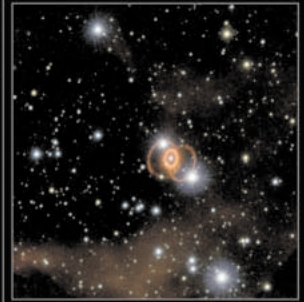


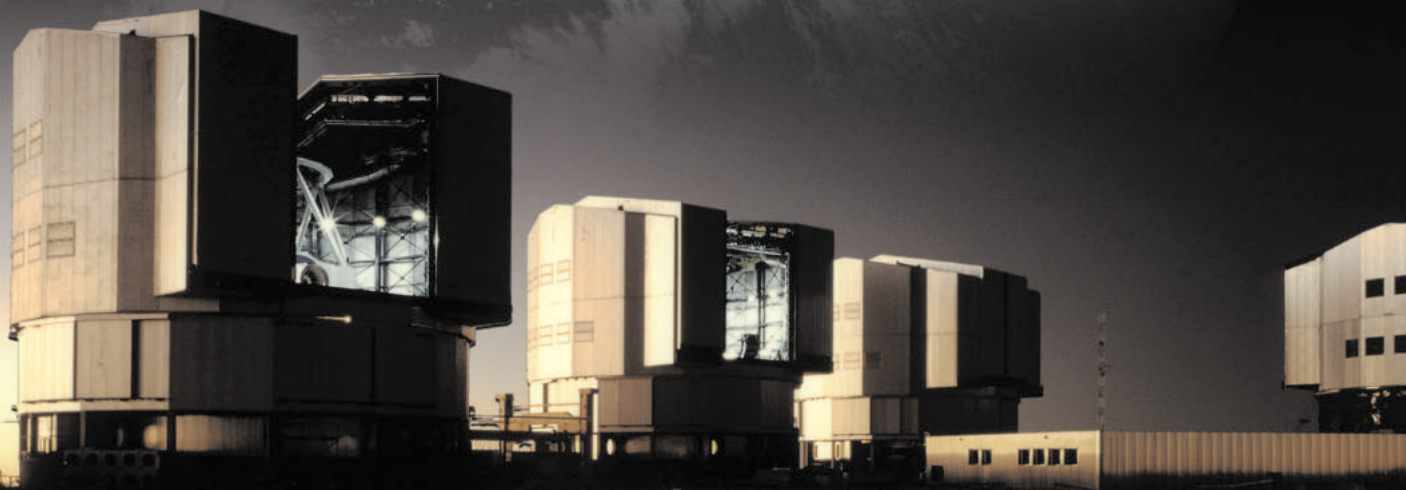
# PROGRAMA DE EJERCICIOS DE ASTRONOMÍA

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



## Medida de la distancia a la Supernova 1987A

Basada en las observaciones realizadas con el Telescopio Espacial Hubble de la NASA y la ESA





# Índice

## Programa de Ejercicios de Astronomía de ESA/ESO 1

### Prefacio

- Prefacio ..... página 2

### Introducción

- Supernovas ..... página 3
- La Supernova 1987A ..... página 4
- La distancia a la Gran Nube de Magallanes ..... página 4
- El anillo ..... página 5

### Tareas

- Tarea 1 ..... página 7
- Tarea 2 ..... página 7
- Tarea 3 ..... página 9
- Tarea 4 ..... página 9
- Tarea 5 ..... página 10
- Tarea 6 ..... página 12

### Lectura adicional

- Artículos científicos ..... página 13

### Guía del profesor

- Guía del profesor ..... página 15

## Prefacio

### Programa de Ejercicios de Astronomía de ESA/ESO 1

## Medida de la distancia a la Supernova 1987A

La Astronomía es una ciencia visual y accesible, lo que la hace ideal para propósitos educativos. En los últimos años la NASA<sup>1</sup>, la ESA<sup>2</sup>, el Telescopio Espacial Hubble y los telescopios del ESO<sup>3</sup> 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

SN 1987A es el nombre de una famosa supernova. La primera parte de su nombre se refiere al tipo de fenómeno — una supernova — a continuación se indica el año en que fue observada por primera vez (1987) , y por último la letra “A” indica que fue la primera supernova descubierta ese año.

### Supernovas

Una supernova es una explosión que indica la muerte de cierto tipo de estrellas. Básicamente hay dos tipos de supernovas, pero aquí sólo trataremos las supernovas llamadas de Tipo II — estrellas masivas que alcanzan el final de sus vidas de una manera muy espectacular. SN 1987A fue la explosión de una de estas estrellas masivas.

Una estrella masiva (de masa típicamente superior a cinco veces la del Sol) puede finalizar su vida con una explosión después de unos pocos millones de años. Durante la explosión, la mayor parte del material de la estrella es lanzado violentamente al espacio. La velocidad del material

eyectado puede alcanzar los  $10^7$  m/s (un 3% de la velocidad de la luz). La capa en expansión con los restos de la explosión se mantiene visible en el espacio interestelar durante miles de años hasta que finalmente se desvanece en el medio interestelar, dejando un residuo visible conocido como el remanente de la supernova. En el interior de la nebulosa circundante, la parte central de la estrella inicial se comprime dando origen a una estrella de neutrones.

Todas las supernovas son muy brillantes, con un brillo equivalente a la luz total emitida por miles de millones de Soles. Se cree que están entre los objetos más brillantes de todo el Universo. Esto las hace visibles a muy grandes distancias.

#### **Figura 2: La Gran Nube de Magallanes (LMC)**

La LMC es una galaxia pequeña e irregular, una de las más cercanas del grupo de galaxias vecinas de la Vía Láctea. Esta compuesta por estrellas, polvo y gas y está repleta de regiones de formación estelar. SN 1987A aparece aquí en la LMC. Esta imagen fue tomada con el telescopio Schmidt en el Observatorio de La Silla del Observatorio Europeo Austral (ESO).







## Introducción



**Figura 3: Aparición de SN1987A**

En la imagen de la izquierda se puede ver la Nebulosa de la Tarántula tras la explosión de la supernova. La flecha apunta a la supernova. La imagen de la derecha muestra la Nebulosa de la Tarántula de la LMC antes de la explosión de la Supernova 1987A el 23 de Febrero de 1987.

Introducción

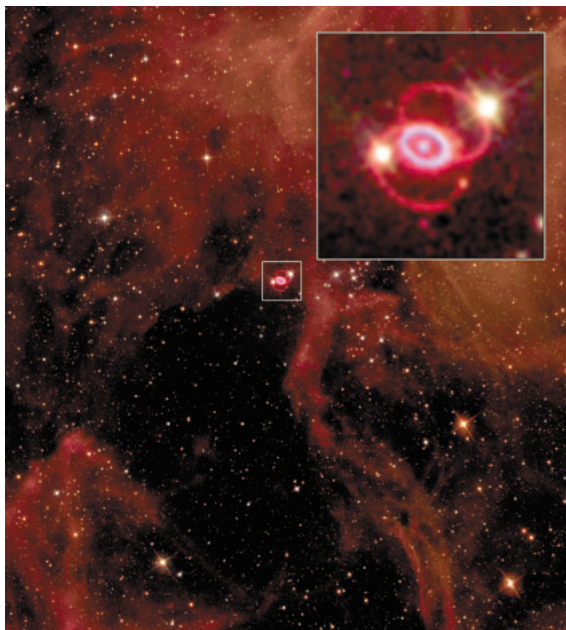
Sin embargo, hay muy pocas supernovas, con lo que el cielo no brilla continuamente con estas espectaculares muertes estelares. Se estima que el número de explosiones de supernovas es solamente de unas pocas por siglo y por galaxia.

### La Supernova 1987A

El 23 de Febrero de 1987 apareció una supernova en la Gran Nube de Magallanes (LMC) visible a simple vista. La LMC es una de las más cercanas del grupo de galaxias vecinas de la Vía Láctea. Fue uno de los sucesos más apasionante en la historia de la Astronomía. SN 1987A fue la primera supernova visible a simple vista en casi 400 años.

### La distancia a la Gran Nube de Magallanes

La determinación de las distancias en el Universo es uno de los problemas fundamentales de la Astronomía. Una medida precisa de la distancia a SN 1987A, situada dentro de la LMC, puede usarse para determinar la distancia a la propia LMC.



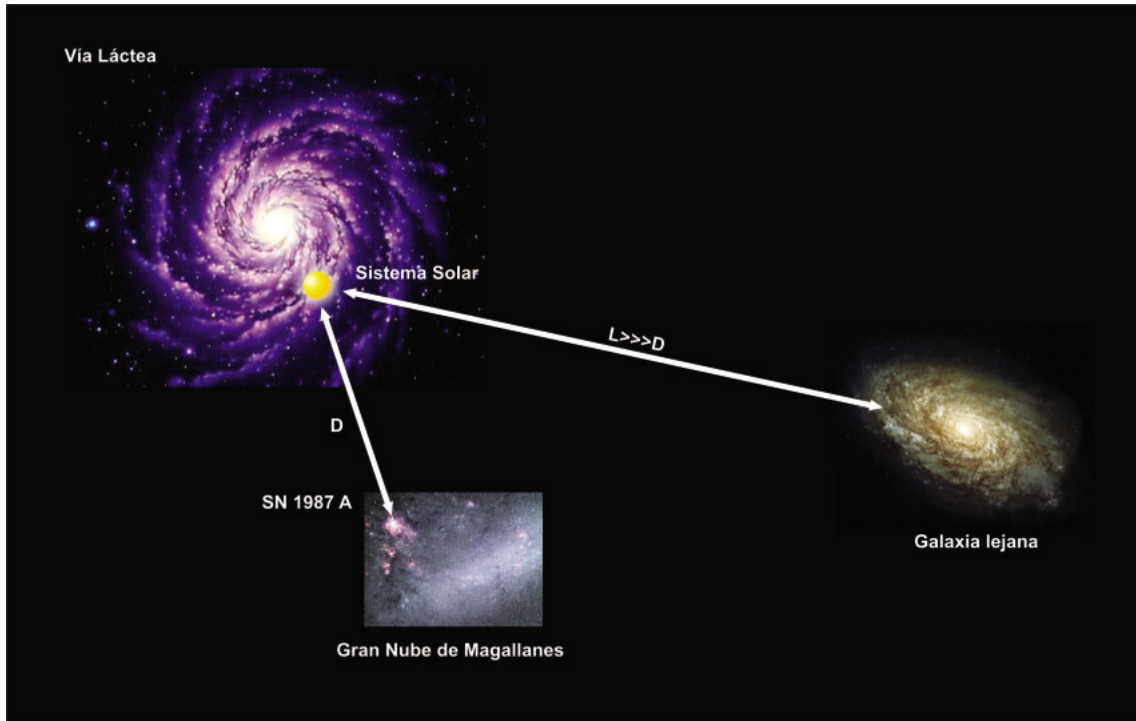
**Figura 4: Supernova 1987A**

SN 1987A en el centro (aumentada en el recuadro insertado) dejó detrás un residuo de tres anillos de gas brillante en la LMC. En este ejercicio, el pequeño anillo central se usa para medir la distancia a la supernova, y de este modo a la LMC.

Se ven en la zona muchas estrellas azules jóvenes - de una edad de 12 millones de años — así como polvo y gas (en rojo oscuro). Esto muestra que la región alrededor de la supernova es aún un fértil semillero de nuevas estrellas.



## Introducción



**Figura 5: Medida de la distancia entre galaxias**

Si se puede medir de manera más precisa la distancia a la LMC, se podrán medir de forma más precisa también las distancias a otras galaxias más lejanas.

Todas las estrellas de la LMC están aproximadamente a la misma distancia de nosotros. Si podemos encontrar la distancia,  $D$ , a SN 1987A, entonces podemos simultáneamente encontrar la distancia a todos los tipos de estrellas encontrados en la LMC. Otro tipo de objetos de la LMC y de otras galaxias más lejanas pueden también usarse para medir distancias, de forma que una medida más precisa de la distancia a la LMC sería un paso más en la determinación más precisa de la distancia a otras galaxias más lejanas.

### El anillo

Las primeras imágenes de SN 1987A tomadas por el Telescopio Espacial Hubble de la NASA y la ESA fueron hechas usando la Cámara de Objetos Débiles (FOC) de la ESA 1278 días después de la explosión. El Hubble fue lanzado en 1990,

y tuvo que ser montado en el espacio, así que no fue posible tomar imágenes antes. Además de ser de gran interés intrínseco, SN 1987A fue un reto incluso para la muy alta resolución del Hubble. Las imágenes de SN 1987A muestran tres nebulosas circulares alrededor de la supernova — un anillo interior y dos anillos exteriores. En este ejercicio usaremos únicamente el anillo interior. El anillo está demasiado lejos de la supernova para ser material eyectado en la explosión. Debe haberse creado con anterioridad, probablemente como material de la estrella moribunda expulsado por el viento estelar durante los últimos pocos miles de años de su vida. No está claro cómo el material se conforma en un anillo fino bien definido, pero una vez formado, el material del anillo comenzó a brillar en cuanto un destello de luz ultravioleta lo alcanzó procedente de SN 1897A.



## Introducción

Es importante darse cuenta que el anillo estaba presente antes de que la estrella explotara como una supernova.

Supondremos que el anillo es un círculo perfecto, pero inclinado cierto ángulo respecto a la línea que une la Tierra con la supernova, de forma que vemos una elipse. Si el anillo estuviera de cara al observador, todas las partes del anillo se habrían iluminado simultáneamente cuando el destello de luz lo alcanzó procedente de la supernova.

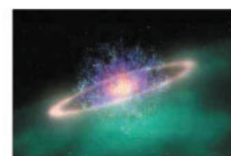
Sin embargo, ya que el anillo está inclinado, el borde más cercano se iluminó primero (debido a que la velocidad de la luz es finita), y luego la luz pareció moverse alrededor del anillo, iluminando al final los puntos más alejados (ver Fig.6). Observa que todo el anillo fue en realidad iluminado al mismo tiempo, pero desde la Tierra nosotros vimos iluminarse primero el borde más cercano.

Ya que el gas continuó brillando y sólo se desvaneció lentamente tras el paso del destello luminoso, la luz total emitida por el anillo alcanzó un máximo aproximadamente cuando toda la circunferencia fue iluminada. Este hecho puede usarse para calcular la distancia a SN 1987A.

Las preguntas en las siguientes tareas esquematizan los pasos a seguir para calcular la distancia a la supernova, usando el tamaño angular del anillo y una curva de luz que muestra la evolución con el tiempo del brillo del anillo tras la explosión.

### Figura 6: El anillo se ilumina

Como ilustra esta animación, la luz procedente de SN 1987A alcanza el anillo de materia alrededor de ella y el anillo se ilumina. El anillo alcanzó un brillo máximo aproximadamente 400 días después de la explosión. Fíjate en que incluso aunque la luz alcanza las diferentes partes del anillo a la vez, nosotros vemos iluminadas antes las partes más cercanas (debido a la velocidad finita de la luz). Midiendo el retardo temporal observado, es posible obtener la distancia a SN 1987A. Las imágenes proceden de una secuencia animada hecha por STScI/NASA.







## Tareas

### Tarea 1

El primer objetivo es calcular el diámetro angular del anillo, es decir, el diámetro aparente del anillo en segundos de arco, tal y como se observa desde la Tierra. A este ángulo lo llamaremos  $a$ .

Las posiciones relativas de las estrellas 1, 2 y 3 en la imagen de SN 1987A (Fig. 8, pág. 8), se dan como separaciones angulares (en segundos de arco) en la tabla de datos de esta página.

¿? Relacionar estos valores con medidas directas sobre la imagen para determinar la escala de esta imagen (en segundos de arco/mm sobre la página).

### Tarea 2

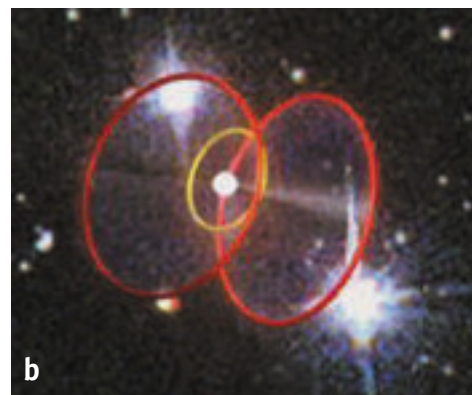
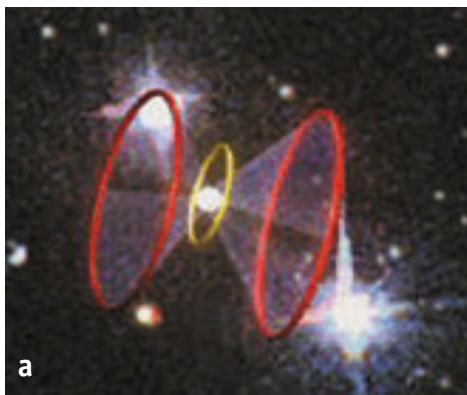
El anillo alrededor de SN 1987A se supone per-

fectamente circular — el hecho de que parezca elíptico se debe a la inclinación del anillo (respecto al plano del cielo — el plano que es perpendicular a nuestra línea de visión a la supernova).

¿? Puedes medir el diámetro angular del anillo en la imagen sin saber su inclinación. Algunos dirán que esta afirmación es obvia, mientras que otros tendrán que pensar en ello para ver que es cierto. Explica por qué la afirmación es cierta. Mira la Fig. 9 si es necesario.

¿? Mide el diámetro del anillo en mm en la Fig. 8 y convierte la respuesta a radianes, usando el factor de conversión que encontraste en la Tarea 1 y la información dada en la sección Herramientas Matemáticas.

	Distancia (mm)	Distancia (segundos de arco)	Escala (segundos de arco/mm)
Estrella 2 respecto a estrella 1:		3.0	
Estrella 3 respecto a estrella 1:		1.4	
Estrella 3 respecto a estrella 2:		4.3	

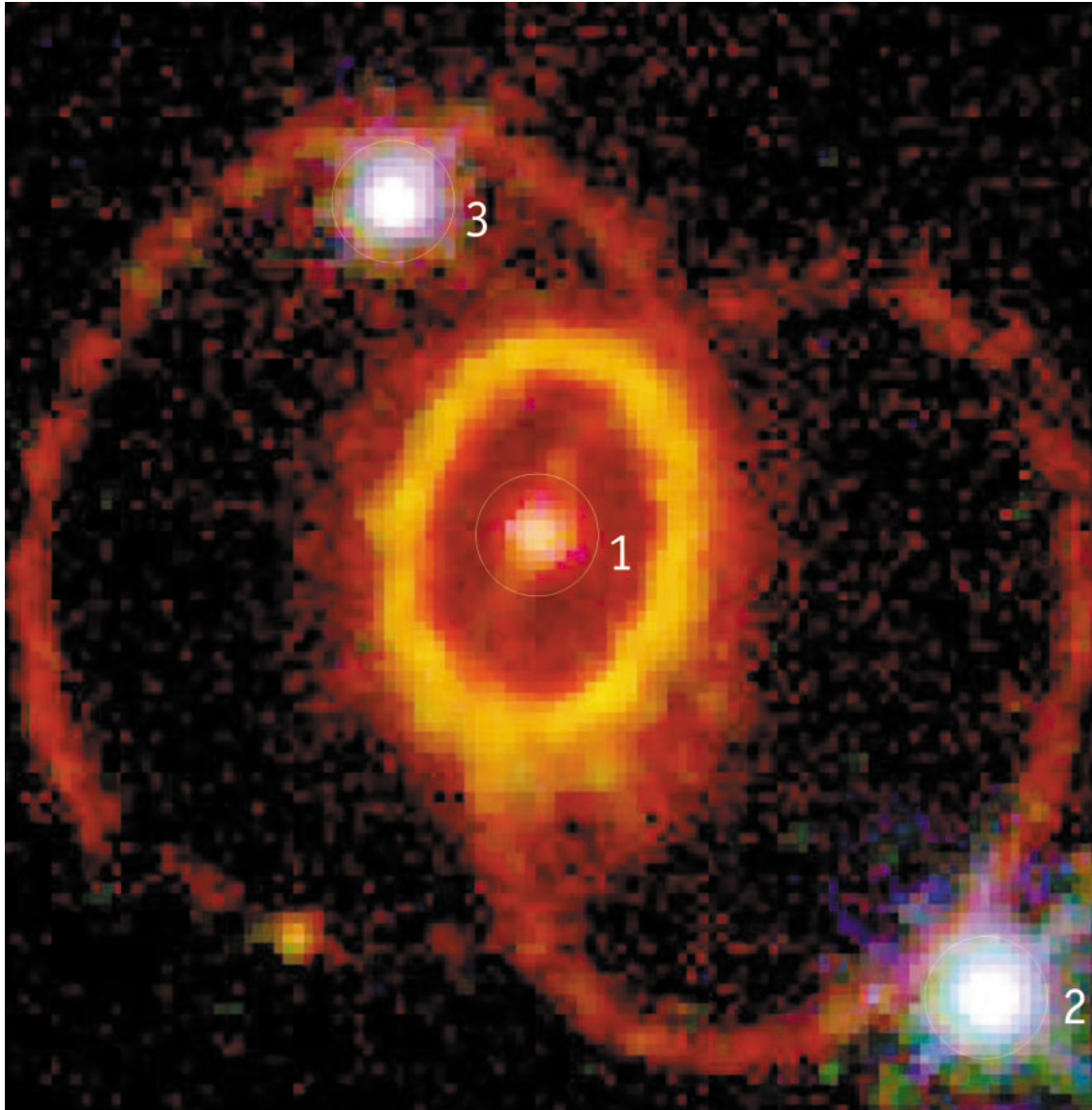


**Figura 7: Los anillos**

Si pudiéramos ver SN 1987A con un ángulo de visión diferente, veríamos tres anillos circulares con SN 1987A en el centro del más pequeño y los dos más grandes en planos paralelos (Fig. 7a). Sin embargo, desde el punto de vista del Hubble los tres anillos parecen estar en el mismo plano (Fig. 7b) (cortesía de STScI/NASA).



## Tareas



**Figura 8: Estrellas alrededor de la Supernova 1987A**

Esta imagen fue tomada en Febrero de 1994 con la Cámara Planetaria de Campo Ancho 2 (WFPC2). WFPC2 ha producido la mayoría de las sensacionales imágenes del Hubble que han sido cedidas como imágenes de dominio público a lo largo de los años. Su resolución y excelente calidad son algunas de las razones por las que WFPC2 fue el instrumento más usado durante los primeros 10 años de vida del Hubble. El filtro usado en la cámara deja pasar la luz roja emitida por el hidrógeno gaseoso brillante — la línea de emisión alfa de la serie de Balmer.



## Tareas

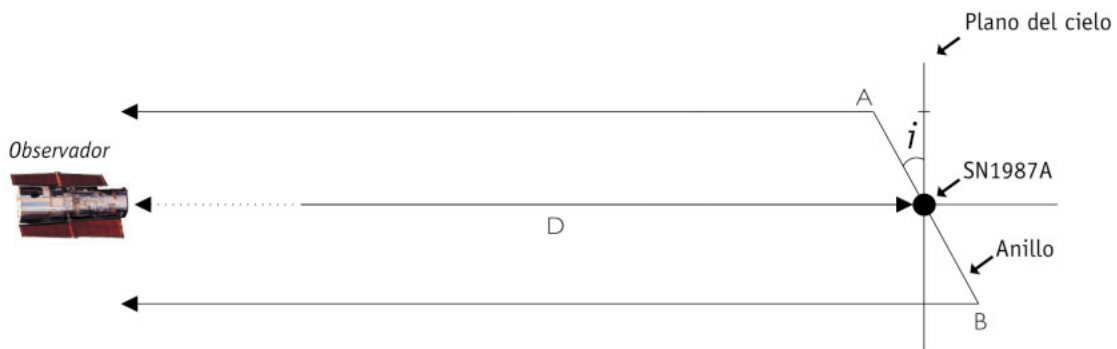
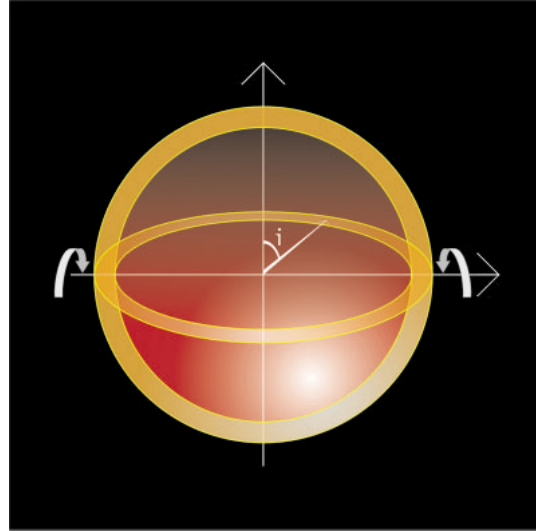
### Figura 9: Inclinación

Un ángulo de inclinación,  $i$ , describe la inclinación de un objeto, por ejemplo, un anillo, respecto del plano del cielo.

### Tarea 3

Llamamos  $i$  al ángulo de inclinación. Si  $i = 0^\circ$  o  $i = 180^\circ$  vemos un círculo, y una línea si  $i = 90^\circ$ . Para los valores de  $i$  comprendidos entre  $0^\circ$  y  $180^\circ$ , vemos una elipse.

¿? Cómo puedes determinar  $i$  a partir de la medida de los ejes mayor y menor de la elipse? Las Figs. 9 y 10 pueden ayudar a deducir esta relación.



### Figura 10: Determinación del ángulo de inclinación, $i$

Imagina que estamos mirando al sistema lateralmente, de forma que vemos el anillo con un ángulo de inclinación,  $i$ , respecto al plano del cielo (este plano es perpendicular a la línea de visión del observador).

El ángulo de inclinación puede derivarse de una simple relación entre los ejes mayor y menor de la elipse observada. Se indican en la figura la parte más cercana, A, y la parte más lejana, B.

¿? Mide el diámetro angular menor y mayor de la elipse y calcula el ángulo de inclinación,  $i$ , a partir de la relación que encuentres.

### Tarea 4

Ahora ya tenemos el diámetro angular del anillo y su inclinación. Necesitas encontrar aún el diámetro real en el plano del cielo,  $d$ , para determinar la distancia.

La clave para encontrar el diámetro real del anillo está en nuestro conocimiento de la velocidad de la luz.

Cuando la supernova explota, emite un fogonazo luminoso muy brillante. Este fogonazo se extiende por el espacio circundante a la velocidad

de la luz,  $c$ . Más tarde, en algún momento,  $t$  segundos después de la explosión, el fogonazo iluminará el anillo. Como hemos supuesto que el anillo es circular y supondremos también que su centro coincide con el de la supernova, todas las partes del anillo se iluminarán simultáneamente, si lo viéramos desde la supernova. Pensemos ahora como se verá desde la Tierra. Aunque todas las partes del anillo "ven" el fogonazo de la supernova a la vez, nosotros no vemos todo el anillo iluminado simultáneamente, puesto que el anillo está inclinado. La parte del anillo inclinada hacia nosotros parecerá brillar primero, ya que la luz procedente de este punto tiene una distancia menor que recorrer para llegar a la Tierra. Únicamente cuando todo el ani-





## Tareas

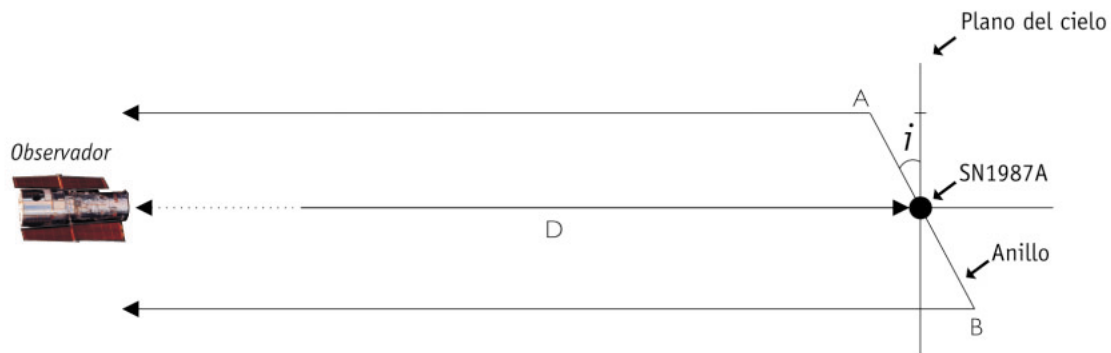
llo se ilumina, visto desde la Tierra, la curva de luz alcanzará su máximo. La diferencia entre la distancia de los puntos cercano y lejano del anillo se puede calcular a partir del tiempo transcurrido entre estos eventos en la curva de luz. De este modo, el tiempo transcurrido desde que vemos iluminarse inicialmente el anillo hasta que la curva de luz alcanza su máximo, está relacionado con la diferencia de distancias entre los puntos más cercano y más alejado del anillo. En la Fig. 12 se muestra la curva de luz del anillo de SN 1987A.

¿? Mide este tiempo  $t$  a partir de la curva de luz del anillo de SN 1987A.

¿? Si el ángulo de inclinación hubiera sido de 90 grados, habría sido muy simple relacionar este tiempo al diámetro del anillo. ¿Por qué?

### Tarea 5

Para realizar el siguiente cálculo, tenemos que utilizar otra aproximación (ver Fig. 13a y 13b). Supondremos que las líneas que unen la Tierra con los puntos A y B, los puntos del anillo más cercano y lejano a la Tierra, son paralelas. Esta



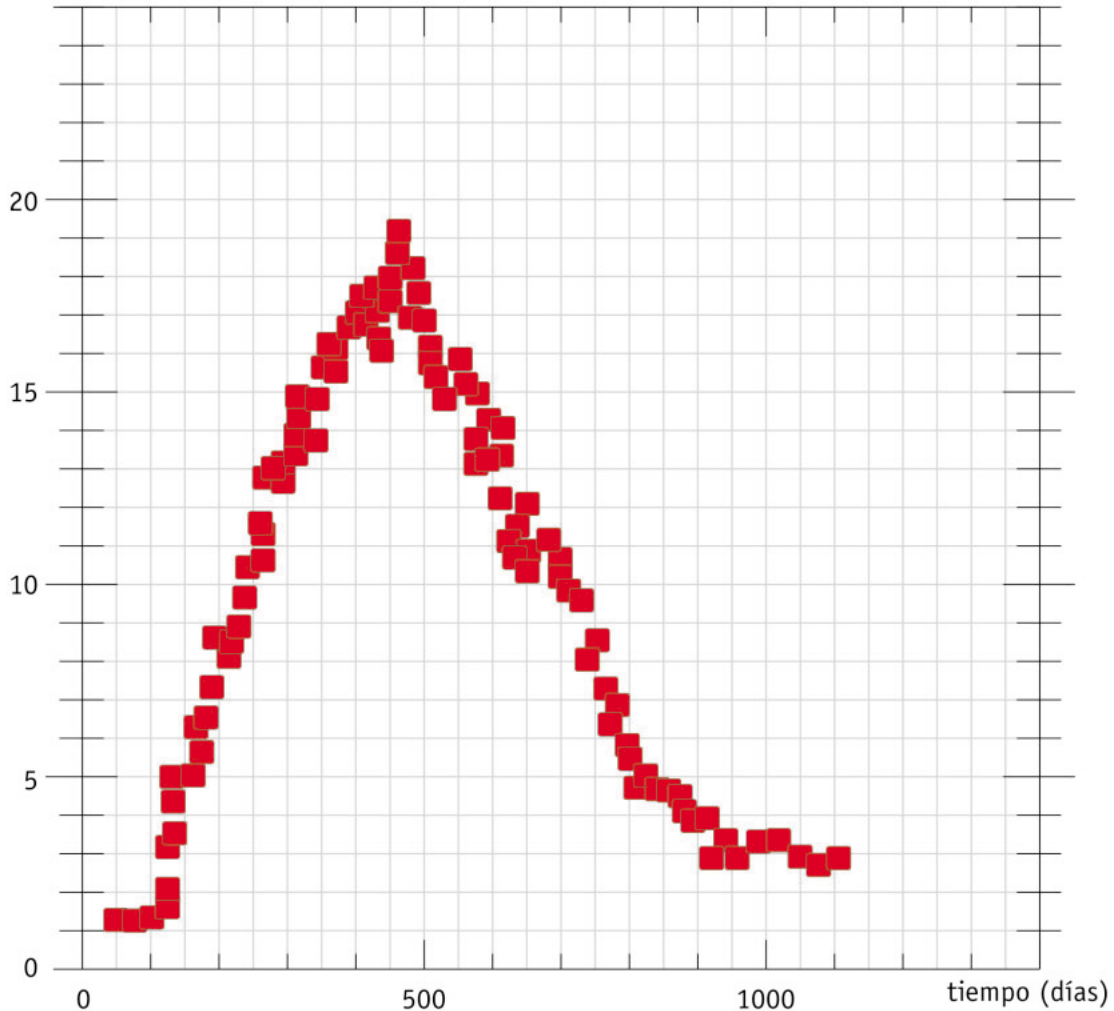
**Figura 11: El viaje de la luz**

El fogueo de SN 1987A alcanza a todo el anillo a la vez. Así que el punto más cercano, A, y el más alejado, B, se iluminaron a la vez y emitieron luz simultáneamente hacia el observador de la Tierra. La luz emitida desde B tuvo un recorrido más largo debido a la inclinación del anillo.



## Tareas

Intensidad (unidades arbitrarias)



**Figura 12: Curva de luz del anillo**

Se muestran medidas de la intensidad total del anillo según se iba iluminando en los meses siguientes a la explosión de la supernova. La intensidad total del anillo comenzó a incrementarse cuando la luz procedente de las partes más cercanas del anillo llegó a la Tierra. Cuando el anillo se iluminó por completo (visto desde la Tierra), la curva de luz alcanzó su máximo. Estas medidas fueron hechas con el Explorador Internacional de Ultravioleta (IUE) — otro observatorio espacial.

es una hipótesis válida puesto que el diámetro angular del anillo,  $a$ , es muy pequeño comparado con la distancia,  $D$ . Por consiguiente, los ángulos  $i$  y  $j$  son iguales.

¿? Mira el diagrama (Fig. 13) y úsalo para encontrar la relación entre:

1. La diferencia en la distancia recorrida por la luz procedente del punto más cercano del anillo, A, y del punto más lejano, B. Llamamos a esta distancia  $d_p$ .

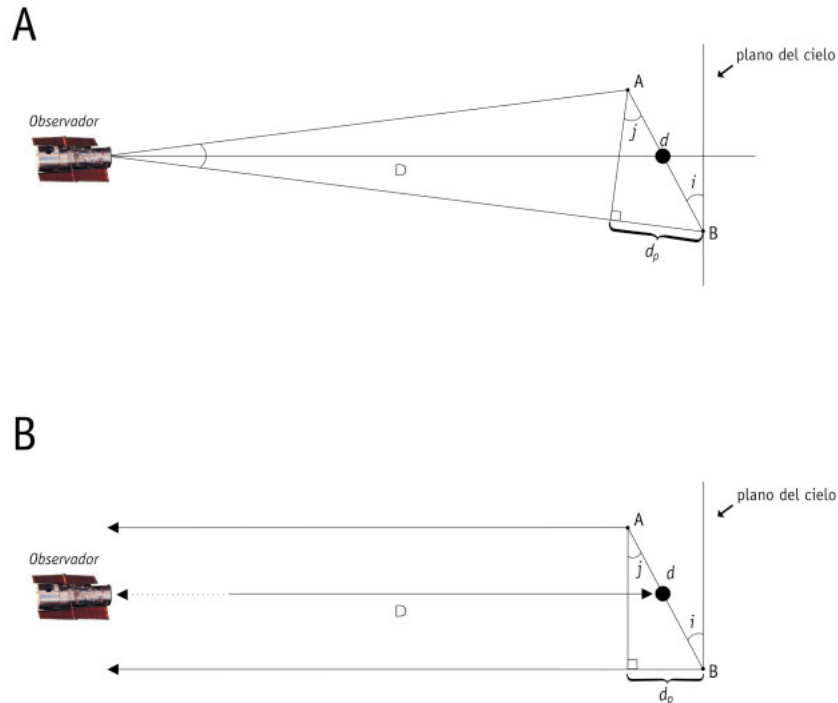
2. El verdadero diámetro del anillo,  $d$

3. El ángulo de inclinación,  $i$  (calculado en la tarea 3)

¿? Encuentra una relación entre la diferencia de distancias,  $d_p$ , la velocidad de la luz,  $c$ , y el tiempo,  $t$ .



## Tareas



**Fig. 13: Obtención del diámetro real**

Con la ayuda de esta figura y los valores encontrados anteriormente, es posible determinar el diámetro real,  $d$ , del anillo de la supernova. En 13a un esquema muestra la situación real, pero debido a la gran distancia a LMC es razonable suponer que las líneas que unen la Tierra con A y B son paralelas. Esta suposición se ilustra en la Fig. 13b.

- ¿? Combina estas dos expresiones para encontrar una expresión para el diámetro real del anillo,  $d$ .
- ¿? Introduce en esta expresión los valores que anteriormente has calculado o medido y encuentra el diámetro real,  $d$ , del anillo.

### Tarea 6

¡Ya estás preparado para el apoteosis final!

- ¿? Usa los valores de  $d$  y del ángulo  $a$  (calculado en la tarea 2) para determinar la distancia a la supernova,  $D$  (usa la aproximación de ángulos pequeños de la sección Herramientas Matemáticas). Da la respuesta en kiloparsecs usando el factor de conversión dado en la sección Herramientas Matemáticas.

Una pista para comprobar tus respuestas...

La distancia a la supernova ha sido calculada por Panagia y colaboradores (1991) a partir de la versión original de estos datos. El valor que ellos encontraron es  $D = 51.2 \pm 3.1$  kpc y el ángulo de inclinación medido por ellos es  $i = 42.8$  grados  $\pm 2.6$  grados.

Si tus respuestas están dentro de un margen de error del 20%, has hecho tanto unas medidas precisas como unos cálculos cuidadosos, y puedes estar muy orgulloso de tu trabajo.

- ¿? ¿Se te ocurren las razones por las que tus resultados difieren de los resultados de los científicos?

Esta tarea no tiene en cuenta los dos anillos exteriores.

- ¿? ¿Puedes especular sobre el origen de estos anillos?





## Lectura adicional

### Artículos científicos

- Fransson, C., Cassatella, A., Gilmozzi, R. Kirshner, R. P., Panagia, N., Sonneborn, G., y Wamsteker, W., 1989, Ap.J., 336, 429-441: *Narrow ultraviolet emission lines from SN 1987A Evidence for CNO processing in the progenitor.*
- Gould, A., 1994, Ap.J., 425, 51-56: *The ring around supernova 1987A revisited. 1: Ellipticity of the ring.*
- Panagia, N., Gilmozzi, R., Macchetto, F., Adorf, H.M., Kirshner, R.P. 1991, Ap.J., 380, L23-L26: *Properties of the SN 1987A circumstellar ring and the distance to the Large Magellanic Cloud.*
- Jakobsen, P., Albrecht, R., Barbieri, C., Blades, J. C., Boksenberg, A., Crane, P., Deharveng, J. M., Disney, M. J., Kamperman, T. M., King, I. R., Macchetto, F., Mackay, C. D., Paresce, F., Weigelt, G., Baxter, D., Greenfield, P., Jedrzejewski, R., Nota, A., Sparks, W. B., Kirshner, R. P., Panagia, N., 1991, ApJ, 369, L63-L66: *First results from the Faint Object Camera — SN 1987A.*

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





## Colofón



**EUROPEAN SOUTHERN OBSERVATORY**  
Education and Public Relations Service

**Programa de Ejercicios de Astronomía de ESA/ESO**  
**Ejercicio 1: Medida de la distancia a la Supernova**  
**1987A**  
**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](mailto:info@astroex.org)

Idea original y texto:

Emma Fosbury and Robert A.E. Fosbury

Texto por:

Anne Værnholt Olesen, Lars Lindberg Christensen,  
Jean-Marc Brauer, y Arnttraud 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 a Karl-Heinz Lotze, Alemania, por la inspiración, a Nino Panagia, STScI/ESA, por los datos amablemente suministrados, y a Nina Troelsgaard Jensen, Frederiksberg Seminarium, por sus comentarios. También querríamos agradecer su labor a las personas que nos han ayudado a mejorar la segunda versión de los ejercicios: Lyle Lichty y Thibaut Plisson, USA; Nausicaa Delmotte, ESO.



## Guía del profesor

### Resumen

Se presenta la geometría del anillo interior alrededor de la Supernova 1987A (SN1987A). A continuación definimos la escala de la imagen de la supernova tomada por el Hubble, de forma que puedan calcularse tanto el diámetro angular del anillo como su inclinación respecto al plano del cielo.

Observaciones desde la Tierra muestran como la luz de la supernova alcanza las diferentes partes del anillo. Usando las medidas de la intensidad de luz y la velocidad de la luz, se pueden obtener las dimensiones físicas del anillo. Una vez se han determinado tanto el tamaño físico como el angular del anillo, podemos determinar la distancia a la propia SN 1987A.

Esta guía del profesor contiene las soluciones a los problemas junto con comentarios y discusiones sobre las aproximaciones y simplificaciones realizadas. El propósito es maximizar la utilidad de los ejercicios y ayudar al profesor a preparar la clase.

### Tarea 1

Medidas de ejemplo, hechas a mano, usando una regla sobre una imagen impresa de 149 mm x 152 mm (el tamaño impreso depende de la impresora):

	Distancia (mm)	Distancia (segundos de arco)	Escala (segundos de arco/mm)	Escala promedio (segundos de arco/mm)
Estrella 2 respecto a estrella 1:	89 mm	3.0	0.03371	0.03111
Estrella 3 respecto a estrella 1:	50 mm	1.4	0.02800	
Estrella 3 respecto a estrella 2:	136 mm	4.3	0.03162	

### Tarea 2

El diámetro angular del anillo se calcula midiendo la dimensión mayor de la elipse observada. La proyección de un círculo siempre muestra el diámetro en algún sitio, sin importar cómo está inclinado el círculo.

El diámetro aparente medido del anillo: 51 mm.

Conversión a radianes (arcsec significa segundos de arco):

$$a = 51 \text{ mm} \times 0.03111 \text{ arcsec/mm} \times 4.848 \times 10^{-6} \text{ rad/arcsec} = \mathbf{7.6917 \times 10^{-6} \text{ rad}}$$

### Tarea 3

Algunas personas tienen dificultades con la percepción espacial en 3D cuando observan un diagrama 2D — esto es, para “decodificar” un diagrama que simula perspectiva (por ejemplo una proyección isométrica) usando la vista de una sección transversal. Ten cuidado con este punto y comenta los diagramas si es necesario. La aproximación que considera los rayos de luz paralelos cuando la fuente está lejos de la Tierra es en general conocida por los estudiantes (se usa a menudo para los rayos procedentes del Sol).

Todas las elipses pueden verse como la proyección de un círculo inclinado un ángulo  $i$  (la inclinación) respecto al plano del cielo (este plano es perpendicular a la línea de visión). El eje mayor es igual al diámetro del círculo y el eje menor es  $\cos(i)$  veces el eje mayor.

Se sigue que:

$$\cos i = \text{eje menor} / \text{eje mayor} = 37 \text{ mm} / 51 \text{ mm}$$

$$i = \cos^{-1}(37/51) = 0.7591 \text{ rad} = \mathbf{43.49 \text{ grados}}$$





## Guía del profesor

### Tarea 4

Sobre la gráfica puedes medir la distancia en el eje del tiempo entre el comienzo de la iluminación del anillo y el máximo de intensidad. Leemos de la gráfica  $t = 399$  días. Es sólo una coincidencia que el tiempo transcurrido esté próximo a un año.

Si el ángulo de inclinación hubiera sido de 90 grados, el anillo se vería desde la Tierra como una línea. En este caso, la diferencia en el tiempo transcurrido entre el momento en el que vemos la primera luz y el momento en el que vemos iluminarse el borde más lejano sería justo el diámetro del anillo dividido entre la velocidad de la luz.

### Tarea 5

$$\text{sen } i = d_p/d \Rightarrow d = d_p/(\text{sen } i)$$

$$d_p = c \cdot t$$

Combinado:

$$d = d_p/(\text{sen } i) = (c \cdot t)/(\text{sen } i) = (2.997 \times 10^8 \times 399 \times 24 \times 3600)/(\text{sen}(43.49)) = 1.5012 \times 10^{16} \text{ m}$$

### Tarea 6

$$D = d/a = (1.5012 \times 10^{16})/(7.6917 \times 10^{-6}) = 1.9517 \times 10^{21} = 63.2 \text{ kpc}$$

La distancia calculada por Panagia y colaboradores a partir de los datos originales (usando un método de cálculo más sofisticado) es  $D = 51.2 \pm 3.1$  kpc. (El valor que obtenemos nosotros está dentro de un margen de error razonable).

### Fuentes de error

Es posible usar esta pregunta para introducir un cálculo más formal de márgenes de error pidiendo a los alumnos que repitan el cálculo usando los valores de las medidas más grandes y más pequeños posibles. Aquí tienes las tendencias:

Diámetro angular  $a$  demasiado grande  $\Rightarrow$   $D$  demasiado pequeño (cuanto más cercano un objeto, más grande parece)

Diámetro aparente demasiado grande  $\Rightarrow$   $D$  demasiado pequeño

Factor de conversión demasiado grande  $\Rightarrow$   $D$  demasiado pequeño

$t$  demasiado pequeño  $\Rightarrow$   $D$  demasiado pequeño

$i$  demasiado grande  $\Rightarrow$   $D$  demasiado pequeño

Es un buen ejercicio para los estudiantes averiguar estas tendencias por ellos mismos.

### El origen de los dos anillos exteriores

La pregunta sobre el origen de los anillos exteriores es un buen ejemplo de una pregunta científica simple sin una respuesta clara (este situaciones ocurren a menudo en una ciencia de primera línea como la Astronomía).

La comunidad científica no se pone de acuerdo en sus orígenes, pero se sabe que los anillos fueron expulsados de la estrella progenitora más de 20,000 años antes de que explotara como una supernova. El porqué los anillos están tan bien definidos es un completo misterio. Se cree que una estrella gigante roja normalmente expulsa sus capas exteriores uniformemente en todas las direcciones.



[www.astroex.org](http://www.astroex.org)

