

Sistemas Estelares 2023

Cúmulos Abiertos - clase 01

Prof. Claudia Scóccola

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** ($\lesssim 10^8$ yr), 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, creando una región HII.
- ❖ A medida que pasa el tiempo, la presión de radiación de las estrellas del cúmulo dispersan 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.

<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 pueden ver incluso sin binoculares.

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 Myr

Las Híades posee 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) https://en.wikipedia.org/wiki/Epsilon_Tauri_b

Se han descubierto alrededor de 1100 **cúmulos abiertos** en nuestra galaxia, la Vía Láctea, aunque se cree que hay muchos más.



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

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

Zoom in onto Trumpler 14

<https://youtu.be/iM4ZxxellOo>

About The Object

Object Name	Trumpler 14
Object Description	Open Cluster in the Carina Nebula
R.A. Position	10h 43m 55.92s
Dec. Position	-59° 33' 0.0"
Constellation	Carina
Distance	8,000 light-years (2,450 parsecs)

Los cúmulos han sido muy importantes para entender cómo evolucionan las estrellas.

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](https://esahubble.org/images/potw1013a/) 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](https://esahubble.org/images/potw1101a/), un cúmulo abierto que se formó hace 5.5 millones de años (miles de estrellas), y está a 52,122 pc 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 busquen ustedes.

Les propongo 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 foto, la edad, la distancia, en que 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 juntar por azar.

Hay varias etapas en la identificación de un cúmulo:

- 1) Identificación en términos estadísticos (Conteos estelares)
- 2) Métodos cinemáticos (movimientos propios)
- 3) Otro método cinemático (velocidades radiales)

Les dejo este video: [Gaia: How to find a star cluster](#)

Conteos estelares

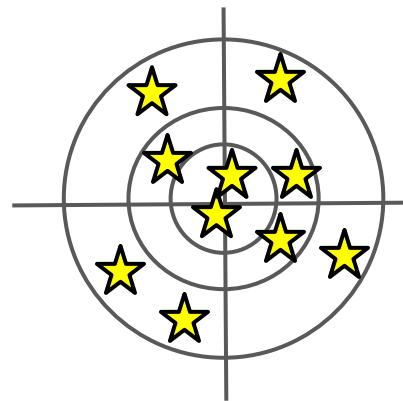
Vemos una agrupación de estrellas. Hacemos un análisis estadístico sobre la significancia estadística de la existencia de ese grupo, o si se trata de una fluctuación.

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

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

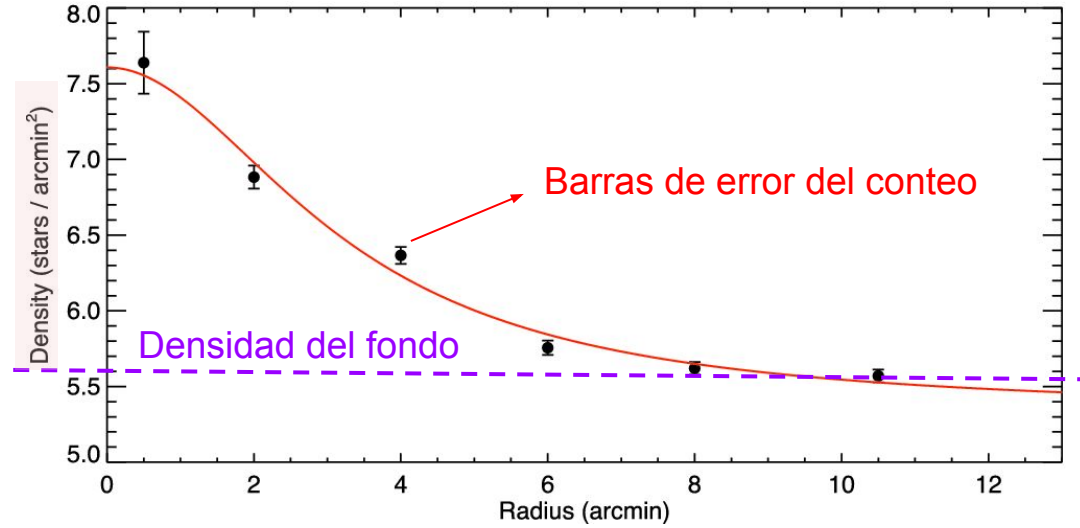
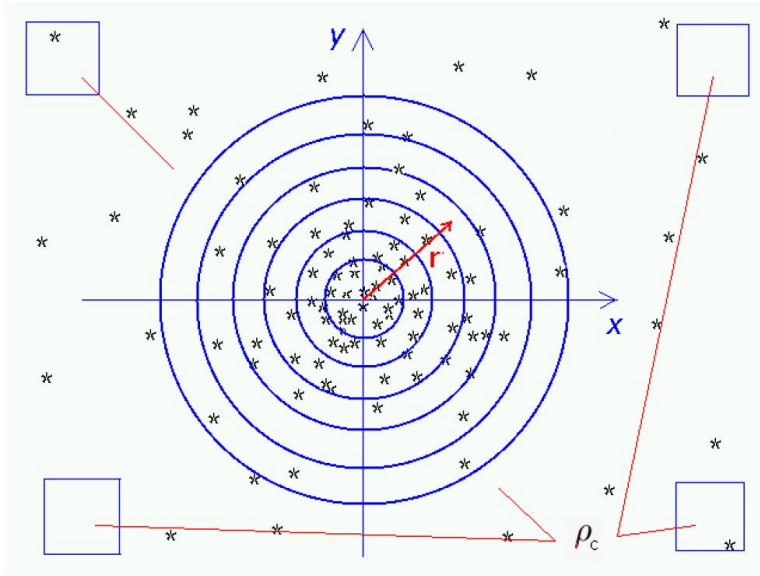
$$\delta_{\star} = \frac{N_{\star}}{\sigma_i} \pm \frac{\sqrt{N_{\star}}}{\sigma_i}$$

Esperamos que la densidad caiga con la distancia angular al centro.



Área del anillo i :

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



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 δ_f , la asociación aparente tiene probabilidad no nula de ser un cúmulo verdadero.

El número neto de estrellas lo podemos calcular así:

$$N_t = 2\pi \int_0^\infty (\delta_\star(r) - \delta_f) r dr$$

Densidad de los conteos
menos el valor del fondo

$2\pi r dr$
Área del anillo

Movimientos propios (método cinemático)

Si el cúmulo es una asociación física, esperamos tener alguna coherencia en los movimientos \Rightarrow hacemos un análisis de los mov. propios de las estrellas.

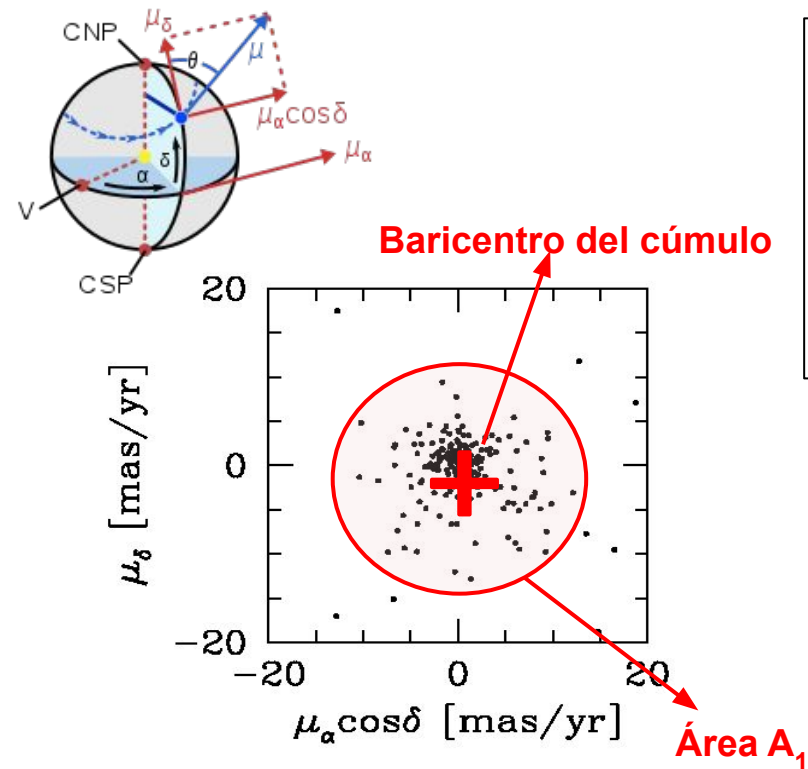


Grafico los mov. propios de las estrellas del cúmulo.

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

En **3D**, la densidad de estrellas alrededor del baricentro es una gaussiana.

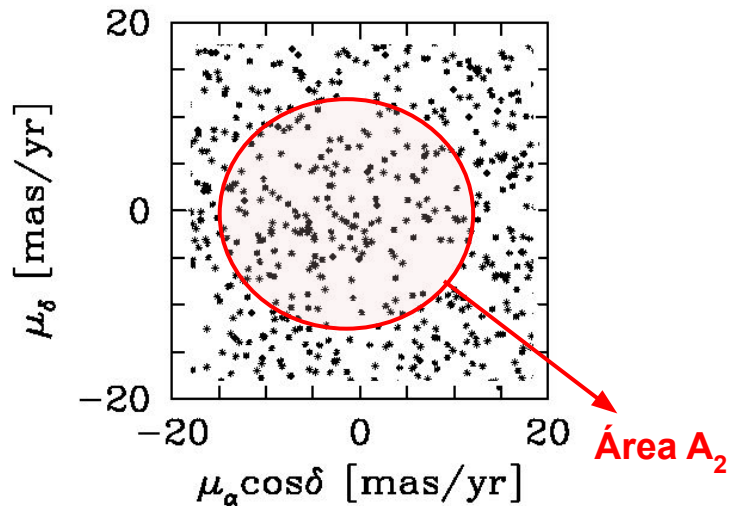
La **dispersión** del diagrama tiene 2 componentes:

ε_{obs} : capacidad de medir el mov. propio.

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

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

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



Este análisis muestra que hay estrellas que no pertenecen al cúmulo y se mueven como si pertenecieran a éste (sólo por azar), es decir, tienen comportamiento cinématico similar.

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

$$\begin{aligned} \mu_{\alpha i} &\pm \Delta\mu_\alpha \\ \mu_{\delta i} &\pm \Delta\mu_\delta \end{aligned}$$

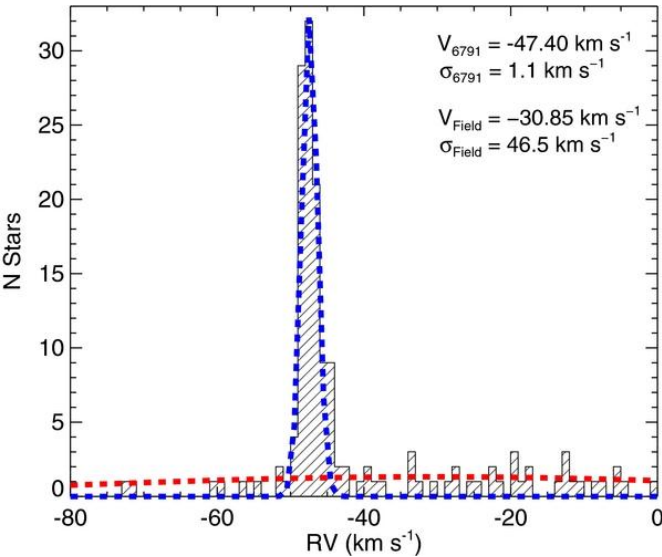
Criterio de pertenencia: $\bar{\mu}_\alpha - 3\sigma_{\mu_\alpha} < \mu_{\alpha i} < \bar{\mu}_\alpha + 3\sigma_{\mu_\alpha}$

Idem para δ

Velocidad radial (método cinemático)

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

Graficamos 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 cuadratura

Criterio de pertenencia

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

Otros criterios de pertenencia

- **Diagrama HR** del cúmulo
- **Diagrama color-color** (enrojecimiento)
- **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)

Masa total de un cúmulo

- Supongamos que conocemos el brillo y la distancia \Rightarrow sacamos M_V
- Con $M_V + TE \Rightarrow$ C.Bol. \Rightarrow Luminosidad
- Usamos relación Masa - Luminosidad
Y hacemos estadística sobre la masa. Sumamos todas las masas y tenemos la masa total (luminosa).

Esto no es fácil de hacer contra el fondo de la Vía Láctea.

Procedimiento inestable \Rightarrow Recurrimos al **Teorema del Virial**.

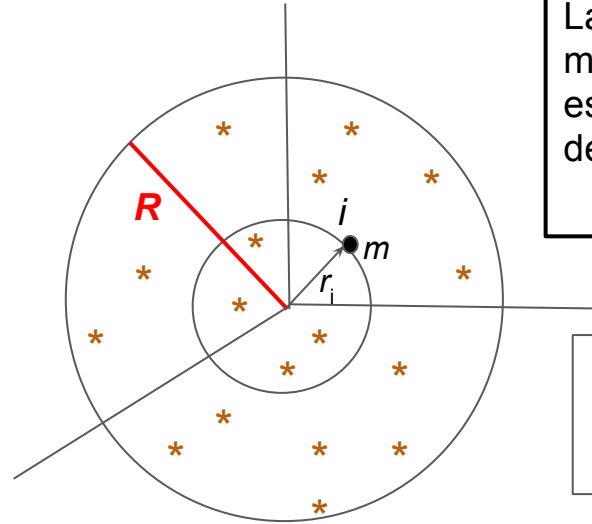
Observaciones:

- Un cúmulo abierto tiene de decenas a miles de estrellas.
- La cantidad de estrellas determina la perdurabilidad del cúmulo a lo largo del tiempo.

Teorema del virial

Hipótesis:

- cúmulo esférico
- Todas las estrellas tienen la misma masa m .
- Densidad volumétrica constante
- Radio del cúmulo: R



Planteo de tipo virial:
La partícula i sólo ve la masa que está en la esfera de radio r_i (no ve la de la cáscara exterior a r_i)

$$\vec{F}_i = -\frac{GmM_i}{r_i^2} \frac{\vec{r}_i}{|\vec{r}_i|}$$

Entonces, como la densidad es constante:

$$\delta = \frac{M}{\frac{4\pi}{3}R^3} = \frac{M_i}{\frac{4\pi}{3}r_i^3} \Rightarrow M_i = M \left(\frac{r_i}{R}\right)^3 \Rightarrow \vec{F}_i = -\frac{GmM}{R^3} \vec{r}_i$$

Virial de una partícula: $\vec{F}_i \cdot \vec{r}_i$

Teorema del Virial:

$$2T + \Omega = 0$$

$$\vec{F}_i \cdot \vec{r}_i = -\frac{GmM}{R^3} \vec{r}_i \cdot \vec{r}_i = -\frac{GM r_i^2}{R^3} m$$

Masa del cúmulo (incógnita)

Teorema del Virial:

$$\vec{F}_i \cdot \vec{r}_i = -2T = -2 \frac{1}{2} m v^2 \quad \Rightarrow \quad \frac{GM r_i^2}{R^3} m = m v^2$$

Mido:

v De la partícula, con respecto al baricentro del cúmulo (lo mido usando μ_* y v_R)

R Tamaño físico del cúmulo (del conteo, tengo que conocer la distancia)

El Teorema del Virial tiene valor como promedio temporal.

$2T + \Omega = 0$ no vale instantáneamente, sino que promediando en el tiempo.

Tomo promedio temporal:

$$\frac{GM\bar{r}_i^{-2}}{\bar{R}^3} = v^2$$

¿Cuánto vale r_i^2 en la vida de la estrella dentro del cúmulo?

$$\bar{x} = \int x f(x) dx$$

$f(x)$ es la probabilidad de que el radiovector se apoye en cáscara de radio r_i (espesor dr_i)

Volumen:

$$4\pi r_i^2 dr_i$$

$$f(x)dx = P_i dr_i = \frac{4\pi r_i^2 dr_i}{\frac{4\pi}{3} R^3} = 3 \left(\frac{r_i^2}{R^3} \right) dr_i$$

Volumen total

Probabilidad: casos favorables / casos totales

Calculo:

$$\begin{aligned} \overline{r_i^2} &= \int_0^R r_i^2 \frac{r_i^2}{R^3} dr_i = \frac{3}{5} R^2 \\ &= \frac{3}{R^3} \left. \frac{r_i^5}{5} \right|_0^R = \frac{3}{5} R^2 \quad \Rightarrow \quad M = \frac{R^3}{G} \frac{\overline{v^2}}{\overline{r_i^2}} = \frac{5}{3} \frac{R}{G} \overline{v^2} \end{aligned}$$

$\overline{v^2}$

No la podemos derivar con una estrella en un momento dado. Pero a nosotros nos interesa el promedio temporal.

Puedo aplicar el teorema ergódico al sistema en equilibrio, y promediar en las vel. de muchas componentes (estrellas) del sistema.

La idea sería tener velocidades espaciales, pero para cúmulos alejados, μ_* son difíciles de medir.

Trabajo sólo con la v_R

$$\overline{v^2} = \langle V_R^2 + V_x^2 + V_y^2 \rangle = 3 \langle V_R^2 \rangle = 3\sigma_{V_R}^2$$

Distribución de velocidades isotrópica

$$M = 5 \frac{R}{G} \sigma_{V_R}^2$$

Esto nos da sólo un orden de magnitud, ya que supusimos:

- Densidad constante
- $R \rightarrow$ Donde termina el cúmulo realmente? (y R es el tamaño lineal, así que necesito la distancia)
- $F_p \sim \sqrt{3}$ (factor de proyección) \rightarrow distribución de velocidades isotrópica

En realidad, deberíamos plantear una distribución de masa más realista.

Dispersión típica en un cúmulo abierto: 1 km/s

Rango de masas de cúmulos:

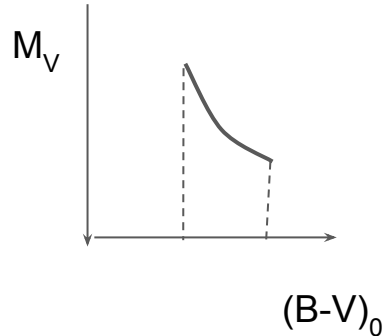
+ pequeños: decenas de M_{sun}

+ grandes: miles de M_{sun}

Este trabajo lo hacemos porque si la masa (obtenida por el Teorema del Virial) coincide con la obtenida contando estrellas, entonces no habría materia oscura (a escala de los cúmulos, al menos)

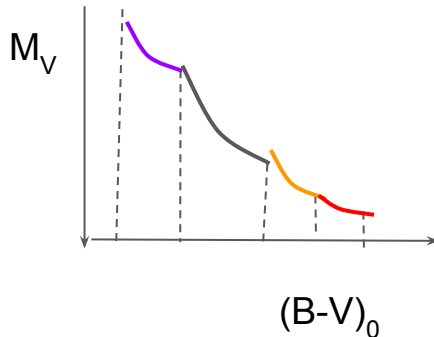
Determinación de distancias

Secuencia principal de edad cero (ZAMS) se construye empalmando cúmulos de distintos colores, aunque no se conozcan las distancias.



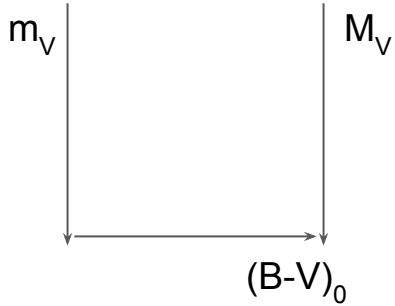
Tomamos un cúmulo cuya distancia podemos calcular (las Hyades, por ejemplo) y lo ponemos en el diagrama.

Después tomamos otros cúmulos galácticos (más rojos o más azules) y los movemos a color constante hasta que empalmen en el diagrama.



Se define una envolvente inferior.

Luego, para un cúmulo de distancia desconocida, hago el diagrama c/m_V . Si lo hago coincidir con la ZAMS, tengo el módulo de distancia:
 $M_V - m_V$



Recordemos que nosotros medimos V , y $(B-V)$.

Calculamos $(B-V)_0$ con el diagrama color-color.

$$V_0 = V - \underbrace{R E(B-V)}_{A_V} = V - \underbrace{R_i E(B-V)_i}_{\text{Promedio del medio interestelar (a lo largo de la visual)}} - \underbrace{R_c E(B-V)_c}_{\text{Constante de absorción selectiva del cúmulo}}$$

Exceso de color B-V

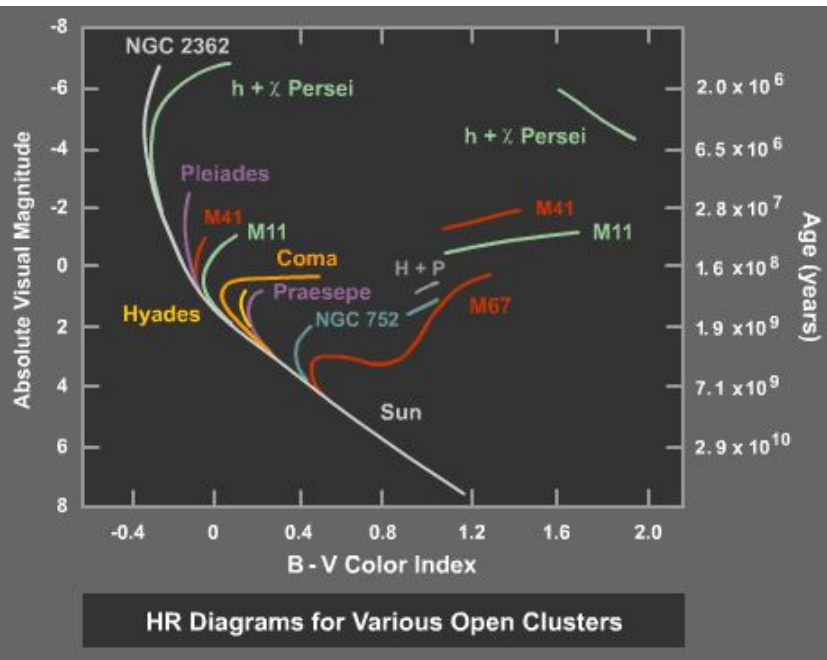
R_c del material que muchas veces se encuentra en cúmulos jóvenes (material asociado).

Las estrellas jóvenes, muy calientes, emiten mucha radiación UV y pueden cambiar las características del polvo interestelar.

$$R_i = 3.2 \pm 0.1$$

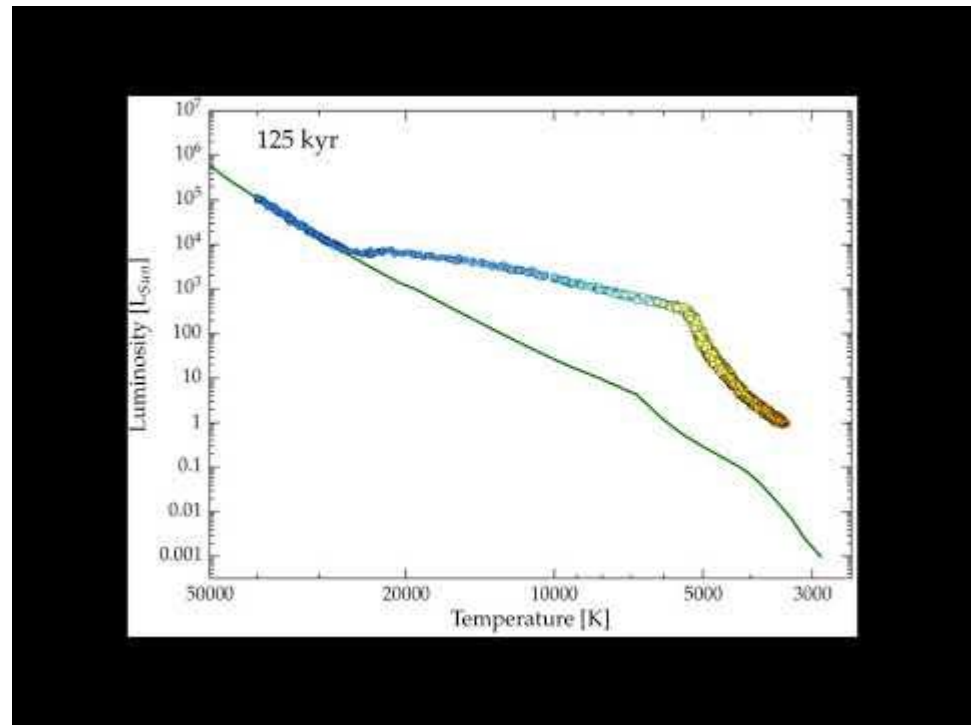
$$R_c = \text{entre 4 y 5}$$

En cúmulos de 10^7 años, no hay material (polvo) circundante. Sí lo hay en cúmulos más jóvenes.



Veamos en esta simulación (evolución temporal), cómo se puebla la secuencia principal, y cómo van evolucionando las estrellas más masivas, abandonando la secuencia principal. **Observen que** la secuencia principal en ningún momento de la vida del cúmulo es igual a la ZAMS!

Los cúmulos presentan distintos puntos de apartamiento de la ZAMS, éstos son indicadores de la edad (turn-off point). A medida que el cúmulo evoluciona, la parte superior de la ZAMS se va despoblando.



Tiempo de vida en la secuencia principal

$$\underbrace{L(M)}_{\text{Luminosidad de la estrella de masa } M} \approx C \times \underbrace{d(M_H)/dt}_{\text{Velocidad con la que cambia su masa de H.}} = C M \underbrace{dX/dt}_{\text{Cómo cambia la abundancia de H.}}$$

↓
Masa de la estrella

$$X = M_H / M$$

Tiempo de vida en la secuencia principal:

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

↖ $\alpha \approx 3$
↘ $L \sim M^\alpha$

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).

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 PC y T.

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

Consideremos un cúmulo cualquiera del cual ignoro la distancia.

Le empalmo la secuencia modelo que está calibrada a la secuencia que forman las estrellas del cúmulo estudiado.

V_0 , $(B-V)_0$ corregidos por efecto del material interestelar.

$$\textcircled{V_0 - M_V} = \text{constante} = 5 \log(d) + 5$$

(para todas las estrellas)

Módulo de distancia del
cúmulo

Comentarios:

A veces tenemos cúmulos muy jóvenes con la parte superior de la secuencia principal muy poblada, y la inferior no.

Esto se debe a que las estrellas de mayor masa ya se formaron (son las que colapsan más rápido), y todavía no lo hicieron las de menor masa.

Otros cúmulos tienen la parte inferior de la secuencia, pero no la superior, porque esas estrellas ya evolucionaron y dejaron la secuencia principal.

Con esto se construye un cúmulo ideal, empalmándolos a un cúmulo de referencia.

En lo posible se eligen cúmulos de bajo enrojecimiento y cercanos al sol.

Para una estrella, calculábamos el módulo de distancia así:

V_0 medible

M_V espectro (conociendo el T.E.)

En el caso de los cúmulos, no tomamos espectros, sino que calculamos $V_0 - M_V$ para todas las estrellas al mismo tiempo, obteniendo errores menores.

El error del ajuste es $\sim \pm 0.1$ mag.

Propagación de errores:

$$\Delta (V_0 - M_V) = 5 \Delta d/d \log_{10} e \rightarrow \Delta d/d \approx 0.5 \underbrace{\Delta (V_0 - M_V)}_{0.1} \approx 0.05 \quad (\text{error muy pequeño})$$

Recurriremos más adelante a los cúmulos para describir la estructura espiral de la Vía Láctea (en las cercanías del sol).