

Bolilla 3

Cúmulos globulares

Cúmulos globulares



Messier 3 / NGC 5272, imagen del telescopio 3.5m WIYN
(Wisconsin Indiana Yale NOAO Observatory)

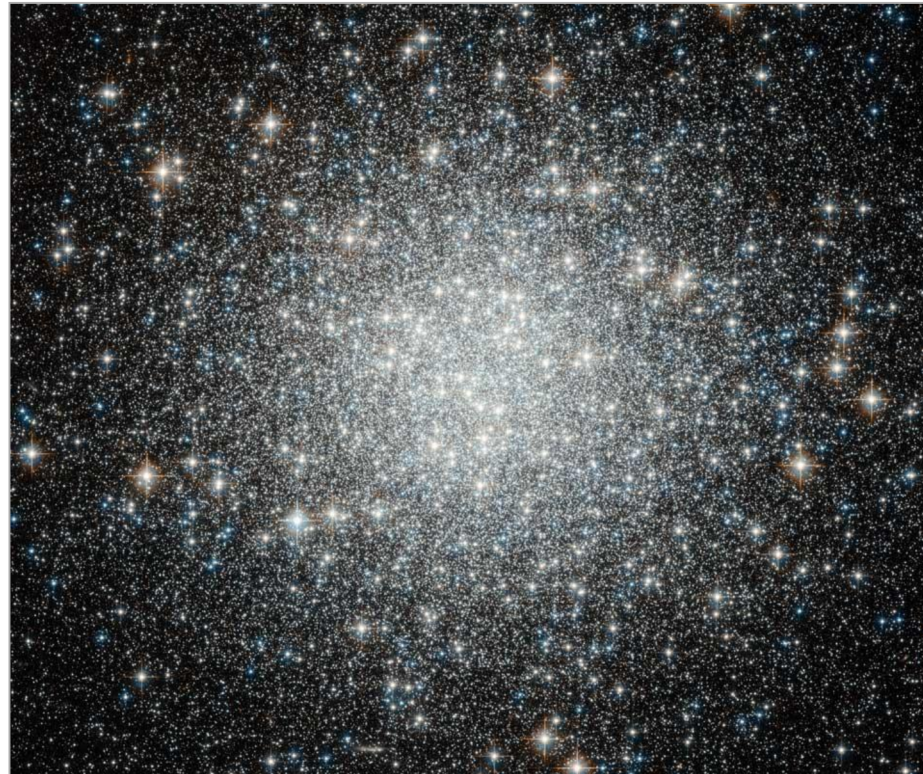
Ejemplos: 47 Tuc / NGC 104 en el hemisferio Sur, es el 2do CG más brillante de la Vía Láctea (después de ω Cen)



Ejemplos: NGC 6934, imagen de la Advanced Camera for Surveys (ACS)
del Telescopio Espacial Hubble (HST)



Ejemplos: M53 / NGC 5024, imagen del Telescopio Espacial Hubble



Características básicas de los cúmulos globulares (CGs)

- Aspecto regular y \sim esférico.
- Sistemas estelares viejos: 10 a 14 x 10^9 años (10⁹ años = 1 Gyr)
- Masas: $\sim 10^4 - 10^6 M_{\odot}$
- Intrínsecamente brillantes: $M_V \sim -4$ a -10 mag (mag. integradas)
- Tamaños compactos: $r_t \sim$ algunos pc / decenas de pc
- Poblaciones estelares “homogéneas”: la mayoría NO son “Poblaciones Estelares Simples” (Simple Stellar Populations, SSP)
- Las galaxias están rodeadas por decenas, centenares y hasta miles de CGs.
- Reflejan las condiciones de formación, dinámica y evolución de sus galaxias-huésped.

Zooming in on the globular star cluster NGC 6388:

This sequence starts with a wide view of the Milky Way and zooms in on the globular star cluster NGC 6388 in the constellation of Scorpius. The final images are first from MUSE on ESO's Very Large Telescope in Wide Field Mode and then the last, very sharp, image shows part of the cluster using the MUSE Narrow Field Mode with adaptive optics turned on.

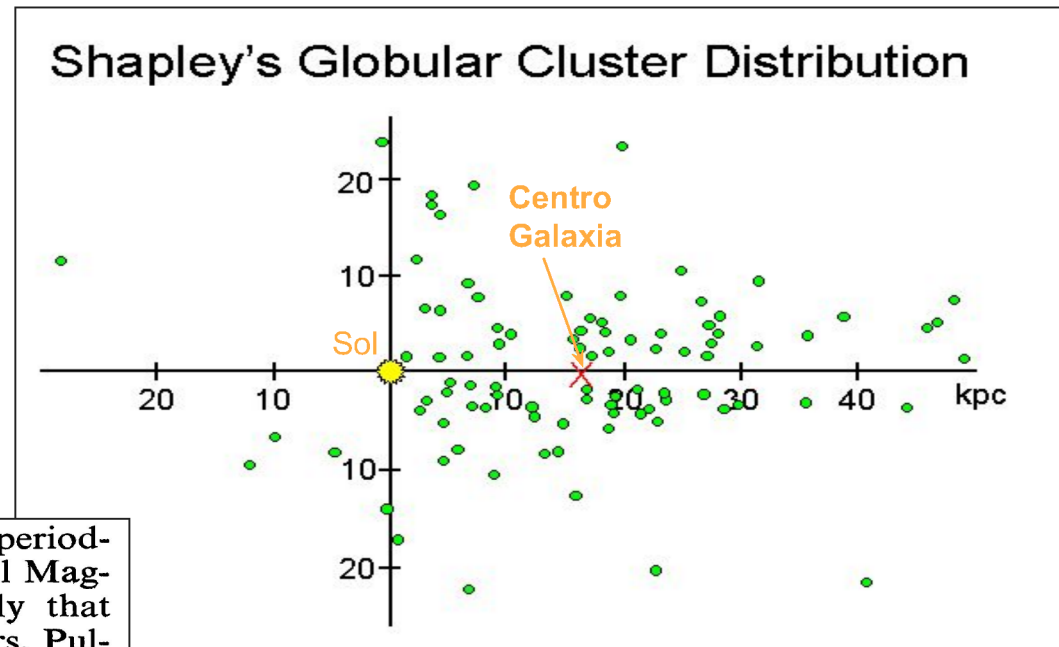
(European Southern Observatory (ESO) , 2018)

<https://www.youtube.com/watch?v=SjSv65FTOFA>

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

Shapley (1916-1920)

Shortly after Henrietta Levitt's discovery of the period-luminosity relationship for Cepheids in the Small Magellanic Clouds, Shapley had proposed correctly that pulsation lay behind the variability of these stars. Pulsating stars, the RR Lyrae variables, were known to exist in globular clusters, and Shapley proceeded to apply the Cepheid period-luminosity relationship to the RR Lyrae stars to calculate the distances to the globular clusters in which they were found. Shapley did not know of interstellar dust, nor that RR Lyrae stars differ from classical Cepheids (Chapter 9); so he overestimated the distances to the globular clusters. However, modern measurements still use his basic method, and his general conclusions about the shape and size of our Galaxy have stood the test of time



"The Physical Universe", Shu

CATÁLOGOS DE PARÁMETROS DE CGs DE LA VÍA LÁCTEA

Compilado por *William E. Harris*, McMaster University

Última revisión: Diciembre 2010

157 objetos clasificados como cúmulos globulares de la Vía Láctea

<http://physwww.mcmaster.ca/~harris/Databases.html>

- Part I: Identifications and Positional Data
- Part II: Metallicity and Photometry
- Part III: Velocities and Structural Parameters

Referencia: Harris, W.E. 1996, *Astronomical Journal*, 112, 1487.

CATÁLOGOS DE PARÁMETROS DE CGs DE LA VÍA LÁCTEA

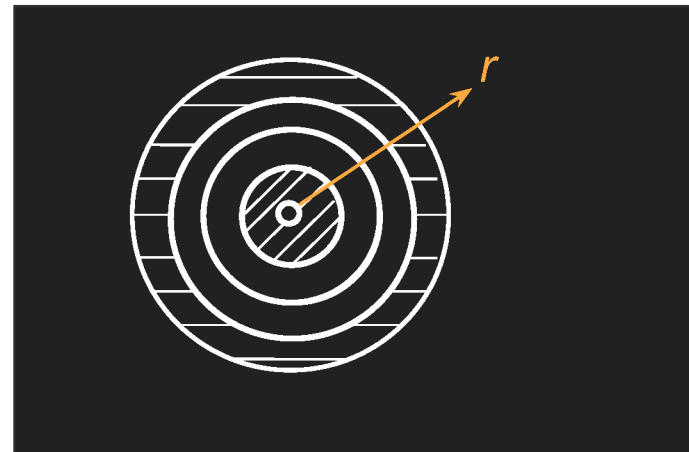
Más reciente y con bibliografía actualizada: “**Gclusters**”

Basado en el catálogo de W.E. Harris, compilado por M. Castellani (INAF – Roma)

<http://gclusters.altervista.org>

Perfiles de brillo superficial: ajustes con *modelos de King*

Dada la apariencia esférica de los CGs, la distribución de brillo proyectada es *paramétrica y con concentración hacia el centro*. Los perfiles de brillo superficial se obtienen midiendo el brillo por unidad de área (fotometría integrada), tal como si se midiera el brillo en anillos concéntricos. Así se obtuvo (originalmente en forma empírica) la distribución de brillo proyectada que se ajusta con la **ley de King (1962)**.



En general: en la parte interna se mide brillo y en la externa se hacen conteos estelares, según la resolución instrumental. Hay que corregir por la contaminación de fondo (“background”), observando, por ej., zonas cercanas donde no llegue el cúmulo.

Ley de King

$$f(r) = f_0 \left\{ \frac{1}{\sqrt{1 + r^2/r_c^2}} - \frac{1}{\sqrt{1 + r_t^2/r_c^2}} \right\}^2$$

Representa una familia paramétrica de curvas, y queda determinada por 3 parámetros: f_0, r_c, r_t que se obtienen a partir del mejor ajuste a la distribución observada.

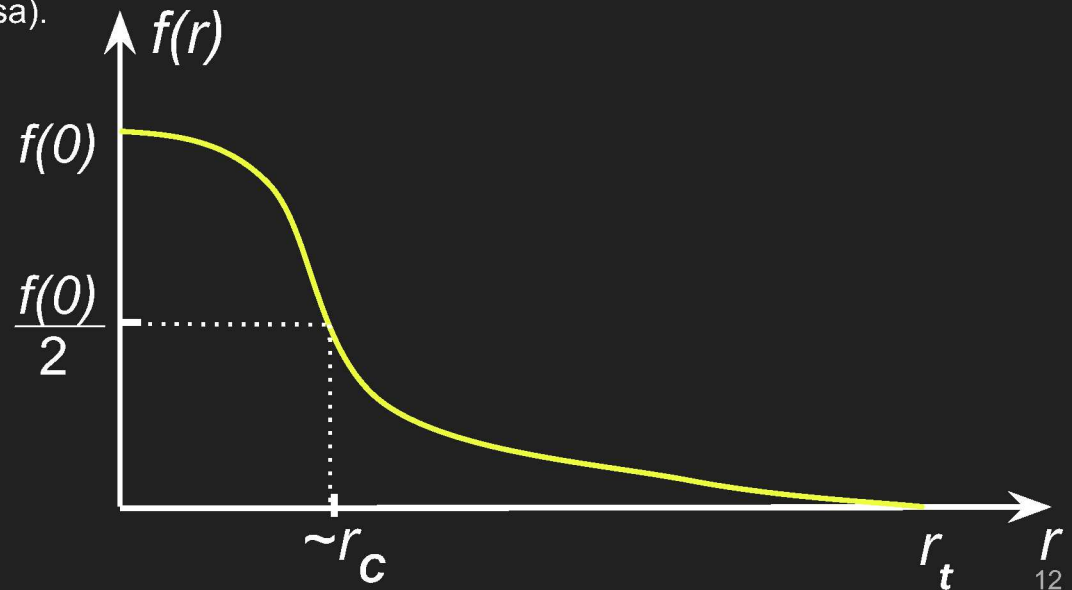
$f(r)$: *brillo superficial* (en unidades de intensidad, esto es flujo/arcsec²) o *densidad numérica proyectada* (Nro. de estrellas/área suponiendo que todas tienen igual masa).

r : *radio proyectado* (es la *variable*).

$f_0 \cong f(0)$: aprox. el *brillo central*.

r_c : radio del "core".

r_t : radio de marea o "tidal", corresponde a la mayor distancia al centro (radio) que puede tener una estrella y seguir estando ligada al cúmulo. Es un límite físico que depende de la fuerza de marea de la Galaxia. En el gráfico es el radio en que $f(r) \rightarrow 0$ (ya corregida la contaminación de fondo).



Valores típicos: $r_c = 0.5$ a 1.5 pc

$$r_t = 20 \text{ a } 50 \text{ pc}$$

(entonces, un valor típico será $r_t / r_c \sim 30$, con lo que el 2do. término de la ley de King es ~ 0.03)

□ Si $r = r_c$ con $r_t \gg r_c \Rightarrow f(r_c) \cong f_0 / 2$

□ En el caso límite $r_t \rightarrow \infty$ $f(r) = \frac{f_0}{1 + (r/r_c)^2}$ (ley de Hubble modificada,

sólo 2 parámetros libres)

donde: $f(0) = f_0$ y $f(r_c) = f_0 / 2$

□ Con el ajuste de la ley de King también se obtiene el *parámetro de concentración* $c = \log\left(\frac{r_t}{r_c}\right)$

Perfil observado combinando brillo superficial y conteos estelares

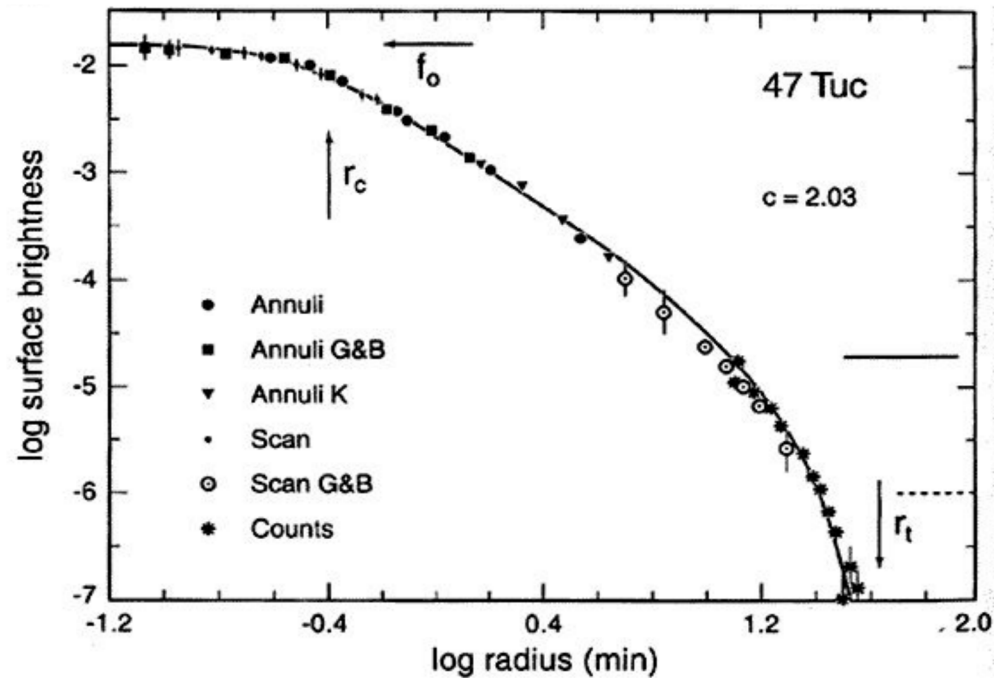
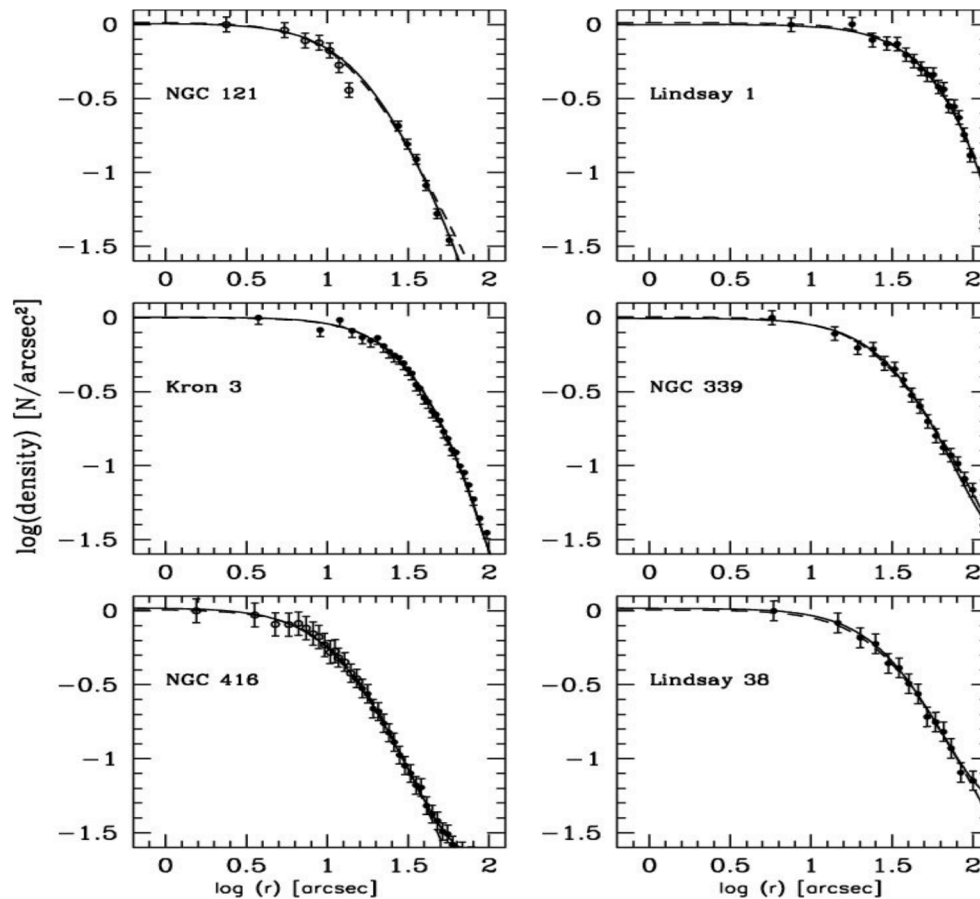


FIGURE 6. Surface brightness profile of 47 Tuc from Illingworth & Illingworth (1976). 'Annuli' are centered apertures measurements, 'scan' refers to photoelectric scans, and 'counts' refers to star counts on photographic plates. The parameters f_0 , r_c and r_t are the central surface brightness and core and tidal radii from King's (1966a) models. c is the concentration parameter. The horizontal lines indicate the background level for the different observations. Surface brightness units are $V = 10.0 \text{ mag arcsec}^{-2}$

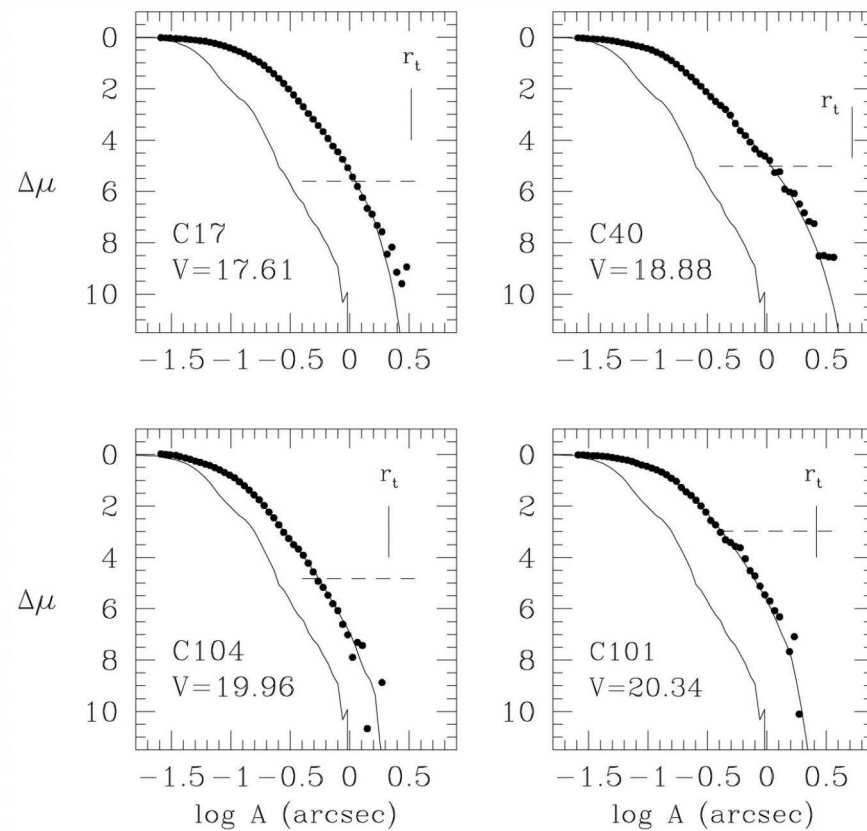
Perfiles observados de densidad numérica proyectada



Perfiles de densidad numérica en cúmulos de la Nube Menor de Magallanes.

Las líneas sólidas indican el mejor ajuste de la distribución de densidad en la dirección radial con un modelo de King. (Glatt et al. 2009)

Perfiles observados de brillo superficial



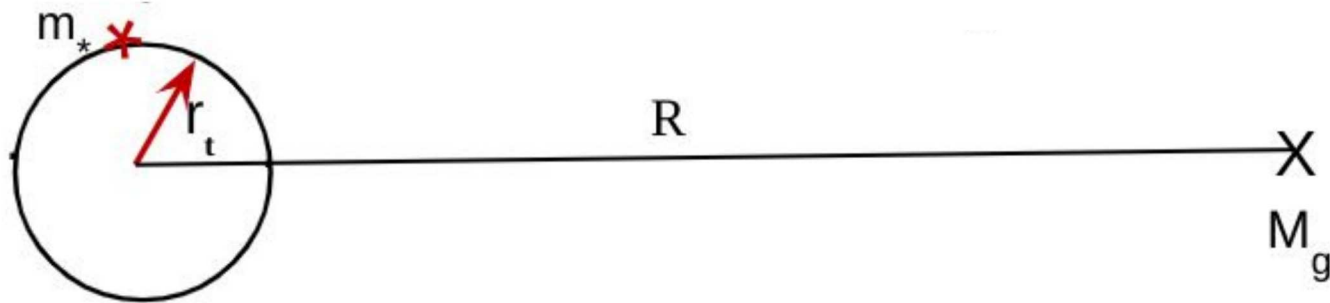
Perfiles típicos de 4 CGs asociados a la galaxia NGC 5128
(círculos llenos: observaciones HST)

$\Delta\mu$: brillo superficial V [mag/arcsec²]
respecto al brillo superficial central

A : semieje mayor [arcsec]

Harris et al. 2002

Cálculo estimativo del radio de marea



Consideremos un cúmulo globular de masa M_c y radio de marea r_t , ubicado a una distancia R del centro de la galaxia, donde se concentra toda la masa M_g de la misma (ver Fig. II). Si m_* es la masa de una estrella que pertenece al cúmulo, ubicada justo en el límite del mismo, la fuerza de atracción gravitatoria de la galaxia sobre la estrella (por unidad de masa) será:

$$F = \frac{F_{g*}}{m_*} = -G \frac{M_g}{R^2}$$

y la variación de esta fuerza con la distancia (o sea su gradiente en la dirección radial) será:

$$\frac{dF}{dR} = 2G \frac{M_g}{R^3}$$

Cálculo estimativo del radio de marea

Nos interesa en particular *la variación de la fuerza con R* entre distintos puntos en el cúmulo, que es la *fuerza de marea* que ejerce la galaxia, por lo que tomamos:

$$dR \equiv r_t \Rightarrow dF = 2G \frac{M_g}{R^3} r_t \quad (9)$$

La galaxia ejerce una fuerza mayor sobre las estrellas del cúmulo cercanas al centro de la galaxia y una fuerza menor sobre las más lejanas.

Por otro lado, la fuerza debida a la atracción gravitatoria del cúmulo sobre una estrella que se ubica a una distancia r_t del centro del mismo será:

$$\frac{F_{c*}}{m_*} = G \frac{M_c}{r_t^2} \quad (10)$$

Cálculo estimativo del radio de marea

Por tanto, para que el cúmulo se mantenga unido y no pierda sus estrellas, debe haber un equilibrio entre las fuerzas (9) y (10) para las estrellas del borde:

$$2G \frac{M_g}{R^3} r_t = G \frac{M_c}{r_t^2} \Rightarrow r_t = R \left(\frac{M_c}{2M_g} \right)^{1/3}$$

Vemos que el radio de marea es mayor cuanto mayor es la distancia del cúmulo al centro de la galaxia y cuanto mayor es la masa del cúmulo, y es menor cuanto mayor es la masa de la galaxia.

(Este cálculo es una primera aproximación. Para hacerlo más preciso habría que plantearlo como un problema restringido de 3 cuerpos y usar una ley más realista para la distribución de masa de la galaxia.)

Diagrama color-magnitud (DCM)

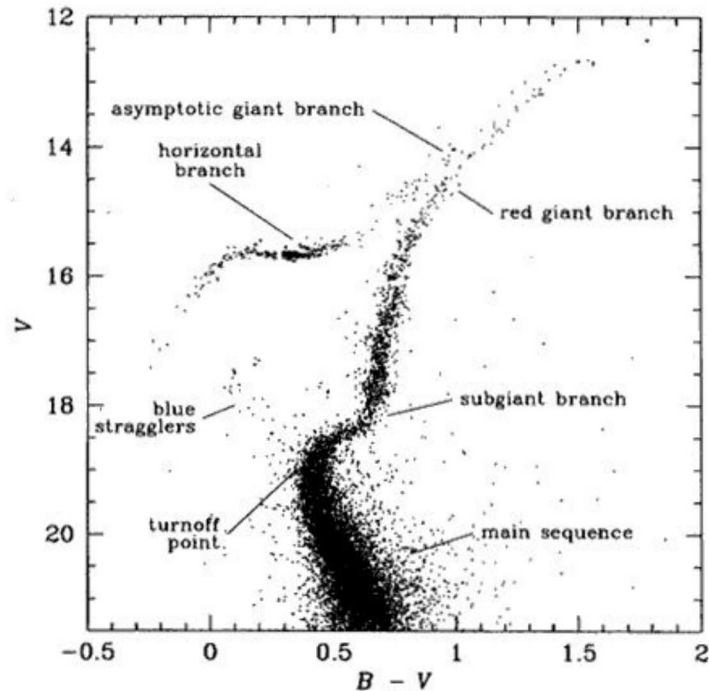


Figure 6.2 The color-magnitude diagram for the globular cluster M3. Known variable stars are shown as open circles, and the principal sequences are annotated. [From data published in Buonanno *et al.* (1994)]

Población estelar simple (SSP):
conjunto de estrellas de igual edad, que nacieron en un brote de formación estelar de duración despreciable y con igual composición química.

Los Cúmulos Globulares son la mejor aproximación a una población estelar simple

Referencia básica para entender la evolución estelar

Diagramas Color Magnitud con datos del Telescopio Espacial Hubble

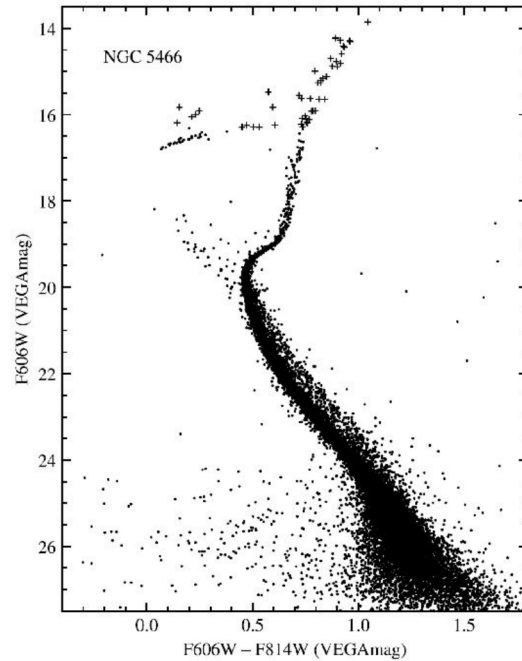


FIG. 1.—CMD for NGC 5466 in the VEGAmag system. The plus signs represent stars that are affected by at least one saturated pixel in either or both of the F606W and F814W images. This diagram contains 21,449 stars and extends to approximately 12% of the tidal radius of 34' (Harris 1996).

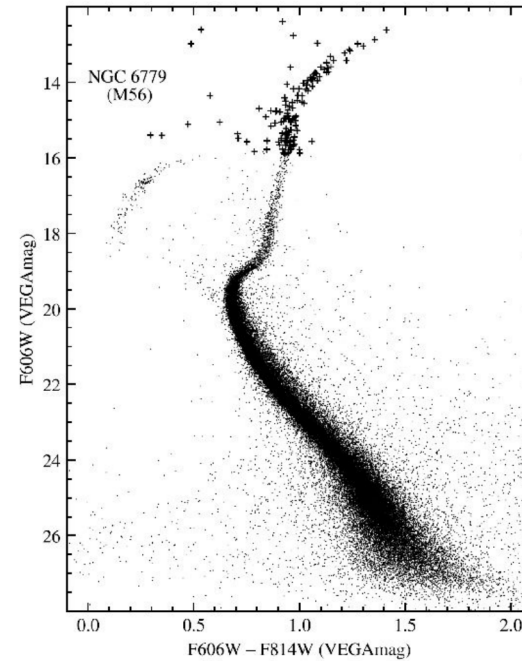
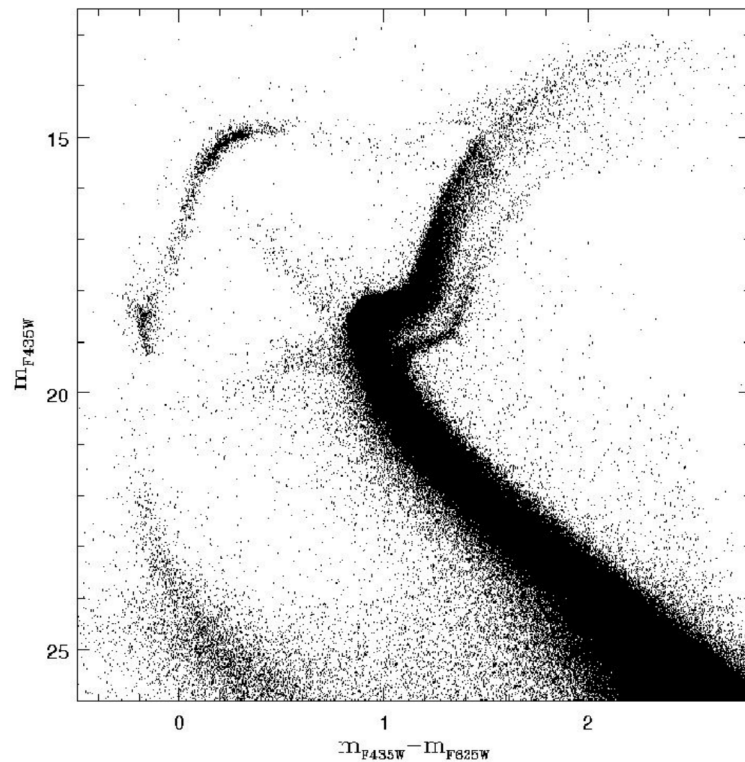


FIG. 2.—Same as Fig. 1, except that the CMD of NGC 6779 (M56) is shown, containing 61,056 stars and extending to about 50% of the tidal radius of 8.5' (Harris 1996).

Sarajedini et al. 2007, AJ 133, 1658
ACS Survey of Galactic globular clusters

ω Centauri ($R_{gc} = 6.4$ kpc)



Villanova et al. 2007 ApJ 663, 296

Población estelar múltiple

Gratton et al. (2011: A&A 534, A72), con abundancias de ~ 800 estrellas de la rama de gigantes rojas:

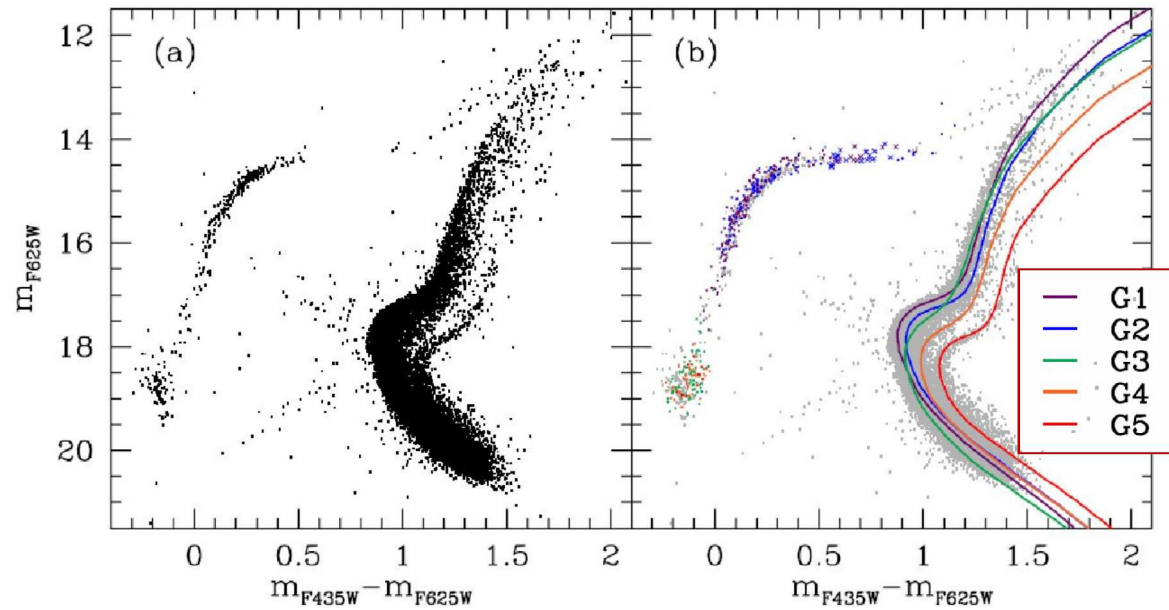
35% pobres en met. 2 subgrupos

59% interm. en met. 4 subgrupos

6% ricas en met. 1 subgrupo

Estudios de cúmulos estelares masivos han mostrado que no son SSP, sino que están constituidos por múltiples poblaciones (¿varios episodios de formación estelar?)

ω Centauri: población estelar múltiple



Population	Z	[Fe/H] ^a	Δ [CNO/Fe] ^b	Y	Age (Gyr)
G1	0.0005	-1.81	0.0	0.231	13.1 \pm 0.2
G2	0.0009	-1.55	0.0	0.232	13.0 \pm 0.3
G3	0.0015	-1.31	0.14	0.41 \pm 0.02	12.0 \pm 0.4
G4	0.0057	-1.01	0.47	0.38 \pm 0.02	11.4 \pm 0.4
G5	0.0136	-0.62	0.47	0.39 \pm 0.02	11.4 \pm 0.5

Joo & Lee 2013, ApJ 762, 36 (imág. ACS/HST y modelos)

ω Centauri: población estelar múltiple

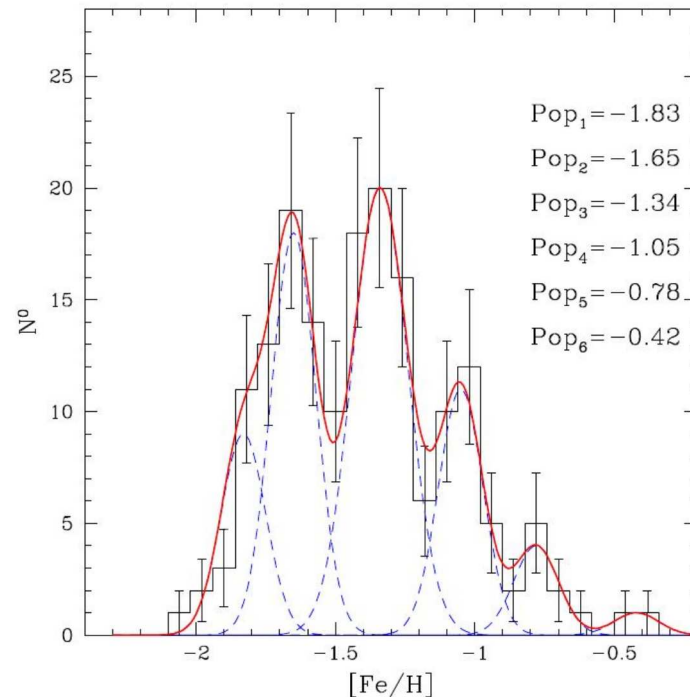


Figure 3. [Fe/H] distribution of our entire sample. Each subpopulation is represented by a blue Gaussian (dashed line) and its mean metallicity is indicated. The continuous red line is the sum of the Gaussians fitting the observational data.

“We studied 172 stars belonging to the five SGBs that we can identify in our photometry... to measure their [Fe/H] content....”

... all of these SGBs have a distribution in metallicity with a spread that exceeds the observational errors and typically displays several peaks that indicate the presence of several subpopulations.”

Villanova et al. 2014, ApJ 791, 107
(espectros FLAMES/VLT)

NGC 2808: población estelar múltiple

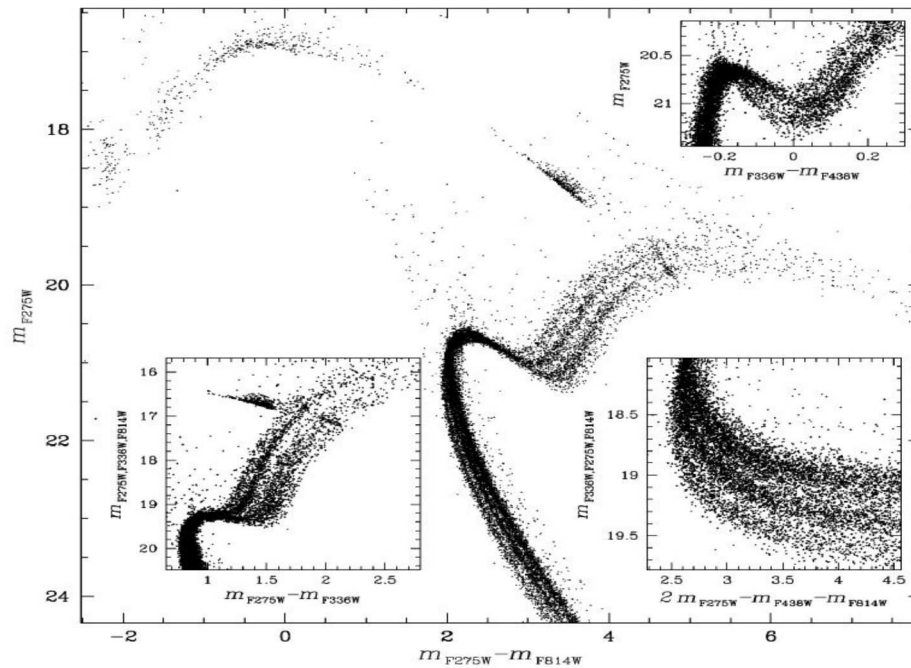


Fig. 1.— m_{F275W} vs. $m_{F275W} - m_{F814W}$ CMD of NGC 2808. The $m_{F275W, F336W, F814W}$ against $m_{F275W} - m_{F336W}$ (bottom-left inset), $m_{F336W, F275W, F814W}$ against $2 m_{F275W} - m_{F438W} - m_{F814W}$ (bottom-right inset), and m_{F275W} vs. $m_{F336W} - m_{F438W}$ (upper-right inset) diagrams highlight multiple sequences along the RGB, the MS, and the SGB, respectively.

“We have identified five distinct stellar groups along the RGB of NGC 2808, which contain 5.8%, 17.4%, 26.4%, 31.3%, and 19.1% of the total number of RGB stars.

... the red MS discovered by Piotto et al. (2007) is composed of populations A, B, and C, while their middle and the blue MS correspond to population D and E, respectively.”

NGC 6752: población múltiple al final de la sec. ppal. (SP) en NIR

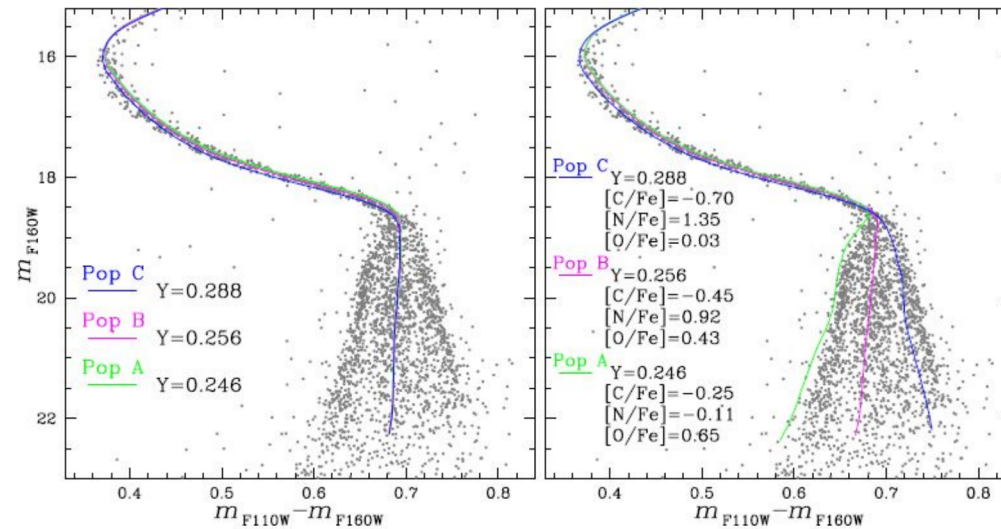
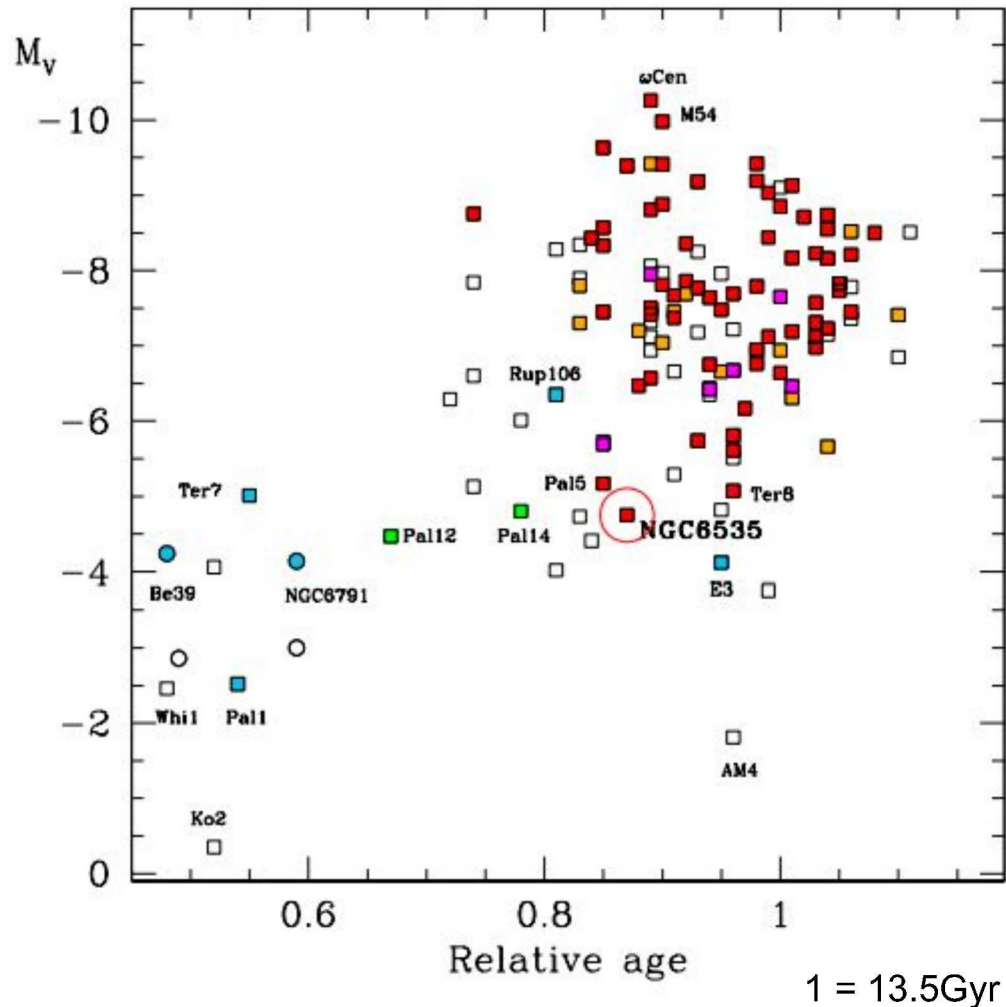


Figure 3. Dartmouth isochrones with different helium abundance overimposed on the CMD of Fig. 1. In the left-panel, where we assumed the same abundances of C, N and O, the three isochrones have similar F110W–F160W colors and are difficult to be distinguished for $m_{F160W} \gtrsim 18.5$. Right-panel isochrones account for the C, N and O abundances of population A, B and C as inferred from spectroscopy and quoted in the figure. The comparison between the right-panel isochrones and the observations demonstrate that the observed blue, middle and red MS correspond to population A, B, and C, respectively. See text for details.

La SP de enanas M se divide en 3 secuencias por debajo de la *knee* (rodilla) de la SP, que se corresponden con las ya identificadas en la SP brillante, SGB y RGB (edad 12.5 Gyr).

Milone et al. 2019, MNRAS 484, 4046 (imág. HST: NIR/WFC3)



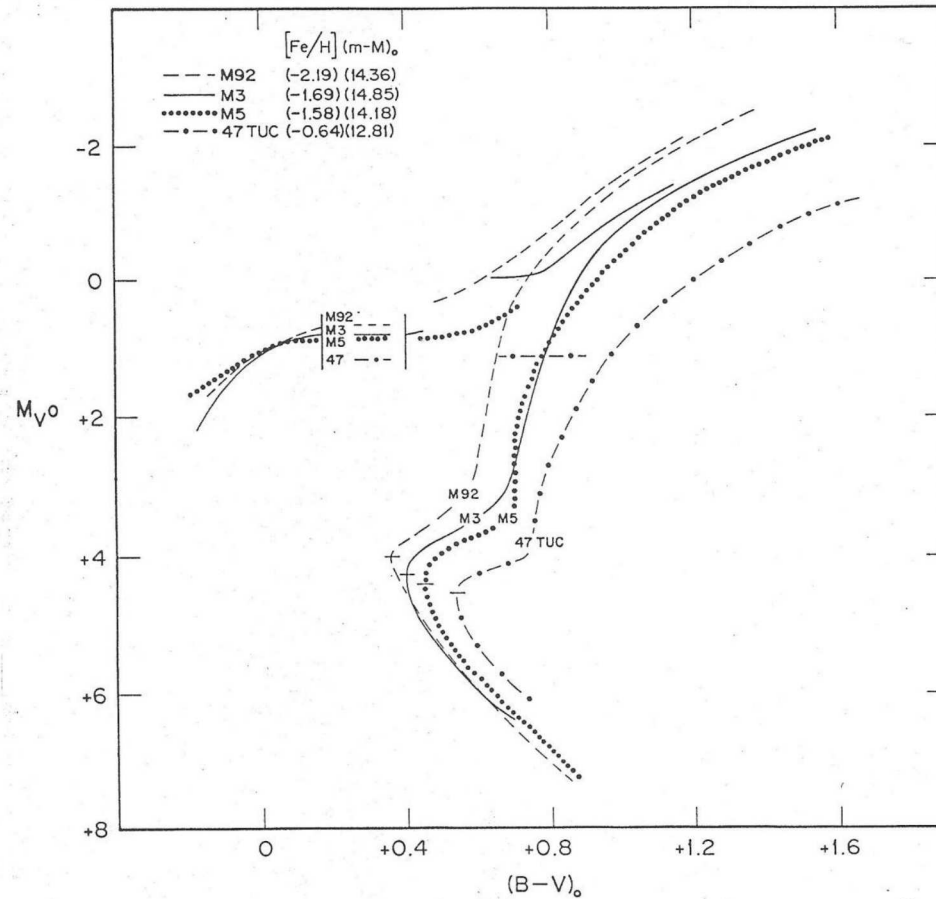
CGs en la Galaxia (hasta 2017)

Los CGs han tenido una evolución interna compleja, que hasta hoy en día *no está clara...*

Fig. 9. Relative age and absolute V mag for the GCs presently in the MW (open squares), including those associated with the Sgr dSph and for old open clusters (circles). Coloured symbols indicate clusters for which a) there is positive indication of multiple population from high-resolution spectroscopy (red) or from photometry or low-resolution spectroscopy (orange); b) there are uncertainties, but the presence is probable (magenta) or unlikely (green); and c) a negative answer has been found (light blue). A few interesting objects are labelled.

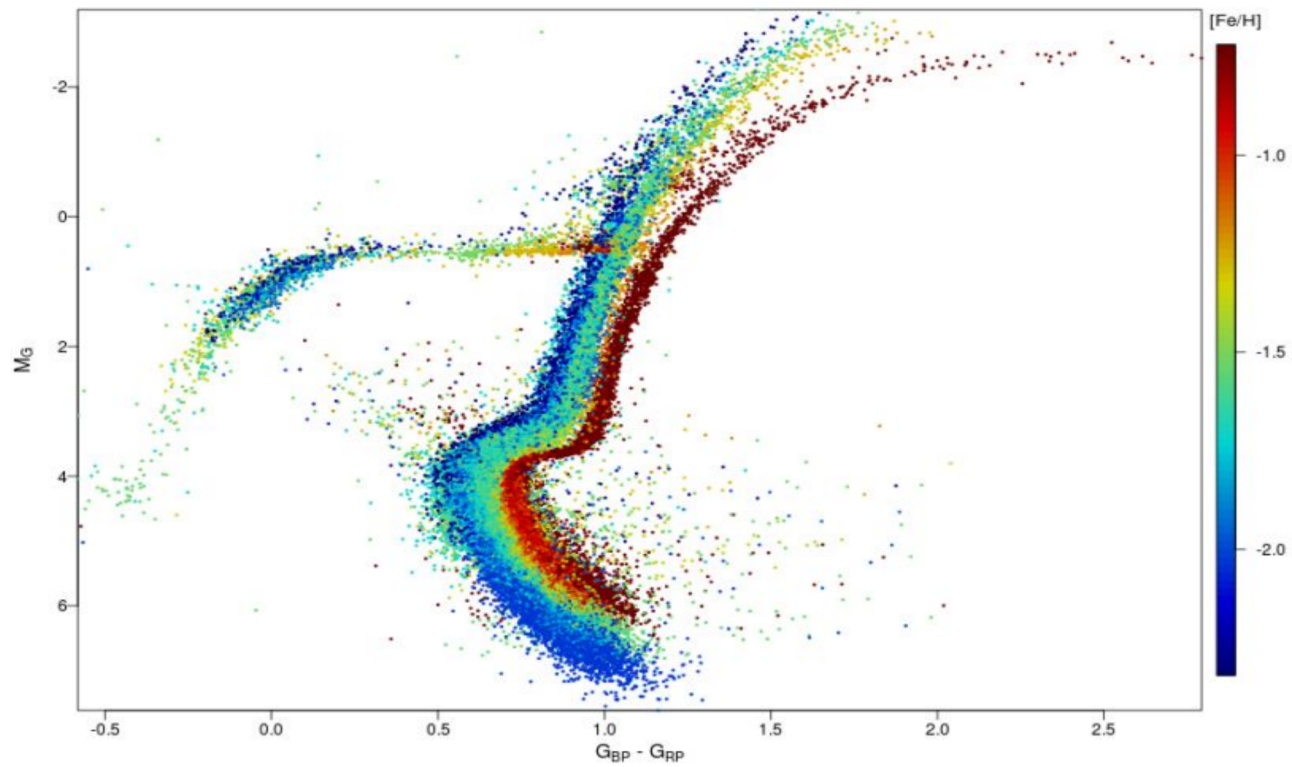
Bragaglia et al. 2017, A&A 607, A44

Diagramas Color Magnitud para diferentes metalicidades



Efectos de la metalicidad en la estructura de los Diagramas Color - Magnitud típicos de CGs

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



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

GAIA Collaboration 2018, A&A 616, A10

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.

· $S_{2.0} = \text{tg } \alpha$ pendiente de la RGB.

· $(B-V)_{0,g}$ color de la base de la RGB.

· M: índice de Mironov (poco usado actualmente)

[definiciones a continuación...]

