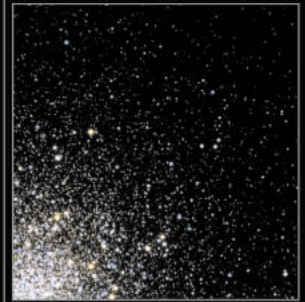


PROGRAMA DE EJERCICIOS DE ASTRONOMÍA

ESA/ESO

Ejercicios de astronomía para estudiantes basados en observaciones del Telescopio Espacial Hubble de la NASA y la ESA, y de los telescopios del ESO



Ejercicio 4



Medida de la distancia y la edad de un cúmulo globular de estrellas

Basada en las observaciones realizadas con el Telescopio VLT del ESO



Índice

Programa de Ejercicios de Astronomía de ESA/ESO 4

Prefacio

- Prefacio página 2

Introducción

- Las estrellas página 3
- La combustión del hidrógeno página 3
- Los cúmulos de estrellas página 3
- Los cúmulos globulares página 4
- El cúmulo globular M12 página 6
- El diagrama de Hertzsprung-Russell página 6
- La evolución estelar en el diagrama de Hertzsprung-Russell página 7
- El índice de color B-V página 8
- Para un cúmulo, el diagrama H-R es la clave página 8

Tareas

- Observaciones, reducción de datos y análisis .. página 9
- Pistas para analizar las imágenes página 9
- Tarea 1 Prácticas en la banda B página 9
- Tarea 2 Calibración en la banda B página 9
- Tarea 3 Magnitudes en la banda B página 9
- Tarea 4 Prácticas en la banda V página 9
- Tarea 5 Calibración en la banda V página 10
- Tarea 6 Magnitudes en la banda V página 10
- Tarea 7 Índice de color página 10
- Tarea 8 Temperatura superficial página 10
- Tarea 9 Diagrama H-R página 10
- Tarea 10 Ajuste de la Secuencia Principal página 10
- Tarea 11 Distancia a M12 página 10
- Tarea 12 Corrección de la extinción página 10
- Tarea 13 página 15
- Evolución de un cúmulo globular página 16
- Tarea 14 página 16
- Tarea 15 página 16
- Tarea 16 página 17

Tareas adicionales

- Tarea 17 página 18
- Tarea 18 página 18

Lectura adicional

- Artículos científicos página 19

Guía del profesor

- Guía del profesor página 21

Prefacio

Programa de Ejercicios de Astronomía de ESA/ESO 4

Medida de la distancia y la edad de un cúmulo globular de estrellas

La Astronomía es una ciencia visual y accesible, lo que la hace ideal para propósitos educativos. En los últimos años la NASA¹, la ESA², el Telescopio Espacial Hubble y los telescopios del ESO³ en los Observatorios de La Silla y Paranal en Chile han mostrado imágenes del Universo cada vez más profundas y espectaculares. Sin embargo, los telescopios del ESO y el Hubble no sólo han proporcionado nuevas imágenes sensacionales, sino que son también herramientas de incalculable valor para los astrónomos. Los telescopios tienen una resolución espacial/angular (nitidez de la imagen) excelente que permite a los astrónomos escudriñar el Universo a distancias mayores, nunca antes alcanzadas, y responder a preguntas sin resolver planteadas desde hace mucho tiempo.

El análisis de tales observaciones, aunque a menudo es muy sofisticado en cuanto a los detalles se refiere, es a veces suficientemente simple en principio como para dar a los estudiantes de secundaria la oportunidad de repetirlo ellos mismos.

Este programa de ejercicios ha sido producido por los socios europeos del proyecto Hubble, ESA (Agencia Espacial Europea), la cual tiene acceso al 15% del tiempo de observación del Hubble, junto con el ESO (Observatorio Europeo Austral).



Figura 1: El Telescopio VLT del ESO

El Telescopio VLT (acrónimo de su nombre inglés "Very Large Telescope", que significa Telescopio Muy Grande) del Observatorio de Paranal (Atacama, Chile) es el telescopio óptico más grande y más avanzado del mundo. Con su exquisita resolución óptica y el inigualable tamaño de su superficie, el VLT produce imágenes muy nítidas y puede registrar la luz procedente de los más débiles y remotos objetos del Universo.



Introducción

Las estrellas

Una estrella es una bola gigantesca de gas que tiene luz propia con propiedades físicas tales como la masa, la temperatura o el radio. También es de interés para los astrónomos la distancia de la estrella a la Tierra. La estrella más cercana— y por ende, más estudiada — es, por supuesto, nuestro propio Sol.

La combustión del hidrógeno

La luz emitida por la mayoría de las estrellas es un subproducto del proceso de fusión termonuclear que se produce en el núcleo interno de las estrellas. Una estrella normal como el Sol se compone de aproximadamente un 74% de hidrógeno y un 25% de helio, siendo el restante 1% una mezcla de elementos más pesados. El proceso de fusión más común en una estrella como el Sol es la “combustión del hidrógeno”, en la cual cuatro núcleos de hidrógeno se fusionan para formar un núcleo de helio. El proceso sucede en varias etapas, que se ilustran en la Fig. 2. En el primer paso del proceso, dos protones se fusionan para formar deuterio, una forma pesada del hidrógeno. Este es un suceso muy raro, incluso para el núcleo denso de la estrella, en donde la temperatura es de unos po-

cos millones de grados. Es por esto por lo que las estrellas como el Sol no explotan en una reacción violenta cuando comienza el proceso de fusión, sino que permanecen en esta fase estable de la vida de la estrella durante varios miles de millones de años. Mientras la estrella es estable, la temperatura de su superficie, su radio y su luminosidad son aproximadamente constantes. Las reacciones nucleares del núcleo de la estrella generan la energía justa para mantener un equilibrio entre la presión térmica ejercida hacia fuera y las fuerzas gravitatorias ejercidas hacia dentro.

La masa de un átomo de helio es sólo el 99.3% de la masa de los cuatro núcleos originales de hidrógeno. El proceso de fusión convierte el 0.7% residual de la masa en energía — mayoritariamente en forma de luz. La cantidad de energía se puede calcular usando la famosa ecuación de Einstein $E = Mc^2$. Ya que c^2 es un número muy grande, esta ecuación implica que incluso una pequeña cantidad de materia puede convertirse en una formidable cantidad de energía. El 0.7% residual de la masa de los cuatro núcleos de hidrógeno involucrados en una sola reacción puede parecer pequeño, pero cuando se considera el número total de reacciones de todo el proceso de fusión, hay implicada una masa total (y por tanto energía) considerable.

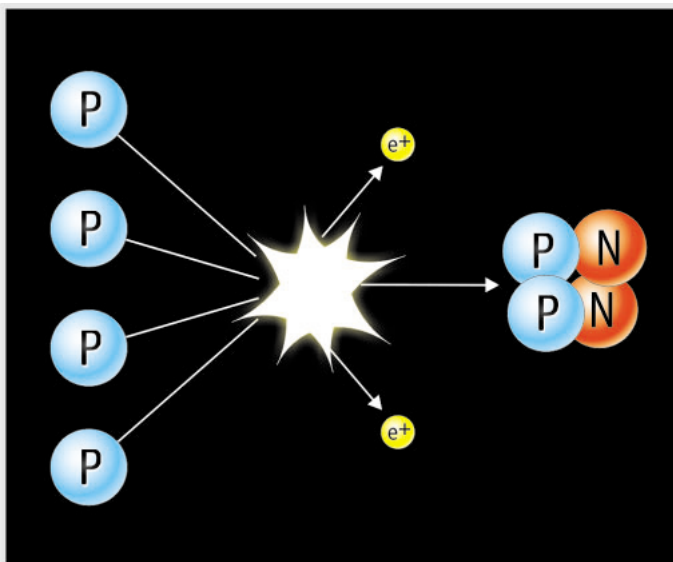


Figura 2: Combustión del Hidrógeno
La forma más simple de “producción” de energía en las estrellas tiene lugar por la fusión de cuatro núcleos de hidrógeno en un núcleo de helio. El proceso tiene varios pasos, pero aquí se muestra el resultado global.

Los cúmulos de estrellas

El término “cúmulo de estrellas” se usa para dos tipos diferentes de agrupaciones de estrellas: cúmulos abiertos de estrellas y cúmulos globulares de estrellas.

Los cúmulos abiertos de estrellas son colecciones no compactas de estrellas relativamente jóvenes que van desde un centenar hasta unas pocas miles de estrellas. Tienen una edad de unos pocos cientos de millones de años, una fracción pequeña del tiempo total de la vida de la estrella (unos pocos miles de millones de años). Estos cúmulos se encuentran en el disco de nuestra galaxia, la Vía Láctea, y a menudo contienen nubes de gas y polvo donde se forman nuevas estrellas. El diámetro típico de un cúmulo abierto de estrellas es de aproximadamente 30 años luz (10 parsecs).



Introducción



Figura 3: Las Pleyades (Messier 45) en la constelación de Tauro

Este es uno de los más famosos cúmulos de estrellas del cielo. Las Pleyades pueden verse a simple vista incluso desde la mayoría de las ciudades pese a la contaminación lumínica. Es uno de los más brillantes y más próximos cúmulos abiertos. El cúmulo de las Pleyades contiene más de 3000 estrellas, está a una distancia de unos 400 años luz y tiene un tamaño de sólo 13 años luz (cortesía de Bruno Stampfer y Rainer Eisendle).

Los cúmulos globulares — las estructuras más viejas de la Vía Láctea

En el halo y en el disco de nuestra Vía Láctea existen unos pocos cientos de cúmulos esféricos y compactos, llamados cúmulos globulares,

y que están ligados gravitatoriamente a nuestra galaxia.

Cada cúmulo globular se compone de un grupo esférico de hasta un millón de estrellas y tiene un diámetro típico de unos 100 años luz. La mayoría de los cúmulos globulares son muy vie-

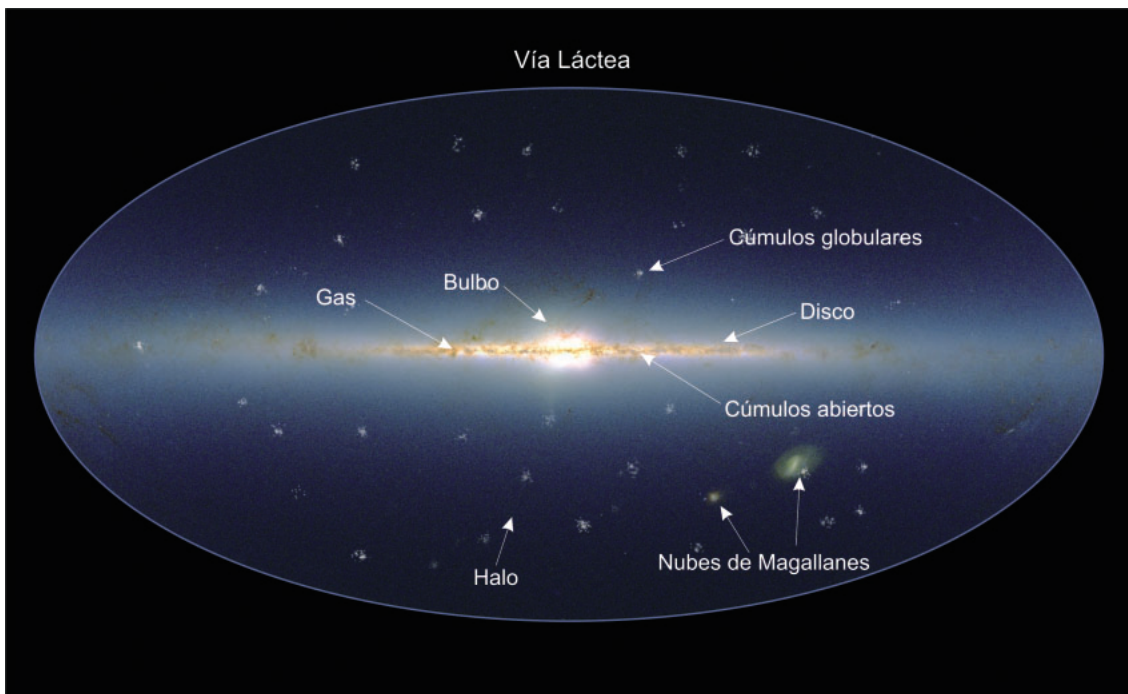


Figura 4: La Vía Láctea

Esta ilustración da una perspectiva general de la galaxia Vía Láctea. Se indican los diferentes componentes de este complicado sistema de estrellas, gas y polvo. El plano del disco se encuentra a lo largo de la línea central horizontal. Los cúmulos globulares se distribuyen en un halo esférico alrededor del centro de la galaxia. Se cree que esta distribución tiene que ver con el hecho de que estos cúmulos de estrellas se formaron muy pronto en la historia de la galaxia.



Introducción

jos y lo más probable es que sean anteriores a la formación de la propia galaxia que tuvo lugar hace aproximadamente 12 mil millones de años cuando la mayoría del material protogaláctico se depositó en el disco.

Muchos cúmulos globulares probablemente se han destruido con el paso de los miles de millones de años por las repetidas colisiones e interacciones entre sus estrellas y con la Vía Láctea. Los cúmulos globulares supervivientes son más viejos que cualquier otra estructura de nuestra Vía Láctea.

El estudio astrofísico de los cúmulos globulares es una parte importante del programa de investigación de la comunidad astronómica internacional. Estos cúmulos de estrellas son importantes, no sólo como un valioso banco de pruebas de valor para las teorías de estructura y evolución estelar, sino también porque se encuentran entre los pocos objetos de la galaxia para los cuales se puede determinar su edad de una forma relativamente precisa. Por ser tan longevos proporcionan un límite inferior muy

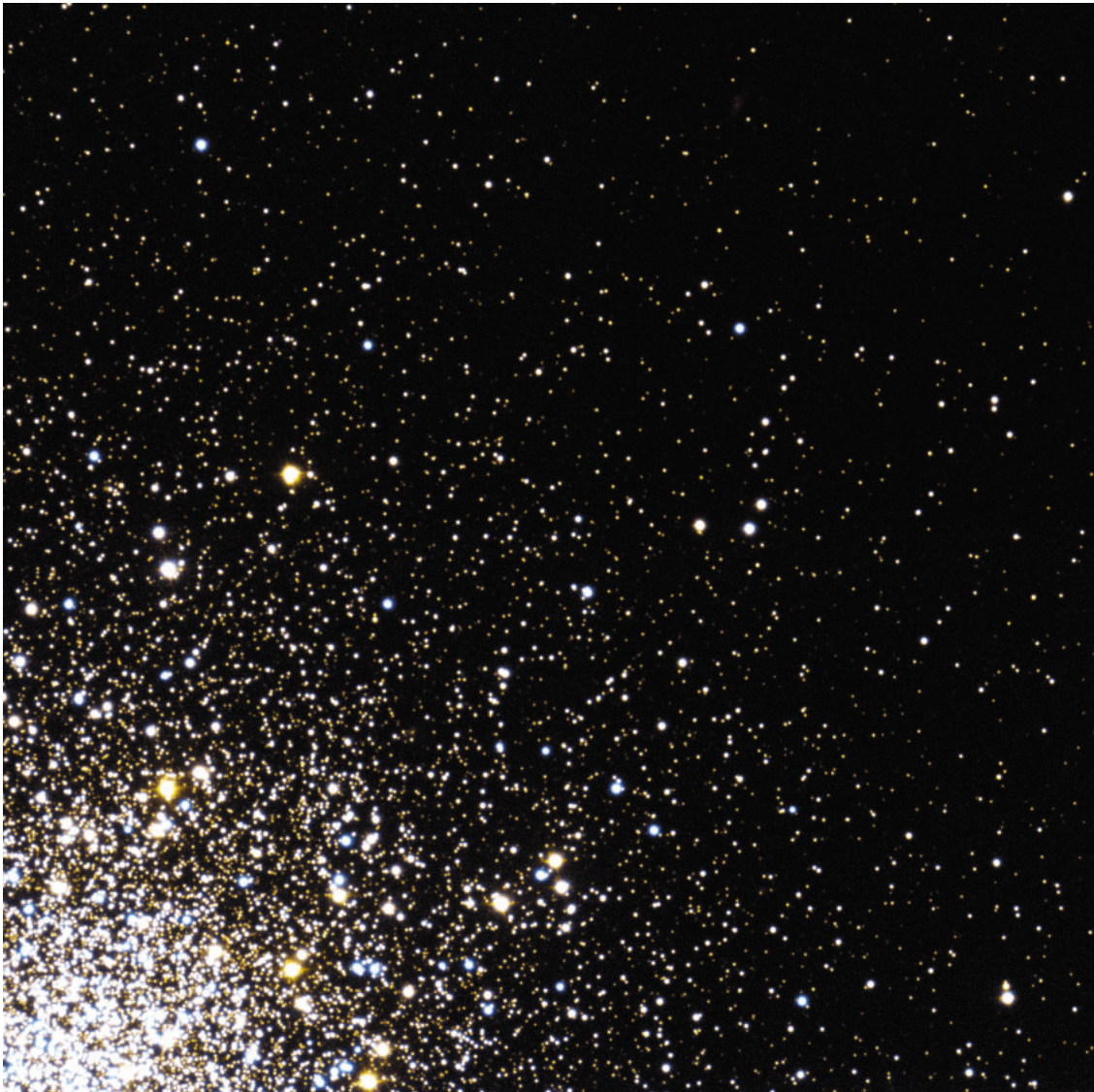


Figura 5: La región exterior del cúmulo globular M12

Esta imagen de dos colores se generó a partir de observaciones hechas a través del filtro azul (B) y del filtro verde (V) por el Telescopio VLT del ESO. La imagen B se muestra en azul y la imagen V en rojo en esta composición de imágenes. Algunas de las estrellas son claramente más brillante en la imagen B (vistas como estrellas azuladas), mientras que otras son más brillantes en la imagen V (vistas como estrellas amarillentas).



Introducción

útil a la edad del Universo. La distribución de sus edades y la correlación entre la edad de un cúmulo y la abundancia en él de los distintos elementos químicos hace de estos sistemas una prueba valiosa en los procesos de formación estelar.

Todas las estrellas que componen un cúmulo globular comparten una historia común y difieren entre sí sólo en sus masas. Por lo tanto, los cúmulos globulares son lugares ideales para estudiar la evolución de las estrellas. En los ejercicios siguientes, determinarás algunas de las propiedades de un cúmulo globular particular, el Messier 12.

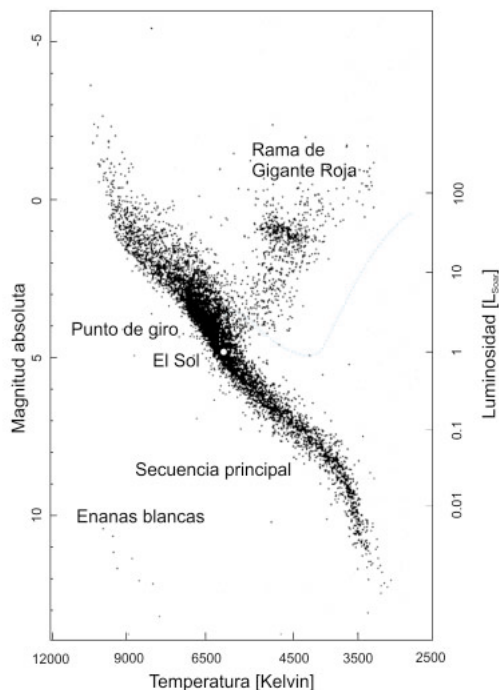


Figura 6: Un diagrama de Hertzsprung-Russell de estrellas próximas

El diagrama H-R muestra la relación entre temperatura superficial y luminosidad de las estrellas. Fíjate en la prominencia de la Secuencia Principal y las regiones donde dominan las gigantes rojas y las enanas blancas. Se indica la posición del Sol así como la "ruta" que una estrella de una masa solar seguirá durante las diferentes fases de su vida. La posición del Sol en el diagrama está determinada por su temperatura superficial de 5800 K y su magnitud absoluta de +4.8.

El cúmulo globular Messier 12

El cúmulo globular Messier 12 (o M12), también llamado NGC 6218, fue descubierto en 1764 por Charles Messier de forma que es el objeto decimosegundo de Messier. Como muchos otros cúmulos globulares, Messier lo describió como una "Nebulosa sin estrellas", una consecuencia del modesto poder de resolución de su telescopio. William Herschel fue el primero que resolvió los cúmulos en estrellas individuales en 1783.

M12 se encuentra en la constelación de Ofiuco y se puede ver con prismáticos desde lugares con muy baja polución lumínica. La magnitud visible del conjunto del cúmulo globular es 6.7 (ver más sobre magnitudes en la sección Herramientas Astronómicas, página 2) y la estrella más brillante del cúmulo tiene una magnitud visible de 12.

El NGC (Nuevo Catálogo General) fue publicado en 1888. En él aparece un listado de cúmulos globulares y cúmulos abiertos de estrellas. Nebulosas planetarias y difusas, remanentes de supernova, galaxias de todos los tipos e incluso algunos errores que no correspondían a ningún objeto.

Diagrama de Hertzsprung-Russell

Se llama diagrama de Hertzsprung-Russell (o de forma más concisa, diagrama H-R) a la gráfica que muestra la luminosidad L (o magnitud absoluta M) frente a la temperatura superficial T de las estrellas. La Fig. 6 muestra un ejemplo general que se ha construido a partir de observaciones de estrellas en la vecindad de los cúmulos donde se conocen las distancias (a partir de las medidas de HIPPARCOS). La temperatura superficial T de una estrella se puede derivar de los valores medidos de su color ($m_B - m_V$) (ver la sección Herramientas Astronómicas).

Se ve claramente del diagramas H-R que las medidas (L , T) para diferentes estrellas forman un curioso patrón cuando se colocan sobre el diagrama. Las estrellas se concentran en áreas específicas (indicadas en la figura). El diagrama H-R nos da la clave para comprender como las estrellas evolucionan en el tiempo. Las estrellas, dependiendo de sus masas, se moverán a través del diagrama a lo largo de caminos diferentes.



Introducción

La evolución estelar en el diagrama H-R

Las estrellas pasan la mayor parte de su vida en la Secuencia Principal, quemando el hidrógeno lentamente en un estado de equilibrio estable. Obviamente, esta es la razón por la que la mayoría de las estrellas se localizan en la Secuencia Principal, aproximadamente una línea recta desde el vértice superior izquierdo al vértice inferior derecho en el diagrama. Cuando el suministro de hidrógeno en el núcleo de la estrella se agota, la combustión del hidrógeno ya no es posible. Este es el final de la fase de la secuencia principal de la vida de la estrella y el equilibrio entre la presión del gas y la contracción gravitatoria en el núcleo estelar ya no es estable. La fusión del hidrógeno tiene lugar entonces en la capa circundante mientras el núcleo comienza a contraerse. Al contraerse el núcleo se elevan su presión y su temperatura central, de manera que los núcleos de helio del núcleo de la estrella comienzan a fusionarse y forman elementos más pesados. Este ciclo se puede repetir usando elementos cada vez más pesados a medida que los elementos más ligeros se van acabando en el núcleo. Durante esta fase la estrella aparece como una gigante roja. Tales estrellas se muestran en el diagrama H-R fuera de la línea de la secuencia principal, en la parte superior derecha. El aumento de la temperatura central hace que las capas externas de la estrella se expandan y enfríen de forma que la tempera-

tura superficial decae. El conjunto de la estrella llega a ser muy grande y, debido a la inferior temperatura superficial, emite hacia el espacio sobre todo radiación de longitudes de onda mayores, de forma que la estrella parece roja. A pesar de su baja temperatura superficial T , todas las gigantes rojas tienen una alta luminosidad L debido a su enorme radio R . Este resultado se deduce de la Ley de Radiación de Stefan-Boltzmann para la radiación del cuerpo negro:

$$L = \sigma 4\pi R^2 T^4$$

donde σ es la constante de Stefan-Boltzmann. Valores típicos para las gigantes rojas son $R \sim 10^2 R_{\text{solar}}$, $T \sim (3 \dots 4)10^3$ K, de forma que L es aproximadamente $10^3 L_{\text{solar}}$.

Cuando ya no pueden mantenerse los procesos avanzados de fusión en el núcleo estelar, el núcleo se colapsa de nuevo. Otra vez la temperatura del núcleo se incrementa y ahora se expulsan las capas externas de la estrella. Las llamadas nebulosas planetarias se forman a partir de los restos de las capas externas (ver Ejercicio 3 de esta serie de ejercicios de astronomía de ESA/ESO). El núcleo colapsado está muy caliente (blanco) y la estrella es muy pequeña. A estas estrellas se las denominan muy adecuadamente enanas blancas y es la fase final de la vida de una estrella normal de tipo solar

Para hacer una estimación aproximada de la relación entre la luminosidad L y la temperatura superficial T de todas las estrellas de la secuencia principal, veamos el diagrama H-R (Fig.6). La línea más o menos recta de la Secuencia Principal se extiende aproximadamente un orden de magnitud en temperatura: $(3 \times 10^3 \dots 3 \times 10^4)$ K. El rango de luminosidades se extiende aproximadamente seis órdenes de magnitud: $(10^{-2} \dots 10^4) L_{\text{solar}}$. Por tanto podemos estimar de forma aproximada: $L \propto T^6$ para las estrellas de la secuencia principal.

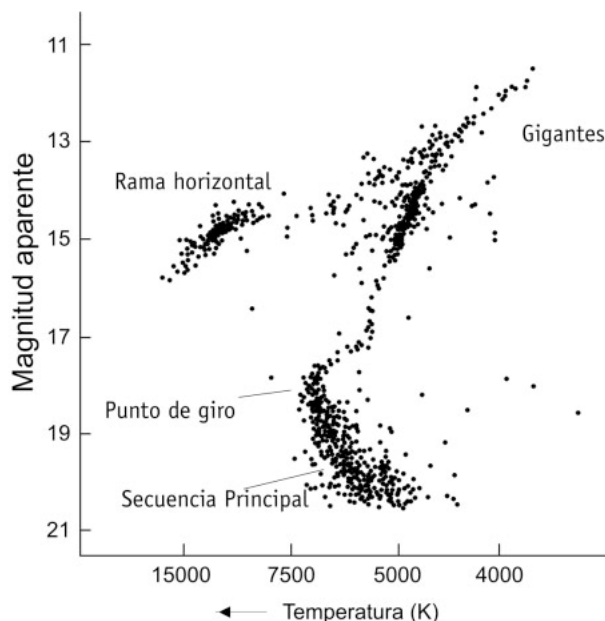


Figura 7: Diagrama típico de Hertzsprung-Russell de un cúmulo globular

Tras miles de millones de años de evolución, el diagrama H-R de un cúmulo globular muestra una Secuencia Principal (MS) corta en la parte inferior derecha. El área llamada rama de las gigantes rojas comienza a partir de la MS y se dirige hacia la parte superior derecha del diagrama. El punto de unión entre la rama MS y la Rama de Gigante Roja se denomina punto de giro.



Introducción

Para dar algunos ejemplos:

- Una estrella de gran masa de la secuencia principal con una temperatura superficial de aproximadamente $T_{\text{estrella}} = 1.0 \times 10^4$ K tiene una luminosidad de aproximadamente $L_{\text{estrella}} = (10/5.8)^6 \cdot L_{\text{solar}}$, o aproximadamente 26 veces la luminosidad del Sol. (La luminosidad del Sol tiene un valor estándar de 1 en la escala de luminosidad).
- Una estrella de baja masa con $T_{\text{estrella}} = 3.5 \times 10^3$ K tiene una luminosidad de aproximadamente sólo el 5% de la luminosidad del Sol.

El índice de color B-V: Una pista de la temperatura superficial

Toda la información que podemos extraer de las estrellas proviene de la radiación que recibimos de ellas. Como se explica en la sección Herramientas Astronómicas, diferentes filtros y sistemas de color se pueden usar para medir el brillo de una estrella. En este ejercicio usamos una imagen B y una imagen V. En tu análisis de estas imágenes encontrarás las magnitudes aparentes m_B y m_V de una muestra de estrellas en el cúmulo. Luego podrás calcular los valores m_B and m_V (el índice de color B-V). Finalmente podrás determinar la temperatura superficial de las estrellas (ver la sección Herramientas Astronómicas).

Para un cúmulo, la clave está en el diagrama H-R

Un cúmulo es un grupo de estrellas. La vida de un cúmulo está determinada por la vida de los diferentes tipos de estrellas que lo componen. Las observaciones han mostrado que en los cúmulos globulares queda muy poca cantidad de gas y polvo, de manera que es muy raro el nacimiento de nuevas estrellas en tales cúmulos. Las

estrellas que vemos en un cúmulo globular son todas "adultas" y han evolucionado de formas diferentes en función de sus masas.

La mayoría de las estrellas de baja masa se encuentran en la Secuencia Principal. Esto se debe a que las estrellas de baja masa van consumiendo su energía muy lentamente. Queman sus reservas de hidrógeno poco a poco y continuarán de este modo durante miles de millones de años. Por consiguiente, estarán en la Secuencia Principal durante mucho tiempo.

Por el contrario, las estrellas más pesadas del cúmulo ya han transformado el hidrógeno de sus núcleos y se han convertido en gigantes rojas. Todo esto sucedió hace mucho tiempo, así que hoy en día no hay estrellas calientes masivas, lo que deja un hueco en la mitad superior de la Secuencia Principal (ver Fig. 7). Estas estrellas se encuentran ahora en el área diagonal que comienza en la Secuencia Principal y se desplaza hacia la parte superior derecha del diagrama conocida como rama de las gigantes rojas.

El punto en el cual se encuentran la Secuencia Principal y la Rama de Gigante Roja se llama punto de giro, y nos da una pista importante a la hora de determinar la edad del cúmulo. En el siguiente ejercicio, medirás las coordenadas de este punto sobre tu diagrama y determinarás la edad de M12.



Tareas

Observaciones, reducción de datos y análisis

El cúmulo globular M12 fue observado el 18 de Junio de 1999 usando el instrumento FORS1 de ANTU (UT1) del VLT en el Observatorio de Paranal (Chile) del ESO. Para este ejercicio hemos elegido imágenes de las zonas externas del cúmulo en donde hay ligeramente menos estrellas. Las exposiciones fueron tomadas a través del filtro azul (banda B) y a través del filtro verde (banda V).

Observar y reducir los datos (proceso de eliminar de los datos factores instrumentales y de otro tipo) es un trabajo que requiere grandes telescopios y sofisticados programas informáticos. La parte realmente interesante para los astrónomos — el análisis de los datos — comienza tras este trabajo.

En este ejercicio los datos ya han sido recogidos y reducidos. Hemos simplificado el análisis un poco al seleccionar un conjunto de estrellas que puede considerarse representativo de la población de todo el cúmulo.

Pistas para analizar las imágenes

Para analizar las imágenes, las magnitudes en los filtros B y V de cada estrella tienen que medirse cuidadosamente. Los errores que puedan cometerse al principio del ejercicio afectarán más tarde a los resultados.

Las 45 estrellas se desdoblan en seis secciones:

1 Cinco estrellas, números del 1 al 5 — “estrellas de prácticas”

2 Cuatro estrellas, números del 6 al 9 — “estrellas de calibración”

3-6 Las estrellas restantes se desdoblan en cuatro grupos (A, B, C y D) para reducir el trabajo y darte suficiente tiempo para hacer medidas precisas.

Para que realices las medidas con tanta precisión como sea posible te sugerimos el siguiente procedimiento:

- Pon la plantilla graduada (ver las Figs. 8-9 de abajo) sobre la estrella y desplázalo hacia delan-

te y atrás. Encuentra dos valores consecutivos que sean uno demasiado grande y el otro demasiado pequeño. Mueve entonces la plantilla a medio camino entre estos valores y lee la medida. Repite esto unas cuantas veces y toma el valor medio.

- Diferentes personas de cada grupo deberán medir cada estrella al menos dos veces y se tomará el valor medio de estas medidas.
- Entre la medida de cada estrella repite las prácticas con la plantilla para asegurarte que tus medidas son consistentes de estrella a estrella.

Tarea 1 Prácticas en la banda B

Para las estrellas de prácticas (números del 1 al 5), las magnitudes se dan en la tabla (Fig. 10).

- ¿? Úsalas para practicar con el manejo del de la plantilla haciendo medidas sobre la imagen B (Fig. 8) y compáralas con la tabla. Asegúrate de obtener los mismos resultados.

Tarea 2 Calibración en la banda B

Cada grupo debe medir las estrellas de calibración (números del 6 al 9) de forma independiente. Las medidas pueden calibrarse entonces con los resultados de otros grupos.

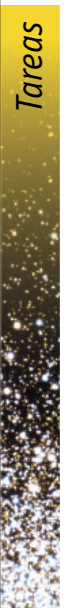
- ¿? Mide las estrellas de calibración en la imagen B (Fig. 8), añade estos números a la tabla y compara tus resultados con los de otros grupos. Si hay diferencias, echa un vistazo a esas estrellas y a las estrellas de prácticas otra vez.

Tarea 3 Magnitudes en la banda B

- ¿? Mide la magnitud con el filtro azul (m_B) de cada estrella etiquetada en el área para ti asignada (A, B, C o D) en la Fig. 8 y añade las medidas a la tabla.

Tarea 4 Prácticas en la banda V

- ¿? Practica haciendo medidas sobre la imagen V (Fig. 9) y compáralas con aquellas dadas en la tabla. Asegúrate de obtener los mismos resultados.





Tareas

Tarea 5 Calibración en la banda V

- ¿? Mide las estrellas de calibración en la imagen V (Fig. 9), rellena la tabla y compara tus resultados con los de otros grupos. Si hay diferencias, echa un vistazo a esas estrellas y a las estrellas de prácticas otra vez.

Tarea 6 Magnitudes de la banda V

- ¿? Usa la Fig. 9 para determinar la magnitud con el filtro verde (m_V) de cada estrella etiquetada en el área para ti asignada (A, B, C o D). Añade estos valores a la tabla.

Tarea 7 Índice de Color

- ¿? Calcula el valor de $m_B - m_V$ de cada estrella e incluye los resultados en la tabla.

Tarea 8 Temperatura superficial

- ¿? Usa el diagrama, Fig. 3 de la sección Herramientas Astronómicas, para convertir los valores $m_B - m_V$ en valores de temperatura superficial, T, de las estrellas e incluye los resultados en la tabla.

Tarea 9 Diagrama H-R

Se ha representado la secuencia principal del cúmulo Hyades como una referencia sobre el diagrama (Fig. 11). Nota que la magnitud absoluta en el filtro verde, M_V , se ha medido para las Hyades.

- ¿? Representa sobre el mismo diagrama las magnitudes aparentes medidas (m_V) frente a la temperatura superficial calculada (T) que corresponden a las estrellas de M12.

Tarea 10 Ajuste de la Secuencia Principal: Módulo de distancia

Para las estrellas de M12 conocemos ahora (m_V , T), y a partir de las medidas de referencia de Hyades sabemos (M_V , T) para una secuencia principal estándar. El módulo de distancia (ver sección Herramientas Astronómicas) de M12 es el desplazamiento en el eje vertical entre las dos secuencias principales que has representado.

- ¿? Calcula el módulo de distancia $m_V - M_V$ para M12.

Tarea 11 Distancia a M12

- ¿? Usa el módulo de distancia y la ecuación de distancia (ver la sección Herramientas Astronómicas) para determinar la distancia D a M12.

Tarea 12 Corrección de la extinción

La distancia que acabas de encontrar no es totalmente correcta, ya que nuestra Galaxia contiene mucho gas y polvo que debilita la luz de las estrellas en su recorrido hasta nosotros desde el interior o el exterior de la Galaxia. El polvo y el gas también colorean la luz de las estrellas enrojeciéndola debido a un proceso conocido como dispersión Rayleigh (que opera más eficientemente para luz de longitud de onda más corta, es decir, luz azulada). Estos dos procesos se conocen con el nombre de "extinción interestelar".

Nos gustaría que tú corrigieras la parte de la extinción que debilita la luz (haciendo demasiado grande la magnitud de las estrellas observadas y haciendo por tanto demasiado grande la distancia calculada)¹. El módulo de distancia corregido $m-M$ es:

$$m-M-A,$$

donde A es el factor de corrección de extinción. La ecuación de distancia cambia ligeramente debido a esto:

$$D=10^{(m-M-A+5)/5}$$

Para M12, A viene dado por Harris y colaboradores con un valor de 0.57 magnitudes (en la banda V, que es la que usamos para medir $m-M$).

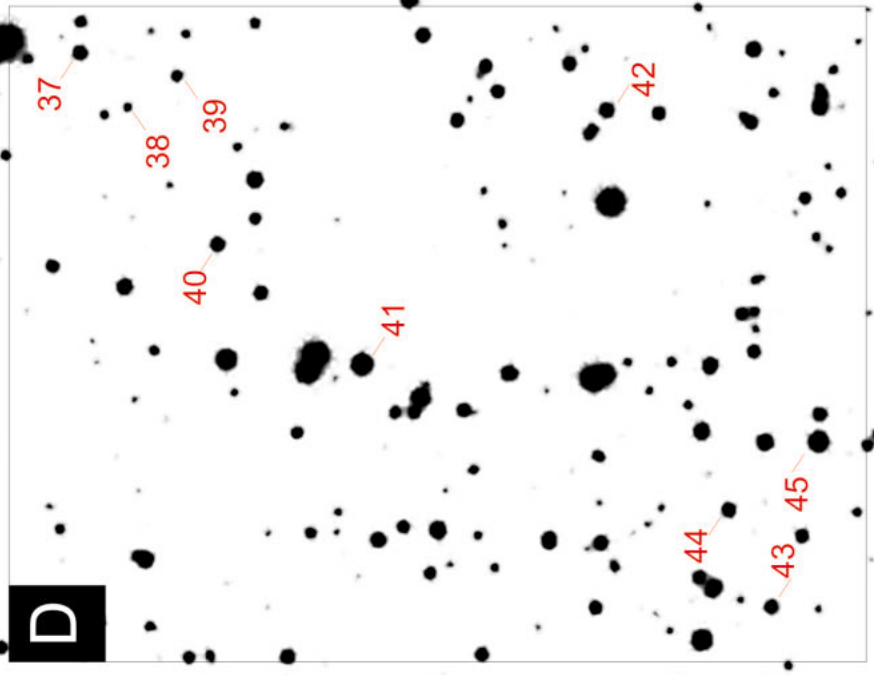
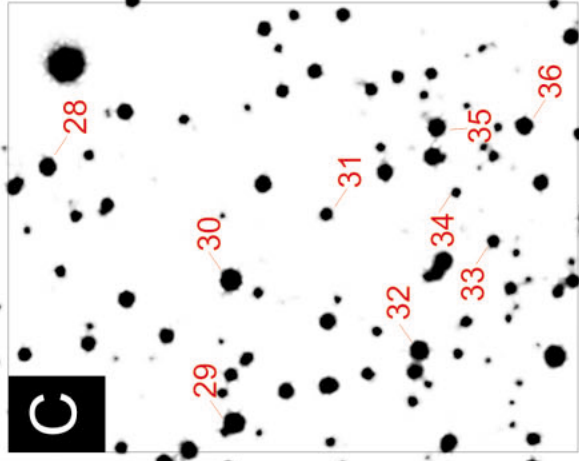
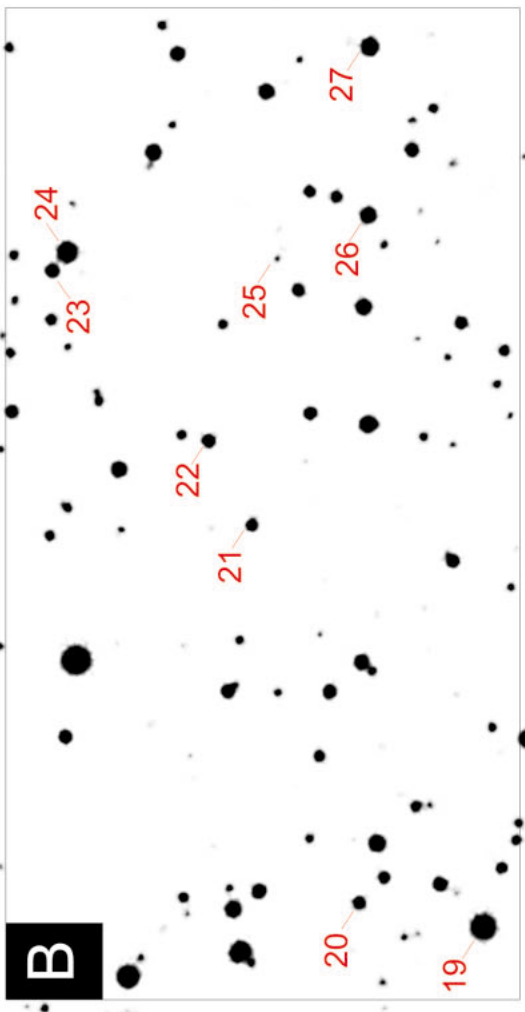
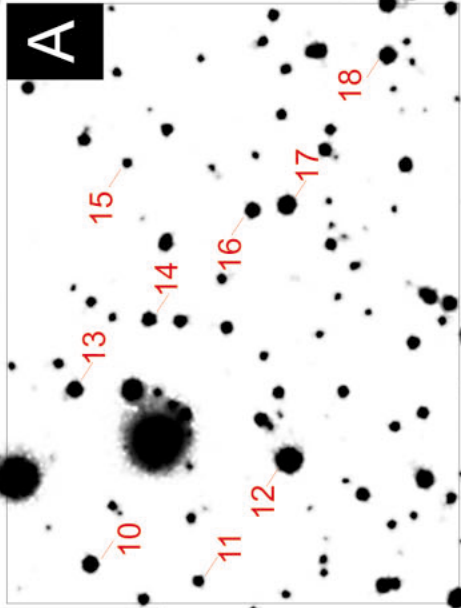
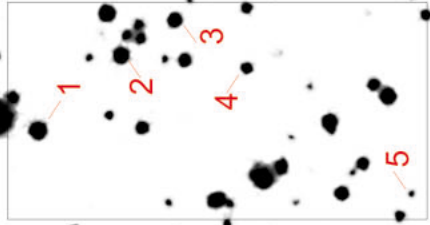
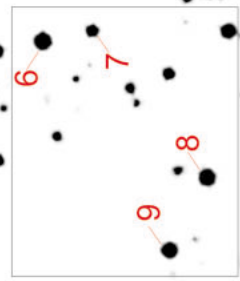
- ¿? Calcula la nueva distancia corregida por la extinción interestelar.

- ¿? ¿Es la distancia corregida muy diferente de la no corregida encontrada en la tarea 11?

- ¿? Comenta las diferencias e implicaciones de esta corrección (una de las muchas que los astrónomos usan continuamente) sobre nuestra comprensión general del tamaño del Universo.

¹Como mencionamos, esto es una simplificación ya que también hay una menor influencia de la extinción sobre el término B-V (o temperatura).

B



1-5 prácticas
 6-9 calibración
 10-18 parte A
 19-27 parte B
 28-36 parte C
 37-45 parte D

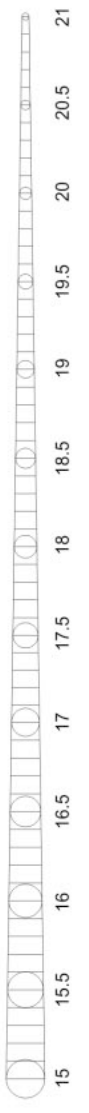
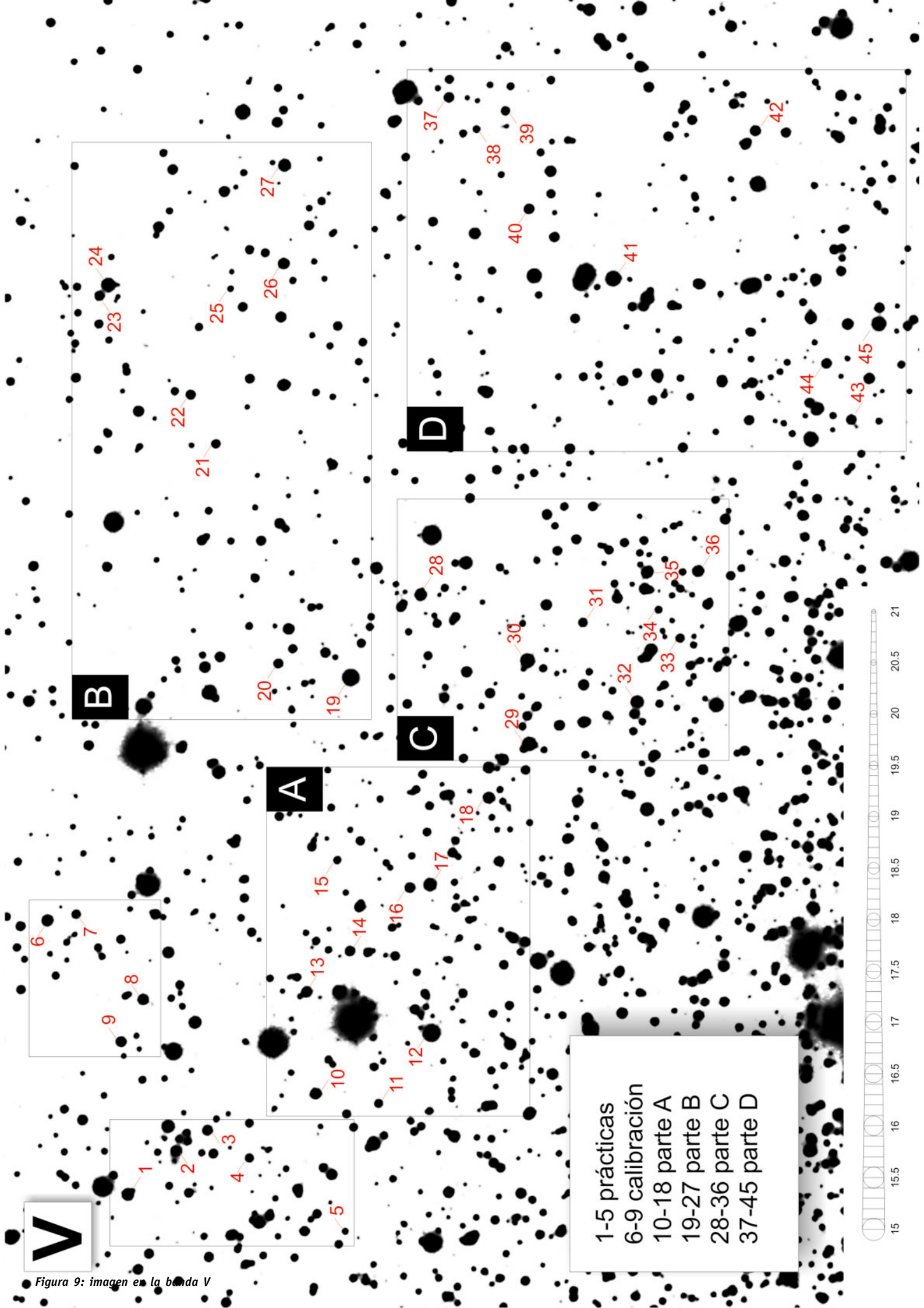


Figura 8: imagen en la banda B



V

Figura 9: imagen en la banda V

6
7
8
9

1
2
3
4
5

A

10 11 12 13 14 15 16 17 18

B

19 20 21 22 23 24 25 26 27

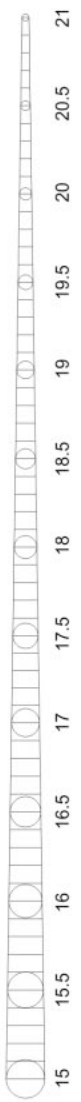
C

28 29 30 31 32 33 34 35 36

D

37 38 39 40 41 42 43 44 45

1-5 prácticas
6-9 calibración
10-18 parte A
19-27 parte B
28-36 parte C
37-45 parte D





Tareas

Figura 10: Tabla de valores

Estrella	Valores de los Científicos				Medidas/cálculos de ESA/ESO			
	B	V	B-V	T	B	V	B-V	T
1	18.82	17.98	0.84	5250	18.70	17.90	0.8	5403
2	19.02	18.31	0.71	5744	19.00	18.20	0.8	5403
3	19.32	18.65	0.67	5864	19.30	18.70	0.6	6122
4	19.96	19.25	0.71	5699	19.90	19.10	0.8	5403
5	21.05	20.21	0.84	5265	21.00	20.10	0.9	5076
6								
7								
8								
9								
10								
11								
12								
13								
14								
15								
16								
17								
18								
19								
20								
21								
22								
23								
24								
25								
26								
27								
28								
29								
30								
31								
32								
33								
34								
35								
36								
37								
38								
39								
40								
41								
42								
43								
44								
45								



Tareas

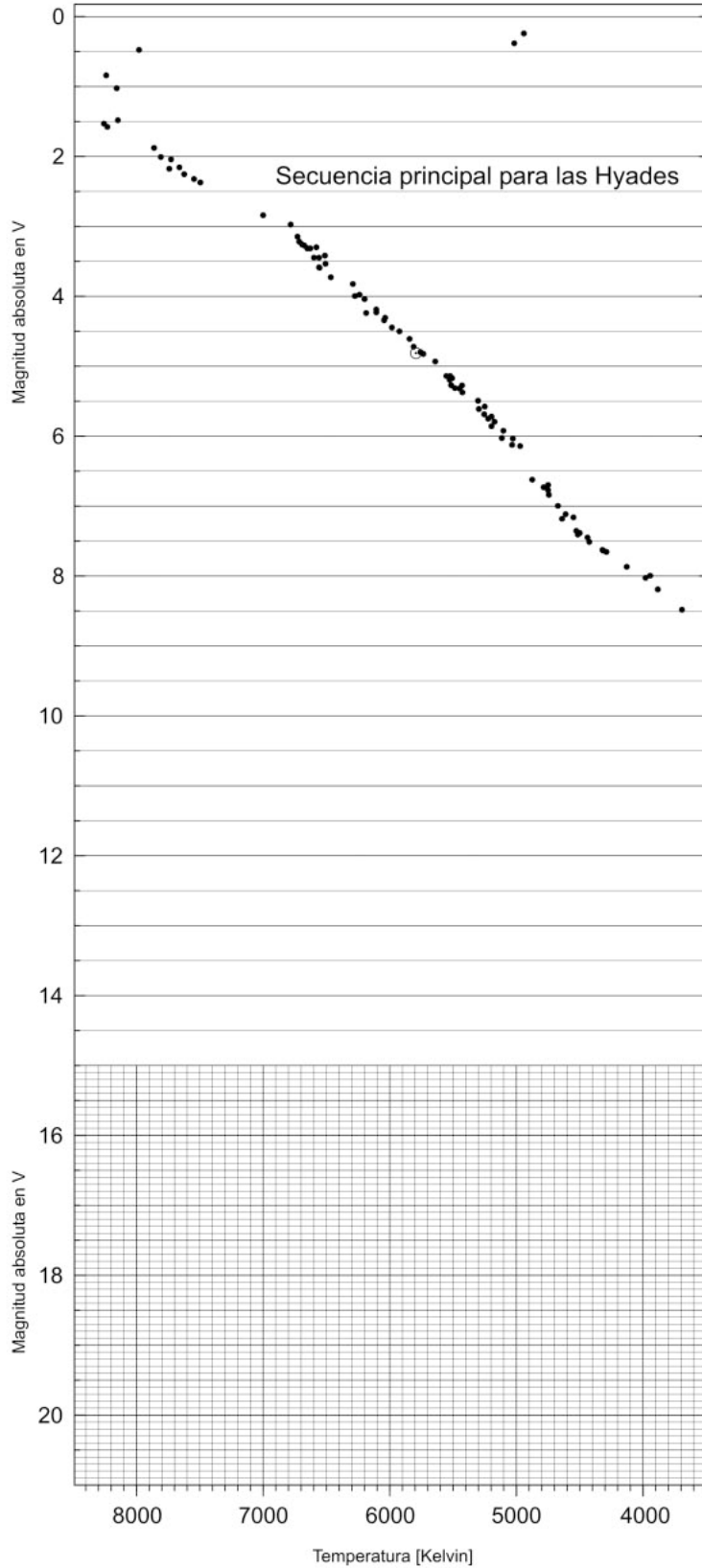
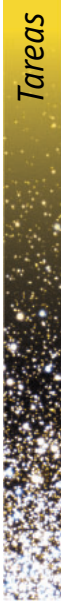


Figura 11: Representación gráfica

Aquí se representan los resultados de las medidas de las tareas 1-9. La Secuencia Principal calibrada para el cúmulo de las Hyades fue observado con el satélite HIPPARCOS de la ESA (de de Bruijne y colaboradores, 2001).



Tareas

Tarea 13

Los científicos han calculado con anterioridad una distancia al cúmulo de $D = 4900$ parsecs a partir de las versiones originales con una muestra mayor de datos. Si tu respuesta difiere en menos de un 20% de este valor, has realizado medidas muy precisas, cálculos concienzudos y ¡puedes estar muy orgulloso de tu trabajo!

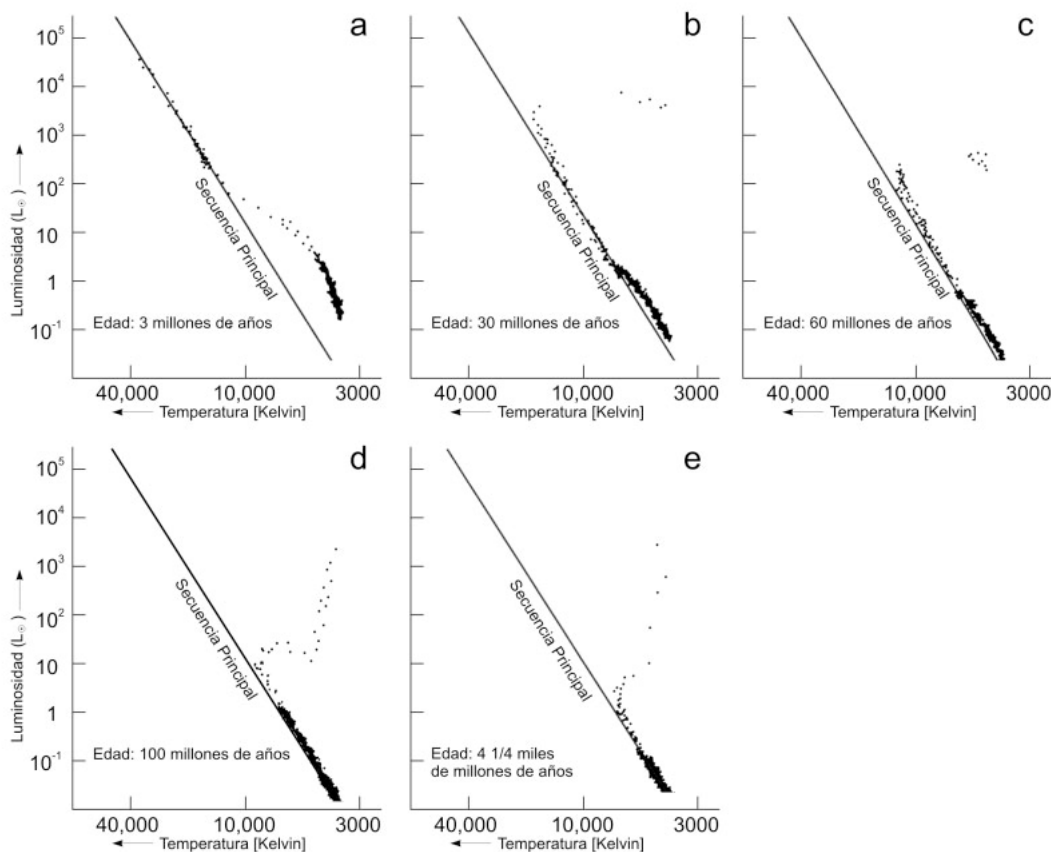


Figura 12: La evolución teórica de un cúmulo globular

Esta serie de diagramas H-R fue creada calculando cómo afectan las ecuaciones de evolución estelar al pasar el tiempo a una muestra de estrellas.

En 12a las estrellas más grandes y más luminosas se encuentran sobre la secuencia principal ($T > 10\,000\text{ K}$) y las estrellas más pequeñas están todavía comenzando el proceso de combustión del hidrógeno (bajas temperaturas, baja luminosidad).

En 12b las estrellas más grandes han consumido la mayor parte del combustible de hidrógeno de su núcleo y están quemando las reservas de las capas externas. Su luminosidad ha decrecido y se han vuelto más rojizas, se han alejado de la Secuencia Principal, ha comenzado a aparecer la rama de las gigantes rojas y el punto de giro es visible. No permanecen estrellas calientes ni luminosas en la parte superior de la Secuencia Principal.

En 12c-e la parte superior de la Secuencia Principal está casi desierta, mientras que la Rama de Gigante Roja está más densamente poblada. La parte inferior de la Secuencia Principal indica una gran población de estrellas de masa solar con temperaturas superficiales en el rango de 4000 a 8000 K. Estas estrellas permanecerán en esta fase durante miles de millones de años (adaptado de R. Kippenhahn).



Tareas

Si tu resultado tiene un gran error, puede deberse a varios factores. Algunos de ellos son:

- ¿Son tus medidas de las magnitudes suficientemente precisas?
- ¿Podrías pensar en otros métodos diferentes más sofisticados para reducir los datos y ajustarlos a la Secuencia Principal?
- Piensa otras formas de mejorar tus resultados.

Evolución de los cúmulos globulares

El aspecto de la Secuencia Principal es básicamente el mismo para todos los cúmulos globulares, sea cual sea su edad. El método de ajuste a la Secuencia Principal usado arriba podría también ser usado para otros cúmulos de diferentes edades para determinar de igual forma sus distancias.

Sin embargo, observaciones de los diagramas H-R de cúmulos diferentes muestran que la parte superior de la Secuencia Principal cambia de forma dependiendo de la edad del cúmulo (ver Fig. 12). En cúmulos más viejos, las estrellas más luminosas del cúmulo han evolucionado y se han desplazado a la rama de las gigantes rojas. El resultado es que la parte superior de la Secuencia Principal se hace más corta y la conexión entre la rama de la Secuencia Principal y la Rama de Gigante Roja (el punto de giro) se desplaza hacia abajo, de igual forma que una vela se consume con el tiempo.

Por consiguiente, podemos inferir que la posición del punto de giro es una clave importante en la determinación de la edad de los cúmulos.

Tarea 14 El punto de giro: de magnitudes a luminosidades

¿? Determina la magnitud aparente de una estrella en el punto de giro de M12. Calcula la luminosidad de esta estrella respecto a la luminosidad solar, usando la fórmula dada en la sección Herramientas Astronómicas.

El punto de giro: de luminosidad a masa

Una vez conocida la luminosidad, podemos determinar la masa de la estrella usando la relación "masa-luminosidad". Para estrellas en la Secuencia Principal hay una correlación observada entre masa y luminosidad, donde tanto luminosidad como masa se expresan con respecto a los valores solares.

($L_{\text{solar}} = 4 \times 10^{26} \text{ W}$, $M_{\text{solar}} = 2 \times 10^{30} \text{ kg}$):

$$L = M^{3.8}$$

Tarea 15

¿? Convierte la luminosidad derivada en la Tarea 14 en masa respecto a la masa solar.

El punto de giro: de masa a edad

El tiempo de vida t de la fase en la Secuencia Principal de una estrella depende de su luminosidad y de su masa.

- Una estrella con alta luminosidad quema más hidrógeno cada segundo que una estrella con luminosidad baja. Por tanto, la masa de una estrella con alta luminosidad disminuye más rápidamente que la masa de una estrella con baja luminosidad y cuanto menor sea la luminosidad mayor será el tiempo durante el cual la estrella puede quemar su combustible.
- Para dos estrellas con masas diferentes, la estrella más pesada tiene más material que quemar. Así, vemos que la vida de una estrella es directamente proporcional a su masa e inversamente proporcional a su luminosidad.

Usando la relación masa-luminosidad, encontramos el tiempo de vida como función de la masa: $t \propto M^{-2.8}$





Tareas adicionales



Figura 13: Imagen general de un cúmulo globular

Esta imagen muestra M12. Cada lado de la imagen corresponde a 0.25 grados (del Catálogo Digitalizado del Cielo).

Tarea 16

¿? Toma la masa derivada en la tarea 15 y estima la edad del cúmulo globular respecto a la edad estimada del Sol cuando deje la secuencia principal, 8.2×10^9 años.

En conclusión, el Universo en su conjunto debe ser más viejo que la edad encontrada en la tarea 16.

Determinación del diámetro

Para determinar el diámetro de M12, necesitamos saber el diámetro angular de M12. En la Fig. 13 hay muchas estrellas en el centro del cúmulo. Comenta qué estrellas pertenecen a la región externa del cúmulo.



Tareas adicionales

Tarea 17

- ¿? Mide el diámetro angular α del cúmulo M12 en centímetros y conviértelo a radianes (ver la sección Herramientas Matemáticas).
- ¿? A continuación calcula el diámetro d (ver la aproximación de ángulos pequeños de la sección Herramientas Matemáticas, página 8).

Para la distancia usa o bien el valor que has obtenido o el valor encontrado por los científicos de $D = 4900$ parsecs.

Determinación del número total de estrellas

Para estimar el número total de estrellas, N , en el cúmulo globular, necesitamos hacer algunas hipótesis:

1. El cúmulo se compone de una mezcla de todos los tipos de estrellas, pero supondremos que la estrella promedio es una estrella de tipo solar, es decir, la magnitud absoluta de una única estrella es aproximadamente la misma que la del Sol.
2. Supondremos que cada estrella contribuye con su luminosidad total a la luminosidad total global de todo el cúmulo. En realidad, el polvo u otras estrellas podrían ocultar algunas estrellas total o parcialmente.

Tarea 18

La magnitud absoluta de M12 es $M_{cl} = -7.32$

La luminosidad total del cúmulo en términos de la luminosidad del Sol se calcula a partir de

$$L_{cl}/L_{solar} = 2.512^{(M_{solar}-M_{cl})}$$

Recuerda que $M_{solar} = 4.8$.

Ya que $L_{cl} \approx N \cdot L_{solar}$ y usando la hipótesis 1, el valor de L_{cl}/L_{solar} es igual a N .

Sin embargo, como resultado de la hipótesis 2, deberemos esperar que el valor real de N sea un poco mayor que L_{cl}/L_{solar} .



Lectura adicional

Artículos científicos

- de Bruijne, J.H.J., Hoogerneerf, R., y de Zeeuw, P.T., 2001, A&A, 367, 111–147: *A Hipparcos study of the Hyades open cluster.*
- Cragin, M., Lucyk, J., Rappaport, B.: *The Deep Sky Field Guide to Uranometria 2000.0*, 1993-96, Willmann-Bell, Inc.
- Harris, W.E.: *Catalog of parameters for Milky Way Globular Clusters*, Revised: June 1999 (<http://physun.mcmaster.ca/~harris/mwgc.dat>)
- Rosenberg, A., Saviane, I., Piotto, G., Aparicio, A., 1999, AJ, 118, 2306–2320: *Galactic Globular Cluster Relative Ages*
- Chaboyer, B., Demarque, P., Sarajedini, A., 1996, ApJ, 459–558: *Globular Cluster Ages and the Formation of the Galactic Halo*

Para leer más acerca de extinción interestelar ir a:
<http://www.astro.virginia.edu/class/hawley/ast124/ism.html>
<http://tesla.phys.unm.edu/a111labs/cepheids/mags.html#Red>

Ver también los enlaces de:
<http://www.astroex.org/>





Colofón



Programa de Ejercicios de Astronomía de ESA/ESO Ejercicio 4: Medida de la distancia y la edad de un cúmulo globular de estrellas 2ª Edición (23.05.2002)

Producido por:

El Centro de Información de la Agencia Espacial Europea del Hubble y el Observatorio Europeo Austral.

<http://www.astroex.org/>

(Versiones pdf de este material y enlaces relacionados están disponibles en esta dirección web)

Dirección:

European Southern Observatory
Karl-Schwarzschild-Str. 2
D-85748 Garching bei München
Alemania

Teléfono: +49 89 3200 6306 (ó 3200 60)

Fax: +49 89 3200 64 80 (ó 320 32 62)

E-mail: info@astroex.org

Texto por:

Arntraud Bacher , Jean-Marc Brauer , Rainer Gaitzsch, y Lars Lindberg Christensen

Gráficas y diseño:

Martin Kornmesser

Traducción:

Álvaro Llorente

Revisión de la traducción:

Rosa María Ros y Francisco Barradas Solas

Coordinación:

Lars Lindberg Christensen y Richard West

Damos la gracias a Jesper Sollerman la reducción de los datos originales, a Nina Troelsgaard Jensen, Frederiksberg Seminarium, por sus comentarios, y a Jos de Bruijne por compartir con nosotros sus magníficos datos de Hipparcos. Y también nos gustaría agradecer a muchas personas que han contribuido a mejorar la segunda versión de este ejercicio: Anne Vørnholt Olesen, Ole Hjort Rasmussen, Helle y Henrik Stub, Dinamarca; Johann Penzl, Alemania; Thibaut Plisson, Estados Unidos; Marina Rejkuba y Manuela Zoccali, ESO.



Guía del profesor

Resumen

Medimos las magnitudes con el filtro azul (m_b) y con el filtro verde (m_v) de estrellas seleccionadas en las regiones externas de un cúmulo globular que se muestra en las imágenes del VLT, convertimos los valores ($m_b - m_v$) en temperaturas estelares superficiales (T) y representamos los valores de m_v como una función de los valores de T en el diagrama de Hertzsprung-Russell. La Secuencia Principal del cúmulo, vista en la representación gráfica, se compara con la Secuencia Principal estándar calibrada para la distancia del cercano cúmulo de Hyades. La distancia al cúmulo se puede determinar por medio del ajuste de la Secuencia Principal y usando el módulo de distancia. La edad del cúmulo, que por cierto representa un límite inferior para la edad del Universo, se puede estimar a partir de la posición del punto de giro de la Secuencia Principal.

La guía del profesor contiene las soluciones a los problemas, con comentarios y discusiones de algunas aproximaciones y simplificaciones que se han realizado, y también consideraciones adicionales sobre el ciclo de vida de las estrellas. El objetivo es maximizar la utilidad del ejercicio y ayudar al profesor a preparar la planificación pedagógica.

Más sobre la vida de las estrellas

El tiempo de vida de una estrella es el intervalo de tiempo que dicha estrella pasa en la secuencia principal. Estimamos el tiempo de vida del Sol, y a continuación el tiempo de vida de una estrella respecto al tiempo de vida del Sol.

Una protoestrella se forma a partir de la materia interestelar. Típicamente esta materia interestelar se compone de un 74% de hidrógeno, un 25% de helio y un 1% de elementos más pesados. Cuando la temperatura interior de una protoestrella alcanza unos pocos millones de K, puede comenzar la combustión del hidrógeno y convertirse así en una estrella de la secuencia principal.

Cuatro átomos de hidrógeno se fusionan en un átomo de helio. Ya que la masa de un átomo de helio es sólo un 99.3% de la masa total de los cuatro átomos de hidrógeno, la masa residual (el 0.7%) se convierte en energía.

Por cada kg de materia estelar, 0.007 kg se convertirán en energía. De la ley de Einstein ($E=Mc^2$), calculamos la conversión de energía en 6.3×10^{14} J/kg. (c es la velocidad de la luz, 3×10^8 m/s).

La luminosidad del Sol es $L_{\text{solar}} = 3.85 \times 10^{26}$ W ($W = \text{J/s}$). A partir de este resultado podemos calcular la masa de hidrógeno fusionado en cada segundo:

$$\Delta M = 3.85 \times 10^{26} / (6.3 \times 10^{14}) = 6.11 \times 10^{11} \text{ kg/s}$$

La estrella dejará la secuencia principal una vez que aproximadamente el 11% de la masa de hidrógeno se haya fusionado, cuando el núcleo de la estrella pasa a ser inestable.

Tomando para la masa total del Sol el valor $M_{\text{solar}} = 2.0 \times 10^{30}$ kg estimamos la masa aproximada de hidrógeno que se puede fusionar durante el tiempo de vida de la estrella en:

$$0.11 \times 0.74 \times 2 \times 10^{30} = 1.6 \times 10^{29} \text{ kg.}$$

Dividiendo esta masa entre la masa perdida por segundo, estimamos el tiempo de vida total del Sol en la secuencia principal en:

$$2.6 \times 10^{17} \text{ s} = 8.2 \times 10^9 \text{ años, } 1 \text{ año} = 365 \times 24 \times 60 \times 60 \text{ s} = 3.15 \times 10^7 \text{ s (o más de 8 mil millones de años).}$$

Observaciones del Sol muestran que tiene una edad aproximada de 4 mil millones de años, de forma que puede pasar otros 4 mil millones de años en la secuencia principal.

Sabiendo el tiempo de vida del Sol, podemos calcular el tiempo de vida de cualquier otra estrella en función del tiempo de vida del Sol.



Guía del professor

El tiempo de vida de cualquier estrella depende de la masa. Simplificaremos los argumentos complejos para obtener una fórmula simple pero adecuada:

El suministro de hidrógeno que abastece a una estrella es proporcional a su masa y t es inversamente proporcional a su luminosidad, así que: $t \propto M/L$

El ritmo a la cual una estrella gasta su energía aumenta rápidamente con su masa. El resultado experimental para las estrellas de la secuencia principal viene dado de forma aproximada por: $L = M^{3.8}$, que es la llamada relación masa-luminosidad. El exponente 3.8 es un compromiso. Se aplica aproximadamente al rango medio de masas estelares (0.5 ... 10) M_{solar} .

En conclusión, tenemos (aproximadamente): $t \propto M/L = M/M^{3.8} = M^{-2.8}$; vemos que las estrellas de gran masa evolucionan mucho más deprisa que nuestro Sol y las estrellas de baja masa mucho más despacio.

Algunos ejemplos:

Una estrella de gran masa de aproximadamente 10 masas solares, tendrá un tiempo de vida de aproximadamente sólo $t = 0.0016 t_{\text{solar}}$ o aproximadamente 13 millones de años.

Una estrella de baja masa de aproximadamente 0.6 masas solares tendrá un tiempo de vida de aproximadamente $t = 4.2 t_{\text{solar}}$ o 34 mil millones de años. Este valor es mucho mayor que la propia edad del Universo. Por lo tanto, ninguna estrella de baja masa en el Universo ha completado todavía su tiempo en la secuencia principal.

Selección de muestras de estrellas

El cúmulo globular M12 contiene unas 150,000 estrellas. La imagen usada en este ejercicio se obtuvo con FORS1 de ANTU (UT1 del VLT). Cubre únicamente una pequeña región en las zonas externas del cúmulo, elegida de forma que se evita las zonas más "abarrotaadas" del cúmulo en donde las estrellas parecen solaparse. Hemos seleccionado 45 estrellas que son representativas de la población del cúmulo. Este tamaño de la muestra implica que la carga de trabajo es razonable y que las medidas de los estudiantes serán comparables con los resultados científicos, los cuales se basaron en una muestra de estrellas mucho mayor. Se usó para las tareas adicionales una imagen de M12, tomada por el Catálogo Digitalizado del Cielo (o DSS, acrónimo de su nombre en inglés).

Análisis de la imagen

Sugerimos que cada grupo use una transparencia que tenga impreso un plantilla sobre ella. Hemos incluido el plantilla sobre cada imagen para hacer así posible la comprobación de que al copiarlas no se ha alterado la escala de la imagen y los estudiantes deberían comprobar primero que sus plantillas transparentes son del mismo tamaño que el de la imagen.

Sugerimos que el trabajo se divida entre grupos de estudiantes y hemos dividido la imagen en seis partes (prácticas, calibración, A, B, C y D). Se dan las magnitudes para las cinco estrellas de prácticas. Estas cinco estrellas se pueden usar para practicar usando el plantilla para obtener resultados precisos y reproducibles. Las cuatro estrellas de calibración pueden medirse por cada grupo y usarlas para calibrar las medidas entre grupos.

Para reducir los errores, sugerimos que cada estrella sea medida al menos dos veces por cada grupo y que los resultados se promedien.

Es muy importante practicar con el plantilla antes de comenzar las medidas reales. ¡Medir no es sólo poner el plantilla sobre la imagen! Por ejemplo, una estrella de magnitud 18.5 debería estar totalmente en el interior del círculo adecuado, pero el cielo circundante debería tocar justo el círculo. Los estudiantes deberían medir cada estrella de esta manera. Si las medidas son consistentemente demasiado altas o demasiado bajas, entonces se puede introducir una corrección sumando o restando una constante como corresponda.

La Fig. 3 de la sección de Herramientas Astronómicas se usa para convertir el índice de color B-V en temperatura. Se suministra un conjunto de tablas que pueden imprimirse, pero se recomienda el uso de un programa de una hoja de cálculo (Excel, por ejemplo) para simplificar los cálculos y mostrar el índice de color B-V.



Guía del profesor

Estrella	Valores de los científicos				Medidas/cálculos de ESA/ESO			
	B	V	B-V	T	B	V	B-V	T
1	18.82	17.98	0.84	5250	18.70	17.90	0.8	5403
2	19.02	18.31	0.71	5744	19.00	18.20	0.8	5403
3	19.32	18.65	0.67	5864	19.30	18.70	0.6	6122
4	19.96	19.25	0.71	5699	19.90	19.10	0.8	5403
5	21.05	20.21	0.84	5265	21.00	20.10	0.9	5076
6	18.94	18.12	0.82	5348	19.00	18.20	0.8	5403
7	19.80	19.10	0.70	5757	19.80	19.20	0.6	6122
8	19.06	18.34	0.72	5702	19.00	18.40	0.6	6122
9	19.20	18.53	0.67	5844	19.10	18.50	0.6	5122
10	18.99	18.25	0.74	5614	19.00	18.20	0.8	5403
11	20.07	19.34	0.73	5620	20.10	19.40	0.7	5751
12	17.32	16.37	0.95	4918	17.20	16.40	0.8	5403
13	19.18	18.52	0.66	5884	19.10	18.50	0.6	6122
14	19.53	18.83	0.70	5722	19.60	18.80	0.8	5403
15	20.33	19.60	0.73	5639	20.30	19.50	0.8	5403
16	19.31	18.62	0.69	5792	19.30	18.60	0.7	5751
17	18.57	17.69	0.88	5140	18.70	17.80	0.9	5076
18	18.95	18.15	0.80	5405	18.90	18.10	0.8	5403
19	17.48	16.56	0.92	5012	17.50	16.60	0.9	5076
20	19.66	18.96	0.70	5738	19.60	18.80	0.8	5403
21	19.77	19.08	0.69	5792	19.80	19.00	0.8	5403
22	19.52	18.84	0.68	5818	19.50	18.80	0.7	5751
23	19.50	18.79	0.71	5734	19.50	18.90	0.6	6122
24	18.23	17.34	0.89	5122	18.30	17.40	0.9	5076
25	21.08	20.26	0.82	5345	21.10	20.20	0.9	5076
26	19.04	18.28	0.76	5552	18.90	18.20	0.7	5751
27	18.76	17.89	0.87	5160	18.80	18.10	0.7	5751
28	18.88	18.05	0.83	5309	18.90	18.10	0.8	5403
29	18.27	17.40	0.87	5183	18.30	17.40	0.9	5076
30	18.14	17.28	0.86	5189	18.20	17.30	0.9	5076
31	19.84	19.14	0.70	5783	19.80	19.10	0.7	5751
32	18.62	17.76	0.86	5197	18.60	17.80	0.8	5403
33	19.92	19.22	0.70	5725	19.90	19.20	0.7	5751
34	20.53	19.75	0.78	5487	20.40	19.70	0.7	5751
35	18.82	17.99	0.83	5300	18.80	18.00	0.8	5403
36	18.95	18.19	0.76	5511	18.80	18.20	0.6	6122
37	19.33	18.65	0.68	5812	19.30	18.70	0.6	6122
38	20.53	19.76	0.77	5502	20.50	19.60	0.9	5076
39	19.92	19.21	0.71	5734	19.90	19.20	0.7	5751
40	19.29	18.62	0.67	5861	19.30	18.70	0.6	6122
41	17.91	17.00	0.91	5026	18.00	16.90	1.1	4479
42	19.19	18.50	0.69	5789	19.20	18.50	0.7	5751
43	19.42	18.74	0.68	5831	19.30	18.70	0.6	6122
44	19.36	18.69	0.67	5841	19.30	18.70	0.6	6122
45	18.12	17.24	0.88	5145	18.20	17.20	1.0	4768

Figura 1: Soluciones de las tareas 1 a 8

La tabla nos da el número de cada estrella y los valores de B, V, B-V y T encontrados por los científicos. También se indican nuestras propias medidas.



Guía del profesor

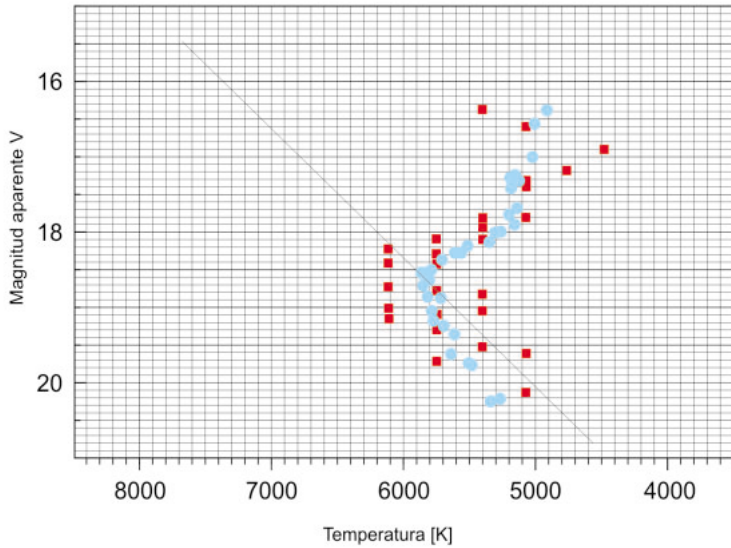


Figure 2: Diagrama de Hertzprung-Russell de M12
El diagrama muestra nuestras medidas (en rojo) así como los resultados obtenidos por los científicos (en azul).

Tarea 1-8

Se presentan en una tabla (ver Fig. 1) los valores de los científicos, así como nuestras propias medidas.

Tareas 9-13

La parte inferior del diagrama (Fig. 3) es bastante corta y los resultados son muy sensibles a la pendiente de la línea de ajuste dibujada entre los puntos que representan los datos. Para simplificar el proceso y evitar resultados incorrectos, hemos supuesto que el aspecto de la secuencia principal es a grosso modo el mismo para todas las estrellas del cúmulo, con independencia de sus edades, de forma que todas las secuencias principales son paralelas. Por lo tanto podemos usar la pendiente de la secuencia principal de referencia del cúmulo de Hyades como una guía.

El valor de D depende de la posición de la línea de la secuencia principal en el diagrama del cúmulo.

Harris da el valor $m_V - M_V = 14.02$ para M12. Nosotros medimos **13.9**.

Harris da el valor de $D_{cl} = 4.9$ kpc. Este valor se obtiene incluyendo la extinción interestelar entre nosotros y M12 (0.57 magnitudes) en la ecuación de la distancia para M12, de forma que $m - M = 5 \log D - 5 + 0.57$.

Hemos calculado $D = 10^{(m-M+5)/5} = 10^{3.78} = \mathbf{6.026 \text{ kpc}}$ sin corregir la extinción interestelar y $D = 10^{(m-M-0.57+5)/5} = 10^{3.666} = \mathbf{4.634 \text{ kpc}}$ con la corrección de la extinción interestelar.

Para los cálculos siguientes usamos la distancia con la corrección de la extinción, 4.634 kpc.

Tareas 14-16

En nuestras medidas, una estrella en el punto de giro tiene una magnitud aparente de 18.7. Los científicos han medido el punto de giro en un valor de 18.3 (Rosenberg y colaboradores).



Guía del profesor

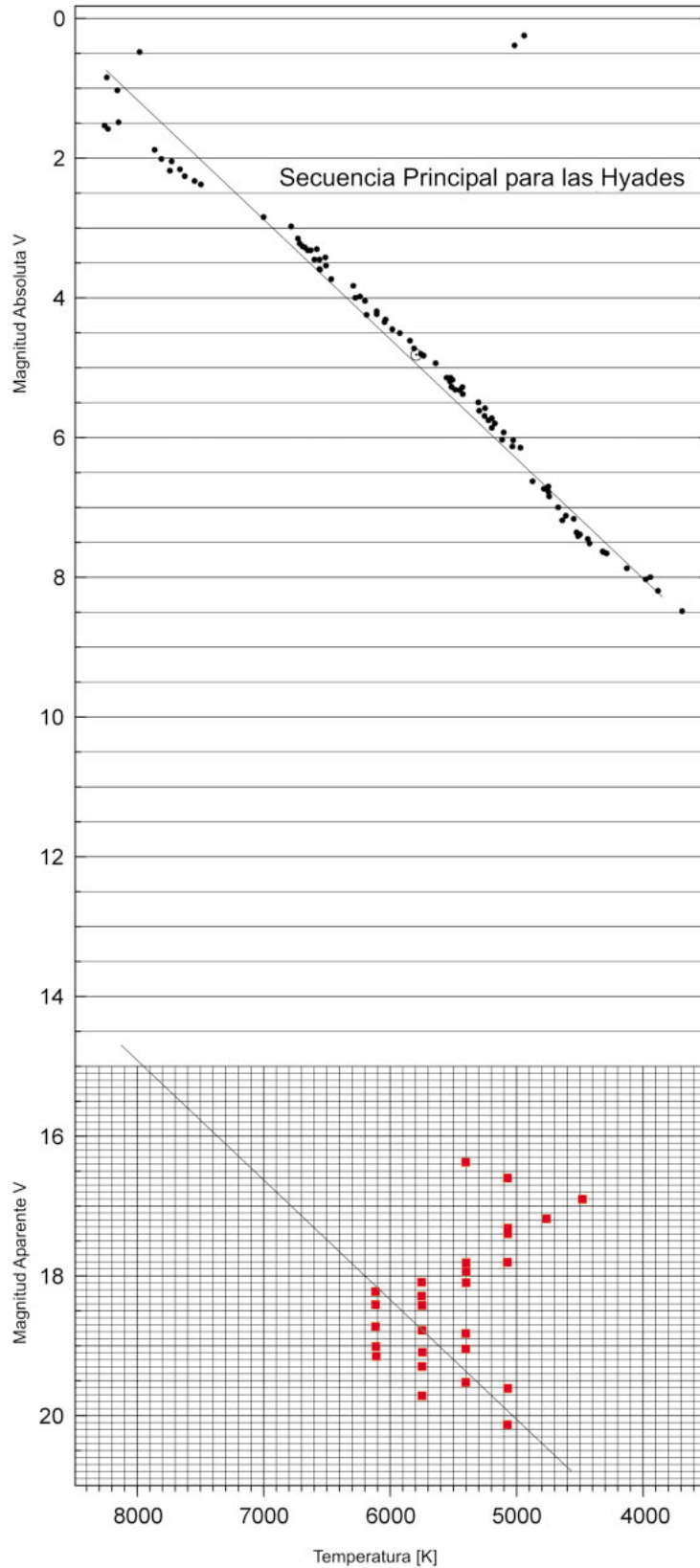


Figura 3: Diagrama de Hertzsprung-Russell de M12 y el cúmulo de Hyades

Este diagrama incluye el diagrama H-R para las Hyades (parte superior) así como el de M12, usando los valores de los autores. Las líneas representan la interpolación de las estrellas sobre la Secuencia Principal.





Guía del professor

Calculamos ahora

$$(L_{cl}/L_{solar}) = (D_{cl}/D_{solar})^2 \cdot (I_{cl}/I_{solar})$$

Cálculo de la razón (I_{cl}/I_{solar}) :

Como I_{solar} es mucho más grande que I_{cl} , la razón será un número muy pequeño, por lo que sugerimos calcular I_{solar}/I_{cl} y tomar entonces el inverso para posteriores cálculos.

$$(I_{solar}/I_{cl}) = 10^{(m_{cl} - m_{solar})/2.5} = 10^{(18.7 - (-26.5))/2.5} = 10^{18.08} = 1.202 \times 10^{18}$$

$$\text{así } (I_{cl}/I_{solar}) = 8.318 \times 10^{-19}$$

Más cálculos:

$$(D_{cl}/D_{solar}) = (4634 \times 3.086 \times 10^{13}) / 1.498 \times 10^8 = 9.559 \times 10^8$$

$$(L_{cl}/L_{solar}) = (D_{cl}/D_{solar})^2 \times (I_{cl}/I_{solar}) = (9.559 \times 10^8)^2 \times 8.318 \times 10^{-19} = \mathbf{0.76}$$

$$(M_{cl}/M_{solar}) = (L_{cl}/L_{solar})^{1/3.8} = \mathbf{0.93}$$

$$(t_{cl}/t_{solar}) = (M_{cl}/M_{solar})^{-2.8} = 1.224$$

$$t_{cl} = 1.224 \times t_{solar} = 1.224 \times 8.2 \times 10^9 = \mathbf{10 \times 10^9 \text{ years}}$$

Existe un método alternativo algo más simple para determinar la edad del cúmulo. Su origen es empírico (basado en medidas) y por lo tanto menos intuitivo. Se trata de aplicar la siguiente relación observada:

$$M_V(PG) = 2.70 \log_{10}(t) + 1.41,$$

donde $M_V(PG)$ es la magnitud absoluta del punto de giro y t la edad del cúmulo en miles de millones de años. Ya que

$$M_V(PG) = m_V(TO) - (m_V(TO) - M_V(TO)) = m_V(TO) - (m_V - M_V)$$

(el módulo de distancia es el mismo para todo el cúmulo), obtenemos:

$$m_V(PG) - (m_V - M_V) = 2.7 \log_{10}(t) + 1.41,$$

lo que se reduce a:

$$t = 10^{[(m_V(TO) - (m_V - M_V)) - 1.41] / 2.7}$$

Las edades resultantes al calcular diferentes conjuntos de magnitudes y distancias en el punto de giro usando el método originalmente propuesto y el método alternativo descrito arriba son:

Magnitud medida en el punto de giro [mV]	Distancia calculada [pc]	Edad, por el método 1 [miles de millones de años]	Edad, por el método 2 [miles de millones de años]
18.7	4634	10.0	18.0
18.85	4634	11.1	20.5
18.5	4634	8.8	15.2
18.3	4900	7.0	11.6
18.3	4634	7.7	12.8
18.3	4500	8.0	13.5
18.7	6026 (no extinc.)	6.8	18.0



Guía del professor

Los números en negrita son las mejores estimaciones de la literatura científica. Diferentes métodos para determinar la edad de los cúmulos globulares es descrito por Chaboyer y colaboradores, quienes encontraron edades en el rango comprendido entre **11.5×10^9 años** y **15.9×10^9 años** para M12.

Tareas adicionales

Tarea 17

	cm	grados	radianes
Imagen total	14.8	0.25	
Diámetro Angular, a	13.0	0.22	3.833×10^{-3}

$$d = D_{cl} \cdot a = 4634 \times 3.833 \times 10^{-3} = \mathbf{17.76 \text{ pc}}$$

El cúmulo termina cuando su densidad de estrellas alcanza la densidad del fondo de estrellas.

El valor del diámetro angular a, tiene un valor de $0.22 \times 60 = \mathbf{13.2 \text{ minutos de arco}}$. En el Atlas Ura-nometría 2000.0 se da un valor del diámetro angular de 14.5 minutos de arco.

Tarea 18

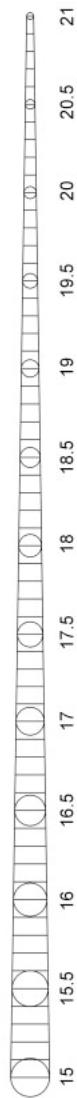
$$L_{cl}/L_{solar} = 2.512^{(M_{solar}-M_{cl})} = 2.512^{4.8-(-7.32)} \sim \mathbf{70500}$$

El número total de estrellas en M12 es aproximadamente de 150000 ± 35000 estrellas según Carl Grill-mair (Centro Científico SIRTf, comunicación privada, 2002).



Guía del professor

Figura 4:
Calibre de medida
Se necesita copiar este
calibre sobre una
transparencia para
usarlo en las medidas
de las tareas 1-6.



www.astroex.org

