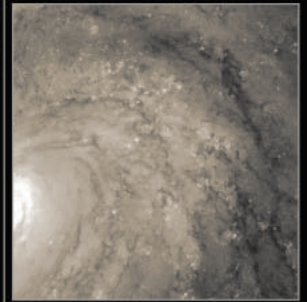


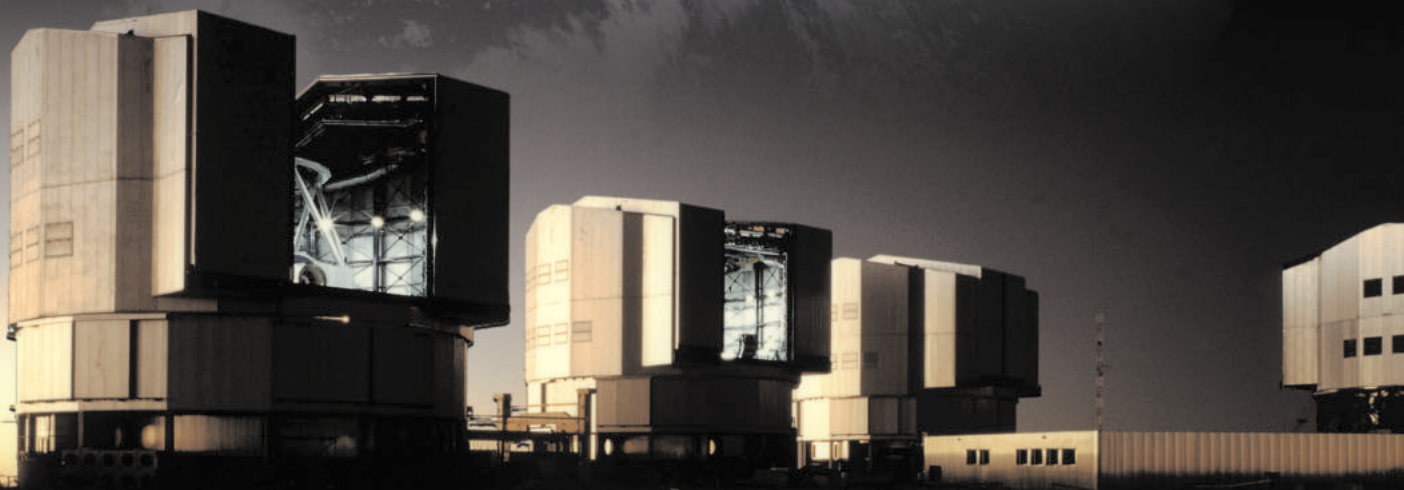
PROGRAMA DE EJERCICIOS DE ASTRONOMÍA

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 2



La Distancia a M100 determinada por las estrellas Variables Cefeidas
Basada en las observaciones realizadas con el Telescopio Espacial Hubble de la NASA y la ESA



Indice

Programa de Ejercicios de Astronomía de ESA/ESO 2

Prefacio

- Prefacio página 2

Introducción

- Cosmología y medidas de distancias página 3
- Uso de las Cefeidas como estimadores de distancias página 5
- M100, una gran espiral página 7

Tareas

- Medidas y cálculos página 8
- Tarea 1 página 8
- Tarea 2 página 9
- Tarea 3 página 10
- Tarea 4 página 10
- Tarea 5 página 10
- Tarea 6 página 11
- Tarea 7 página 11
- Tarea 8 página 11

Lectura adicional

- Artículos científicos página 12

Guía del profesor

- Guía del profesor página 14

Prefacio

Programa de Ejercicios de Astronomía de ESA/ESO 2

La Distancia a M100 determinada por las estrellas Variables Cefeidas

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 Espacial Hubble de la NASA y la ESA

El Telescopio Espacial Hubble de la NASA y la ESA ha mostrado espectaculares imágenes del Universo desde su órbita alrededor de la Tierra.



Introducción

Cosmología y medidas de distancias

¿Cuál es la edad del Universo? ¿A qué velocidad se está expandiendo? ¿Comenzará a contraerse algún día? Estas son preguntas fundamentales de la cosmología que llevan muchos años esperando respuestas satisfactorias.

El destino del Universo está íntimamente ligado al comportamiento/evolución futuro de su ritmo de expansión. Si la expansión se frena suficientemente, el Universo podrá un día comenzar a contraerse. Las observaciones actualmente su-

gieren que es más probable que el Universo continúe expandiéndose eternamente.

La expansión hace que todas las galaxias se alejen de un observador dado (por ejemplo, en la Tierra), y cuanto más lejos están, más deprisa se alejan. La expansión conocida como Ley de Hubble (formulada por Edwin Hubble en 1929) describe la relación entre la distancia a un objeto dado y su velocidad de recesión, v . La ley de Hubble es:

$$v = H_0 \cdot D$$

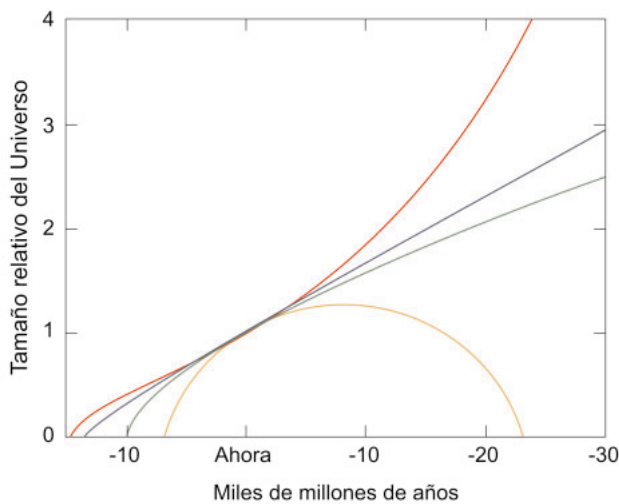


Figura 2: El destino del Universo

Esta gráfica relaciona el tamaño del Universo con el tiempo — en otras palabras muestra como se expande y/o contrae con el tiempo. Las diferentes líneas “del futuro” (hacia la derecha en el diagrama) muestran diferentes modelos para el destino del Universo — un Universo en eterna expansión o un Universo en contracción.

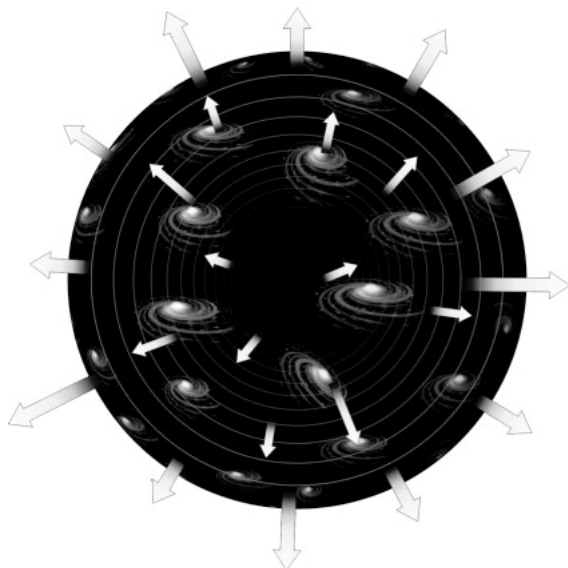


Figura 3: Galaxias en recesión

Este diagrama ilustra cómo las galaxias se alejan unas de otras debido a la expansión del Universo.



Introducción

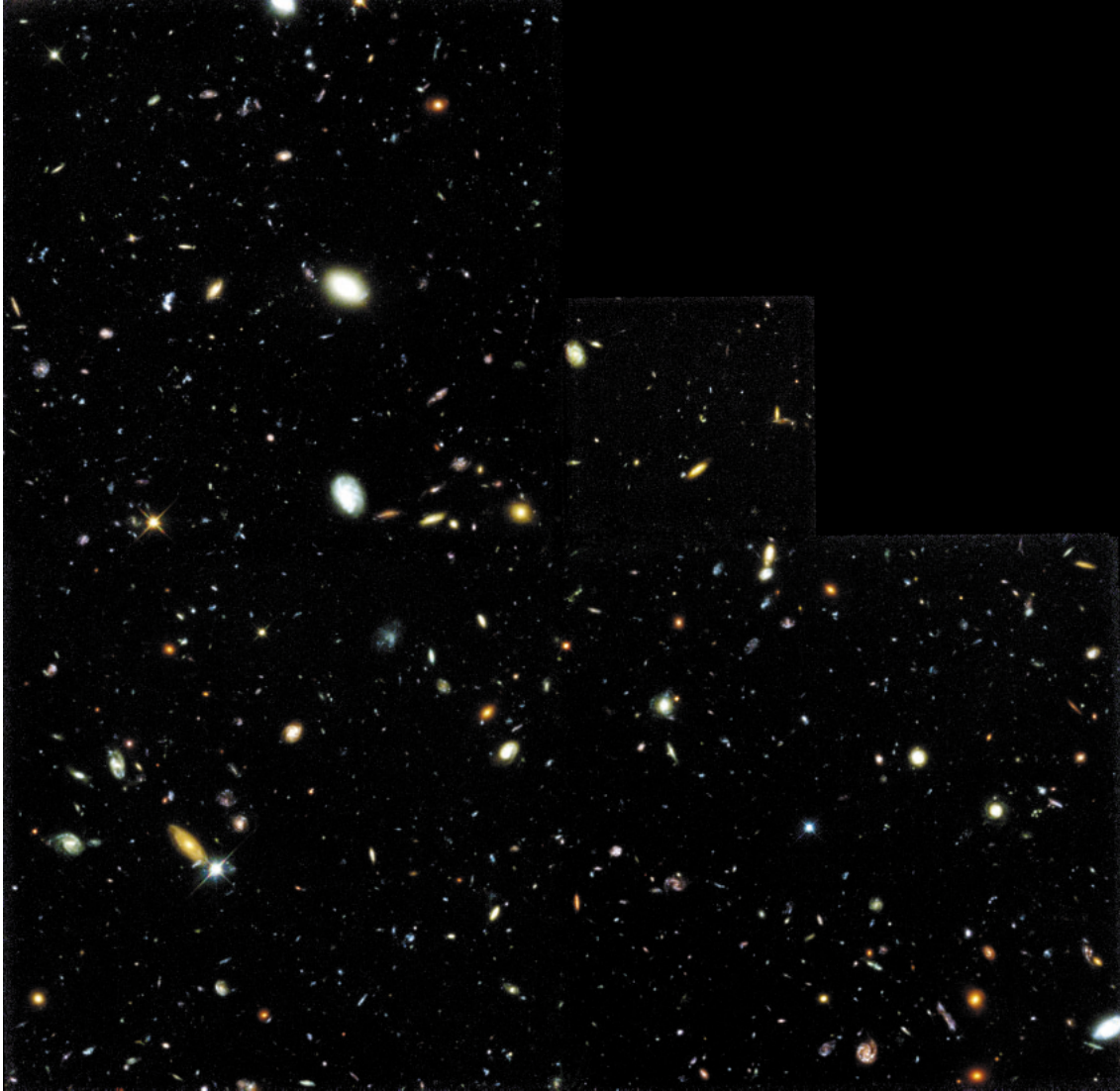


Figura 4: Galaxias remotas con gran desplazamiento al rojo

Esta imagen, tomada por la Cámara Planetaria de Campo Ancho (WFPC2) del Telescopio Espacial Hubble, muestra muchas galaxias, a miles de millones de años luz de nosotros. La mayor parte de los puntos borrosos son galaxias que contienen miles de millones de estrellas. Las galaxias de esta imagen se alejan de nosotros a altas velocidades.

Establece que las galaxias en nuestro Universo se alejan unas de otras con una velocidad v , proporcional a la distancia D entre ellas.

H_0 es una propiedad fundamental del Universo — la constante de Hubble — importante en muchas cuestiones cosmológicas y mide la velocidad con la que el Universo se expande hoy en día.

La edad del Universo, t , se puede aproximar por el inverso de la constante de Hubble H_0 .

$$t = 1/H_0$$

El valor de H_0 tiene enorme importancia a la hora de estimar la edad del Universo. Pero, ¿cómo medimos dicho valor? Para determinar H_0 “simplemente” necesitamos medir tanto la velocidad de recesión, v , como la distancia, D , de un objeto, normalmente una galaxia, o incluso mejor, muchas galaxias y encontrar el promedio de las medidas.



Introducción



Figura 5: Henrietta Leavitt

La comprensión del brillo relativo y la variabilidad de las estrellas cambió radicalmente con el trabajo de Henrietta Swan Leavitt (1868-1921). Trabajó en el Observatorio del Colegio de Harvard, y calibró las magnitudes fotográficas de 47 estrellas que usó como referencias

estándar o "candelas" para las magnitudes de las demás estrellas. Leavitt descubrió y catalogó más de 1500 estrellas variables en las proximidades de las Nubes de Magallanes. Gracias a este catálogo, descubrió que las estrellas variables Cefeidas más brillantes tardaban más tiempo en variar su brillo, un hecho que se usa hoy en día para calibrar la escala de distancias en nuestro Universo (Cortesía de AAVSO).

Es relativamente fácil determinar la *velocidad de recesión*: podemos medir el llamado desplazamiento al rojo de la luz procedente de una galaxia. El desplazamiento al rojo es una consecuencia directa del movimiento de un objeto al alejarse de nosotros. Es un desplazamiento Doppler de la luz procedente de galaxias individuales, lo que provoca un desplazamiento de la longitud de onda de la luz de las galaxias hacia la parte roja del espectro. Ya que la longitud de onda de la luz roja es mayor que la de la luz azul, la longitud de onda de la luz procedente de las galaxias ha aumentado durante su viaje hasta la Tierra. La razón del cambio en la longitud de onda debido al desplazamiento Doppler se llama redshift o desplazamiento al rojo, y las galaxias con un alto desplazamiento al rojo tienen una alta velocidad de recesión.

Uso de las Cefeidas como estimadoras de distancias

Medir la distancia a un objeto astronómico es mucho más difícil y es uno de los grandes retos a los que se enfrentan los astrónomos. Con el transcurso de los años, se han encontrado diferentes estimadores de distancias. Uno de ellos es una clase de estrellas conocidas como variables Cefeidas.

Las Cefeidas son un tipo de estrellas raras y muy luminosas y cuya luminosidad varía muy regularmente. Su nombre proviene de la estrella δ -Ce-

pei en la constelación de Cefeo, la cual fue el primer ejemplo conocido de este particular tipo de estrellas variables y es un objeto fácilmente visible a simple vista.

En 1912 la astrónomo Henrietta Leavitt (ver Fig. 5) observó 20 estrellas variables Cefeidas en la Pequeña Nube de Magallanes (SMC). Las pequeñas variaciones en la distancia a cada estrella variable Cefeida de la Nube son despreciables comparadas con la distancia mucho mayor a la SMC. Las estrellas más brillantes de este grupo son intrínsecamente más brillantes y no son sólo aparentemente más brillantes porque estén más cerca. Henrietta Leavitt descubrió una relación entre el brillo intrínseco y el periodo de pulsación de las estrellas variables Cefeidas, y mostró que Cefeidas intrínsecamente más

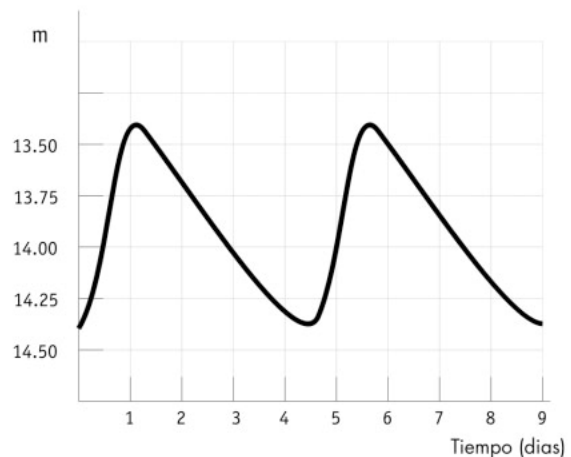


Figura 6: Curva de luz típica de las Cefeidas

La curva de luz de una estrella variable Cefeida tiene una forma característica, con un aumento abrupto en el brillo, al que sigue una atenuación mucho más suave. La amplitud de las variaciones es de típicamente 1-2 magnitudes.

brillantes tenían periodos de variación más largos. Observando el periodo de cualquier Cefeida, uno puede deducir su brillo intrínseco y así, observando su brillo aparente, calcular su distancia. De esta forma pueden usarse las estrellas variables Cefeidas como una de las "candelas estándar" del Universo, bien actuando como indicadores de distancia directamente, bien pudiendo ser usadas para calibrar (o seleccionar el punto cero de) otros indicadores de distancias. Las variables Cefeidas se pueden distinguir de otras estrellas variables por sus curvas de luz características (ver Fig. 6).



Introducción

Las medidas más precisas tanto de velocidad como de distancia se obtienen, como es normal, para objetos que están relativamente próximos a la Vía Láctea. Antes de que el Telescopio Espacial Hubble de la NASA y la ESA estuviera operativo, observaciones desde tierra habían detectado variables Cefeidas en galaxias distantes hasta 3.5 Megaparsecs (ver la definición de Megaparsecs en la sección de Herramientas Matemáticas) de nuestro Sol. Sin embargo, a estas pequeñas distancias interviene otro factor también sobre la velocidad. Las galaxias se atraen gravitatoriamente entre sí, y esto introduce una componente no uniforme en el movimiento que afecta nuestras medidas de

la componente uniforme de la velocidad debida a la expansión del Universo. Esta componente no uniforme de la velocidad se conoce como velocidad peculiar y su efecto es comparable al de la velocidad de expansión en nuestra vecindad local del Universo. Con el fin de estudiar la expansión global del Universo, se requieren medidas fidedignas de distancias a galaxias más lejanas donde la velocidad de expansión es significativamente mayor que las velocidades peculiares. El Hubble ha detectado variables Cefeidas en galaxias a distancias de hasta aproximadamente 20 Megaparsecs.



Figura 7: La galaxia espiral M100

Si pudiéramos observar de cara nuestra galaxia, la Vía Láctea, desde una nave espacial extragaláctica, su aspecto sería muy similar al de la Galaxia Espiral M100.

Las galaxias espirales son ricas en polvo y gas. El polvo se muestra en esta imagen como caminos oscuros que se extienden entre los brazos espirales.

M100 es un objetivo popular entre los astrónomos amateur y se encuentra en el cielo de primavera en la dirección de la constelación de Coma Berenices. Esta imagen fue tomada con la Cámara Planetaria de Campo Ancho 2 del Hubble. Los colores azulados corresponden a regiones con estrellas jóvenes calientes.



Introducción

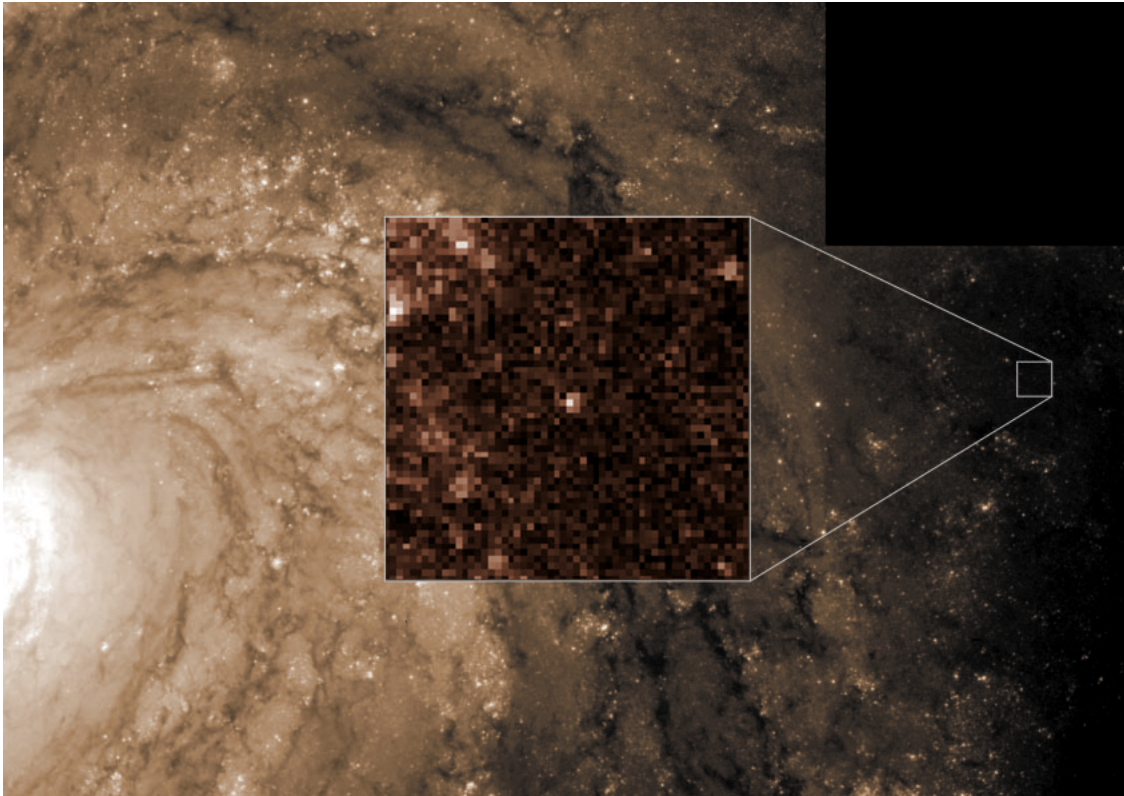


Figure 8: El Hubble encuentra estrellas variables Cefeidas en M100

La alta resolución de la cámara del Hubble detectó y distinguió una de las estrellas variables Cefeidas usadas en este ejercicio. La estrella se encuentra en una región de formación estelar en uno de los brazos espirales de la galaxia (la estrella está en el centro del recuadro).

Con anterioridad a estas observaciones del Hubble los astrónomos discutían si la edad del Universo era de 10 ó 20 mil millones de años. Ahora el acuerdo es en general mucho mejor — se cree que la edad del Universo es un valor comprendido entre 12 y 14 mil millones de años.

Uno de los Proyectos Clave del Hubble como objetivo a largo plazo era la obtención de un valor más preciso de la constante de Hubble y de la edad del Universo. Dieciocho galaxias situadas a diferentes distancias han sido monitorizadas a la búsqueda de alguna variable Cefeida. Una de estas galaxias es M100.

M100, una gran espiral

La galaxia M100 es una espléndida galaxia espiral en el gran cúmulo de galaxias de Virgo. El cúmulo de Virgo contiene 2500 galaxias. M100

es un sistema en rotación formado por gas, polvo y estrellas similar a la Vía Láctea, y se ve de cara. El nombre M100 proviene de hecho de que es el número 100 en el catálogo Messier de objetos no estelares.

M100 es una de las galaxias más distantes en donde se han realizado medidas precisas de variables Cefeidas. Este ejercicio se basa en las imágenes del Hubble y en datos procedentes de esta galaxia.



Tareas

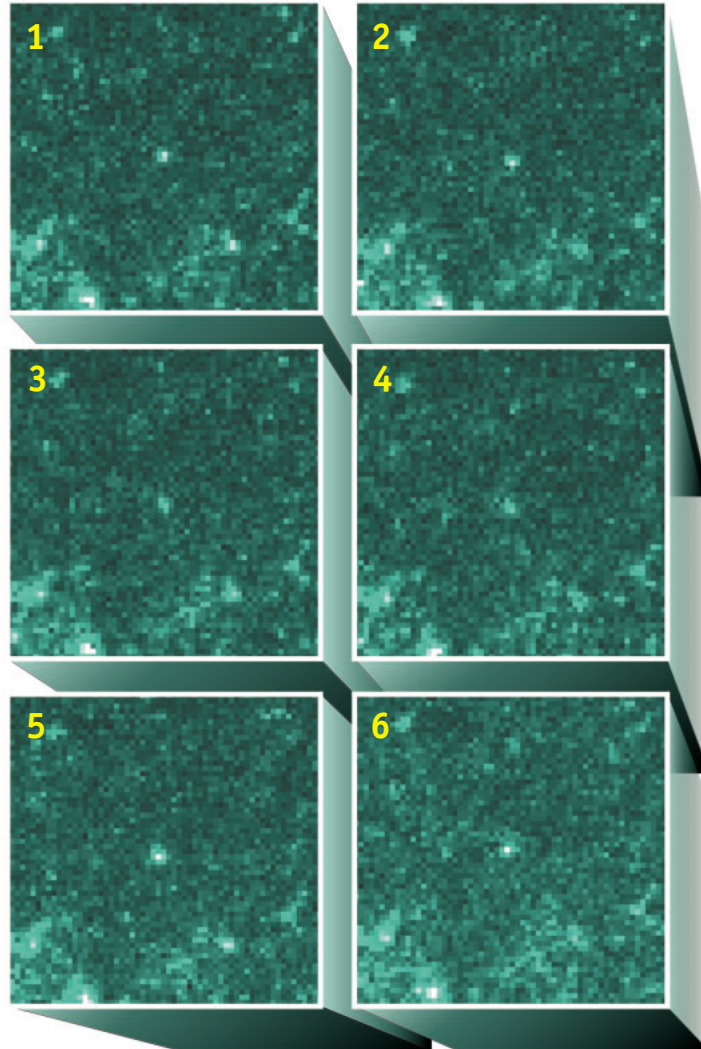


Figura 9: Una variable Cefeida en M100
Estas seis imágenes tomadas en diferentes momentos representan una de las estrellas variables Cefeidas de la galaxia M100. La Cefeida está en el centro de cada imagen. Es evidente que la Cefeida varía en brillo a lo largo del tiempo.

Medidas y cálculos

La relación Periodo-Luminosidad para las variables Cefeidas se ha revisado muchas veces desde las primeras medidas de Henrietta Leavitt. Hoy en día, la mejor estimación de la relación es:

$$M = -2.78 \log (P) - 1.35$$

donde M es la magnitud absoluta de la estrella y P es el periodo medido en días.

En las páginas 9 y 10 se muestran las curvas de luz para las 12 Cefeidas de M100 que han sido medidas con el Hubble.

Tarea 1

¿? Usando la información de estas curvas, calcula la magnitud absoluta M para las 12 estrellas.

Nuestro objetivo es calcular la distancia a M100. Si recuerdas la ecuación de la distancia, verás que la magnitud absoluta por sí sola no es suficiente para calcular la distancia — también necesitas la magnitud aparente.

Además de los problemas asociados a la medida precisa de la cantidad de luz recibida y a la calibración de las magnitudes que se midieron,



Tareas

durante cien años los astrónomos han discutido qué magnitud aparente m usar en la ecuación de distancias para una variable Cefeida cuya magnitud está realmente variando.

Tarea 2

¿? Piensa en un método para estimar la magnitud aparente m usando las curvas.

A comienzos del siglo 20, los astrónomos midieron la magnitud aparente mínima (m_{\min}), la magnitud aparente máxima (m_{\max}) y tomaron la media ($\langle m \rangle$) de las dos.

Si lo haces así — o si usas tu propio método — tienes ya toda la información que necesitas para calcular la distancia a M100.

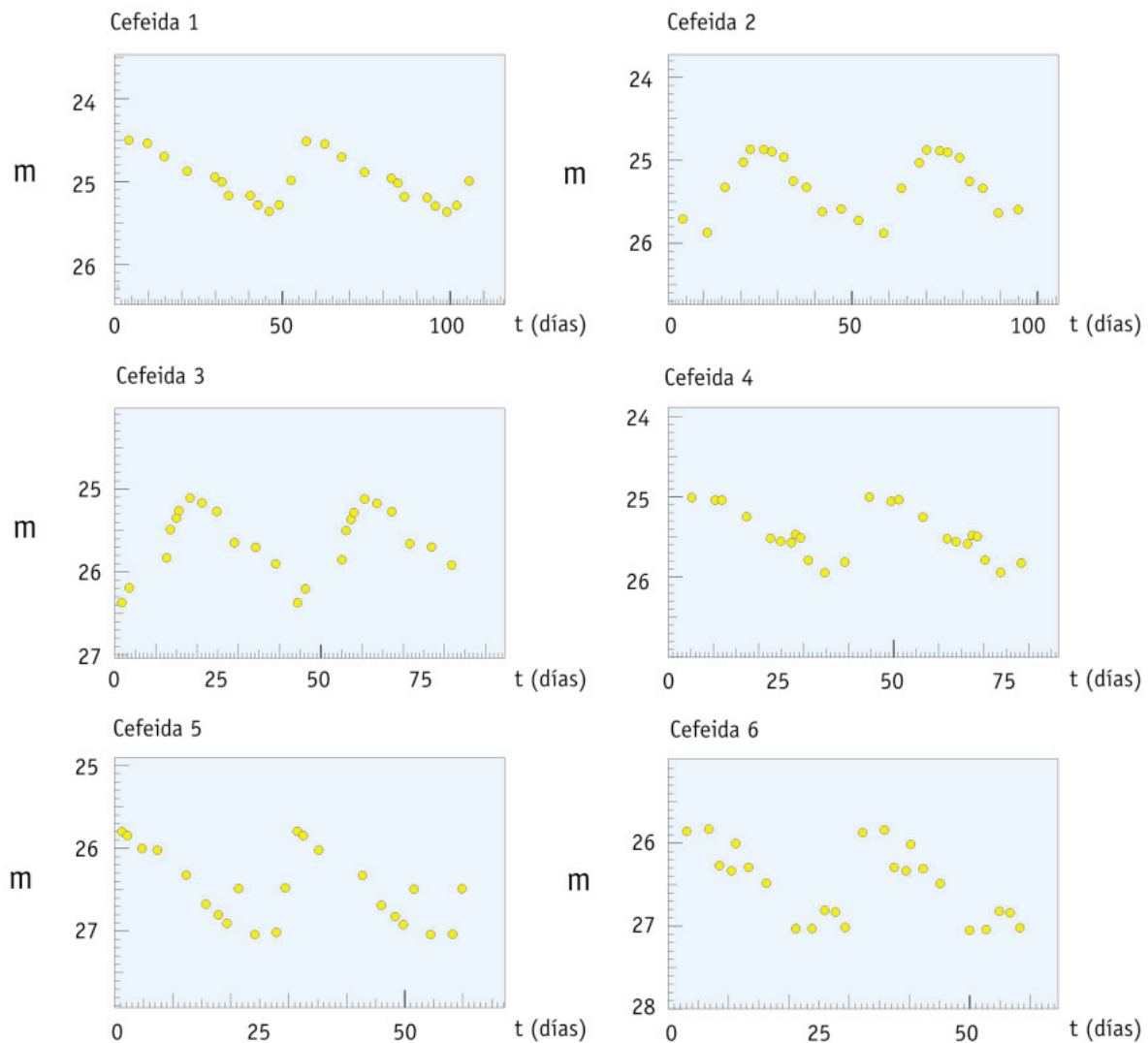


Figura 10: Curvas de luz de las Cefeidas

Curvas de luz de las doce variables Cefeidas de M100 que han sido observadas con el Hubble. La magnitud absoluta M se determina a partir del periodo de las Cefeidas. Adaptado de Freedman y colaboradores (1994).



Tareas

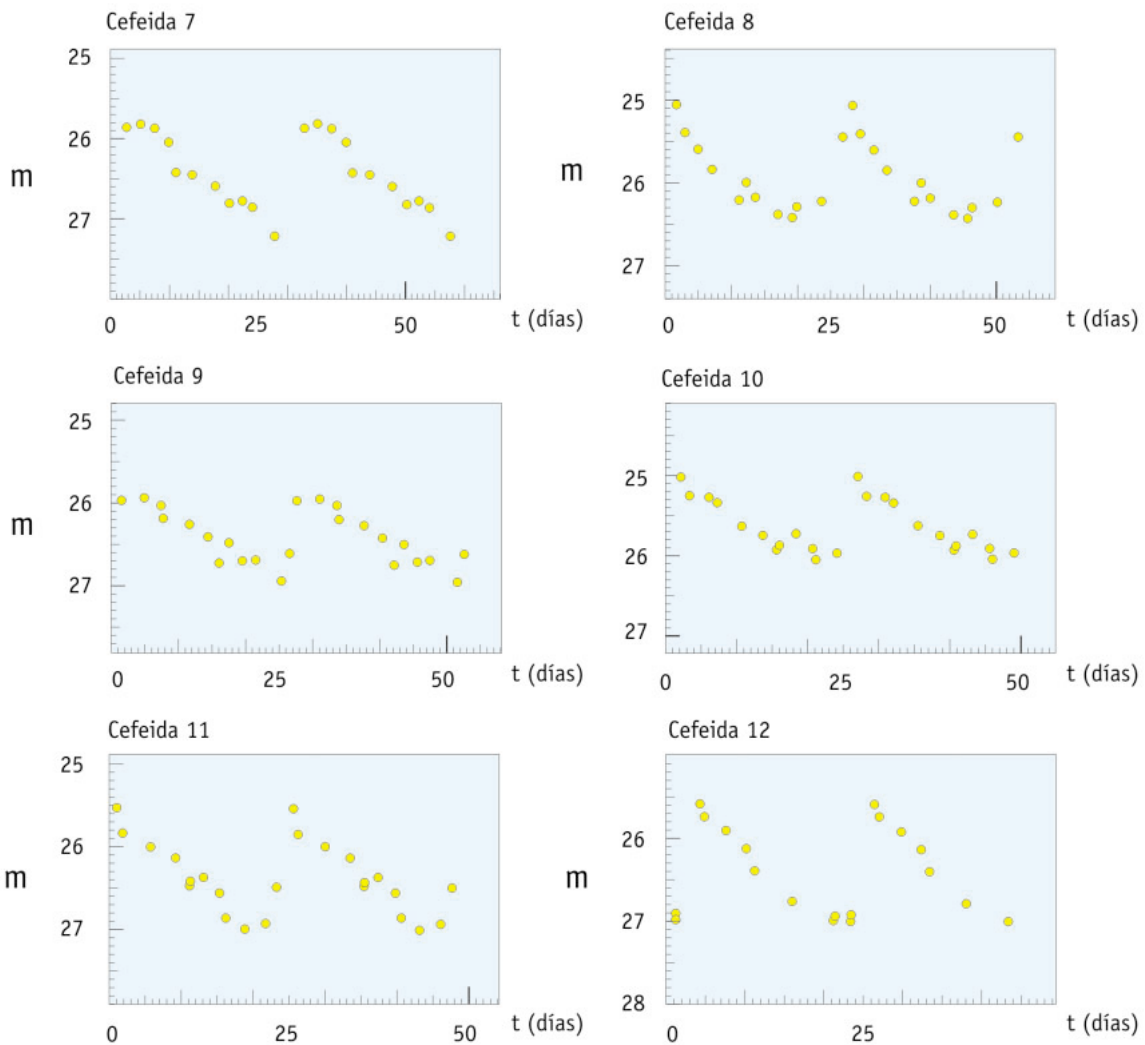


Figure 10 (continuación): Curvas de luz de las Cefeidas

Tarea 3

¿? Calcula $\langle m \rangle$ y D (en Mpc) de cada Cefeida.

Por supuesto, podrías hacer exactamente el mismo cálculo doce veces, pero puedes reducir la cantidad de trabajo escribiendo, por ejemplo, un pequeño programa en una calculadora o usando una hoja de cálculo.

Tarea 4

¿? Considera cuáles pueden ser las razones más probables por las que no encuentras exactamente la misma distancia para todas las variables Cefeidas.

Tarea 5

¿? Ya has calculado la distancia a las doce estrellas variables Cefeidas de M100. ¿Obtienes con ello la distancia a M100?



Tareas

- ¿? El hecho de que las doce estrellas tengan diferentes posiciones en M100, ¿podría ser la razón para la variación obtenida en la distancia de las doce estrellas?
- ¿? Averigua cuál es el tamaño de la Vía Láctea (por ejemplo puedes mirarlo en un libro de astronomía o en Internet). Supón que el tamaño de M100 es del mismo orden. Ahora reconsidera la pregunta previa otra vez.

Tarea 6

- ¿? Calcula el valor medio de la distancia a las doce estrellas Cefeidas y considera este valor como la distancia a M100.
- ¿? En el artículo científico original que usa las medidas del Hubble, el cálculo de la distancia a M100 fue 17.1 ± 1.8 Megaparsecs. En la determinación de este valor se tuvo en cuenta la presencia de polvo interestelar. Compara tus resultados con esta distancia.

Tarea 7

Como recordarás de la introducción (pág. 5), la velocidad de recesión v de una galaxia como M100, junto con la información de su distancia puede darnos un valor de la velocidad general de expansión del Universo, tal y como se describe por la constante de Hubble, H_0 . H_0 se expresa en la unidad km/s/Mpc . La velocidad de recesión del Cúmulo de Virgo, al cual pertenece M100, se ha medido con anterioridad, siendo su valor 1400 km/s (Freedman y colaboradores, 1994).

- ¿? Calcula la constante de Hubble usando esta v y la media D de tus distancias medidas.

Tarea 8

- ¿? Suponiendo que la edad del Universo t viene dada por $t = 1/H_0$, calcula un valor para la edad del Universo. Recuerda utilizar las unidades correctas. ¿Cuánto mayor es este valor que la edad de la Tierra?



Lectura adicional

Artículos científicos

- Freedman, W.L., Madore, B.F., Mould, J.R., Ferrarese, L.; Hill, R., Kennicutt, R.C., Jr., Saha, A., Stetson, P.B., Graham, J.A., Ford, H., Hoessel, J.G., Huchra, J., Hughes, S.M., Illingworth, G.D., 1994, *Nature*, 371, 757-762.: *Distance to the Virgo cluster galaxy M100 from Hubble Space Telescope observations of Cepheids.*

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



Colofón



EUROPEAN SOUTHERN OBSERVATORY
Education and Public Relations Service

Programa de Ejercicios de Astronomía de ESA/ESO
Ejercicio 2: La Distancia a M100 determinada por
las estrellas Variables Cefeidas
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 (or 3200 60)

Fax: +49 89 3200 64 80 (or 320 32 62)

E-mail: info@astroex.org

Idea original y texto:

Emma Fosbury y Robert A.E. Fosbury

Texto por:

Anne Værnholt Olesen, Lars Lindberg Christensen,
Jean-Marc Brauer, y Arntraud Bacher

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 al Planetario Tycho Brahe, Dinamarca, por la inspiración, a Wendy Freedman por los datos suministrados, y a Nina Troelsgaard Jensen, Frederiksberg Seminarium, por sus comentarios.



Guía del profesor

Resumen

En este ejercicio medimos el periodo y la magnitud aparente de variables Cefeidas de la galaxia M100. La magnitud absoluta se deriva utilizando la relación Periodo-Luminosidad, y la distancia a M100 puede determinarse entonces usando la relación de distancia. Finalmente calculamos un valor para la constante de Hubble (usando un valor para la velocidad de recesión de M100 observada por otros científicos) y estimamos la edad del Universo.

La guía del profesor contiene las soluciones a los problemas junto con una discusión de las aproximaciones y simplificaciones hechas en el ejercicio.

La hipótesis de que el Universo se ha expandido desde el Big Bang a un ritmo constante sólo es estrictamente correcta para ciertos modelos cosmológicos. Una expansión tal sólo es realmente posible si el Universo contiene muy poca materia, ya que toda la materia, tanto si es visible como si es oscura, interacciona gravitatoriamente ralentizando el ritmo de expansión. Resultados recientes no han conducido a conclusiones definitivas respecto a la ritmo de expansión del Universo, y así nosotros consideraremos la expresión usada en estas tareas como una aproximación simple pero razonable. Fíjate en que, según modelos cosmológicos recientes, el Universo sufrió una fase de expansión decreciente (debido al efecto gravitacional de la materia normal y de la materia oscura) que duró aproximadamente 5 mil millones de años tras el Big Bang. Desde entonces el Universo parece haber entrado en un periodo con un ritmo de expansión acelerado en el que una misteriosa "gravitación repulsiva" ha tomado el control. Se conoce esta fuerza también con el nombre de "energía oscura" o "quintaesencia" (el quinto elemento).

Tareas 1, 2 y 3

Usando el método sugerido en la Tarea 2 y mediante medidas simples con una regla sobre la copia en papel, obtenemos los siguientes resultados:

Ya que M100 está muy lejos, otros métodos (tales como por ejemplo, hacer la gráfica de $m(P)$) no

| Número de la Cefeida | t2 | t1 | periodo = t2-t1 | M | m máx | m mín | m media | D Mpc | D media Mpc |
|----------------------|-------|------|-----------------|-------|-------|-------|---------|-------|-------------|
| 1 | 100.0 | 46.5 | 53.5 | -6.15 | 24.50 | 25.30 | 24.90 | 16.25 | 19.85 |
| 2 | 58.5 | 11.0 | 47.5 | -6.01 | 24.90 | 25.90 | 25.40 | 19.15 | |
| 3 | 61.0 | 18.5 | 42.5 | -5.88 | 25.10 | 26.40 | 25.75 | 21.15 | |
| 4 | 74.0 | 35.0 | 39.0 | -5.77 | 25.00 | 25.95 | 25.48 | 17.77 | |
| 5 | 50.0 | 19.0 | 31.0 | -5.50 | 25.80 | 27.05 | 26.43 | 24.22 | |
| 6 | 50.0 | 21.0 | 29.0 | -5.42 | 25.80 | 27.10 | 26.45 | 23.61 | |
| 7 | 35.0 | 4.5 | 30.5 | -5.48 | 25.80 | 27.20 | 26.50 | 24.85 | |
| 8 | 46.0 | 19.0 | 27.0 | -5.33 | 25.05 | 26.40 | 25.73 | 16.25 | |
| 9 | 31.0 | 5.0 | 26.0 | -5.28 | 25.90 | 27.00 | 26.45 | 22.22 | |
| 10 | 27.0 | 2.5 | 24.5 | -5.21 | 25.00 | 26.10 | 25.55 | 14.20 | |
| 11 | 43.0 | 19.0 | 24.0 | -5.19 | 25.55 | 27.00 | 26.28 | 19.61 | |
| 12 | 38.0 | 16.0 | 22.0 | -5.08 | 25.60 | 27.00 | 26.30 | 18.90 | |



Guía del profesor

funcionan muy bien. Hemos decidido proporcionar la relación Periodo-Luminosidad en lugar de permitir a los estudiantes derivar ellos mismos los dos coeficientes de esta ecuación. Como resultado, el ejercicio es accesible a un mayor número de estudiantes — algo que consideramos (razonablemente) positivo.

Tarea 4

La razón que primero viene a la cabeza para justificar cualquier desviación en los resultados es simplemente la incertidumbre normal en las medidas. Medidas de esta clase, hechas a mano, no son muy precisas. Se puede mejorar la precisión usando métodos más refinados de medida. Alternativamente, podría haber dos clases diferentes de Cefeidas que tuvieran características ligeramente diferentes.

Tarea 5

Sí, basado en la muestra relativamente grande de Cefeidas, tenemos ahora una estimación razonable de la distancia a M100.

No, el tamaño de una galaxia es pequeño comparado con la distancia a M100.

La Vía Láctea tiene un tamaño de aproximadamente 25 kpc. La respuesta a la pregunta previa sigue siendo un clarísimo no.

Tarea 6

Con los métodos aproximados utilizados aquí, un valor de 19.8 Mpc es bastante razonable.

La pregunta se hace para que los estudiantes se den cuenta de que las incertidumbres son una parte importante en muchas ciencias naturales, y ciertamente sucede así en astronomía.

Tarea 7

$$H_0 = v/D = 1400/19.85 = \mathbf{70.53 \text{ km/s/Mpc}}$$

Este valor está dentro de un rango aceptable. De forma genérica, se considera que H_0 está en un rango comprendido entre 60 y 80 km/s/Mpc.

Tarea 8

Usando el factor de conversión de Mpc a km, obtenemos $H_0 = 2.286 \times 10^{-18} \text{ s}^{-1}$.

$$t = 1/H_0 = 4.375 \times 10^{17} \text{ s} = \mathbf{13.87 \times 10^9 \text{ años}}$$

Esto es aproximadamente tres veces la edad de la tierra (~4.6 miles de millones de años). Se hace esta pregunta para intentar que los estudiantes relacionen la edad de Universo con algo que ellos pudieran conocer de antemano.

www.astroex.org

