

Los presentes contenidos han sido elaborados para que profesores de enseñanza básica de Chile tengan un apoyo para impartir sus clases de astronomía en la asignatura de ciencia.

No obstante lo anterior, cualquier reproducción, distribución, comunicación o transformación de este material debe ser debidamente visados por su autor: El Académico de la Universidad de Chile y Premio Nacional de Ciencias Exactas, José Maza Sancho.

Adicionalmente, se prohíbe – terminantemente- que el material aquí presentado pueda ser incluido en libros, textos o manuales con propósito comercial.

## Todos los derechos reservados

Enero de 2011

Departamento de Astronomía

Facultad de Ciencias Física y Matemáticas

Universidad de Chile



# Escala de Distancias

José Maza Sancho

Astrónomo

Departamento de Astronomía

Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas

Universidad de Chile

Cerro Calán, 19 de Enero 2011

# Museo de Alejandría

- **Demetrio** de Faléreo y **Estratón** de Lampsacos fueron los fundadores del Museo de Alejandría junto a los dos primeros reyes Ptolomeos.
- Demetrio y Estratón estudiaron con Teofrastos en el Liceo, en Atenas.
- **Museo**: El Templo de las musas:

- Clío Historia
- Euterpe Poesía lírica
- Talía Comedia y poesía alegre
- Melpómene Tragedia
- Terpsícore Danza y música
- Erato Poesía erótica
- Polimnia Poesía sacra
- **Urania Astronomía**
- Calíope Poesía épica

# Aristarco de Samos

- Nació en Samos, isla jónica cercana a Mileto.
- Se dirigió a Atenas donde puede haber sido discípulo de Estratón, que después de ayudar al Rey Ptolomeo II con el Museo de Alejandría, volvió a Atenas para hacerse cargo del Liceo al morir Teofrastos.
- Entre los años 286 al 268 Teofrastos estuvo a cargo del Liceo.
- Sólo sabemos de Aristarco que observó el solsticio de verano de los años 281 y 280.

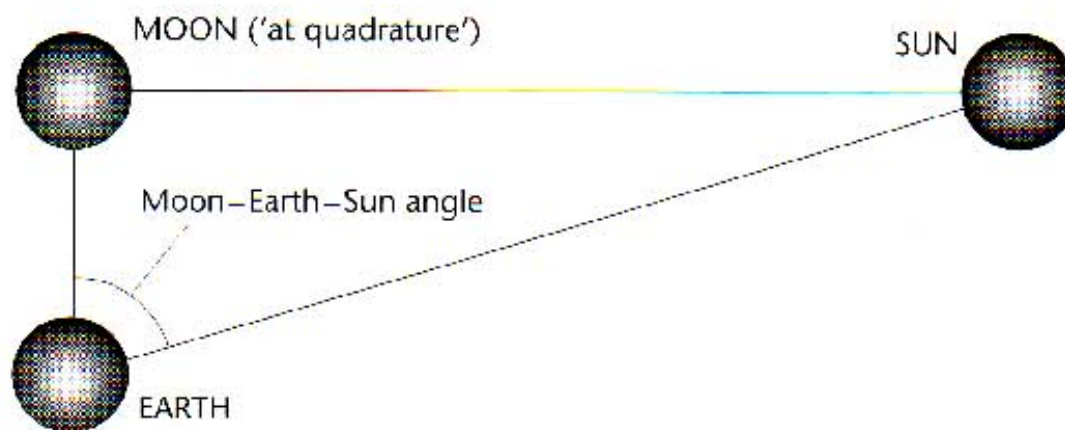
- Aristarco probablemente era un hombre joven cuando observó los solsticios.
- Aristarco nació ~ 310 a.C.
- murió ~ 230 a.C.
- Aristarco planteó la rotación terrestre en 24 hr y la traslación terrestre en un año.
- Sólo el babilonio Seleuco parece haber sostenido el heliocentrismo, unos 100 años después de Aristarco.

- Las variaciones de brillo de Marte sugieren una órbita excéntrica, con el centro “hacia el Sol”.
- ¿Porqué no **en** el Sol?
- Heráclides hacía girar a Venus y Mercurio en torno del Sol.

# Distancia a la Luna y al Sol

- Aristarco fue el primero en determinar la distancia Tierra-Sol en términos de la distancia Tierra-Luna.
- Aristarco notó que cuando la Luna está en cuarto creciente o menguante el triángulo Tierra-Luna-Sol es rectángulo en la Luna

# Aristarco de Samos



Aristarchus's method for calculating the relative distances of the Moon and Sun.

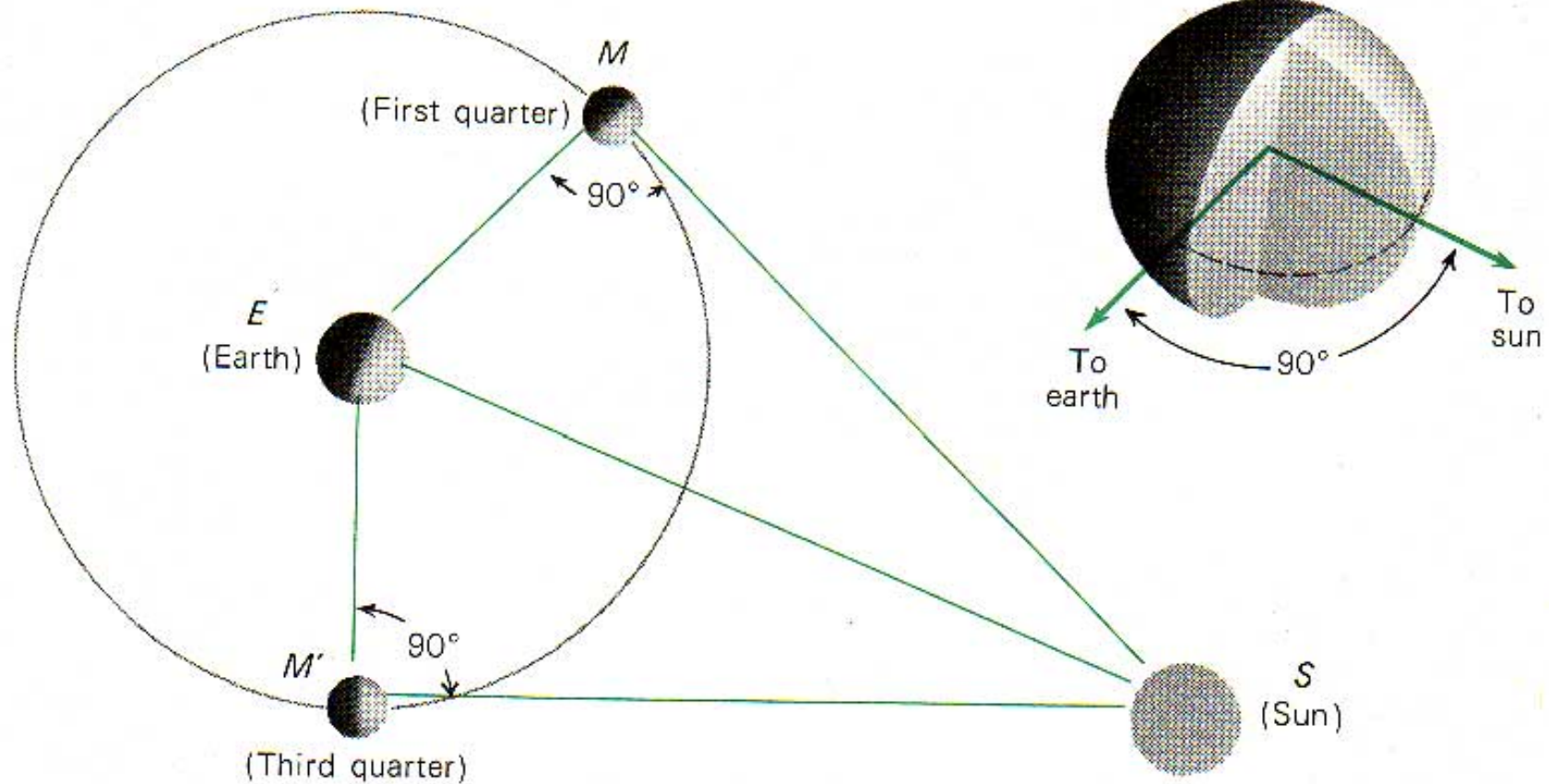


FIGURE 2.6 Aristarchus' method of measuring the relative distances of the sun and moon.

- En principio sólo se necesita medir el ángulo de las visuales al Sol y la Luna en el instante del cuarto para determinar totalmente el triángulo y con ello las distancias.
- Aristarco se dio cuenta de la dificultad de dicha determinación y midió el tiempo que transcurre entre creciente y menguante y menguante y creciente.
- Aristarco encontró una diferencia de 1 día

$$\Delta t = 1[\text{día}] = t_{MM'} - t_{M'M}$$

$$T_1 + T_2 = 29,5$$

$$T_1 - T_2 = 1$$

- $T_1 = 15,25$
- $T_2 = 14,25$
- $\theta_1 = 186$
- $\theta_2 = 174$
- Por lo tanto el ángulo en la Tierra en el triángulo Tierra-Luna-Sol mide  $87^\circ$  en el momento del cuarto

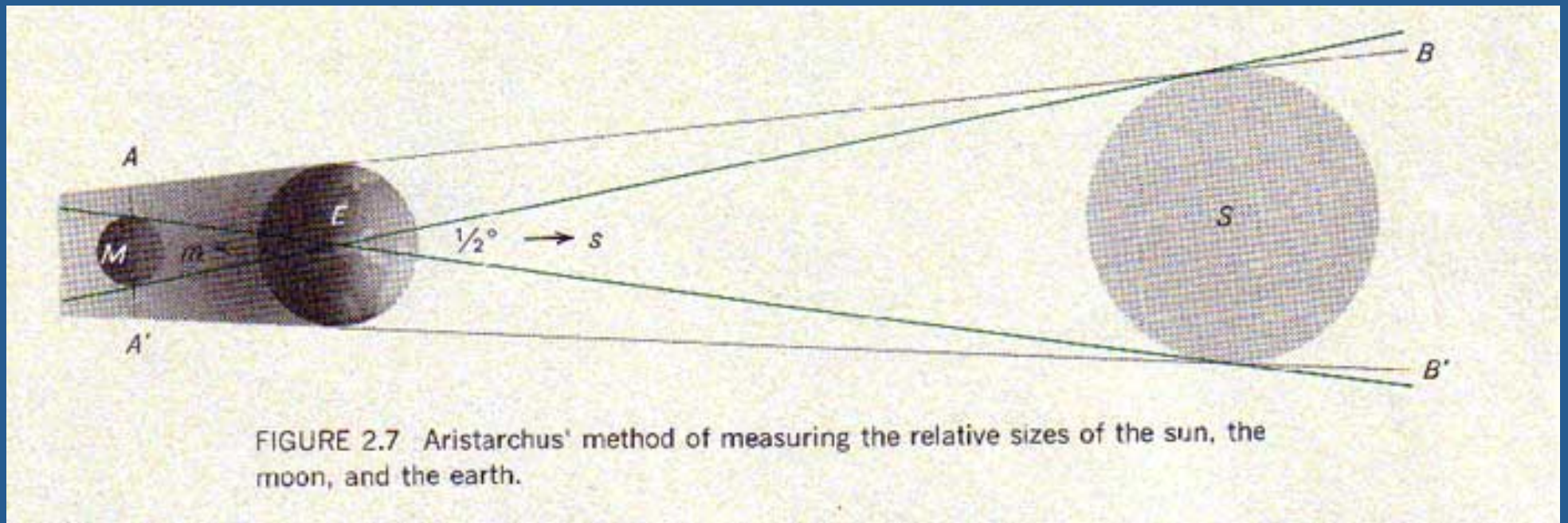
$$\frac{\text{Luna} - \text{Tierra}}{\text{Tierra} - \text{Sol}} = \cos 87^\circ = \frac{1}{19}$$

- El Sol, según Aristarco, está situado 19 veces más lejos que la Luna.
- Como el Sol y la Luna sustienden un ángulo de medio grado vistos desde la Tierra, el resultado anterior implica que:
- Diámetro Sol = 19 x Diámetro de la Luna

# Distancia Tierra-Luna

- Aristarco además inventó un sistema para medir la distancia Tierra Luna en radio terrestres.
- Notó que en un eclipse de Luna el cono de sombra de la Tierra a la distancia de la Luna es  $\frac{8}{3}$  del diámetro lunar.
- Con ello hace la siguiente construcción:

# Distancia Tierra-Luna



- Aristarco cometió un error difícil de entender (supuso que el Sol y la Luna sustienden una ángulo de  $2^\circ$ ).
- Eso le llevó a estimar la distancia Tierra-Luna en sólo 20 radio terrestres (en verdad son 60).
- La siguiente tabla muestra los valores utilizados en la antigüedad.

	Aristarco	Hiparco	Ptolomeo	Valor moderno
Distancia Luna	20	60,5	59	60,3
Radio Luna	1/3	0,29	0,294	0,272
Distancia al Sol	400	2.550	1.210	23.400
Radio Solar	7	12 1/3	5,5	109.

- Aristarco encontró, pese a sus errores, que el Sol era ~7 veces más grande que la Tierra.
- Ese debe haber sido el origen de su sistema heliocéntrico.
- Aristarco propone que la Tierra rota en 24 horas y se traslada alrededor del Sol en un año.
- El Sol está inmóvil en el centro del sistema.
- Aristarco no desarrolló su sistema de mundo en detalle.
- El mundo antiguo ignoró a Aristarco.

# Eratóstenes (276-194)

- Nació en Cirene, capital de Cirenaica, que en la actualidad está en Libia y se llama Shahhat.
- Hijo de una familia rica, estudió en Alejandría y Atenas.
- Hombre sabio, dominaba las matemáticas, la poesía, la astronomía, la geografía y la filosofía.
- Amigo personal y admirador de Arquímedes.

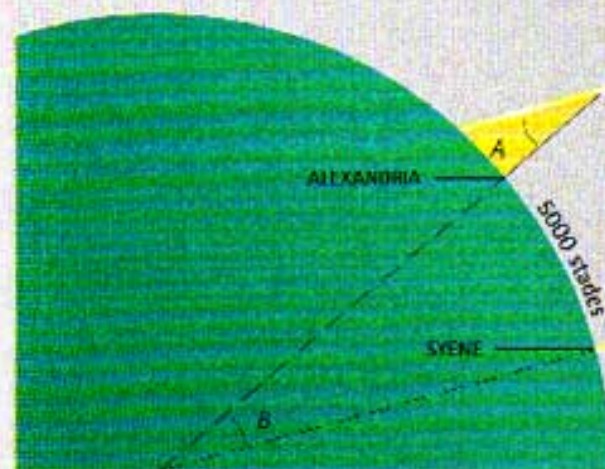
- Hacia el 235 a.C. lo llamaron para hacerse cargo de la Biblioteca del Museo de Alejandría, cargo que ocupó por el resto de su vida.
- Eratóstenes es famoso por haber sido el primero en medir el radio terrestre con un método claro y preciso.
- Para medir el radio terrestre es necesario medir la latitud de dos lugares cuya distancia sea conocida y que se encuentren en el mismo meridiano.

# Eratóstenes

## Eratosthenes and the size of the Earth

Eratosthenes (c. 276–c. 195 BC) was born in Cyrene (in what is now Libya), and after studying in Athens spent the rest of his life in Alexandria, where he was in charge of the famous library that was part of the Museum. Outstanding in several branches of mathematics and geography, he was responsible for a remarkable estimate of the circumference of the sphere of the Earth.

At noon on the day of the summer solstice, in the town of Syene in Upper Egypt, the Sun was directly overhead: a vertical pointer cast no shadow, and the Sun's rays reached to the bottom of a well that had been dug for the purpose. Eratosthenes, who was then in Alexandria, measured the



Sun casts shadow with angle  $A$  at Alexandria, 5000 stades north of Syene

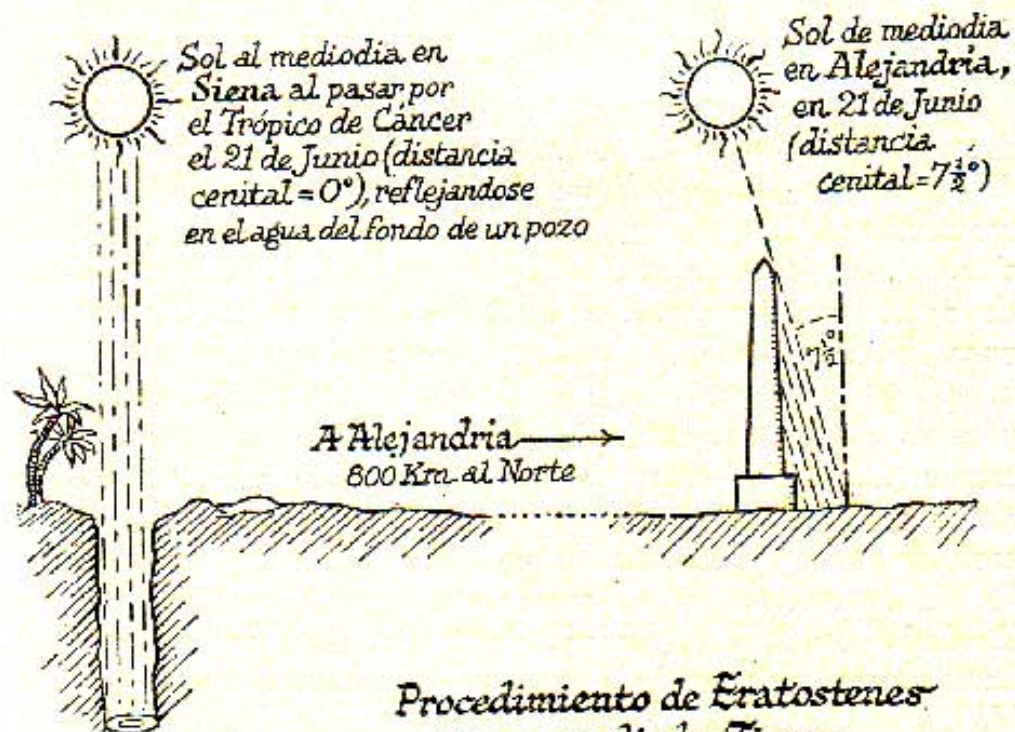
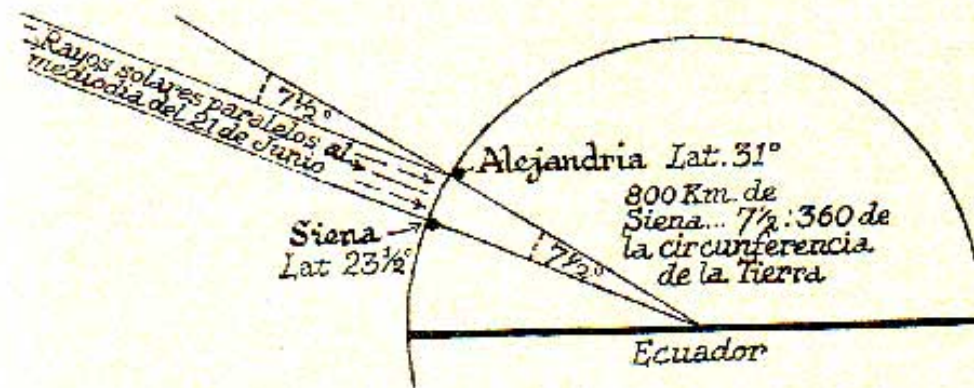
Sun directly overhead at Syene casts no shadow

shadow cast at noon by a vertical pointer, and found it to be  $1/50$ th of a circle. Believing Alexandria to be some 5,000 stades due north of Syene, Eratosthenes concluded that the circumference of the Earth was fifty times 5,000 stades, or 250,000 stades.

Although the data used by Eratosthenes are not quite accurate, and although the modern equivalent of 250,000 stades is a matter of debate – some put it at 29,000 miles – there is no doubt that the fit between Eratosthenes's value for the circumference of the Earth and our modern value of nearly 25,000 miles is good, and possibly excellent.

Eratosthenes found by measurement that the angle  $A$  was  $1/50$ th of a circle and, since  $A$  and  $B$  were equal, he concluded that the circumference of the Earth was fifty times 5,000 stades, or 250,000 stades.

- Eratóstenes observó que el día del solsticio de verano el Sol pasaba por el cenit de Siena (Asuán) y que sólo pasa a  $7,2^\circ$  ( $1/50$  de círculo) del cenit de Alejandría.
- Eratóstenes midió la distancia de Siena a Alejandría, estimándola en 5.000 estadios
- En unidades modernas corresponde a 800 km.



*Procedimiento de Eratostenes para medir la Tierra*

FIG. 107

Nótese que, a mediodia, el Sol está exactamente sobre el meridiano del observador. Siena y Alejandro tienen casi la misma longitud geográfica. Resulta, pues, que el Sol, estos dos lugares y el centro de la Tierra, están entonces sobre un mismo plano.

- Como  $7,2^\circ$  es  $1/50$  de círculo, determinó que el perímetro terrestre es de 250.000 estadios.
- Eratóstenes luego corrige a 252.000 estadios el valor del perímetro para que se tenga que hay 700 estadios por grado.
- Valor moderno 111,11 km/grado
- No se sabe exactamente qué tipo de estadio utilizó Eratóstenes

- Si el estadio hubiese sido el de **157,5** metros:  $700 \times 157,5 = 110,3$  km (error -0,6%)
- Si el estadio hubiese sido el estadio olímpico de **185** metros:  $700 \times 185 = 129,5$  km (error 17%).
- Si el estadio hubiese sido el estadio egipcio de **210** metros:  $700 \times 210 = 147$  km (error 32%).
- El estadio más probable es el de 157,5 metros con lo cual el valor de Eratóstenes resulta ser excelente.
- Ptolomeo adopta 500 estadios por grados, pero del estadio real egipcio de 210 metros, con lo cual el valor de Ptolomeo es  $500 \times 210 = 105,0$  km (error -5,4%).

## 1.02.27. Arquímedes (287-212)

- Nació en Siracusa, Sicilia, en una familia culta de clase alta, emparentada con el Rey.
- Su padre, Fidas, astrónomo, lo mandó a estudiar a Alejandría con los sucesores de Euclides.
- Murió en el 212, a manos de un soldado romano, cuando Roma se tomó Siracusa.

# Arquímedes

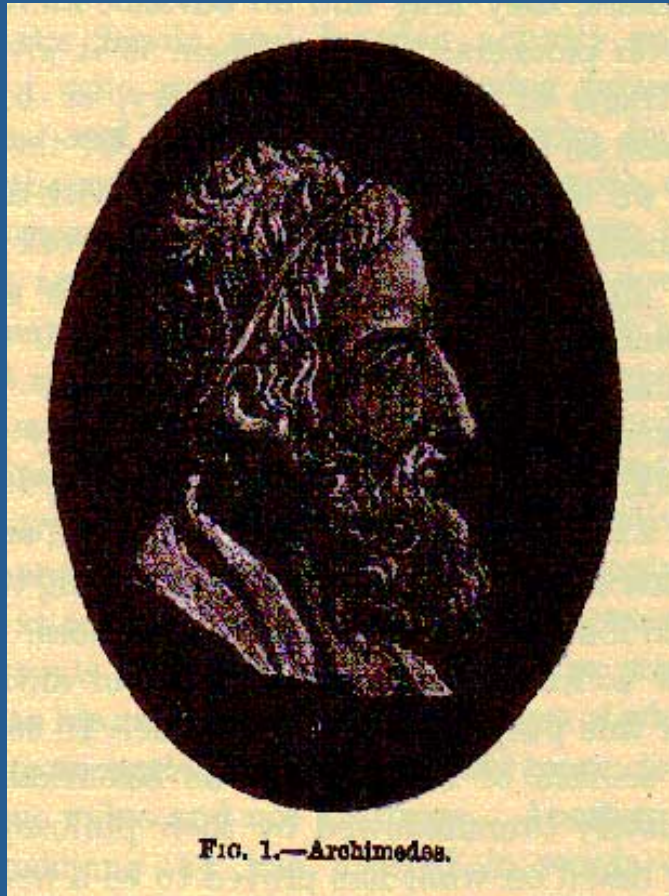
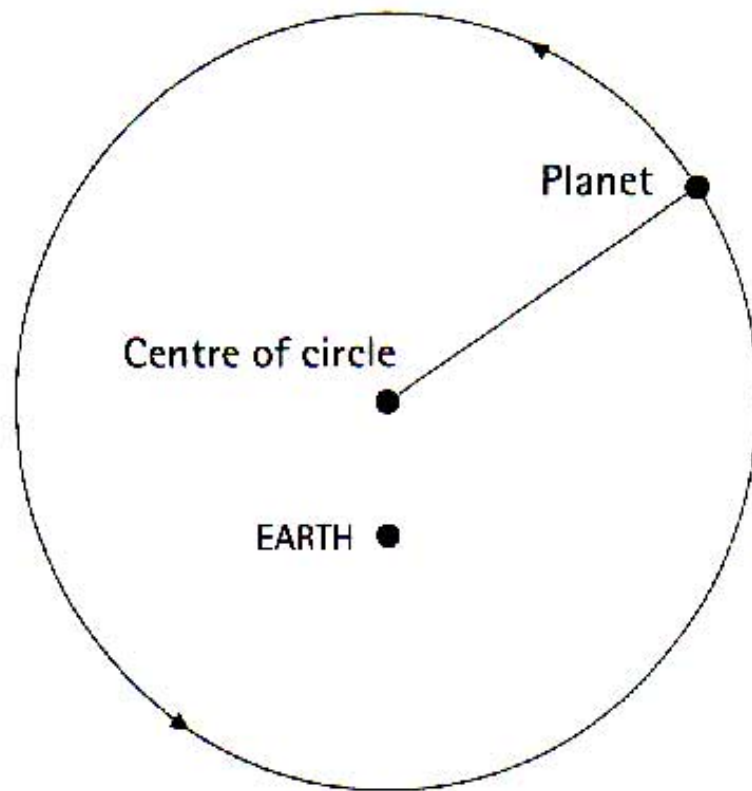


FIG. 1.—Archimedes.

- Gran mecánico y geómetra.
- Grandes avances en estática e hidrostática (principio de Arquímedes).
- Calculó áreas y volúmenes; iniciador del cálculo.
- Euclides, Apolonio y **Arquímedes** son los más grandes matemáticos de la antigüedad.
- En su libro *“El Arenario”* menciona a Aristarco y da argumentos en contra de la hipótesis heliocéntrica.

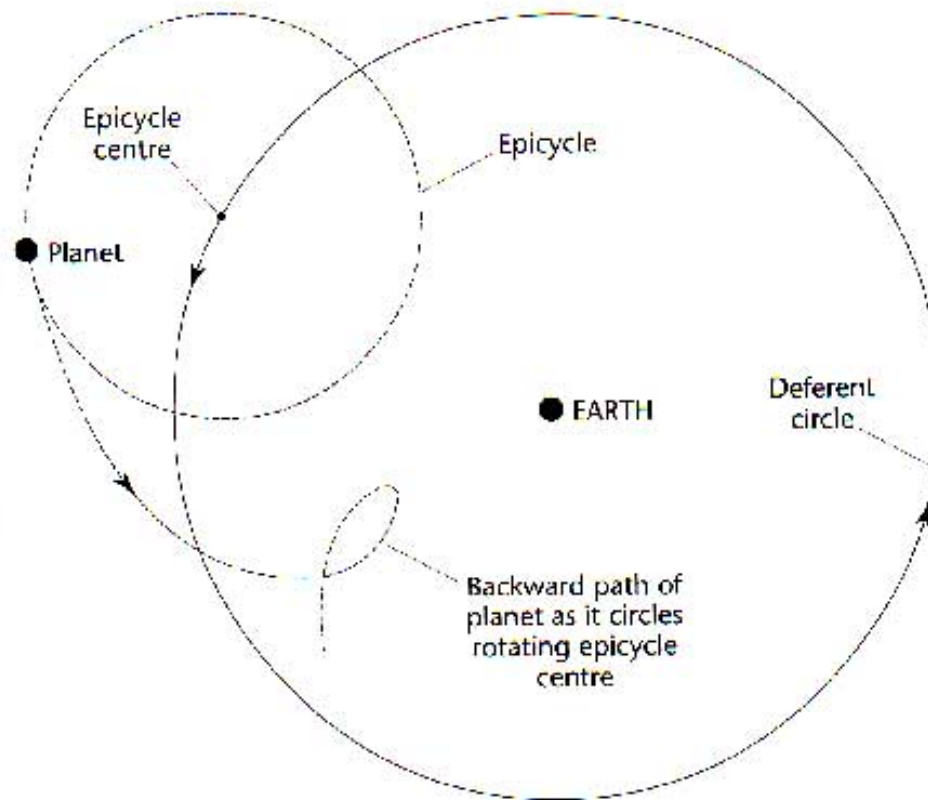
# Apolonio de Perga (~260 - ~200)

- Nació en Perga, costa sur del Asia Menor al oeste de Chipre.
- Estudió las secciones cónicas.
- Conocía bien las excéntricas móviles y los epiciclos y deferentes.
- Representó el movimiento del Sol y de la Luna con excéntricas.
- Eudoxio  $\Rightarrow$  esferas homocéntricas
- Apolonio  $\Rightarrow$  excéntricas
- $\Rightarrow$  epiciclos y deferentes



In an eccentric circle, the planet moved as usual with uniform speed around the circle; but since the Earth was not at the centre of the circle, the planet appeared from Earth to move with varying speed (slower when at the top of the circle and faster when at the bottom).

How an epicycle might explain the apparent backward motion of a wandering star. The Earth is assumed to be at the centre of the large circle or *deferent*, on which travels the centre of the small circle or *epicycle*, which carries the planet. Each circle rotates with uniform speed. The path of the planet as seen from Earth depends upon the values chosen for the various parameters, but the figure indicates how the backward [retrograde] motion of a planet could be produced.

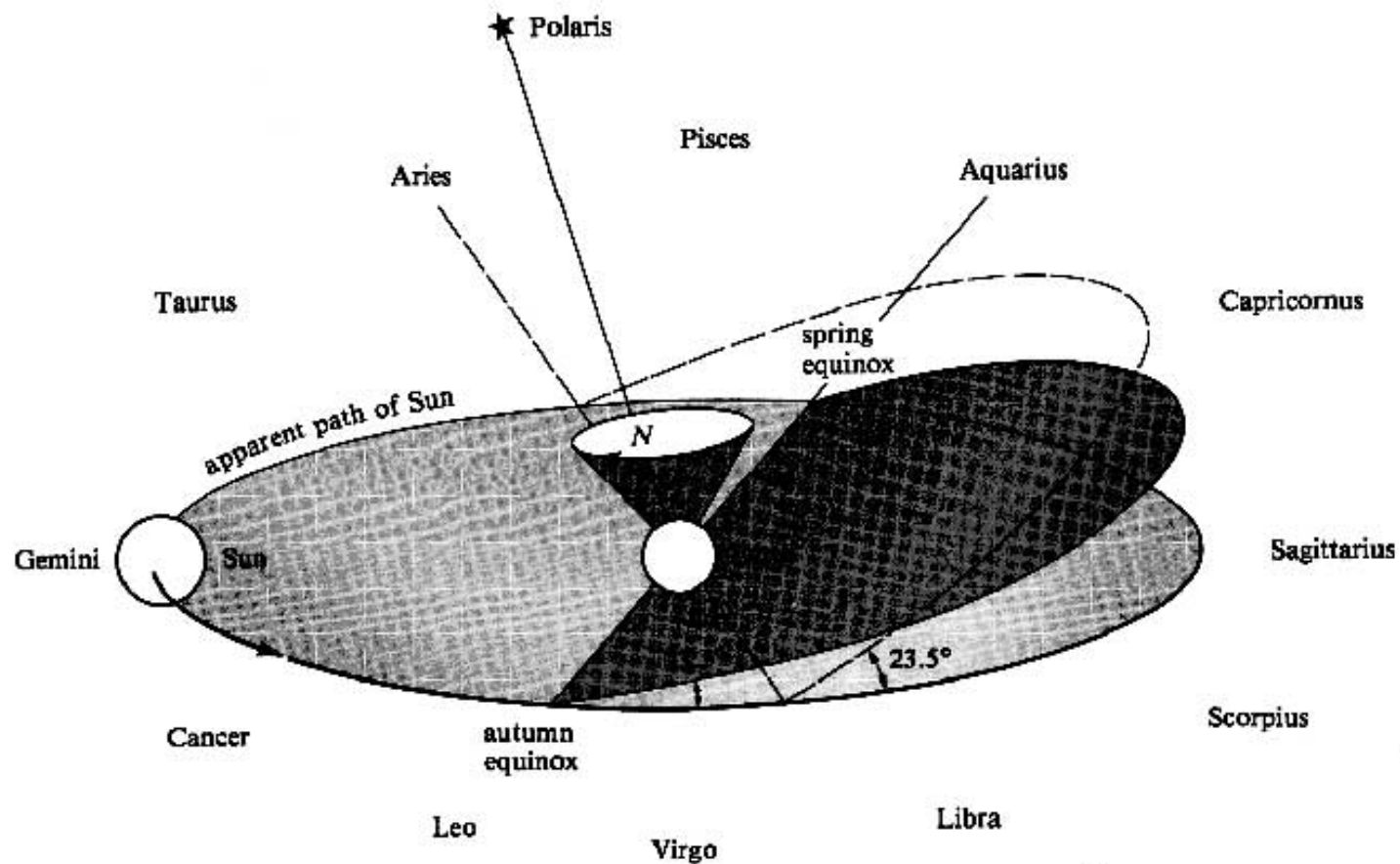


# Hiparco de Nicea

- Nació en Nicea, Bitinia, pero vivió su vida en Rodas.
- El más grande astrónomo de la antigüedad.
- Escribió un libro hacia el año 140 a.C.
- Elaboró un catálogo estelar el 129 a.C.
- Catalogó 850 estrellas.
- Introdujo las magnitudes estelares.

- Dividió las estrellas en seis categorías de brillo aparente y las llamó de primera a sexta magnitud.
- Las estrellas de primera magnitud son las más brillantes.
- Las de sexta las más débiles a ojo desnudo.
- Comparando posiciones estelares con observaciones hechas en Babilonia 150 años antes, descubrió que el polo celeste había cambiado.

- Precesión de los equinoccios
- Período  $\sim 26.000$  años
- El punto  $\gamma$ , intersección entre el ecuador y la eclíptica, se mueve  $50''/\text{año}$ .
- En los 150 años entre las observaciones antiguas y sus observaciones las estrellas habían variado en 2 grados en sus ascensiones rectas.



**Figure 1.6.** The seasons and the signs of the Zodiac. An Earth-bound observer seems to see the Sun move around the Earth once a year in the plane of the ecliptic (lightly shaded oval). At the present epoch, the North Pole of the Earth points toward the star Polaris, and the extension of the equatorial plane of the Earth is shown as the dark semi-oval. The two points of intersection of the Sun's apparent path with the equatorial plane are called the spring and autumn equinoxes. The equatorial plane in 2000 B.C. corresponded to the dashed semi-oval.

- Hiparco determinó la longitud del año con un error de 6 minutos, estimando el error en no más de 15 minutos.
- Demostró la equivalencia de excéntricas móviles y de epiciclos y deferentes.
- Elaboró una excelente teoría para la Luna y el Sol.
- Utilizó excéntricas y epiciclos y deferentes.
- Parece haber favorecido a estos últimos.

# Escala de Distancias

- Distancia Tierra-Luna: 384.000 km
- Radio terrestre 6.371 km
- Distancia Tierra-Luna:  $60 R_T$
- Unidad astronómica de distancia (semi-eje mayor de la órbita terrestre):
- 149.600.000 km
- $149.600.000 / 384.000 = 390$
- EL SOL ESTÁ 390 VECES MÁS LEJOS QUE LA LUNA

- En el siglo XVIII el alemán **J. Daniel Titius** (1729-1796), profesor de física en Wittenberg, encontró una relación numérica que reproduce con una buena aproximación los semi-ejes mayores de las órbitas planetarias.
- La publicó en 1772 en una nota a pie de página en un libro que tradujo.

- Esta serie pasó inadvertida hasta que **Johan Elert Bode** (1747-1826), director del Observatorio de Berlín, la dio a conocer en 1778
- ahora es referida como la “*ley de Titius-Bode*”, o simplemente como *ley de Bode*,
- doble error pues no es una “*ley*” ni tampoco es de Bode.

- Partiendo de una sucesión formada por el número 0 y los términos de una progresión geométrica de razón 2 y primer término 3 (0, 3, 6, 12, 24, 48, 96, 192, 384, ...), si le agregamos 4 a cada término y luego dividimos por 10, resulta la serie: 0,4 0,7 1,0 1,6 2,8 5,2 10,0 19,6 38,8 ...

- Esta serie representa muy bien las distancias de los planetas al Sol, desde Mercurio hasta Saturno, empezando en orden desde el primer término, pero omitiendo el quinto.
- [Las distancias media al Sol son: Mercurio 0,39; Venus 0,72; La Tierra 1,0; Marte: 1,52; Júpiter 5,20; Saturno: 9,54].

<b>Planeta</b>	<b>Distancia</b>	<b>Ley de Bode</b>
Mercurio	0,39	0,4
Venus	0,72	0,7
Tierra	1,0	1,0
Marte	1,52	1,6
????		2,8
Júpiter	5,20	5,2
Saturno	9,54	10,0
Urano	19,18	19,6

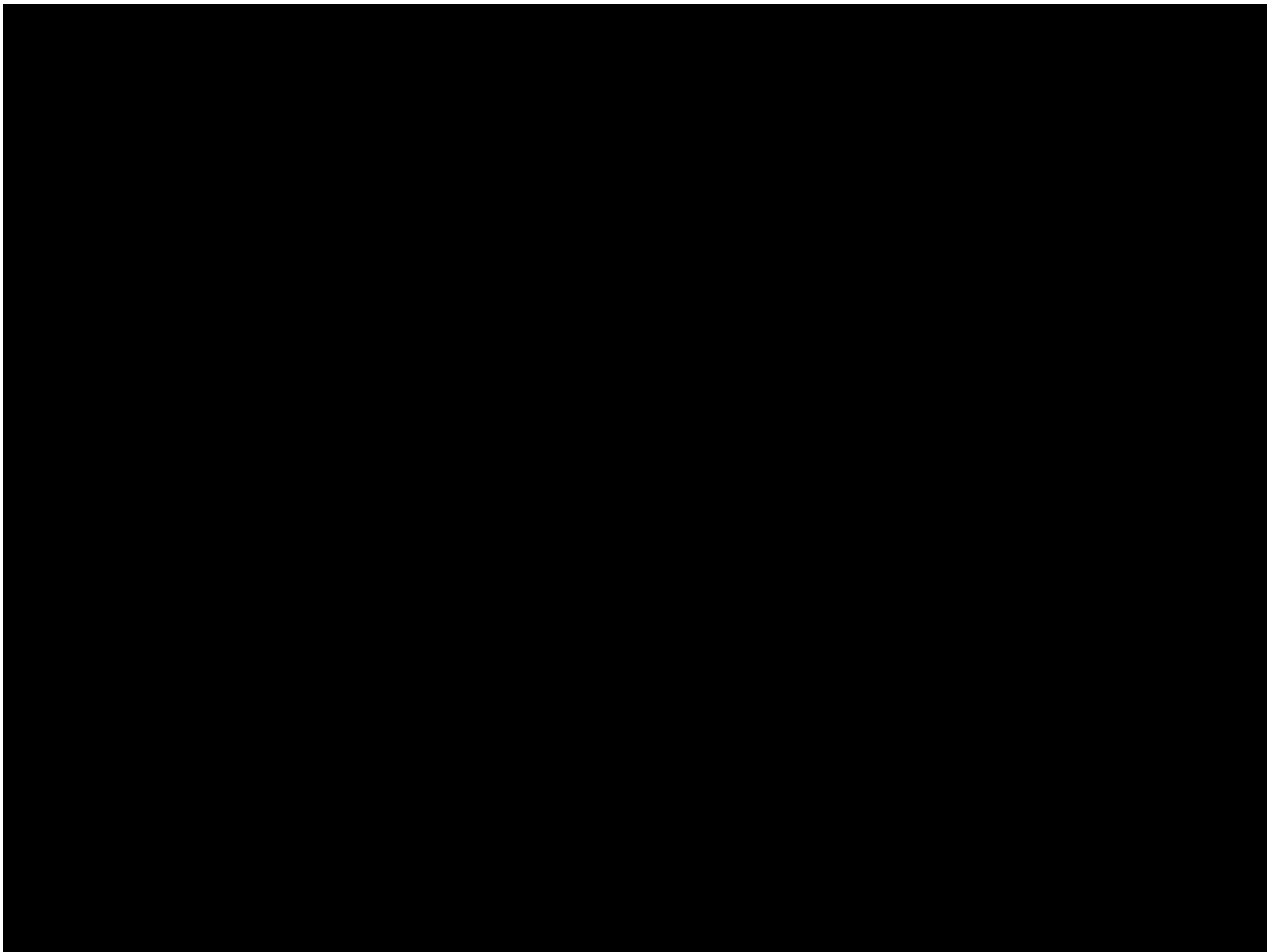
- Año-luz: distancia que recorre la luz en un año.
- $299.792,458 \times 86.400 \times 365,2422 =$
- $9,46 \times 10^{12} \text{ km}$
- Unidad astronómica de distancia =
- $149.600.000 / 299.792 = 499 \text{ segundos-luz}$
- Distancia a la Luna:
- $384.000 / 299.792 = 1,3 \text{ segundos-luz}$
- Distancia a Neptuno  $30,2 \text{ UA} = 4,2 \text{ horas-luz}$

- Estrella más cercana Alfa Centauri
- 4,3 años-luz
- La Vía Láctea:
- Diámetro: 100.000 años-luz
- Espesor: 10.000 años-luz
- Estrellas: 200.000.000.000 =  $2 \times 10^{11}$
- Volumen de la Vía Láctea:  $\pi \times r^2 \times e =$
- $3 \times (50.000)^2 \times 10.000 = 75 \times 10^{12}$
- Densidad 0,003 ★/año-luz<sup>3</sup>
- $1/\rho = 370 \text{ año-luz}^3 / \star \rightarrow 7,2 \text{ años-luz}$

- Diámetro del Sol:
- 1.400.000 km = 4,7 segundos-luz
- Distancia a Alfa Cen 4,3 años-luz
- $4,3 \times 365,25 \times 86.400 = 1,357 \times 10^8$  segundos-luz
- $1,357 \times 10^8 / 4,7 = 3 \times 10^7$
- Si el Sol midiera 10 cm la estrella más cercana estaría a 3.000 km (en Lima).

- La Vía Láctea tiene un diámetro de 100.000 años-luz
- La galaxia de Andrómeda está a 2.400.000 años-luz
- $2.400.000 / 100.000 = 24$
- Las galaxias están muy cerca entre sí. En un cúmulo dos galaxias pueden chocar fácilmente
- En una galaxia dos estrellas no pueden chocar con facilidad.

- Galaxias del cúmulo de Virgo:
- 60 millones de años-luz
- Galaxias del cúmulo de Coma
- 250 millones de años-luz
- Cuasares remotos:
- 5.000 millones de años-luz
- Edad del sistema solar 4.700 millones de años
- Edad del Universo: 13.700 millones de años



**FIN**