casi separada de la RGB [Davis et al., 2022]

Durante la AGB la envoltura se vuelve muy extensa y altamente convectiva, facilitando el transporte hacia la superficie de material procesado internamente (como carbono y elementos sintetizados por el proceso-s).

Este comportamiento general y la trayectoria correspondiente dentro del diagrama HR se ven en la Figura 2.4, que muestra el desplazamiento característico hacia regiones más luminosas y frías. La fase termina cuando la estrella pierde gran parte de su envoltura debido a una fuerte expulsión de masa, dejando como remanente una enana blanca rodeada, en algunos casos, por una nebulosa planetaria.

2.1.2 COLAPSO Y EXPLOSIONES ESTELARES

En estrellas de masa intermedia-alta, la evolución posterior a la fusión del helio conduce a la formación de un núcleo cada vez más denso compuesto por elementos progresivamente más pesados. Una vez que el núcleo alcanza condiciones donde la presión de degeneración electrónica deja de ser suficiente para sostenerlo, se produce un colapso gravitacional rápido. Este colapso eleva la densidad y temperatura en

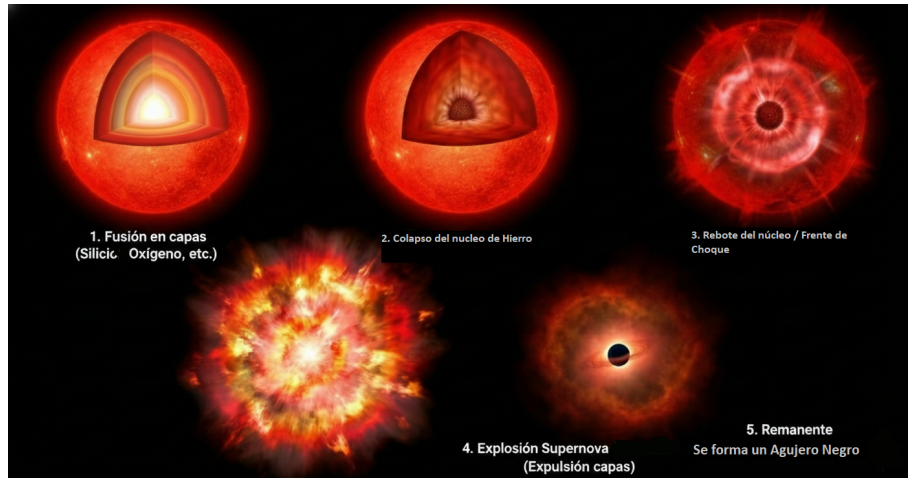


FIGURA 2.5: Fases de una supernova tipo II

escalas de milisegundos, hasta que la materia del núcleo se vuelve prácticamente incomprensible, dando lugar a un rebote que desencadena la explosión de supernova de tipo II.

La energía liberada en el choque expulsa las capas externas de la estrella, mientras que el núcleo colapsado queda como remanente compacto. La masa final del núcleo determina si el objeto resultante será una estrella de neutrones o un agujero negro. La secuencia esquemática de este proceso se ilustra en la Figura 2.5, donde se muestran las etapas principales: contracción del núcleo, formación del objeto compacto y expulsión de la envoltura estelar.

2.2 DIAGRAMA COLOR-MAGNITUD

El diagrama color–magnitud (CMD) es la representación fotométrica más utilizada para caracterizar poblaciones estelares: en el eje vertical se grafica la magnitud absoluta en un filtro (por ejemplo M_V) y en el eje horizontal un índice de color, típicamente la diferencia entre magnitudes observadas en dos filtros (por ejemplo $B - V$). El índice de color se define como

$$(B - V) = m_B - m_V \quad (2.2)$$

donde m_B y m_V son las magnitudes aparentes en los filtros B y V . La magnitud

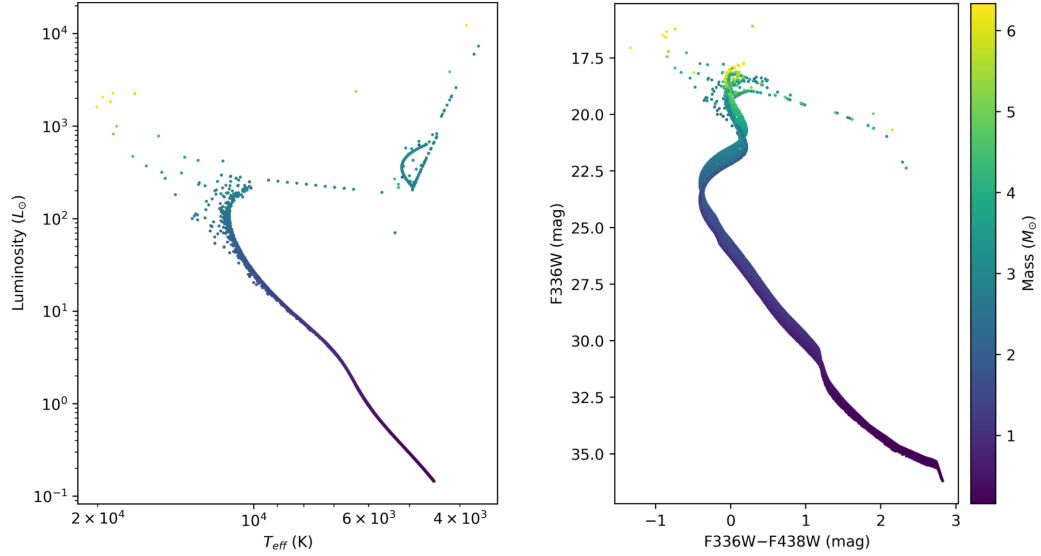


FIGURA 2.6: (Izquierda) Diagrama HR y (derecha) CMD del modelo P300, generado a partir del código PETAR (véase Figura 2 del trabajo de Wang et al. [2023])

absoluta M se obtiene a partir de la magnitud aparente mediante la relación de distancia:

$$M = m - 5 \log_{10} \left(\frac{d}{10 \text{ pc}} \right) \quad (2.3)$$

o, en presencia de extinción, aplicando la corrección por medio de un coeficiente de extinción interestelar.

Físicamente, el índice de color está directamente relacionado con la temperatura efectiva de la estrella, ya que las estrellas más calientes emiten proporcionalmente más flujo en los filtros azules que en los rojos; de manera similar, la magnitud absoluta se relaciona con la luminosidad L a través de la ley de Stefan–Boltzmann (ver ecuación 2.1), por lo que el CMD puede interpretarse como una proyección observacional del diagrama de Hertzsprung–Russell (HR), donde el eje color $\leftrightarrow T_{\text{eff}}$ y M (con corrección bolométrica) $\leftrightarrow L$.

Para poblaciones estelares, especialmente en cúmulos donde las distancias y edades son aproximadamente comunes, la ubicación del MSTO (o turn-off) en el CMD permite estimar la edad por comparación con isócronas. Asimismo, objetos que se sitúan claramente por encima y hacia la izquierda del MSTO (más azules y brillantes) son candidatos a Blue Stragglers.

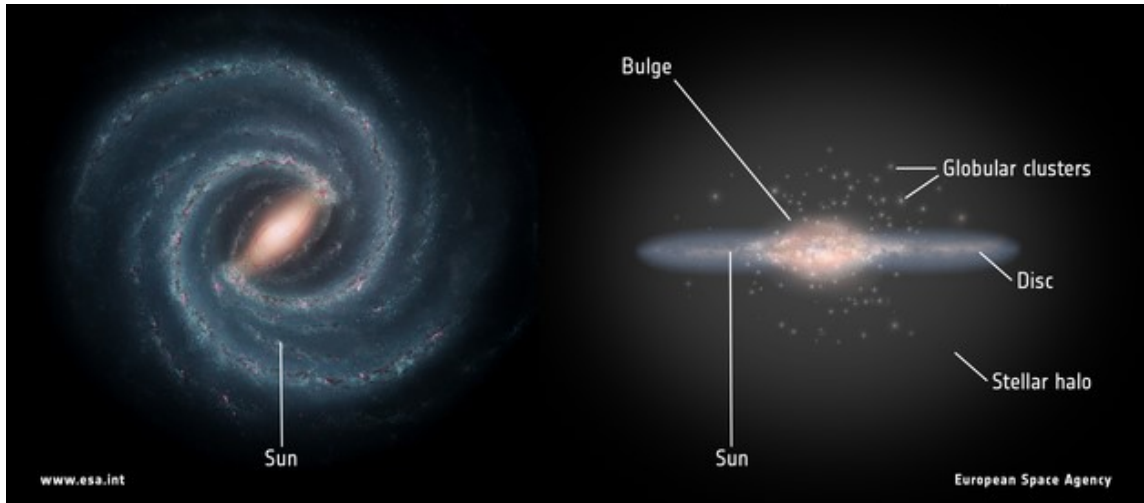


FIGURA 2.7: Impresión artística de la Vía Láctea. Créditos: ESA, NASA/JPL-Caltech

2.3 POBLACIONES ESTELARES EN LA VÍA LÁCTEA

La estructura de la Vía Láctea se divide en componentes principales definidas por su distribución espacial y cinemática: el bulbo, el disco (subdividido en delgado y grueso) y el halo. Estas poblaciones presentan propiedades dinámicas diferenciadas que reflejan las distintas etapas de formación de la Galaxia.

Es necesario caracterizar estas regiones para clasificar correctamente las estrellas de estudio, ya que la pertenencia a una componente específica impone restricciones sobre la edad y metalicidad esperada de los objetos.

2.3.1 BULBO

El bulbo galáctico constituye la componente central de la Vía Láctea, caracterizada por la mayor densidad de estrellas y una alta concentración de masa. Morfológicamente, esta estructura es a menudo descrita como elipsoidal o en forma de barra, y se extiende hasta un radio de aproximadamente 3 a 4 kpc desde el centro (Karttunen et al. [2017]).

Su población estelar es predominantemente antigua, aunque incluye subpoblaciones con una mayor presencia de estrellas jóvenes y formación estelar reciente en

las regiones internas. Cinemáticamente, las estrellas del bulbo presentan una alta dispersión de velocidades, lo que indica movimientos significativos en direcciones aleatorias. Esta dispersión se superpone a una rotación general. La complejidad de su estructura y dinámica parece indicar una formación rápida y temprana.

2.3.2 DISCO DELGADO

El disco delgado concentra la mayor parte de la masa estelar y gaseosa del plano galáctico. Es la región donde reside el Sol y donde predomina la formación estelar actual. Esta estructura se extiende radialmente hasta unos 15-20 kpc y se define verticalmente por una altura de escala (h_z) pequeña. Para el gas y el polvo, h_z es de aproximadamente 100 pc, mientras que la componente estelar presenta un grosor mayor, cercano a los 300 pc, debido al calentamiento dinámico gradual. El disco delgado se caracteriza por una rotación diferencial ordenada. La velocidad de rotación es de $V_{rot} \approx 220$ km/s a la distancia solar, con una dispersión de velocidades baja. Esto implica que las estrellas siguen órbitas casi circulares y se mantienen restringidas al plano galáctico [Karttunen et al., 2017].

2.3.3 DISCO GRUESO

El disco grueso engloba al disco delgado pero se extiende a mayores alturas sobre el plano. A diferencia del disco delgado, su población estelar es generalmente más vieja y presenta una menor densidad de materia. Muestra una mayor dispersión de velocidades y una velocidad de rotación promedio menor, fenómeno conocido como retraso asimétrico o lag. Como se discutirá en capítulos posteriores al analizar estrellas ricas en elementos α , la distinción cinemática entre ambos discos es fundamental para entender el origen de estrellas que presentan discrepancias entre su edad aparente y su posición galáctica [Karttunen et al., 2017].

2.3.4 HALO

El halo galáctico es la componente más extensa y difusa de la Vía Láctea. Se trata de una estructura esferoidal que contiene estrellas de campo muy antiguas y el sistema de cúmulos globulares.

Los objetos del halo no participan en la rotación ordenada del disco; en su lugar, describen órbitas muy excéntricas y con inclinaciones aleatorias que los llevan a grandes distancias del plano galáctico y del centro, a veces superando los 50 kpc. Esta región representa los vestigios de las etapas más tempranas de la formación galáctica y de eventos de acreción posteriores. Estudios de poblaciones antiguas ([Rain, M. J. et al. \[2021\]](#)) suelen utilizar estrellas del halo como laboratorios para estudiar dinámicas en entornos de baja densidad y alta antigüedad.

2.4 ESTRELLAS BINARIAS

Los sistemas binarios están formados por dos estrellas unidas gravitacionalmente que orbitan alrededor de un centro de masa común. Representan una fracción significativa de la población estelar y constituyen un laboratorio natural para estudiar procesos de evolución estelar que no ocurren en estrellas aisladas. La mayor parte de los mecanismos asociados a la formación de blue straggler (y posiblemente a las $Y\alpha R$) depende directamente de la interacción dentro de estos sistemas, como se muestra en los estudios recientes de [Jadhav and Subramaniam \[2021\]](#), [Li, Chunyan et al. \[2023\]](#), entre otros.

2.4.1 TIPOS DE ESTRELLAS BINARIAS

Los sistemas binarios pueden clasificarse de acuerdo con el método de detección o con el grado de interacción entre sus componentes.

1. Clasificación observacional

Esta clasificación se refiere a la forma en que se identifican:

- Binarias visuales: sistemas cuya separación angular permite resolver a ambas estrellas de forma directa.
- Binarias espectroscópicas: se detectan por el desplazamiento Doppler en sus líneas espectrales.
- Binarias eclipsantes: presentan variaciones periódicas de brillo cuando una estrella pasa frente a la otra.
- Binarias astrométricas: solo una componente es visible, pero el movimiento orbital puede deducirse de oscilaciones en su posición.

2. Clasificación por interacción física

La clasificación más utilizada es:

- Binarias separadas (detached): ambas estrellas se encuentran dentro de sus lóbulos de Roche, sin transferencia significativa de masa.
- Binarias semiseparadas (semidetached): una estrella llena su lóbulo de Roche y transfiere masa a la otra. Muchos blue stragglers formados por transferencia estable de masa corresponden a esta categoría ([[Chiappini et al., 2015](#)]).
- Binarias de contacto: ambas componentes comparten una envoltura común. Varios modelos de formación de YARs y sistemas evolucionados consideran la fase de envoltura común como un mecanismo relevante para explicar órbitas muy compactas ([[Cerqui et al., 2023](#)], [[Jofré et al., 2023](#)]).
- Binarias fusionadas: el sistema termina en la coalescencia de las dos estrellas.

EVOLUCIÓN QUÍMICA ESTELAR Y DETERMINACIÓN DE EDADES

La composición química de una estrella conserva información clave sobre el entorno en el que se formó. En el disco galáctico, las razones de abundancia como $[\text{Fe}/\text{H}]$ y $[\alpha/\text{Fe}]$ muestran la etapa de formación estelar, la eficiencia del enriquecimiento químico y la contribución relativa de supernovas de tipo II y tipo Ia. En este capítulo se describen los procesos fundamentales de evolución química del disco, así como las tendencias observadas en hierro y elementos α que permiten distinguir poblaciones estelares. Esta descripción es esencial para comprender fenómenos anómalos como las estrellas Young Alpha-Rich ($Y\alpha R$), cuya composición química no coincide con su edad aparente.

3.1 EVOLUCIÓN QUÍMICA DEL DISCO GALÁCTICO

La evolución química del disco se describe como la consecuencia del enriquecimiento progresivo del gas por supernovas de distintos tipos y por la formación continua de estrellas. Según los modelos de evolución química presentados por [Matteucci \[2001\]](#), los elementos α (O, Mg, Si, Ca, Ti) se producen principalmente en supernovas tipo II, que explotan a partir de estrellas masivas y en escalas de tiempo cortas. En contraste, la mayor parte del hierro proviene de supernovas tipo Ia, cuyos tiempos de retraso pueden alcanzar varios miles de millones de años. Como resultado, la razón $[\alpha/\text{Fe}]$ funciona como un reloj relativo que informa sobre la velocidad de formación estelar y sobre la contribución relativa de SN II y SN Ia en distintas

épocas.

Los resultados observacionales de [Toyouchi and Chiba \[2014\]](#) afirman que las poblaciones del disco presentan secuencias químicas bien diferenciadas, asociadas a regiones y épocas distintas del proceso de formación galáctica. Ellos encuentran gradientes radiales en $[\text{Fe}/\text{H}]$, variaciones sistemáticas en $[\alpha/\text{Fe}]$, y evidencia de que el disco grueso y el disco delgado siguen trayectorias químicas diferentes.

3.1.1 EVOLUCIÓN DE $[\text{Fe}/\text{H}]$

En los modelos de [Matteucci et al. \[2018\]](#), la evolución de la metalicidad global ($[\text{Fe}/\text{H}]$) está controlada por:

- la eficiencia de la formación estelar,
- el aporte de hierro desde supernovas tipo Ia,
- y la entrada continua de gas pobre en metales.

Un ritmo alto de formación estelar al inicio de la vida del disco genera un enriquecimiento rápido, pero el mayor aumento de $[\text{Fe}/\text{H}]$ ocurre cuando las SN Ia comienzan a aportar hierro en cantidades significativas. Esto produce un incremento progresivo de la metalicidad mientras el gas se sigue reciclando.

3.1.2 EVOLUCIÓN DE $[\alpha/\text{Fe}]$

[Matteucci et al. \[2018\]](#) y [Toyouchi and Chiba \[2014\]](#) muestran que $[\alpha/\text{Fe}]$ es un trazador directo del ritmo de formación estelar:

Las SN II producen principalmente elementos $\alpha \rightarrow$ valores altos de $[\alpha/\text{Fe}]$ en épocas tempranas.

Las SN Ia producen la mayor parte del hierro \rightarrow disminución de $[\alpha/\text{Fe}]$ cuando su contribución se vuelve dominante.

Por ello, poblaciones con altos valores de $[\alpha/\text{Fe}]$ corresponden a épocas de formación rápida, típicas del disco grueso, mientras que bajos valores de $[\alpha/\text{Fe}]$ caracterizan al disco delgado, formado con una tasa más prolongada y moderada.

3.1.3 SECUENCIA QUÍMICA DEL DISCO DELGADO Y GRUESO

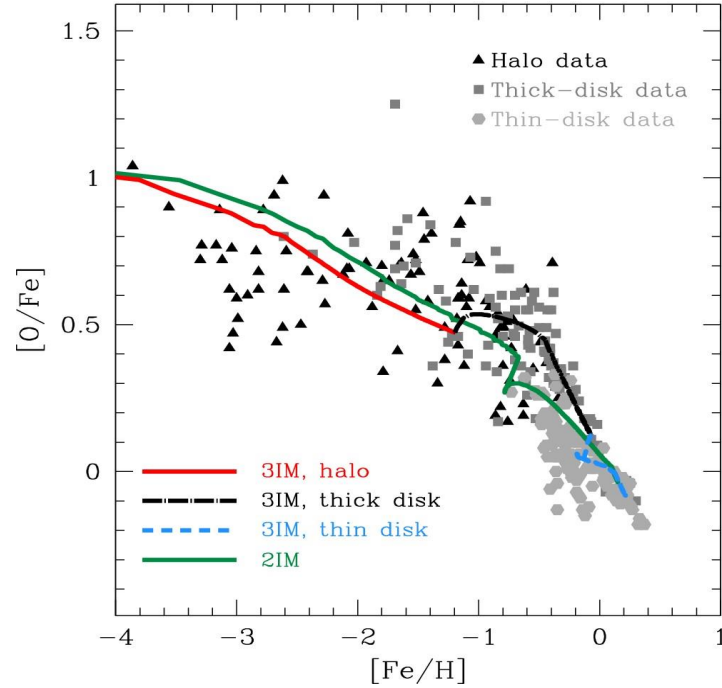


FIGURA 3.1: Comportamiento de $[\text{O}/\text{Fe}]$ versus $[\text{Fe}/\text{H}]$ para el 3IM (Modelo de tres entradas) (línea continua roja, línea discontinua negra y línea discontinua azul) y el 2IM (Modelo de dos entradas) (línea continua verde). Figura extraída de [Micali et al. \[2013\]](#).

El disco de la Vía Láctea muestra dos secuencias químicas bien diferenciadas en el espacio $[\alpha/\text{Fe}]$ vs $[\text{Fe}/\text{H}]$: una secuencia de alto $[\alpha/\text{Fe}]$ (asociada al disco grueso) y otra de bajo $[\alpha/\text{Fe}]$ (asociada al disco delgado). Estas secuencias muestran unas formaciones estelares diferentes: el disco grueso se formó rápidamente y con una eficiencia de formación estelar alta, lo que produjo una abundancia relativa de elementos α elevada antes de que las SNe Ia aportaran Fe en gran cantidad; el disco delgado se formó en un tiempo más largo y con menor eficiencia, permitiendo que la contribución retardada de SNe Ia bajara $[\alpha/\text{Fe}]$ a un mismo $[\text{Fe}/\text{H}]$ ([Matteucci \[2001\]](#))

Los modelos quimio-galácticos que se mencionan en [Micali et al., 2013] se ajustan a estas observaciones y requieren episodios de acreción de gas y distintas escalas temporales: un episodio corto e intenso para formar el disco grueso (tiempos de formación ~ 1 Gyr y eficiencia de SFR 'tasa de formación estelar' muy alta) y un episodio más extendido para el disco delgado, en el modelado del "Three Infall Model". Así, la formación independiente y rápida del disco grueso explica su elevada $[\alpha/\text{Fe}]$ (ver Figura 3.1).

3.2 ESPECTROSCOPIA PARA DETECCIÓN DE ABUNDANCIA DE ELEMENTOS α

Matteucci et al. [2018] señalan que la identificación y cuantificación de los elementos α (p. ej. O, Mg, Si, Ca, Ti) en estrellas requiere espectros de alta resolución y análisis detallado para comparar con modelos quimio-galácticos; este punto es la base para interpretar la relación $[\alpha/\text{Fe}]-[\text{Fe}/\text{H}]$ en términos de tiempos de formación y aporte relativo de SN II frente a SN Ia.

Estudios como de Anders et al. [2023] demuestran además que, combinando espectroscopía (APOGEE) con técnicas de aprendizaje automático y calibraciones a partir de muestras con edades conocidas, es posible derivar edades espectroscópicas para grandes muestras de estrellas gigantes rojas con incertidumbres estadísticas manejables, lo que convierte a la espectroscopía en una herramienta doble: medir química y estimar edades, además de ser un método fiable que un ajuste de isócronas (para el caso de las estrellas gigantes rojas) o de la astrosismología.

3.2.1 EDADES TÍPICAS SEGÚN ABUNDANCIAS ALFA

Matteucci et al. [2018] (en su revisión y trabajos asociados) y Micali et al. [2013] sostienen que la secuencia de alto $[\alpha/\text{Fe}]$ corresponde, en promedio, a poblaciones formadas en fases tempranas y rápidas de la evolución galáctica; los tiempos de formación deducidos por modelos quimio-evolutivos sitúan la formación del disco grueso en escalas del orden de $\sim 1-2$ Gyr, implicando edades mayores para la mayoría de sus estrellas.

Los estudios astrosísmicos y espectroscópicos reunidos por [Miglio, A. et al. \[2021\]](#), y por trabajos sobre APOGEE muestran coherencia con esta interpretación: las estrellas con alto α suelen ser antiguas (mayoritariamente $>\sim 8-10$ Gyr), mientras que bajo α abarca edades más jóvenes y extendidas en el tiempo.

Sin embargo, [Chiappini et al. \[2015\]](#) mencionan excepciones: la detección de estrellas con enriquecimiento α elevado pero aparentes edades jóvenes (llamados “Young α Rich”) indica que la relación edad- $[\alpha/\text{Fe}]$ no es absolutamente rígida y que procesos como acreción de gas, mezclado de poblaciones o errores sistemáticos en estimación de edades pueden producir casos discrepantes que requieren explicación. Este tipo de estrellas es la que se estudian en el presente trabajo y se detallará en los capítulos siguientes.

3.3 ASTROSISMOLOGÍA PARA DETERMINAR EDADES ESTELARES

[Miglio, A. et al. \[2021\]](#) mencionan que la astrosismología da estimaciones de masa y radio con precisión suficiente para transformar esas medidas en edades individuales con incertidumbres menores que los métodos de modelos isocrónicos (esto para para estrellas con oscilaciones detectables); por ello, la astrosismología se ha convertido en la técnica de referencia para obtener muestras estelares en las observaciones de Kepler y TESS.

Estas edades astrosísmicas sirven tanto para validar calibraciones espectroscópicas como para acoplar modelos de evolución química: la combinación de edades sísmicas y abundancias químicas permite trazar la cronología de enriquecimiento del disco con una resolución temporal que otras técnicas no alcanzan. [Miglio, A. et al. \[2021\]](#) muestran además que la distribución de edades de altos elementos α es coherente con una formación temprana y relativamente rápida.

3.3.1 RELACIÓN $[\alpha/\text{Fe}]$ -EDAD

En los trabajos de [Matteucci \[2001\]](#) sostiene que la diferencia de tiempos entre aporte de α por SN II y de Fe por SN Ia convierte a $[\alpha/\text{Fe}]$ en un cronómetro químico:

altos valores de $[\alpha/\text{Fe}]$ implican formación rápida y, por ende, edades mayores en promedio, con ciertas discrepancias.

Las comprobaciones empíricas a gran escala (p. ej. APOGEE) y los análisis de edad espectroscópica presentados por [Anders et al. \[2023\]](#) confirman una correlación clara entre $[\alpha/\text{Fe}]$ y edad para la mayoría de las estrellas, lo que afirma y establece el uso combinado de química y edades para describir la evolución de las estrellas en las regiones del disco.

Sin embargo, trabajos recientes ([Chiappini et al. \[2015\]](#); [Das et al. \[2020\]](#), [Zinn et al. \[2022\]](#), [Jofré et al. \[2023\]](#)) mencionan que existe dispersión en la relación $[\alpha/\text{Fe}]$ -edad, la presencia de estrellas con elementos α enriquecidas y con edades jóvenes, lo cual, surgen hipótesis para poder describir dichas discrepancias: fusión/acreción de gas, migración radial con mezcla de poblaciones, o sesgos en las estimaciones de edad, binariedad no detectada; para explicar la complejidad observada. Estas aportaciones muestran que, aunque $[\alpha/\text{Fe}]$ es un indicador estadístico de edad confiable, su uso a nivel individual requiere precaución y calibraciones basadas en edades sísmicas y en análisis espectroscópicos cuidadosos.

ESTRELLAS BLUE STRAGGLERS Y YOUNG ALPHA RICH

4.1 BLUE STRAGGLERS

Las estrellas Blue Stragglers (BSS) son aquellas que, en un diagrama de color–magnitud (CMD) de un cúmulo estelar, aparecen más azules y más luminosas que el punto de “turn-off” (TO) de la secuencia principal (MS) del cúmulo, es decir, ocupan una extensión de la secuencia principal hacia arriba y a la izquierda del TO (Wang and Ryu [2025], Li, Chunyan et al. [2023], Rain, M. J. et al. [2021]).

Este posicionamiento en el diagrama es llamativo si se asume que provienen de un mismo cúmulo: al formarse todas las estrellas casi al mismo tiempo, las más masivas deberían haber evolucionado ya fuera de la MS. Por lo tanto, la presencia de BSS representa una anomalía importante respecto a los modelos estándar de evolución estelar sencilla. Así, las BSS han sido identificadas en objetos muy diversos: cúmulos globulares, cúmulos abiertos (OCs), galaxias enanas, e incluso en la población de campo de la Vía Láctea.

En cúmulos abiertos, gracias a los datos del satélite Gaia, es posible realizar estudios estadísticos de su población, distribución y frecuencia. Por ejemplo, en el trabajo de Rain, M. J. et al. [2021], se identificaron 897 BSS y 77 “Yellow Stragglers” (YSS) en 408 cúmulos abiertos utilizando Gaia DR2.

Más recientemente, el trabajo realizado por Li, Chunyan et al. [2023] realizó un análisis usando Gaia DR3 donde identificó 138 BSS nuevas en 50 cúmulos abiertos

que no estaban reportadas previamente, lo que representa un aumento del orden de 10 % en el número total de BSS en OCs.

Por tanto, las BSS constituyen una población recurrente y aparece en distintos entornos estelares, y su estudio sistemático en cúmulos abiertos se ha beneficiado enormemente de la alta precisión de los datos astrométricos y fotométricos de Gaia.

4.2 DESCUBRIMIENTO: ANOMALÍAS EN LAS CMD

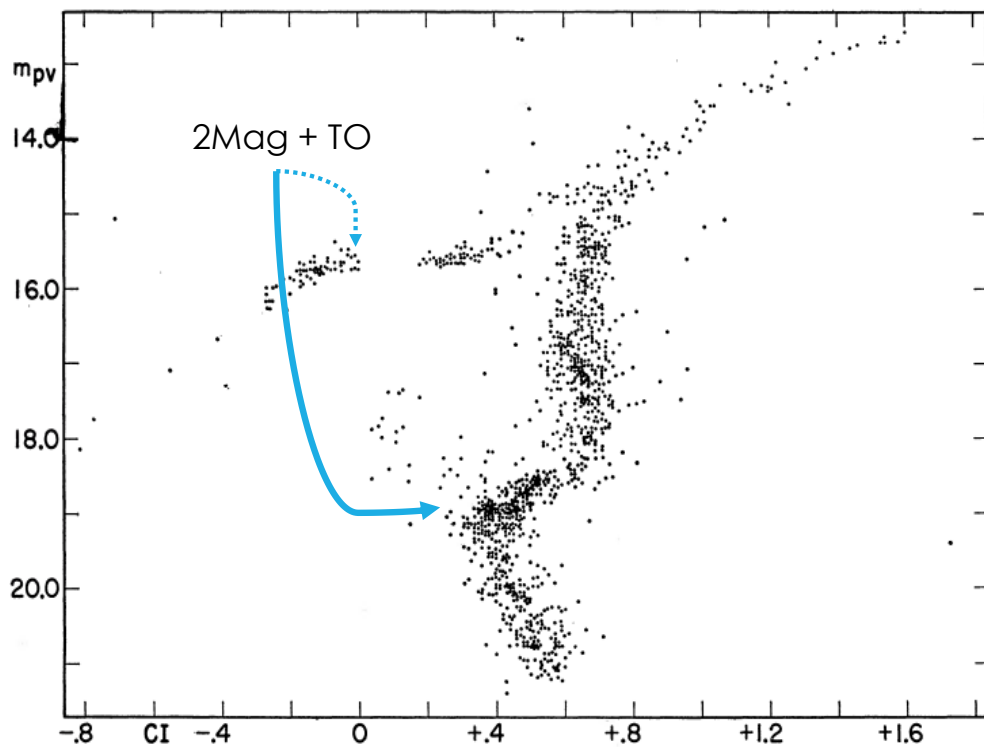


FIGURA 4.1: Diagrama color-magnitud de M3. Se Puede observar la región donde aparecen las BSS, por encima del TO (Figura extraída de [Sandage \[1953\]](#)).

[Sandage \[1953\]](#) descubrió por primera vez un grupo peculiar de estrellas conocidas como azules rezagadas (BSS) en el cúmulo globular M3. Estas aparecen en el diagrama color-magnitud (CMD) como una prolongación inesperada de la secuencia principal, desplazándose hacia la zona más azul y situándose por encima del punto de no retorno de dicha secuencia (MSTO) (ver Figura 4.1).

Según la recopilación de [Li, Chunyan et al. \[2023\]](#) estas estrellas se encuentran

en cúmulos globulares, galaxias esferoidales y en cúmulos abiertos de estrellas con edades medias a antiguas (Jadhav and Subramaniam [2021], Rain, M. J. et al. [2021]).

4.2.1 PROPIEDADES FÍSICAS

La posición de las BSS en el CMD indica que son más masivas que la masa del TO del cúmulo. Jadhav and Subramaniam [2021] cuantificó este exceso en forma de “fractional mass excess” M_e (exceso fraccionario de masa). En una muestra de cúmulos con Gaia DR2, se encontró que $\sim 54\%$ de BSS tienen $M_e < 0.5$ por encima del TO, lo cual sugiere que estos BSS ganaron masa mediante transferencia de masa en binarias (mass-transfer, MT). Otros $\sim 30\%$ tienen de $0.5 < M_e < 1.0$ compatibles con una fusión por colisión o por fusión binaria.

Además, la distribución radial de BSS dentro de los cúmulos suele mostrar segregación: Wang and Ryu [2025] menciona que las BSS tienden a concentrarse hacia el centro conforme el cúmulo evoluciona dinámicamente, un indicio de evolución interna y migración por fricción dinámica, especialmente si las BSS son más masivas que el promedio.

Otras propiedades como la multiplicidad (binariedad), rotación y composición química son también clave, aunque dependen fuertemente de estudios espectroscópicos o de seguimiento radial-velocidad, lo cual aún es limitado.

4.2.2 HIPÓTESIS DE FORMACIÓN

4.2.2.1 FORMACIÓN POR TRANSFERENCIA DE MASA

La hipótesis propuesta por McCrea [1964] consiste en que una estrella, en una binaria, transfiere masa a su compañera, rejuveneciéndola: esta adquiere masa adicional, vuelve a una posición más azul y luminosa en la MS, y aparece como BSS (ver Figura 4.2).

Rain, M. J. et al. [2021], trabajando con Gaia EDR3, encontró una correlación significativa entre el número de BSS y la fracción binaria del cúmulo padre: cuan-

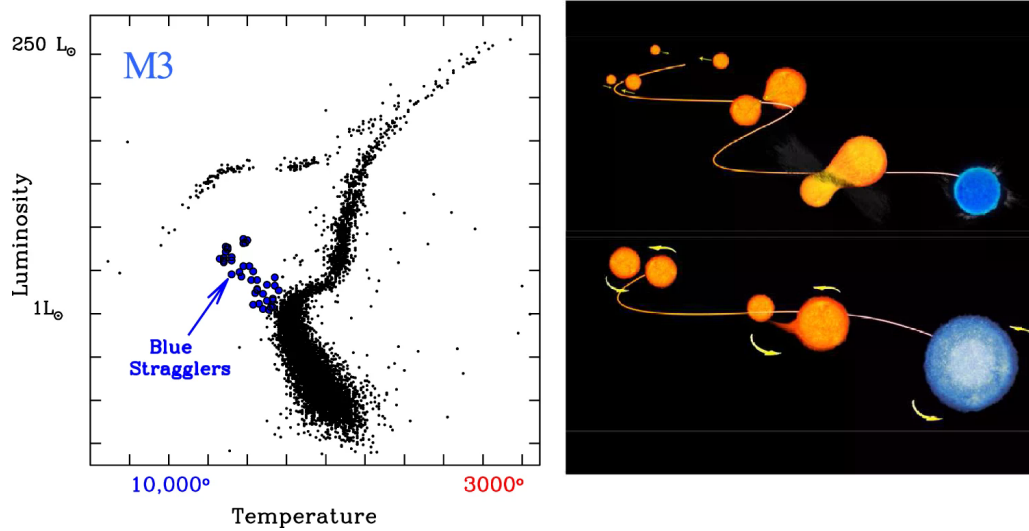


FIGURA 4.2: Izquierda: Diagrama HR del Cúmulo M3. Los círculos azules indican la posición de las BSS. Derecha: Imagen ilustrativa de dos tipos de la formación de BSS: arriba, por colisiones, abajo, por transferencia de masa. Figura extraída del trabajo de Ferraro et al. [2020].

to mayor la fracción de binarias, mayor la población de BSS. Esto sugiere que la evolución binaria es la hipótesis más aceptada.

4.2.2.2 FORMACIÓN POR FUSIÓN

Otra posibilidad es que dos estrellas, ya sea dos componentes de una binaria en contacto, o miembros internos de un sistema múltiple (triples o más), se fusionen en una sola, más masiva, rejuvenecida (ver Figura 4.2).

En particular, en sistemas triples, mecanismos como el efecto Kozai–Lidov pueden inducir oscilaciones en la excentricidad e inclinación de la órbita interna, lo que en combinación con fricción permite la fusión de las estrellas internas (Rain, M. J. et al. [2021], Wang and Ryu [2025]).

Desde la perspectiva observacional, Jadhav and Subramaniam [2021] menciona que un porcentaje de BSS con exceso de masa más alto, por ejemplo entre $0.5 < M_e < 1.0$ (donde M_e es el exceso de masa fraccional), o incluso mayores, podría indicar formación por fusión, ya que la transferencia de masa estable difícilmente permitiría esos incrementos.

4.2.2.3 BINARIEDAD CERCANA NO RESUELTA

Algunos BSS podrían corresponder a sistemas binarios o múltiples aún no resueltos, lo que complica su clasificación. Por ejemplo, sistemas triples podrían dar lugar a fusiones internas, o a configuraciones inestables de transferencia de masa, cuya evolución no es sencilla de reconstruir.

El hecho de que muchos BSS presenten alta fracción binaria, o asociaciones con binarios de período largo, sugiere que múltiples interacciones (transferencia estable, fusiones, interacciones en sistemas múltiples) pueden operar simultáneamente.

Además, las limitaciones observacionales actuales (en especial en espectroscopía, determinación de órbitas, mediciones de velocidad radial, tal como los trabajos de [Rain, M. J. et al. \[2021\]](#) y [Li, Chunyan et al. \[2023\]](#)) dificultan detectar todos los sistemas múltiples, lo que implica que la población real de BSS provenientes de binariedad cercana/resuelta podría estar siendo subestimada.

Por tanto, una hipótesis de “binariedad no resuelta” o multiplicidad oculta sigue siendo una explicación viable para alguna parte significativa de la población de BSS, y realza la importancia de estudios espectroscópicos y de seguimiento a largo plazo.

4.3 ESTRELLAS YOUNG ALPHA RICH

4.3.1 DESCUBRIMIENTO

Las estrellas denominadas Young α Rich ($Y\alpha R$) constituyen una población aparentemente contradictoria: presentan abundancias elevadas de elementos α (por ejemplo O, Mg, Si, Ca, Ti) que son típicas de poblaciones antiguas formadas rápidamente, pero muestran edades estelares que, según determinaciones astrosismológicas y ajustes isocrónicos, son indicativas de estrellas relativamente jóvenes. Esta aparente discrepancia (composición química de una formación temprana vs. edades estelares recientes) fue identificada y discutida en varios trabajos durante la última década ([Sun et al. \[2020\]](#), [Miglio, A. et al. \[2021\]](#), [Jofré et al. \[2023\]](#), [Warfield et al. \[2024\]](#)), que utilizaron grandes muestras espectroscópicas combinadas con técnicas

de datación (astrosismología, ajustes de isócronas, indicadores de rotación y modelos evolutivos).

Los descubrimientos iniciales mostraron un punto importante:

- Las estrellas $Y\alpha R$ tienen $[\alpha/\text{Fe}]$ consistentemente altas, semejantes a las de la secuencia α -alta

Estos hallazgos obligan a considerar escenarios no estándar para explicar cómo una estrella puede tener química típica de una población antigua y, sin embargo, comportarse como una estrella más masiva (y por tanto más joven) en cuanto a su evolución.

4.3.2 PROPIEDADES QUÍMICAS Y FÍSICAS

Por lo anterior dicho, debido a que presentan elementos *alpha* elevados con respecto al hierro, además de presentar masas elevadas que han sido determinados por métodos astrosísmicos o espectroscópicos, han sido clasificadas como estrellas de apariencia joven.

Estas estrellas son vistas como estrellas gigantes rojas, con temperaturas efectivas y gravedades superficiales compatibles con esa fase evolutiva; estas observaciones se hicieron en los trabajos de [Jofré et al. \[2023\]](#), quien caracterizó 41 estrellas gigantes rojas que incluyen las estrellas $Y\alpha R$, y en el trabajo de [Anders et al. \[2023\]](#), quienes, al estimar las edades de las estrellas gigantes rojas de APOGEE, aun eliminando a las que ellos denominan las “estrellas sobremasivas mejoradas con $[\alpha/\text{Fe}]$ ”, encontraron de igual forma unas cuantas en su muestra, que determinaron que puedan deberse a un evolución binaria.

4.3.3 HIPÓTESIS DE FORMACIÓN

Las estrellas young α rich ($Y\alpha R$) presentan una combinación inesperada de propiedades: abundancias elevadas de elementos α , típicas de poblaciones viejas, y edades aparentes jóvenes inferidas a partir de su masa. Este comportamiento fue

señalado por [Chiappini et al. \[2015\]](#), quienes propusieron que estas estrellas no siguen el estándar de evolución química galáctica. Desde entonces, varios trabajos han explorado distintos mecanismos para explicar su origen, destacando procesos de interacción binaria y, en menor medida, escenarios de formación galáctica no convencionales.

4.3.3.1 TRANSFERENCIA DE MASA EN SISTEMAS BINARIOS

[Martig et al. \[2015\]](#) propusieron que muchas estrellas young α rich no son realmente jóvenes, sino estrellas antiguas que han ganado masa mediante transferencia de masa en sistemas binarios. En este escenario, una estrella evolucionada transfiere material a su compañera, aumentando su masa total. Como consecuencia, cuando se infiere la edad usando modelos de evolución de estrella aislada, la estrella aparece artificialmente más joven.

Este mecanismo explica de forma natural la coexistencia de altas abundancias α con edades jóvenes aparentes, ya que la composición química refleja el origen antiguo de la estrella, mientras que la masa actual ha sido modificada posteriormente. Además, [Martig et al. \[2015\]](#). encontraron que muchas $Y\alpha R$ muestran rotación rápida y propiedades consistentes con acreción de masa, lo que refuerza esta interpretación.

Estudios posteriores han apoyado este escenario, mostrando que las $Y\alpha R$ comparten propiedades químicas y cinemáticas con la población alta- α antigua, lo que sugiere que pertenecen a esa población pero han sido rejuvenecidas por interacción binaria.

4.3.3.2 FUSIÓN

Un escenario relacionado es la fusión de dos estrellas en un sistema binario, discutido también por [Martig et al. \[2015\]](#) y analizado con mayor detalle por [Jofré et al. \[2023\]](#). En este caso, dos estrellas de baja masa se fusionan, formando un único objeto más masivo.

El producto de la fusión aparece como una estrella joven al analizar su masa y posición en el diagrama HR, aunque su composición química corresponde a una

población antigua rica en α . Este mecanismo es análogo al de las blue stragglers observadas en cúmulos estelares.

Jofré et al. [2023] mostraron que varias $Y\alpha R$ presentan indicadores químicos, como razones $[C/N]$, compatibles con una historia de mezcla interna alterada, lo que puede interpretarse como evidencia de fusión o interacción binaria fuerte. Este medio resulta especialmente relevante para explicar aquellas $Y\alpha R$ que no muestran evidencia clara de una compañera actual.

4.3.3.3 REMANENTES DE SN IA

Un enfoque alternativo fue propuesto inicialmente por Chiappini et al. [2015], quienes sugirieron que algunas $Y\alpha R$ podrían haberse formado realmente en épocas tardías a partir de gas enriquecido en α -elementos. Este gas podría originarse en regiones donde el enriquecimiento por supernovas de tipo Ia fue ineficiente o retrasado, permitiendo la formación de estrellas jóvenes con altos valores de $[\alpha/Fe]$.

Modelos recientes de evolución química, como los presentados por Grisoni et al. [2024], han explorado este tipo de escenarios, incluyendo migración radial y episodios particulares de formación estelar. Sin embargo, estos trabajos concluyen que producir una población numerosa de $Y\alpha R$ mediante este mecanismo requiere condiciones muy específicas y poco comunes.

Además, las propiedades cinemáticas y químicas de la mayoría de las $Y\alpha R$ observadas son más coherentes con estrellas rejuvenecidas que con una población joven genuina, lo que limita la importancia de este medio frente a los escenarios binarios.

CAPÍTULO 5

INTERFEROMETRÍA SPECKLE

La interferometría speckle es una técnica de alta resolución angular que permite recuperar información cercana al límite de difracción de un telescopio a partir de una gran cantidad de exposiciones cortas de un objeto estelar, evitando así el efecto de dispersión causado por la turbulencia atmosférica. Esta técnica fue propuesta por primera vez en 1970 por Labeyrie [1970], quien demostró que mediante el análisis de Fourier de patrones de moteado (speckles) se puede reconstruir información espacial que se pierde en exposiciones largas tradicionales.

5.1 FUNDAMENTOS

La atmósfera terrestre introduce fluctuaciones temporales en el frente de onda estelar y esto degrada la resolución de una imagen hasta aproximadamente 1" en el óptico. Sin embargo, para tiempos de exposición muy cortos (típicamente milisegundos), las turbulencias se “congelan”, dando lugar a un patrón granular de interferencia conocido como patrón speckle. Cada speckle tiene un tamaño aproximadamente igual al límite de difracción del telescopio, λ/D .

Labeyrie [1970] propuso que la transformada de Fourier de estas imágenes speckle guarda información de alta frecuencia espacial que puede recuperarse, permitiendo así medir parámetros de sistemas estelares estrechos que serían inaccesibles sin corrección atmosférica. La técnica se basa en promediar los espectros de potencia de muchos fotogramas de speckle, eliminando así los efectos de la atmósfera en el dominio de Fourier.

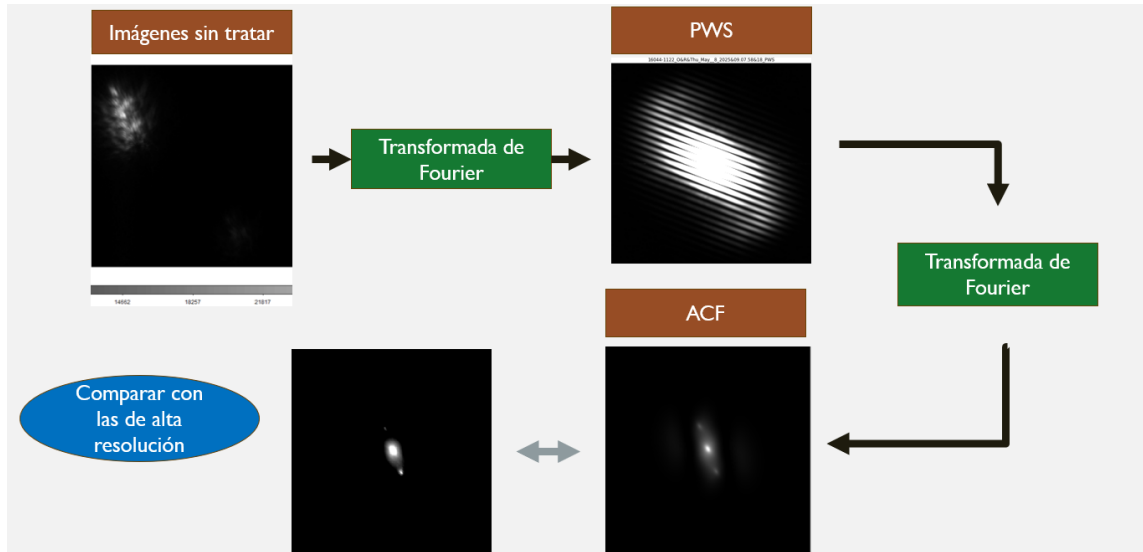


FIGURA 5.1: Ejemplo ilustrativo del método de interferometría speckle. (*Izquierda*) Imagen speckle obtenida mediante exposiciones cortas, donde la turbulencia atmosférica se encuentra congelada. (*Centro arriba*) Espectro de potencias promedio, que muestra el patrón de franjas característico de un sistema binario. (*Abajo centro*) Función de autocorrelación resultante, en la que los picos laterales simétricos respecto al centro corresponden a la separación angular de las componentes. (*Abajo izquierda*) Imagen de alta resolución generada con el método shift-and-add.

5.2 ESPECTRO DE POTENCIAS

El espectro de potencias (PWS) de una imagen speckle es la magnitud al cuadrado de su transformada de Fourier. Este representa la densidad de energía de las distintas frecuencias espaciales contenidas en los speckles. Al promediar los espectros de potencia de muchas imágenes rápidas, se obtiene una cantidad que depende del objeto astronómico observado, separando la firma del objeto de la perturbación atmosférica.

Para una estrella binaria, el espectro de potencia muestra un patrón de franjas cuya separación y orientación están directamente relacionados con la separación angular y el ángulo de posición de las componentes de la binaria. Este método fue utilizado en prácticas de observación modernas, como en el caso de las mediciones realizadas con telescopios del Observatorio de San Pedro Mártir en México y el Observatorio do Pico dos Dias en Brasil, donde se analizaron cientos de pares estelares con separaciones menores a $1''$ mediante esta técnica [Guerrero et al., 2018b][Guerrero et al., 2018a].

5.3 FUNCIÓN DE AUTOCORRELACIÓN

La función de autocorrelación (autocorrelation function, ACF) se obtiene al aplicar la transformada de Fourier inversa al espectro de potencias promedio. Matemáticamente, si $P(u, v)$ es el espectro de potencias promedio, su transformada inversa $ACF(x, y)$ da una función que presenta picos que corresponden a separaciones entre estructuras en la imagen original [Guerrero et al., 2014].

En astronomía de estrellas binarias, la ACF presenta tres picos principales: uno central y dos simétricos alrededor. La distancia entre el pico central y cualquiera de los picos laterales corresponde a la separación angular de los componentes, mientras que la dirección de estos picos da el ángulo de posición. Este enfoque elimina gran parte de la distorsión introducida por la atmósfera y permite mediciones astrométricas precisas incluso cuando las estrellas están muy cerca.

5.4 MAGNITUD DIFERENCIAL

La diferencia de brillo entre las componentes de un sistema binario (magnitud diferencial, Δm) se puede estimar a partir de la contraste de los picos en la función de autocorrelación o del patrón de franjas en el espectro de potencias. En general, cuanto mayor es la diferencia de magnitud entre las componentes, menor es la amplitud relativa del patrón asociado con la secundaria en el espectro de potencias. Medidas recientes han demostrado que, con cámaras de alta sensibilidad como las EMCCD utilizadas en observaciones de speckle, es posible detectar y cuantificar diferencias de magnitud de varios magnitudes incluso en separaciones menores a 1" [Guerrero et al., 2018a][Orlov et al., 2007].

5.5 LÍMITES Y SENSIBILIDAD DEL MÉTODO

La sensibilidad de la interferometría speckle depende de varios factores instrumentales y atmosféricos:

- Difracción y Seeing: El límite teórico de resolución es λ/D , independiente de

la turbulencia, siempre que las exposiciones sean suficientemente cortas para “congelar” el speckle.

- Ruido y número de exposiciones: La relación señal/ruido mejora con el número de exposiciones promediadas en el espectro de potencia, pero el proceso está limitado por la estabilidad atmosférica y el tiempo total disponible.
- Magnitud de las estrellas: Las observaciones reportadas con telescopios de tamaño mediano (1.5–2.1 m) muestran que se pueden resolver binarias con diferencias de magnitud de varios magnitudes y separaciones por debajo de $\sim 0.1\text{--}0.2''$, aunque la precisión decrece para objetos más tenues o para separaciones extremadamente pequeñas.
- Ambigüedad de 180 grados: La función de autocorrelación presenta una ambigüedad de 180 grados en el ángulo de posición, que requiere métodos adicionales como shift-and-add o reconstrucción de imágenes para resolver.

En conjunto, estos límites hacen que la interferometría speckle sea excelente para medir binaridad y astrometría de estrellas cercanas desde tierra, complementando otras técnicas de alta resolución.

DATOS OBSERVACIONALES

6.1 SELECCIÓN DE LAS MUESTRAS YAR Y BS

La selección de las muestras de estrellas young α -rich (Y α R) y blue stragglers (BS) se realizó a partir de catálogos publicados en la literatura, aplicando cortes simples en edad, abundancias químicas y magnitud aparente, con el objetivo de construir muestras homogéneas y observacionalmente accesibles.

Como criterio principal para definir estrellas α -ricas se adoptó la definición propuesta por [Zinn et al. \[2022\]](#), basada en la relación entre las abundancias [Mg/Fe] y [Fe/H]. En particular, se seleccionaron estrellas que cumplen:

Para [Fe/H] < 0:

$$[Mg/Fe] > 0.12 - 0.13[Fe/H] \quad (6.1)$$

Para [Fe/H] \geq 0:

$$[Mg/Fe] > 0.12 \quad (6.2)$$

Adicionalmente, se impuso un límite de edad menor a 5 Gyr, con el fin de seleccionar estrellas que aparecen como jóvenes según modelos estándar de evolución estelar. Siguiendo el mismo criterio aplicado al resto de las muestras, también se restringió la selección a estrellas con magnitudes mayores a 10.

Para una fracción significativa de la muestra YAR se utilizó el catálogo de

Anders et al. [2023], el cual está basado en datos espectroscópicos del sondeo APOGEE. En este caso, se seleccionaron estrellas con edades espectroscópicas calibradas menores o iguales a 5 Gyr, y se aplicaron los mismos criterios químicos definidos por Zinn et al. [2022] utilizando las abundancias $[\text{Fe}/\text{H}]$ y $[\text{Mg}/\text{Fe}]$.

Las muestras adicionales tomadas de los trabajos de Miglio, A. et al. [2021] y Jofré et al. [2023] se seleccionaron directamente de los catálogos publicados por dichos autores, imponiendo de igual forma un corte en magnitud aparente mayor a 10. Estas estrellas presentan propiedades compatibles con objetos rejuvenecidos y se utilizan como muestras complementarias para el análisis observacional.

6.2 OBSERVATORIO ASTRONÓMICO GUILLERMO HARO - INAOE

El Observatorio Astronómico Guillermo Haro (OAGH) es operado por el Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE) y se localiza en Cananea, Sonora, a una altitud aproximada de 2480 m sobre el nivel del mar. El sitio presenta condiciones favorables para la observación astronómica, con baja contaminación lumínica y un número significativo de noches despejadas al año.

El observatorio cuenta con un telescopio reflector de 2.12 m de diámetro, diseñado para observaciones en el óptico y cercano al infrarrojo. Este telescopio ha sido ampliamente utilizado en estudios de estrellas binarias, caracterización espectroscópica y programas de alta resolución angular. Su estabilidad mecánica y óptica lo hace adecuado para técnicas como la interferometría speckle, permitiendo alcanzar resoluciones cercanas al límite de difracción bajo condiciones atmosféricas apropiadas.

6.3 OBSERVATORIO ASTRONÓMICO NACIONAL DE SAN PEDRO MÁRTIR

El Observatorio Astronómico Nacional de San Pedro Mártir (OAN-SPM) es operado por el Instituto de Astronomía de la UNAM y se encuentra en la Sierra

de San Pedro Mártir, Baja California, a una altitud aproximada de 2830 m. Este sitio es reconocido como uno de los mejores lugares de observación astronómica en el hemisferio norte, debido a su excelente calidad de cielo, bajo contenido de vapor de agua y condiciones atmosféricas estables.

Para este trabajo, las observaciones se llevaron a cabo con el telescopio de 2.1 m, equipado con una cámara ultrarrápida iXon 888, una lente Barlow MEADE 4× y una rueda portafiltros. Esta configuración instrumental es adecuada para la aplicación de la técnica de interferometría speckle, ya que permite obtener exposiciones muy cortas con alta relación señal-ruido.

6.4 OBSERVACIONES

En el observatorio Astronómico Guillermo Haro (OAGH) se realizó dos campañas de observaciones:

El año 2023, entre el 24 y 26 de mayo

El año 2025, los días 13, 14, 29 y 30 de junio.

Se observaron 279 objetos, 71 los objetos de calibración, 184 objetos de ciencia, que son las estrellas $Y\alpha R$ y BS.

En el Observatorio Astronómico Nacional de San Pedro Mártir (OAN-SPM) se tuvo una campaña de observación, del 8 al 11 de mayo de 2025.

Se observaron 198 objetos, 37 los objetos de calibración, 161 objetos de ciencia, que son las estrellas $Y\alpha R$ y BS.

Hay que mencionar que algunos objetos se enviaron a ambos observatorios para mejor obtención de datos.

Ambos observatorios tomaron las imágenes con un tiempo de exposición corto, de 20 ms, realizando un cubo de imágenes de 1000 imágenes de 256 px x 256 px, en 3 filtros: R, V e I.

6.5 REDUCCIÓN DE DATOS

Las imágenes fueron corregidas por dark, utilizando imágenes de calibración correspondientes a la misma ganancia empleada durante las observaciones. Este paso permitió eliminar la señal electrónica del detector y homogenizar los datos antes del análisis.

Posteriormente, las imágenes corregidas se procesaron mediante técnicas de interferometría speckle, comenzando con las estrellas de calibración. Para cada objeto se calculó el espectro de potencias (PWS) y la función de autocorrelación (ACF), a partir de las cuales se determinaron la separación angular en píxeles, el ángulo de posición y la magnitud diferencial entre las componentes del sistema binario.

Una vez obtenidos estos parámetros en unidades instrumentales, se procedió a la calibración de la escala de placa. Para ello, se utilizaron sistemas binarios con órbitas bien determinadas, cuyas efemérides fueron obtenidas del Sixth Catalog of Orbits of Visual Binary Stars (ORB6), el cual es una compilación bibliográfica de órbitas visuales asociada al Washington Double Star Catalog.

Las separaciones angulares y ángulos de posición esperados para la época de observación se calcularon a partir de las efemérides de ORB6 y se compararon con los valores medidos en píxeles. Mediante un ajuste de mínimos cuadrados se obtuvo la relación lineal entre separación en píxeles y separación angular en segundos de arco, donde la pendiente de la recta corresponde a la escala de placa. Este procedimiento se realizó de forma independiente para cada filtro utilizado (V, R e I), obteniéndose así las escalas de placa correspondientes a cada banda.

A continuación se muestran las gráficas obtenidas para las escalas de placa, de acuerdo a cada filtro utilizado, en este caso del Observatorio de San Pedro Mártir:

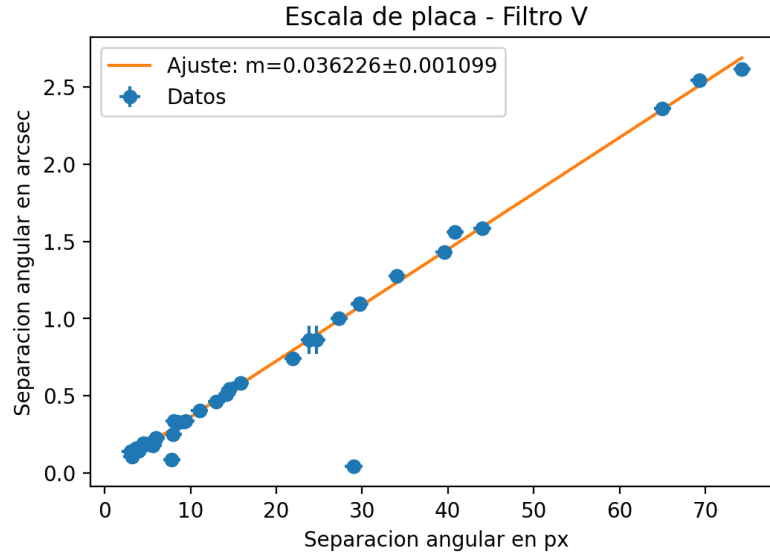


FIGURA 6.1: Escala de placa (arcsec/píxel) para el filtro V de SPM-2025. La gráfica muestra la conversión de píxeles a segundos de arco obtenida a partir de las soluciones astrométricas.

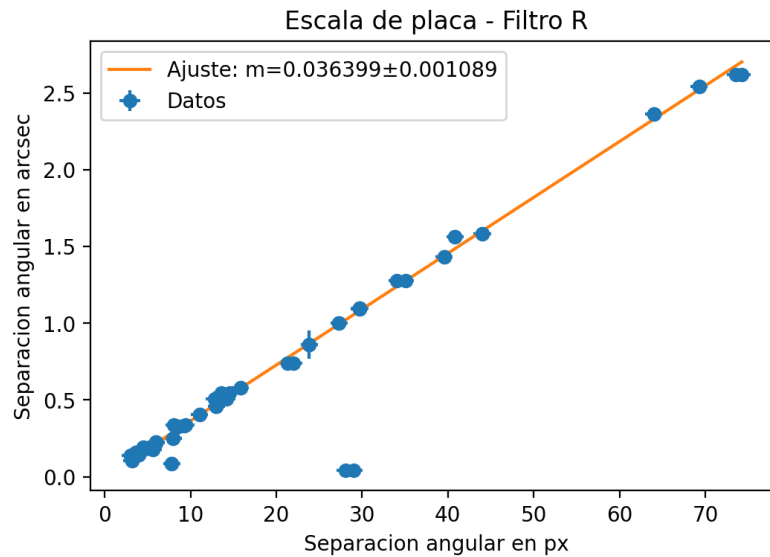


FIGURA 6.2: Escala de placa (arcsec/píxel) para el filtro R de SPM-2025. La gráfica muestra la conversión de píxeles a segundos de arco obtenida a partir de las soluciones astrométricas.

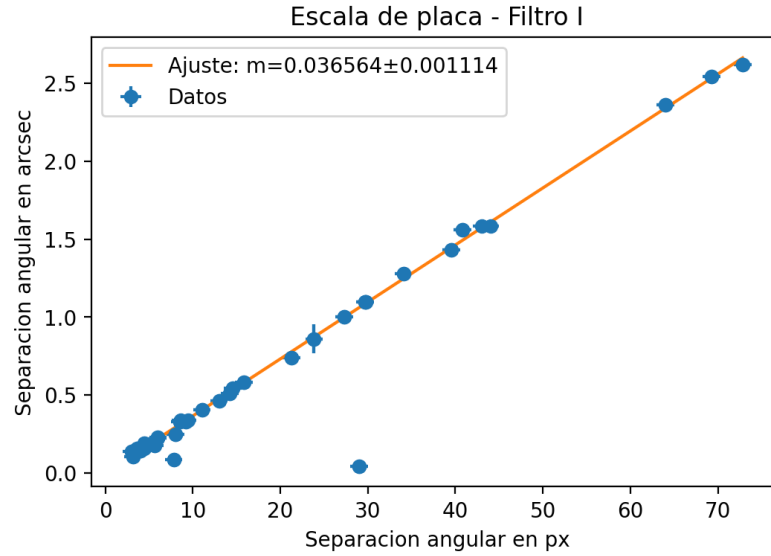


FIGURA 6.3: Escala de placa (arcsec/píxel) para el filtro I de SPM-2025. La gráfica muestra la conversión de píxeles a segundos de arco obtenida a partir de las soluciones astrométricas.

Los valores para cada escala de placa, de acuerdo al año y observatorio, son:

Para OGH - 2023:

- Filtro I: 0.0471 ± 0.0007 [arcsec/píxel]
- Filtro R: 0.0468 ± 0.0006 [arcsec/píxel]
- Filtro V: 0.0467 ± 0.0006 [arcsec/píxel]

Para OGH - 2025:

- Filtro I: 0.0471 ± 0.0007 [arcsec/píxel]
- Filtro R: 0.0468 ± 0.0006 [arcsec/píxel]
- Filtro V: 0.0467 ± 0.0006 [arcsec/píxel]

Para SPM - 2025:

- Filtro I: 0.0365 ± 0.0011 [arcsec/píxel]

- Filtro R: 0.0364 ± 0.0011 [arcsec/píxel]
- Filtro V: 0.0362 ± 0.0011 [arcsec/píxel]

6.6 OBTENCIÓN DE MAGNITUD DIFERENCIAL

La determinación de la magnitud diferencial entre las componentes de cada sistema binario se realizó a partir del análisis de la función de autocorrelación (ACF) y de las imágenes reconstruidas mediante el método de shift-and-add (llamadas HIGH images). En el análisis de la ACF, la presencia de dos picos laterales simétricos introduce una ambigüedad de 180 grados en el ángulo de posición, lo que impide identificar de manera directa el cuadrante real donde se encuentra la estrella secundaria.

Para resolver esta ambigüedad, se utilizaron las imágenes de alta resolución (HIGH). A partir de estas imágenes se identificó el cuadrante correcto de la estrella secundaria, lo que resultó fundamental para determinar correctamente el ángulo de posición con respecto al polo norte celeste.

Una vez identificado el cuadrante correcto, se procedió a la extracción del flujo de la estrella primaria y de la secundaria. Este análisis se realizó de forma individual para cada objeto, evaluando caso por caso la calidad de la detección de la componente secundaria.

La magnitud diferencial se calculó a partir de la razón de flujos entre ambas componentes, utilizando la relación estándar entre magnitud aparente y flujo:

$$\Delta m = -2.5 \log(F_2/F_1) \quad (6.3)$$

donde F_2 y F_1 corresponden al flujo medido de la estrella secundaria y primaria, respectivamente.

Este procedimiento se aplicó específicamente a las estrellas de ciencia, es decir, a las estrellas $Y\alpha R$ y blue stragglers.

6.7 DATOS COMPLEMENTARIOS

6.7.1 GAIA: ASTROMETRÍA

La información proveniente del catálogo de Gaia se utilizó como fuente bibliográfica complementaria. De este repositorio se obtuvieron, para cada uno de los objetos analizados, las magnitudes fotométricas disponibles en los filtros de Gaia, la distancia, y el parámetro de extinción nula (zero extinction) reportado por el catálogo.

Las magnitudes fotométricas de Gaia fueron transformadas al sistema Johnson–Cousins mediante las relaciones empíricas oficiales proporcionadas en la documentación de la misión, mencionadas en [Jordi et al. \[2010\]](#), las cuales son:

$$\begin{aligned}
 G - V &= -0.02704 + 0.01424(G_{BP} - G_{RP}) \\
 &\quad - 0.2156(G_{BP} - G_{RP})^2 \\
 &\quad + 0.01426(G_{BP} - G_{RP})^3
 \end{aligned} \tag{6.4}$$

$$\begin{aligned}
 G - R &= -0.02275 + 0.3961(G_{BP} - G_{RP}) \\
 &\quad - 0.1243(G_{BP} - G_{RP})^2 \\
 &\quad - 0.01396(G_{BP} - G_{RP})^3 \\
 &\quad + 0.003775(G_{BP} - G_{RP})^4
 \end{aligned} \tag{6.5}$$

$$\begin{aligned}
 G - I &= 0.01753 + 0.76(G_{BP} - G_{RP}) \\
 &\quad - 0.0991(G_{BP} - G_{RP})^2
 \end{aligned} \tag{6.6}$$

Estas ecuaciones permiten convertir las magnitudes de Gaia a los filtros V, R e I, que son los utilizados en las observaciones realizadas.

Finalmente, para la extinción, se usó los cálculos mencionados por [Cardelli](#)

[et al. \[1989\]](#), para cada uno de los filtros.

Es importante destacar que las magnitudes aparentes reportadas por Gaia corresponden, en general, a sistemas no resueltos, es decir, representan la suma del flujo de ambas componentes del sistema binario. Por esta razón, dichas magnitudes no pueden ser utilizadas directamente como magnitudes individuales de la estrella primaria o secundaria.

Para resolver este problema, se utilizó la magnitud diferencial obtenida a partir de las observaciones de interferometría speckle. Asumiendo la relación logarítmica estándar entre flujo y magnitud aparente, se descompuso la magnitud total del sistema en las magnitudes aparentes individuales de la estrella primaria y la secundaria, utilizando relaciones basadas en la razón de flujos entre ambas componentes.

Una vez obtenidas las magnitudes aparentes individuales en los filtros V, R e I, y utilizando la distancia proporcionada por Gaia, se calcularon las magnitudes absolutas correspondientes para cada componente del sistema binario, usando la ecuación 2.3. Este procedimiento se aplicó únicamente a aquellos sistemas en los que la binariedad fue detectada por speckle.

CAPÍTULO 7

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

7.1 ASTROMETRÍA DE NUEVOS PARES

A partir de las magnitudes aparentes obtenidas en cada filtro observacional, se calcularon las magnitudes absolutas de todos los sistemas binarios que pudieron resolverse en este trabajo, en los tres filtros fotométricos I,R y V. Para cada sistema se determinaron de manera independiente las magnitudes absolutas de la componente primaria y de la componente secundaria, propagando las incertidumbres asociadas a las mediciones fotométricas.

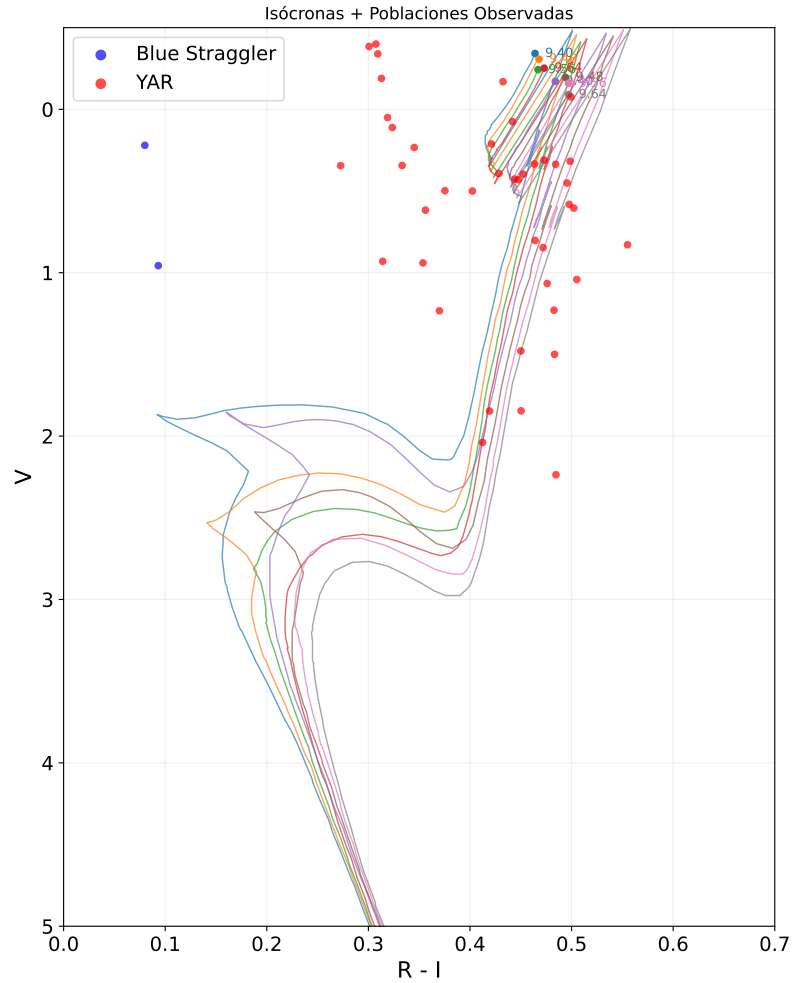


FIGURA 7.1: CMD de las poblaciones de YAR y Blue Stragglers observadas. Las isócronas se muestran de distintos colores, que corresponden a edades diferentes

Se construyó un diagrama color–magnitud (CMD) (ver Figura 7.1) que incluye las estrellas clasificadas como blue stragglers y $Y\alpha R$ observadas en este trabajo, consideradas en todos los casos como sistemas no resueltos. Este diagrama se presenta únicamente con fines de visualización y comparación cualitativa, y se acompaña de isócronas teóricas superpuestas.

Las isócronas mostradas en este diagrama cubren un intervalo de edades comprendido entre $\log(age/yr) = 9.40$ y $\log(age/yr) = 9.64$.

7.2 PARES INTERESANTES

Los sistemas que tienen indicios de binariedad se resumen en una tabla, en la cual se presenta, para cada objeto, el nombre del sistema considerado en su forma no resuelta, la magnitud absoluta de la componente primaria y de la componente secundaria en el filtro V, junto con sus incertidumbres, así como los parámetros astrométricos determinados en este trabajo: la separación angular y su error, el ángulo de posición y su error, y la referencia correspondiente.

TABLA 7.1: Astrometría en la banda V de las estrellas con indicios de binariedad

| ID GAIA | M_{total} | M_{V_1} | Error M_{V_1} | M_{V_2} | Error M_{V_2} | ρ [arcsec] | σ_ρ [arcsec] | θ | σ_θ | Bibliografía |
|--------------------------------|-------------|-----------|-----------------|-----------|-----------------|-----------------|------------------------|----------|-----------------|--------------------------|
| Gaia DR3 2130434517620507136 | -0.86 | -0.37 | 0.04 | 0.23 | 0.10 | 0.59 | 0.05 | 18.43 | 4.53 | Jofré et al. [2023] |
| Gaia DR3 1387298316626173056 | -0.40 | 0.03 | 0.05 | 0.82 | 0.12 | 0.42 | 0.05 | 353.66 | 6.33 | Anders et al. [2023] |
| Gaia DR3 4477214749926383104 † | -0.80 | -0.57 | 0.04 | 0.99 | 0.15 | 1.88 | 0.05 | 345.62 | 1.42 | Risbud et al. [2025] |
| Gaia DR3 3618789089690540160 | -0.08 | 0.41 | 0.05 | 1.04 | 0.10 | 0.27 | 0.05 | 300.96 | 9.83 | Zinn et al. [2022] |
| Gaia DR3 1167199904339965312 | -0.17 | 0.25 | 0.05 | 1.07 | 0.11 | 0.28 | 0.05 | 260.54 | 9.42 | Anders et al. [2023] |
| Gaia DR3 3618789089690540160 | -0.08 | 0.34 | 0.05 | 1.16 | 0.12 | 0.30 | 0.05 | 341.57 | 9.06 | Zinn et al. [2022] |
| Gaia DR3 6245459593207469696 | 0.34 | 0.86 | 0.04 | 1.41 | 0.10 | 0.50 | 0.05 | 68.20 | 5.32 | Grisoni et al. [2024] |
| Gaia DR3 2100001689331818368 | 0.32 | 0.78 | 0.05 | 1.46 | 0.11 | 0.19 | 0.05 | 194.04 | 13.90 | Jofré et al. [2023] |
| Gaia DR3 1447093783330220160 | 0.34 | 0.78 | 0.04 | 1.52 | 0.11 | 0.27 | 0.05 | 300.96 | 9.83 | Anders et al. [2023] |
| Gaia DR3 2143001179613094656 | 0.40 | 0.86 | 0.04 | 1.55 | 0.10 | 3.36 | 0.06 | 106.16 | 0.80 | Anders et al. [2023] |
| Gaia DR3 1447093783330220160 | 0.34 | 0.73 | 0.05 | 1.63 | 0.12 | 0.55 | 0.05 | 70.02 | 4.90 | Anders et al. [2023] |
| Gaia DR3 1629957444795170816 | 0.34 | 0.73 | 0.05 | 1.64 | 0.12 | 1.20 | 0.05 | 69.44 | 2.24 | Anders et al. [2023] |
| Gaia DR3 2610889904611901696 | 0.46 | 0.85 | 0.05 | 1.74 | 0.12 | 0.30 | 0.05 | 38.66 | 8.95 | Anders et al. [2023] |
| Gaia DR3 3617477303598894336 | 0.50 | 0.91 | 0.05 | 1.75 | 0.12 | 0.34 | 0.05 | 254.05 | 7.87 | Anders et al. [2023] |
| Gaia DR3 2100313641395786752 | 0.94 | 1.37 | 0.05 | 2.14 | 0.12 | 0.44 | 0.05 | 302.01 | 6.07 | Miglio, A. et al. [2021] |
| Gaia DR3 4283994994589339776 † | 0.96 | 1.37 | 0.05 | 2.21 | 0.12 | 1.04 | 0.05 | 97.77 | 2.58 | Qin et al. [2023] |
| Gaia DR3 2100234510918046592 | 0.83 | 1.18 | 0.05 | 2.22 | 0.13 | 0.38 | 0.05 | 172.87 | 7.11 | Jofré et al. [2023] |
| Gaia DR3 1648467826128759424 | 0.93 | 1.32 | 0.05 | 2.24 | 0.12 | 0.67 | 0.05 | 65.22 | 4.00 | Anders et al. [2023] |
| Gaia DR3 6253196478580743296 | 1.27 | 1.69 | 0.05 | 2.51 | 0.12 | 0.28 | 0.05 | 170.54 | 9.42 | Zinn et al. [2022] |
| Gaia DR3 6243129178318692480 | 1.67 | 2.10 | 0.05 | 2.88 | 0.12 | 0.33 | 0.05 | 0.00 | 8.19 | Zinn et al. [2022] |
| Gaia DR3 2127890556952050560 | 2.24 | 2.74 | 0.04 | 3.32 | 0.10 | 0.37 | 0.05 | 0.00 | 7.16 | Miglio, A. et al. [2021] |

† Blue Straggler

En el diagrama color–magnitud construido a partir de 5 sistemas binarios resueltos: Gaia DR3 1648467826128759424, Gaia DR3 4283994994589339776, Gaia DR3 4477214749926383104, Gaia DR3 2143001179613094656, Gaia DR3 6243129178318692480 (ver Figura 7.2), se observa que, una vez separadas las componentes, las estrellas $Y\alpha R$ aparecen dispersas a lo largo del CMD, principalmente en la región correspondiente a las gigantes rojas. Esta dispersión es mayor que la observada en el diagrama de los sistemas no resueltos, lo que indica que la separación de las componentes modifica de forma importante su posición en el plano color–magnitud. Las estrellas que presentan el color rojo y verde son las blue stragglers que se resolvieron, sin embargo, no todas sus componentes se acoplan a alguna isócrona ajustada.

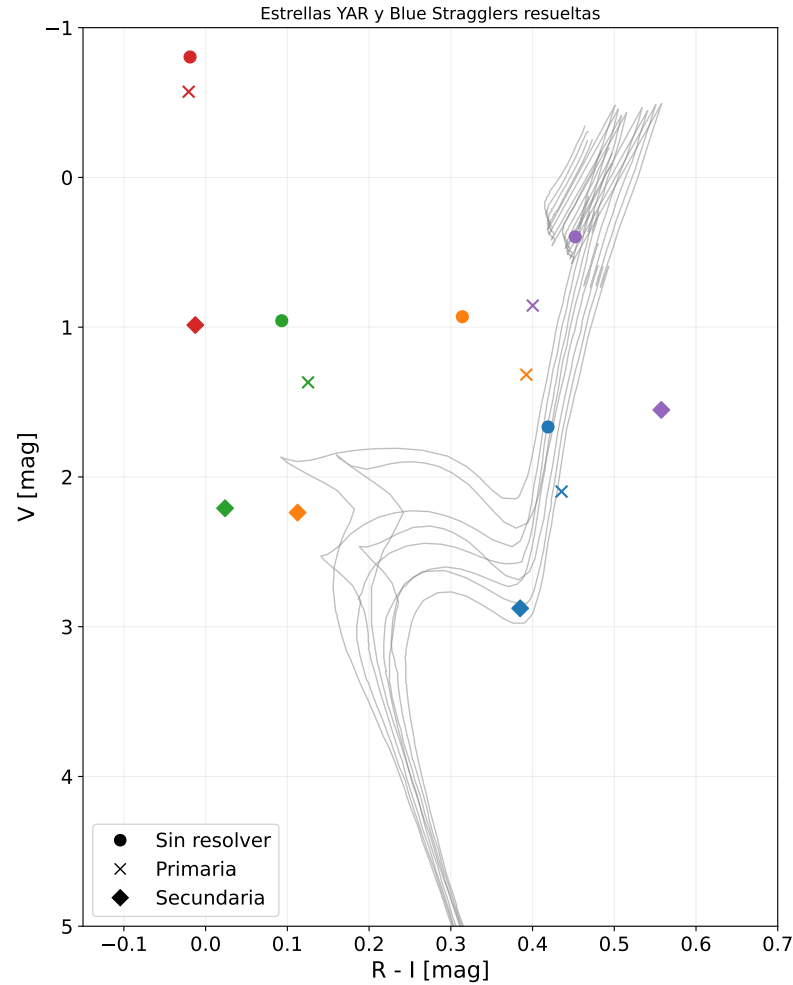


FIGURA 7.2: CMD de 5 objetos más prometedores ya resueltos por binariedad. Los puntos indican del sistema binario sin resolver, las cruces son de la estrella primaria resuelta y los diamantes de la estrella secundaria resuelta. Los colores indican la correspondencia de su resolución. Se muestran las isócronas de color gris, solo para visualización de la dispersión de las estrellas.

Una posible explicación de esta dispersión es que el método de interferometría speckle, en la función de autocorrelación (ACF), puede verse afectado por ruido, estructuras residuales en los patrones interferométricos o variaciones atmosféricas, lo que en determinadas circunstancias puede producir señales que imiten la presencia de un par estelar. Por esta razón, aunque la presencia de una señal en la ACF respalda la clasificación de estos objetos como candidatos a sistemas binarios, la confirmación visual no es tan clara en todos los casos; no obstante, se mantienen como candidatos dentro del análisis.

Dentro de estos 21 sistemas, uno muestra de forma clara y consistente la pre-

sencia de dos componentes: Gaia DR3 1648467826128759424, catalogada como $Y\alpha R$. En este objeto la binariedad se visualiza con mayor definición, lo que lo convierte en el caso con mayor nivel de confianza dentro de la muestra. Los 20 sistemas restantes presentan señales tenues pero distinguibles en la ACF, por lo que se consideran candidatos a binariedad.

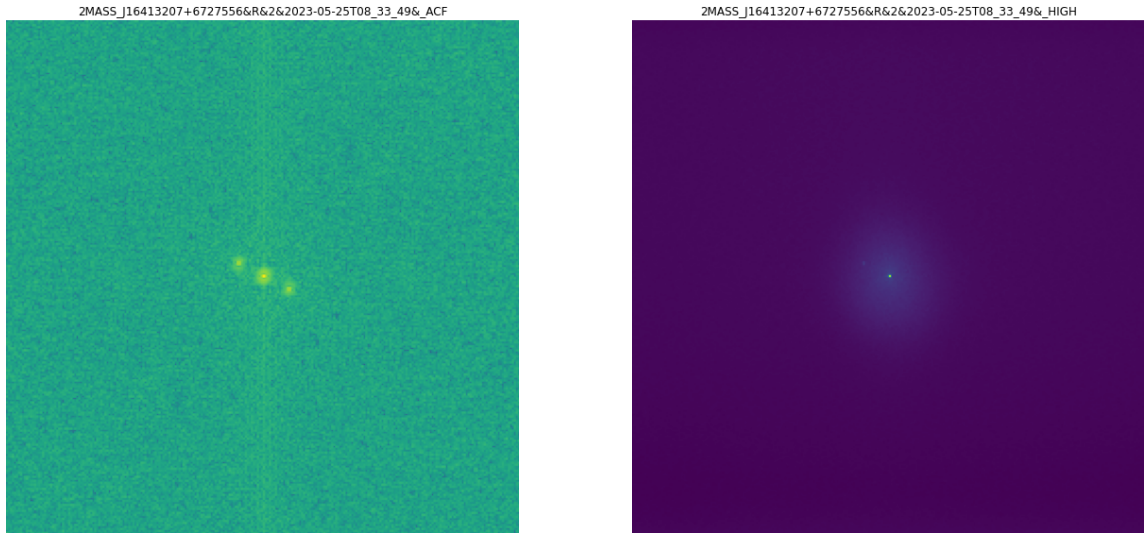


FIGURA 7.3: Gaia DR3 1648467826128759424. Imagen izquierda es el ACF, mientras que la imagen derecha es el HIGH. Se puede notar la componente binaria.

TABLA 7.2: Metalicidades reportadas de la estrella Gaia DR3 1648467826128759424

| ID-APOGEE | ID-GAIA | Mg/Fe [dex] | Fe/H [dex] | Edad-Anders [Gyr] |
|--------------------|------------------------------|-------------------|--------------------|-------------------|
| 2M16413207+6727556 | Gaia DR3 1648467826128759424 | 0.381 ± 0.016 | -0.727 ± 0.008 | 2.7 ± 0.6 |

En la tabla 7.2 se tiene los datos extraídos de los catálogos de APOGEE y de Anders et al. [2023] de este sistema binario resuelto.

La figura 7.4 muestra el sistema resuelto Gaia DR3 1648467826128759424 en una gráfica CMD, junto a la familia de isócronas que comprende el mismo rango de edades de la Figura 7.1. Anders et al. [2023] señaló a este objeto Gaia DR3 1648467826128759424 como candidata a $Y\alpha R$, al encontrar una discrepancia significativa entre la edad estimada a partir de sus abundancias químicas y la edad obtenida mediante astrosismología. Los datos resueltos de este sistema binario se encuentra en la tabla 7.1. Aunque la binariedad fue confirmada mediante interferometría speckle, la curva de luz obtenida por TESS (Transiting Exoplanet Survey Satellite) no muestra eclipses ni variaciones periódicas evidentes que permitan clasificarlo como un sistema binario eclipsante (ver Figura 7.5).

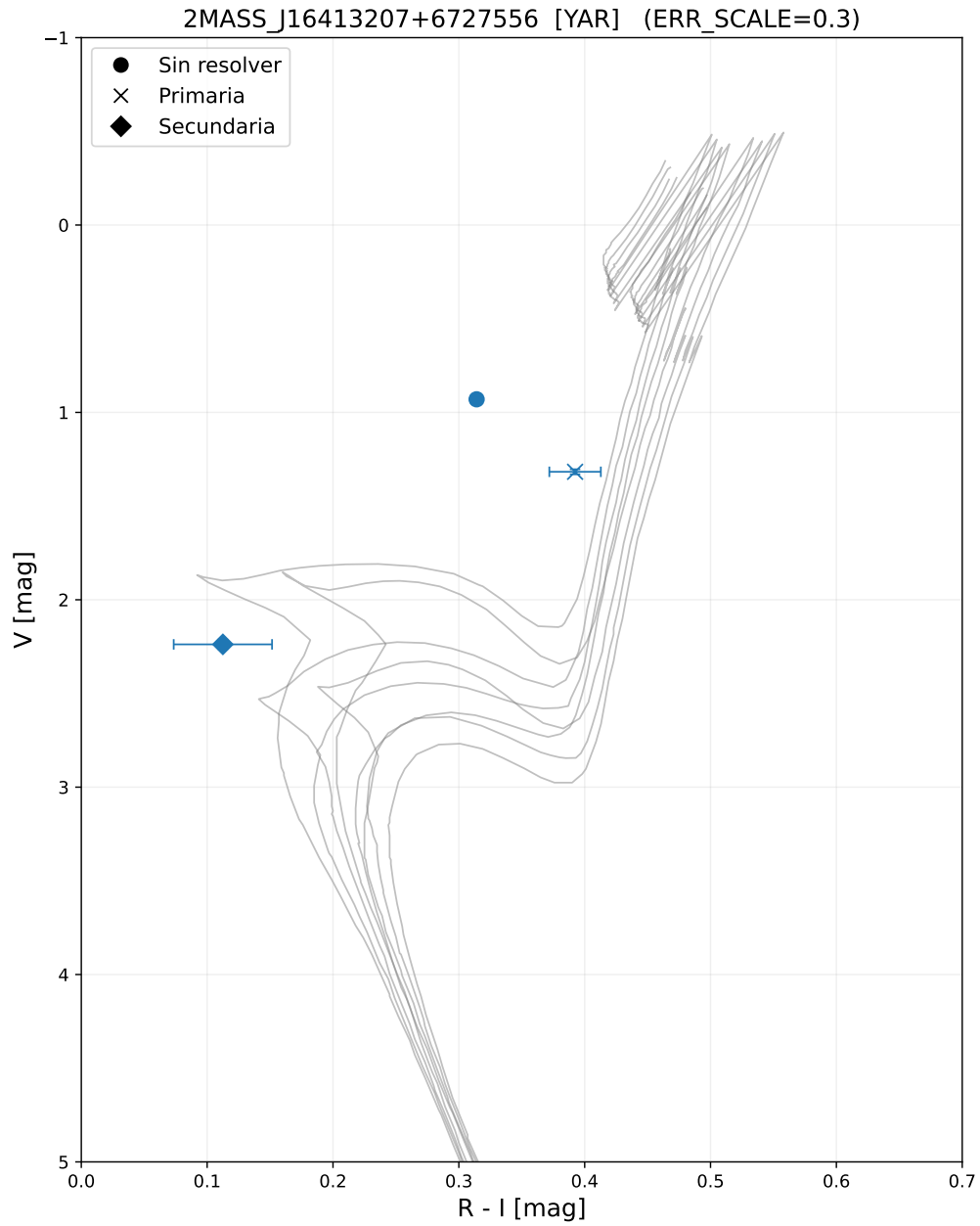


FIGURA 7.4: CMD del sistema binario resuelto Gaia DR3 1648467826128759424 con escalado de error para mejor visualización.

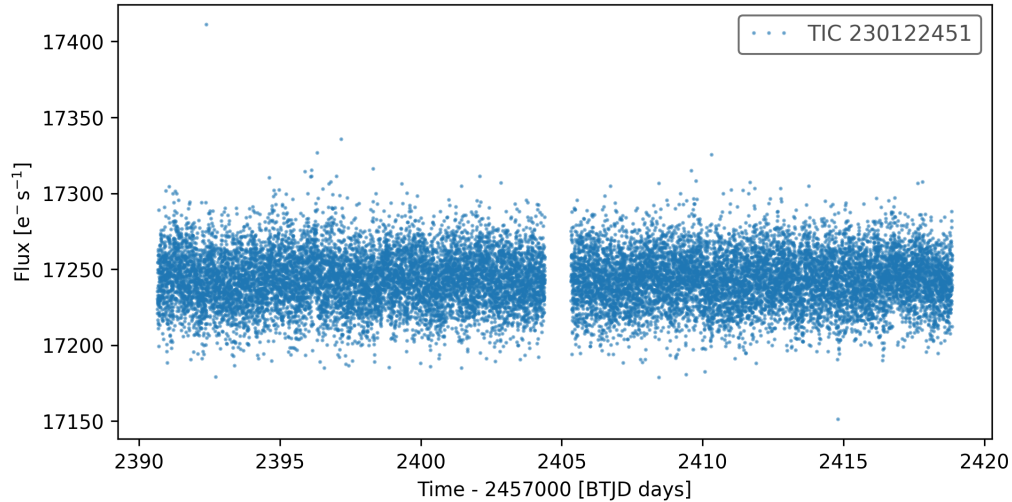


FIGURA 7.5: Curva de luz del objeto Gaia DR3 1648467826128759424 obtenida por TESS.

Considerando la muestra total de objetos de ciencia analizados, los 21 sistemas con indicios de binariedad representan aproximadamente un 6.5% de la muestra observada. Esta fracción depende de los límites ya antes mencionados.

Si bien solo esta fracción mostró evidencia observable de binariedad, esto no implica la ausencia de sistemas binarios adicionales entre las estrellas $Y\alpha R$ y blue stragglers analizadas. La capacidad de detección está condicionada por la resolución angular alcanzada, el contraste de magnitudes y la calidad atmosférica durante las noches de observación. Aún así, el método de interferometría speckle ha demostrado ser capaz de revelar binariedad en objetos que previamente no habían sido reportados como tales (como el caso de Gaia DR3 1648467826128759424), lo que respalda su utilidad para este tipo de estudios.

Estos resultados son relevantes en el contexto de los escenarios propuestos para las estrellas young alpha-rich y para las blue stragglers, en los que la binariedad juega un papel importante en la interpretación de su origen [Chiappini et al., 2015] [Martig et al., 2015]. Por esta razón, la hipótesis de binariedad para estos objetos debe analizarse con mayor detalle en estudios futuros, idealmente con observaciones bajo mejores condiciones atmosféricas y con instrumentación que permita una detección más confiable de sistemas binarios cercanos.

CAPÍTULO 8

CONCLUSIONES

8.1 SÍNTESIS

En este trabajo se llevó a cabo la detección y el análisis de sistemas binarios mediante observaciones interferométricas, combinando información fotométrica y astrométrica. A partir de las magnitudes aparentes medidas en los filtros I, R y V, se calcularon las magnitudes absolutas de las componentes primaria y secundaria para los sistemas que pudieron resolverse, incluyendo la propagación de sus incertidumbres.

El análisis de los diagramas color–magnitud permitió comparar la posición de los sistemas considerados como fuentes no resueltas con la distribución de sus componentes individuales una vez resueltos. En general, se encontró que la descomposición de los sistemas modifica de forma importante su ubicación en el CMD, lo que puede tener un impacto directo en la interpretación de sus propiedades físicas y evolutivas.

En particular, en el CMD correspondiente a los sistemas resueltos se observa una dispersión considerable, principalmente en la región de las gigantes rojas, lo que pone de manifiesto la necesidad de evaluar con cautela la naturaleza binaria de los objetos identificados.

8.2 LIMITACIONES

Los principales límites de este estudio están relacionados con la calidad de las observaciones y con las capacidades de la instrumentación utilizada. En varios casos, la detección de binariedad se basa en señales débiles en la función de autocorrelación, las cuales pueden verse afectadas por ruido, por efectos instrumentales y por las condiciones atmosféricas durante las observaciones.

Como consecuencia, algunos de los sistemas clasificados como binarios podrían corresponder a detecciones falsas. En la muestra analizada, solo un sistema presenta una señal clara de binariedad, mientras que el resto debe considerarse como candidatos a sistemas binarios.

Adicionalmente, el tamaño de la muestra es limitado, lo que impide realizar un análisis estadístico más robusto sobre la distribución de las componentes en el diagrama color–magnitud y sobre la relación entre binariedad y tipo estelar.

8.3 TRABAJO A FUTURO

Como continuación de este trabajo, es necesario confirmar la naturaleza binaria de los sistemas identificados mediante nuevas observaciones, idealmente bajo mejores condiciones atmosféricas y con instrumentación de mayor estabilidad y sensibilidad.

Un análisis más detallado de la función de autocorrelación, así como la incorporación de técnicas complementarias de detección de binariedad, permitiría reducir la probabilidad de falsos positivos y mejorar la confiabilidad de los resultados.

Finalmente, resulta especialmente importante profundizar en el estudio de la hipótesis de binariedad en el contexto de las estrellas young alpha-rich y de las blue stragglers, ya que la confirmación de sistemas binarios en esta población puede aportar información clave sobre sus mecanismos de formación y evolución. Para ello, se requieren campañas observacionales más extensas y un análisis combinado con información espectroscópica y astrométrica de mayor precisión.

REFERENCIAS

- Leandro Althaus, Alejandro Córscico, Jordi Isern, and Enrique Garcia-Berro. Evolutionary and pulsational properties of white dwarf stars. *Astronomy and Astrophysics Review*, 18:471–566, 10 2010. doi: 10.1007/s00159-010-0033-1.
- F. Anders, P. Gispert, B. Ratcliffe, C. Chiappini, I. Minchev, S. Nepal, A. B. A. Queiroz, J. A. S. Amarante, T. Antoja, G. Casali, L. Casamiquela, A. Khalatyan, A. Miglio, H. Perottoni, and M. Schultheis. Spectroscopic age estimates for APOGEE red-giant stars: Precise spatial and kinematic trends with age in the Galactic disc. , 678:A158, October 2023. doi: 10.1051/0004-6361/202346666.
- Jason A. Cardelli, Geoffrey C. Clayton, and John S. Mathis. The Relationship between Infrared, Optical, and Ultraviolet Extinction. , 345:245, October 1989. doi: 10.1086/167900.
- Carrasco-Varela, Francisco F., Nayak, Prasanta K., and Puzia, Thomas H. Beyond the main sequence: Binary evolution pathways to blue stragglers in the gaia era - i. galactic open and globular clusters. *AA*, 699:A142, 2025. doi: 10.1051/0004-6361/202452195. URL <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202452195>.
- V. Cerqui, M. Haywood, P. Di Matteo, D. Katz, and F. Royer. Stragglers of the thick disc. , 676:A108, August 2023. doi: 10.1051/0004-6361/202346334.
- C. Chiappini, F. Anders, T. S. Rodrigues, A. Miglio, J.án@, B. Mosser, L. Girardi, M. Valentini, A. Noels, T. Morel, I. Minchev, M. Steinmetz, B. X. Santiago, M. Schultheis, M. Martig, L. N. da Costa, M. A. G. Maia, C. Allende Prieto, R. de Assis Peralta, S. Hekker, N.βl@, T. Kallinger, R. A. García, S. Mathur, F. Baudin, T. C. Beers, K. Cunha, P. Harding, J. Holtzman, S. Majewski, Sz. Mészáros, D. Nidever, K. Pan, R. P. Schiavon, M. D. Shetrone, D. P. Schneider, and K. Stassun. Young $[\alpha/\text{Fe}]$ -enhanced stars discovered by CoRoT and APOGEE: What is their origin? , 576:L12, April 2015. doi: 10.1051/0004-6361/201525865.
- Katia Cunha, Kris Sellgren, Verne V Smith, Solange V Ramirez, Robert D Blum, and Donald M Terndrup. Chemical abundances of luminous cool stars in the galactic center from high-resolution infrared spectroscopy. *The Astrophysical Journal*, 669 (2):1011, 2007.

- Payel Das, Keith Hawkins, and Paula Jofré. Ages and kinematics of chemically selected, accreted milky way halo stars. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 493(4):5195–5207, 02 2020. ISSN 0035-8711. doi: 10.1093/mnras/stz3537. URL <https://doi.org/10.1093/mnras/stz3537>.
- Ben Davies, Livia Origlia, Rolf-Peter Kudritzki, Don F. Figer, R. Michael Rich, and Francisco Najarro. The Chemical Abundances in the Galactic Center from the Atmospheres of Red Supergiants. , 694(1):46–55, March 2009. doi: 10.1088/0004-637X/694/1/46.
- Brian D. Davis, Howard E. Bond, Michael H. Siegel, and Robin Ciardullo. A census of above-horizontal-branch stars in galactic globular clusters*. *The Astrophysical Journal*, 926(1):99, feb 2022. doi: 10.3847/1538-4357/ac4224. URL <https://doi.org/10.3847/1538-4357/ac4224>.
- Francesco R. Ferraro, Barbara Lanzoni, and Emanuele Dalessandro. The “dynamical clock”: dating the internal dynamical evolution of star clusters with blue straggler stars. *Rendiconti Lincei. Scienze Fisiche e Naturali*, 31(1):19–31, February 2020. ISSN 1720-0776. doi: 10.1007/s12210-020-00873-2. URL <http://dx.doi.org/10.1007/s12210-020-00873-2>.
- Richard de Grijs, Weijia Sun, Chengyuan Li, and Licai Deng. Blue straggler populations beyond the milky way. *Communications of the Byurakan Astrophysical Observatory*, 65(2):193–199, 2018. ISSN 2579-2776. doi: 10.52526/25792776-2018.2.2-193.
- V. Grisoni, C. Chiappini, A. Miglio, K. Brogaard, G. Casali, E. Willett, J. Montalbán, A. Stokholm, J. S. Thomsen, M. Tailo, M. Matteuzzi, M. Valentini, Y. Elsworth, and B. Mosser. VizieR Online Data Catalog: Young alpha-rich stars in the Galaxy from K2 (Grisoni+, 2024). VizieR On-line Data Catalog: J/A+A/683/A111. Originally published in: 2024A&A...683A.111G, November 2023.
- V. Grisoni, C. Chiappini, A. Miglio, K. Brogaard, G. Casali, E. Willett, J.án@, A. Stokholm, J. S. Thomsen, M. Tailo, M. Matteuzzi, M. Valentini, Y. Elsworth, and B. Mosser. K2 results for “young” α -rich stars in the Galaxy. , 683:A111, March 2024. doi: 10.1051/0004-6361/202347440.
- C. A. Guerrero, V. G. Orlov, M. A. Monroy-Rodríguez, and V. V. Voitsekhovich. Stellar Multiplicity of the Open Cluster ASCC 113. , 147(2):28, February 2014. doi: 10.1088/0004-6256/147/2/28.
- C. A. Guerrero, V. G. Orlov, M. Borges Fernandes, and F. Ángeles@. Speckle interferometry at the OAN-SPM México: astrometry of double stars measured in 2011. , 475(2):1725–1735, April 2018a. doi: 10.1093/mnras/stx3173.
- C. A. Guerrero, T. B. Souza, R. P. Campos, M. Borges Fernandes, and J. C. N. Campagnolo. First speckle interferometric measurements at the Observatório do

- Pico dos Dias of the Laboratório Nacional de Astrofísica. , 481(4):5307–5314, December 2018b. doi: 10.1093/mnras/sty2629.
- Vikrant V Jadhav and Annapurni Subramaniam. Blue straggler stars in open clusters using gaia: dependence on cluster parameters and possible formation pathways. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 507(2):1699–1709, 08 2021. ISSN 0035-8711. doi: 10.1093/mnras/stab2264. URL <https://doi.org/10.1093/mnras/stab2264>.
- P. Jofré, A. Jorissen, C. Aguilera-Gómez, S. Van Eck, J. Tayar, M. Pinsonneault, J. Zinn, S. Goriely, and H. Van Winckel. Cannibals in the thick disk. II. Radial-velocity monitoring of the young α -rich stars. , 671:A21, March 2023. doi: 10.1051/0004-6361/202244524.
- C. Jordi, M. Gebran, J. M. Carrasco, J. de Bruijne, H. Voss, C. Fabricius, J. Knude, A. Vallenari, R. Kohley, and A. Mora. Gaia broad band photometry. , 523:A48, November 2010. doi: 10.1051/0004-6361/201015441.
- Hannu Karttunen, Pekka Kröger, Heikki Oja, Markku Poutanen, and Karl Johan Donner. *Fundamental Astronomy*. 2017. doi: 10.1007/978-3-662-53045-0.
- A. Labeyrie. Attainment of Diffraction Limited Resolution in Large Telescopes by Fourier Analysing Speckle Patterns in Star Images. , 6:85, May 1970.
- Li, Chunyan, Zhong, Jing, Qin, Songmei, and Chen, Li. The new detection of blue straggler stars in 50 open clusters using gaia dr3. *AA*, 672:A81, 2023. doi: 10.1051/0004-6361/202244998. URL <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202244998>.
- R. Earle Luck and David L. Lambert. The Distribution of the Elements in the Galactic Disk. III. A Reconsideration of Cepheids from $l = 30^\circ$ to 250° . , 142(4):136, October 2011. doi: 10.1088/0004-6256/142/4/136.
- Marie Martig, Hans-Walter Rix, Victor Silva Aguirre, Saskia Hekker, Benoit Mosser, Yvonne Elsworth, Jo Bovy, Dennis Stello, Friedrich Anders, Rafael A. García, Jamie Tayar, Thaíse S. Rodrigues, Sarbani Basu, Ricardo Carrera, Tugdual Ceillier, William J. Chaplin, Cristina Chiappini, Peter M. Frinchaboy, D. A. García-Hernández, Fred R. Hearty, Jon Holtzman, Jennifer A. Johnson, Steven R. Majewski, Savita Mathur, Szabolcs Mészáros, Andrea Miglio, David Nidever, Kaike Pan, Marc Pinsonneault, Ricardo P. Schiavon, Donald P. Schneider, Aldo Serenelli, Matthew Shetrone, and Olga Zamora. Young α -enriched giant stars in the solar neighbourhood. , 451(2):2230–2243, August 2015. doi: 10.1093/mnras/stv1071.
- Francesca Matteucci. *The chemical evolution of the Galaxy*, volume 253. 2001. doi: 10.1007/978-94-010-0967-6.
- Francesca Matteucci, E. Spitoni, A. Rojas-Arriagada, and M. Schultheis. The chemical evolution of the Bulge. In *The Galactic Bulge at the Crossroads*, page 25, December 2018. doi: 10.5281/zenodo.2595366.

- W. H. McCrea. Extended main-sequence of some stellar clusters. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 128(2):147–155, 07 1964. ISSN 0035-8711. doi: 10.1093/mnras/128.2.147. URL <https://doi.org/10.1093/mnras/128.2.147>.
- A. Micali, F. Matteucci, and D. Romano. The chemical evolution of the milky way: the three infall model. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 436(2):1648–1658, 10 2013. ISSN 0035-8711. doi: 10.1093/mnras/stt1681. URL <https://doi.org/10.1093/mnras/stt1681>.
- Miglio, A., Chiappini, C., Mackereth, J. T., Davies, G. R., Brogaard, K., Casagrande, L., Chaplin, W. J., Girardi, L., Kawata, D., Khan, S., Izzard, R., Montalbán, J., Mosser, B., Vincenzo, F., Bossini, D., Noels, A., Rodrigues, T., Valentini, M., and Mandel, I. Age dissection of the milky way discs: Red giants in the kepler field. *AA*, 645:A85, 2021. doi: 10.1051/0004-6361/202038307. URL <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202038307>.
- V. G. Orlov, V. V. Voitsekhovich, L. J. Sánchez, and F. Garfias. First Speckle Interferometry Measurements of Binary Stars at the OAN-Tonantzintla. , 43: 137–140, April 2007.
- Songmei Qin, Jing Zhong, Tong Tang, and Li Chen. Hunting for Neighboring Open Clusters with Gaia DR3: 101 New Open Clusters within 500 pc. , 265(1):12, March 2023. doi: 10.3847/1538-4365/acadd6.
- Rain, M. J., Ahumada, J. A., and Carraro, G. A new, gaia-based, catalogue of blue straggler stars in open clusters. *AA*, 650:A67, 2021. doi: 10.1051/0004-6361/202040072. URL <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202040072>.
- Dhanraj Risbud, Vikrant V. Jadhav, and Pavel Kroupa. Tidal tails of nearby open clusters: I. Mapping with Gaia DR3. , 694:A258, February 2025. doi: 10.1051/0004-6361/202453302.
- A. R. Sandage. The color-magnitude diagram for the globular cluster M 3. , 58: 61–75, January 1953. doi: 10.1086/106822.
- W.-X. Sun, Y. Huang, H.-F. Wang, C. Wang, M. Zhang, X.-Y. Li, B.-Q. Chen, H.-W. Zhang, D.-D. Wei, D.-K. Jiang, and X.-W. Liu. Mapping the galactic disk with the lamost and gaia red clump sample. v. on the origin of the “young” [Fe]-enhanced stars. *The Astrophysical Journal*, 903(1):12, oct 2020. doi: 10.3847/1538-4357/abb1b7. URL <https://doi.org/10.3847/1538-4357/abb1b7>.
- Daisuke Toyouchi and Masashi Chiba. On the chemical and structural evolution of the galactic disk. *The Astrophysical Journal*, 788(1):89, may 2014. doi: 10.1088/0004-637X/788/1/89. URL <https://doi.org/10.1088/0004-637X/788/1/89>.
- C. J. Walcher, P. R. T. Coelho, A. Gallazzi, G. Bruzual, S. Charlot, and C. Chiappini. Abundance patterns in early-type galaxies: is there a “knee” in the [Fe/H] vs. [α /Fe] relation? , 582:A46, October 2015. doi: 10.1051/0004-6361/201525924.

- Chen Wang and Taeho Ryu. Blue straggler stars, 2025. URL <https://arxiv.org/abs/2410.10314>.
- Li Wang, Chengyuan Li, Long Wang, Chenyu He, and Chen Wang. On the origin of the split main sequences of the young massive cluster ngc 1856. *The Astrophysical Journal*, 949(2):53, may 2023. doi: 10.3847/1538-4357/accae0. URL <https://doi.org/10.3847/1538-4357/accae0>.
- Jack T. Warfield, Joel C. Zinn, Jessica Schonhut-Stasik, James W. Johnson, Marc H. Pinsonneault, Jennifer A. Johnson, Dennis Stello, Rachael L. Beaton, Yvonne Elsworth, Rafael A. García, Savita Mathur, Benoît Mosser, Aldo Serenelli, and Jamie Tayar. The apo-k2 catalog. ii. accurate stellar ages for red giant branch stars across the milky way. *The Astronomical Journal*, 167(5):208, apr 2024. doi: 10.3847/1538-3881/ad33bb. URL <https://doi.org/10.3847/1538-3881/ad33bb>.
- Joel C. Zinn, Dennis Stello, Yvonne Elsworth, Rafael A. García, Thomas Kallinger, Savita Mathur, Benoît Mosser, Marc Hon, Lisa Bugnet, Caitlin Jones, Claudia Reyes, Sanjib Sharma, Ralph Schönrich, Jack T. Warfield, Rodrigo Luger, Andrew Vanderburg, Chiaki Kobayashi, Marc H. Pinsonneault, Jennifer A. Johnson, Daniel Huber, Sven Buder, Meredith Joyce, Joss Bland-Hawthorn, Luca Casagrande, Geraint F. Lewis, Andrea Miglio, Thomas Nordlander, Guy R. Davies, Gayandhi De Silva, William J. Chaplin, and Victor Silva Aguirre. The k2 galactic archaeology program data release 3: Age-abundance patterns in c1–c8 and c10–c18. *The Astrophysical Journal*, 926(2):191, feb 2022. doi: 10.3847/1538-4357/ac2c83. URL <https://doi.org/10.3847/1538-4357/ac2c83>.