

Estudio del cúmulo abierto NGC-2287 mediante de diagramas magnitud-color

Simón González López

27 de febrero de 2026

Resumen

En este informe se presentan los resultados del estudio por fotometría de apertura del cúmulo abierto NGC-2287 o M41. Se construyó un código en Python para detectar las estrellas y calcular la magnitud aparente para hacer fotometría de apertura, se encontraron 351 estrellas comunes en los filtros azul, rojo y verde de los datos tomados localmente. Se construyeron diagramas de magnitud-color y se compararon con datos tomados del catálogo Gaia DR3. Si bien es cierto que los datos no son directamente comparables por cuestiones de extinción atmosférica, y sensibilidad, y por tanto el número de estrellas observadas es considerablemente menor, se encontró que existe una gran cantidad de estrellas en M41 que siguen la secuencia principal, lo que implica que son estrellas jóvenes que están produciendo energía a partir de la fusión de Hidrógeno en Helio. Asimismo, se encontró que gran parte de las estrellas de M41 son poco calientes y por tanto emiten radiación mayoritariamente en longitudes de onda largas. Para acceder al código, visite el repositorio en GitHub en el siguiente link <https://n9.cl/4nr8c>.

1. Introducción

Los cúmulos abiertos son sistemas astrofísicos, de entre 10^2 y 10^4 estrellas, ideales para el estudio de la evolución estelar, que sus estrellas se formaron al mismo tiempo, aproximadamente, a partir de la misma nube molecular, por lo que sus composiciones químicas son similares y se encuentran a distancias similares. Una forma de estudiar las estrellas de los cúmulos abiertos es mediante diagramas magnitud-color, los cuales permiten identificar estrellas en la secuencia principal, para así estimar otras propiedades físicas como la temperatura, luminosidad y la distribución espectral de estrellas que conforman el cúmulo [1, 2]. Las estrellas en la secuencia principal se caracterizan por ser estrellas jóvenes que fusionan Hidrógeno en Helio como fuente de energía, las estrellas más viejas por otra parte, fusionan helio en elementos más pesados.

El cúmulo abierto NGC-2287 o M41, es un objeto cercano ubicado a una distancia de 725pc, con un diámetro aproximado de 8pc. Además es un cúmulo joven de 200 millones de años que además presenta poca extinción estelar [3]. Debido a estas características, M41 es ideal para realizar estudios fotométricos con el objetivo de caracterizar la secuencia principal de estrellas en este.

La fotometría de apertura es una técnica observational ampliamente utilizada para estimar el flujo y la magnitud aparente de estrellas en imágenes astronómicas. El cálculo de estas cantidades es de vital importancia, pues permite también calcular la distancia a dichas estrellas. La fotometría de apertura se basa en la integración del flujo dentro de una región circular centrada en la estrella, corrigiendo la señal del fondo mediante un anillo de cielo concéntrico a la estrella de interés [4]. Aunque la técnica es conceptualmente sencilla, aplicarla con muy buena precisión representa un gran desafío. Esto especialmente si las mediciones son hechas desde tierra, pues los resultados se ven afectados por la extinción atmosférica, la cual reduce el flujo estelar detectado y en consecuencia aumenta la magnitud aparente de las estrellas.

Por otro lado, las misiones espaciales han permitido obtener catálogos fotométricos con una gran precisión. En particular, el satélite Gaia ubicado en el punto de Lagrange L2, operado por la Agencia Espacial Europea, ha proporcionado mediciones de posiciones, paralajes, movimientos propios y fotometría para muchas estrellas en nuestra galaxia. El tercer Data Release (DR3) ofrece una referencia de gran calidad para la construcción de diagramas magnitud-color, al estar libre de extinción atmosférica y contar con una sensibilidad mayor que las observaciones locales [5].

En este informe se presenta un estudio fotométrico del cúmulo abierto NGC 2287 (M41) a partir de datos obtenidos localmente en el desierto de la Tatacoa en Huila, Colombia, analizados mediante fotometría de apertura en bandas azul, verde y roja. A partir de estas mediciones se construyen diagramas magnitud-color que permiten analizar la población estelar del cúmulo e identificar su secuencia principal. Finalmente, estos resultados se comparan con diagramas construidos a partir de los datos del catálogo Gaia DR3, con el objetivo de evaluar la consistencia física de los resultados y discutir las limitaciones instrumentales y metodológicas inherentes a la fotometría de apertura con datos tomados en tierra.

2. Objetivos

- Realizar fotometría de apertura del cúmulo abierto NGC-2287 o M41, a partir de datos tomados localmente en Colombia, para estimar las magnitudes aparentes de las estrellas del cúmulo.
- Construir gráficas de magnitud-color del cúmulo NGC-2287 a partir de las mag-

nitudes aparentes calculadas.

- Hacer una comparación de las gráficas magnitud-color con las construidas a partir de los datos del catálogo Gaia DR3.

3. Procedimiento

3.1. Fotometría de apertura de datos locales

Los datos locales del cúmulo abierto M41 o NGC-2287 fueron tomados en el desierto de la Tatacoa en el departamento del Huila, Colombia, por Santiago Henao, María Gracia Batista y Miguel Monrroy. El instrumento utilizado fue un telescopio de 80mm con una cámara CMOS ZWO ASI178MM acoplada, al igual que filtros SVBONY CCD en bandas verde, azul y rojo. La toma de datos se realizó en 5 frames de 5s de exposición por cada filtro y se hicieron correcciones por bias y flat field en el momento de la toma. Asimismo, se usó el software L.A.Cosmic para eliminar señales provenientes de rayos cósmicos. La figura 1 muestra la imagen tomada en el filtro azul de M41.

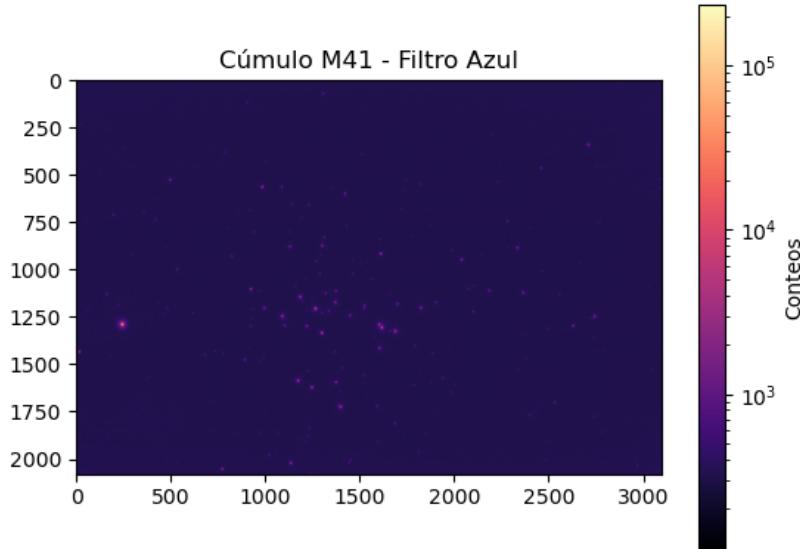


Figura 1: Cúmulo abierto M41.

Para el procesamiento de datos, primero se realizó un suavizado a las imágenes de cada filtro aplicando un filtro gaussiano de dos desviaciones estándar, posteriormente se realizó un histograma para poder entender el comportamiento de los datos, así como

de encontrar un parámetro de conteos óptimo para diferenciar el ruido del fondo de las estrellas. La figura 2 muestra el histograma de los datos de filtro azul, así como la distribución de intensidades hasta el percentil 99.8. Dada la forma normal de esta distribución, podemos aseverar que hasta el percentil 99.8 los datos contienen ruido de fondo, por lo que podemos estimar un límite de brillo para separar la señal del fondo de las de las estrellas. Para esto, se calculó el promedio y la desviación estándar de la región de ruido, posteriormente, el límite se calculó como $L = \text{mean} + 3 * \text{std}$, lo que garantiza con buena certeza que valores de brillo mayores a este son de estrellas.

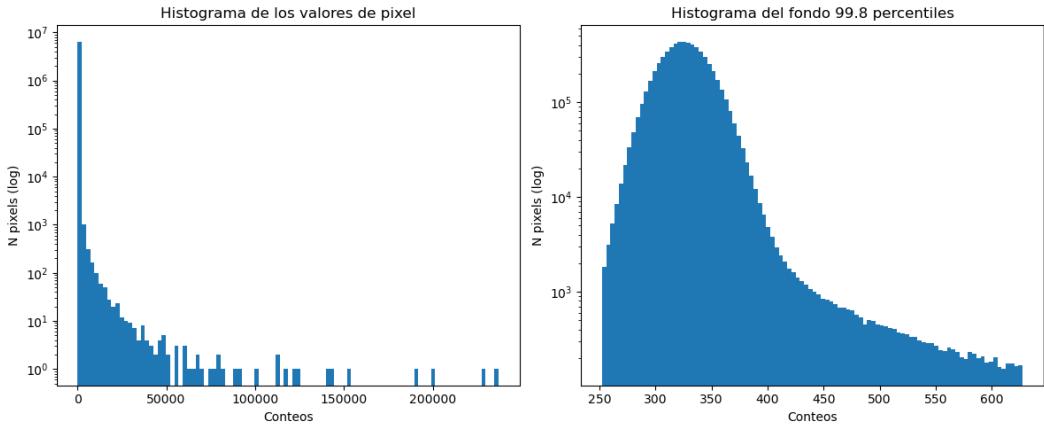


Figura 2: Histograma y percentil 99.8 de los datos.

Posteriormente, se definieron los centros de las estrellas haciendo uso de un algoritmo para encontrar máximos de intensidad locales, más precisamente se utilizó la función `peak_local_max` de la librería `skimage.feature` teniendo en cuenta el límite de brillo para distinguir las estrellas del fondo. Posteriormente, se partió la imagen original en 36 regiones, sobre las cuales se aplicó el mismo algoritmo de detección de máximos locales para encontrar la estrella más brillante de cada región, esto con el fin de obtener 36 estrellas de referencia para calcular el FWHM. Para este cálculo se utilizó la función `RadialProfile` de la librería `photutils.profile`, la cual permite estimar el perfil radial de las estrellas dado su centro, para posteriormente ajustar una función gaussiana sobre la cual podemos calcular el FWHM. Para estimar el FWHM que se utilizó para definir las regiones de apertura y cielo de cada estrella, se hizo un análisis estadístico de los 36 FWHM y se determinó la mediana del conjunto.

Para realizar la fotometría de apertura, definimos las regiones de apertura y el anillo de cielo. El radio de apertura se definió como 3 veces el FWHM calculado previamente, mientras que el anillo de cielo se definió como la región entre 4 veces y 5 veces el FWHM alrededor del centro de cada estrella. Los valores de estos FWHM y demás parámetros se comentarán en la sección de resultados. El flujo de cada estrella se calculó de la

siguiente manera:

$$F = \frac{1}{25} \left(\sum_{i,j} I_{apertura}(i,j) - \frac{\sum_{i,j} I_{cielo}(i,j) * n_{apertura}}{n_{cielo}} \right) \quad (1)$$

en donde $I_{apertura}$ es la intensidad en la región de apertura, I_{cielo} es la intensidad en el anillo de cielo, n_{cielo} es la cantidad de píxeles de esta región y $n_{apertura}$ es la cantidad de píxeles en la región de apertura. El flujo se normaliza por 25 dado que es el tiempo total de exposición de las imágenes. Una vez calculado el flujo, la magnitud aparente de cada estrella se calcula como:

$$m = -2,5 \log \left(\frac{F}{F_0} \right) \quad (2)$$

siendo F_0 un flujo de referencia que en este caso asumimos como 1, pero idealmente debería ser el flujo de Vega. Con la magnitud aparente calculada es posible hacer los diagramas magnitud-color, tal como se presentará en la sección de resultados de este informe.

3.2. Datos del catálogo Gaia DR3

En el catálogo DR3 de Gaia se buscaron los datos de M41 o NGC-2287. Se hizo una búsqueda en cono de 1° , y los datos se filtraron por paralaje. Como la distancia al cúmulo es de 725pc y tiene un diámetro de 8pc, se filtró el paralaje en $(725pc \pm 4pc)^{-1} = 1372 - 1,386$ mas, de tal forma que se cubriera toda el área del cúmulo. Los parámetros de interés para este informe son la magnitud en el filtro verde, azul y rojo. En total se descargaron datos de 1049 imágenes, lo que representa una gran diferencia con las 351 detectadas en los datos locales. Sin embargo esto es una diferencia esperable, dado que Gaia tiene una mayor sensibilidad y permite registrar el flujo de estrellas más débiles, además de que no se pierde flujo debido a la extinción atmosférica.

Posteriormente, los datos se procesaron con el software TOPCAT y se realizaron los diagramas de magnitud-color pertinentes.

4. Problemas encontrados y soluciones aplicadas

El primer problema detectado es que las imágenes en los distintos filtros no están alineadas geométricamente, por lo que la posición x, y de una estrella en el filtro azul no es la misma que en las imágenes del filtro rojo y verde. Para esto, se usó la función `register` de la librería `astroalign` para que a partir de una imagen de referencia (azul), se alinearan las imágenes de los filtros rojo y verde.

El segundo problema encontrado es que en la búsqueda de mínimos locales para calcular los centros de las estrellas, se encontró que había más estrellas en el filtro rojo (573) que en el filtro verde (436) y el azul (377). Esto apunta a que la mayor parte de las estrellas de M41 no son tan calientes, lo que quiere decir que emiten más radiación en longitudes largas, como el rojo y menos en cortas, como el azul. Para solucionar esto, se hizo uso de la función `cKDTree` de la librería `scipy.spatial`, la cual permitió encontrar un total de 351 estrellas comunes en los tres filtros, con una tolerancia de 2 píxeles. Es sobre estas estrellas comunes que se calculó el flujo y la magnitud aparente para construir los diagramas magnitud-color.

5. Resultados

La figura 3 muestra las posiciones de los centros de las 351 estrellas comunes en los tres filtros, es posible observar una región de alta densidad de estrellas que está relacionada con la ligadura gravitacional del cúmulo.

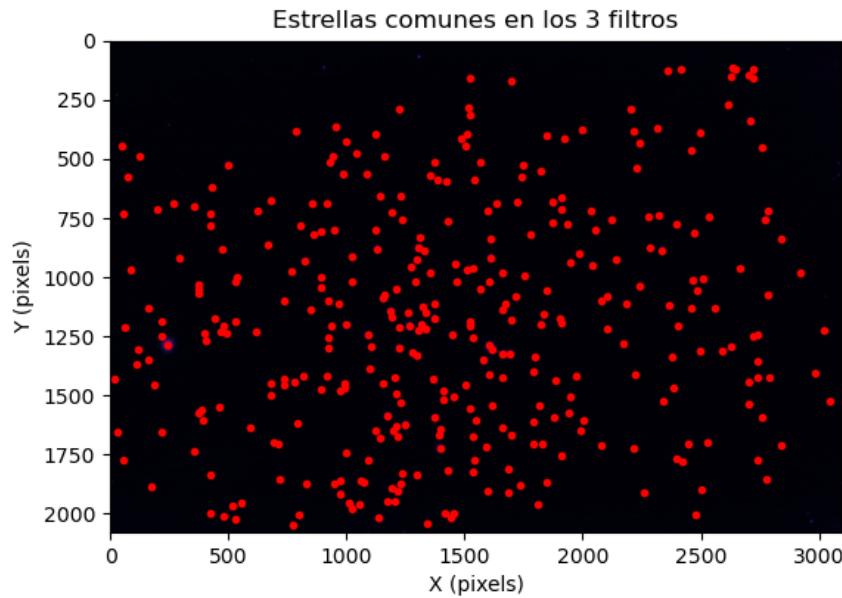


Figura 3: Posiciones de las estrellas comunes detectadas en los tres filtros.

Por otro lado, la tabla 1 muestra los FWHM utilizados para el cálculo del radio de apertura y del anillo de cielo para la fotometría de apertura. Los FWHM del filtro verde y azul son similares, pero el del filtro rojo es aproximadamente 1 píxel menor, esto tiene que ver con que la respuesta del detector depende de la longitud de onda incidente.

Filtro	FWHM (Px)	Radio Apertura (Px)	Anillo de Cielo (Px)
Azul	9.83	29.50	39.32-49.15
Rojo	8.78	26.34	35.12-43.9
Verde	9.94	29.82	39.76-49.7

Cuadro 1: Resultados de la mediana del FWHM de las 36 estrellas más brillantes en cada filtro, usados para el cálculo del radio de apertura y el anillo de cielo.

Con estos datos y con el procedimiento descrito en la sección anterior, se realizó el cálculo de la magnitud aparente de cada una de las estrellas detectadas. Se construyeron tres diagramas magnitud-color, definiendo tres colores: azul-rojo, azul-verde y verde-rojo. La figura 4 muestra los diagramas magnitud-color para los tres colores descritos anteriormente. Al analizar los 3 diagramas es posible ver una región de gran densidad que corresponde a estrellas en la secuencia principal, es decir estrellas jóvenes que se encuentran fusionando Hidrógeno en Helio. La secuencia principal no se observa con muy buena claridad en el diagrama azul-verde, esto puede deberse a que la emisión en esas dos bandas es similar, puesto que se observa una región de muy alta densidad cerca al 0 en color. Por el contrario, en los diagramas azul-rojo y verde-rojo, la secuencia principal es más evidente. Además, en estos diagramas se puede observar que hay muchas estrellas en la región verde-rojo > 0 , lo que sugiere que la mayor cantidad de estrellas detectadas emite más en longitudes de onda largas, por lo que M41 parece estar compuesto por estrellas poco calientes en la secuencia principal. En el diagrama azul-rojo, hay estrellas en la región azul-rojo > 0 , pero también hay una cantidad representativa en azul-rojo < 0 , lo que indica que de todas formas existen estrellas calientes en M41.

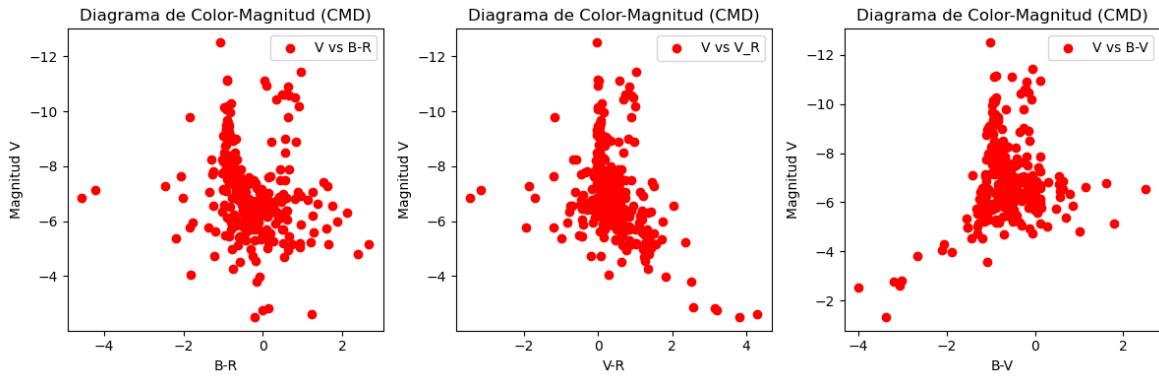


Figura 4: Diagramas magnitud-color de M41 construidos a partir de fotometría de apertura de datos locales.

Por otra parte, la figura 5 muestra los diagramas-magnitud-color, con los mismos colores mencionados antes, de M41 calculados a partir de los datos del catálogo Gaia DR3. Es posible observar varias diferencias con los diagramas de la figura 4 construidos

con los datos locales. La primera diferencia es la escala de la magnitud en el filtro verde (eje vertical), la cual se debe a tres razones principales. La primera de ellas es que el filtro utilizado en Gaia no es el mismo utilizado en la toma de datos local, lo cual afecta directamente el número de estrellas detectadas. De manera similar, la sensibilidad de Gaia es mayor, tanto por instrumentación como por la ausencia de extinción atmosférica. La tercera razón es la forma en que se calcula la magnitud aparente, pues en el caso de los datos locales no se tomó ningún flujo de referencia. Asimismo, la secuencia principal es notoria en los tres gráficos y el signo de cada color sugiere que realmente las estrellas de M41 radian más en longitudes de onda largas (rojo) que en cortas (azul), lo que es congruente con nuestros datos locales. Es decir, que realmente M41 está compuesto por estrellas no tan calientes, por lo que su pico de emisión electromagnética se encuentra en longitudes de onda largas.

Evidentemente, las estrellas que alcanzamos a detectar localmente son estrellas muy brillantes, por lo que estarían ubicadas en la parte superior izquierda de los diagramas de la figura 5. Podríamos superponer ambas imágenes, pero partiendo de la base de que el algoritmo usado para el cálculo de las magnitudes, sobretodo en el hecho de no se tenga en cuenta un flujo de referencia, las hace incompatibles.

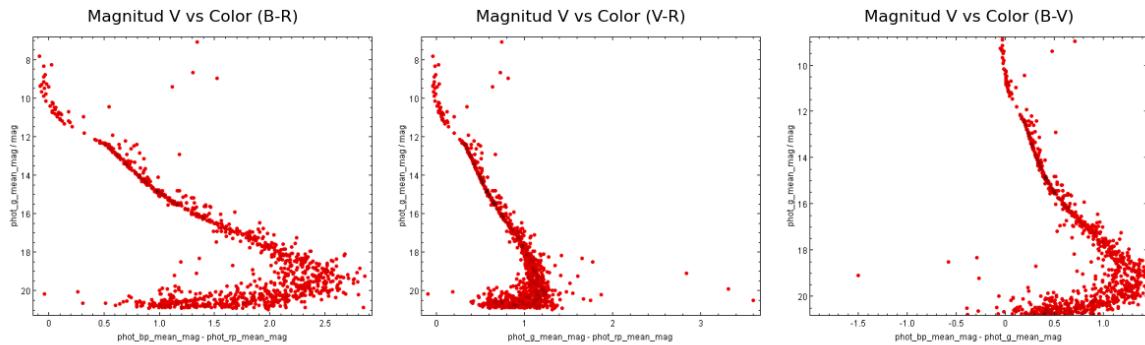


Figura 5: Diagramas magnitud-color de M41 construidos a partir de los datos del catálogo Gaia DR3.

El algoritmo implementado para realizar la fotometría de apertura de los datos locales puede tener una limitación grande, la cual radica en el uso de los valores de FWHM de la tabla 1 para definir los radios de apertura y del anillo de cielo. Es posible que en regiones altamente pobladas como la que se muestra en el centro de la figura 3, el anillo de cielo contenga información de estrellas vecinas que contaminan el cálculo del flujo y por tanto de magnitud aparente. Esto principalmente en el filtro verde y azul, ya que como se muestra en la tabla 1, son los que poseen un mayor radio de apertura

y cielo, por lo que si el flujo está contaminado con estrellas vecinas, la magnitud se ve fuertemente disminuida si el radio de apertura se ve contaminado, o aumentada si el anillo de cielo se ve contaminado.

6. Conclusiones

En este informe hemos hecho un estudio mediante fotometría de apertura del cúmulo abierto M41 o NGC-2287. Para lograrlo, se utilizaron datos tomados localmente en el desierto de la Tatacoa en el departamento del Huila, Colombia, al igual que datos tomados del catálogo de Gaia DR3. Para analizar los datos locales se construyó un algoritmo en Python para identificar estrellas, con el cual se encontraron 351 estrellas, al igual que para realizar fotometría de apertura para calcular la magnitud aparente de las estrellas del cúmulo en bandas azul, verde y rojo.

Con las magnitudes aparentes se construyeron diagramas magnitud-color, con los que se demostró que una gran cantidad de estrellas en M41 siguen la secuencia principal. Además, mediante el estudio del signo del color, concluimos que M41 posee estrellas no tan calientes que emiten en su mayoría radiación con longitudes de onda largas. Al comparar nuestros resultados con los datos de Gaia DR3, encontramos diferencias en la escala de la magnitud en la banda verde, las cuales atribuimos a la instrumentación, la extinción atmosférica y a que en nuestro algoritmo no tuvimos en cuenta un flujo de referencia. Con el estudio del signo del color pudimos concluir que efectivamente muchas estrellas de M41 son poco calientes y emiten radiación en longitudes de onda largas mayoritariamente.

Finalmente se mencionó que una limitación potencial del algoritmo construido es la posibilidad de contaminación de señales de estrellas vecinas en las regiones de radio de apertura y anillo de cielo. Pues la magnitud calculada puede variar fuertemente dependiendo de si la contaminación es en la región de cielo o del radio de apertura.

Referencias

- [1] H. Karttunen, P. Kröger, H. Oja, M. Poutanen, and K. J. Donner, *Fundamental astronomy*. Springer, 2007.
- [2] B. W. Carroll and D. A. Ostlie, *An introduction to modern astrophysics*. Cambridge University Press, 2017.
- [3] B. J. Ramsey, *Exploring NGC 2287: An Investigation of Open Cluster Membership, Rotation, and a Curiously Bifurcated Main Sequence*. Rochester Institute of Technology, 2024.

- [4] S. B. Howell, *Handbook of CCD astronomy*, vol. 2. Cambridge University Press, 2000.
- [5] A. Vallenari, A. G. Brown, T. Prusti, J. H. De Bruijne, F. Arenou, C. Babusiaux, M. Biermann, O. L. Creevey, C. Ducourant, D. W. Evans, *et al.*, “Gaia data release 3-summary of the content and survey properties,” *Astronomy & Astrophysics*, vol. 674, p. A1, 2023.