SISTEMAS ESTELARES

Material didáctico para las clases de "Cúmulos Globulares"

> Clases teóricas dictadas por: Dra. Lilia P. Bassino

Características básicas de los cúmulos globulares (CGs)

- ✤ Aspecto regular y ~ esférico.
- Sistemas estelares viejos: 10 a 14 x 10⁹ años

 $(10^{9} a n o s = 1 Gyr)$

- ✤ Masas: ~ 10⁴ 10⁶ M_☉
- Intrínsecamente brillantes: $M_v \sim -4$ a -10 mag (mag integradas)
- Tamaños compactos: r_t ~ algunos pc / decenas de pc
- Poblaciones estelares homogéneas.... la mayoría NO son "SSP" (Simple Stellar Populations)
- Las galaxias están rodeadas por decenas, centenares y hasta miles de CGs.
- Reflejan condiciones de formación, dinámica y evolución de sus galaxias-huésped.

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



Ejemplos: M13 / NGC 6205 (en la constelación de Hércules) es uno de los CGs más brillantes del hemisferio Norte



Image Credit & Copyright: Marco Burali, Tiziano Capecchi, Marco Mancini (Osservatorio MTM)

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



Ejemplos: M3 / NGC5272, imagen del telescopio 3.5m WIYN (Wisconsin Indiana Yale NOAO Observatory)



Ejemplos: M53 / NGC5024, imagen del Telescopio Espacial Hubble





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

CATÁLOGOS DE PARÁMETROS DE CGS DE LA VÍA LÁCTEA

- Compilado por William E. Harris, McMaster University
- Última revisión: Diciembre 2010
- Comprende: <u>157 objetos clasificados como cúmulos globulares de la Vía Láctea</u>
- 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.

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



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

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

A: semieje mayor [arcsec]

Harris et al. 2002, AJ 124, 1435

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): conj. de estrellas de igual edad, que nacieron en un brote de formación estelar de duración despreciable y con igual composición química.

> Los CGs son la mejor <u>aproximación</u> a SSP

Referencia básica para entender la *evolución estelar*

"Galactic Astronomy" Binney & Merrifield

Comparación: diagramas color-magnitud de <u>cúmulos abiertos</u> de distintas edades



Australia Telescope Outreach and Education Credit: Mike Guidry, University of Tennessee

DCMs con datos del Telescopio Espacial Hubble





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)



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 generaciones (varios episodios de formación estelar?).

Villanova et al. 2007 ApJ 663, 296

<u>o</u> Centauri: población estelar múltiple



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

Population	[Fe/H] ^a	Age (Gyr)
G1	-1.81	13.1 ± 0.2
G2	-1.55	13.0 ± 0.3
G3	-1.31	12.0 ± 0.4
G4	-1.01	11.4 ± 0.4
G5	-0.62	11.4 ± 0.5

<u>o</u> 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.— $m_{\rm F275W}$ vs. $m_{\rm F275W} - m_{\rm F814W}$ CMD of NGC 2808. The $m_{\rm F275W,F336W,F814W}$ against $m_{\rm F275W} - m_{\rm F336W}$ (bottom-left inset), $m_{\rm F336W,F275W,F814W}$ against $2 m_{\rm F275W} - m_{\rm F438W} - m_{\rm F814W}$ (bottom-right inset), and $m_{\rm F275W}$ vs. $m_{\rm F336W} - m_{\rm F438W}$ (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 NGC2808, 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."

Milone et al. 2015, ApJ 808, 51 (imág. HST: ópt / ACS + UV / WFC3)

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





La SP de enanas M se divide en 3 secuencias por debajo de la SP 'knee', 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)

Estadística de CGs con poblaciones múltiples: Mv integrada vs. edad (hasta 2017)



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

DCMs para diferentes metalicidades



Efectos de la metalicidad en la estructura de los DCMs típicos de CGs

DCMs para diferentes metalicidades: observaciones de 14 CGs



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

GAIA Collaboration 2018, A&A 616, A10

Distribución espacial - metalicidad

- En total 157 CGs, catalogados por W.E. Harris hasta 2010 (aunque sus orígenes sean diferentes)
- Distribución *bimodal* de metalicidad: bulbo/disco y halo



Bica et al. 2006, A&A 450, 105

reduced sample: "descontaminado" de todos los CGs más jóvenes que 10¹⁰ años y de aquellos con órbitas retrógradas y/o evidencia de estar relacionados con galaxias enanas (quedan 116 CGs).

Distribución espacial



Fig. 4. One-dimensional distribution functions

Se relaciona con la metalicidad de los CGs

• CGs pobres en metales \rightarrow halo ($\Delta x, \Delta y, \Delta z$) ~35 × 36 × 30 kpc esfera levemente achatada, c/a ~ 0.8.

 CGs "ricos" en metales → bulbo/disco (Δx, Δy, Δz) ~12 × 11 × 5 kpc, esferoide oblongo, c/a ~ 0.4.

Bica et al. 2006, A&A 450, 105

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

a) RR Lyrae and HB stars. Trigonometric Parallaxes $M_V(RR) = 0.18([{\rm Fe}/{\rm H}] + 1.5) + 0.62 \pm 0.11.$

b) RR Lyrae and HB stars. Statistical Parallaxes $M_V(RR) = 0.18([Fe/H] + 1.5) + 0.73 \pm 0.12.$

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

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

Datos de Hipparcos: Carretta et al. 2000, ApJ 533, 215

< Mv > = 0.214 ([Fe/H]+1.5) + 0.57 ± 0.05

Observaciones de RR Lyr en la LMC: Clementini et al. 2003, AJ 125, 1309

Distancias: ajuste de secuencia principal + paralajes de subenanas

"Main-sequence fitting is one of the classical methods of estimating the distances to globular clusters.

- In the empirical approach, *local halo subdwarfs* of known distance and abundance are used to define a *metal-poor main sequence* in the (Mv, (B–V)₀) plane.

- If that calibrated sequence is matched against the observed *cluster color magnitude diagram*, then the mean offset (Vo-Mv) gives the distance modulus of the cluster."

(Reid N. 1998, PNAS 95, 8)

Problem: small number of subdwarfs with high quality parallaxes.

- Increased sample of the Hipparcos satellite.
- Significant contribution from GAIA.

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



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

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).

VandenBerg et al. 2018, ApJ 862, 72

Función de Luminosidad integrada



Se puede ajustar con una Gaussiana, cuyo máximo "*turn-over*" $M_V = -7.4$ mag, corresponde a una masa típica ~2 x10⁵ M_{\odot} En la Vía Láctea se observa

la Gaussiana "completa"

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, SaasFee Advanced Course 28: Star Clusters 28, 223

Distribución de edad

64 CGs con R_{ac} < ~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' escala de metalicidad de Carretta & Gratton (1997)

Relación edad - metalicidad

64 CGs con R_{qc} < ~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.

Marín-Franch et al. 2009, ApJ 694, 1498

Relación edad - metalicidad (cont.)

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 acretados junto con sus galaxias enanas huésped, y cuyos núcleos pueden sobrevivir como CGs.

Un halo estelar "simulado", construido a partir de satélites acretados (Helmi 2008, Astron. Astrophys. Rev. 15, 145)



The origin of the Galaxy's system of globular clusters

Massari et al. 2019, A&A submitted (arXiv:1906.08271v1)

"... we have combined the *kinematic information provided by Gaia* for almost all Galactic clusters, with the largestsample of *cluster ages* available after carefully correcting for systematics....

We have found that:

- about 40% of the clusters likely formed in situ.

- a similarly large fraction, *35%, can be associated to the merger events*, in particular to *Gaia-Enceladus* (19%), the *Sagittarius dwarf galaxy* (5%), the *progenitor of the Helmi streams* (6%) and to the *Sequoia galaxy* (5%), although some uncertainty remains due to some degree of overlap in their dynamical characteristics."

CGs en la Vía Láctea: futuro con datos de GAIA

GAIA DR2 (2018): datos de excelente calidad.
 Paralajes y mov. propios para 75 CGs Galácticos.
 Velocidades radiales para 57 de ellos (más en los próximos DRs).

- Perfiles radiales de densidad numérica de CGs Galácticos (de Boer et al. 2019) -> modelo de King falla en la parte externa?
- Estudio de órbitas, rotación y otros aspectos de la dinámica de CGs (Helmi et al. 2018).

Posti & Helmi (2019):

- "metal-rich clusters ([Fe/H] > -0.8) very likely belong to the disc component, while roughly 67% of the metal-poor clusters ([Fe/H] \leq -0.8) are more likely part of the halo component.

- we measure the mass of the dark matter halo of the Galaxy within 20kpc to be log($M_{20;DM}$ / $M_{\odot})$ = 11.14 $\pm~0.05."$