



# Los CÚMULOS GLOBULARES y la arqueología galáctica

Armando Arellano Ferro

## Introducción

Se conocen como cúmulos globulares a las agrupaciones de cientos de miles de estrellas que se encuentran distribuidos en una región más o menos esférica alrededor del centro de nuestra galaxia.

Las estrellas de un cúmulo globular se formaron todas casi al mismo tiempo, a partir de una gran nube primordial de gas y polvo, y por lo tanto tienen todas aproximadamente la misma edad e historia química. Son los sistemas estelares más viejos que se conocen en nuestra galaxia; determinar sus edades, distancias, movimientos espaciales y composición química es de importancia fundamental para las conjeturas que los astrofísicos hacen sobre los procesos tempranos de formación de la galaxia y su evolución ulterior.

Actualmente se conocen 158 cúmulos globulares en la galaxia (véase, por ejemplo, Harris, 2000) cuyas distancias al centro galáctico van desde 800 hasta 123 mil *parsecs* (un *parsec* equivale aproximadamente a 3.2 años luz o  $3 \times 10^{13}$  kilómetros).

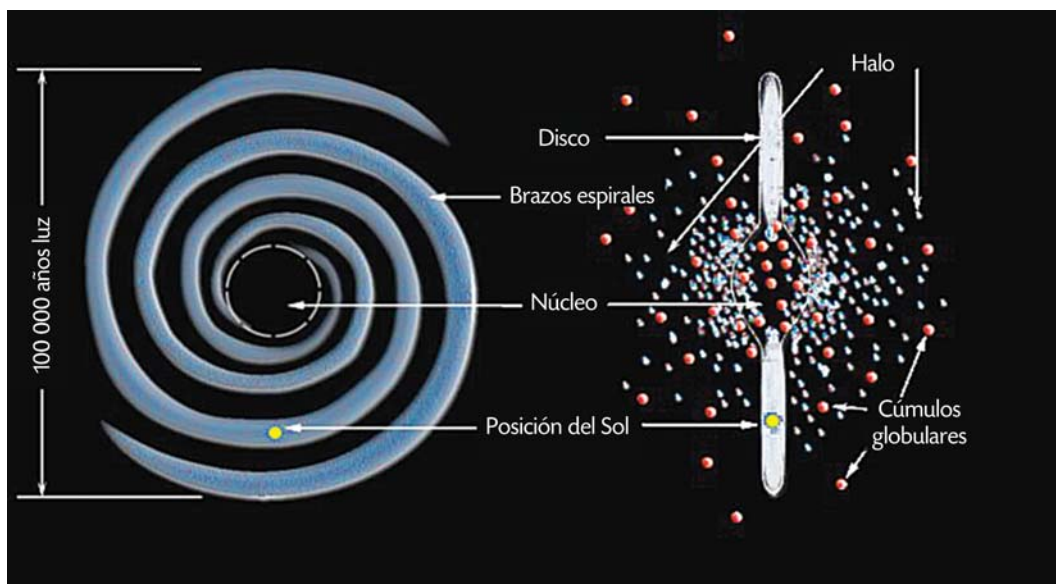
El primer cúmulo globular en ser descubierto fue el hoy conocido como M22 (o NGC 6655). El astrónomo alemán Abraham Ihle lo encontró en 1665 mientras observaba Saturno. Muchos cúmulos más serían descubiertos durante el siglo XVII. Sin embargo, durante mucho tiempo fueron descritos como “nebulosas redondas que no contienen estrellas individuales”. Su naturaleza de cúmulos estelares fue reconocida por

William Herschel en 1783, pero la estimación de sus distancias y otras propiedades físicas a partir de sus estrellas individuales tendría que esperar hasta bien entrado el siglo XX (véase Baade, 1928, para el cúmulo NGC 5053 y sus estrellas RR Lyrae). La introducción del uso de la placa fotográfica en telescopios de gran tamaño permitió medir y estudiar el brillo y las variaciones de brillo de estrellas individuales en los cúmulos globulares.

En el panorama global de nuestra galaxia (la Vía Láctea) se pueden distinguir dos regiones principales, con propiedades fisicoquímicas y dinámicas rotundamente diferentes que son consecuencia de los mecanismos de formación de la galaxia; el *disco galáctico*, rico en hidrógeno, polvo interestelar y estrellas jóvenes, y el *halo galáctico*, con poco material interestelar y objetos muy viejos, entre ellos los cúmulos globulares (Figura 1).

La galaxia NGC 5866, fotografiada por el telescopio espacial Hubble, se nos presenta de canto (Figura 2) y es muy parecida a la nuestra; es un hermoso ejemplo de un disco de gas y polvo rodeado por un tenue halo en el que se encuentran algunos cúmulos globulares, difíciles de ver en este caso debido a la gran distancia.

En los halos de galaxias espirales más cercanas se conocen varios cúmulos globulares, por ejemplo en Andrómeda (M31). La Figura 3 muestra el ejemplo del cúmulo Mayal II o G1, el más brillante y masivo en Andrómeda.



**Figura 1.** Esquema de nuestra galaxia, la Vía Láctea. A la izquierda el disco galáctico, visto de frente con sus brazos espirales. A la derecha el halo galáctico, con los cúmulos globulares indicados como círculos azules.

Existen dos modelos generales sobre la formación del sistema galáctico. El primero plantea que toda la galaxia se formó a partir del colapso general de una gran nube de material que, por conservación del momento angular, aumentaba gradualmente su cantidad de giro, haciendo que el sistema como un todo se aplanara. Durante el colapso temprano se formarían los cúmulos globulares en las regiones externas. Más tarde, el gas y el polvo se concentrarían en un disco plano que rotaba en torno al centro galáctico, donde la formación de estrellas continuó hasta el presente.

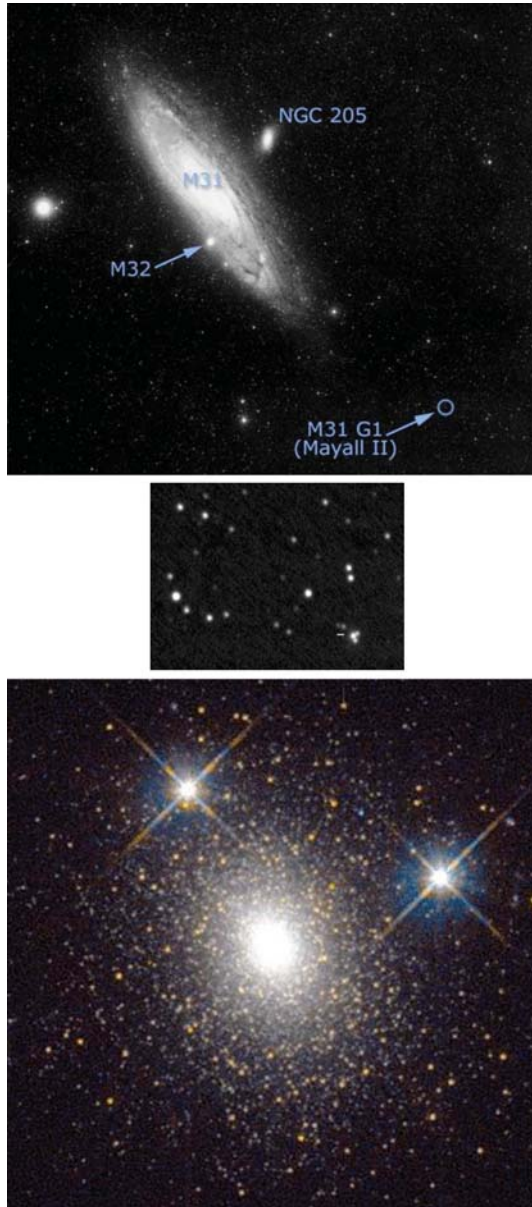
Como los elementos químicos más pesados se generan por fusión nuclear en el interior de las estrellas, a medida que transcurre el tiempo la composición química de éstas se enriquece con mayor variedad de elementos más complejos, por lo que en este esquema de formación se espera que exista un gradiente de composición química que aumenta del halo hacia el disco galáctico. Dicho de otra forma, las estrellas o sistemas estelares como los cúmulos globulares del halo deben ser mucho más viejos y menos ricos en elementos pesados que sus contrapartes en el disco, como por ejemplo el Sol, que se encuentra inmerso en el disco galáctico.

El segundo modelo propone que los cúmulos globulares, o al menos algunos, quizá los más externos, no se



**Figura 2.** Galaxia NGC 5866. El disco rico en polvo (zona oscura) y el halo tenue alrededor son muy claros (imagen del STScI).

formaron como parte del colapso galáctico, sino que se originaron independientemente en las cercanías de la protogalaxia (nuestra galaxia en sus etapas tempranas de formación) y que fueron capturados posteriormente por el campo gravitacional de ésta. En este caso, se esperaría que la química de algunos cúmulos globulares fuera anómala y no siguiera un gradiente químico general.



**Figura 3.** Galaxia de Andrómeda, donde se distingue el disco (arriba). El cúmulo globular más brillante de Andrómeda G1, fotografiado desde la Tierra (centro), y acercamiento tomado por el telescopio espacial Hubble (abajo). (NASA, Observatorio Palomar/ Z. Levay/STScI).

En nuestra galaxia, el cúmulo NGC 2419, a 90 mil parsecs del centro, y el cúmulo G1, en Andrómeda, a aproximadamente 53 mil parsecs del centro, podrían ser sistemas atrapados, quizá núcleos de lo que alguna vez fueron galaxias enanas.

### Cuantificar la historia de la galaxia

La única manera de conjeturar sobre el origen de los cúmulos globulares en el halo galáctico es determinando la distancia, edad y composición química de estos antiguos sistemas estelares. Medir las cantidades físicas de cúmulos globulares es como hacer arqueología galáctica. Midiendo y pesando estos “fósiles galácticos” podemos vislumbrar el pasado remoto del complejo sistema que es nuestra galaxia.

Las posibilidades de medir cantidades físicas en el universo tuvieron un gran desarrollo durante el siglo XX, a través de notabilísimos desarrollos tecnológicos: mejores procesos fotográficos (placas de vidrio con emulsiones más sensibles) seguidos del desarrollo de los detectores electrónicos (CCD), construcción de grandes telescopios en tierra (de 6 a 10 metros de diámetro) y telescopios y satélites en órbita (telescopio espacial Hubble, *International Ultraviolet Explorer*, etcétera). Actualmente es posible distinguir y efectuar mediciones de la luz proveniente de estrellas individuales en un cúmulo globular (véase Figura 4) e incluso en muchas galaxias externas.



**Figura 4.** Imagen del cúmulo globular NGC 6093, obtenida por el telescopio espacial Hubble. Se pueden distinguir miles de estrellas individuales y percibir las diferencias de brillo y color.

El problema central al que se enfrenta un astrónomo dispuesto a las mediciones es que en la Tierra recibimos cantidades ínfimas de la luz emitida por estrellas tan lejanas

El problema central al que se enfrenta un astrónomo dispuesto a las mediciones es que en la Tierra recibimos cantidades ínfimas de la luz emitida por estrellas tan lejanas, y sólo con ese atisbo luminoso podemos alimentar nuestros instrumentos para extraer, de esa magra energía, la información física de las estrellas. De ahí que poseer telescopios grandes y detectores sensibles haya hecho posible el paso de la descripción cualitativa a la determinación cuantitativa de muchos procesos físicos en el universo.

La descomposición, a través de un espectrógrafo, de esa pequeña cantidad de luz recibida permite medir varias cantidades de importancia en el estudio de las estrellas: la velocidad con que se mueven por el espacio, su temperatura, la aceleración de la gravedad en su superficie y la composición química de su atmósfera. Sin embargo, dispersar la luz tiene como consecuencia que la señal recibida en cada color del espectro sea muy poca, mucho menor aún que la ya escasa energía total que se recibe. De ahí que hacer mediciones espectroscópicas de alta calidad requiera un gran esfuerzo observacional, y por tanto dichas mediciones están



Observatorio Indio de Astrofísica (IAO) en Hanle, Himalayas, India, cerca de las montañas nevadas, visto desde el templo budista de Hanle en el primer plano. Se encuentra a 4 mil 500 metros sobre el nivel medio del mar y de ahí provienen prácticamente todos los datos para el trabajo sobre cúmulos globulares del autor (fotografía del autor).

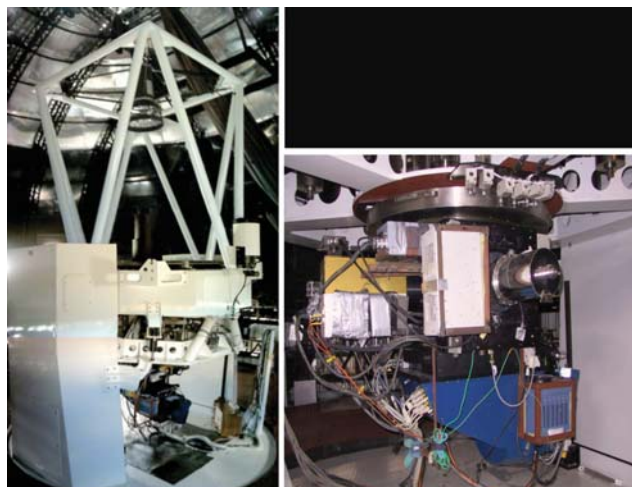
limitadas a estrellas brillantes. Todo esto sin considerar además que las técnicas que permiten determinar la composición química son complejas y requieren de mucho tiempo de análisis.

Durante mucho tiempo, los astrónomos han buscado una técnica alternativa más eficiente, pero suficientemente precisa, que les permita llegar muy profundo, hasta medir estrellas muy débiles en sistemas lejanos. A continuación describiremos una técnica exitosa, mucho más económica en términos de recursos observacionales, y muy eficiente.

### Fotometría de cúmulos globulares

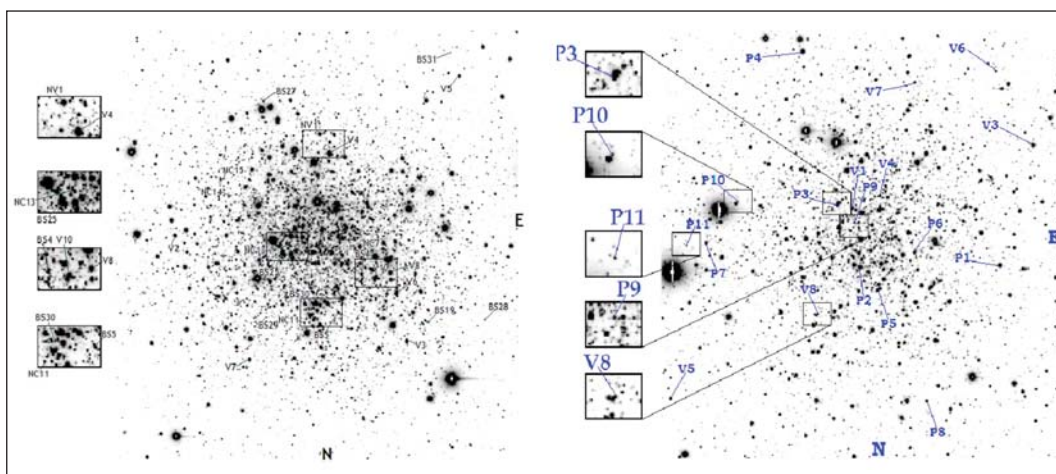
La mayoría de nosotros estamos familiarizados con el empleo de un detector CCD (de *charge-coupled devices*, o dispositivos de carga acoplada) para obtener imágenes. Todas las cámaras fotográficas modernas están equipadas con uno. Esta tecnología vino a reemplazar a las viejas películas fotográficas, que debían ser reveladas posteriormente.

Los CCD fueron desarrollados con fines astronómicos, dada la imperante necesidad de los astrónomos de medir la luz proveniente de objetos muy débiles en el menor tiempo posible y con buena exposición. Los astrónomos colocan el detector CCD dentro de una

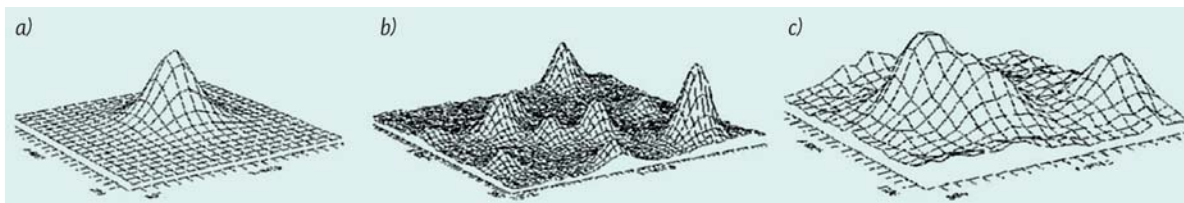


**Figura 5.** a) Telescopio de 2.0 metros del Observatorio del Astronómico de la India (IAO), en los Himalayas. b) Grupo de instrumentos en el foco del telescopio. El tubo plateado a la derecha es la cámara con el detector CCD. La caja azul es un espectrógrafo. La caja dorada a la izquierda es una cámara infrarroja (fotos del autor).

cámara (Figura 5) y lo mantienen muy frío por medio de un baño de nitrógeno líquido, porque el detector es tan sensible que reacciona al ruido térmico generado por la propia electrónica del instrumento. Bajando la temperatura, este ruido disminuye y se puede distinguir la tenue señal proveniente del objeto astronómico. En la Figura 6 se puede ver una imagen de un cúmulo globular obtenida con el instrumento de la Figura 5.



**Figura 6.** Imágenes CCD de los cúmulos globulares NGC 5053 (izquierda) y NGC 6366 (derecha) con algunas estrellas variables marcadas. Los pequeños recuadros indican detalladamente la posición de estrellas variables descubiertas por nuestro grupo. Nótese que gracias a la técnica numérica empleada es posible detectar variaciones, aun en regiones densamente pobladas. Típicamente es posible obtener buenas mediciones fotométricas para unas 7 mil estrellas en la imagen (imágenes obtenidas por el autor en el IAO).



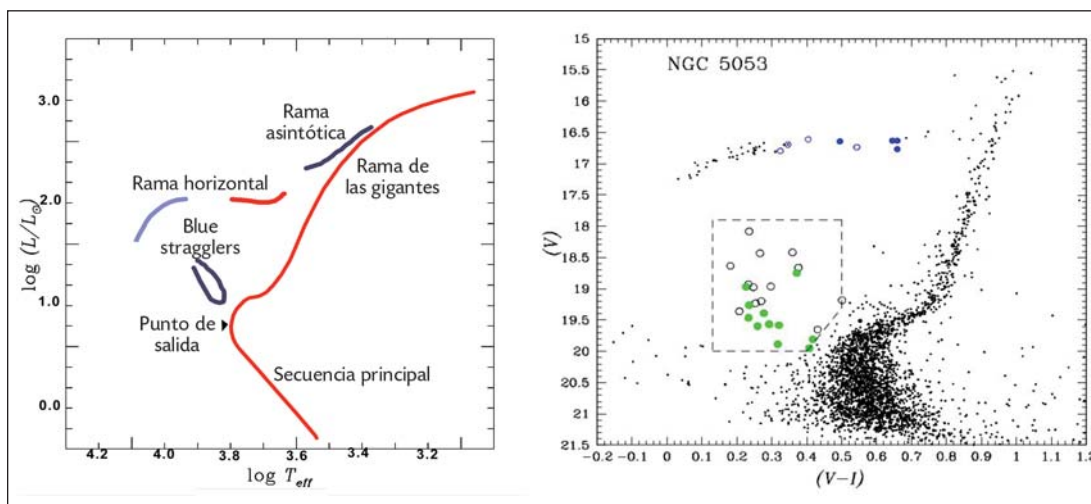
**Figura 7.** Distribución de energía en el plano del detector para: a) una estrella aislada, b) varias estrellas en una región no muy mezclada, y c) varias estrellas severamente mezcladas.

El reto es ahora obtener una buena medida del brillo o, dicho en jerga astronómica, de la *magnitud* de tantas estrellas sobre la imagen como sea posible. Como es fácil intuir, es mucho más difícil medir con precisión los brillos de las estrellas más cercanas a las regiones centrales, donde las imágenes de estrellas se sobrepone unas con otras. En la Figura 7 se ilustran las distribuciones de energía para estrellas aisladas y con distintos grados de contaminación por conglomeración. Muy recientemente se han desarrollado técnicas numéricas de diferenciación de imágenes que permiten aislar estrellas mezcladas y corregir las posibles diferencias de sensibilidad del detector, o defectos de la imagen por aberraciones ópticas o posibles deficiencias en el foco de la imagen, o por condiciones atmosféricas turbulentas (por ejemplo, Bramich, 2008).

El brillo de las estrellas se mide a través de filtros de distintos colores –por ejemplo, desde el ultravioleta

hasta el infrarrojo cercano– y se convierten a una escala de magnitudes, que podemos etiquetar como  $U$ ,  $B$ ,  $V$ ,  $R$ ,  $I$ . La diferencia de magnitudes en dos filtros cualesquiera es una medida del color de la estrella, por ejemplo  $B-V$  o  $V-I$ . El color es un parámetro directamente relacionado con la temperatura superficial de la estrella, mientras que la magnitud depende tanto del brillo intrínseco de la estrella como de la distancia a la que se encuentra.

Actualmente tenemos datos de las magnitudes individuales y colores para una gran cantidad de estrellas en la imagen del cúmulo. Una gráfica del color contra la magnitud de cada estrella, digamos  $V-I$  vs.  $V$ , se conoce como el *diagrama color-magnitud* (DCM), y un ejemplo esquemático de un DCM típico de un cúmulo globular se incluye en la Figura 8, donde se definen la *secuencia principal* (SP), la *rama de las gigantes* (RG), el *punto de salida* (PS) y la *rama horizontal* (RH). En la



**Figura 8.** Diagrama color-magnitud (DCM) de un cúmulo globular. A la izquierda se muestran esquemáticamente las diferentes ramas o secuencias. A la derecha se tiene el DCM observado para el cúmulo globular NGC 5053, donde los símbolos azules representan a las estrellas RR Lyrae en la RH, y los verdes a las estrellas SX Phe en la región de las *blue stragglers* (círculos).

Figura 8 también se incluye el DCM obtenido para el cúmulo NGC 5053.

Llama mucho la atención que la distribución de estrellas en el diagrama color-magnitud no tiene nada de uniforme, y que hay regiones claramente definidas y secuencias en las que las estrellas caen preferentemente. Es bien sabido que esto es consecuencia de la evolución de las estrellas. La discusión detallada de la evolución estelar cae fuera de la perspectiva de este artículo, pero diremos que, dado que la magnitud y el color están relacionados con el brillo de la estrella y su temperatura, respectivamente, el DCM nos indica cómo las estrellas han cambiado sus brillos y temperaturas a lo largo de la vida del cúmulo, y define regiones donde podemos poner nuestra atención para encontrar y estudiar algunos grupos de estrellas variables de particular importancia.

Para los fines de este trabajo, notemos dos regiones: la rama horizontal (RH) donde yacen las estrellas pulsantes tipo RR Lyrae (círculos y puntos azules) y la zona de las *blue stragglers* (estrellas rezagadas azules), demarcada por líneas segmentadas, donde encontramos otro tipo de estrellas variables con periodo de pulsación ultracorto (de unos 40 minutos): las SX Phoenicis (SX Phe, puntos verdes). Estas estrellas son importantes para determinar la distancia del cúmulo, porque también presentan una correlación entre su periodo y su brillo intrínseco o magnitud absoluta. A continuación discutiremos en detalle el caso de las estrellas RR Lyrae.

### Estrellas RR Lyrae: las joyas del cúmulo

Las RR Lyrae son estrellas que pulsán. Su superficie se desplaza radialmente por efectos de variación de la opacidad en el interior de la estrella. Se llaman así porque la primera estrella que se descubrió con esas características fue la estrella RR de la constelación de la Lira. Actualmente se conocen en nuestra galaxia unas 800 estrellas RR Lyrae en cúmulos globulares, y otras tantas no asociadas a grupos estelares.

Las RR Lyrae no son las únicas estrellas variables o pulsantes. Existen familias de estrellas variables que se

agrupan según algunas de sus propiedades fundamentales, como su estado evolutivo, su masa, su periodo de pulsación, etcétera. Entre las estrellas variables más notables están sin duda las cefeidas (llamadas así por su prototipo, la estrella delta-Cephei) y las RR Lyrae; la razón de su importancia es que ambos tipos de estrellas son excelentes indicadores de distancia.

Si tomamos series temporales de imágenes de un cúmulo, podemos medir variaciones en las magnitudes y colores de las estrellas variables. Un ejemplo de la variación de la magnitud de la estrella tipo RR Lyrae en el cúmulo NGC 6366, marcada como V1 en la Figura 6, muy cerca del centro, se puede ver en la Figura 9. El periodo de variación de esta estrella es de 0.5131635 días, o bien 12 horas, 18 minutos y 57 segundos. Su curva de luz es muy asimétrica, pero puede representarse matemáticamente como la suma de varios armónicos senoidales, todos del mismo periodo pero de amplitudes y desplazamientos diferentes. La ecuación general para una curva de este tipo es:

$$m(t) = A_0 + \sum_{k=1}^N A_k \cos\left(\frac{2\pi}{P} k(t - E) + \phi_k\right) \quad (1)$$

donde  $A_k$  y  $\phi_k$  son las amplitudes y desplazamientos de cada armónico, y  $N$  es el número de armónicos necesarios para reproducir las observaciones. Para la curva de la Figura 9 se han empleado seis armónicos.

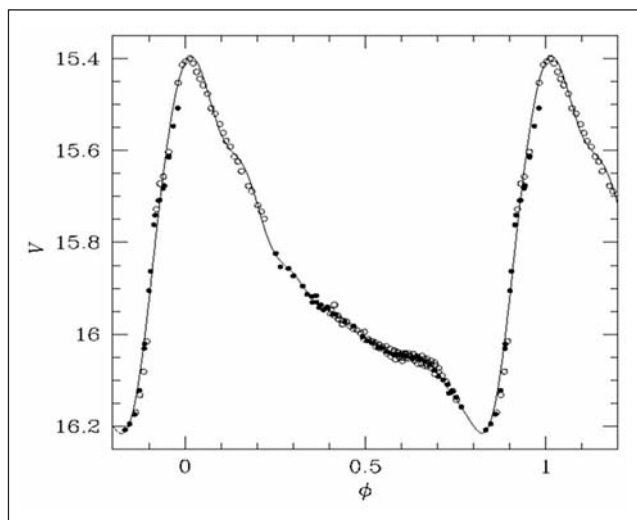


Figura 9. Curva de luz de la RR Lyrae V1 en el cúmulo globular NGC 6366.

Lo verdaderamente sorprendente es que la forma de la curva de luz de las estrellas RR Lyrae contiene información sobre sus parámetros físicos, tales como su luminosidad o magnitud absoluta, y la metalicidad o contenido de elementos pesados en la atmósfera de la estrella. Fue Walraven (1955) quien primero se dio cuenta de esta dependencia. Una forma de caracterizar la forma precisa de la curva de luz es a través de las amplitudes y corrimientos de sus armónicos  $A_k$  y  $\phi_k$  de la ecuación 1.

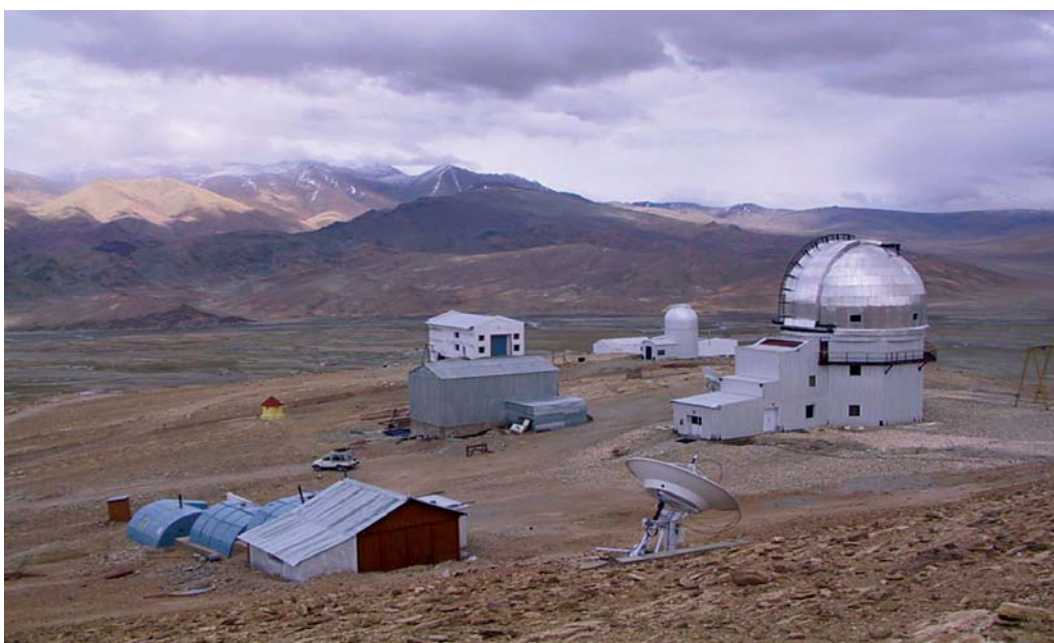
El reto de las últimas décadas ha sido calibrar las amplitudes y corrimientos de los armónicos en términos de cantidades físicas, y los grupos que trabajan en este problema han conseguido calibraciones semiempíricas utilizando modelos hidrodinámicos de la pulsación de la estrella y curvas de luz observadas para varios cientos de estrellas RR Lyrae (véanse por ejemplo, los trabajos de Jurcsik y Kovács, 1996, y Morgan y colaboradores, 2007, para la abundancia de hierro; y los de Kovács, 1998, y Kovács y Walker, 2001, para la magnitud absoluta  $M_v$ ; o bien, el trabajo de Arellano Ferro, Giridhar y Bramich, 2010, para las ecuaciones funcionales detalladas y su aplicación a NGC 5053).

En resumen, las observaciones detalladas de un cúmulo nos conducen a obtener curvas de luz de estre-

llas variables conocidas o descubiertas en el proceso. Las curvas de luz se descomponen en armónicos, y a través de calibraciones semiempíricas se obtienen la magnitud absoluta y el contenido de metales de cada estrella RR Lyrae en el cúmulo, y por lo tanto la distancia y metalicidad medias de éste.

### La edad de los cúmulos globulares

El diagrama color-magnitud de la Figura 10 también proporciona información sobre la edad del cúmulo. A medida que las estrellas evolucionan, abandonan la secuencia principal y se van incorporando a la rama de las gigantes, desde donde posteriormente se desplazarán hacia la rama horizontal. Como resultado, la secuencia principal se va despoblando poco a poco y el punto de salida (PS, véase Figura 8) se va corriendo hacia magnitudes más débiles. La posición del punto de salida depende por lo tanto de la edad del cúmulo. Es claro que a medida que el cúmulo envejece, la distancia vertical del punto de salida a la rama horizontal,  $\Delta V_{HB}^{TO}$  aumenta, y también la distancia horizontal del punto de salida a un punto fiducial sobre la rama de las gigantes que suele escogerse 2.5 magnitudes por encima del punto de salida,



Cúpula del telescopio de 2 metros del IAO, utilizado para nuestro trabajo sobre cúmulos globulares. El telescopio e instrumentos en su interior se pueden ver en la Figura 5 (fotografía del autor).



$\delta(V-I)_{2.5}$ . Estos métodos vertical y horizontal de fechamiento proporcionan dos determinaciones independientes de la edad del sistema estelar (Figura 10).

La calibración de  $\Delta V_{HB}^{TO}$ ,  $\delta(V-I)_{2.5}$  y de la posición del punto de salida con la edad del cúmulo es un asunto difícil y delicado, que ha tomado mucho trabajo de investigación en las últimas décadas, y sobre lo que la literatura astronómica es prolífica. Hoy en día, los modelos evolutivos estelares proporcionan *isocronas*, o líneas de la misma edad, sobre el diagrama color-magnitud para diversas edades. A manera de ejemplo hemos incluido en la Figura 11 el diagrama color-magnitud de NGC 5053 y nuestro ajuste con las isocronas de Vandenberg y colaboradores (2006). La edad que determinamos para ese cúmulo es de  $12.5 \pm 2.0$  miles de millones de años (giga-años) o 12 mil 500 millones de años.

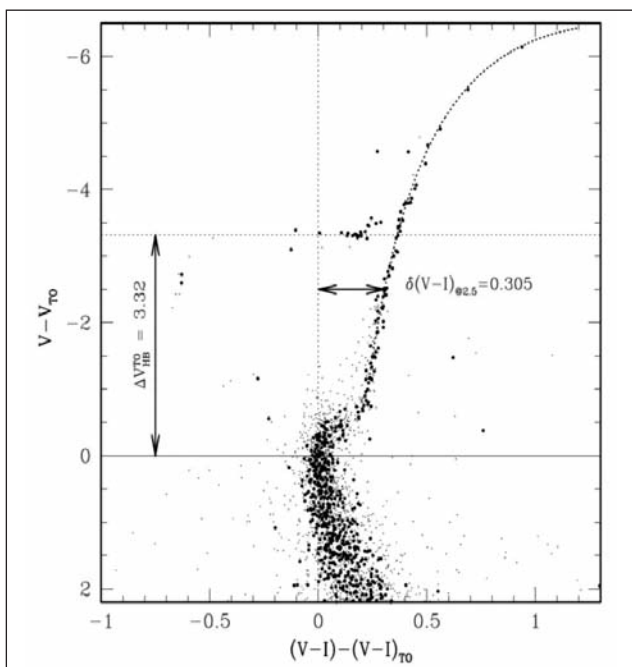
Actualmente es aceptado que los cúmulos globulares más alejados del centro galáctico, con distancias mayores a 50 kiloparsecs (miles de parsecs), son entre 1.5 y 2.0 giga-años más jóvenes que aquellos con distancias menores a 10 kiloparsecs, y por su edad y su

cinemática se distinguen dos grupos; la población I, con abundancia de hierro mayor a  $-0.8$  (una abundancia de hierro de 0 significa que es igual a la del Sol;  $-1.0$  y  $-2.0$  significan un décimo y un centésimo, respectivamente, de la abundancia en el Sol), con rotación rápida o cinemática del disco; y la población II, con abundancia de hierro menor a  $-0.8$ , con rotación lenta o cinemática del halo. Estos dos grupos de cúmulos parecen haberse formado en momentos y con cinemáticas diferentes.

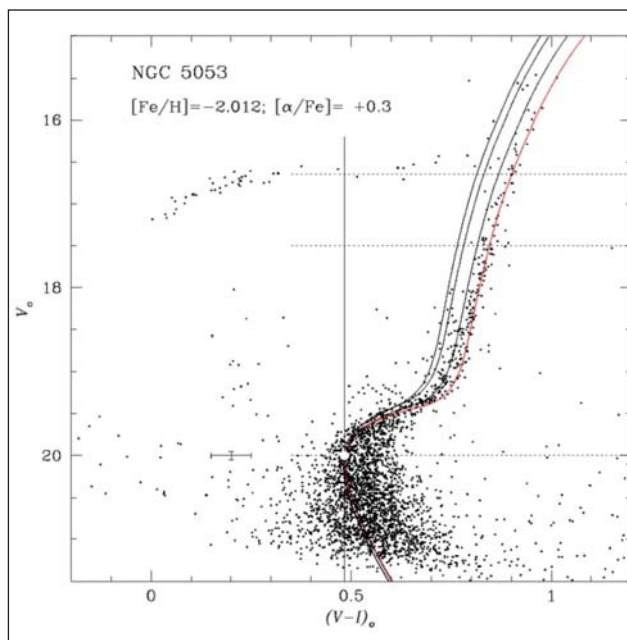
El estudio de las estrellas variables, en particular las RR Lyrae, en un gran número de cúmulos globulares contribuirá, seguramente, a entender las etapas tempranas en la evolución de nuestra galaxia.

### Conclusiones

Por medio de la observación CCD y el análisis cuidadoso de las imágenes se pueden obtener, a través de la descomposición en armónicos de las curvas de luz de estrellas tipo RR Lyrae, las metalicidades, distancias y edades de los cúmulos globulares.



**Figura 10.** Diagrama color-magnitud (DCM) de un cúmulo globular y los parámetros dependientes de la edad; la distancia del punto de salida (PS) a la rama horizontal ( $\Delta V_{HB}^{TO}$ ) y la distancia del punto de salida a una marca fiducial sobre la rama de las gigantes RG ( $\delta[V-I]_{2.5}$ ).



**Figura 11.** Diagrama color-magnitud del cúmulo NGC 5053 y cuatro isocronas de 12 (isocrona roja), 14, 16 y 18 giga-años, correspondientes al contenido de hierro del cúmulo. La edad de este cúmulo se calcula en  $12.5 \pm 2$  giga-años. El punto blanco es nuestra estimación del punto de salida, tomando en cuenta las incertidumbres en la fotometría (véase barra de error).

Este trabajo puede hacerse con una inversión modesta de recursos instrumentales y tiempo. Típicamente, un telescopio del orden de 2 metros equipado con una cámara CCD en un buen sitio astronómico y una semana de observación proporcionan el material necesario para analizar un cúmulo.

Esta estrategia permite además descubrir nuevas estrellas variables aun en zonas densamente pobladas, como suelen ser las regiones centrales de los cúmulos globulares.

#### Agradecimientos

En este proyecto participan de manera activa Sunetra Giridhar, del Indian Institute of Astrophysics de Bangalore, India; Daniel M. Bramich, del European Southern Observatory de Garching, Alemania, y el estudiante de posgrado Roberto Figueroa Jaimes, del Instituto de Astronomía de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM); a todos ellos agradezco su apoyo. Agradezco también a Juan Carlos Yustis por la preparación de algunas de las figuras.

Este proyecto es financiado parcialmente por DGAPA-UNAM a través del proyecto IN114309, y por Conacyt a través de un programa de intercambio con el Departamento de Ciencia y Tecnología de la India.

**Armando Arellano Ferro** es investigador en el Instituto de Astronomía de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Obtuvo su maestría y doctorado en la Universidad de Toronto, Canadá, y su licenciatura en la Escuela Superior de Física y Matemáticas del Instituto Politécnico Nacional. Es fundador del Departamento de Astronomía de la Universidad de Guanajuato. Su interés principal es la determinación de parámetros físicos de las estrellas, a partir de recursos observacionales. También tiene interés en la divulgación científica, y es autor del libro *Por qué no hay extraterrestres en la Tierra*, núm. 193 de la colección "La ciencia para todos" del Fondo de Cultura Económica.

#### Lecturas recomendadas

- Arellano Ferro, A., S. Giridhar y D. M. Bramich (2010), "CCD time-series photometry of the globular cluster NGC 5053: RR Lyrae, Blue Stragglers and SX Phoenixis stars revisited", *Monthly notices of the Royal Astronomical Society* 402:226-244.
- Baade, W. (1928), "Der Sternhaufen NGC 5053", *Astronomische Nachrichten* 232(11):193-200.
- Bramich, D. M. (2008), "A new algorithm for difference image analysis", *Monthly notices of the Royal Astronomical Society* 386:L77.
- Jurcsik, J. y G. Kovács (1996), "Determination of [Fe/H] from the light curves of RR Lyrae stars", *Astronomy and Astrophysics* 312:111-120.
- Kovács, G. (1998), "Relative distance moduli based on the light and color curves of RR Lyrae stars", *Memorie della Societa Astronomica Italiana*, 69, 49.
- Kovács, G. y A. R. Walker (2001), "Empirical relations for cluster RR Lyrae stars revisited", *Astronomy and Astrophysics* 371:579-591.
- Morgan, S. M., J. N. Wahl y R. M. Wieckhorst (2007), "[Fe/H] relations for c-type RR Lyrae variables based upon Fourier coefficients", *Monthly notices of the Royal Astronomical Society* 374:1421-1426.
- Walraven, T. (1955), "The pulsations of AI Velorum, SX Phoenixis and RR Lyrae", *Bull. of the Astronomical Institutes of the Netherlands* 12:223.
- Harris, William E. (2000), *Catalog of parameters for milky way globular clusters: the database*, McMaster University, [www.physics.mcmaster.ca/Globular.html](http://www.physics.mcmaster.ca/Globular.html) (revisión: diciembre, 2010).

