

Sistemas Estelares 2024

Cúmulos Abiertos - clase 01

Prof. Gabriel Ferrero

Comencemos viendo algunas imágenes de cúmulos abiertos y tratemos de definirlos.

Para eso, usaremos imágenes recolectadas por sus compañeras y compañeros en las cursadas anteriores.

<https://apod.nasa.gov/apod/ap090831.html>

Cúmulo
abierto **M25**,
contiene miles
de estrellas, y
está a más de
600 parsecs
de distancia.

Las estrellas
del cúmulo se
formaron
juntas hace
más de 90
millones de
años.

Este cúmulo
es visible con
binoculares
hacia la
constelación
del arquero
(Sagitario)

[Sagittarius](#)

<https://apod.nasa.gov/apod/ap060109.html>



Las Pléyades (M45)

Es uno de los cúmulos abiertos más famosos. Se puede observar a simple vista.

Es uno de los cúmulos más brillantes y cercanos.

Contiene 3,000 estrellas y está a unos 122 parsecs.

Tiene un diámetro de alrededor de 4 parsecs.

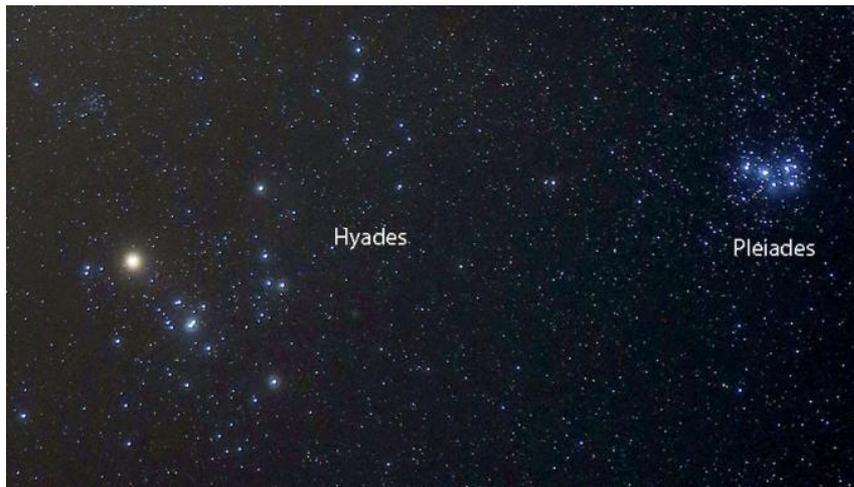
Notar las nebulosas de reflexión que rodean a las estrellas más brillantes del cúmulo. También se encuentran estrellas de baja masa y enanas marrones en este cúmulo.



Las Híades (conocido también como **Collinder 50** y **Melotte 25**) es el cúmulo abierto más cercano al sol. Se encuentran cerca de las Pléyades (posición angular aparente).

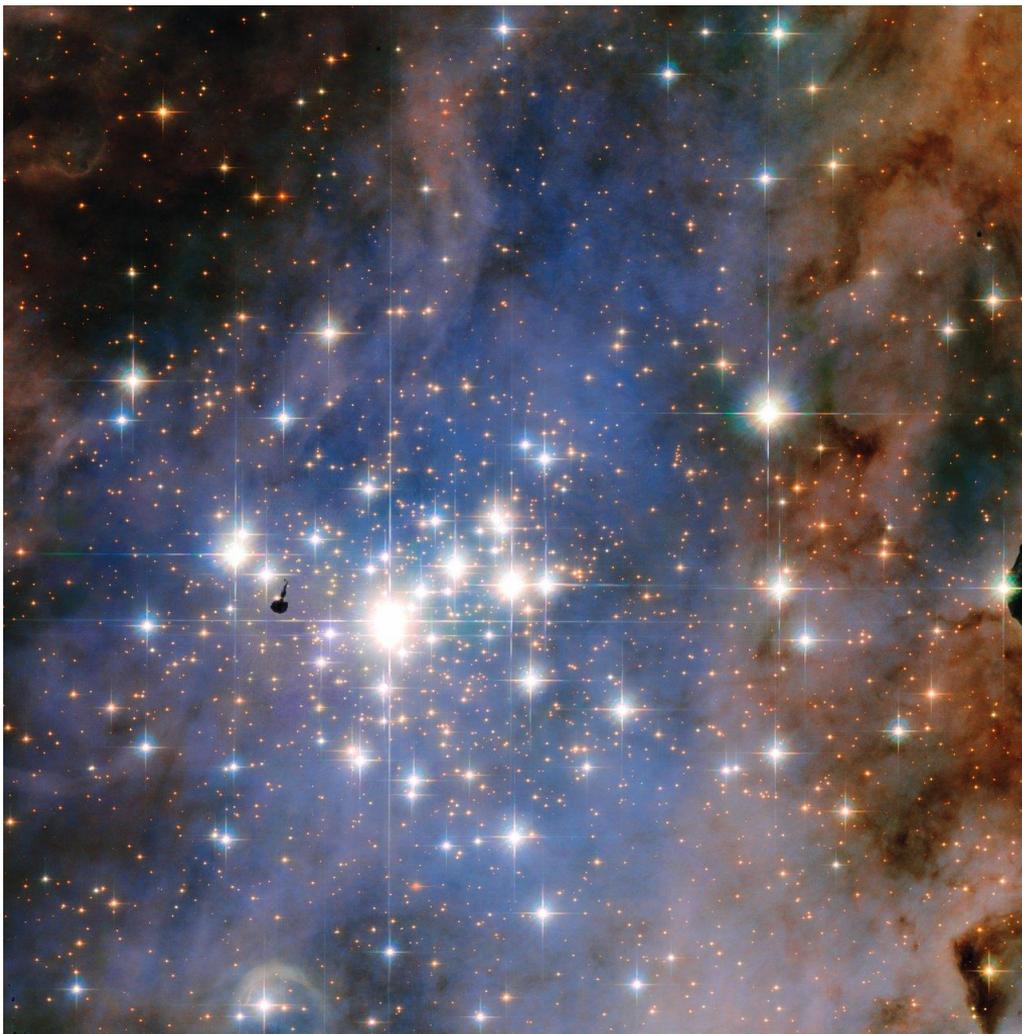
Distancia: 47 pc
Edad: 625 Ma

Las Híades poseen varios cientos de estrellas, se originaron al mismo tiempo y tienen la misma composición química, y también tienen un movimiento propio común. Una de sus estrellas más brillantes, [Epsilon Tauri](#), tiene un planeta gigante gaseoso (primera estrella con planetas descubierta dentro de un cúmulo abierto)



En el canto XVIII de La Ilíada, Homero relata la fabricación de las armas de Aquiles, por parte de Hefesto. Éste grabó figuras artísticas en el escudo, poniendo allí:

“la tierra, el cielo, el mar, el sol infatigable y la luna llena; allí las estrellas que el cielo coronan, las Pléyades, las Híades, el robusto Orión y la Osa, llamada por sobrenombre el Carro, la cual gira siempre en el mismo sitio, mira a Orión y es la única que deja de bañarse en el océano.”



Trumpler 14 es un cúmulo abierto, a 2,450 pc de distancia, en la nebulosa de Carina. Edad: 500,000 a

Esta región es una de las concentraciones más altas de estrellas masivas en nuestra galaxia.

Zoom en Trumpler 14

<https://youtu.be/iM4ZxxellOo>

El poder del telescopio espacial Hubble nos permitió estudiar cúmulos más allá de nuestra galaxia; en galaxias del grupo local.

Un ejemplo es [NGC 1872](#) en nuestra galaxia vecina, la **Nube Mayor de Magallanes**.

Este cúmulo es particular porque tiene la riqueza de un cúmulo globular típico, pero es mucho más joven y tiene estrellas azules. Estos cúmulos “intermedios” son comunes en la Nube Mayor de Magallanes.

Hubble también ha estudiado una parte de la Nebulosa del Águila, llamada [NGC 6611](#), un cúmulo abierto que se formó hace 5.5 millones de años (miles de estrellas), y está a 2 kpc de distancia. Es un cúmulo joven, que contiene varias estrellas azules calientes, cuya emisión ultravioleta hace que la Nebulosa del Águila brille.



NGC 1872 <https://esahubble.org/images/potw1013a/>



NGC 6611 <https://esahubble.org/images/potw1101a/>

Ahora intentemos definir un cúmulo abierto.

¿Cómo lo definirían ustedes?

Cúmulos Abiertos (llamados también cúmulos galácticos)

Grupo de estrellas que se formaron de la misma nube molecular gigante, ligados gravitacionalmente (no tan fuertemente ligados como los cúmulos globulares).

Número de miembros: desde **unas decenas**, hasta unos **pocos miles**.

Se encuentran **en galaxias espirales e irregulares**, en las cuales hay formación estelar activa. Se ubican en el disco de la galaxia.

En general tienen edades menores que unos pocos **cientos de millones de años** ($\lesssim 10^8$ a), ya que se disgregan por interacciones con otros cúmulos y nubes de gas, a medida que orbitan el centro galáctico. También pierden miembros por encuentros estelares cercanos dentro del cúmulo.

- Algunos cúmulos abiertos jóvenes pueden estar aún dentro de la nube molecular de la cual se formaron e iluminarla. Las estrellas masivas del cúmulo pueden ionizar la nube, creando una región HII.
- A medida que pasa el tiempo, la presión de radiación de las estrellas del cúmulo dispersa la nube molecular.
- Típicamente, alrededor del 10% de la masa de la nube de gas formará estrellas, y el resto se dispersará por la presión de radiación.
- Los cúmulos abiertos son objetos muy importantes para el estudio de la evolución estelar: las estrellas tienen todas aproximadamente la **misma edad y composición química**, por lo tanto facilitan el estudio de otras propiedades de las estrellas, comparadas con su estudio en ambientes aislados.

Distribución en edad y metalicidad

$\sim 4 \times 10^6$ años $< t < 10\,000 \times 10^6$ años

$-0.5 < [\text{Fe}/\text{H}] < +0.5$ con alto pico en $[\text{Fe}/\text{H}] = 0$

La mayoría de los Cúmulos Abiertos: $t < \sim 10^8$ años

N = número

$\mathbf{N} (10^8 \text{ años} < t < 10^9 \text{ años}) \sim \mathbf{N} (< 10^8 \text{ años})$

$\mathbf{N} (t > 10^9 \text{ años}) \sim 0.4 \mathbf{N} (< 10^8 \text{ años})$

No hay (casi) cúmulos abiertos “viejos”.

Ahora pueden seguir buscando ustedes.

Les proponemos que busquen ustedes cúmulos abiertos, y los agreguen a esta presentación de Google Slides:

https://docs.google.com/presentation/d/1UM_dxHaHq0ViHZgSq2hjHuK8B98brq7TKLasJQXbDHQ/edit?usp=sharing

(una filmina por cada cúmulo que quieran agregar)

Pueden poner una imagen, la edad, la distancia, en qué región del cielo se encuentra, y las características que encuentren, y citar la página web donde encontraron la información.

Identificación de un cúmulo en el cielo

Cuando miramos una región del cielo y vemos una asociación de estrellas, nos preguntamos si tienen alguna asociación física entre sí, o si las vemos juntas por azar. Se trata pues de identificar un cúmulo y al mismo tiempo establecer qué estrellas pertenecen a él (pertenencia).

Hay varias maneras de identificar de un cúmulo:

- 1) Identificación en términos estadísticos (conteos estelares)
- 2) Métodos cinemáticos: movimientos propios y
- 3) velocidades radiales.
- 4) Otros

Un video sobre el descubrimiento de un cúmulo con GAIA: [Gaia: How to find a star cluster](#)

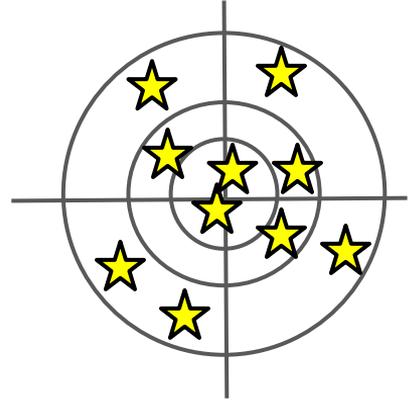
Conteos estelares

Vemos una agrupación de estrellas. Hacemos un análisis estadístico sobre la significancia estadística de la existencia de ese grupo, o si se trata de una fluctuación.

- 1) Determinamos el centro del cúmulo.
- 2) Analizamos de la densidad (superficial) de estrellas.

Cantidad de estrellas por unidad de área en cada anillo de área σ_i

$$\delta_{\star} = \frac{N_{\star}}{\sigma_i} \pm \frac{\sqrt{N_{\star}}}{\sigma_i}$$



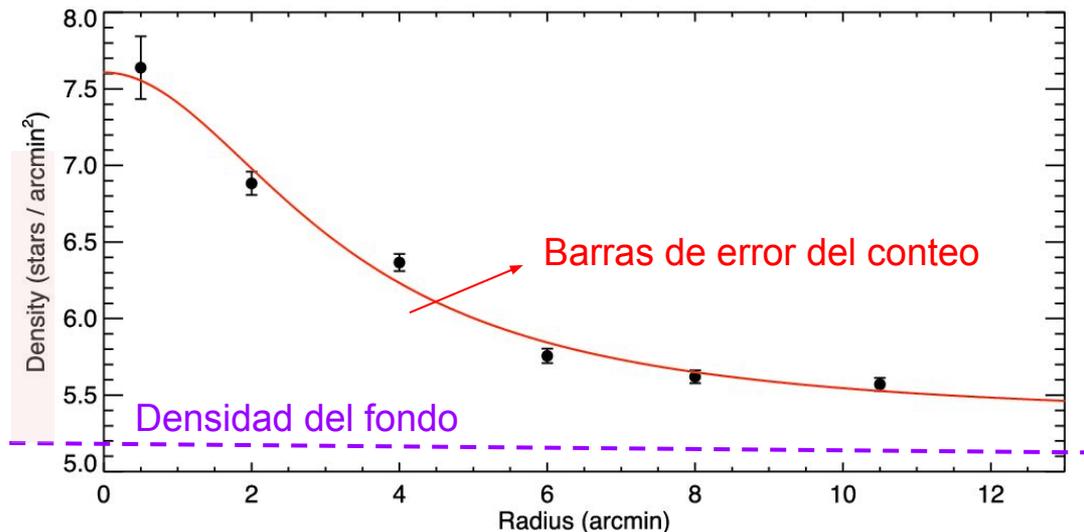
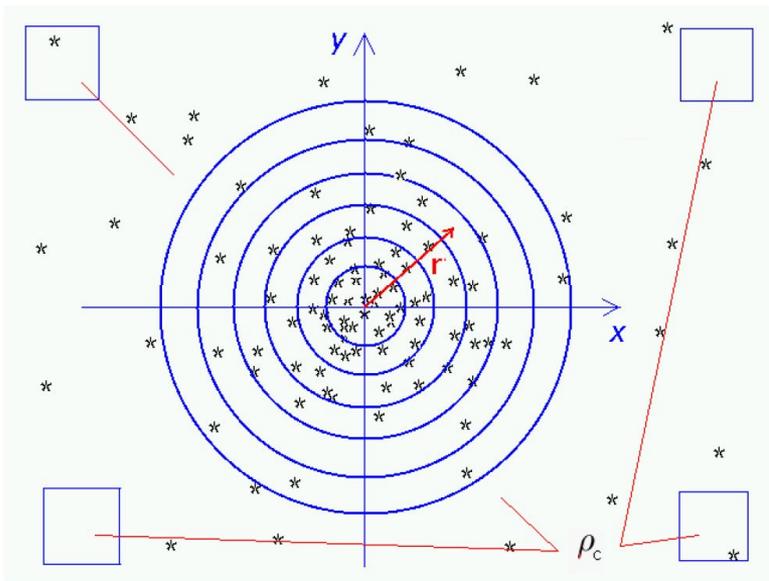
Área del anillo i :

$$\sigma_i = 2\pi r_i \Delta r_i$$

La densidad debería caer con la distancia angular al centro.

Se estima que el error proviene de la estadística de muestreo (poissoneana).

NGC 6866 ([Bostanci et al. 2015, MNRAS, 453, 1095](#))



La densidad tiende asintóticamente al valor del fondo estelar (estrellas que no pertenecen al cúmulo).

Si la barra de error permite separar δ_{\star} de la densidad de fondo (δ_f), la asociación aparente tiene probabilidad no nula de ser un cúmulo verdadero.

Ver también [Rizzo, L. et al. 2017 BAAA 59,130](#) y [2013 BAAA 56,2013](#)

Recordando que el área del anillo lo podemos calcular como

$$\underbrace{2\pi r dr}_{\text{Área del anillo}}$$

El **número neto de estrellas** lo podemos calcular así:

$$N_t = 2\pi \int_0^{r_L} \underbrace{(\delta_\star(r) - \delta_f)}_{\substack{\text{Densidad de los conteos} \\ \text{menos densidad de fondo}}} r dr$$

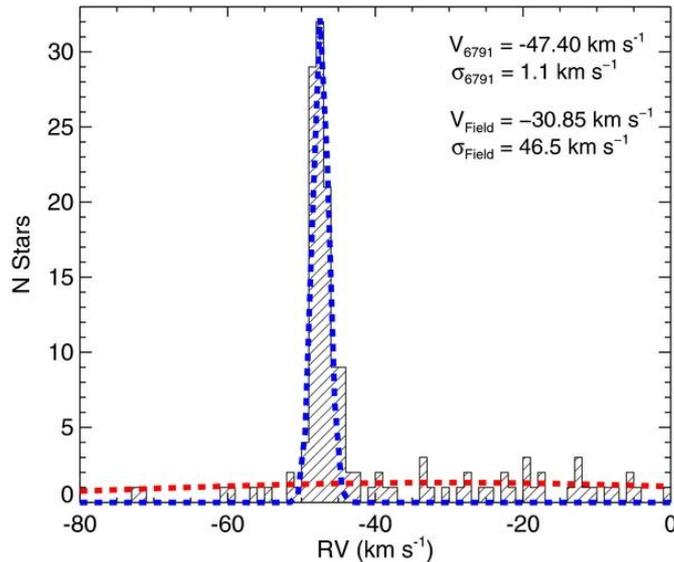
Donde la densidad estelar observada se identifica con la densidad de estrellas de campo se obtiene el radio límite del cúmulo (r_L).

N_T tiene un error asociado ΔN_T por lo que se puede establecer un criterio de existencia del cúmulo: $N_T > 3 \Delta N_T$

Velocidad radial (método cinemático)

Si las estrellas forman un sistema físico, deben tener velocidades similares. Las velocidades radiales las obtenemos de los espectros.

Graficamos el histograma de la velocidad radial de todas las estrellas. Tendremos una velocidad baricentral, y una distribución gaussiana alrededor de ésta.



$$v_{Ri} = v_{R0} \pm \epsilon_{v_{Ri}}$$

**Error de medición +
velocidad peculiar**

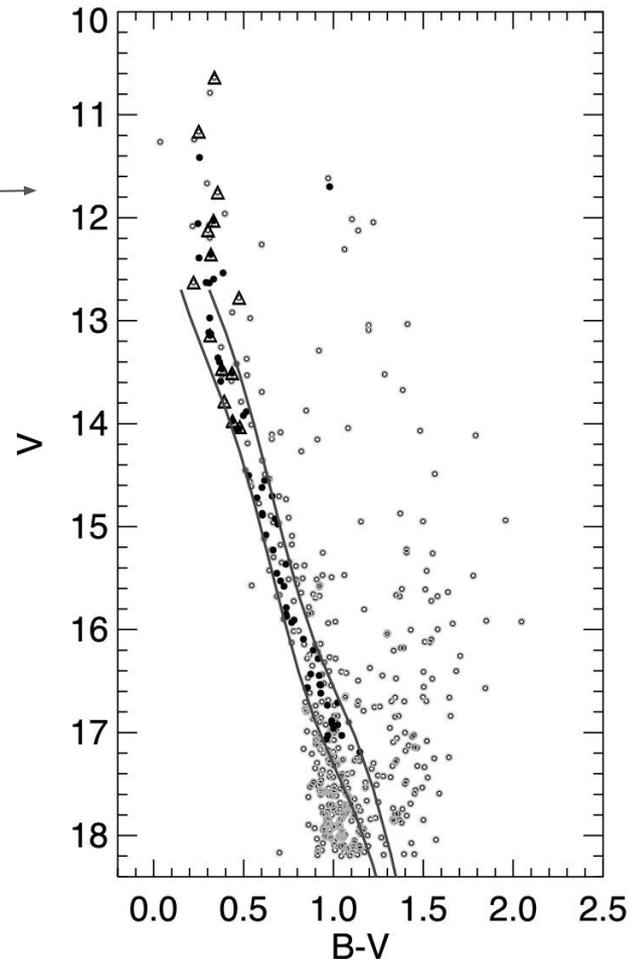
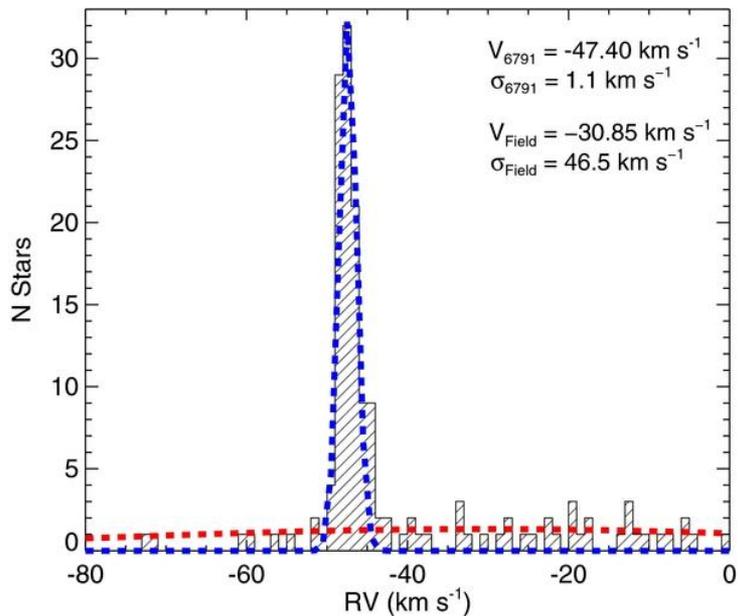
$$\epsilon_{v_{Ri}}^2 = \epsilon_{instr(i)}^2 + \epsilon_{pec(i)}^2$$

Se suman en cuadráticamente

**Criterio de
pertenencia**

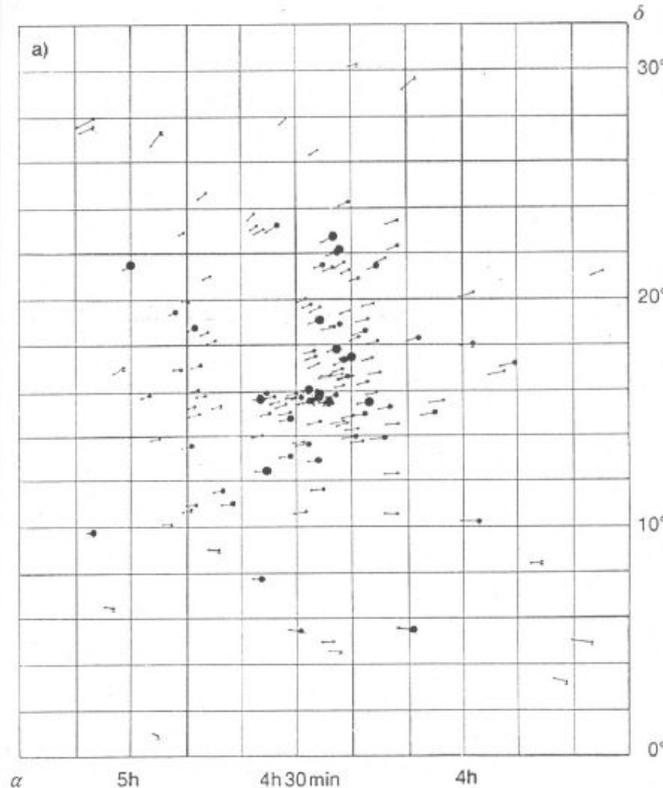
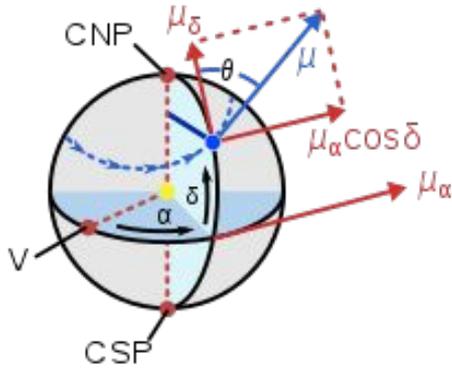
$$\bar{v}_R - 3\sigma_{v_R} < v_{Ri} < \bar{v}_R + 3\sigma_{v_R}$$

Estrellas de NGC 6866 dentro de un círculo de 6' de radio centrado en el centro del cúmulo. Líneas negras: ZAMS (una desplazada en 0.75 mag). Puntos negros: estrellas con mayor probabilidad de pertenencia de acuerdo al criterio cinemático.



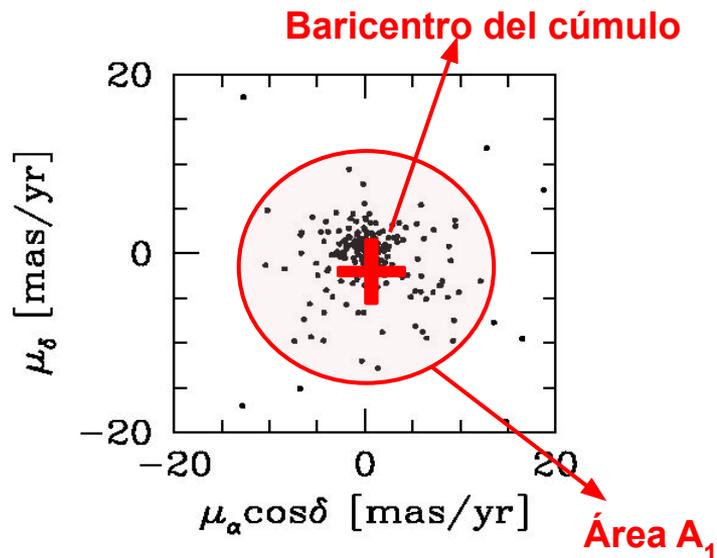
Movimientos propios (método cinemático)

Si el cúmulo es una asociación física, esperamos que las estrellas tengan velocidades similares \Rightarrow analizamos los movimientos propios de las estrellas.



Mapa de movimientos propios de las Híades.

Movimientos propios (método cinemático)



Graficamos los mov. propios de las estrellas del cúmulo.

Hay estrellas que contaminan este diagrama porque no pertenecen al cúmulo.

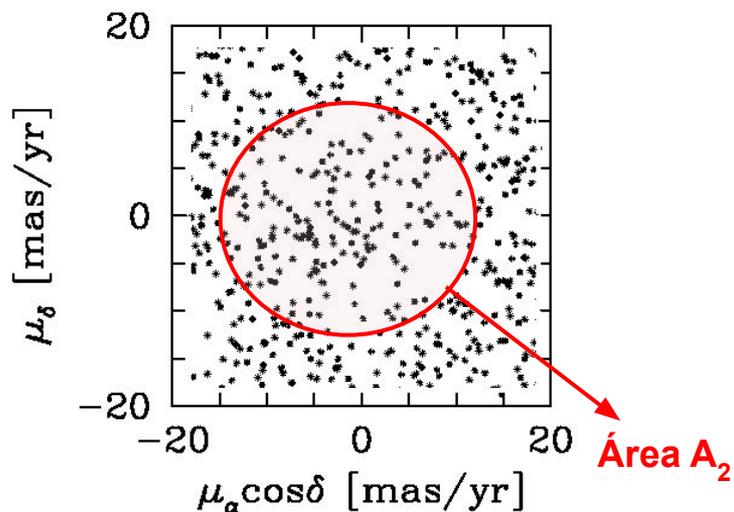
En **3D**, la distribución de velocidades de las estrellas alrededor de la velocidad baricentral es una gaussiana.

La **dispersión** del diagrama tiene 2 componentes:

ε_{obs} : error observacional.

ε_{dyn} : por la dinámica interna del cúmulo (las estrellas no se mueven todas en línea recta; tienen movimientos orbitales dentro del cúmulo).

Para ver la contaminación, hacemos un análisis similar en área adyacente (campo de comparación):



No se agrupan (notar que $A_2 = A_1$)

Criterio de pertenencia:

$$\bar{\mu}_\alpha - 3\sigma_{\mu_\alpha} < \mu_{\alpha i} < \bar{\mu}_\alpha + 3\sigma_{\mu_\alpha}$$

Y lo mismo para la declinación δ

Se puede definir una probabilidad de pertenencia en términos de la fracción de estrellas que hay en A_1 comparada con la que hay en A_2 .

Notemos que puede haber estrellas que no pertenecen al cúmulo y se mueven como si pertenecieran a éste sólo por azar, es decir, tienen comportamiento cinématico similar.

Otros criterios de pertenencia

- **Diagrama Color - Magnitud** del cúmulo
- **Diagrama color - color** (ver Astronomía Estelar)
- **Polarimetría** (los miembros del cúmulo deberían mostrar el mismo grado y ángulo de polarización porque la radiación de las estrellas atravesó la misma cantidad de granos de polvo, y campo magnético, ya que están todas a la misma distancia).

Ver por ejemplo: [Medhi, B. & Tamura, M. \(2013\) MNRAS, 430, Issue 2, p.1334-1343](#)

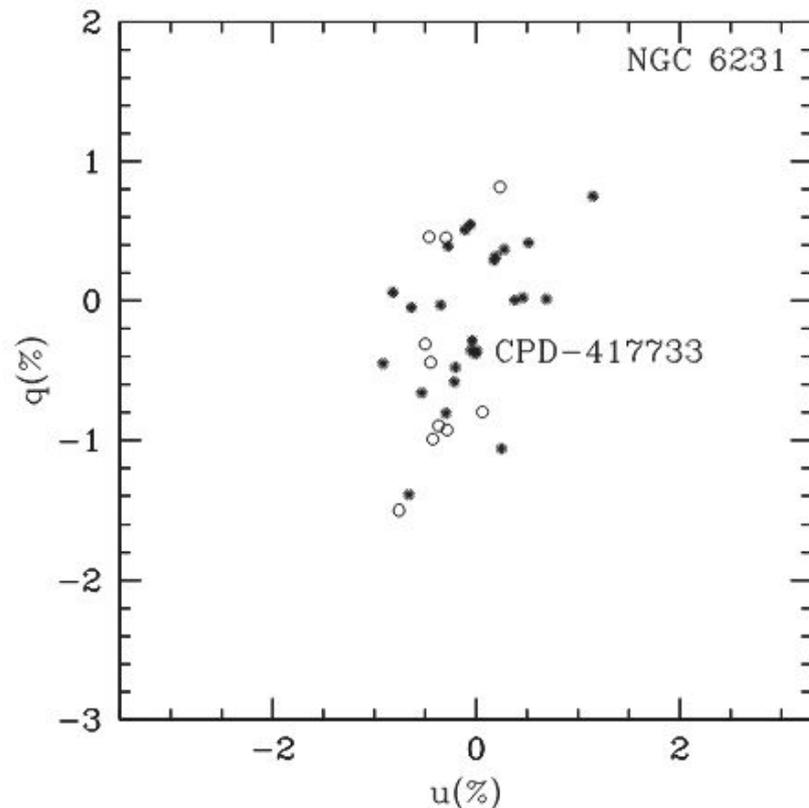
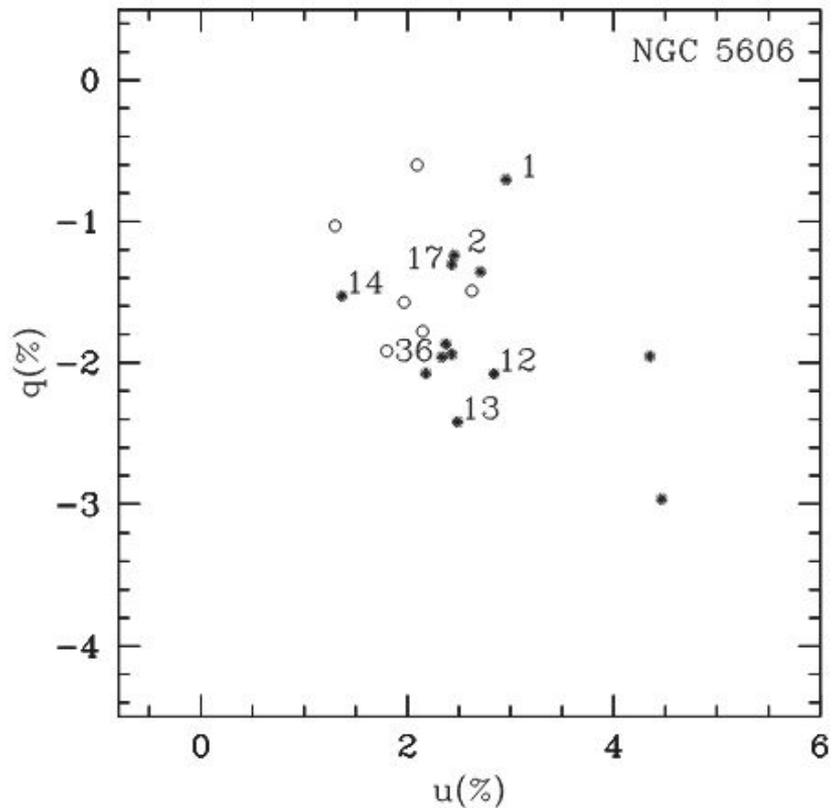


Figure 1. Polarization Stokes vectors u (per cent) and q (per cent) for stars with an available proper-motion cluster membership probability. Proper-motion cluster members are shown by filled circles and non-members by open circle symbols. The same range of X [u (per cent)] and Y [q (per cent)] scales is used in all the plots to visualize and compare the scatter in the different clusters.

Diagramas color-magnitud

Diagramas color - magnitud

Útiles porque:

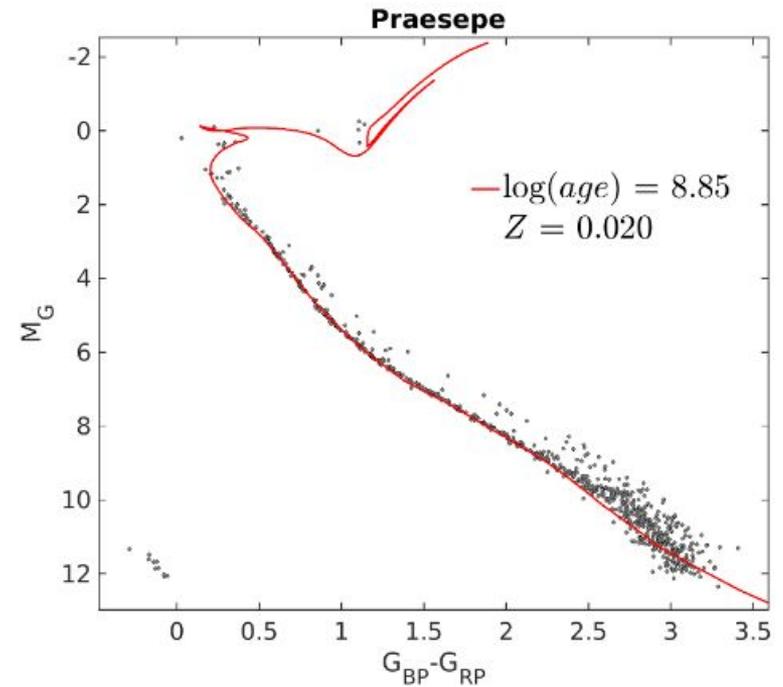
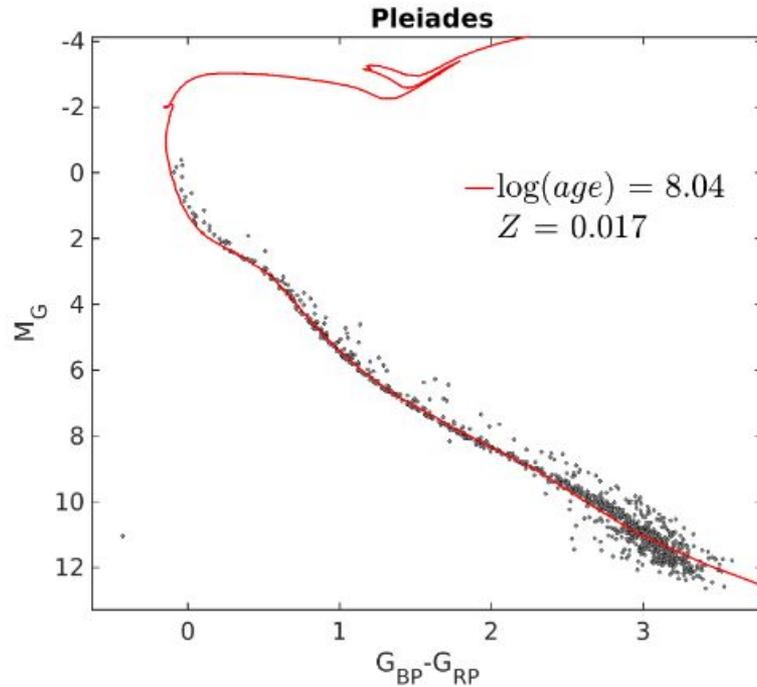
- podemos asumir que todas las estrellas están (aproximadamente) a la misma distancia
- las estrellas no están muy “apiñadas” (*crowding*)
- las estrellas del cúmulo abierto son “pocas”

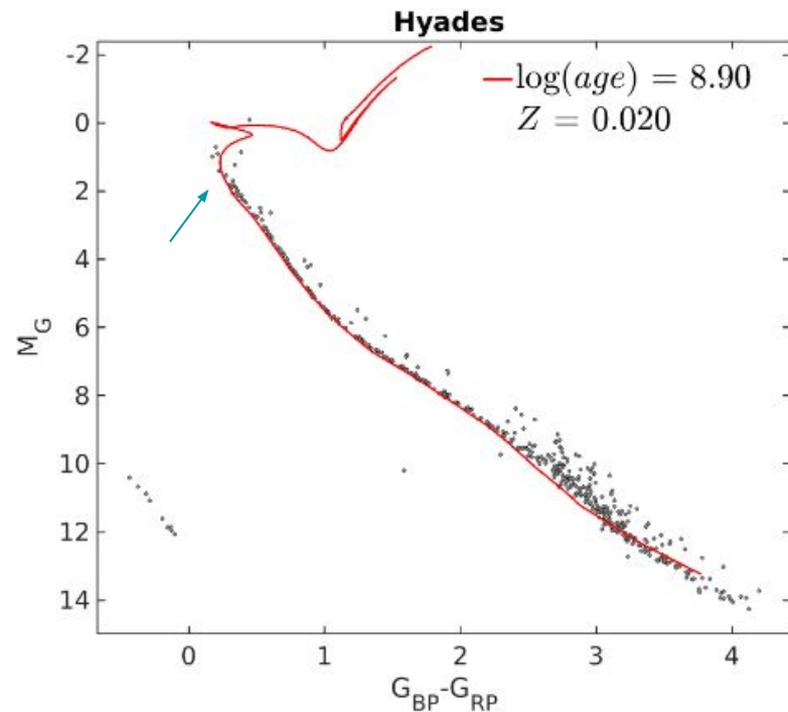
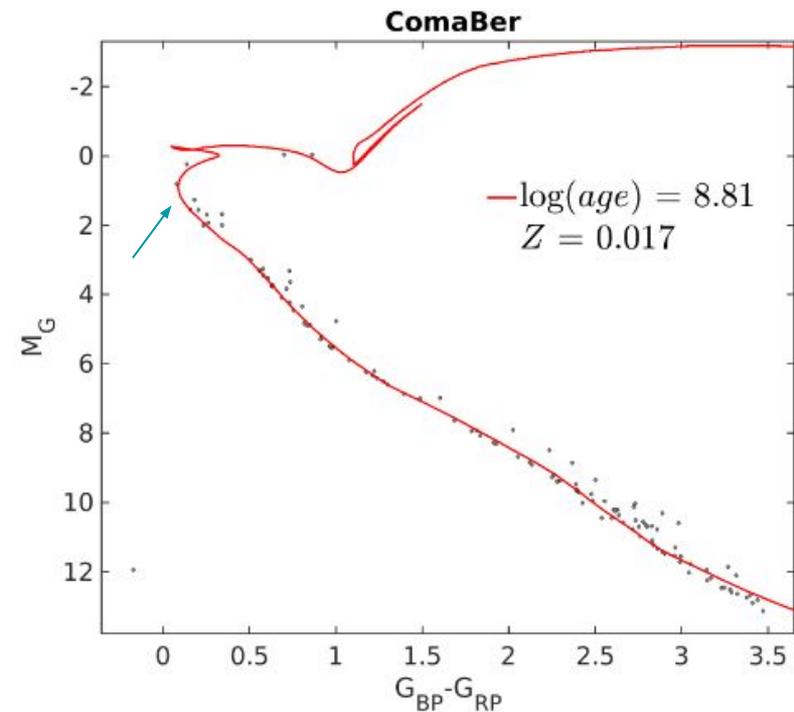
Dificultades:

- contaminación por nebulosas de emisión y reflexión
- extinción interna del cúmulo puede ser variable
- estos cúmulos están casi todos en el plano de la Galaxia por tanto:
 - contaminación con estrellas del disco
 - **alta extinción en la banda visual** (se requiere desenrojecer los datos)

El **ajuste de isócronas** permite determinar la **distancia, edad y metalicidad** de los cúmulos abiertos.

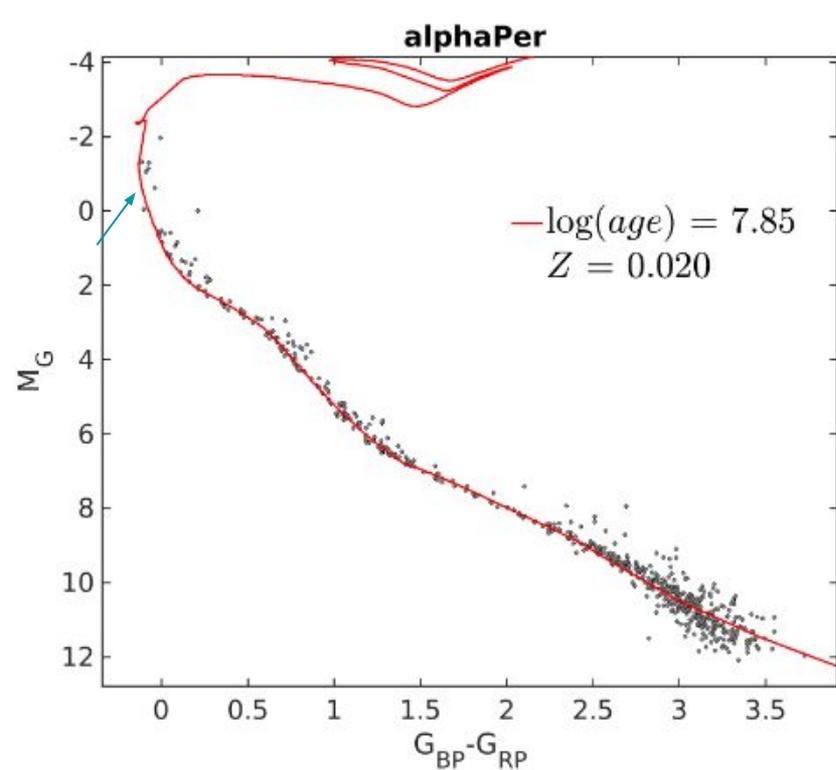
A&A 616, A10 (2018)



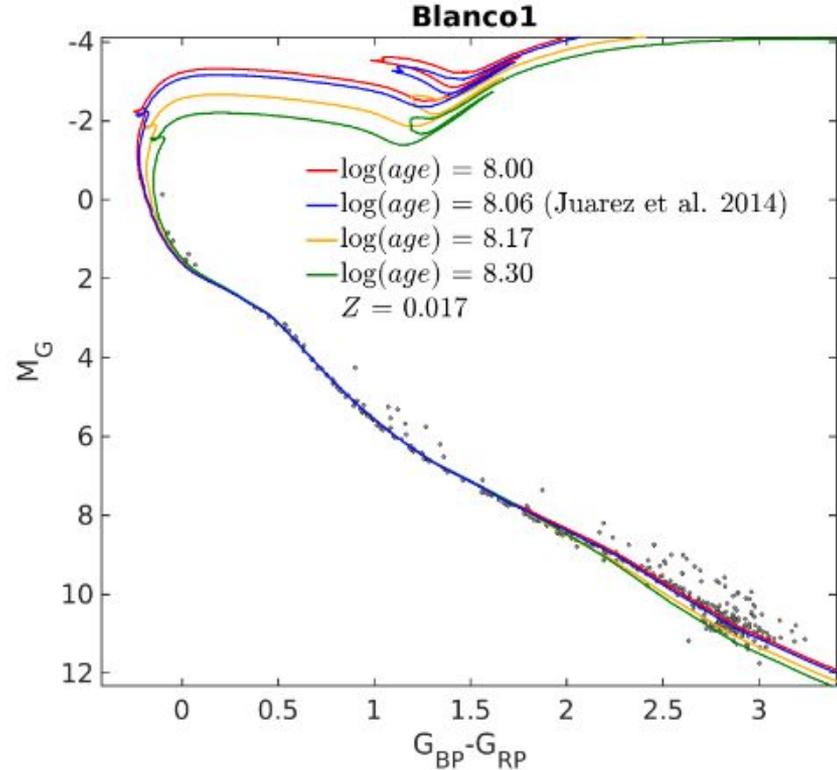


El **turn-off point** es el principal indicador de la edad del cúmulo.

Notar el gran rango de magnitudes absolutas (en el eje y) gracias a la sensibilidad de los instrumentos.



Este cúmulo es más joven que los cúmulos de la diapositiva anterior. Notar que el *turn-off point* está en magnitudes absolutas menores (estrellas más brillantes).



Isocronas de distintas edades muestran turn-off points diferentes. Cuanto mayor es la edad, más abajo aparece el turn-off point.

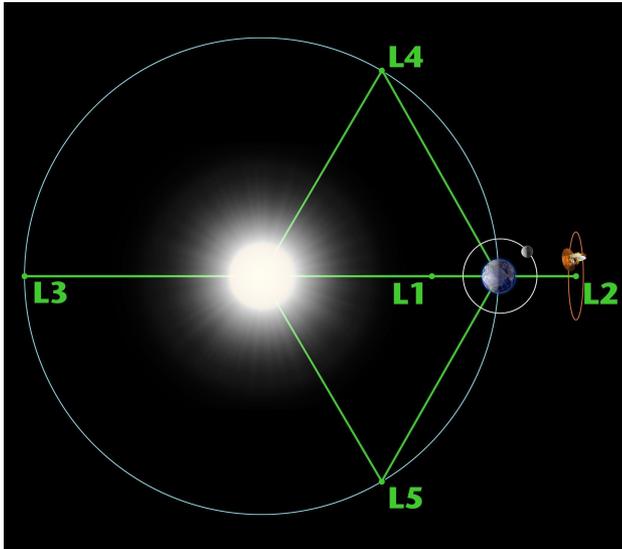
Turn-off point

Es el punto en el cual las estrellas comienzan a separarse de la secuencia principal.

Es el mejor “reloj astrofísico” para medir la edad de las poblaciones estelares.

La misión Gaia

- ❖ Gaia está creando un mapa 3D extraordinariamente preciso de más de mil millones de estrellas en nuestra galaxia y más allá.
- ❖ Mov. propio, luminosidad, temperatura y composición química.
- ❖ Estos datos ayudan, entre otras cosas, a responder preguntas sobre el origen, estructura e historia evolutiva de nuestra galaxia.



Launch: 19 December 2013

Orbit: L2 Lagrangian point

Data release milestones:

Data Release 1: 14 September 2016

Data Release 2: 25 April 2018

Early Data Release 3: 3 December 2020

Data Release 3: 13 June 2022

***Gaia* Data Release 2**

Observational Hertzsprung-Russell diagrams★

Gaia Collaboration, C. Babusiaux^{1,2,★★}, F. van Leeuwen³, M. A. Barstow⁴, C. Jordi⁵, A. Vallenari⁶, D. Bossini⁶,

[Link al paper](#)

Veamos los **diagramas color magnitud** de cúmulos abiertos cercanos.

Fig. 17. HRDs of nearby clusters compared with PARSEC isochrones (see text for details) of the Pleiades (*panel a*), Praesepe (*panel b*), Coma Ber (*panel c*), Hyades (*panel d*), Alpha Per (*panel e*), and Blanco 1 (*panel f*). Praesepe, Hyades, and Alpha Per are fitted with $Z = 0.02$, while the others are reproduced using $Z = 0.017$.



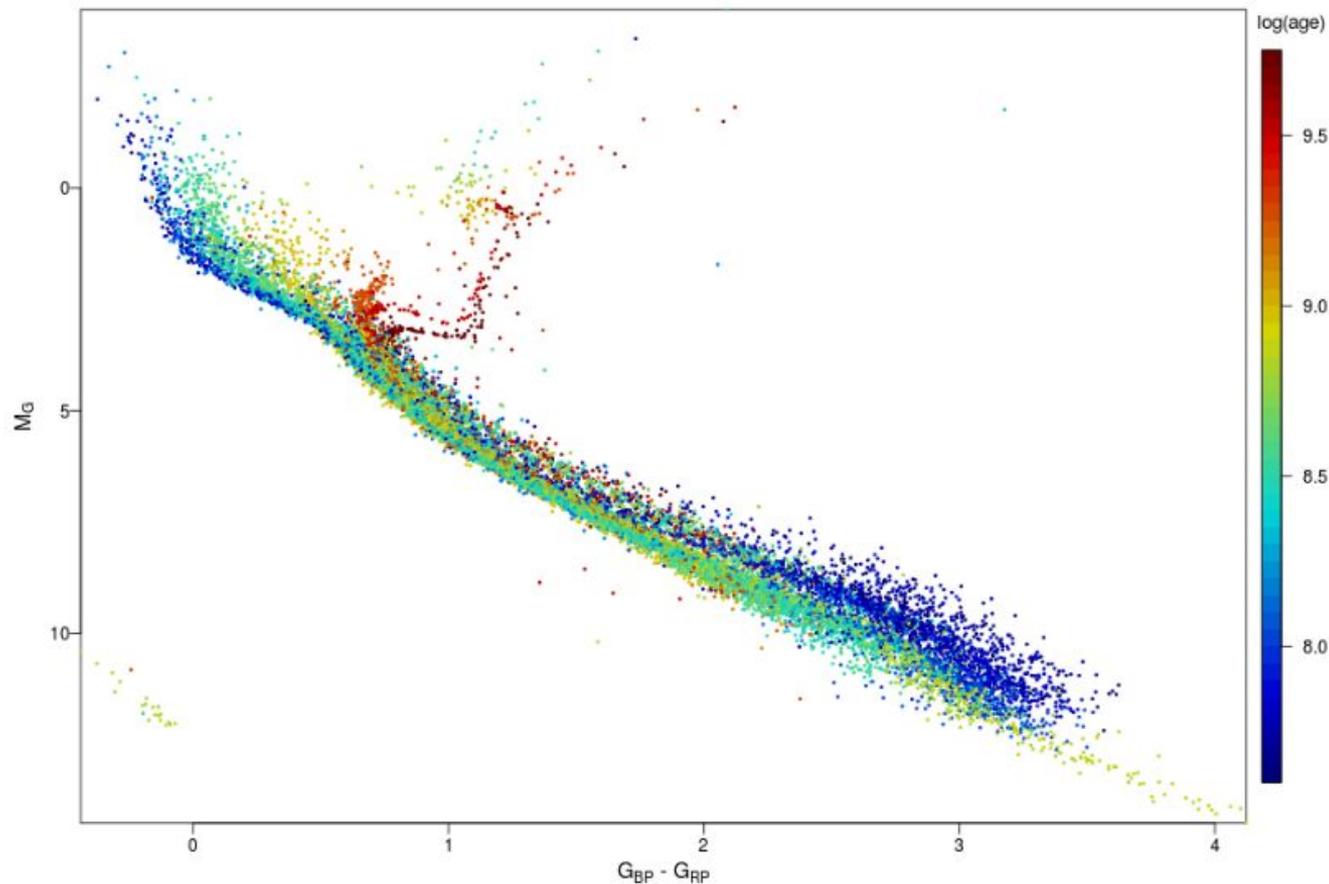


Diagrama color-magnitud para 32 cúmulos abiertos, coloreados según su edad.

Notar que los cúmulos más viejos tienen turn-off points en magnitudes más débiles, correspondientes a estrellas de menor masa.

Notar la posición en el diagrama de las estrellas de menor masa en cúmulos más jóvenes.

Fig. 2. Composite HRD for 32 open clusters, coloured according to $\log(\text{age})$, using the extinction and distance moduli as determined from the Gaia data (Table 2).

Tiempo de vida en la secuencia principal

$$\underbrace{L(M)} \approx \underbrace{C d(M_H)/dt} = \underbrace{C M dX/dt}$$

Luminosidad
de la estrella
de masa M

Velocidad con
la que cambia
su masa de H.

Cómo cambia
la abundancia
de H.

Masa de la estrella

donde $X = M_H / M$

Tiempo de vida en la secuencia principal:

$$T = \int_0^T dt = CM \int_{X_1}^{X_2} \frac{dX}{L} = C_2 M^{1-\alpha} = C_2 M^{-2}$$

dada por la relación masa - luminosidad $L \propto M^\alpha$

A mayor M , menor T .
(el tiempo en secuencia principal de las estrellas más masivas es más corto que el de las estrellas menos masivas).

En la ecuación anterior

X_1 : fracción de H que la estrella posee al llegar a la ZAMS.

X_2 : fracción de H que la estrella posee al salir de la ZAMS.

Cuando llega a ese X_2 , el peso molecular medio cambia lo suficiente como para que la estrella no esté en equilibrio con esa P_C y T .

La estrella se reestructura y llega al equilibrio interno nuevamente, para $X_2 < X_1$.

Los parámetros que determinan el aspecto del diagrama color-magnitud son:

- EDAD
- METALICIDAD

Tiempos de vida en la Secuencia Principal: $\tau_{SP} \propto 1 / M^\alpha$ ($\alpha \sim 2 - 3$)

Estrella de $10 M_{\text{sun}}$ $\rightarrow \tau_{SP} \sim 10^7$ años

Estrella de $2 M_{\text{sun}}$ $\rightarrow \tau_{SP} \sim 10^9$ años

Estrella de $0.8 M_{\text{sun}}$ $\rightarrow \tau_{SP} \sim 14 \times 10^9$ años

Por eso en los diagramas color-magnitud, el **turn-off point** cambia para distintas edades.

Algunas parametrizaciones útiles:

$$M_V(\text{T.O.}) = 2.70 \log(t/\text{Gyr}) + 0.30 [\text{Fe}/\text{H}] + 1.41 \quad \text{Bergbusch \& Vandenberg (1992)}$$

Relación entre el tiempo de vida en sec. ppal. y la masa de la estrella en el turn-off point:

$$\log(t) = 0.825 \log^2(M_{\text{TO}}/120) + 6.43 \quad \text{para } [\text{Fe}/\text{H}]=0 \quad \text{Buzzoni (2002)}$$

Existen trabajos más actuales, con métodos más refinados.