

Cálculo de distancias a las estrellas

Ricardo Moreno Luquero



Publicaciones de ApEA nº 11

CÁLCULO DE DISTANCIAS A LAS ESTRELLAS

Ricardo Moreno Luquero

Publicaciones de ApEA

Asociación para la Enseñanza de la Astronomía

No. 11 (Secundaria) - Junio 2007

Publicaciones de ApEA

Asociación para la Enseñanza de la Astronomía

Dibujo de Portada: Albert Domènech

Foto de Portada M13. Hubble, NASA, ESA

Comité de Redacción:

Esteban Esteban, Simón García, Rosa M. Ros y Ederlinda Viñuales

Dirección:

Rosa M. Ros (Vocal Editora de Publicaciones de ApEA)

Departamento de Matemática Aplicada IV

Universidad Politécnica de Cataluña

Jordi Girona 1-3, módulo C3, 08034 Barcelona

e-mail: ros@ma4.upc.edu

ISBN: 978-84-934442-4-2

D.L.

Impresión FLAIX ÒFSET



Esta obra está licenciada bajo la Licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional. Para ver una copia de esta licencia, visita <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.

ÍNDICE

Presentación	6
1. El telescopio como una cámara oscura. Cálculo de la distancia al Sol	7
2. Distancias a las galaxias usando triángulos	9
3. Distancias usando el concepto de paralaje	17
4. Cálculo de la distancia a la Luna por paralaje	19
5. Distancia a la estrella de Barnard por paralaje	22
6. Qué es un Nomograma	24
7. Distancia, luminosidad y magnitud de una estrella.....	26
8. Distancia a las estrellas por su magnitud aparente	29
9. Cálculo de distancias usando estrellas variables	31
10. Estimación del tamaño de nuestra galaxia.....	33
11. Uso de cefeidas para medir distancias en el cielo.....	35
12. La Ley de Hubble	37
13. Distancias con la Ley de Hubble	38
Soluciones a las Actividades	39
BIBLIOGRAFÍA	42

PRESENTACIÓN

¿Cómo saben los astrónomos a qué distancias están las estrellas, si nunca han viajado a ellas?, preguntan con frecuencia algunos escépticos. La respuesta es que no hay que ir hasta allí para saber la distancia a la que están. Los científicos se valen de sus conocimientos para deducir, a veces sólo aproximadamente, la distancia a las estrellas. Para ello sacan fotografías, miden tamaños de los objetos, analizan su luz, clasifican las estrellas, hacen suposiciones que a veces con el tiempo hay que corregir, etc. En definitiva, usan el método científico.

Creo que es interesante que nuestros alumnos puedan usar también esos métodos, y puedan medir esas distancias. Por eso se presentan aquí unas actividades, con las explicaciones pertinentes, para que un chico o una chica del segundo ciclo de la ESO o de Bachillerato pueda sentir la satisfacción personal de medir distancias a varias estrellas y galaxias.

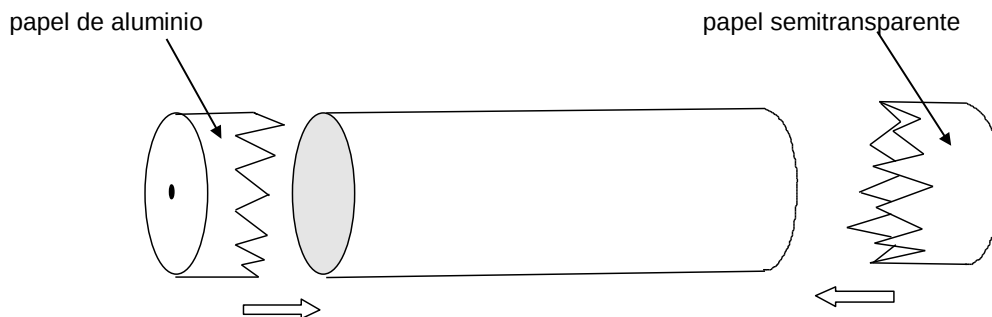
Se usan fotografías reales, y se aportan datos reales de estrellas y galaxias. Son cálculos sencillos y simplificados, pero similares a los que se hacen en la astronomía real.

Espero que sean útiles para los profesores y aficionados, y que contribuyan a ampliar el gusto y la atracción sobre esta ciencia apasionante.

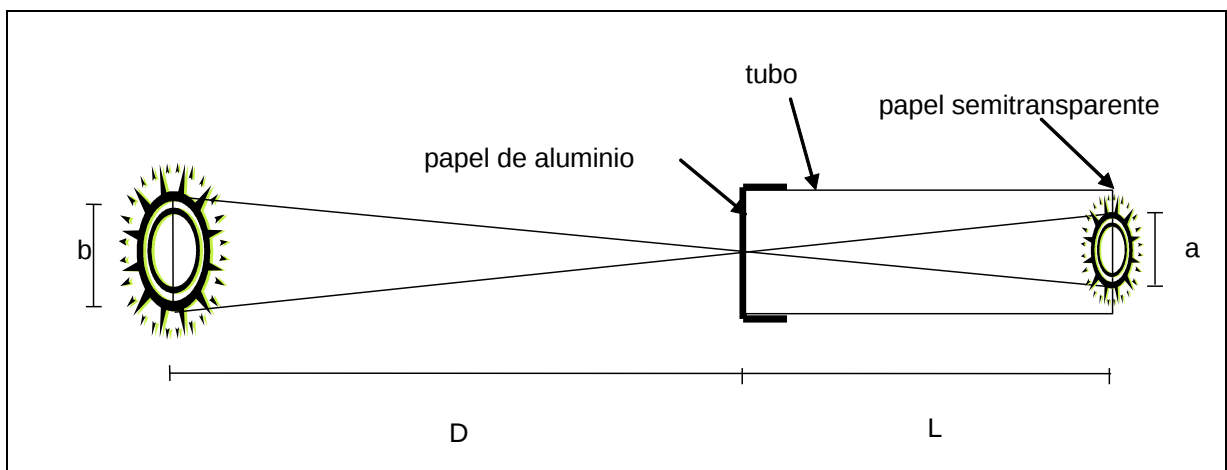
1. EL TELESCOPIO COMO UNA CÁMARA OSCURA. CÁLCULO DE LA DISTANCIA AL SOL

Cuando se hace una fotografía con un telescopio, el tamaño de los objetos depende fundamentalmente de la distancia focal del objetivo. Para ver porqué, trabajemos primero con una cámara oscura.

Cogemos un tubo de cartón y tapamos un extremo con papel de aluminio y el otro con papel semitransparente (papel cebolla o papel de seda), que nos hará de pantalla. Hacemos un pequeño agujero en el centro del papel de aluminio. Lo que tenemos es una cámara oscura.



Si miramos a través de la cámara oscura algo brillante, por ejemplo el Sol, se formará una imagen en la pantalla de papel semitransparente. La trayectoria de los rayos de luz puede seguirse en el siguiente dibujo:

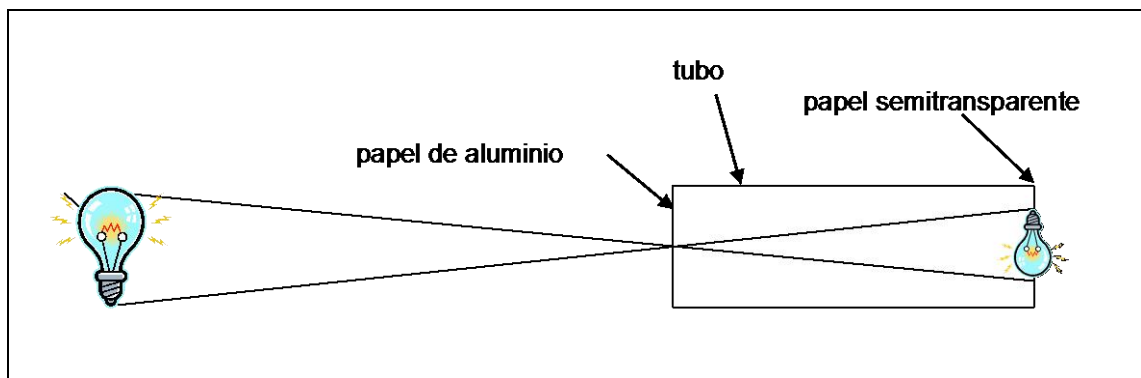


Se ve claramente que cuanto mayor es la longitud del tubo, mayor es la imagen que se forma. Los dos triángulos que se forman son semejantes, por tanto:

$$\frac{b}{D} = \frac{a}{L} \Rightarrow D = \frac{b \cdot L}{a}$$

Si sabemos que el Sol tiene un diámetro b de 1.400.000 km, podríamos calcular la distancia D entre el Sol y la Tierra. Bastaría con medir el tamaño a de la imagen que se forma, y la longitud L del tubo.

Observemos ahora una bombilla con la cámara oscura. La imagen es menos brillante que el Sol. Si aumentamos ligeramente el tamaño del agujerito en el papel de aluminio, la imagen mejora. El diámetro del orificio influye en la brillantez y en la nitidez de la imagen. Por desgracia, la influencia en ambos es en sentido opuesto: cuanto más grande es el agujero, más brillante es la imagen, pero menos nítida. A cada punto de la bombilla real le corresponde no sólo un punto de la imagen, sino varios, ya que hay varios rayos, ligeramente desviados, que pasan por el agujero.



Vamos a ver cómo tener más brillo sin perder nitidez. Para ello necesitaremos una lente, por ejemplo la de unas gafas de las que venden en farmacias. La longitud focal de la lente es la distancia a la que se forman con ella las imágenes. Para determinarla, ponemos la lente entre la bombilla y una pared blanca, y acercamos y alejamos la lente hasta que se forme en la pared una imagen nítida. La distancia entre la lente y la imagen es la distancia focal de la lente.

Cojamos ahora un tubo de longitud igual a la distancia focal de la lente, y construyamos una cámara oscura (con el papel de aluminio y el papel semitransparente). Observemos con ella la imagen de la bombilla. A continuación, hagamos en el papel de aluminio un agujero mucho más grande. La imagen aumenta su luminosidad, y a la vez se vuelve muy borrosa. Pero si ponemos la lente sobre el orificio, la imagen mantiene su buena luminosidad, y recupera la nitidez. Es importante observar que el tamaño de la imagen es el mismo con la lente que con el pequeño agujero, sólo cambia el brillo.

Lógicamente, cuanto mayor sea la longitud focal de la lente, más largo será el tubo y mayor será la imagen formada.

Cuando se acopla una cámara fotográfica a un telescopio, se quita el ocular y se deja sólo el objetivo. La longitud focal del objetivo es la que determinará el tamaño de la fotografía. Para estudiar el tamaño y la posición de los objetos que hay en ella, se puede asimilar el telescopio a una cámara oscura, aunque la trayectoria de los rayos sea distinta con la lente. De esa forma se pueden calcular tamaños de la misma forma que hemos hecho antes con el Sol, trabajando sólo con triángulos semejantes. Veámoslo en las siguientes actividades.

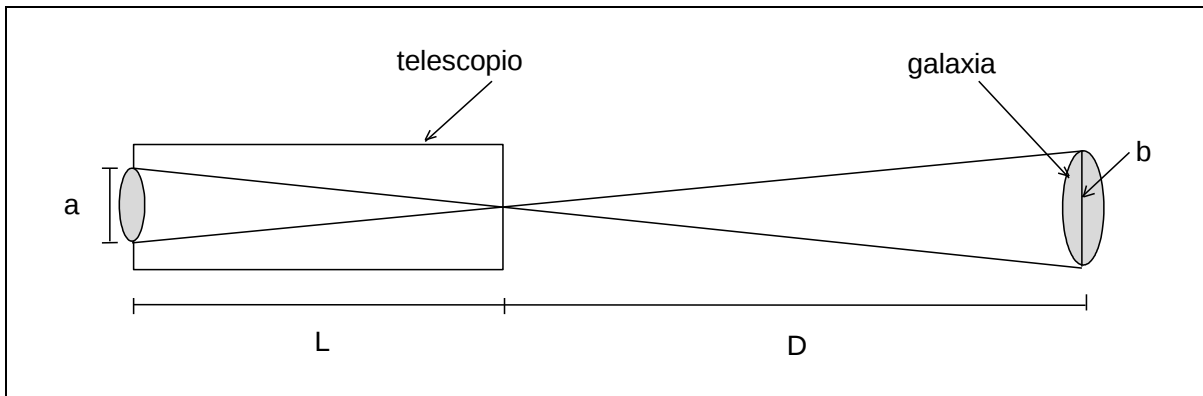
2. DISTANCIAS A LAS GALAXIAS USANDO TRIÁNGULOS

Objetivo: Determinar la distancia a galaxias cercanas usando triángulos semejantes.

Material: - siete fotos del cielo
- regla

Procedimiento:

1. Al hacer una fotografía de una galaxia con un telescopio, se puede establecer que:

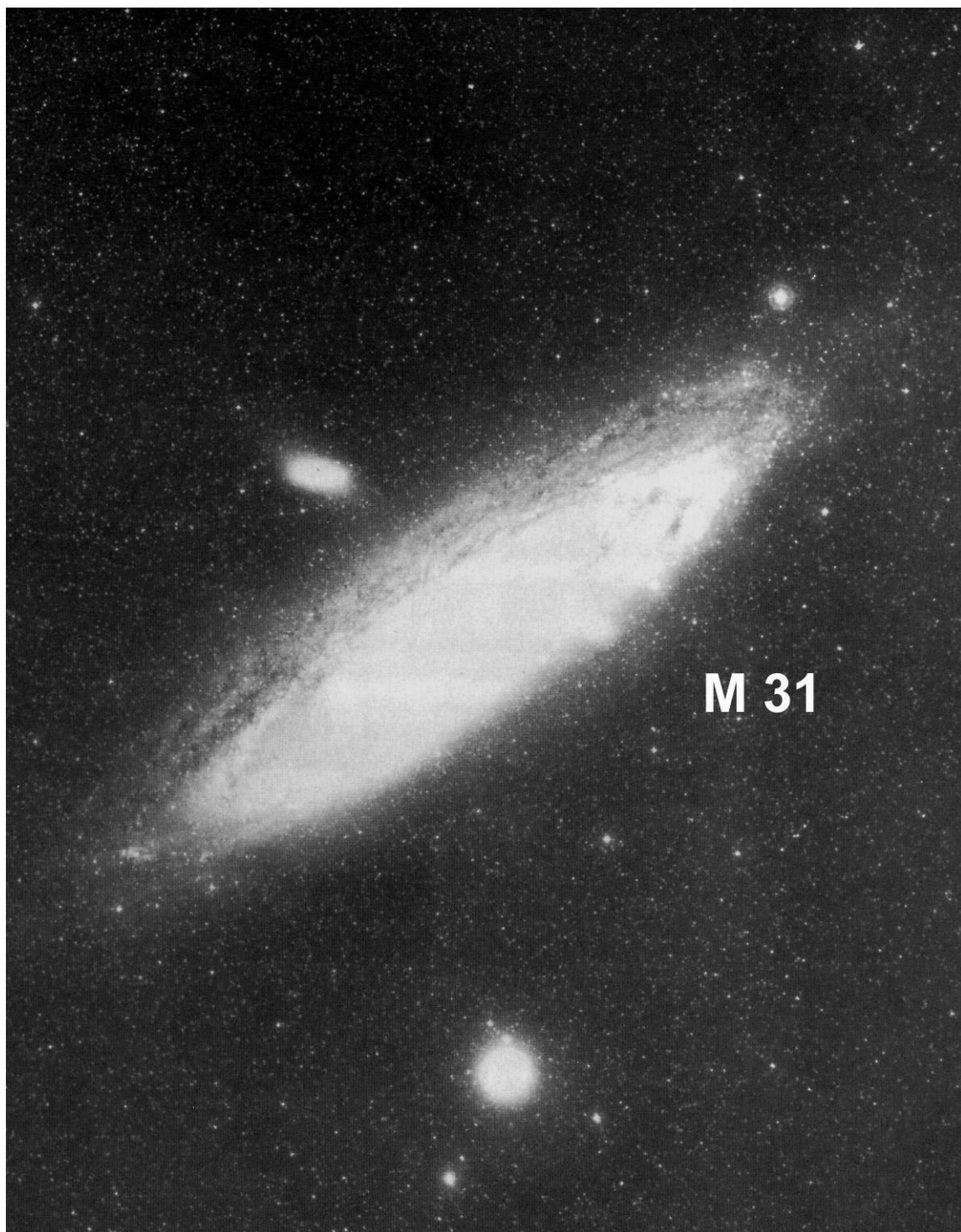


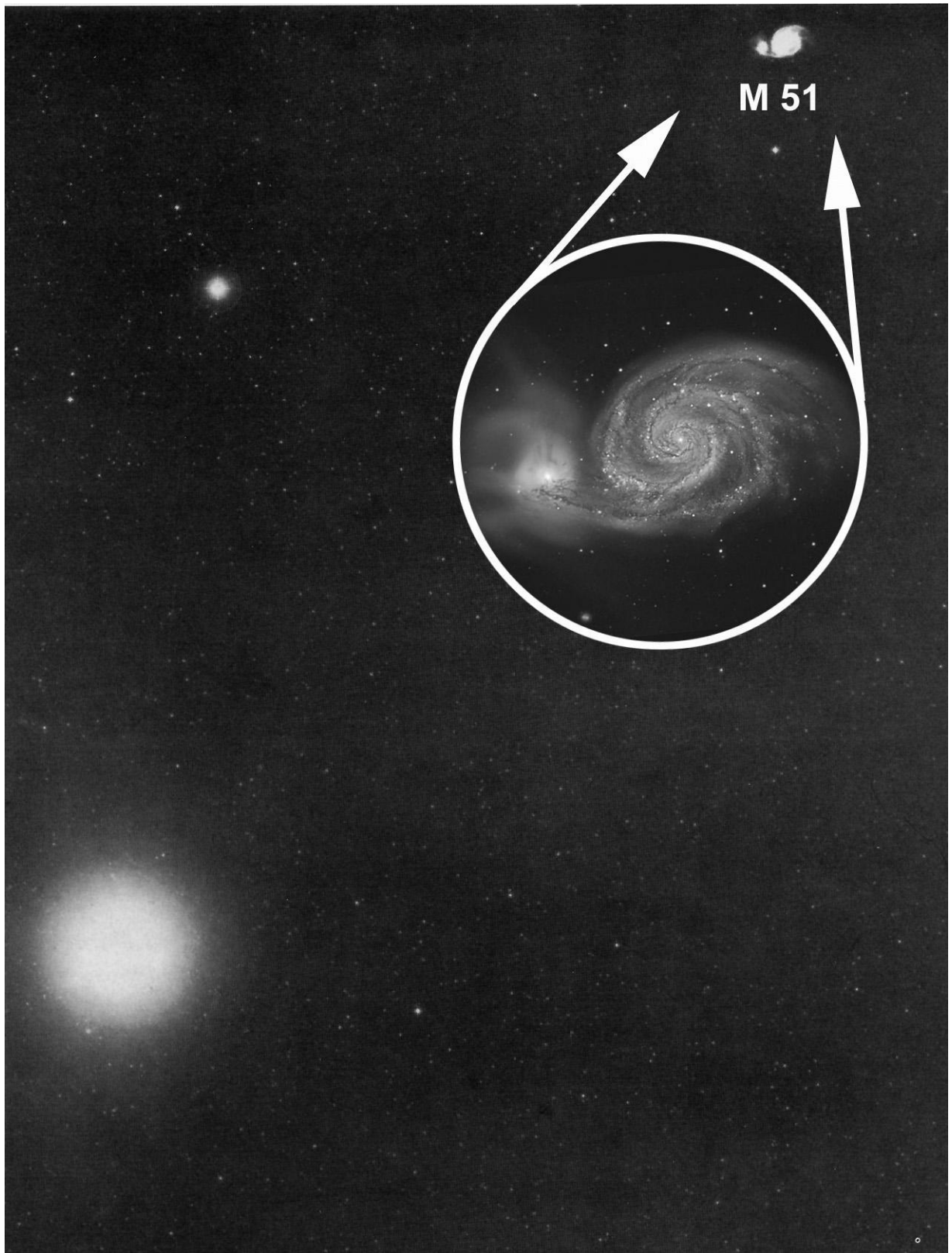
$$\frac{D}{b} = \frac{L}{a} \Rightarrow D = \frac{L \cdot b}{a} \quad (1)$$

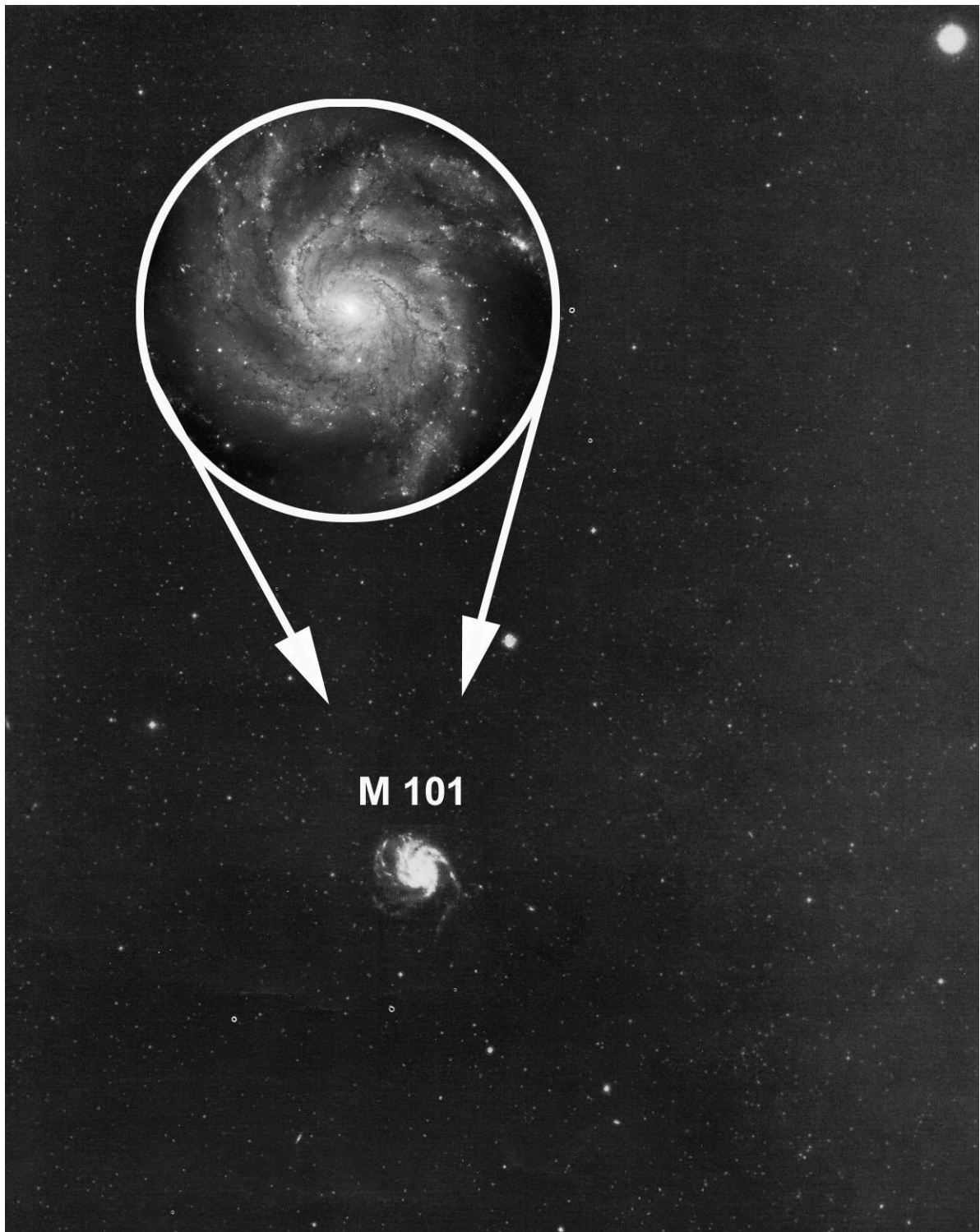
2. Vamos a suponer que todas las galaxias son de un tamaño similar a la nuestra, es decir, **b**= 100.000 a.l. (en la Actividad 9 haremos una estimación de esta medida). Aunque esta hipótesis no es exacta, sí nos sirve para hacer estimaciones.

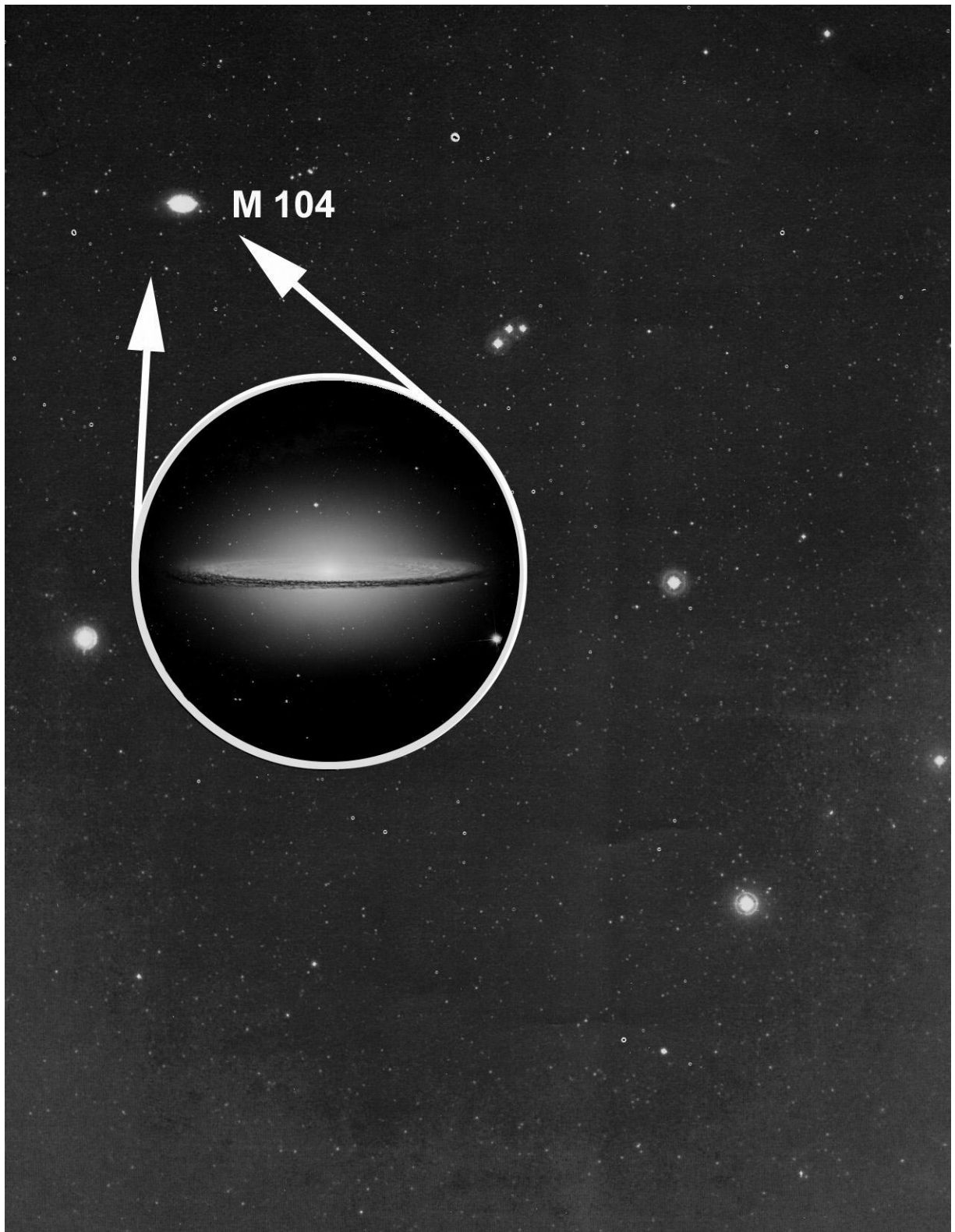
3. Las fotos fueron tomadas con un telescopio de longitud focal **L** = 310 cm. Mide el tamaño **a** de las imágenes de las galaxias, y haz una estimación de la distancia **D** a la que están, usando la fórmula (1). No confundas las pequeñas imágenes que debes medir con las imágenes ampliadas dentro de un círculo que están a su lado. Estas fueron tomadas con una longitud focal mucho mayor.

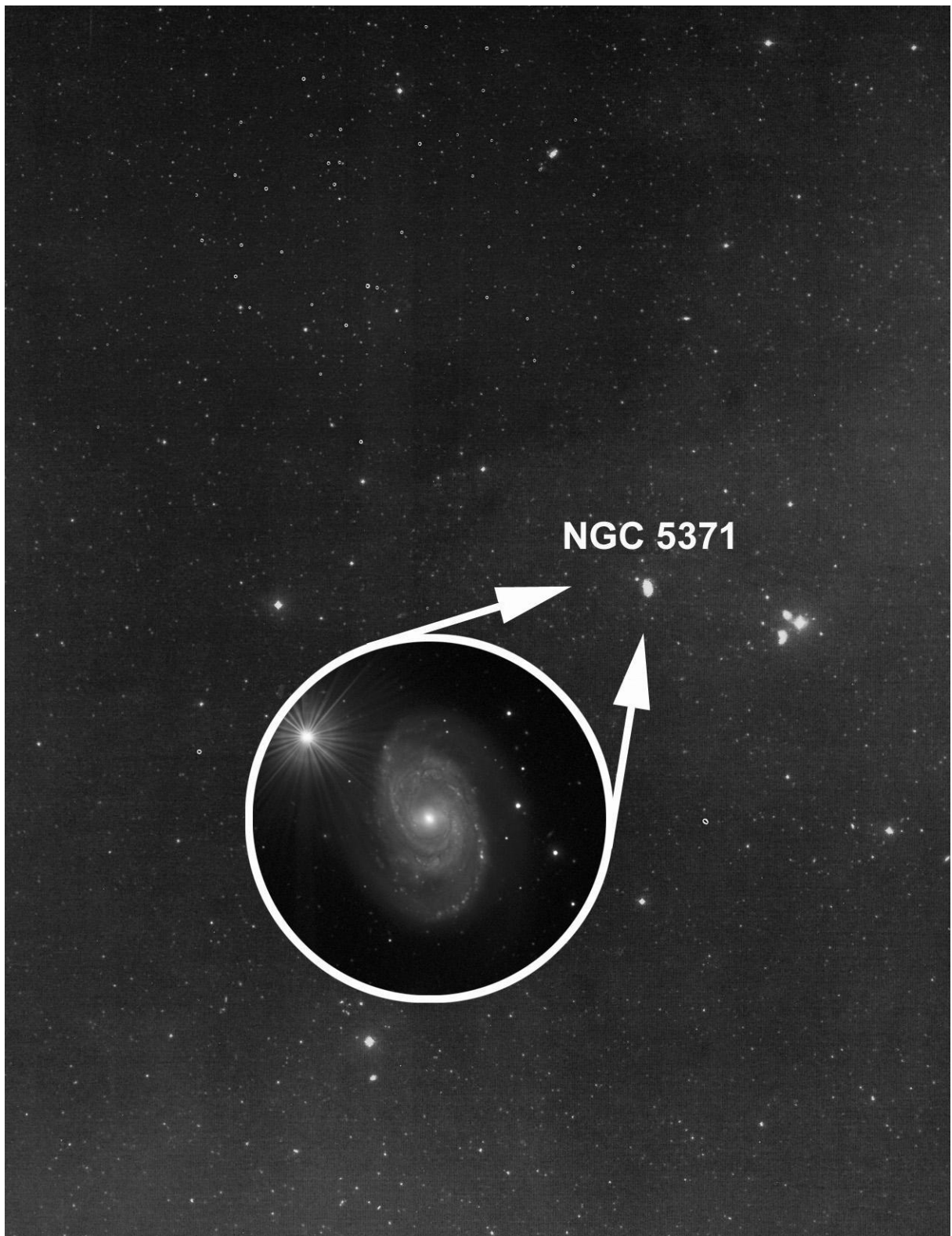
Objeto	a = Tamaño en la foto en cm.	D = Distancia (en millones de a.l.)
M 31		
M 51		
M 101		
M 104		
NGC 5371		
NGC 4565		
NGC 4725		
Galaxia del Cúmulo de Hércules		

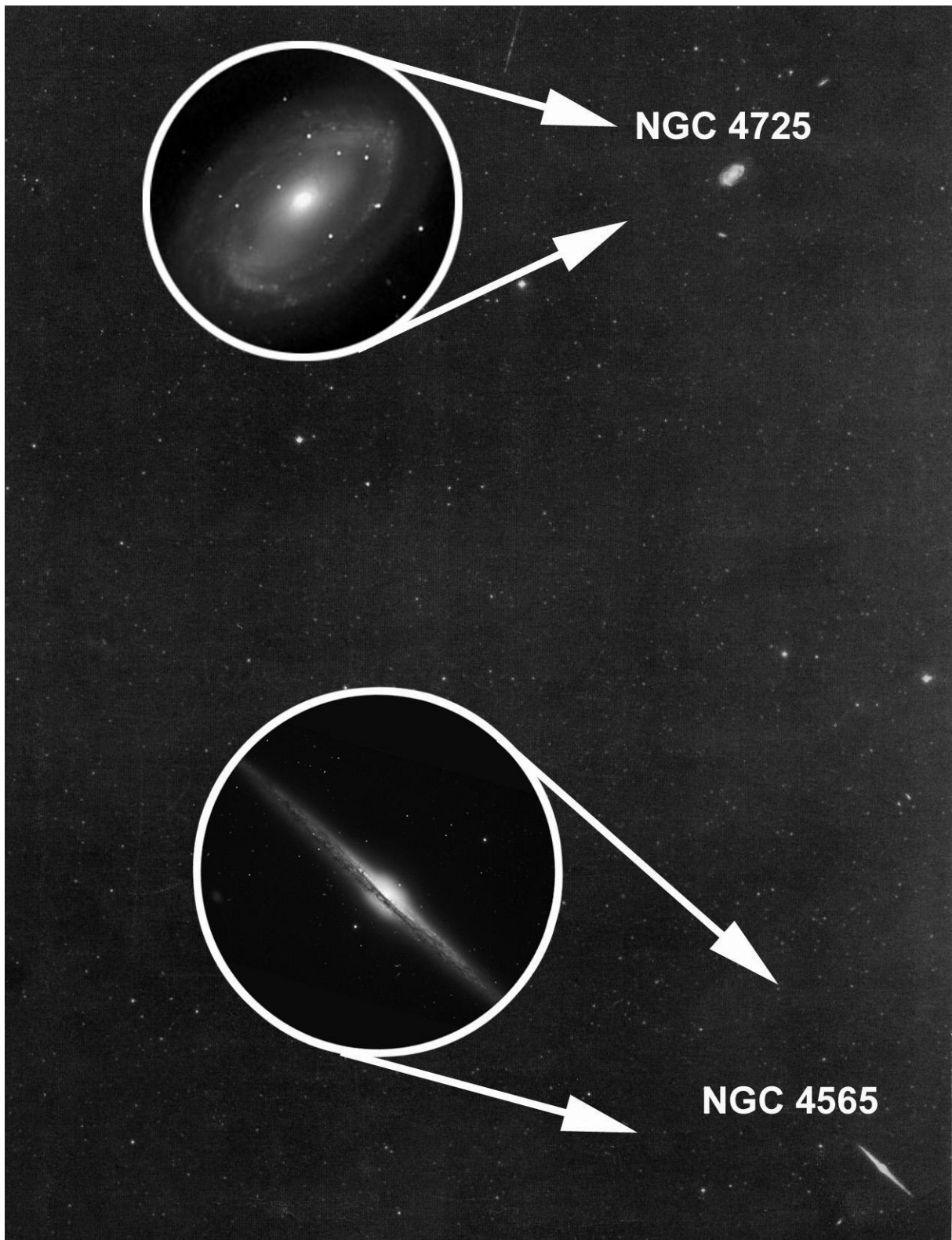


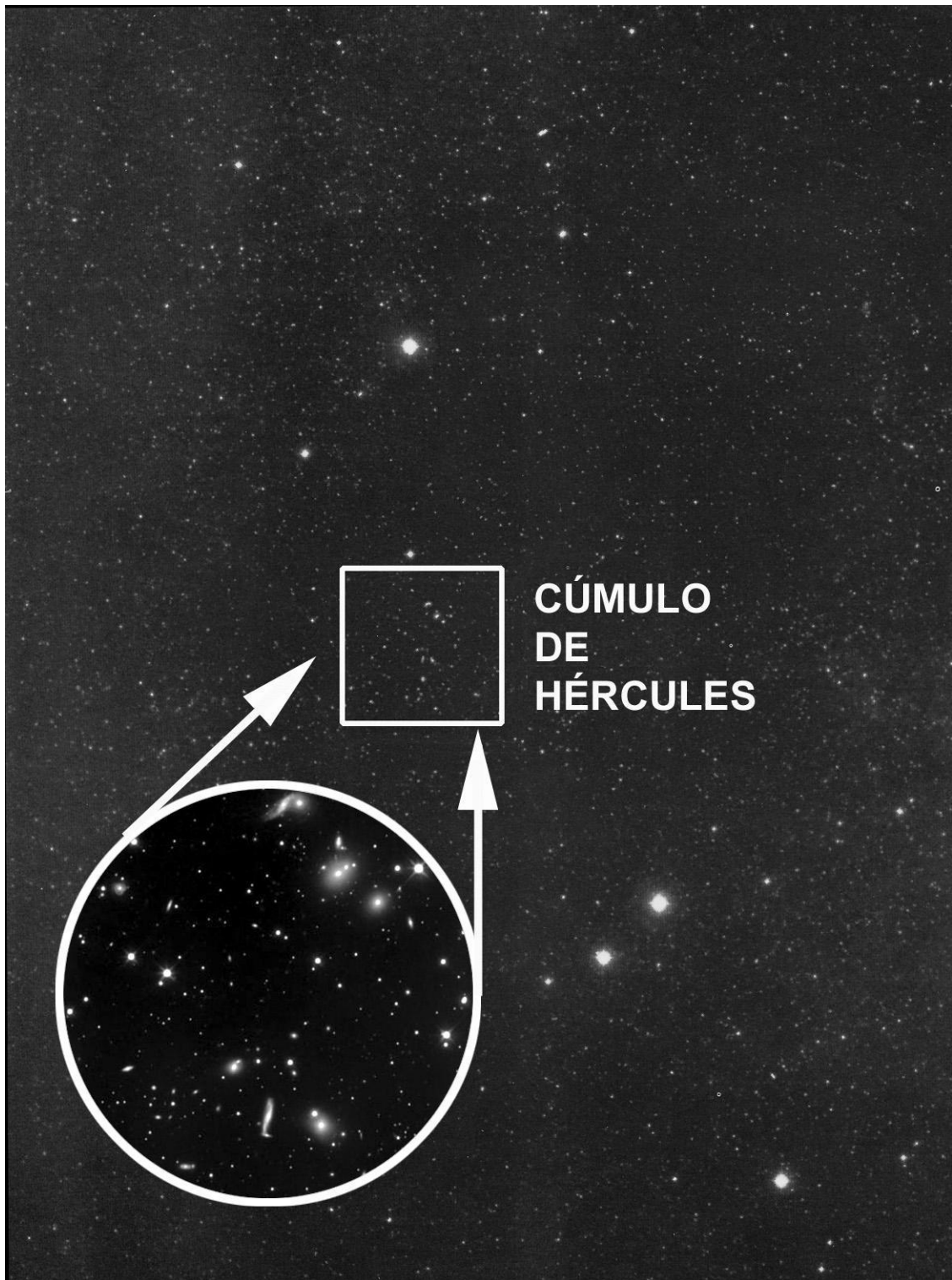






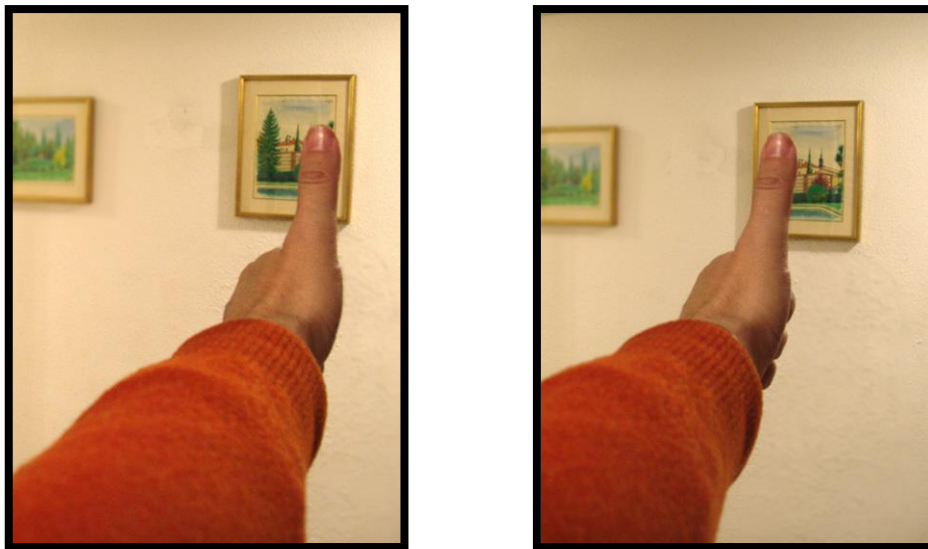






3. DISTANCIAS USANDO EL CONCEPTO DE PARALAJE

Un concepto que se usa en la fotografía astronómica para calcular distancias es la paralaje. Para entenderlo, pongámonos frente a una pared a una cierta distancia, en la que haya puntos de referencia: armario, cuadros, puertas, etc. Estiremos el brazo frente a nosotros, y pongamos el dedo pulgar vertical. Si cerramos ahora el ojo izquierdo, veremos al dedo y detrás por ejemplo el centro de un cuadro. Sin mover el dedo, abramos el ojo izquierdo y cerremos el derecho. El dedo ahora aparece desplazado sobre el fondo: ya no coincide con el centro sino con el borde del cuadro.



Por esta razón, cuando fotografiamos el cielo desde ciudades alejadas, los cuerpos cercanos, por ejemplo la Luna, aparecen desplazados respecto a las estrellas del fondo, que están muchísimo más lejanas. El desplazamiento es mayor cuanto más separados estén los lugares desde donde se toman las fotografías. Esa distancia se llama línea de base.

En la actividad siguiente vamos a usar el concepto de paralaje para calcular la distancia a la Luna a partir de dos fotografías tomadas desde dos ciudades que distan cerca de 2000 km.

Para poder observar la paralaje de la estrella más cercana en dos fotografías, tendríamos que tomarlas desde sitios tan alejados que no cabríamos en la Tierra. Los astrónomos usan un truco: hacen una foto un día, dejan que la Tierra recorra la mitad de la órbita alrededor del Sol, y toman otra foto de la misma zona de estrellas. Así consiguen líneas de bases de 300.000.000 km, que es el diámetro de la órbita terrestre alrededor del Sol.

La primera observación de paralaje de una estrella (61 Cygni) lo hizo Bessel en 1838. Aunque se sospechaba que las estrellas estaban muy lejanas, hasta entonces no se pudo medir con cierta precisión la distancia de las estrellas.

Actualmente, se usa la paralaje para medir distancias de estrellas que distan hasta unos 3600 años luz. Más allá la paralaje es inapreciable, y hay que usar otros métodos. Sin embargo estos otros métodos se basan en general en comparar las estrellas lejanas con otras cuya distancia se sabe por paralaje. Por tanto es básico el concepto de paralaje en Astronomía.

El satélite de la Agencia Espacial Europea Hipparcos (*High Precision Parallax Collecting Satellite*) realizó desde el año 1989 al 1993 una medición muy precisa del paralaje de más de un millón de estrellas. Con ello se ajustaron mucho mejor las medidas de distancias en el cielo.



En las siguientes actividades mediremos la distancia a la Luna y a la estrella de Barnard usando el concepto de paralaje.

4. CÁLCULO DE LA DISTANCIA A LA LUNA POR PARALAJE

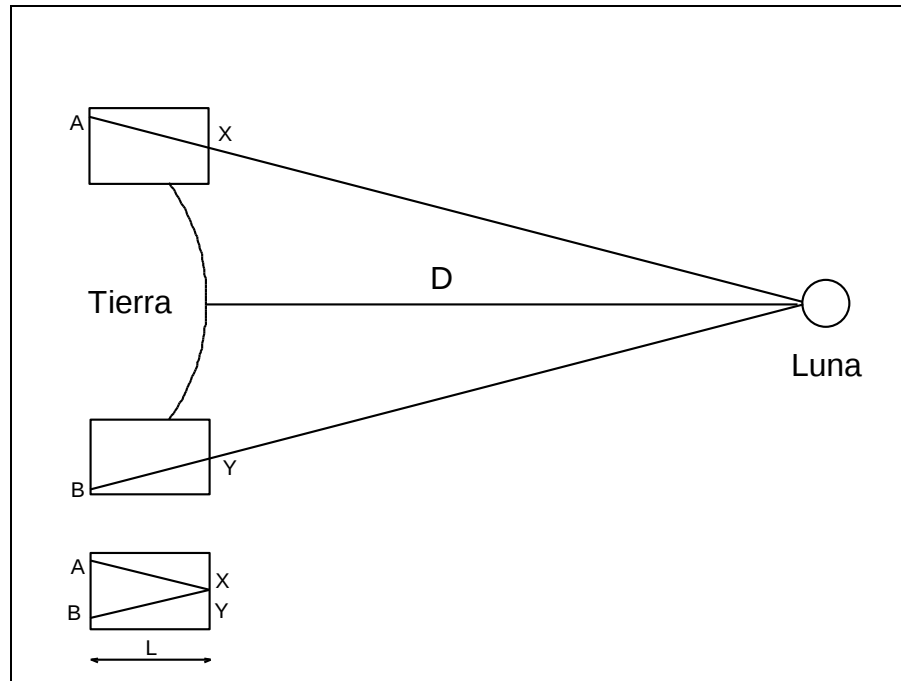
Objetivo: Determinar la distancia Tierra-Luna por paralaje con dos fotos de la Luna.

Material:

- 2 fotografías de la página siguiente
- 1 hoja de papel semitransparente
- una regla

Procedimiento:

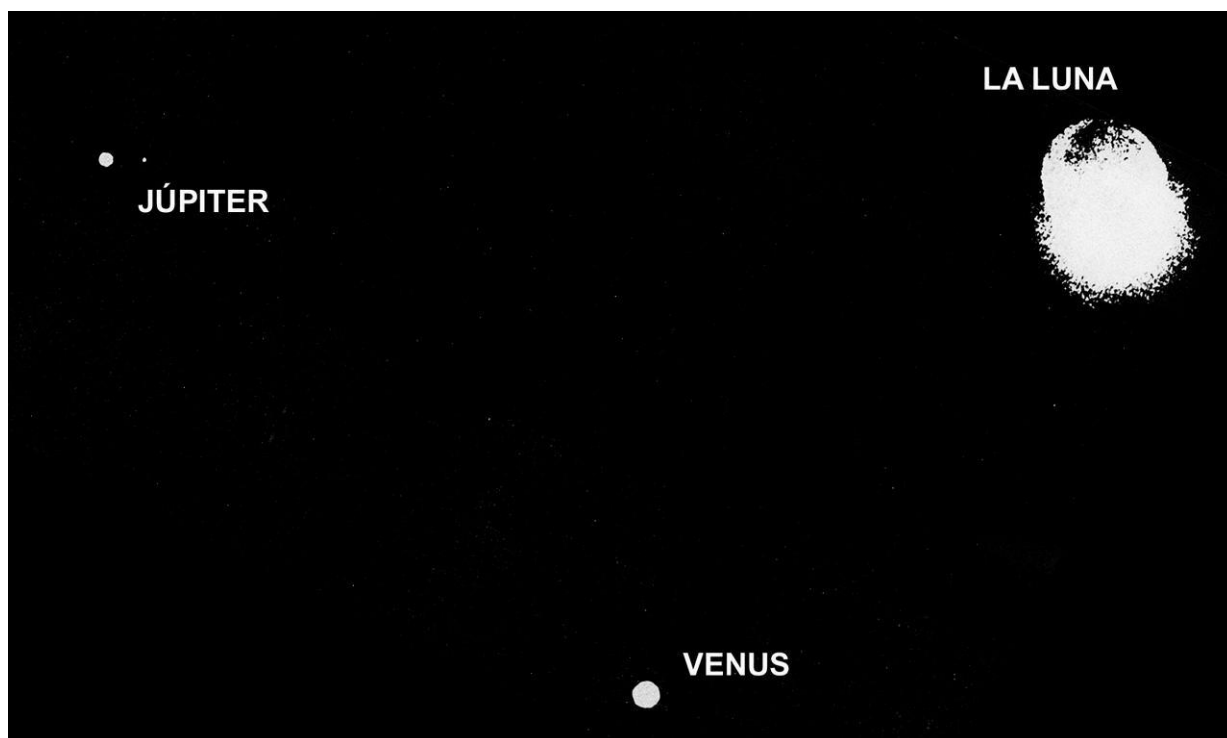
1. Si desde dos ciudades de la Tierra, suficientemente separadas, fotografiamos la Luna, ésta aparecerá ligeramente desplazada respecto a las estrellas del fondo. Aplicando el concepto explicado en el apartado anterior, podemos suponer el telescopio como una cámara oscura. Las estrellas del fondo (en este caso los planetas Júpiter y Venus), como están mucho más lejos, nos servirán de referencias fijas.



2. El triángulo que forma la Luna y las dos posiciones X,Y de los telescopios en la Tierra, es semejante al que forman las dos posiciones A y B de la Luna en la foto y el orificio de la cámara oscura. Por tanto:

$$\frac{\overline{XY}}{D} = \frac{\overline{AB}}{L} \quad (1)$$

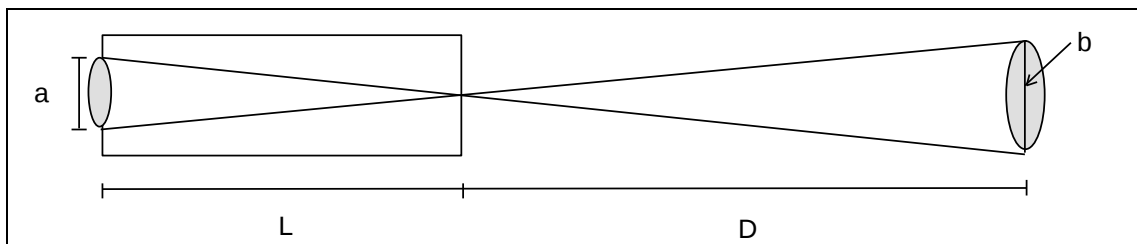
3. Las dos fotos que tenemos en la página siguiente fueron tomadas a la misma hora, desde dos ciudades que distan 1.950 km, y que están aproximadamente en el mismo paralelo. La longitud focal de los telescopios era 175 cm, que es la longitud L de la fórmula (1).



4. Calca en un papel semitransparente la posición de Júpiter, Venus y la Luna en la primera fotografía. La Luna tiene un halo en la parte inferior por estar sobreexpuesta: dibuja sólo la parte superior del contorno de la Luna, que se distingue bien.

5. Lleva ese papel a la otra fotografía y haz coincidir Júpiter y Venus. Calca la nueva posición de la Luna. Mide el desplazamiento que tiene la imagen de la Luna, que será el segmento **AB** de la fórmula (1). Con estos datos, calcula la distancia **D** a la Luna.

6. Midiendo el diámetro de la imagen de la Luna en cualquiera de las 2 fotos, ¿sabrías calcular el diámetro de la Luna?



5. DISTANCIA A LA ESTRELLA DE BARNARD POR PARALAJE

Objetivo: Hallar la distancia a la estrella de Barnard, por paralaje.

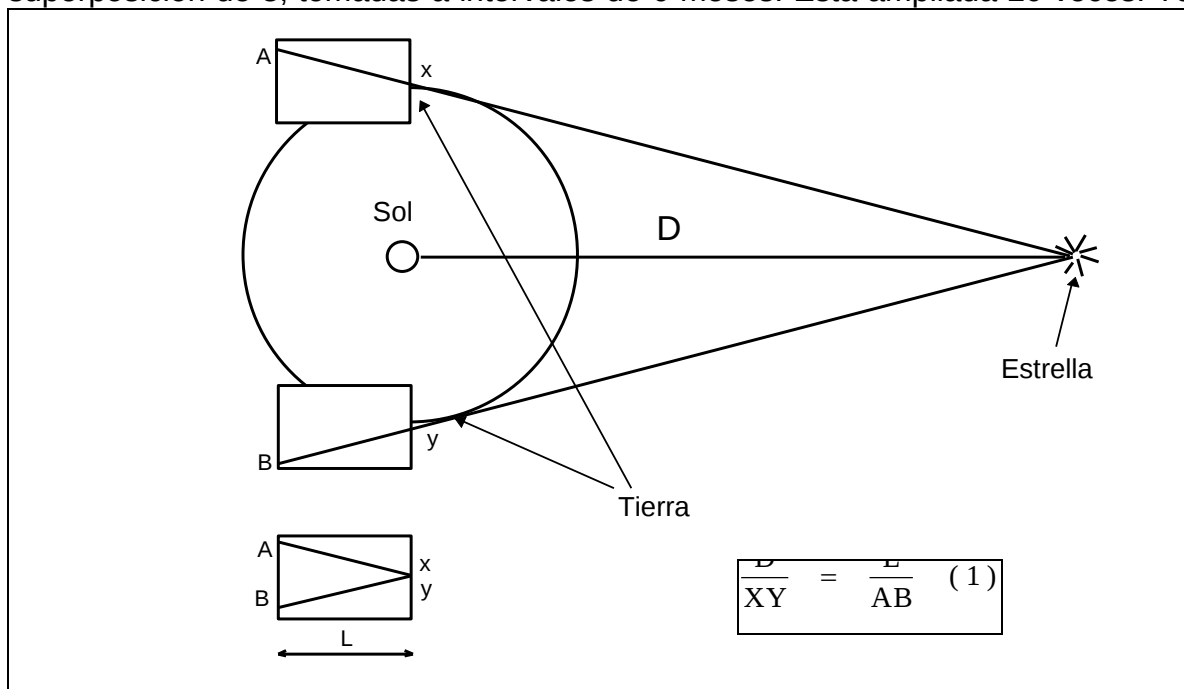
Material:

- Fotografía
- Regla graduada en mm

Procedimiento:

1. Los astrónomos usan la paralaje para determinar distancias a objetos lejanos, tomando fotos simultáneas desde dos puntos suficientemente alejados. Para trabajar con estrellas, los astrónomos toman fotos desde el mismo observatorio pero en puntos opuestos de la órbita terrestre alrededor del Sol, es decir, distanciando las fotos 6 meses.

2. La fotografía que tenemos en la página siguiente es realmente una superposición de 3, tomadas a intervalos de 6 meses. Está ampliada 20 veces. Todas

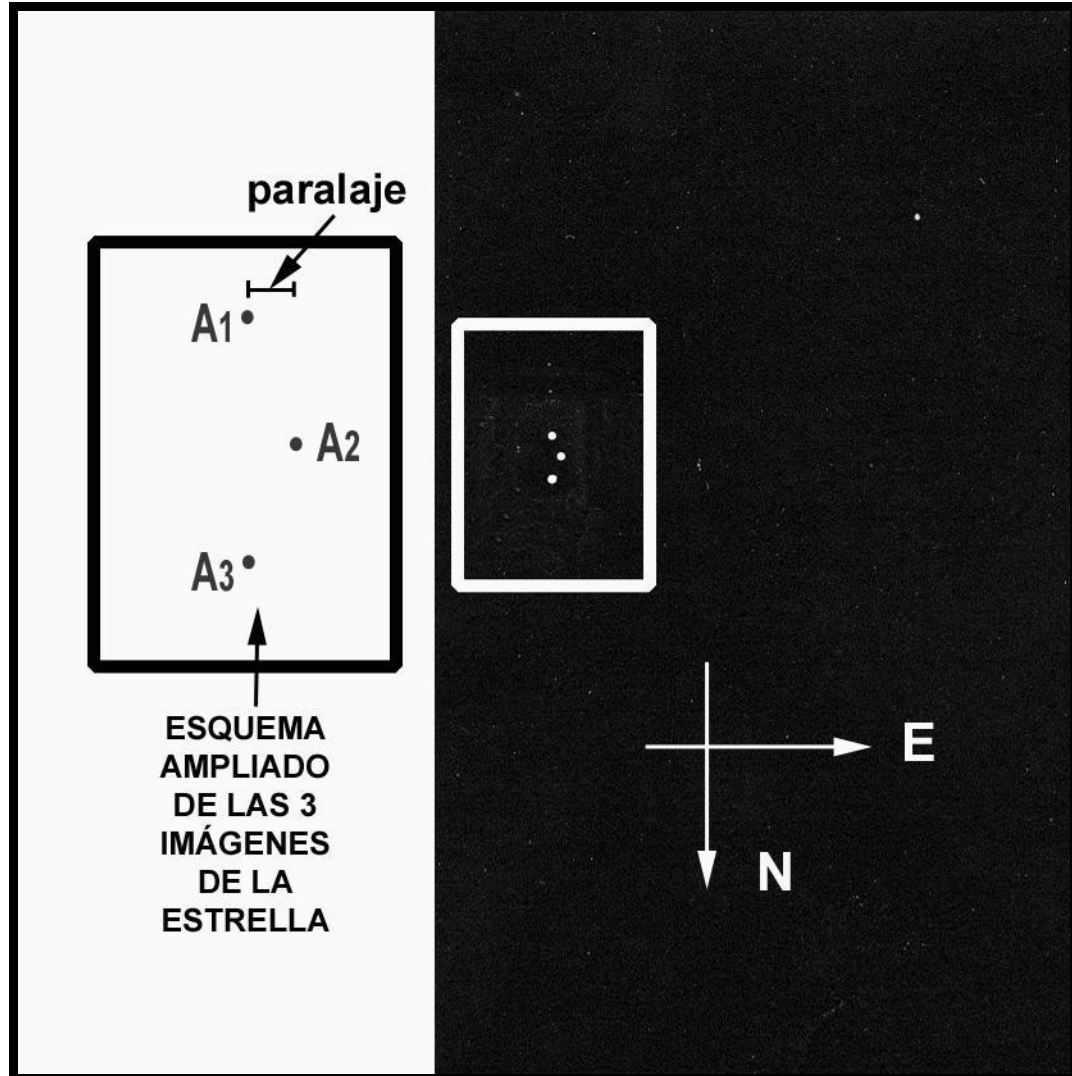


las estrellas coinciden, excepto la estrella de Barnard, que son los tres puntos blancos que aparecen arriba a la izquierda (no los confundas con el esquema ampliado a su izquierda).

3. La paralaje, debido al cambio de posición de la Tierra, es el desplazamiento en la dirección O-E (izq.-dcha.). El movimiento vertical N-S es causado por el movimiento de la estrella a través del espacio. Aquí sólo nos interesa el primero.

4. El telescopio que tomó la foto tiene la longitud focal $L=10$ m. El diámetro XY de la órbita terrestre es 300.000.000 km

5. Mide el desplazamiento horizontal de la estrella en la fotografía (no en el esquema de la izquierda). Como la fotografía está ampliada veinte veces, el desplazamiento AB real será veinte veces menor, o sea, hay que dividirlo entre 20. Con estos datos, calcula la distancia a la estrella con la fórmula (1). Pásalo a años luz ($1 \text{ a.l.} = 10^{13} \text{ km}$).



Cuestiones

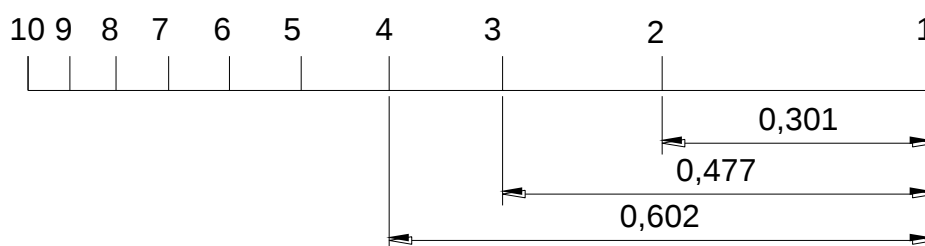
1. En otra foto sin ampliar tomada con el mismo telescopio de antes, la estrella más brillante del cielo, Alfa Centauro (o Rigil Kent) presenta una paralaje de $0'073$ mm. Calcula su distancia en a.l.

2. La estrella más brillante en el hemisferio norte es Sirio. Presenta un desplazamiento de $0'035$ mm. ¿A qué distancia está?

3. Otras estrellas brillantes que se pueden ver a simple vista desde el hemisferio norte son Procyon, en Canis Minor y Aldebarán, en Taurus. Tienen un desplazamiento por paralaje de $0'028$ mm y $0'0047$ mm respectivamente. Calcula su distancia hasta nosotros.

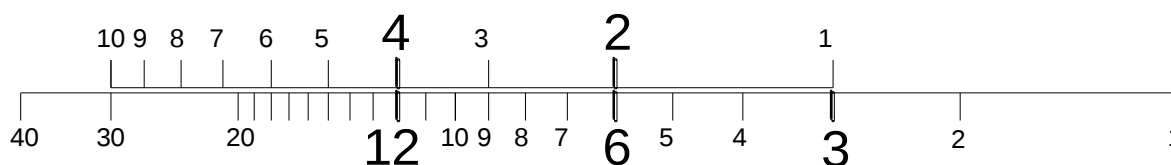
6. QUÉ ES UN NOMOGRAMA

Supongamos que tenemos una recta con un origen de medidas O. Vamos a graduarla de la siguiente forma: el 1 lo ponemos a una distancia del origen de $\log 1 = 0$, es decir, sobre el origen. El 2 lo ponemos a una distancia del origen igual a $\log 2 = 0,301$, el 3 a una distancia de $\log 3 = 0,477$, el 4 a una distancia de $\log 4 = 0,602$, etc. Así tendríamos una escala logarítmica de los números naturales.



Igual se podría hacer una escala logarítmica de $\log(a^2)$ ó de $\log\sqrt{a}$

Por otra parte, todos sabemos que los logaritmos transforman los productos en sumas, los cocientes en restas y las potencias en multiplicación por el exponente. Por eso, si queremos multiplicar dos números y los tenemos representados en escalas logarítmicas, basta con sumarlos, ya que estamos sumando los logaritmos. En eso se basaban las antiguas reglas de cálculo. Por ejemplo, para multiplicar $3 \times 2 = 6$ bastaba sumar al $\log 3$ (marcado con 3) el $\log$ de 2 (marcado con 2). Igual con $3 \times 4 = 12$:



Un nomograma es algo parecido. Es un artificio gráfico con escalas logarítmicas, que equivale a una fórmula más o menos complicada que relaciona tres magnitudes. Usando escalas adecuadas, los logaritmos de las tres magnitudes están alineados en el nomograma.

Vamos a ver un ejemplo. Supongamos la fórmula sencilla $c=a \cdot b$. Si aplicamos logaritmos (da igual si son decimales que neperianos, aunque aquí usaremos logaritmos en base 10)

$$\log c = \log(a \cdot b)$$

$$\log c = \log a + \log b$$

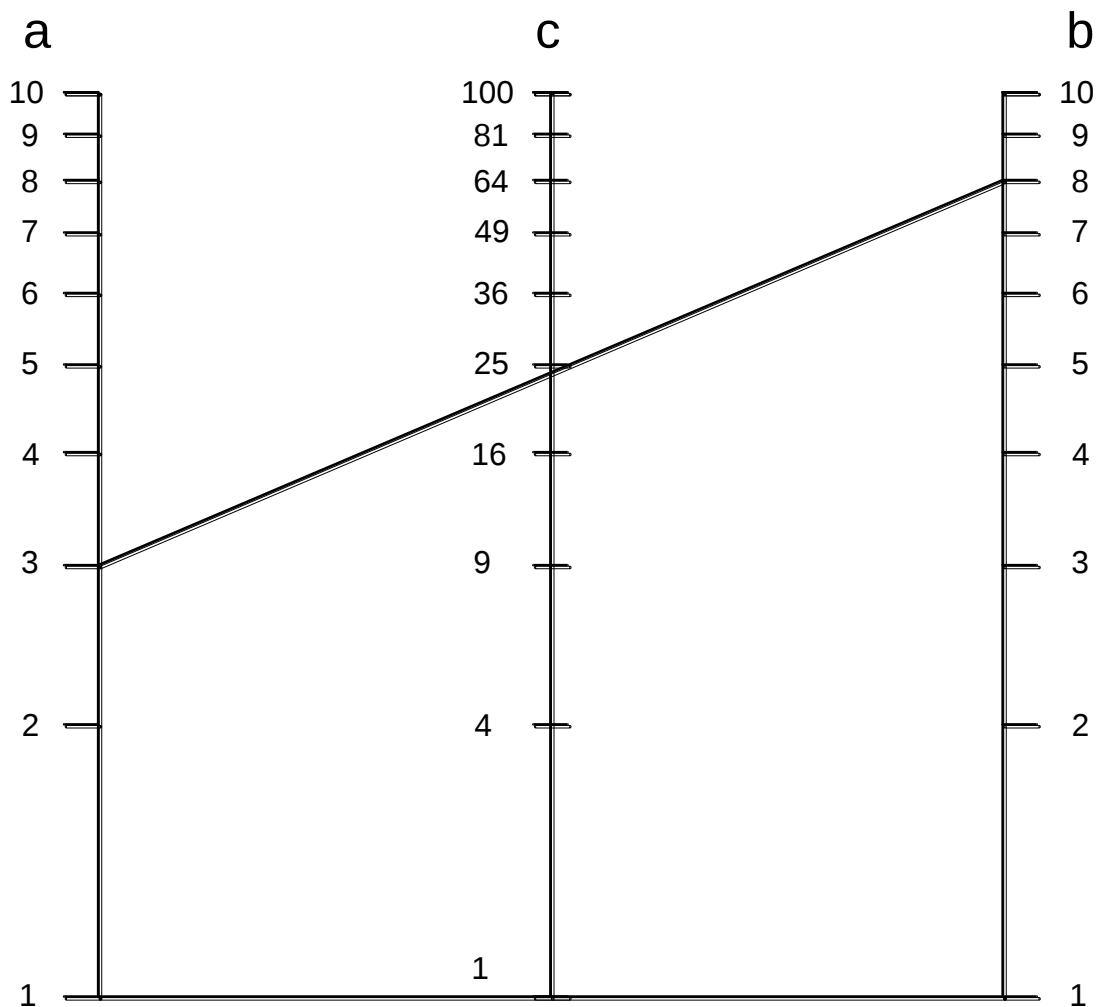
Si dividimos por 2 ambos términos:

$$\frac{\log c}{2} = \frac{\log a + \log b}{2}$$

$$\log \sqrt{c} = \frac{\log a + \log b}{2}$$

Lo que podemos interpretarlo como que el primer término es la media (semisuma) de log a y de log b.

Si ponemos dos escalas logarítmicas verticales de los número naturales (log a y log b), y en el medio, equidistante de las anteriores, ponemos una escala logarítmica de $\sqrt{c}$ (o sea, ponemos 81 a la distancia de $\log \sqrt{81} = \log 9$), la fórmula anterior nos dice que los tres valores de a, b y c están alineados. Tendríamos el nomograma de la fórmula $c = a \cdot b$:



En las siguientes actividades, emplearemos un Nomograma llamado M-D-L.

7. DISTANCIA, LUMINOSIDAD Y MAGNITUD DE UNA ESTRELLA

A simple vista, en un lugar oscuro y en una noche sin Luna, se pueden contar unas 3.000 estrellas. No todas aparecen igualmente brillantes, ni están uniformemente distribuidas. ¿Las más brillantes son las más cercanas? En unos casos sí y en otros no. Hay estrellas muy cercanas que apenas se ven y otras que brillando mucho, son muy lejanas pero gigantes. Tampoco tienen todas el mismo color, aunque las diferencias son sutiles. Unas son rojizas, otras amarillentas, blancas o incluso verdosas o azuladas. A través de prismáticos, y desenfocándolos levemente, se aprecian mejor. Para un observador avezado del cielo, un placer indefinible es ir distinguiendo esas suavísimas diferencias de tono.

Una bombilla de 100 vatios luce más que una de 25, tiene más "potencia", irradia más luz a su alrededor. Lo mismo pasa con las estrellas: unas irradian más luz a su alrededor que otras, son más "potentes" que otras. Esa cualidad se mide en vatios, y se llama luminosidad.

Si una bombilla de 100 w la ponemos lejos, y otra igual la ponemos a nuestro lado, ésta nos da más luz, la vemos más brillante aunque realmente tengan la misma luminosidad, los mismos vatios. Si dos estrellas tienen la misma luminosidad, es decir, son igual de potentes, pero una está al doble de distancia de nosotros, la vemos brillar más débil.

Hiparco de Nicea, en el siglo II a.C., hizo el primer catálogo de estrellas. Clasificó más de 1000. Las más brillantes decía que eran de 1ª magnitud y las más débiles, que eran de 6ª. Así inventó un sistema de división de brillos de las estrellas que aún está vigente hoy, aunque ligeramente retocado con medidas más precisas basadas en fotómetros. Una estrella de magnitud 2 es más brillante que otra de magnitud 3. Las hay incluso de magnitud 0 y de magnitud negativa (Sirio tiene magnitud -1'5). Prolongando la escala, Venus llega a adquirir magnitud -4, la Luna llena -13, y el Sol -26'7.

La relación entre magnitudes y luminosidades es la siguiente:

$$m_1 - m_2 = 2.5 \cdot \log \frac{L_2/4\pi d_2^2}{L_1/4\pi d_1^2} \quad (1)$$

Aproximadamente, una estrella de magnitud 1 es 2'5 veces más luminosa que otra de magnitud 2, ésta 2'5 veces más que otra de magnitud 3, etc. Esto hace que una diferencia de 5 magnitudes sea equivalente a 100 veces más brillo.

A simple vista y en sitios oscuros, se puede llegar a ver estrellas de magnitud 6. Con unos buenos prismáticos se llega a la 9ª ó 10ª. Con telescopios de aficionados se ven estrellas de magnitud 12 ó 14, y en grandes telescopios, de magnitud 20. Con placas fotográficas y varias horas de exposición, que van acumulando la luz, se llega hasta la magnitud 25. Con el Telescopio Espacial Hubble se ha llegado hasta la magnitud 29.

Pero, como hemos visto, una cosa es el brillo aparente, visto desde la Tierra, y otra el brillo real de la estrella. Por ejemplo, Canopus emite 50.000 veces más luz que Sirio, y sin embargo, al estar mucho más lejos, la vemos la mitad de brillante. La estrella *S de Dorado* es quizá la más brillante que se conoce y sin embargo no se ve a simple vista. Para poder comparar el brillo de unas y otras estrellas, se ha inventado el concepto de *magnitud absoluta*, que es la que tendría si estuviera separada de nosotros 10 parsecs (32'6 años luz). He aquí las magnitudes absolutas y relativas de las estrellas más brillantes de nuestro hemisferio.

LAS ESTRELLAS MÁS BRILLANTES						
Nombre	Magnitud aparente	Magnitud absoluta	Temperatura °K	Luminosidad (Sol = 1)	Radio (Sol = 1)	Masa (Sol=1)
SOL	-25'7	4'8	5.800	1	1	1
Sirio	-1'52	1'4	11.200	26	1'8	2'5
Canopus	-0'86	-7'4	8.000	80.000	210	25
αCentaurio	-0'33	4'7	6.000	1'1	1	1'1
Vega	0'14	0'6	11.200	50	2'4	3
Capella	0'21	-0'6	5.500	150	12	4'2
Arturo	0'24	-0'2	4.500	100	30	4
Rigel	0'34	-5'8	12.500	18.000	42	17
Proción	0'53	2'8	6.500	5'4	2	1'1
Altair	0'89	2'4	8.600	9	1'3	1'5
Aldebarán	1'06	-0'1	3.300	90	60	4
Pollux	1'21	1'2	4.200	28	16	2
Antares	1'23	-4'0	3.100	3.100	480	30
Deneb	1'33	-5'2	10.000	10.000	42	15

La relación anterior, aplicada a una misma estrella pero a dos distancias, d y 10 parsecs, nos da la relación entre magnitud aparente y absoluta de una estrella:

$$m_{ap} = M_{abs} + 5 \cdot \log \frac{d(a.l.)}{32'6}$$

Aplicando la relación (1) al Sol y a una estrella cualquiera de luminosidad L, que está a una distancia d y que se la ve con una magnitud aparente de m, queda:

$$m - 4'72 = 2'5 \cdot \log \frac{3'9 \cdot 10^{26} / 10^2}{L/d^2}$$

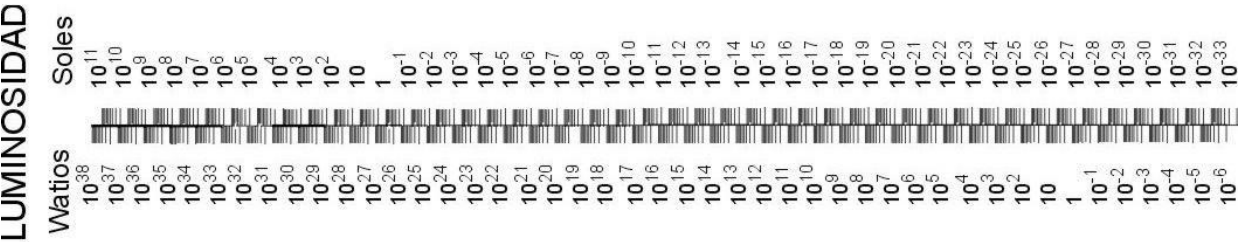
$$m = 4'72 + 2'5 \cdot \log(3'9 \cdot 10^{24}) - 2'5 \cdot \log(L/d^2)$$

$$m = 158'4 - 2'5 \cdot \log(L/d^2) = 158'4 - 2'5 \cdot \log L + 2'2'5 \cdot \log d$$

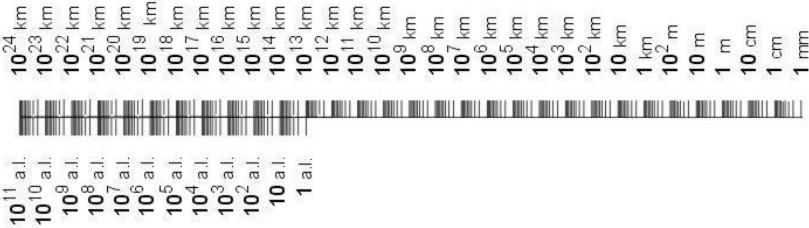
También se puede escribir:

$$\frac{(m - 158'4) + 2'5 \cdot \log L}{2} = 2'5 \cdot \log d$$

Esto significa que $(2'5 \cdot \log d)$ es media entre $(m - 158'4)$ y $2'5 \cdot \log L$. Esto se puede poner de forma gráfica en un nomograma, en el que las medidas de m, L y d estén siempre en una línea recta. Las distancias d están en años luz y en kilómetros; la luminosidad L está en soles y en vatios. Usaremos ese Nomograma en la actividad siguiente.

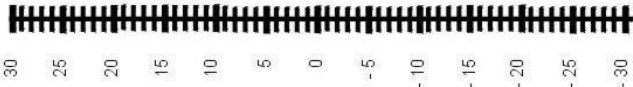


DISTANCIA



NOMOGRAMA M-D-L

**Magnitud
aparente**



8. DISTANCIA A LAS ESTRELLAS POR SU MAGNITUD APARENTE

Objetivo: Calcular la distancia a las estrellas usando su magnitud aparente y la luminosidad de las estrellas. También, calcular sus magnitudes absolutas.

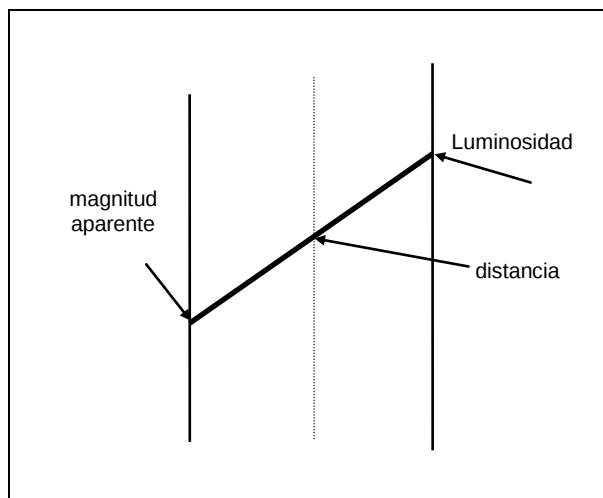
Material: - Nomograma M-D-L
- regla

Procedimiento:

1. La magnitud aparente m de una estrella indica su brillo vista desde la Tierra. Dependerá de su luminosidad (potencia) L y de la distancia d a la que está. Estas magnitudes se relacionan por la fórmula

$$\frac{(m - 158'4) + 2'5 \cdot \log L}{2} = 2'5 \cdot \log d$$

que, como es un poco complicada, vamos a sustituirla por el Nomograma M-D-L, que es un artificio gráfico que equivale a la fórmula. Los tres datos (magnitud aparente, distancia y luminosidad) de una estrella están siempre alineados en el Nomograma según una recta:



2. Algunas escalas son logarítmicas, por lo que sus divisiones intermedias no están separadas uniformemente. En el recuadro inferior del nomograma se indica, ampliadas, cómo son esas divisiones.

3. La distancia a Sirio se estima por paralaje en 9 a.l. Su magnitud aparente m es $-1'5$. ¿Cuál es su luminosidad? ¿Es mayor o menor que el Sol?

4. La estrella visible más cercana a nosotros es Alfa Centauro, que está a $4'1$ a.l. Su magnitud aparente es 0 . ¿Qué luminosidad tiene? ¿Es mayor o menor que el Sol?

5. Analizando la luz de una estrella y por otros datos, los astrónomos pueden determinar la luminosidad de una estrella. Betelgeuse, en Orión, tiene una luminosidad de $5 \cdot 10^{30}$ w, y una magnitud aparente de 0'4. ¿A qué distancia está?

6. La estrella Polar tiene una luminosidad equivalente a 2000 soles. Su magnitud aparente es de 2'0. ¿A qué distancia está?

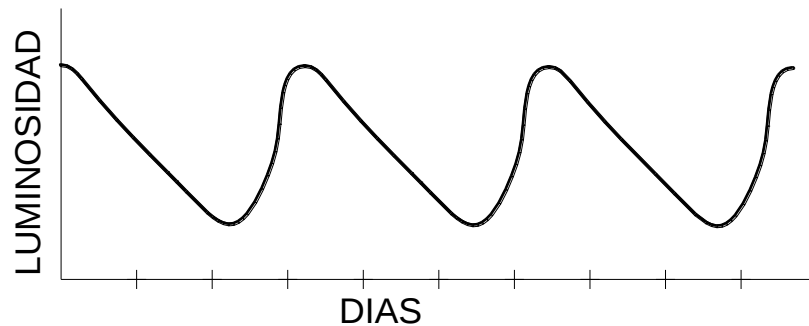
7. Rigel, otra brillante estrella de la constelación de Orión, tiene una magnitud aparente de 0'1. Se estima que su potencia es de 3000 veces la del Sol. ¿A qué distancia está?

8. Deneb es la estrella más brillante de Cygnus. Su magnitud aparente es 0'1, y su luminosidad se estima en $4 \cdot 10^{30}$ w. ¿A cuántos años luz está de la Tierra?

9. CÁLCULO DE DISTANCIAS USANDO ESTRELLAS VARIABLES

Ya desde antiguo nuestros antepasados observaron que algunas estrellas tienen un comportamiento que se sale de lo ordinario, y les pusieron nombres como *Mira*, la Maravillosa, o *Algol*, que en árabe significa Demonio.

Hoy se conocen muchas estrellas que varían su luminosidad. Los científicos se esfuerzan en explicar cómo funcionan y cuáles son las razones de su comportamiento. Hay algunas que son especialmente interesantes para calcular distancias. Son estrellas que palpitan, normalmente por estar en un período crítico de su vida. Unas son las **cefeidas**, llamadas así por ser su prototipo δ de Cefeo. Su curva de luz es muy característica, y por lo tanto, viendo desde la Tierra cómo varía su luz, se puede identificar muy bien si es una cefeida.



Estas estrellas son muy importantes en Astronomía porque sirven para calcular distancias en el Universo. Tienen períodos que van de 1 a 50 días. La astrónoma *Henrietta Leavitt*, a principios del siglo XX, estudió las cefeidas en las *Nubes de Magallanes*, pequeñas galaxias muy cerca de la nuestra. Todas esas cefeidas están a una distancia similar de nosotros, y observó que cuanto más luminosas, mayor era el período de variación. Por tanto, conocido el período de oscilación de la luz de una cefeida, se puede saber su luminosidad real. Como también se puede medir con un fotómetro la luminosidad tal como se ve desde la Tierra, se puede determinar la distancia a la que está la estrella.





Unas *primas hermanas* de las cefeidas son las *RR Lyrae*. Son más rojas y con períodos de horas. Se ha descubierto que tienen todas la misma luminosidad, aproximadamente 50 veces nuestro Sol (o sea, tienen una magnitud absoluta de 0'6). Comparándolas con el brillo que presentan desde la Tierra se puede saber a qué distancia están. Como son abundantes en los cúmulos globulares que rodean a las galaxias, se usan para determinar la distancia a la que se encuentran esos glóbulos.

Veamos dos actividades en las que se usan estrellas cefeidas y *RR Lyrae* para calcular distancias en el Universo.

10. ESTIMACIÓN DEL TAMAÑO DE NUESTRA GALAXIA

Objetivo: Estimar el tamaño de nuestra galaxia por brillo.

Material:

- Fotografía de la región de Sagitario
- Nomograma M-D-L

Procedimiento:

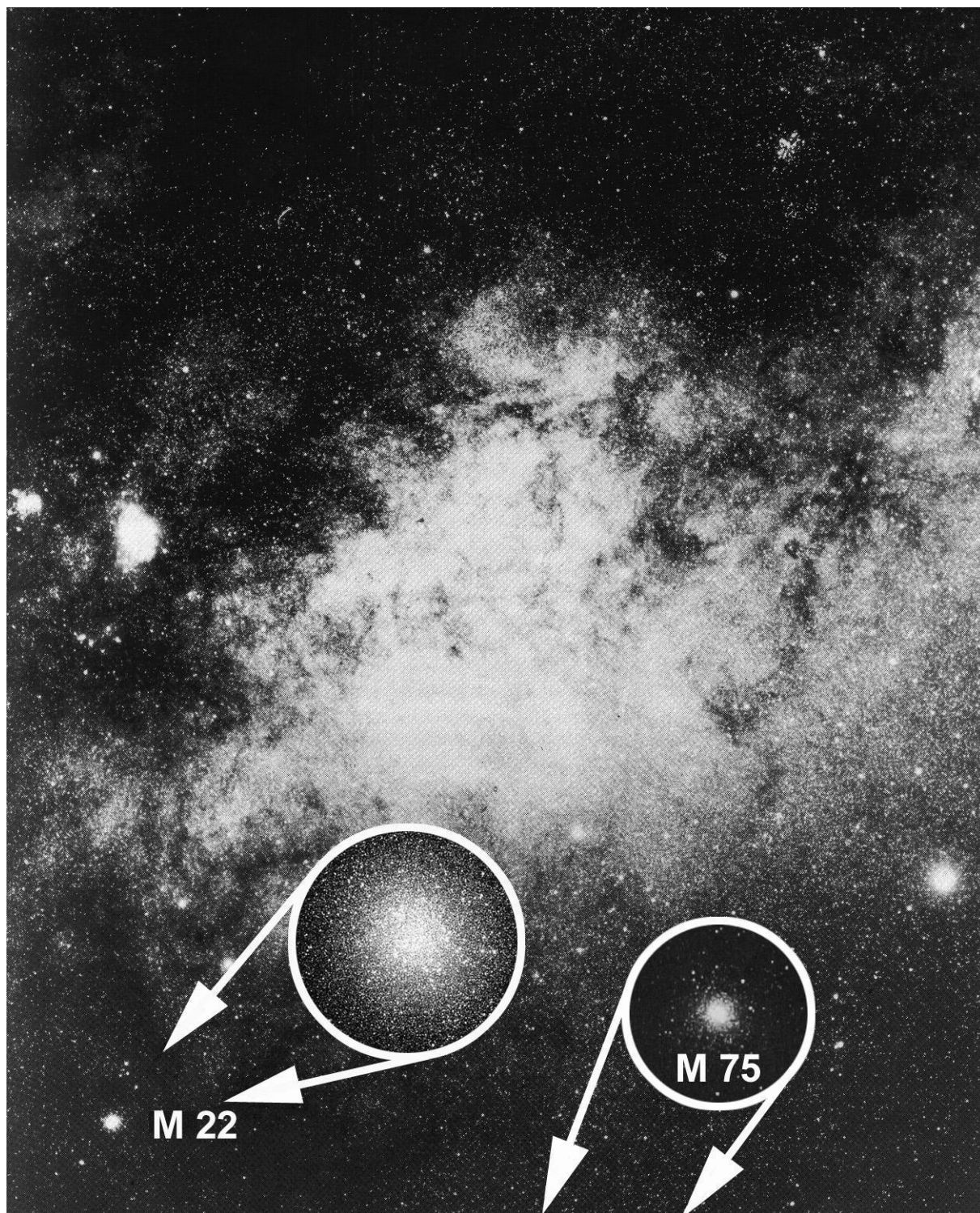
1. En los cúmulos globulares se encuentran estrellas variables de un tipo llamado RR-Lyrae. La variación de su luz es muy típica, y estudiando su luz, los astrónomos han estimado que tienen una luminosidad bastante constante, equivalente a unas 50 veces la del Sol. Suelen estar en los cúmulos globulares que rodean a las galaxias.

2. En la fotografía de la región de Sagitario, próxima a nuestro centro galáctico, se encuentra M 22, uno de los cúmulos globulares más grandes y brillantes. Es de suponer que es uno de los más cercanos a nosotros. Contiene una estrella RR-Lyrae que tiene una magnitud aparente de +13. Usando el nomograma, ¿a qué distancia está de nosotros?

3. En esa misma región, pero fuera de la fotografía, se encuentra el cúmulo globular M 75, uno de los más pequeños y menos brillante. Por lo tanto es de suponer que es uno de los más lejanos a nosotros. En él se encuentra una estrella RR-Lyrae de magnitud +18. ¿A qué distancia se encuentra?

4. Con estos datos puedes calcular la distancia media de los cúmulos globulares cerca del plano de la galaxia. Si supones que esa distancia es aproximadamente igual al radio de la galaxia, ¿cuánto mide el diámetro de la Vía Láctea?

5. La Gran Nube de Magallanes es una pequeña galaxia que está muy cercana a la nuestra y tiene sus propios cúmulos globulares. En uno de ellos se observa una variable RR-Lyrae de magnitud +20. ¿A qué distancia está de la Tierra?



Fotografía de la región de Sagitario, con el cúmulo M 22. El cúmulo M 75 queda fuera, pero también en Sagitario

11. USO DE CEFIDAS PARA MEDIR DISTANCIAS EN EL CIELO

Objetivo: Determinar la distancia de objetos en el cielo usando las cefeidas.

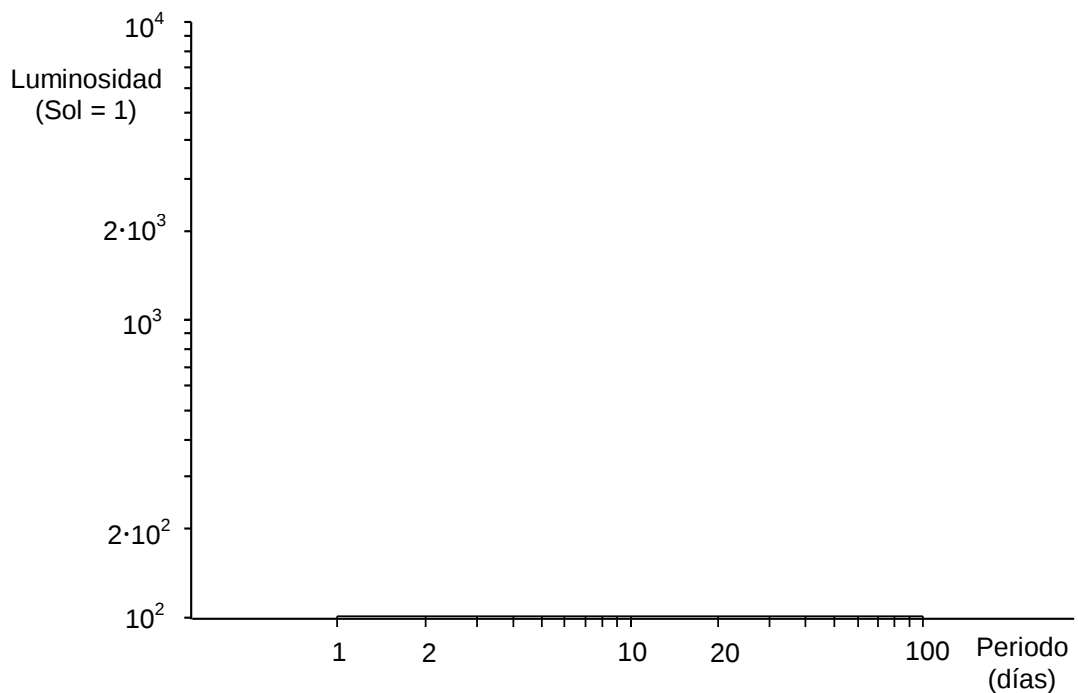
Material: Nomograma M-D-L

Procedimiento:

1. En la actividad anterior has hallado la distancia del cúmulo globular M 22. En él se han visto varias estrellas variables cefeidas, cuya luminosidad y periodo de luz se muestran en la siguiente tabla:

Luminosidad media (Sol = 1)	Periodo (días)
$2'5 \cdot 10^2$	2
$3'3 \cdot 10^2$	3
$6 \cdot 10^2$	6
$9 \cdot 10^2$	9
$1 \cdot 10^3$	10
$4'5 \cdot 10^3$	50

2. Representa los datos en un gráfico como el siguiente (ojo, son escalas logarítmicas), y traza la recta que más se aproxime:



3. En el cúmulo M 55 se observa una cefeida de 30 días de periodo y magnitud +12. Usando el Nomograma, ¿a qué distancia está?

4. En el cúmulo M 54 se observa otra de periodo 20 días y magnitud +18. ¿A qué distancia está?
5. En el cúmulo M 13 de Hércules hay una cefeida de magnitud +13 y periodo 3 días. ¿A qué distancia está el cúmulo?
6. En un cúmulo de la galaxia de Andrómeda se observa una cefeida de 40 días de periodo y magnitud +20. ¿A qué distancia está nuestra galaxia vecina?
7. Con el Telescopio Espacial Hubble se ha detectado una cefeida de periodo 8 días y magnitud +29 en un cúmulo globular de la galaxia M 100. Esa galaxia está rodeada de otras muchas de tamaño aparente similar, que forman el llamado cúmulo de Virgo. ¿A qué distancia podemos estimar que está dicho cúmulo de galaxias?

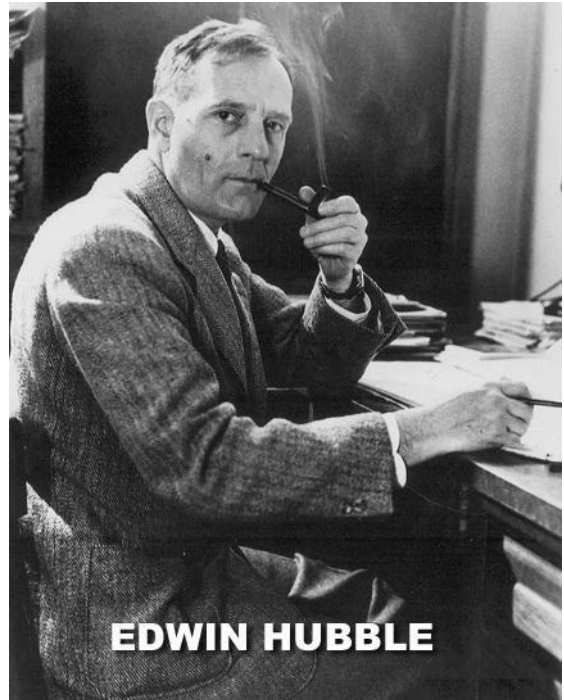
12. LA LEY DE HUBBLE

Todos hemos visto una onda en una cuerda, en una pantalla o en las olas del mar. La distancia entre dos crestas se llama **longitud de onda**. El sonido es también una onda, que se oye más grave o más agudo según la longitud de la onda. Cuando una locomotora viene hacia nosotros silbando, las ondas de *amontonan*, disminuyendo su *longitud de onda*. El resultado es un silbido más agudo. Cuando se aleja, las ondas se alargan y el sonido es más grave. Es el **efecto Doppler**.

La luz también es una onda. En el espectro de una estrella aparecen unas líneas en determinados colores, que corresponden a unas longitudes de onda determinadas. Si esa estrella se acerca a nosotros, esas líneas se desplazan hacia el extremo azul del espectro. Si se aleja, se desplaza hacia el extremo rojo. Cuanto mayor es la velocidad, mayor es el desplazamiento. Así, analizando la luz de galaxias lejanas, podemos saber a qué velocidad se mueven respecto a nosotros.

Las galaxias cercanas tienen movimientos relativos pequeños, algunas se acercan y otras se alejan. Pero si vamos al cúmulo de *Virgo*, a una distancia media de 50 millones de a.l., veremos que todas se alejan de nosotros a velocidades entre 1.000 y 2.000 km/s. Y en el supercúmulo de *Coma*, a 300 millones de a.l., las velocidades de alejamiento oscilan entre 7.000 y 8.500 km/s. Pero si miramos en dirección opuesta, obtenemos que M 74 se aleja de nosotros a 800 km/s y M 77 a 1.130 km/s. Y si apuntamos a galaxias más lejanas y débiles, la velocidad de recesión es aún mayor: NGC 375 se aleja a 6.200 km/s, NGC 562 a 10.500 y NGC 326 a 14.500 km/s. Miremos hacia donde miremos, todas, excepto las muy cercanas, se alejan de nosotros. ¿Somos tan repulsivos?

Fue *Edwin Hubble* quien se dio cuenta en 1930 de este hecho, y estableció la ley que lleva su nombre: cuanto más lejana está una galaxia, más de prisa se aleja de nosotros. Y esto ocurre desde cualquier punto en que nos pongamos a observar el Universo. Ocurre como en una explosión de un fuego artificial: las partículas luminosas se van separando entre sí movidas por la explosión de la pólvora.



Por tanto, la velocidad de recesión (alejamiento) y la distancia a la que están de nosotros parece que es proporcional. La constante que las relaciona es la **constante de Hubble**. El valor más aceptado ronda los 70 km/s por *Megaparsec*, lo que indica una edad del Universo de unos 13.500 millones de años.

13. DISTANCIAS CON LA LEY DE HUBBLE

Objetivo: mostrar la relación entre las distancias a las galaxias y su movimiento de alejamiento (**Ley de Hubble**).

Material:

- una hoja cuadriculada
- regla

Procedimiento:

1. Una de las formas para saber la velocidad a la que se alejan las galaxias de nosotros es medir el corrimiento al rojo de su luz, debido al efecto Doppler. Con ese procedimiento los astrónomos han encontrado las siguientes velocidades de las galaxias que se usaron en las actividades 2 y 11:

Objeto	Velocidad
M 51	800 km/s
M 101	600 km/s
M 100	1200 km/s
NGC 5371	2400 km/s

2. Dibuja un gráfico con las distancias en el eje horizontal (están en las actividades anteriores) y las velocidades en el vertical. ¿Se aproxima a una recta? Es la llamada **Ley de Hubble**. Calcula la constante de Hubble **H** que las relaciona, dividiendo las velocidades por las distancias. (Esta constante tendrá unidades de km/s por millones de años luz. Como 1 Megaparsec equivale a 3'26 millones de a.l., habría que multiplicar ese valor por 3'26 para pasarla a unidades de km/s por Megaparsec.)

$$v(\text{km/s}) = H \cdot d(\text{millones de a.l.})$$

3. Calcula la velocidad a la que se aleja una galaxia del cúmulo de Hércules (su distancia está en la actividad 2).

4. La siguiente tabla indica la velocidad a la que se alejan algunas galaxias brillantes. Calcula su distancia a nosotros.

Nº NGC / Nº Messier	Velocidad (km/s)	Distancia (a.l.)
M 55	215	
NGC 2903	600	
NGC 4649 / M 60	1200	
NGC 4736 / M 94	850	
NGC 5055 / M 63	570	
Cúmulo de Coma	7.700	
Cúmulo de Hydra	47.000	
Quásar 3C 273	50.000	
Quásar 3C 9	160.000	

SOLUCIONES A LAS ACTIVIDADES

ACTIVIDAD 2

Objeto	a = Tamaño en la foto en cm.	D = Distancia (en millones de a.l.)
M 31	15	2'1
M 51	0'9	34
M 101	1'2	26
M 104	0'6	52
NGC 5371	0'3	103
NGC 4565	1'2	26
NGC 4725	0'5	62
Galaxia del Cúmulo de Hércules	0'1	310

ACTIVIDAD 4

5. $AB = 9$ mm. Por tanto $D = 379.167$ km, muy parecido al valor medio aceptado de 385.000 km.

6. El diámetro de la Luna en la foto es $a = 1'6$ cm.

$$\frac{a}{L} = \frac{b}{D} \quad \text{por lo que}$$

$$b = \frac{a \cdot D}{L}$$

Tomando como D la medida que nos ha salido en el punto anterior, y $L = 175$ cm, el diámetro de la Luna saldría $b = 3.466$ km, buena aproximación al valor real de 3.476 km.

ACTIVIDAD 5

5. Desplazamiento horizontal de la estrella = 1 mm. Por tanto, como la foto está ampliada 20 veces, el desplazamiento real será

$$AB = 1/20 \text{ mm} = 0'05 \text{ mm} = 0'005 \text{ cm.}$$

Y la distancia a la estrella:

$$D = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ km} \cdot 10 \text{ m}}{5 \cdot 10^{-5} \text{ m}} = 6 \cdot 10^{13} \text{ km} = 6 \text{ a.l.}$$

Cuestiones:

1. $D = 4'1 \cdot 10^{13} \text{ km} = 4'1 \text{ a.l.}$
2. $D = 8'6 \text{ a.l.}$
3. Procyón: $D = 10'7 \text{ a.l.}$ Aldebarán: $D = 63'8 \text{ a.l.}$

ACTIVIDAD 8

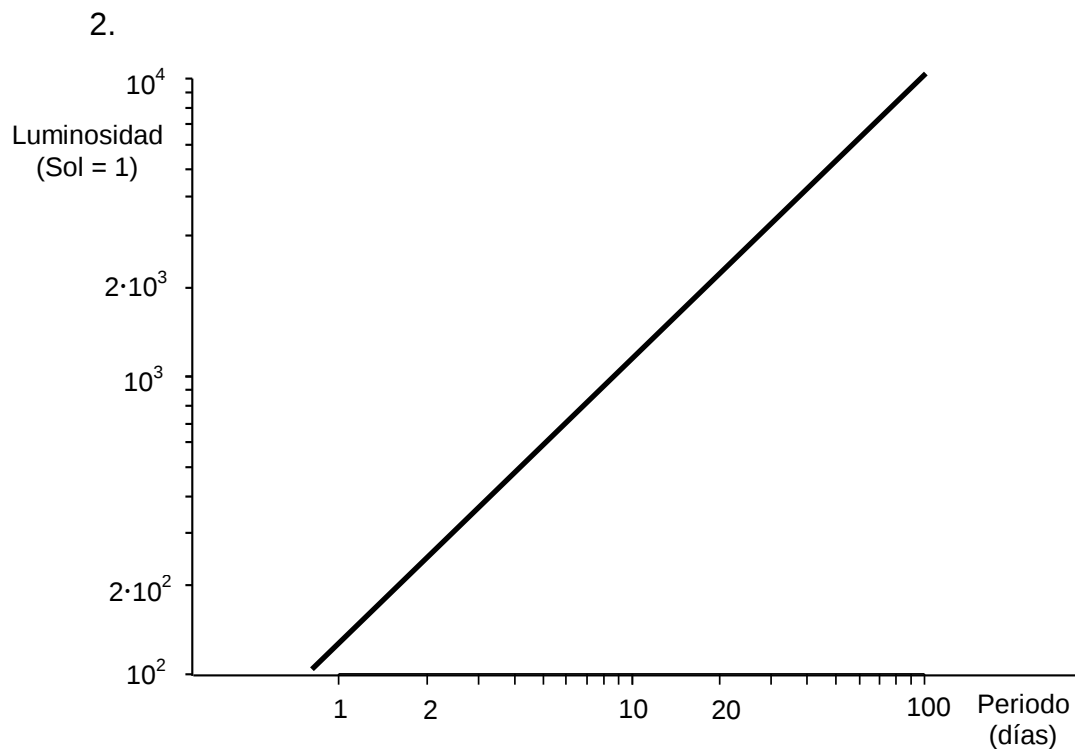
Algunos alumnos pueden tener dificultad en leer las escalas logarítmicas, a las que no están acostumbrados, pero después de dos o tres medidas, aprenderán a hacerlo.

3. $4 \cdot 10^{27} w = 10$ soles.
4. $3 \cdot 10^{26} w$, equivalente al Sol.
5. 600 a.l.
6. 500 a.l.
7. 250 a.l.
8. 500 a.l.

ACTIVIDAD 10

2. 10.000 a.l.
3. 100.000 a.l.
4. Distancia media = $(10.000 + 100.000)/2 = 55.000$ a.l. Por tanto, el diámetro de nuestra galaxia es de unos 110.000 a.l.
5. 200.000 a.l.

ACTIVIDAD 11



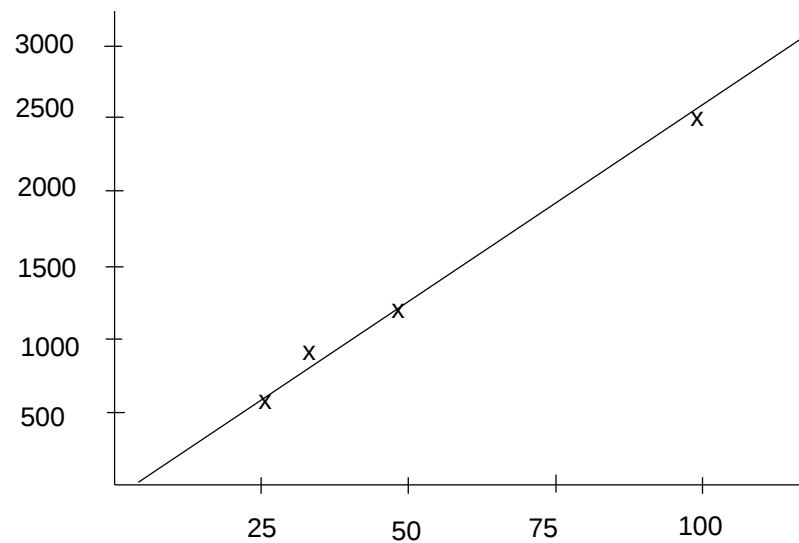
3. Tendrá una luminosidad de 3.000 soles y una distancia de 16.000 a.l.
4. Tendrá una luminosidad de 2.000 soles y una distancia de 70.000 a.l.
5. La luminosidad será de 300 soles, a una distancia de 25.000 a.l.
6. La luminosidad será de 4.000 soles, a 2 millones de a.l.
7. La cefeida tiene una luminosidad de 800 soles y está a una distancia de 50 millones de a.l.

ACTIVIDAD 13

1. Los datos tomados de las actividades 2 y 11 son:

Objeto	Velocidad	Distancia (millones de a.l.)
M 51	800 km/s	34
M 101	600 km/s	26
M 100	1200 km/s	50
NGC 5371	2400 km/s	103

2. La gráfica queda:



La constante de Hubble H sale aproximadamente 24 km/s por millón de año luz (m.a.l.) ($24 \cdot 3 \cdot 26 = 78 \cdot 2$ km/s por Megaparsec). Por tanto v (km/s) = $24 \cdot d$ (m.a.l.)

3. Distancia = 310 millones de a.l., a la que corresponde, según el punto anterior, una velocidad de 7400 km/s.

4.

Nº NGC / Nº Messier	Velocidad (km/s)	Distancia (millones de a.l.)
M 55	215	9
NGC 2903	600	25
NGC 4649 / M 60	1200	50
NGC 4736 / M 94	850	35
NGC 5055 / M 63	570	24
Cúmulo de Coma	7.700	320
Cúmulo de Hydra	47.000	2000
Quásar 3C 273	50.000	2083
Quásar 3C 9	160.000	6666

BIBLIOGRAFÍA

- Taller de Astronomía. *A. Moreno y R. Moreno*, Editorial Akal, Madrid 1996
- Project Star. The Universe in Your Hands. *Harold P. Coyle y otros*. Kendall/Hunt Publishing Company, Dubuque, Iowa, 2000
- Where We Are in Space and Time. *Harvard Smithsonian Centre for Astrophysics*. Cambridge 1990.
- Exercises in practical Astronomy using Photographs. *M.T.Brück*. Adam Hilder, Bristol 1990.
- Astronomía General. Teoría y Práctica. *David Galadí-Enríquez y Jordi Gutiérrez Cabello*. Ediciones Omega, Barcelona 2001.
- Historia Breve del Universo. *Ricardo Moreno*. Editorial Rialp, Madrid 1998.



ApEA, la Asociación para la Enseñanza de la Astronomía, nació en 1995 para acoger a todas las personas que se dedican a la enseñanza de la Astronomía en centros educativos, planetarios, museos de la ciencia, agrupaciones de aficionados y clubes de estudiantes.

ApEA engloba a todos los interesados en la enseñanza de todos los niveles educativos reglados -desde la enseñanza primaria hasta la universitaria- así como los no reglados. También organiza reuniones de formación para sus socios y publica materiales de interés didáctico, como la presente colección.

Más información en www.apea.es

