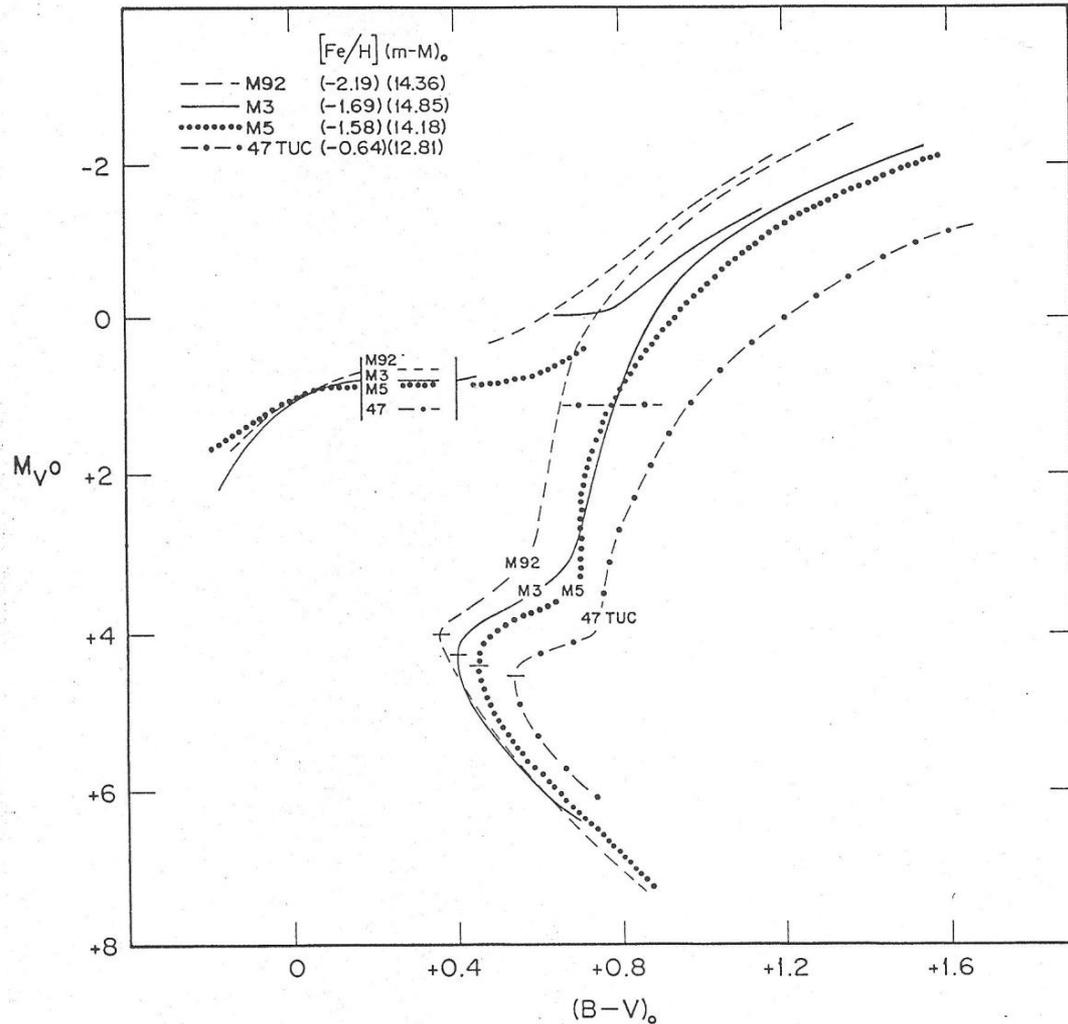


Sistemas Estelares 2024

Cúmulos Globulares - clase 02

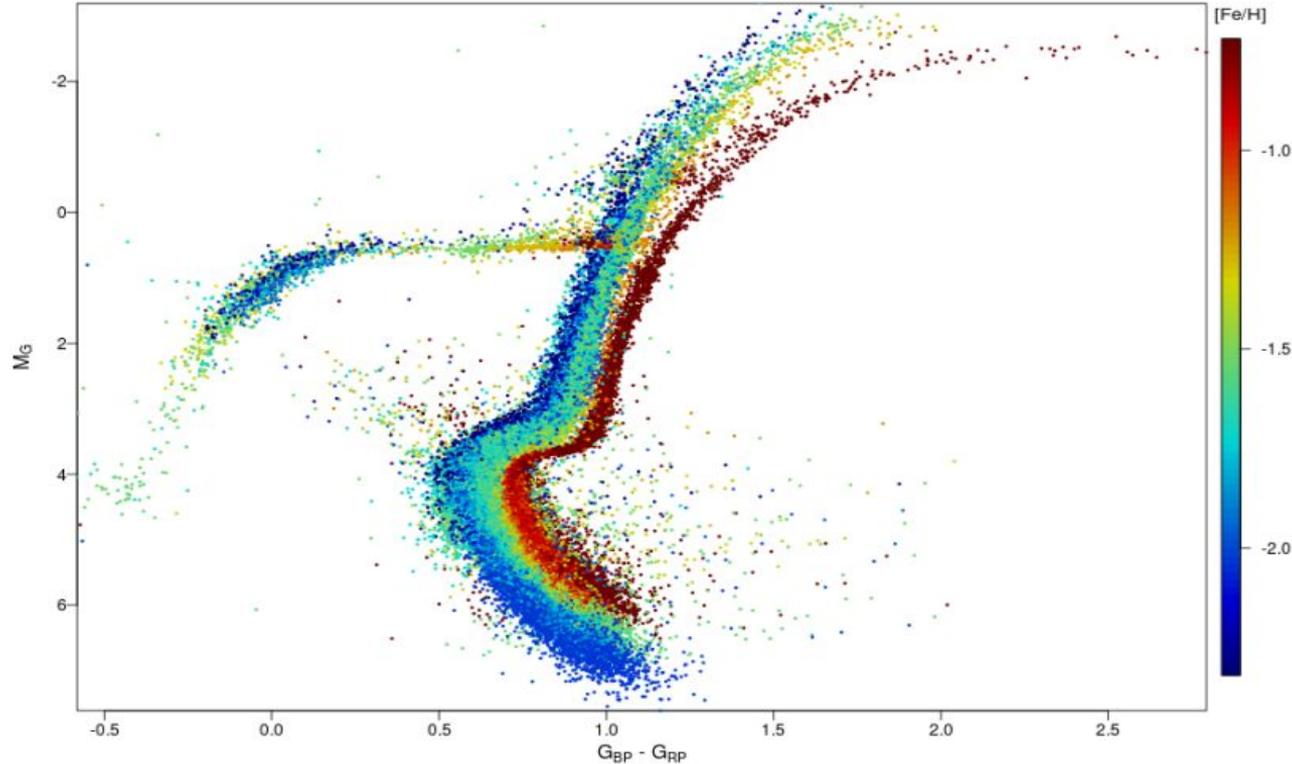
Prof. Gabriel Ferrero

Diagramas Color - Magnitud para diferentes metalicidades



Efectos de la metalicidad en la estructura de los diagramas Color - Magnitud típicos de cúmulos globulares

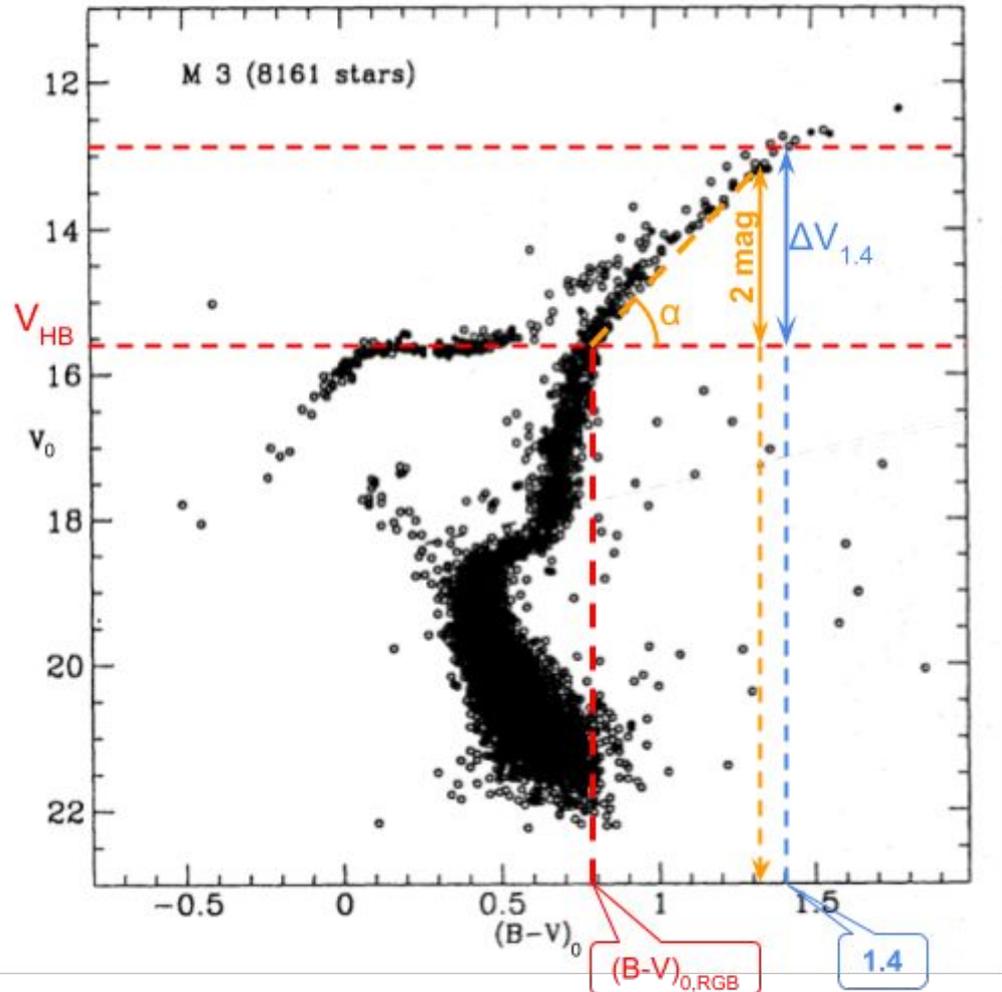
Diagramas Color Magnitud para diferentes metalicidades: observaciones de 14 Cúmulos Globulares



3. Composite HRD for 14 globular clusters, coloured according to metallicity

Parámetros fotométricos para determinar metalicidad

Relacionados con la morfología de la rama de las gigantes rojas (RGB):

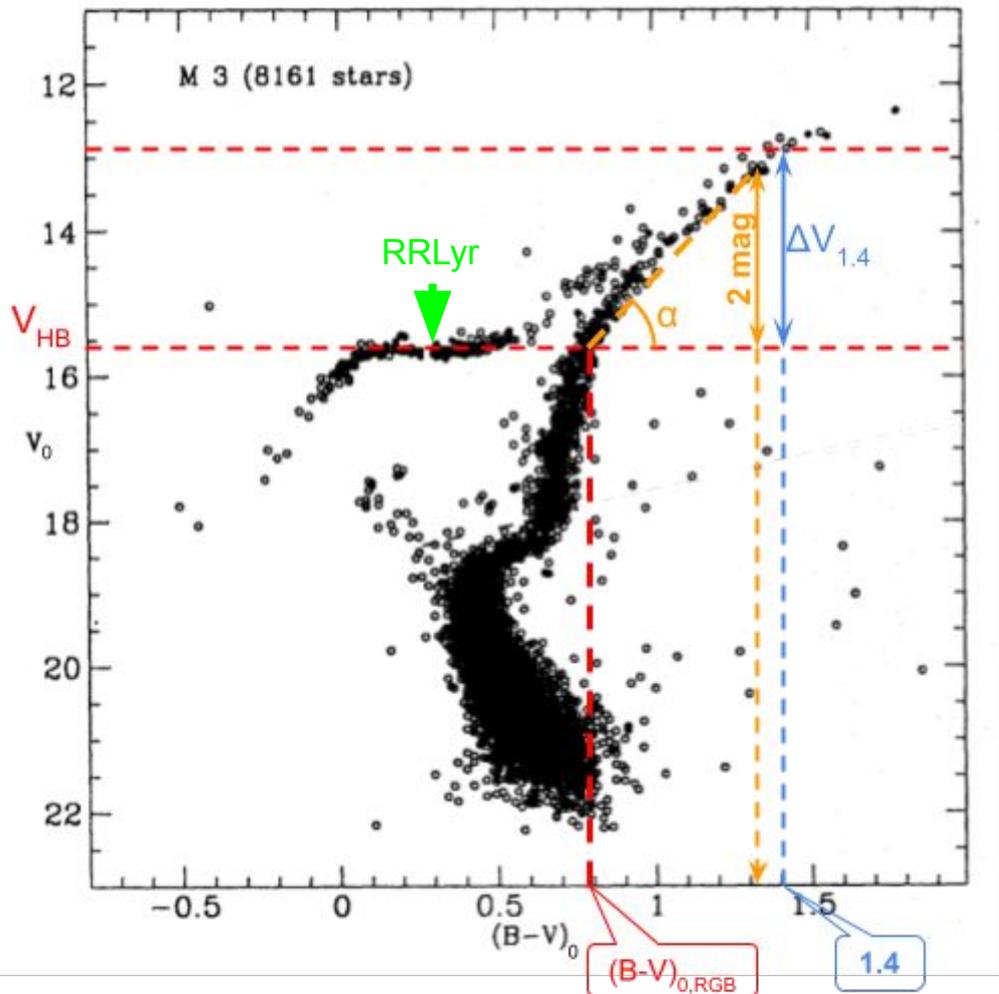


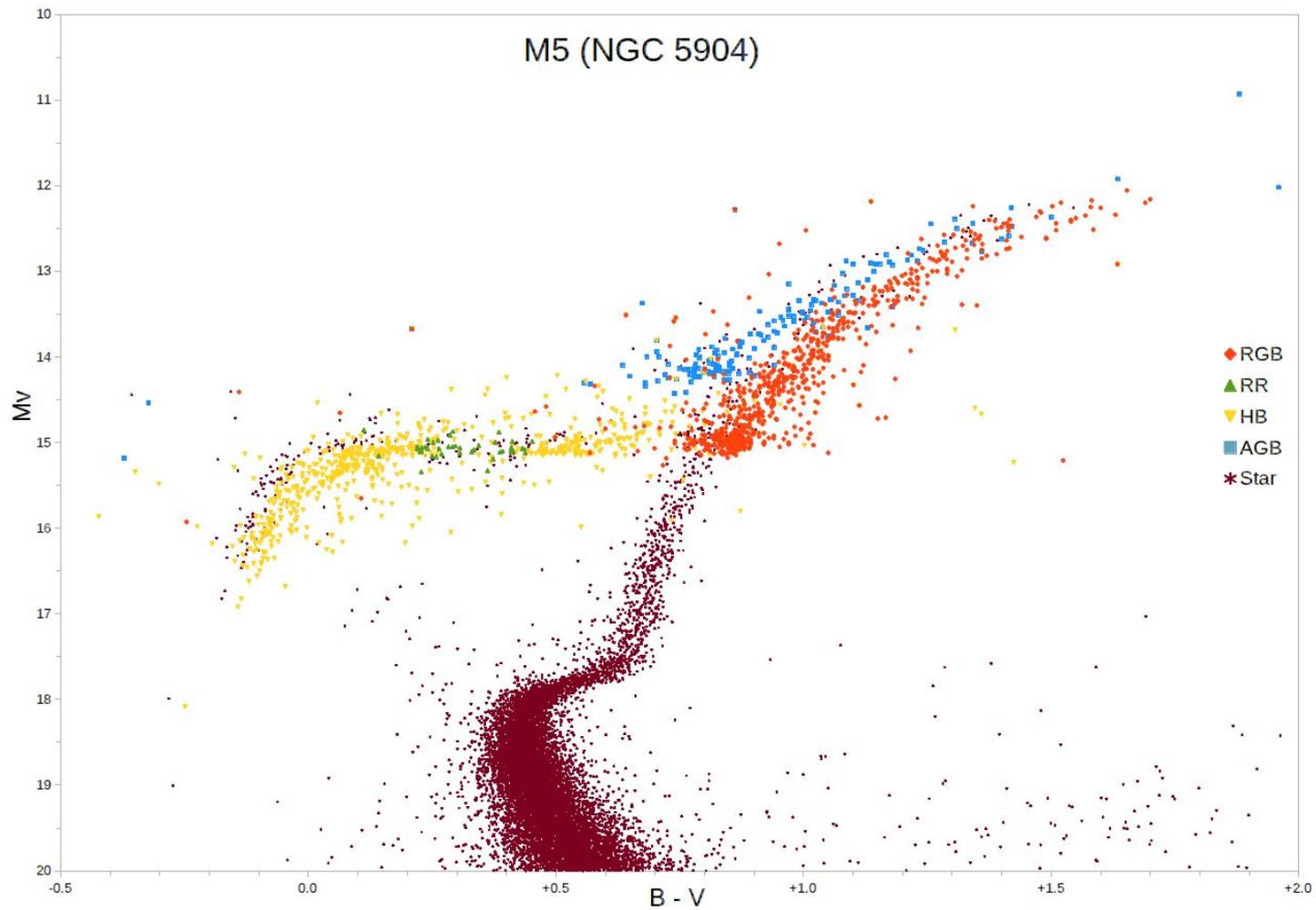
- **$\Delta V_{1.4}$** : altura de la RGB para $(B-V)_0 = 1.4$. Es la medida de la diferencia (en magnitudes) entre el brillo de la Rama Horizontal y la de la RGB para color intrínseco $(B-V)_0 = 1.4$ (Sandage & Wallerstein, 1960). También se puede medir para $(B-V)_0 = 1.2$ o 1.1 (Sarajedini & Layden, 1997)
- **S2.0** : pendiente de la RGB ($= \tan \alpha$). Es la pendiente de la línea que conecta 2 puntos de la RGB. El primero es el punto de la RGB con la misma magnitud que la Rama Horizontal (HB). El segundo es el punto de la RGB que es 2 magnitudes más brillante que la HB.

Parámetros fotométricos para determinar metalicidad

Relacionados con la morfología de la rama de las gigantes rojas (RGB):

- **M** : índice de Mironov
 $M = B / (B+R)$, siendo
B el número de estrellas de la rama horizontal ubicadas hacia el azul respecto de la banda de inestabilidad de las RR Lyrae.
R el número de estrellas de la rama horizontal ubicadas hacia el rojo respecto de la banda de inestabilidad de las RR Lyrae.
- $(B-V)_{0,RGB}$: color intrínseco de la RGB al nivel de brillo de la rama horizontal.





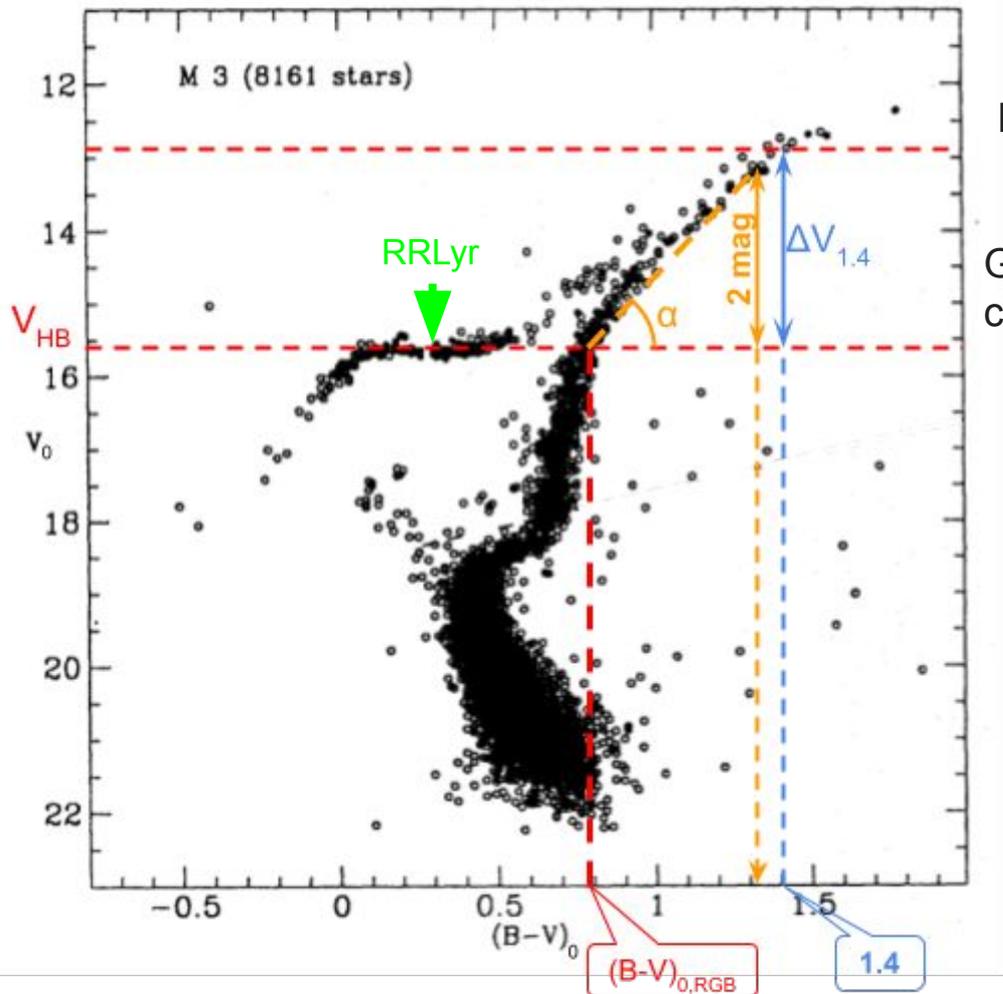
Ubicación de las RR Lyrae en el diagrama color magnitud de Messier 5 (Crédito: Lithopsian)

Parámetros fotométricos para determinar metalicidad

Relacionados con la morfología de la rama de las gigantes rojas (RGB):

Globalmente, al aumentar la metalicidad del cúmulo:

- $\Delta V_{1.4}$, $S_{2.0}$ y M disminuyen
- $(B-V)_{0,RGB}$ aumenta



Parámetros fotométricos para determinar metalicidad

Relacionados con la morfología de la rama de las gigantes rojas (RGB)

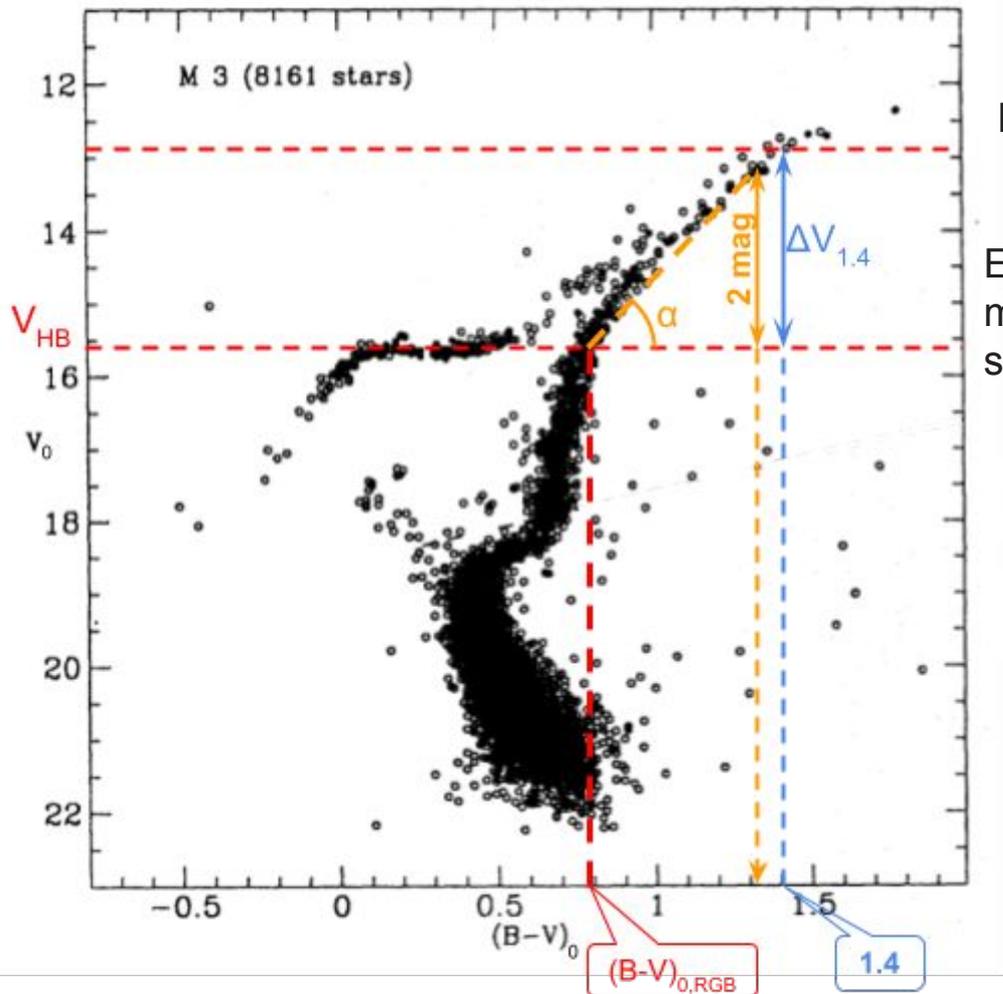
Existen calibraciones para obtener valores de metalicidad a partir de estos índices. Por ejemplo, según Ferraro et al. (1999, AJ 118, 1738):

$$[m/H] = -0.280(\Delta V_{1.4})^2 + 0.717(\Delta V_{1.4}) - 0.918$$

$$[m/H] = -0.29(S2.0) + 0.53$$

De este modo se obtiene que el rango de metalicidad (aproximado) para los cúmulos globulares de la Vía Láctea es:

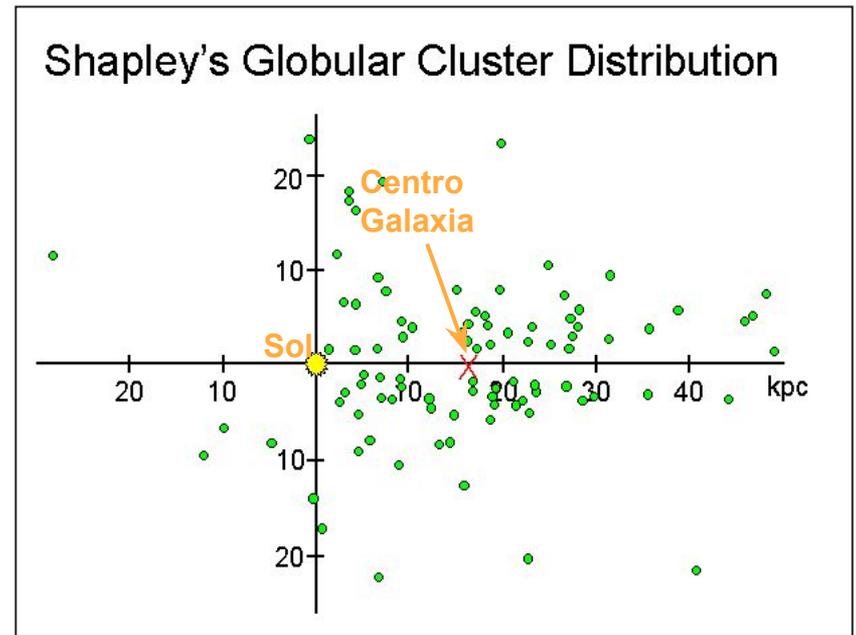
$$-2.4 \leq [Fe/H] \leq 0.2$$



Una breve nota histórica

El primer estudio de la estructura de la Vía Láctea que señaló que su centro estaba lejos del Sol...

Shapley (1916-1920)

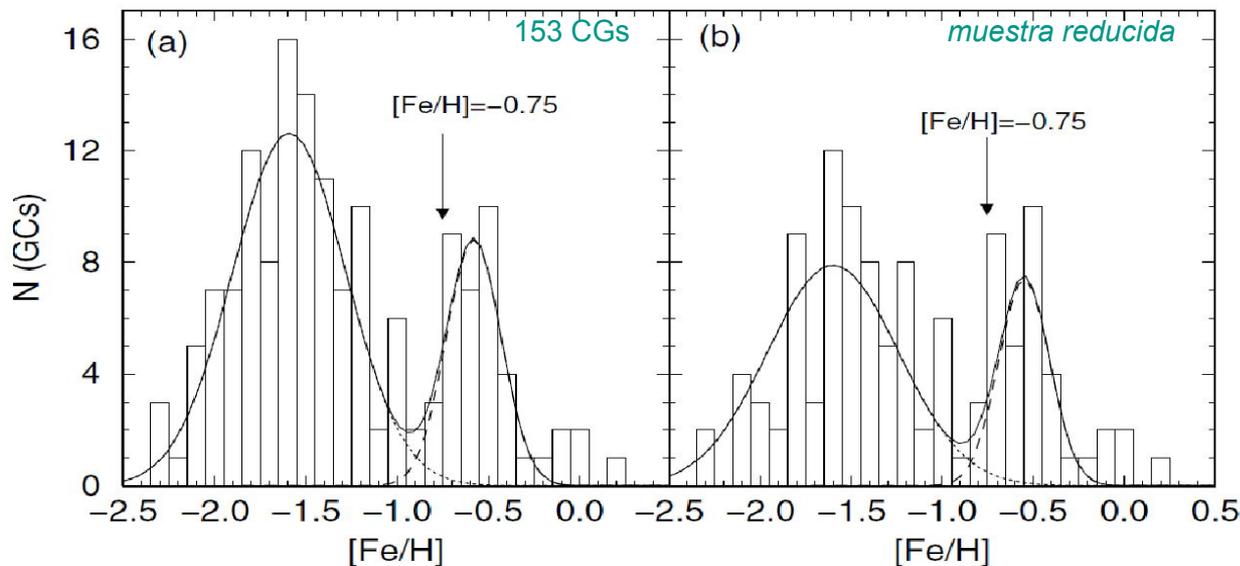


Poco después de que Henrietta Leavitt descubrió la relación período-luminosidad para las cefeidas en la Nube Menor de Magallanes, Shapley propuso, correctamente, que la variabilidad de estas estrellas era debida a una pulsación. Ya se sabía que existían estrellas pulsantes también en los cúmulos globulares (las variables RR Lyrae) y Shapley procedió a aplicar la relación período-luminosidad de las cefeidas a las RR Lyrae para calcular distancias a los cúmulos globulares correspondientes. Shapley no conocía la existencia del polvo interestelar, ni que las RR Lyrae eran diferentes de las cefeidas clásicas; por eso sobreestimó las distancias a los cúmulos globulares. Sin embargo, las mediciones modernas siguen usando básicamente su método, y sus conclusiones generales acerca de la forma y el tamaño de nuestra galaxia han superado la prueba del tiempo. (The Physical Universe, F. Shu, p. 258)

Distribución espacial - metalicidad

En total 157 CGs, catalogados por W.E. Harris hasta 2010
(aunque sus orígenes sean diferentes)

Distribución **bimodal** de metalicidad: cúmulos globulares “azules” y “rojos”
asociados a halo y disco/bulbo



muestra reducida: muestra que se obtiene al quitar todos los CGs más jóvenes que 10^{10} años y aquellos con órbitas retrógradas y/o evidencia de estar relacionados con galaxias enanas (quedan 116 CGs).

Cinemática y Distribución espacial de CGs en la Vía Láctea

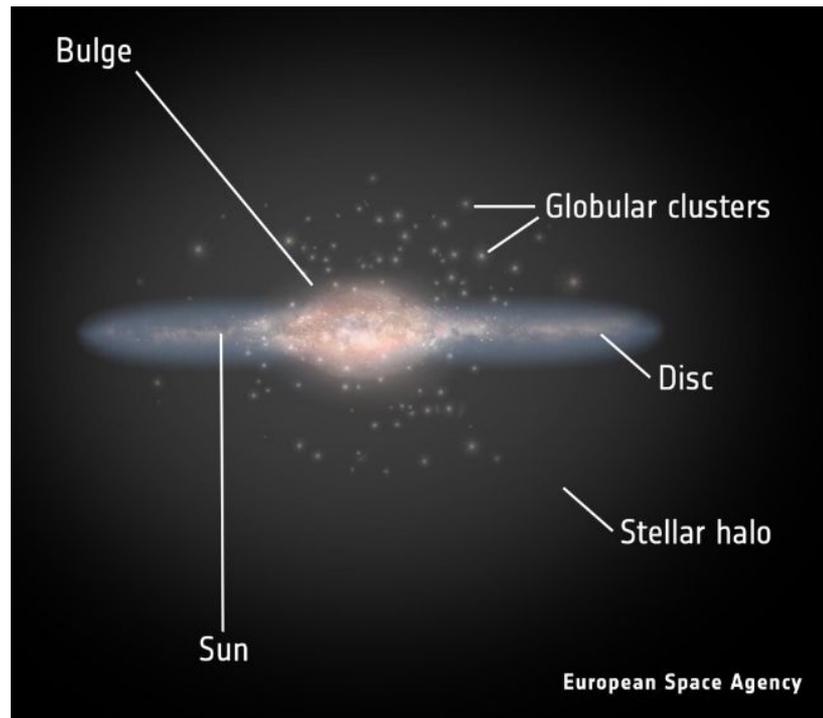
Posti & Helmi (2019):

“Nuevas mediciones de GAIA y el HST de los movimientos propios de 91 CGs con una precisión sin precedentes.”

“Nuestro mejor modelo de la componente de **halo** tiene una pequeña rotación retrógrada neta del orden de $V_{rot} \sim -15 \text{ km/s}$ a 20 kpc o no rotación neta, mientras que la componente de **disco** rota a alrededor de $V_{rot} \sim 210 \text{ km/s}$ al radio solar.”

(...)

“Los cúmulos del halo más ligados se encuentran típicamente en órbitas contra-rotantes o no-rotantes. La mayoría de los cúmulos más ricos en metales ($[Fe/H] > -0.8$) tienen una alta probabilidad de estar asociados con la componente de disco.”



Esquema de la Vía Láctea (elaboración artística)

Distribución espacial y metalicidad de los CGs

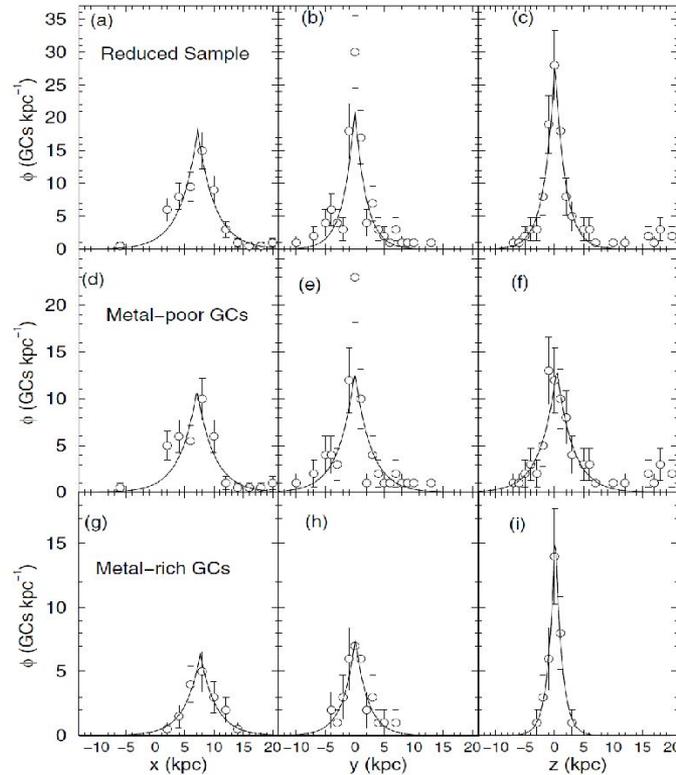
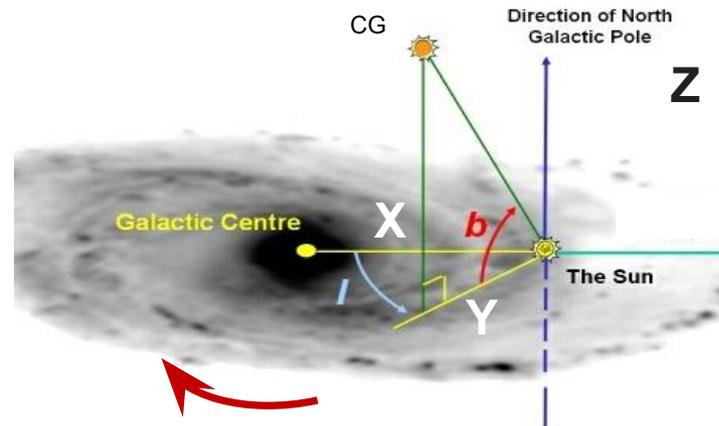


Fig. 4. One-dimensional distribution functions of the reduced sample

Bica et al. 2006

- CGs pobres en metales □ halo
 $(\Delta x, \Delta y, \Delta z) \sim 35 \times 36 \times 30$ kpc
 esfera levemente achatada, $\Delta z/\Delta x \sim 0.8$.
- CGs ricos en metales □ disco
 $(\Delta x, \Delta y, \Delta z) \sim 12 \times 11 \times 5$ kpc,
 esferoide oblongo, $\Delta z/\Delta x \sim 0.4$.



Determinación de edad (y distancia): ajuste de isocronas

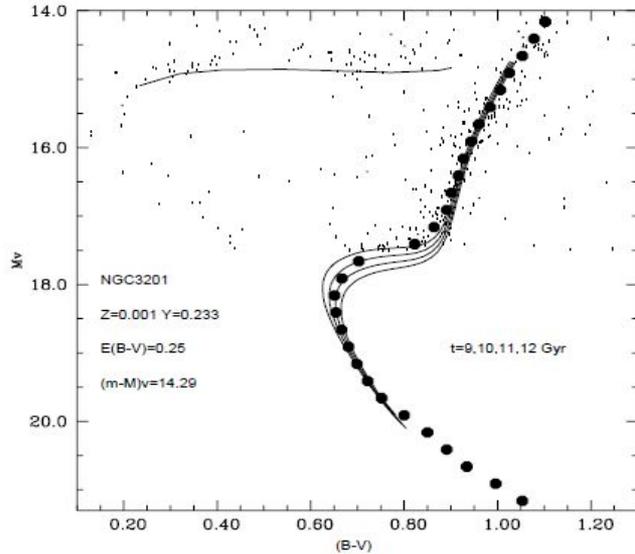


Fig. 7. Isochrones for ages between 9 and 12 Gyr and ZAHB theoretical models compared to the CMD and ridge line of NGC3201 (Covino & Ortolani 1997). For sake of clarity, only the ridge line is displayed for the cluster MS

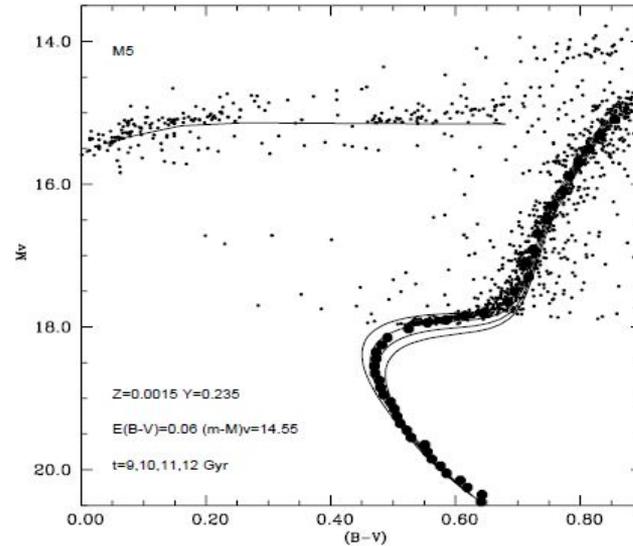


Fig. 9. Isochrones for ages between 9 and 12 Gyr and ZAHB theoretical models compared to the CMD and ridge line of M5 (Sandquist et al. 1996). Only the ridge line is displayed for the cluster MS, and along the RGB, at luminosities lower than the HB, only a subsample of stars is shown

Los Diagramas Color - Magnitud de los Cúmulos Globulares son isocronas.

Determinación de edad (y distancia): ajuste de isocronas

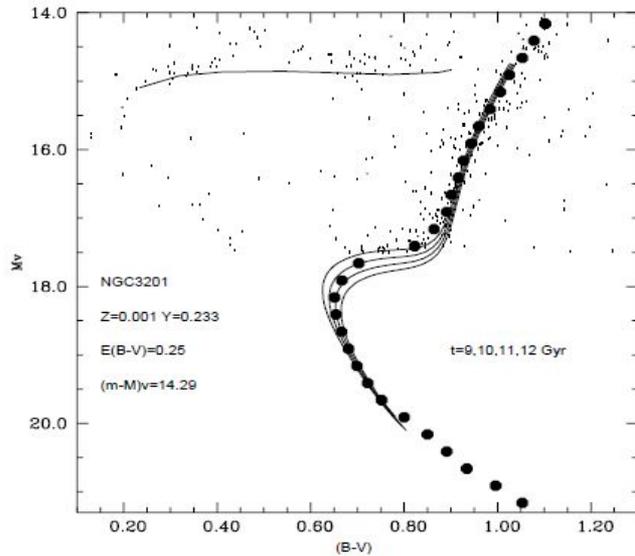


Fig. 7. Isochrones for ages between 9 and 12 Gyr and ZAHB theoretical models compared to the CMD and ridge line of NGC3201 (Covino & Ortolani 1997). For sake of clarity, only the ridge line is displayed for the cluster MS

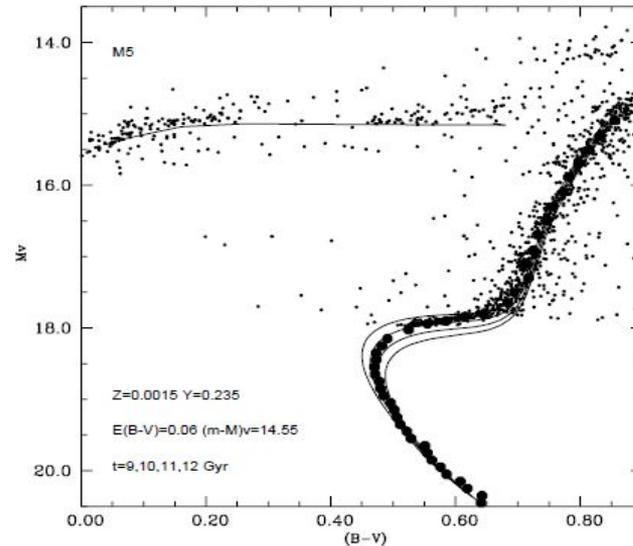


Fig. 9. Isochrones for ages between 9 and 12 Gyr and ZAHB theoretical models compared to the CMD and ridge line of M5 (Sandquist et al. 1996). Only the ridge line is displayed for the cluster MS, and along the RGB, at luminosities lower than the HB, only a subsample of stars is shown

La posición del ***turn-off*** es la característica del diagrama C-M de los cúmulos globulares **más sensible a la edad** de la población estelar.

Cuanto mayor es la edad del cúmulo, menos luminoso y más rojo es el turn-off.

Determinación de edad (y distancia): ajuste de isocronas

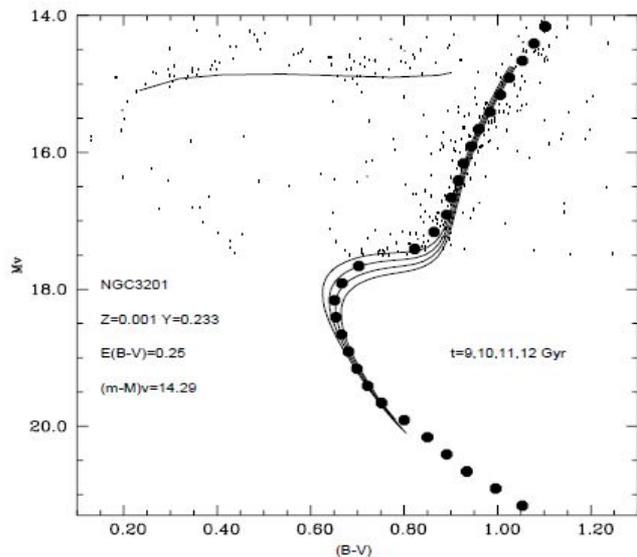


Fig. 7. Isochrones for ages between 9 and 12 Gyr and ZAHB theoretical models compared to the CMD and ridge line of NGC3201 (Covino & Ortolani 1997). For sake of clarity, only the ridge line is displayed for the cluster MS

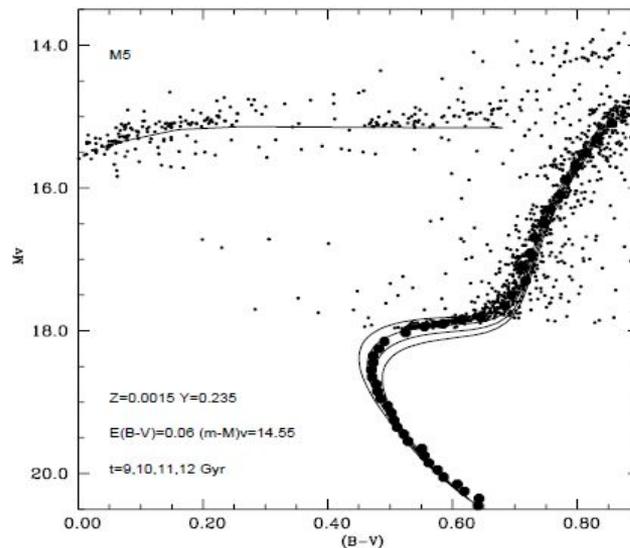


Fig. 9. Isochrones for ages between 9 and 12 Gyr and ZAHB theoretical models compared to the CMD and ridge line of M5 (Sandquist et al. 1996). Only the ridge line is displayed for the cluster MS, and along the RGB, at luminosities lower than the HB, only a subsample of stars is shown

Lo más usado: **ajustar isocronas** a la región de la secuencia principal donde está el **turn-off** y la **rama de las subgigantes**.

Ventaja: la **distancia** es un parámetro libre que puede obtenerse simultáneamente.

Pero: hay que saber la **metalicidad** y el **enrojecimiento** del cúmulo.

Distancias: magnitud absoluta de variables RR Lyrae y estrellas de la rama horizontal (HB)

Datos de Hipparcos:

Carretta et al. 2000, ApJ 533, 215

a) *RR Lyrae and HB stars. Trigonometric Parallaxes*

$$M_V(RR) = 0.18([\text{Fe}/\text{H}] + 1.5) + 0.62 \pm 0.11.$$

b) *RR Lyrae and HB stars. Statistical Parallaxes*

$$M_V(RR) = 0.18([\text{Fe}/\text{H}] + 1.5) + 0.73 \pm 0.12.$$

c) *RR Lyrae and HB stars. The Baade-Wesselink method.*

$$M_V(RR) = 0.18([\text{Fe}/\text{H}] + 1.5) + 0.71 \pm 0.08.$$

Observaciones de RR Lyr en la LMC: $\langle M_V \rangle = 0.214 ([\text{Fe}/\text{H}] + 1.5) + 0.57 \pm 0.05$

Clementini et al. 2003, AJ 125, 1309

[Se verá la calibración de estas M_V más adelante, en “Escala de distancias extragaláctica”.]

Función de Luminosidad integrada

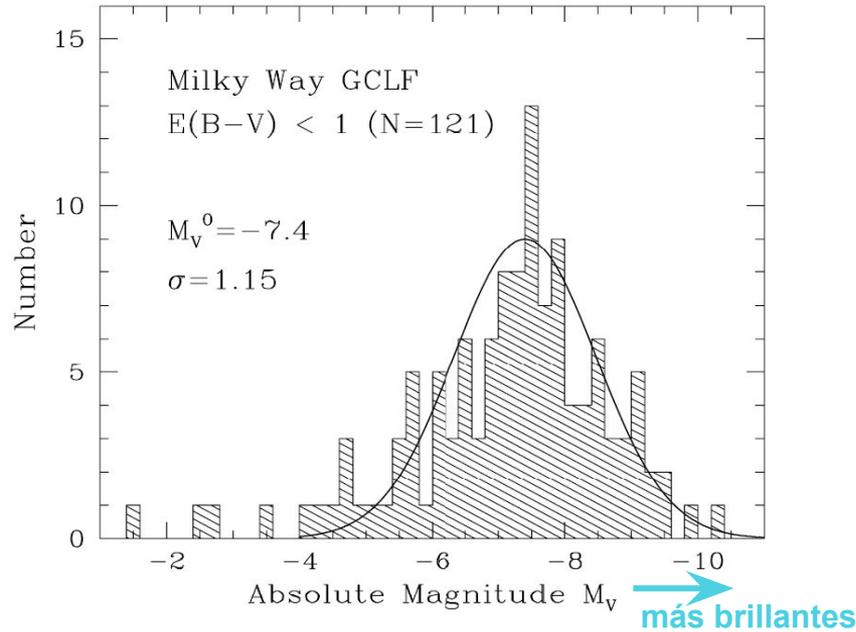


Fig. 1.33. Number of globular clusters per 0.2-magnitude bin, for the Milky Way. A Gaussian curve with mean $M_V = -7.4$ and standard deviation $\sigma = 1.15$ mag is superimposed to indicate the degree of symmetry of the distribution

Harris 2001, Saas Fee Advanced Course 28: Star Clusters 28, 223

Se puede ajustar con una gaussiana, cuyo máximo (*turn-over*) tiene

$$M_V = -7.4 \text{ mag,}$$

y corresponde a una masa típica

$$\sim 2 \times 10^5 M_\odot$$

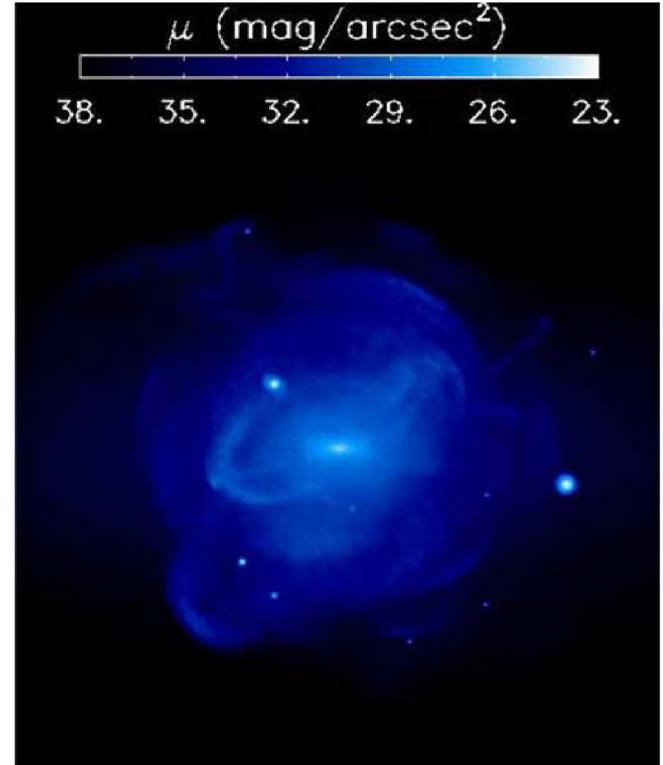
En la Vía Láctea se observa la gaussiana “completa”.

Su forma es consecuencia de la destrucción de los CGs de menor masa desde su formación.

Relación edad - metalicidad

Forbes & Bridges (2010, MN 404,1203): La relación edad-metalicidad para los CGs de la Vía Láctea muestra dos ramas diferentes: una correspondiente a una edad aprox. constante ~ 12.8 Gyr (CGs más antiguos) y otra que tiende a menores edades.

Se especula que la rama “joven” está dominada por CGs que pueden haber sido acretaados junto con sus galaxias enanas huésped, y cuyos núcleos pueden sobrevivir como CGs.



Simulación de halo estelar, construido a partir de satélites acretaados. (Helmi 2008)

Distribución de edades

64 CGs con $R_{GC} < \sim 20$ kpc y edades normalizadas a 12.8 Gyr

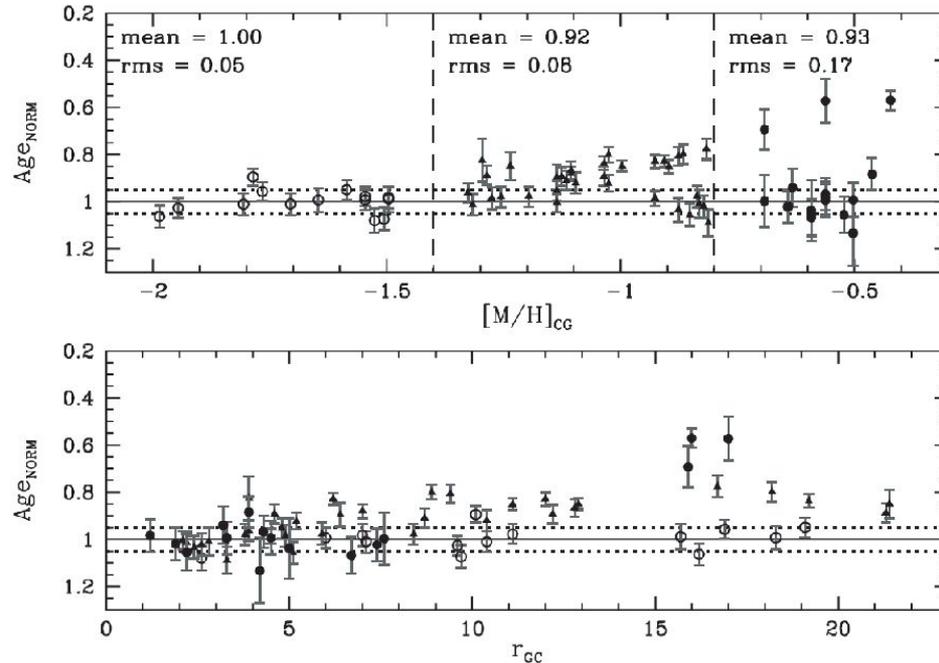


Figure 10. Globular cluster normalized ages as a function of $[M/H]$ in the CG-metallicity scale (upper panel), and as a function of galactocentric distance (r_{GC} kpc, lower panel). These results have been derived using the D07 stellar evolution library. Open circles, filled triangles, and filled circles represent GCs within the low-, intermediate-, and high-metallicity groups, respectively. For each of the three metallicity groups, mean age and rms are indicated. See text for details.

Marín-Franch et al. 2009, ApJ 694, 1498 : ACS Survey of Galactic globular clusters
'CG metallicity scale': escala de metalicidad de Carretta & Gratton (1997)

Relación edad - metalicidad

64 CGs con $R_{gc} < \sim 20$ kpc y edades normalizadas a 12.8 Gyr

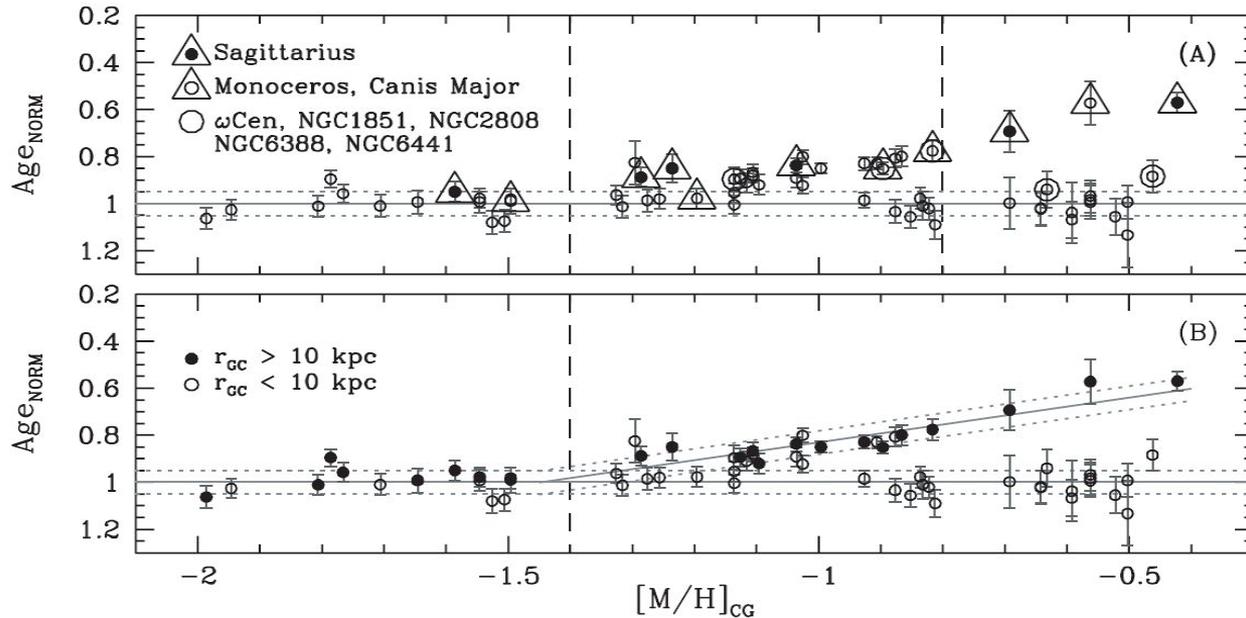


Figure 13. Age–metallicity relation using the CG-metallicity scale (*a* and *b*) and normalized ages vs. galactocentric distance (*c* and *d*). In *a*, clusters associated with Sagittarius, Monoceros, and Canis Major have been marked, together with multiple stellar population clusters. In *b*, GGCs with $r_{GC} < 10$ kpc are represented with open circles, while those with $r_{GC} > 10$ kpc are plotted with filled circles. A least-squares fit to the young group’s age–metallicity relation is also plotted.

Un caso particular: ω Cen es el CG más brillante de la Vía Láctea (pero... ¿es un CG?)

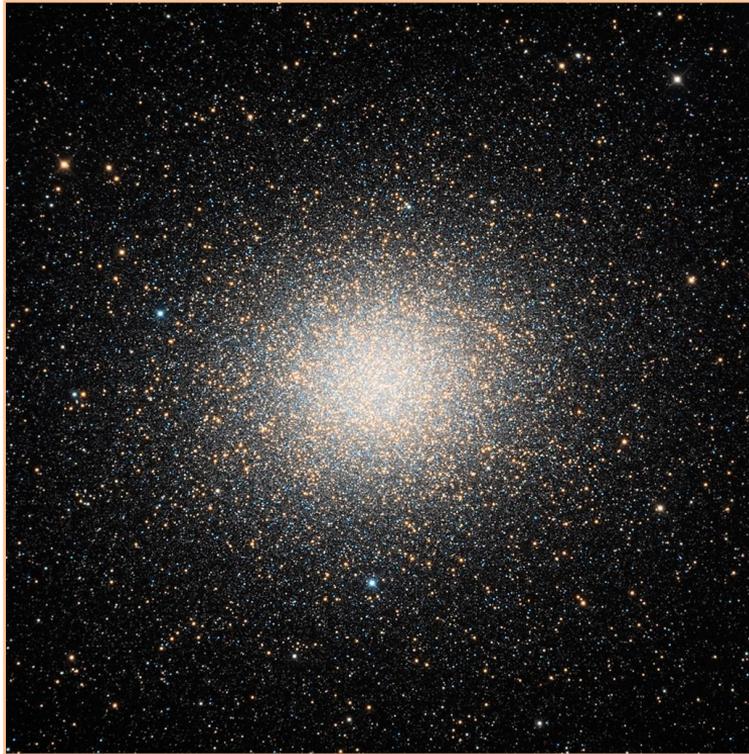
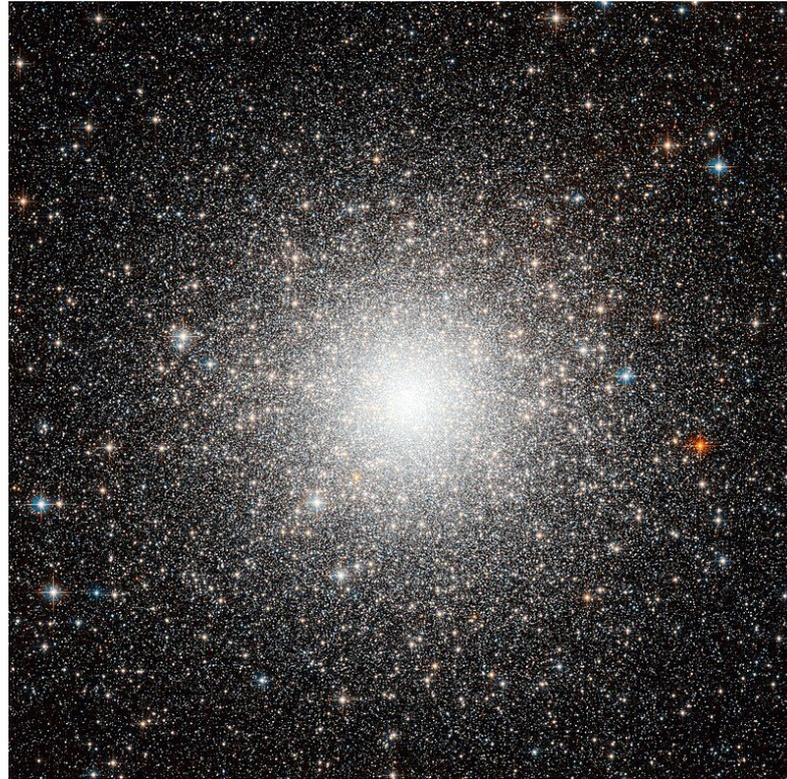


Image Credit & Copyright: Michael Miller, Jimmy Walker

- ω Cen es el cúmulo más masivo de la Galaxia $\sim (2-7) \times 10^6 M_{\odot}$
- se sabe que alberga varias poblaciones estelares
- tiene un movimiento retrógrado en el halo
- posible origen:
 - una fusión de varios cúmulos o
 - “core” de una galaxia enana, destruída por la Vía Láctea

Otro ejemplo: **Messier 54**



ESA/Hubble & NASA

Núcleo de la galaxia enana esferoidal (o elíptica) de Sagitario

<https://www.youtube.com/watch?v=bHTFIFMuLUU>

El origen del sistema de cúmulos globulares Galácticos

Massari et al. 2019:

“... combinamos la *información cinemática proporcionada por Gaia* para casi todos los cúmulos Galácticos, con la mayor muestra de *edades de cúmulos* disponible, después de corregir por errores sistemáticos...

Encontramos que:

- alrededor del **40%** de los cúmulos **probablemente se formaron in situ**.
- una fracción similar, **35%**, se pueden asociar con **eventos de fusión**, en particular a *Gaia-Enceladus* (19%), la *galaxia enana de Sagitario* (5%), la *progenitora de las corrientes de Helmi streams* (6%) y la *galaxia Sequoia* (5%), aunque permanecen algunas incertezas debido a una cierta superposición en sus características dinámicas.”

Distancias: ajuste de secuencia principal + paralajes de subenanas

“El **ajuste de la Secuencia Principal** es uno de los métodos clásicos para estimar distancias a los cúmulos globulares.

- En la aproximación empírica, se usan **subenanas del halo local** de distancia y abundancia conocida, para definir una **secuencia principal pobre en metales** en el plano $(M_V, (B-V)_o)$.
- Haciendo coincidir esa secuencia calibrada con el **diagrama color-magnitud observado del cúmulo**, el valor promedio del desplazamiento $(V_o - M_V)$ indica el módulo de distancia del cúmulo.” (Reid N. 1998, PNAS 95, 8)

Problema: el número pequeño de subenanas con paralajes de alta calidad.

- Muestra aumentada con el satélite Hipparcos.
- Contribución significativa de *GAIA*.

Distancias: ajuste de secuencia principal + paralajes de subenanas (GAIA)

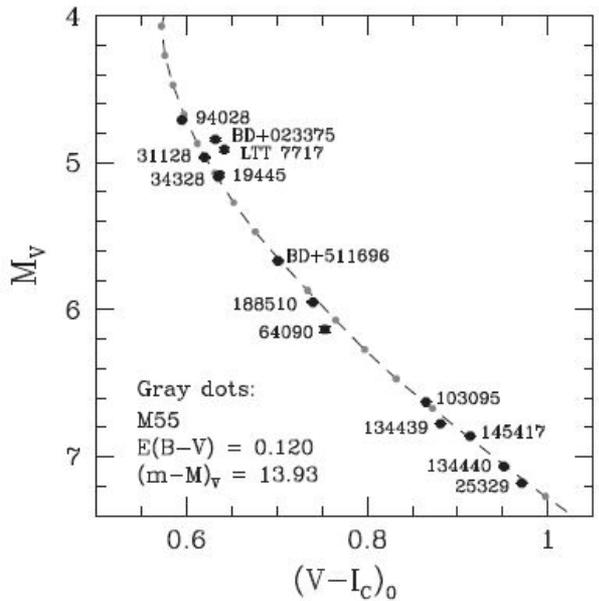


Figure 25. Fit of the main-sequence fiducial of M55 (gray dots connected by a dashed curve) to the 11 subdwarfs in our sample (filled circles with vertical error bars), once small corrections have been applied to their colors to compensate for the difference between their metallicities and that of the cluster (which is assumed to have $[Fe/H] = -1.85$). If $E(B - V) = 0.120$, the MS fit yields $(m - M)_V = 13.93$ (as indicated).

Ajuste de la SP de M55 a 11 subenanas con paralajes trigonométricas de GAIA DR2.

Cúmulos Globulares en la Vía Láctea: trabajos recientes

❖ GAIA DR2 (2018): datos de excelente calidad.

Paralajes y mov. propios para 75 cúmulos globulares Galácticos.

Velocidades radiales para 57 de ellos (más en los próximos DRs).

❖ Perfiles radiales de densidad numérica de cúmulos globulares Galácticos (de Boer et al. 2019 -> ¿el modelo de King falla en la parte externa?)

❖ Estudio de órbitas, rotación y otros aspectos de la dinámica de cúmulos globulares (Helmi et al. 2018).

Cúmulos Globulares en la Vía Láctea: trabajos recientes

Posti & Helmi (2019):

- “La mayoría de los cúmulos más ricos en metales ($[Fe/H] > -0.8$) muy probablemente pertenecen a la componente disco, mientras que aproximadamente el 67% de los cúmulos más pobres en metales ($[Fe/H] \leq -0.8$) parece más bien parte de la componente halo.
- medimos la masa de materia oscura del halo de la Galaxia dentro de 20 kpc como $\log(M_{20;DM} / M_{\odot}) = 11.14 \pm 0.05$.”

(Esto vendría a ser $\sim 1.38 \times 10^{11} M_{\odot}$)