



LOS CÚMULOS GLOBULARES: RESTOS FÓSILES DEL UNIVERSO PRIMITIVO

Juan J. Clariá
Observatorio Astronómico
Universidad Nacional de Córdoba
CONICET

Presentación

El Doctor Clariá es uno de los profesores más antiguos de esta casa. Su currículum es realmente muy extenso e incluye numerosas páginas. En pocas palabras, me permitiría decir que es uno de los pocos astrónomos del país que ha sido incorporado a la Academia Nacional de Ciencias y uno de los muy pocos astrónomos argentinos que es Investigador Superior del CONICET. Desde muy joven ha incursionado en el estudio de los sistemas estelares tanto de la Vía Láctea como de otras galaxias. Ha publicado numerosos trabajos sobre los cúmulos estelares en general y sobre los cúmulos globulares en particular. Él nos va a explicar por qué son tan importantes los cúmulos globulares para lograr definir el concepto de "galaxia".

Si bien este es un tema en el que se trabaja seriamente desde hace mucho más de un siglo, en la actualidad muchos trabajos de última línea (incluyendo el *Telescopio Espacial*, por ejemplo), procuran delimitar lo que está pasando en una galaxia con sus cúmulos globulares muy viejos (como lo explicará seguramente el Dr. Clariá) e incluso, en algunos casos, excepcionalmente también con sus cúmulos globulares jóvenes. Esta constituye una línea de frontera aún en la actualidad; o sea que, si bien los cúmulos globulares son objetos que han sido estudiados durante muchísimo tiempo y pueden por lo tanto considerarse un tema tradicional en Astronomía, también constituyen en la actualidad un tema de frontera.

Doctor Sebastián Lípari

LOS CÚMULOS GLOBULARES: RESTOS FÓSILES DEL UNIVERSO PRIMITIVO

Dr. Juan J. Clariá

(Conferencia dictada en el Observatorio Astronómico el
7 de julio de 2006)

INTRODUCCIÓN

En otras ocasiones similares a ésta, cuando me ha tocado iniciar una charla para todo público, para el público en general, no para mis colegas como suele ser más frecuente, he solido aclarar que si bien son muchos y de índole muy variada los temas o los problemas relacionados con la Astronomía que suelen despertar el interés de la gente común, del público en general, no resulta fácil, al menos para mí, privilegiar en interés un tema respecto de otros, ya que lo que puede ser efectivamente interesante o atractivo para algunos, puede no serlo para otros y viceversa. Aún así y con el “riesgo” que implica elegir el tema de una charla, yo he aceptado gustoso asumir este “riesgo” y he elegido hoy hablarles sobre cierto tipo de estrellas, o más bien sobre cierto tipo de sistemas de estrellas muy particulares, fascinantes por cierto desde mi punto de vista, los denominados *cúmulos globulares* (CGs), cuyo estudio a lo largo de muchas décadas ha incidido notablemente en el conocimiento que hoy tenemos sobre la evolución de las estrellas, sobre la formación y evolución de nuestra *Vía Láctea*, de otras galaxias y del Universo entero.

Y como en otras ocasiones similares a ésta, mi intención hoy será, por un lado, usar una terminología simple, sencilla, desprovista dentro de lo posible de aspectos o términos técnicos (cuando esto no sea posible tendré que dar las explicaciones que correspondan), y por otro lado, será también mi intención evitar el uso de expresiones matemáticas que me parece poco ayudan a los que no son mis colegas, e incluso a aquéllos que siendo mis colegas no están precisamente en este tema.

No intentaré hoy hacer una revisión detallada de todos los problemas relacionados con los CGs que hoy cautivan a los astrónomos. No sólo creo que no sería capaz de hacer esta revisión debidamente, sino que presumo que un intento de esta naturaleza demandaría seguramente mucho más tiempo del que disponemos hoy en esta tarde-noche en el Observatorio. Me referiré entonces hoy sólo a algunos aspectos relacionados con los CGs que en mi opinión más interesan a los astrónomos, y en todo caso me permitiré

(seguramente Uds. me concederán esta licencia) destacar algunos aspectos, como por ejemplo las *edades relativas* de estos objetos, ya que como veremos éstas constituyen verdaderas claves para develar cómo se formó y evolucionó nuestra *Vía Láctea*.

CÚMULOS GLOBULARES EN LA GALAXIA

Hace poco más de dos siglos, en 1791, el astrónomo francés *Charles Messier* publicó un catálogo de objetos celestes nebulosos brillantes. El primer objeto catalogado por *Messier* hace más de 2 siglos, es decir M1, es la conocida *Nebulosa del Cangrejo* que estamos viendo en esta primera imagen. Como probablemente muchos de Uds saben, esta nebulosa no es otra cosa que el residuo o el remanente de la explosión de una antigua supernova que fuera observada y registrada por los chinos en el año 1054 de nuestra era.



El segundo objeto catalogado por *Messier* (en nuestra jerga M2, ver imagen) es precisamente un CG. Esto es, un sistema autogravitante de cientos de miles de estrellas ligadas gravitacionalmente entre sí, con apariencia esférica o globular, de allí su designación.



M2 es muy parecido -por cierto- al conocidísimo CG *Omega Centauro* (ver imagen), que algunos de Uds. con buena vista pueden quizás lograr divisar a simple vista como una manchita borrosa, difusa, ubicada en la constelación del *Centauro*.



Suelo decir muchas veces que para quienes tenemos la posibilidad de observar el cielo con un telescopio, estos objetos, los CGs, se presentan probablemente como los más pintorescos del mismo.

Hoy sabemos que del total de objetos catalogados por *Charles Messier* hace más de dos siglos, 28 son CGs y, a su vez, estos 28 CGs representan poco menos de la quinta parte del total de CGs observados hasta el momento en nuestra Galaxia (= 153). Por otra parte, estimamos que estos 153 CGs observados representan aproximadamente el 80 u 85% del total real de CGs galácticos, ya que muchos de ellos no han sido aún observados o bien porque se encuentran muy distantes en ciertas latitudes Galácticas, o bien porque están ubicados en dirección hacia el centro de la Galaxia y están afectados por una elevada absorción interestelar.

DISTRIBUCIÓN DE LA MATERIA EN EL UNIVERSO: CÚMULOS ESTELARES

Ahora bien:



O quizás antes que esta pregunta deberíamos tal vez formularnos la siguiente:



Cuando hablamos de materia nos estamos refiriendo por supuesto a la materia *observada* o *luminosa*, no a la materia *oscura* o *invisible*. En su expresión macroscópica, yo diría que la materia *observada* se distribuye en el Universo en grupos de galaxias; es decir, en grupos de “pequeños universos-islas” o galaxias, las cuales tienen variadas morfologías, como podemos ver en la siguiente imagen tomada con el *Telescopio Espacial Hubble* de un cúmulo de galaxias (*Abell 1689*).



Si pudiésemos ver en detalle y por separado cada una de las galaxias de *Abell 1689*, veríamos muy probablemente algunas como la imagen siguiente, una magnífica galaxia con estructura espiral:



Veríamos probablemente además galaxias como la siguiente imagen, también espiral, con una forma notablemente semejante a un huevo frito:



También veríamos seguramente algunas galaxias como la siguiente, parecida a una pelota de rugby; son las conocidas galaxias *elípticas*. Cada puntito en cada una de estas galaxias es una estrella.



O incluso veríamos galaxias sin forma (*irregulares*), o espirales vistas de canto, como las dos imágenes siguientes, etc.





Sabemos desde hace décadas que el Universo está formado por millones de galaxias como éstas, con variadas morfologías, las cuales se alejan entre sí con velocidades que son proporcionales a sus respectivas distancias, por lo que decimos que el Universo se encuentra en un proceso de continua *expansión* desde su origen. Esta evidencia (*expansión* del Universo), oficialmente detectada por vez primera por el astrónomo norteamericano *Edwin Hubble* a fines de la década de 1920, constituye en mi opinión, el descubrimiento astrofísico probablemente más relevante de nuestra era. Digo oficialmente detectada por vez primera por *Hubble*, porque aparentemente con anterioridad a *Hubble*, otros colegas parecen haber obtenido evidencias de este sorprendente fenómeno.

Les decía que la *materia observada* se distribuye en el Universo en grupos de galaxias. Ahora bien, a su vez la *materia observada* en cada galaxia se organiza en forma de *estrellas* comunes (como el Sol, por ejemplo), en forma de grandes *nubes de gas*, principalmente H y He, nubes éstas que constituyen la materia prima para la formación de nuevas estrellas, y en forma de *polvo interestelar*, es decir, material interestelar que absorbe selectivamente, no uniformemente, la energía luminosa de los cuerpos celestes.

Si continuásemos con esta cadena, tendríamos quizás que decir que, a su vez, las *estrellas* en cada galaxia se distribuyen de manera semejante a lo

que acontece con los seres humanos en nuestro planeta. Es decir, no sólo hay estrellas *simples* o *aisladas*, de la misma manera que existen personas solteras entre nosotros, sino que muchas veces las estrellas se encuentran de a pares formando *sistemas binarios* o *estrellas dobles*, equivalentes a los matrimonios, por cierto cada vez menos frecuentes entre nosotros, o incluso *sistemas múltiples*. En ocasiones, cuando se agrupan o aglutinan muchas estrellas formando verdaderos conglomerados o *familias* de estrellas, resultan los conocidos *cúmulos estelares* y las *asociaciones estelares*. Pues bien, tanto los *sistemas binarios*, los *sistemas múltiples*, como los *cúmulos* y las *asociaciones estelares* son los astrónomos simplemente *sistemas estelares*. O más simple aún, cuando dos o más estrellas están ligadas gravitacionalmente entre sí en el cielo forman un *sistema estelar*. El más simple de todos los *sistemas estelares* es naturalmente una *estrella doble* o *sistema binario*.



Ocurre que en comparación con las estrellas aisladas, las estrellas de un determinado *sistema estelar*, como este pintoresco ejemplar de cúmulo abierto que vemos en la siguiente imagen, tienen la “*ventaja*” de que comparten varias propiedades comunes.



En efecto, todas las estrellas de este cúmulo estelar se encuentran prácticamente a la misma *distancia del sol*. Todas comparten un *movimiento global común* en el espacio. Por haberse formado todas aproximadamente al mismo tiempo, tienen todas aproximadamente la misma *edad* y, lo que es aún más importante, por haberse formado todas a partir de la misma nube de gas y polvo primigenias, las “cascaritas superficiales” (atmósferas) de las estrellas de un mismo cúmulo estelar tienen también una *composición química* bastante parecida. Todas estas son propiedades afines, comunes. Sin embargo, como ocurre también entre los miembros de una familia numerosa, existen características diferenciales entre los miembros de un sistema estelar. En efecto, las estrellas de un cúmulo se diferencian en sus *masas* y, por ende, también en sus *brillos* o *luminosidades intrínsecas*. Y también se diferencian en sus *temperaturas superficiales* y, por lo tanto, en sus *colores*, ya que bien sabemos que las estrellas calientes se presentan ante nuestros ojos como blanco-azuladas, en tanto que aquéllas como el Sol, con temperaturas de unos 6000 K en su superficie son típicamente amarillas, mientras que las estrellas rojizas como *Betelgeuse* de Orión o *Aldebarán* del Toro, por ejemplo, son más frías que el Sol (2000-3000 K). Esto explica porqué cuando vemos un cúmulo estelar a través de un telescopio, su apariencia por lo general es la de un pintoresco conglomerado multicolorido de estrellas, en donde la variedad de colores

refleja simplemente la diversidad de temperaturas superficiales de los miembros del cúmulo.

Los *cúmulos abiertos* - como el conocido “*Cúmulo del Trapecio*” de la constelación de *Orión* que vemos fotografiado en el infrarrojo por el *Telescopio Espacial* (imagen derecha), o bien el pintoresco *Cúmulo Arches*, otro bonito ejemplar ubicado cerca del centro de nuestra *Vía Láctea*, también fotografiado con el *Telescopio Espacial* (imagen izquierda) - tienen en general una forma más o menos irregular, incluyen típicamente entre algunas decenas o centenares de estrellas, en ocasiones algunos miles, y sus edades oscilan entre poco menos de un millón de años los más jóvenes y unos 8 o 9 mil millones de años los más viejos.



Por su parte, los CGs como el conocido *47 Tucanae* que vemos en la siguiente imagen - observado desde tierra (izquierda) y resuelto en su parte central en millares de estrellas por el *Telescopio Espacial* (derecha) – no tienen apariencia irregular, sino más bien esférica, simétrica, regular, o *globular* (de allí su designación); incluyen típicamente algunas decenas o

centenares de miles e incluso millones de estrellas como *47 Tucanae* y sus edades superan en casi todos los casos los 10 mil millones de años.



¿Cuál es el interés en estudiar los cúmulos estelares ? O mejor aún:



La importancia del estudio de los *sistemas estelares* en general radica en que el conocimiento de las propiedades astrofísicas de estos sistemas (tanto estadísticas de conjunto, como individuales de sus miembros), ha desempeñado y aún desempeña un papel fundamental en el desarrollo de la Astrofísica moderna. Precisamente, gracias al estudio de los cúmulos estelares, desde muy diversos puntos de vista, los astrónomos hemos podido comprender definitivamente cómo se forman las estrellas a partir del material interestelar, cómo ellas evolucionan a lo largo de millones de años, cómo terminan sus vidas pasando por las distintas configuraciones de equilibrio de las que seguramente Uds. habrán oído hablar, tales como *enanas blancas*, *estrellas de neutrones* o eventualmente y dependiendo de sus masas, como los enigmáticos *agujeros negros*. Hemos podido además comprender cómo es la estructura de nuestra *Vía Láctea*; cómo ella misma se formó y evolucionó e incluso cómo se formaron y evolucionaron otras galaxias, etc.

Tanto los cúmulos abiertos como los globulares son de un enorme interés astrofísico por muchas razones. Los *cúmulos abiertos jóvenes*, como NGC 3603, que vemos en la siguiente imagen, rodeado de una nebulosa gigante, probablemente la materia prima a partir de la cual se formarán nuevas estrellas), son muy buenos *delineadores* o *trazadores* de la estructura espiral que bien sabemos tiene nuestra Galaxia.



Por su parte, los *cúmulos abiertos viejos*, como el conocido M67 (ver imagen), al incluir estrellas en diferentes etapas evolutivas, son muy buenos laboratorios para estudiar precisamente esto, las distintas etapas de la evolución estelar.



Por su parte, los CGs son también de interés por muchas y bien conocidas razones, pero quizás la más importante es que estos objetos son (salvo excepciones) probablemente los más viejos conocidos en el Universo, cuya formación se remonta quizás a los instantes comparativamente consecutivos al *Big Bang* (a la *Gran Explosión*), si es que efectivamente ocurrió alguna vez este dichoso episodio). Debido a su extremada longevidad, los CGs han sido testigos de eventos que han ocurrido hace miles de millones de años, por lo que constituyen una parte muy valiosa de la historia de nuestra Galaxia y del mismo Universo. En particular, las *edades* de los CGs, hoy en día determinadas con mucho mayor precisión que hace unos pocos años atrás, imponen límites, cotas o restricciones a los modelos cosmológicos vigentes. Tengan Uds. presente que el Universo no puede ser más joven que los objetos más viejos que el mismo contiene, por lo que esta simple aseveración explica la importancia cosmológica que tiene la determinación de las edades de los CGs. Por otra parte, conocer la *composición química* de las atmósferas de las estrellas que forman parte de

un CG es -si me permiten la comparación- algo así como conocer la composición química que tuvo nuestra Galaxia en sus primeras fases evolutivas. Estos objetos son interesantes además porque forman parte de un *sistema jerárquicamente superior* (como es nuestra propia Galaxia o en general las galaxias que los albergan), y nos informan sobre la estructura y evolución química de las galaxias en general. Y entre muchas otras cosas más, suelo decir muchas veces que estos objetos, los CGs, son una especie de “*plaga universal*”, simplemente porque se encuentran desparramados por todas partes en el Universo. En efecto, veamos para donde veamos siempre encontraremos CGs, no sólo asociados a los halos y eventualmente a los discos de las galaxias espirales (como la nuestra), sino también asociados a las galaxias elípticas, e incluso a las galaxias irregulares como nuestras vecinas más próximas: las *Nubes de Magallanes*.



LA NUEVA SUBDIVISIÓN DE NUESTRA GALAXIA

¿ Qué concepción se tenía de nuestra Galaxia, de nuestra Vía Láctea, hace un siglo atrás y qué concepción tenemos actualmente ?



Hace aproximadamente un siglo, a fines del siglo XIX o principios del siglo XX, se pensaba que nuestra Galaxia estaba constituida por un enorme disco de gas y de estrellas centrado en el Sol y de unos 7 mil años luz de diámetro.



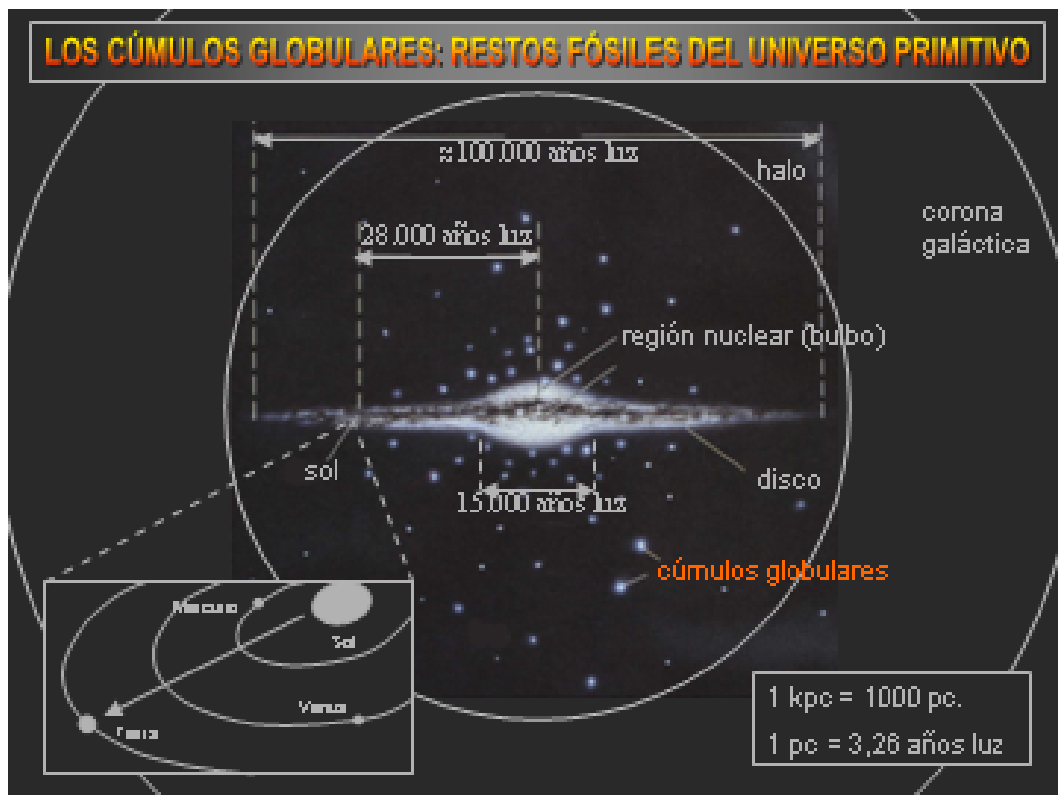
Esta concepción netamente heliocéntrica cambió significativamente cuando, en la segunda década del siglo pasado, otro astrónomo norteamericano, el Dr. *Harold Shapley*, luego de medir las distancias precisamente de varios CGs, llegó a la conclusión de que éstos constituían un sistema mucho más extenso, cuyo centroide coincidía con el centro de la Galaxia. De acuerdo a sus mediciones, *Shapley* llegó a la conclusión de que el Sol no se encontraba en este centroide sino bastante alejado del mismo, hacia un borde del disco Galáctico. Lamentablemente, *Shapley* no tuvo en cuenta la absorción selectiva que produce el medio interestelar, por lo que sobrestimó considerablemente las distancias de los CGs, asignando al disco un diámetro 3 veces más grande que el que hoy sabemos tiene.



¿ Qué concepción tenemos actualmente de nuestra Galaxia ?



Hoy sabemos que nuestra Galaxia, como muchas otras galaxias espirales, posee 4 componentes fundamentales. La región nuclear, conocida como el *bulbo*, de forma aproximadamente esferoidal aunque ligeramente achatado y de unos 15.000 años luz de diámetro. Un *disco* (visto de canto o de perfil en la ilustración) cuyo diámetro es de unos 100.000 años luz, dentro del cual yace el Sol junto con todos los planetas a unos 28.000 años luz del centro Galáctico.



El *halo*, componente esferoidal cuyo diámetro debe superar ligeramente el del disco y, últimamente, se reconoce una cuarta componente, la *corona galáctico* o *halo exterior*, del cual se cree que puede llegar a ser hasta 6 o 7 veces más extenso que el halo.

Ahora bien: ¿ qué contienen estas 4 componentes ?



El *bulbo* no muestra estructura espiral y hasta donde sabemos contiene estrellas comparativamente viejas, altamente concentradas en la región, y una cierta proporción de gas y polvo interestelar, material éste a partir del cual podrían estar formándose nuevas estrellas. El *disco* posee parcialmente estructura espiral, contiene estrellas en un amplio rango de edades aunque comparativamente más jóvenes que el *bulbo* y un porcentaje de gas y polvo interestelar mucho mayor que en el *bulbo*. El *disco* contiene también todos los cúmulos abiertos y las asociaciones estelares conocidas. Por su parte, el *halo* galáctico contiene casi exclusivamente estrellas comparativamente viejas o extremadamente viejas, un porcentaje ínfimo de gas y polvo (sobre este tema disentimos con colegas del Observatorio de La Plata) y, precisamente, buena parte de los CGs conocidos.

¿ Y qué contiene la *corona galáctica* ? ¿ De qué está formada esta cuarta componente ? Pues créase o no, la masa total de la *corona galáctica* parece superar en 5 o 10 veces la del *bulbo*, *disco* y *halo* tomadas en conjunto. Lo

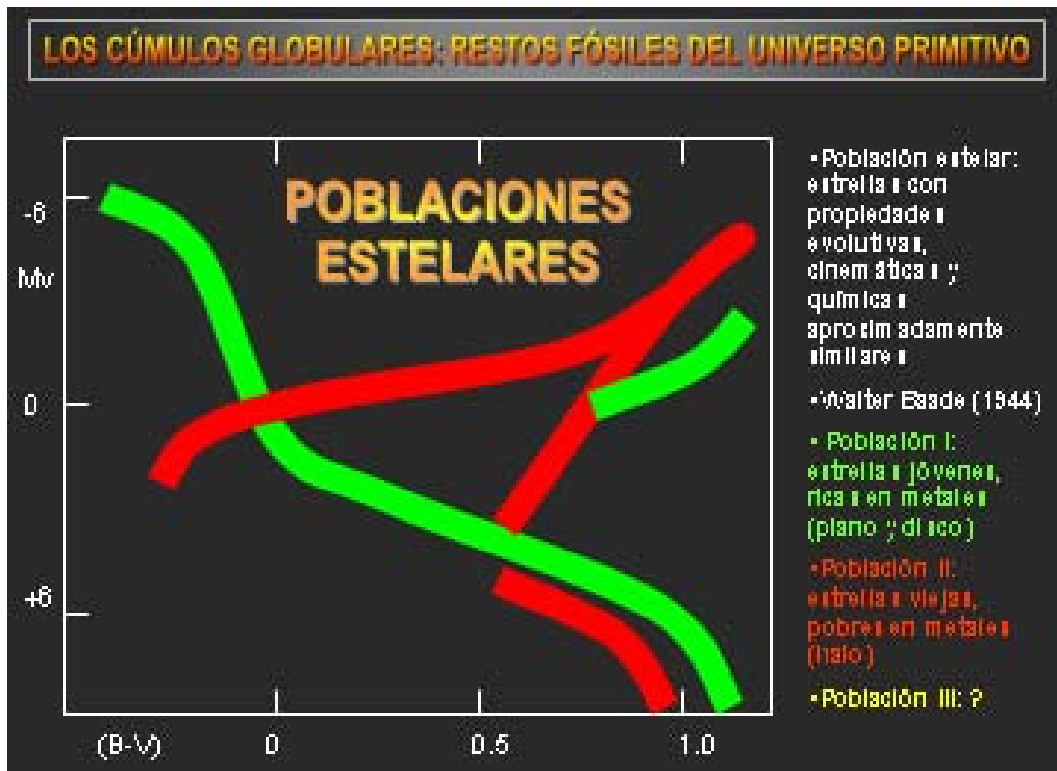
interesante es que si la materia que compone la *corona galáctica* fuese de tipo común, ordinario, deberíamos detectarla sino en la región visual del espectro electromagnético, tal vez en el infrarrojo, o en el ultravioleta, o en frecuencias de radio, o en radiación X, etc. Sin embargo, nada de esto ocurre y apenas si hemos podido detectar las propiedades gravitacionales de esta *materia oscura*, no luminosa, que parece eludir su identificación. ¿De qué está formada la *corona galáctica* ? Pues, si bien se están examinando varias hipótesis (neutrinos, agujeros negros e hipótesis aún más exóticas), todavía no lo sabemos a ciencia cierta. Felizmente, este tema, el *Universo Invisible*, será precisamente objeto de otra conferencia que será dictada en este observatorio por un joven colega, el Dr. Carlos Valotto, en octubre de este mismo año.

POBLACIONES ESTELARES

Antes de continuar, permítanme introducir y explicar rápidamente el concepto de “*población estelar*”, ya que me referiré a él en algunos minutos.

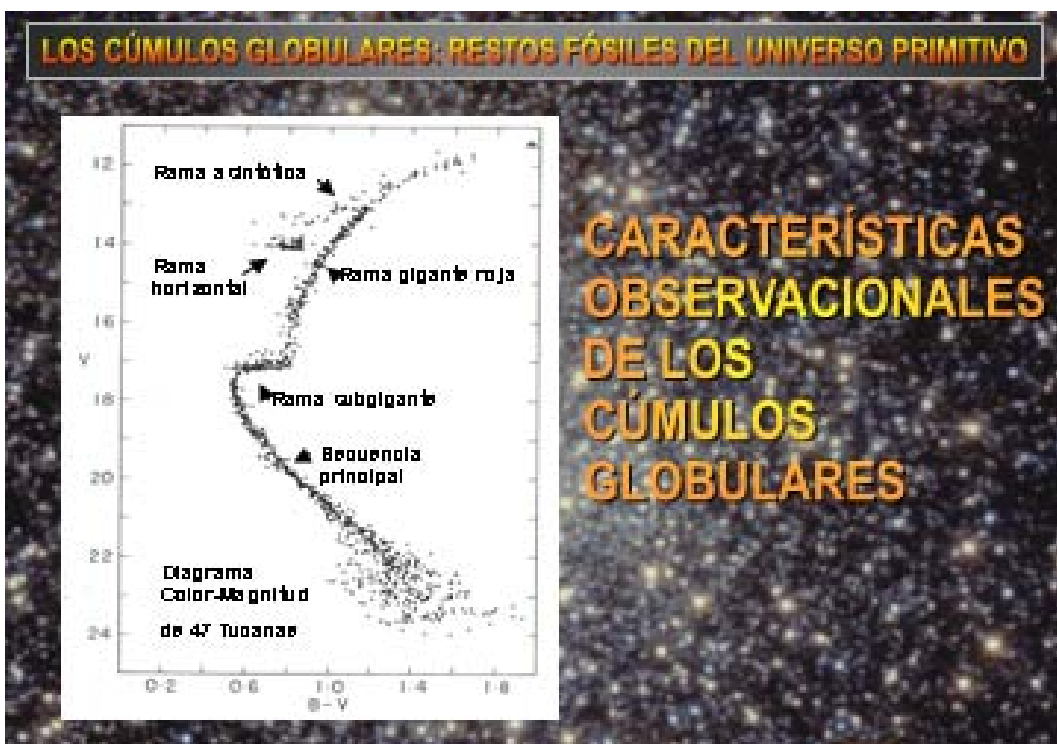
Hace algunas décadas, cuando los astrónomos pudieron efectuar las primeras mediciones de magnitudes y colores de estrellas individuales en algunos CGs, pudo constatar que la distribución de las estrellas de un típico CG en un diagrama magnitud versus color (conocido como *diagrama color-magnitud* o diagrama de *Hertzsprung-Russell*) difería significativamente del de las estrellas comunes ubicadas en la inmediata vecindad solar, principalmente por dos aspectos. En primer lugar, las estrellas vecinas del Sol (banda verde en la siguiente imagen) intrínsecamente más brillantes son azules y ocupan la porción superior izquierda del diagrama CM (*gigantes azules*), mientras que en los CGs (banda roja) las estrellas más brillantes son rojas, más exactamente *gigantes rojas*. En segundo lugar, el diagrama CM de un típico CG tiene la apariencia general de una “Y” invertida (banda roja), esto es, marcadamente diferente del diagrama CM de las estrellas de la inmediata vecindad solar en el mismo diagrama (banda verde). Esta última gran diferencia condujo precisamente a otro astrónomo norteamericano *Walter Baade*, hace casi exactamente 60 años, a introducir el concepto de “*población estelar*”, es decir, clases de objetos con propiedades evolutivas, cinemáticas y químicas aproximadamente similares. Es bien sabido que después de *Baade* las estrellas se dividen convencionalmente en dos clases: una clase joven, rica en metales, observada a lo largo del plano y del disco galáctico, donde las estrellas más luminosas son gigantes azules (*población I*), y una clase más vieja, pobre en metales, observada en el halo galáctico, en la cual las estrellas más luminosas son gigantes rojas (*población II*). Desde luego, los CGs son

objetos típicos de la población II. La posible existencia de una *población III* la discutiremos al final de esta charla.



CARACTERÍSTICAS OBSERVACIONALES FUNDAMENTALES DE LOS CÚMULOS GLOBULARES

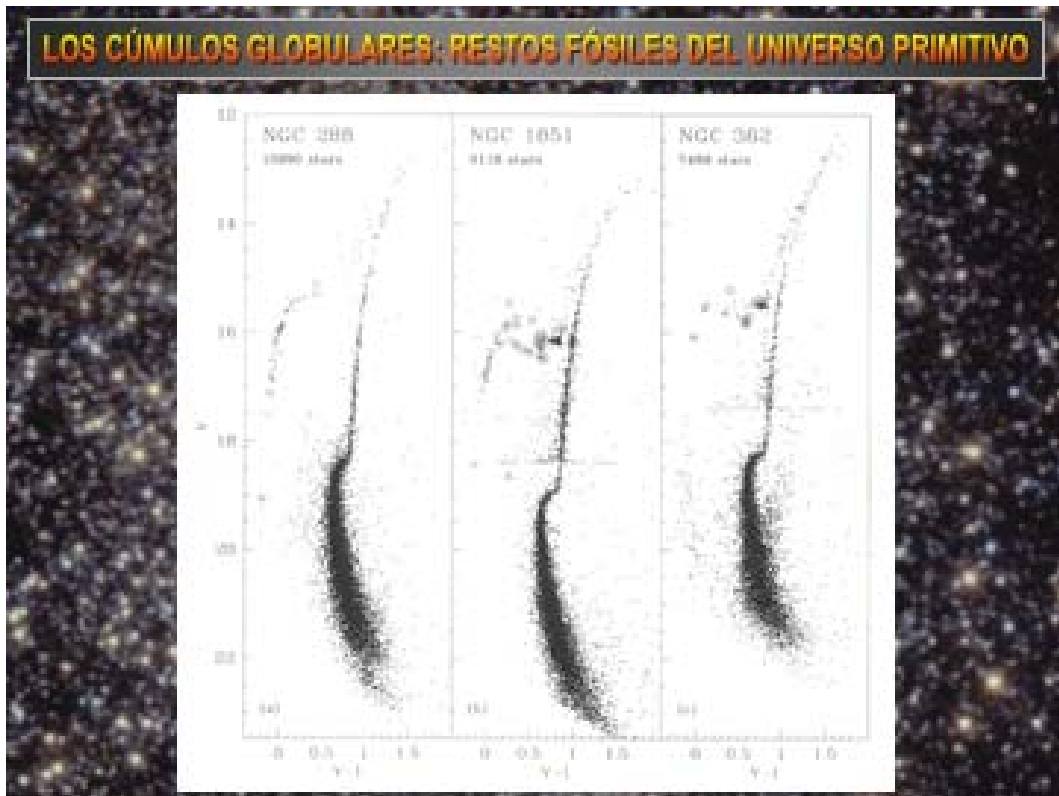
Pero regresemos nuevamente al diagrama CM de los CGs, por ej. al de 47 *Tucanae* (imagen siguiente), y lo examinemos un poco más en detalle.



Desde el punto de vista morfológico, los diagramas CM de todos los CGs son bastante similares en líneas generales. Todos poseen una “*secuencia principal*” en la cual se ubican la gran mayoría de las estrellas; un “*punto de separación*” o de desvío de dicha secuencia, cuya luminosidad depende de la edad; una “*rama gigante roja*”, cuyo nombre se debe a que contiene estrellas de gran tamaño, superficialmente frías (rojas); una “*rama subgigante*”, que une la secuencia principal con la rama gigante roja; la denominada “*rama horizontal*”, cuyas estrellas son unas 50 veces más luminosas intrínsecamente que el Sol (a propósito, las estrellas de esta rama con temperaturas superficiales entre 6500 y 7500 K caen dentro de una región de inestabilidad y se conocen como variables del tipo *RR Lyrae*. Estas estrellas aumentan y reducen su brillo rítmicamente según períodos que oscilan entre 6 horas y un día aproximadamente). Finalmente, reconocemos a veces con dificultad, la denominada “*rama asintótica*”, conformada por un reducido número de estrellas que yacen por encima o a la izquierda de la rama gigante roja.

Suelo decir muchas veces que el diagrama CM de un CG constituye una herramienta fundamental para comprender cómo evolucionan las estrellas. Efectivamente, como las estrellas de un CG se formaron presumiblemente al mismo tiempo, su distribución actual en el diagrama CM se debe a que algunas estrellas, las de mayor masa, han evolucionado más rápidamente, han evolucionado primero y, en consecuencia, las diferentes regiones del diagrama corresponden a diferentes etapas en la vida de las mismas. Las estrellas de la secuencia principal, por ejemplo, no han aún evolucionado (están transformando H en He en su región central), en tanto que las estrellas de las ramas gigante roja, horizontal y asintótica se encuentran en estados avanzados de evolución, más avanzado cuanto mayor es la masa de la estrella.

Les decía hace algunos minutos que desde el punto de vista morfológico los diagramas CM de todos los CGs son en general bastante similares. Sin embargo, vistos en detalle, suelen apreciarse diferencias a veces muy marcadas, como en el caso de NGC 288, NGC 1851 y NGC 362 (Bellazzini et al. 2001), tres CGs elegidos bastante al azar (ver imagen siguiente).



Noten, por ejemplo, cómo varían las pendientes de las ramas gigantes rojas, los puntos de desvío de las secuencias principales y particularmente la población de la rama horizontal (tanto en la cantidad como en el tipo de estrellas). Precisamente, el *problema general* de la Astrofísica de los CGs consiste en correlacionar las características morfológicas observadas en los diagramas CM de los CGs, con los parámetros evolutivos de los mismos (principalmente *edad* y *composición química*). En efecto, desde los primeros modelos teóricos de evolución estelar se sabe, por ejemplo, que la población de la rama horizontal y la pendiente de la rama gigante roja dependen fuertemente de la composición química. Por otra parte, se sabe también que la posición del punto de separación o de desvío de la secuencia principal depende de la edad del CG, simplemente porque las estrellas más brillantes, de mayor masa, se separan o evolucionan primero. En consecuencia, a medida que la edad del CG aumenta, el punto de separación se desplaza hacia abajo en la secuencia principal, hacia las regiones de menor luminosidad.

COMPOSICIÓN QUÍMICA Y EDAD: PARÁMETROS FUNDAMENTALES

El conocimiento exacto de la *edad* y la *composición química* de las estrellas de los CGs resulta entonces de vital importancia desde el punto de

vista cosmológico. En efecto, decíamos hace algunos minutos que el Universo no puede ser más joven que los objetos más viejos que el mismo contiene y dado que los CGs son probablemente los objetos más antiguos del Universo, su edad representa entonces una cota inferior para la edad del mismo, la cual, a su vez, impone un límite máximo a la constante de *Hubble*, constante ésta que define el proceso observado de expansión del Universo. Por su parte, conocer en detalle la *composición química* de los CGs (los astrónomos hablamos de *metallicidades*) significa conocer la composición química de la Galaxia en sus primeras fases evolutivas.

Comprenderán entonces porqué el empeño de los astrónomos en determinar estos dos parámetros (*edad y metalicidad* de los CGs) de la manera más confiable posible.

Surge entonces de inmediato la pregunta:



Comencemos por la *composición química*, o bien por la denominada *metalicidad*. Debo aclarar que cuando los astrónomos hablamos de *metalicidad* o *contenido metálico* de una estrella, nos estamos refiriendo en lenguaje astronómico, a la abundancia en la “*cascajista superficial*” (atmósfera) de la estrella, de todos los elementos químicos más pesados que el helio (generalmente hierro), aunque no sean necesariamente metales. Para quienes deseen un poco de mayor precisión en este concepto, me permito recordarles que usualmente la *metalicidad* ($[M/H]$) o *razón de*

metales a hidrógeno de una estrella, se define como el logaritmo del cociente entre la abundancia de “metales” y de H de la estrella, menos el logaritmo de dicho cociente en el Sol:

LOS CÚMULOS GLOBULARES: RESTOS FÓSILES DEL UNIVERSO PRIMITIVO

METALICIDAD DE UNA ESTRELLA

$$[M/H] = \log\left(\frac{N_{\text{metales}}}{N_{\text{H}}}\right)_{\text{estrella}} - \log\left(\frac{N_{\text{metales}}}{N_{\text{H}}}\right)_{\text{Sol}}$$

$[M/H] = 0.0 \Rightarrow$ abundancia solar

De esta manera, la *metalicidad* se expresa en términos del contenido metálico solar.

Antes que intentar interpretar esta expresión matemática, yo los invitaría a que usemos la imaginación, ya que esto suele dar generalmente mejores resultados. Imaginemos entonces una estrella cuya atmósfera tenga el mismo contenido de “metales” que el Sol. En ese caso, por la forma en que se define la *metalicidad*, esta estrella imaginaria tendrá una *metalicidad* igual a cero. Si esta estrella imaginaria tiene por ejemplo 10, 100 o 1000 veces menos “metales” que el Sol, pues de acuerdo a la definición, su *metalicidad* será -1, -2 o -3, respectivamente.

Una vez definida la *metalicidad* de una estrella, la siguiente pregunta será entonces:



Si bien existen varios métodos para determinar la *metalicidad* de los CGs y sería imposible describirlos, yo me permitiría clasificarlos esencialmente en 3 categorías. (1) Aquéllos que se basan en *propiedades integradas* de todo el CG (por ejemplo, espectros integrados, brillos integrados o índices de color integrados, etc). Estos métodos no son muy precisos ni confiables y sólo sirven para tener una primera estimación de la *metalicidad*. Son útiles por ejemplo para fines estadísticos. (2) Aquéllos que se basan en ciertas *características morfológicas* del diagrama CM (pendiente de la rama gigante roja, intersección de la rama horizontal con la rama subgigante, etc). Estos métodos son algo más precisos y confiables que los anteriores, pero tienen la desventaja de que requieren el conocimiento de los diagramas CM. (3) Aquéllos que se basan en la aplicación de *técnicas espectroscópicas o fotométricas* a estrellas individuales. De todos estos métodos, los que se basan en técnicas espectroscópicas (en particular de alta dispersión) son sin duda los más precisos y, por ende, los más confiables. Lamentablemente, cuando se trata de estrellas individuales de CGs, por lo general muy débiles, estos métodos requieren la utilización de telescopios de gran apertura, equipados con espectrógrafos modernos (tipo *echelle*, por ejemplo) que no todos los observatorios poseen y muchas horas de observación para extraer información de pocas estrellas. Es decir, son métodos muy confiables pero poco expeditivos. De allí que sólo una tercera parte de los CGs conocidos tengan *metalidades* bien determinadas a partir de espectroscopía de alta dispersión.

Por su parte, algunos métodos basados en *fotometría individual de gigantes rojas* han mostrado ser razonablemente confiables. Es precisamente en este aspecto donde el Observatorio Astronómico de Córdoba y, en particular, el Grupo de Astrofísica Estelar que tengo el honor de dirigir desde hace varios años, ha realizado algunos aportes interesantes. En efecto, en este Observatorio hemos desarrollado un par de métodos independientes para determinar la *metalicidad* de cúmulos abiertos y globulares. Estos métodos que vienen siendo exitosamente utilizados acá y en otros países, se basan en la observación -con un *telescopio*, un *fotómetro* y una *fotomultiplicadora* o un detector CCD- de estrellas individuales en diferentes regiones del espectro electromagnético. Por obvias razones de tiempo no describiré acá estos métodos. Me limitaré apenas a comentar dos cosas: (1) Estos métodos se aplican a estrellas *gigantes rojas*, debido a que estas estrellas no sólo constituyen la componente estelar probablemente más numerosa de nuestra y de otras galaxias, sino que además por ser tan luminosas pueden ser observadas a grandes distancias del Sol, aún usando telescopios pequeños, como los que existen en Argentina. (2) La idea básica para el desarrollo de estos métodos consiste en definir parámetros o cantidades que puedan medirse observacionalmente usando un *telescopio*, un *fotómetro* y una *fotomultiplicadora* o un *CCD* y que resulten sensibles a la *metalicidad* de las gigantes rojas. Se preguntarán Uds. cómo hacemos para definir estos parámetros observados ? Pues bien, para esto debemos conocer muy bien y de antemano cómo es en detalle la distribución espectral de energía de las estrellas gigantes rojas, para seleccionar las regiones del espectro que sean sensibles a la *metalicidad*. Una vez seleccionadas estas regiones, elegimos filtros que dejan pasar luz en estas bandas seleccionadas y medimos magnitudes en estas bandas. Luego combinamos adecuadamente estas magnitudes formando colores o combinación de colores, hasta definir los parámetros observados que más varían con la *metalicidad*. Finalmente, calibramos estos parámetros en función de la *metalicidad*, utilizando para ello estrellas cuyas *metalidades* conocemos muy bien porque han sido determinadas a partir de espectroscopia de alta dispersión. Estas calibraciones requieren por lo general precisos ajustes matemáticos, para lo cual suelen usarse computadoras de última generación.

Hemos descripto más o menos superficialmente cómo determinamos la *metalicidad* de un CG. La pregunta ahora es: ¿ Cómo se imaginan Uds. que puede estimarse la *edad* de un CG ? Si suele ser en principio difícil estimar la edad de una persona desconocida, cómo hacemos los astrónomos en el siglo XXI, con toda la tecnología del presente siglo, para determinar la edad de un CG ?

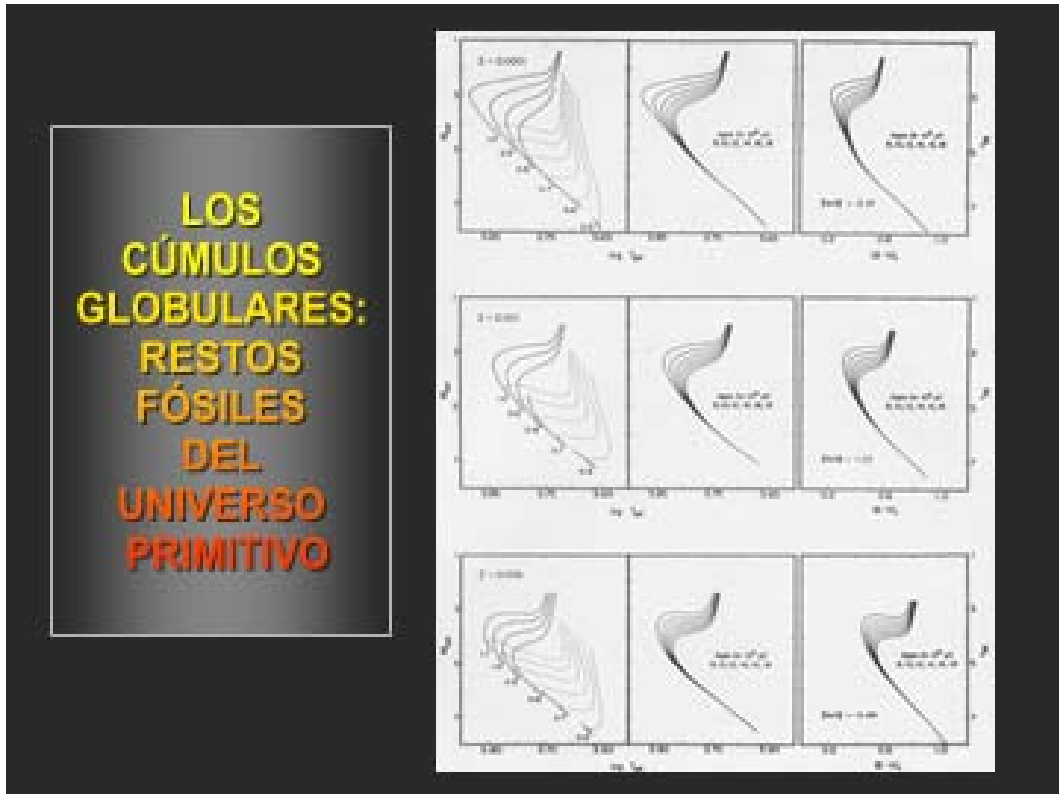


La idea básica para determinar la *edad* de un CG no ha variado, en lo esencial, desde hace varios años. Básicamente, se obtiene observacionalmente un diagrama CM del CG y se compara la distribución de estrellas observada en ese diagrama con la que predice teóricamente un determinado modelo teórico de evolución estelar, para una determinada composición química y una determinada edad. Por lo general, suele adoptarse para el CG la *edad* del modelo teórico que mejor reproduce la distribución observada en el diagrama CM, especialmente en el punto de separación de la secuencia principal.

No voy a explicar acá de qué manera se calcula un modelo teórico de evolución estelar. A lo sumo, me permitiría recordarles que la evolución de las estrellas es extremadamente lenta, imperceptible a la observación directa y ocurre según una escala temporal de millones de años. El cálculo de un modelo teórico de evolución estelar es algo bastante complejo y requiere, entre otras cosas, resolver ecuaciones diferenciales y algebraicas no demasiado sencillas.

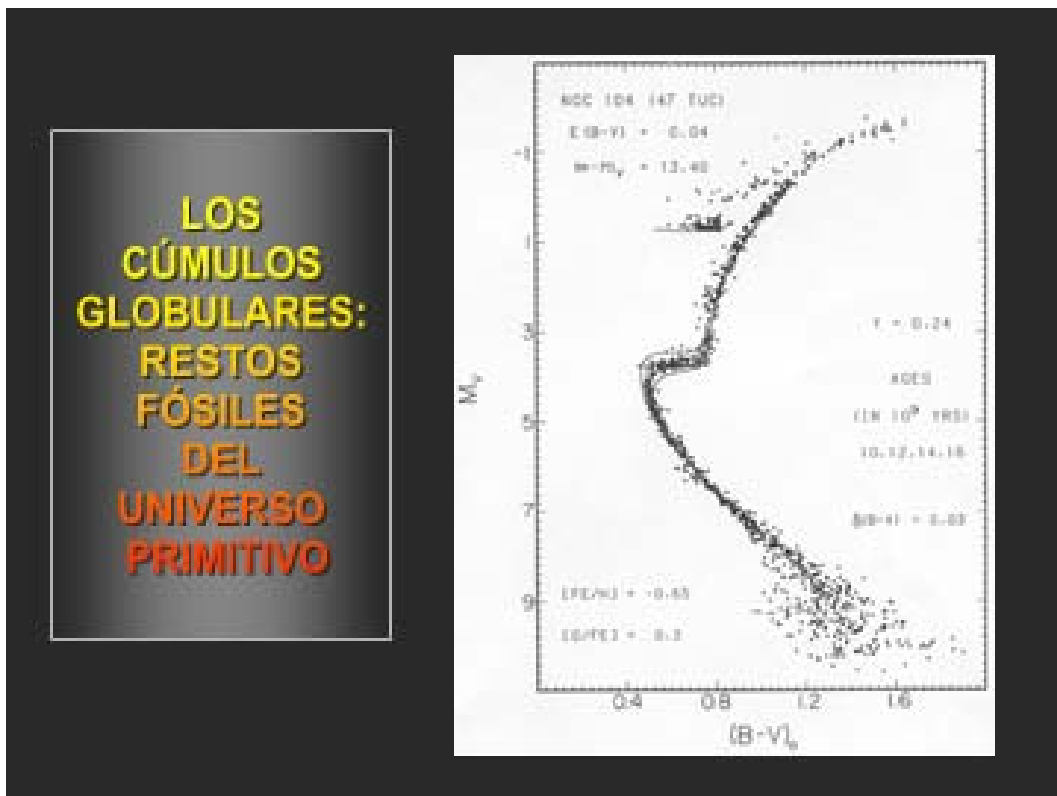
Partiendo de los parámetros iniciales de una estrella (esencialmente *masa* y *composición química*) puede calcularse, a través de un modelo teórico de evolución estelar, la trayectoria evolutiva de dicha masa en el diagrama CM, para un determinado tiempo de evolución o *edad*. Una *isócrona*

teórica, como su nombre lo indica, queda definida por los lugares o posiciones que ocupan en el diagrama CM distintas masas, con una determinada composición química, para un determinado tiempo de evolución o *edad*.



Muchos astrónomos han calculado *isócronas teóricas* para un amplio rango de *edades* y *metallicidades*. En la imagen de esta página vemos las trayectorias evolutivas (izquierda) calculadas por dos reconocidos colegas (VandenBergh & Bell 1985), correspondientes a estrellas de masas entre 0.6 y 1 masas solares, para 3 *metallicidades* diferentes: una muy baja, otra intermedia y otra comparativamente alta. Al centro y a la derecha en la figura se muestran las *isócronas teóricas* calculadas para las 3 *metallicidades* mencionadas. Las *isócronas* oscilan entre 8 y 18 mil millones de años. Noten Uds. cómo cambia la posición del punto de desvío de la secuencia principal de cada *isócrona* con la edad. Más sutil, aunque claramente perceptible, es la variación de la forma de las *isócronas* con la composición química.

A manera de ejemplo, en la siguiente imagen podemos ver qué edad le corresponde al conocido CG 47 *Tucanae*, si usamos *isócronas teóricas* para determinarla. Cada punto en el diagrama CM corresponde a la magnitud y el color de una estrella del cúmulo, determinados usando un moderno detector CCD, en combinación con el telescopio de 4 m del Observatorio de *Cerro Tololo* (Chile). Las líneas representan *isócronas teóricas* de *VandenBerg* y *Bell* (1985), calculadas para la composición química conocida de 47 *Tucanae* ($[M/H] = -0.65$), correspondientes a 10, 12, 14 y 16 mil millones de años. Noten entonces cuán importante es conocer previamente la composición química para determinar la edad del cúmulo. En este ejemplo, el mejor ajuste de la distribución observada (particularmente en la región del punto de desvío de la secuencia principal) ocurre entre las isócronas de 13 y 14 mil millones de años. El valor actualmente aceptado para 47 *Tucanae* es de $(13.5 \pm 1.5) \times 10^9$ años.



EDADES RELATIVAS DE LOS CÚMULOS GLOBULARES

Hemos comentado la importancia que tiene, desde el punto de vista cosmológico, la determinación de las edades de los CGs. Si bien la determinación de *edades absolutas* de estos objetos está sujeta a errores relativamente grandes del orden del 15% o incluso 20%, lo que constituye una limitación comparativamente grande desde el punto de vista

cosmológico, esto no ocurre con las *edades relativas* de los CGs, ya que las mismas se determinan con errores típicamente menores que el 5%. El conocimiento de las *edades relativas* de los CGs resulta fundamental para comprender cómo se formó y evolucionó nuestra *Vía Láctea*.

Como Uds. podrán imaginar, existen varios métodos teóricos y empíricos ciertamente muy interesantes para determinar *edades relativas* de CGs. Uno de ellos en particular, conocido como el método de las *diferencias verticales en magnitud*, es muy preciso, ya que no depende ni de la distancia, ni de la *metalicidad*, ni del enrojecimiento del CG. Si bien no vamos a describir acá este método, podríamos preguntarnos qué resultados se obtienen cuando se lo aplica a los CGs de nuestra galaxia ? ¿Es que acaso todos los CGs galácticos tienen exactamente la misma edad como se aceptó durante décadas ? O tal vez esto no sea así y los CGs tienen edades sólo aproximadamente similares, estando las diferencias dentro de los márgenes de error con que se determinan las edades ? O tal vez esto no sea así y las diferencias de edad son mayores ? Si este último fuera el caso, entonces existiría un cierto *rango de edad* entre los CGs. La pregunta entonces sería, cuán grande es ese *rango de edad* ?

Pues bien, como resultado de aplicar el método de las *diferencias verticales en magnitud* para determinar *edades* relativa de los CGs galácticos, se ha podido confirmar recientemente y en forma fehaciente que efectivamente existe un rango apreciable de edad de unos 4 o 5 mil millones de años entre los CGs de nuestra *Vía Láctea*. Es decir, entre los CGs más jóvenes y los más viejos puede haber una diferencia de edad semejante a la edad del Sol (entre 4 y 5 mil millones de años). Esto ocurre específicamente para los CGs del denominado “*halo exterior*”, es decir, aquéllos ubicados a distancias del centro galáctico mayores que unos 8.5 kpc (~ 28.000 años luz), no así en cambio para los CGs del “*halo interior*”. Estos últimos tienen todos aproximadamente la misma edad.

FORMACIÓN DE LA GALAXIA Y DE LOS CÚMULOS GLOBULARES

Sobre la base de este importante resultado (*rango de edad*) y otros conocidos de antemano que no hemos mencionado (problema del *segundo parámetro*, por ejemplo), es posible explicar, en líneas generales, cómo se habría formado nuestra Galaxia, nuestra *Vía Láctea* y, en particular, cómo se habrían formado los CGs.



Si bien el tema de la formación de la Galaxia está aún en discusión, existe actualmente cierto consenso general con respecto al proceso o mecanismo que habría dado lugar a la formación de nuestra Galaxia y, en particular, al sistema de CGs de la misma. No sólo la conocida estructura espiral, sino también la rotación e incluso el contenido metálico de nuestra Galaxia, sugieren que la misma se habría formado hace varios miles de millones de



años (como mínimo hace unos 14 mil millones de años) a partir de una nube aproximadamente esférica de H y He, con un determinado momento angular, la cual comenzó a contraerse, a colapsar, por la influencia de su propia gravedad.

Si bien la Galaxia comenzó como una nube de gas aproximadamente esférica, muy poco después debe haberse iniciado el colapso hacia el *halo* primero y hacia un *disco rotante* después, componentes estas que discriminamos muy bien en la actualidad. Esto es así simplemente porque una nube de gas aproximadamente esférica y de baja densidad que rota uniformemente alrededor de un eje no puede mantener su forma esférica. Una estrella puede lograrlo debido a que en ella existe *equilibrio hidrostático*, es decir, en ella se compensa la presión interna de los gases con el peso del gas, pero en una nube de gas de baja densidad, esta presión gaseosa no es lo suficientemente efectiva.

Si la nube de gas aproximadamente esférica necesariamente colapsó, podríamos entonces preguntarnos:



Durante mucho tiempo prevaleció la idea, propuesta originalmente por tres grandes astrónomos (*Eggen, Lynden-Bell & Sandage 1962*), de que el colapso del halo fue un colapso monolítico “en caída libre” (no soportado

por la presión de los gases) y más o menos rápido; es decir, producido en una escala de tiempo del orden de los 100 millones de años. De haber sido así todos CGs deberían tener aproximadamente la misma *edad* y, efectivamente, eso es lo que medimos para todos los CGs del denominado “*halo interior*”. Este y otros resultados son compatibles con la idea de *Eggen, Lynden-Bell y Sandage*, de allí que actualmente se acepte que el “*halo interior*” de nuestra Galaxia se formó como resultado de un colapso rápido, violento, en caída libre, tal como sugirieron estos tres grandes astrónomos.

Sin embargo, numerosas observaciones de los últimos años demuestran que el “*halo exterior*” tuvo una historia algo diferente. En efecto, tanto el rango apreciable de edad entre los CGs del halo exterior, como el denominado “*problema del segundo parámetro*” (*Sandage & Wildey 1967*) sobre el que no hemos hablado acá por razones de tiempo, sugieren que el “*halo exterior*” se habría formado a partir de un colapso lento, gradual, más o menos caótico o desorganizado, que ocurrió en una escala de tiempo mucho mayor de unos 1000, 2000 millones de años o aún más, tal como sugirieron 16 años después de *Eggen, Lynden-Bell y Sandage* otros dos grandes astrónomos norteamericanos (*Searle & Zinn 1978*).

Numerosas observaciones realizadas particularmente en el último lustro demuestran que durante este lento proceso de contracción que formó el “*halo exterior*”, la protonube galáctica original muy probablemente acreció, capturó o como dicen algunos más osados *canibalizó* algunos subsistemas independientes, tales como *galaxias enanas* o incluso también cúmulos abiertos y globulares. La bibliografía astronómica del último lustro está inundada de ejemplos que demuestran el mencionado efecto de *canibalismo* galáctico. No tenemos duda de que la conocida galaxia enana *Sagitario* está sufriendo un proceso de captura por parte de nuestra galaxia (*Ibata et al. 1994*). Algo semejante ocurre con la galaxia enana conocida como del *Can Mayor*, con 4 CGs de la galaxia enana *Sagitario* (*Da Costa & Armandroff 1995*) e incluso con 2 cúmulos abiertos (AM-2 y *Tombaugh 5*) de la galaxia del *Can Mayor* (*Bellazzini et al. 2004*). Sabemos además que el CG conocido como *Ruprecht 106*, en honor a su descubridor, ha sido capturado de nuestra galaxia vecina, la *Nube Mayor de Magallanes* (*Lin & Richer 1992*). Y como estos hay muchos otros ejemplos más.

Se piensa además que el lento proceso de contracción que dio lugar al “*halo exterior*” debe haber sido acompañado por un gradual aumento de la densidad de la protonube. Este incremento de la densidad habría favorecido a su vez la fragmentación en nubes individuales, las cuales habrían adquirido desde el comienzo velocidades al azar, en virtud del carácter más

o menos turbulento del gas que les dio origen. Probablemente, cuando la densidad aumentó lo suficiente, parte del gas se condensó para formar cúmulos de estrellas pobres en metales: los CGs. Puesto que para esta época la Galaxia era aproximadamente esférica, estos primeros CGs se habrían formado en una distribución esférica que hoy identificamos como el *halo galáctico*.

Seguramente muchos de estos CGs no tuvieron en el pasado la apariencia que tienen hoy. Muchos de ellos pueden quizás haber contenido pocas estrellas y, por ende, deben haberse disgregado o disociado después de su formación. Sólo un porcentaje de los cúmulos originalmente formados deben probablemente haber sobrevivido a los distintos mecanismos de ruptura (evaporación, efectos de mareas, fricción dinámica, etc).

Hablábamos hace unos instantes de un colapso hacia el disco. Es muy probable que dicho colapso no haya afectado las órbitas de las estrellas formadas cuando la Galaxia era esférica. Estas primeras estrellas, las estrellas del halo, tanto como los CGs observados, serían algo así como “*restos fósiles de la Galaxia primigenia*”, de allí el título que hemos elegido para esta conferencia. Las sucesivas generaciones de estrellas deben haberse formado en distribuciones cada vez más achatadas. En particular, las estrellas de la extrema población I (objetos de reciente formación) se encuentran confinadas en un disco de unos 200 años luz de espesor.

Por otra parte, creemos que el colapso hacia el disco debe haber compensado los movimientos del gas, de suerte que las sucesivas generaciones de estrellas deben haber ido adquiriendo velocidades cada vez más circulares, como efectivamente medimos. Finalmente y simultáneamente con estos cambios en la distribución espacial y en la cinemática de las estrellas, la *metalicidad* de las sucesivas generaciones de estrellas debe haber ido gradualmente aumentando, simplemente porque cada generación de estrellas debe haberse formado a partir de un medio previamente contaminado por explosiones de supernovas; es decir, por restos de estrellas de una o varias generaciones anteriores.

Este esquema muy simplificado que acabo de describir explicaría en líneas generales la formación de la Galaxia y de los CGs. Sin embargo, quedan algunos misterios o problemas no resueltos. Uno de ellos es, por ejemplo, porqué contienen metales los CGs ? Es decir, cómo es posible que los CGs -incluso los más viejos formados a partir de la materia galáctica primitiva, la cual incluía sólo H y He según la teoría- contengan metales en sus atmósferas, por pequeñas que sean estas cantidades ? ¿ De donde

proviene estos metales ? Nosotros creemos que dichos metales provienen de la *auto-contaminación* producida por la explosión de supernovas. Sin embargo, no son pocos los colegas que creen que dichos metales fueron producidos por una generación de estrellas masivas de contenido metálico nulo, formadas antes que la Galaxia. Estas estrellas de contenido metálico nulo, a las que podríamos llamar de *población III*, habrían generado metales por *nucleosíntesis* (no conocemos otra manera de generar metales) y al explotar como supernovas habrían contaminado el gas antes de que se formaran las primeras generaciones de estrellas (estrellas de *población II extrema*).

Lamentablemente, no se han observado aún estrellas de esta posible *población III*, con contenido metálico nulo, aunque los astrónomos no perdemos las esperanzas de que esto ocurra en cualquier momento. Reconocer estas estrellas sería relativamente fácil, ya que las mismas no deberían mostrar líneas metálicas de absorción en sus espectros. Aparentemente, si las estrellas de *población III* efectivamente existieron, debieron haber sido muy masivas, evolucionaron rápidamente y desaparecieron hace mucho tiempo. De haber existido estrellas de *población III* de baja masa, éstas deberían haber sobrevivido y deberíamos detectarlas hoy. Restaría entonces explicar porqué la primera generación de estrellas sólo incluyó objetos de elevada masa ? Como éste, quedarán siempre muchos problemas que exigirán alguna explicación por parte de los astrónomos. Felizmente esto es así, ya que estos continuos desafíos nos alientan, creo yo, a proseguir trabajando en esta y tantas otras apasionantes ramas de la Astrofísica moderna.

CÚMULOS GLOBULARES JÓVENES DE OTRAS GALAXIAS

Antes de concluir, debería en rigor aclarar que no todos los CGs son objetos antiquísimos o restos fósiles del Universo primitivo. Tenemos evidencias muy recientes proporcionadas por el *Telescopio Espacial* de que fuera de nuestra *Vía Láctea* se encuentran excepcionalmente CGs comparativamente muy jóvenes.

En la siguiente imagen vemos la galaxia peculiar NGC 7252, un típico ejemplo de fusión, colisión o simplemente *merger* de dos galaxias. Esta imagen fue obtenida con el telescopio de 4.0 m del Observatorio de *Kitt Peak* (Estados Unidos) y la misma exhibe un par de estructuras en forma de largas colas, las cuales evidencian los efectos de fuerzas tidales gravitacionales producto del *merger* o fusión de dos galaxias



¿ Qué vería el *Telescopio Espacial* si enfocáramos el mismo hacia el núcleo de esta galaxia peculiar ?

Como puede verse en la siguiente imagen, la extraordinaria resolución del *Telescopio Espacial* revela la presencia de un disco de gas y de estrellas con estructura “*miniespiral*” y de unos 20 CGs excepcionalmente brillantes. Noten Uds. cómo el núcleo de la galaxia peculiar parece de por sí una galaxia espiral vista de arriba, con su propio sistema de CGs. La rotación de esta “*miniespiral*” es contraria a la de la galaxia peculiar, lo que constituye otra clara indicación de que se trata efectivamente de un *merger*.



Espectros integrados de algunos de los CGs de NGC 7252 obtenidos recientemente con el telescopio *Keck* de 10 m de *Hawaii* (Estados Unidos) han mostrado que estos CGs son sorprendentemente muy jóvenes, ya que sus edades oscilan increíblemente entre unos 10 y a lo sumo 500 millones de años. Esto significa que son muchísimo más jóvenes que los CGs galácticos. Se piensa por supuesto que estos CGs se formaron como consecuencia de la colisión de dos galaxias (espirales), hecho éste que habría ocurrido hace como máximo unos 500 millones de años, muy poco tiempo desde el punto de vista cosmológico. Resulta, sin embargo, realmente gratificante haber podido constatar, usando CGs, el carácter de comparativamente muy reciente de un fenómeno tan espectacular como es el *choque* de dos galaxias en el espacio.

Esto es todo, por vuestra paciencia que ha sido mucha, muchísimas gracias. Quedo por supuesto con gusto a disposición de todos Uds. por si tienen alguna pregunta, algún comentario o quieren hacer alguna reflexión sobre los temas desarrollados.

Juan J. Clariá
 Observatorio Astronómico
 Universidad Nacional de Córdoba
 CONICET

REFERENCIAS

- Bellazzini, M., Fusi-Peccci, F., Ferraro, F.R. et al., 2001, *Astron. J.*, 122, 2586.
 Bellazzini, M., Ibata, R.A. et al., 2004, *MNRAS*, 364, 1263.
 Da Costa, G.G., Armandroff, T.E., 1995, *Astron. J.*, 109, 2533.
 Eggen, O.J., Lynden-Bell, D., Sandage, A., 1962, *Astrophys. J.*, 136, 748.
 Ibata, R.A., Gilmore, G., Irwin, M.J. et al., 1994, *Nature*, 370, 194.
 Lin, D.C.N., Richer, H.B., 1992, *Astrophys. J.*, 388, L57.
 Sandage, A., Wildey, R., 1967, *Astrophys. J.*, 150, 469.
 Searle, L., Zinn, R., 1978, *Astrophys. J.*, 225, 357.
 VandenBergh, D.A., Bell, R., 1985, *Astrophys. J. Suppl.*, 58, 561.