



Tao Terence

LA ESCALA
CÓSMICA DE
DISTANCIAS



Número 11

CIENCIA AL VIENTO

La escala cósmica
de distancias

Terence Tao

Número 11

Febrero, 2015

Facultad de Ciencias
Universidad Nacional de Colombia

Presentación

En este número de *Ciencia al Viento*, Terence Tao, Medallista Fields y actualmente profesor de la Universidad de California, nos presenta su charla *La escala cósmica de distancias*, correspondiente a la AMS 2010 Einstein Public Lecture.

Agradecemos al profesor Tao su disponibilidad para compartir esta charla con nuestros lectores.

Agradecemos también a la American Mathematical Society (AMS) por permitirnos reproducir esta charla. En particular, agradecemos al profesor Michel Lapidus, organizador de la charla, y al profesor Sergei Gelfand, encargado de las publicaciones de la AMS.

Además del interés intrínseco del tema, esta charla es interesante debido al hecho que es un matemático exponiendo un tema de cosmología,

lo cual nos muestra que la ciencia no tiene fronteras disciplinarias.

Quienes resulten interesados en profundizar en los aspectos más técnicos de este tema pueden consultar: S. Weinberg, *Gravitation and Cosmology. Principles and Applications of the General Theory of Relativity* (Wiley, 1972).

Disfruten la lectura.

Victor Tapia

Editorial

Hoy en día nadie pone en duda el hecho de que la Tierra no sea plana. Aprendemos en el colegio que la Tierra es casi esférica, con mayor radio en el ecuador y menor radio en los polos, y se nos ha contado la historia de que Cristóbal Colón fue uno de los primeros en convencerse de que la Tierra no era plana al observar que lo primero que aparecía en el horizonte al vislumbrar un barco lejano era su mástil.

Sin embargo, el hecho de que la Tierra tiene una forma casi esférica era un hecho conocido por los griegos antes del año 400 a. n. e. Por medio de métodos elementales de trigonometría, junto a observaciones detalladas de la sombra del Sol sobre la Tierra y la Luna, los griegos calcularon de manera muy aproximada el radio de la Tierra, el radio de la Luna y su distancia a la Tierra. Parece inverosímil que hace más de dos mil años se hayan podido hacer mediciones de distancias que hoy en día se hacen utilizando aparatos electrónicos.

Sin embargo, cuando nos ponemos en la tarea de averiguar cómo se hicieron las primeras mediciones de las distancias antes mencionadas, nos sorprenderemos de ver lo inteligente, recursivo y brillante de los métodos usados para su medición.

En esta edición de **Ciencia al Viento**, el profesor de matemáticas de la Universidad de California en Los Ángeles, y ganador de la Medalla Fields, el australiano Terence Tao, nos presenta una exposición titulada *La escala cósmica de distancias*, donde de manera muy clara y precisa nos explica los métodos e ideas esenciales que se usaron para hacer las mediciones de las distancias a los diferentes objetos celestes.

En la exposición, el profesor Tao enfatiza una idea muy simple, la cual es esencial en el cálculo de las diferentes distancias: el cálculo de una distancia, que *a priori* es muy grande, se basa en la medición de una distancia mucho más pequeña y de la medición de un ángulo específico. Esto es, si conocemos el tamaño de un cateto de un triángulo rectángulo y la apertura de uno de sus ángulos, entonces podremos conocer el tamaño del otro cateto y el de la hipotenusa. Con este método a la mano, podemos ir ascendiendo en el

cálculo de la dimensión de las distancias cósmicas, de la misma manera cómo hacemos para subir una escalera.

Para calcular el radio de la Tierra necesitamos calcular una distancia entre dos pueblos y el ángulo que definen con respecto al centro de la Tierra. Para calcular el radio de la Luna necesitamos conocer el radio de la Tierra y el tiempo que demora un eclipse lunar. Para calcular la distancia de la Tierra a la Luna necesitamos conocer el radio de la Tierra, el radio de la Luna y el tiempo que demora la Luna en orbitar alrededor de la Tierra. Para calcular el radio del Sol, y su distancia a la Tierra, se necesita el radio de la Tierra, el radio de la Luna, la distancia entre los dos y el tiempo que demora la Luna entre cuarto creciente y cuarto menguante, etc.

El profesor Tao nos hace un recuento de cómo se han calculado las diferentes distancias cósmicas usando la idea de la escalera mencionada antes. Comienza con los cálculos que hicieron los griegos Aristóteles, Eratóstenes y Aristarco, continúa con los de Copérnico, Kepler, Brahe, Newton, Huygens, Maxwell, Bessel, y termina con los de Hertzsprung, Russell, Swan y Hubble, todos ellos

científicos que, con sus descubrimientos, mediciones y cálculos, nos han permitido avanzar en el conocimiento de nuestro universo.

¡Feliz lectura!

Bernardo Uribe

Universidad del Norte
Barranquilla

**La escala
cós mica
de distancias**

**Terence Tao
(UCLA)**

10 Terence Tao, *La escala cósmica de distancias*



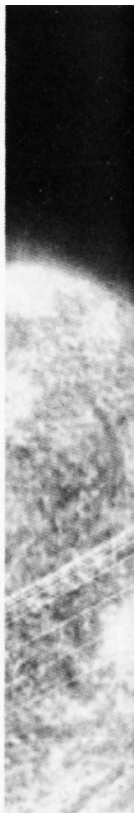


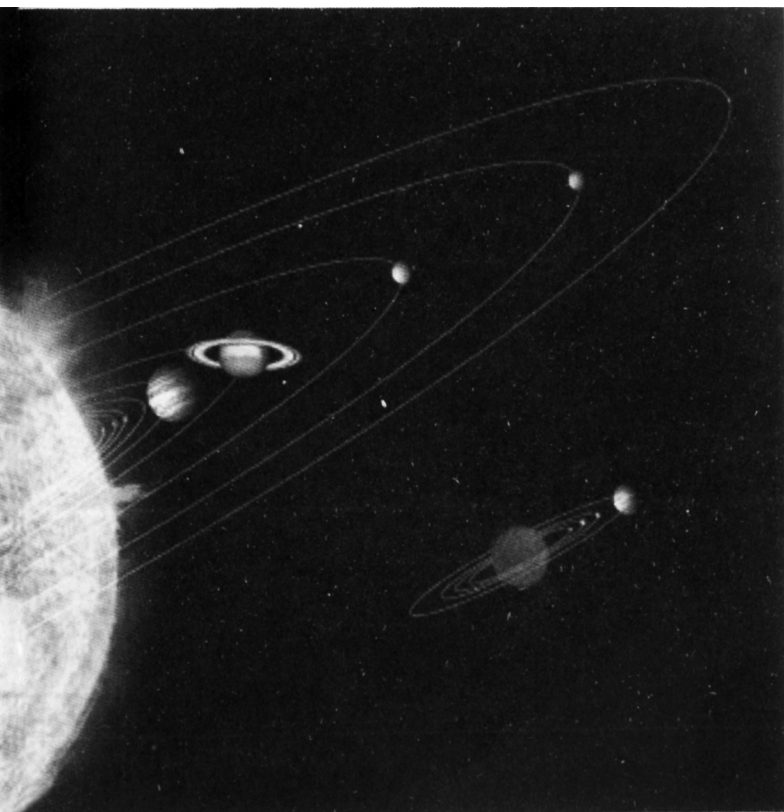
Astrometría

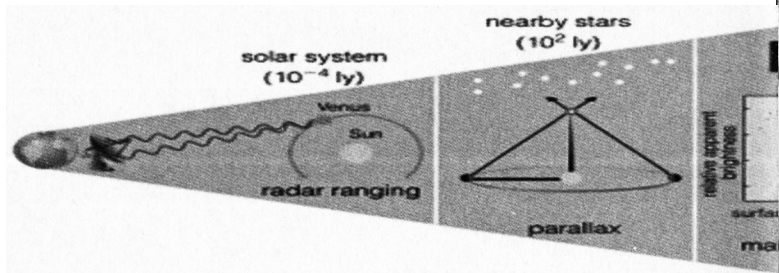
Un subcampo importante de la astronomía es la astrometría: el estudio de las posiciones y movimientos de los cuerpos celestes (el Sol, la Luna, los planetas, las estrellas, etc.).

Las preguntas típicas en astrometría son:

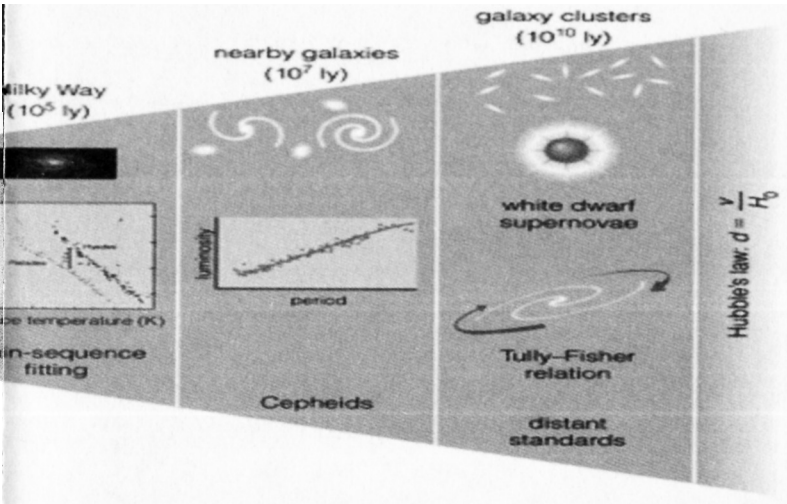
- ¿Cuál es la distancia de la Tierra a la Luna?
- ¿Desde la Tierra al Sol?
- ¿Desde el Sol a otros planetas?
- ¿Desde el Sol a las estrellas cercanas?
- ¿Desde el Sol a las estrellas lejanas?







- Estas distancias son demasiado grandes con
- No obstante, se tienen varias maneras para
- Estos métodos a menudo son bastante inteli
que también en la observación y en la mate
- Usualmente, los métodos indirectos perm
de distancias más pequeñas. Entonces se r
últimas distancias, hasta que se llega a las d
Esta es la escalera de distancias cósmicas.



no para ser medidas en forma directa.

medirlas en forma indirecta.

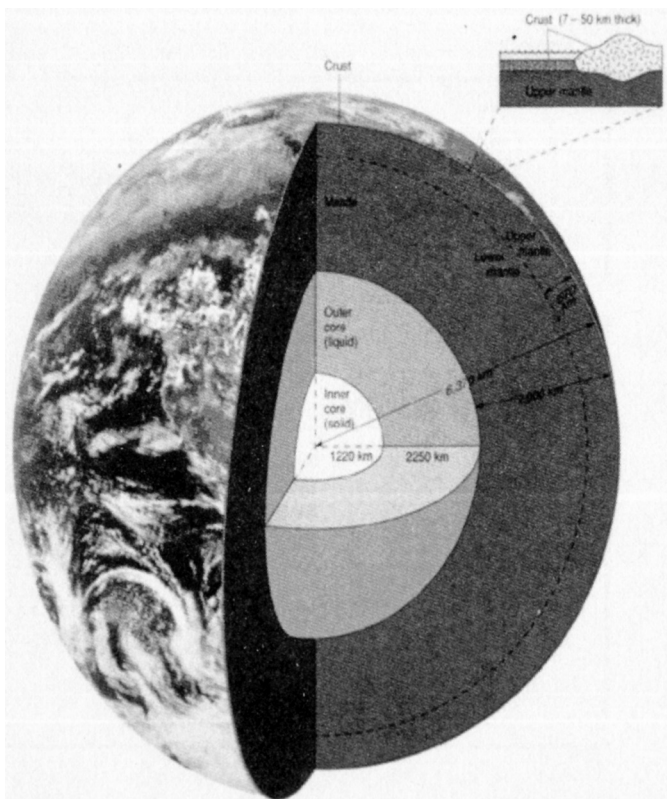
gentes, apoyándose no sólo en la tecnología sino
mática elemental.

ten determinar distancias grandes en término
necesitan otros métodos para determinar estas
distancias que se pueden medir en forma directa.

Primer peldaño: el

- Hoy en día se sabe que la Tierra es aproximadamente esférica, con un radio de 6378 kilómetros en el Ecuador y de 6356 en los polos. En la actualidad estos valores han sido verificados con gran precisión a través de varios medios, incluyendo los satélites modernos.
- Pero supongamos que no tuviésemos una tecnología avanzada, tal como los vuelos espaciales, los viajes marítimos y los aéreos, o ni siquiera telescopios y sextantes. ¿Sería todavía posible argumentar de manera convincente que la Tierra debe de ser (aproximadamente) una esfera, y calcular su radio?

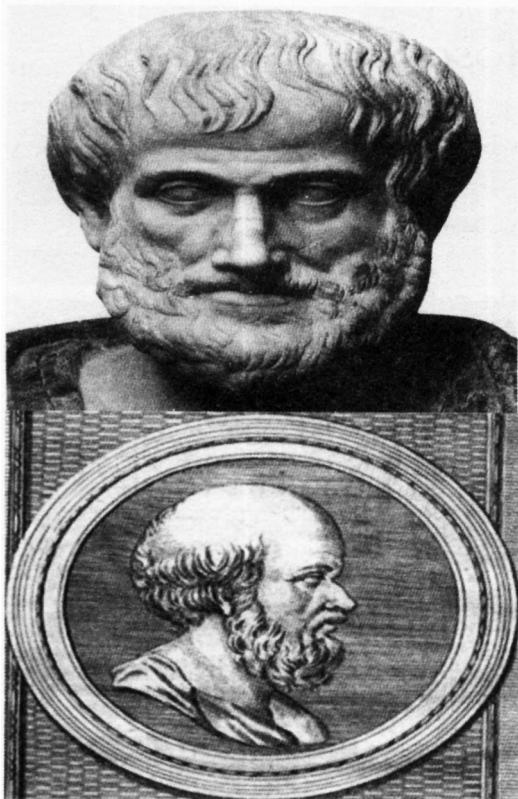
radio de la Tierra



La respuesta es sí —

- Aristóteles (384–322 ane) dio un argumento simple que demostraba por qué la Tierra era una esfera (lo cual ya había sido afirmado por Parménides (515–450 ane)).
- Eratóstenes (276–194 ane) determinó que el radio de la Tierra era de 40.00 estadios (aproximadamente 6800 kilómetros). Dado que el verdadero radio de la Tierra es de 6376–6378 kilómetros, este resultado difiere sólo en un ocho por ciento.

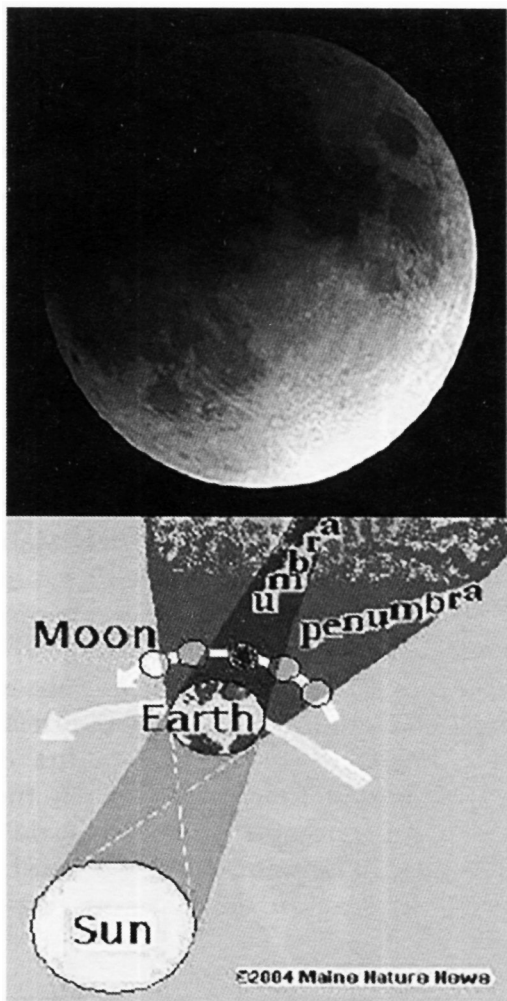
¡si se sabe geometría!



El argumento de Aristóteles

- Aristóteles argumentó que un eclipse de Luna era provocado por la sombra de la Tierra sobre la Luna. Esto era debido a que en el instante de un eclipse de Luna, el Sol estaba siempre diametralmente opuesto a la Tierra (esto se podía determinar utilizando las constelaciones como un punto de referencia fijo).
- Aristóteles también observó que la forma de esta sombra sobre la Luna era siempre un arco circular, sin importar cuáles fueran las posiciones de la Luna y del Sol. De esta manera, cualquier proyección de la Tierra era un círculo, lo cual significaba que lo más probable era que la Tierra fuera una esfera. Por ejemplo, la Tierra no podía ser un disco, debido a que las sombras serían arcos elípticos en vez de arcos circulares.

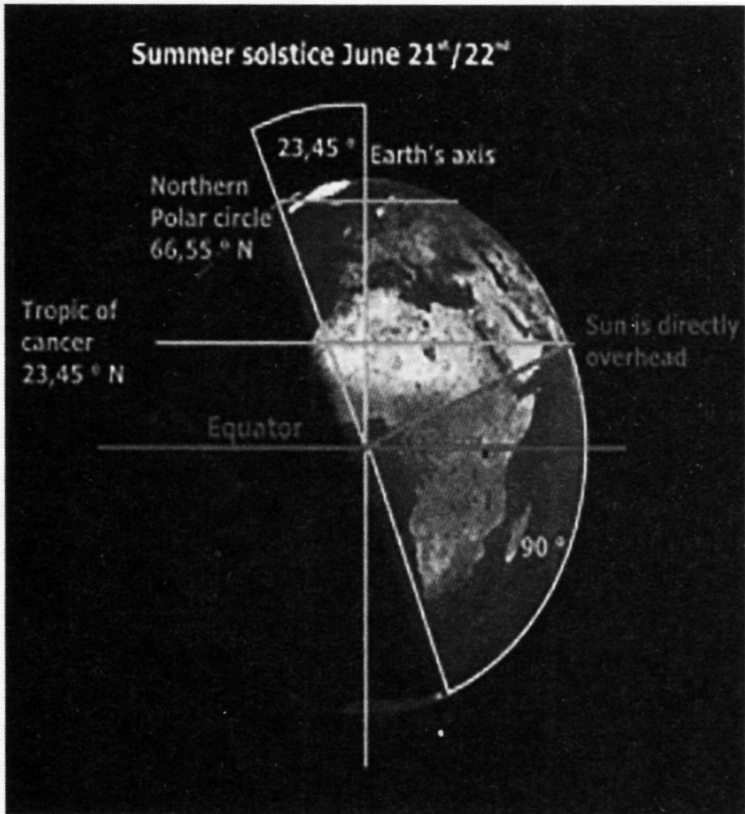
óteles



El argumento

- Aristóteles también argumentó que el radio de la Tierra no podía ser increíblemente grande, debido a que algunas estrellas se podían ver en Egipto, pero no en Grecia, y viceversa.
- Eratóstenes dio un argumento más preciso. Eratóstenes había leído de un pozo en Siena, Egipto, el cual, al mediodía del solsticio de verano (21 de junio) reflejaba el Sol en forma vertical. (Esto es debido a que Siena está casi exactamente sobre el Trópico de Cáncer.)
- Eratóstenes entonces observó un pozo en su ciudad natal, Alejandría, el 21 de junio, pero encontró que la luz del Sol no se reflejaba fuera del pozo a mediodía. Usando un gnomón (una vara de medida) y algo de trigonometría elemental, encontró que la desviación del Sol con respecto a la vertical era de 7° .

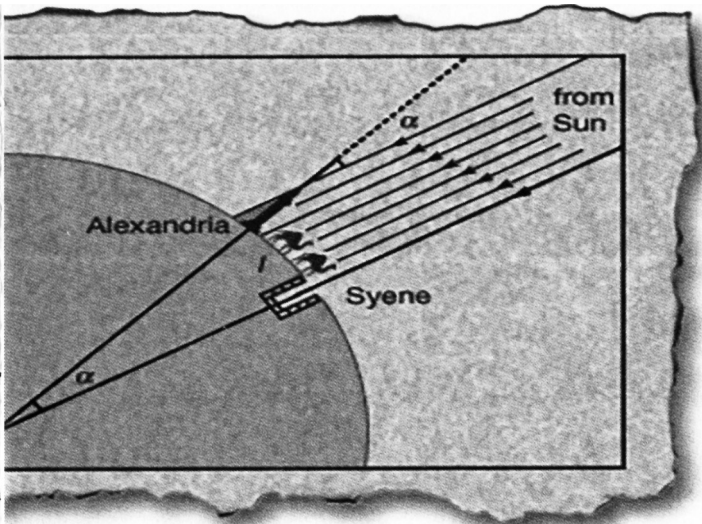
de Eratóstenes





© 2000 Encyc

- La información acerca de las caravanas que viajaban entre Alejandría y Siena era de aproximadamente 5000 kilómetros). Esta es la única medición directa del “peldaño cero” de la escalera de distancias.
- Eratóstenes también supuso que el Sol estaba en la Tierra (más sobre esto en la sección del “teorema”).
- Entonces, la trigonometría elemental es suficiente para medir la Tierra.



Encyclopædia Britannica, Inc.

rciales y otras fuentes establecía que la distancia
lmente 5000 estadios (aproximadamente de 740
cta que se utiliza aquí, y se puede pensar como
as cósmicas.

ba muy lejos en comparación con el radio de la
rcer peldaño”).

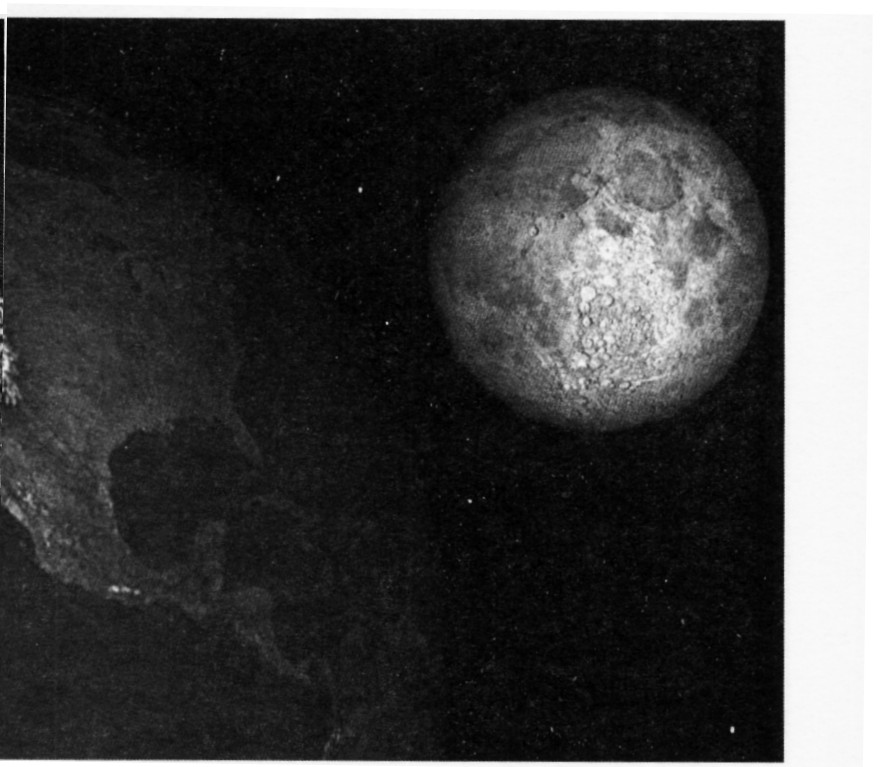
iciente para establecer una estimación del radio

Segundo forma, tamaño y loc

- ¿Cuál es la forma de la Luna?
- ¿Cuál es el radio de la Luna?
- ¿Cuál es la distancia desde la Tierra a la Luna?



Apeldataño: alizacion de la Luna



Nuevamente, estas preguntas fueron respondidas con no exactitud por los antiguos griegos.

- Aristóteles argumentó que la Luna era un disco (en vez de un disco) debido a que el terminator (la línea de la luz del Sol sobre la Luna) era siempre circular.
- Aristarco (310–230 a.n.e) determinó que la distancia entre la Tierra y la Luna era aproximadamente 300 veces el radio terrestre. (De hecho, la distancia varía entre 356 y 406 radios terrestres debido a la excentricidad de la órbita lunar.)
- Aristarco también estimó que el radio de la Luna era $1/3$ del radio de la Tierra. (El radio verdadero es 0.273 radios terrestres.)
- El radio de la Tierra, por supuesto, se conocía a partir del anterior peldaño de la escalera.

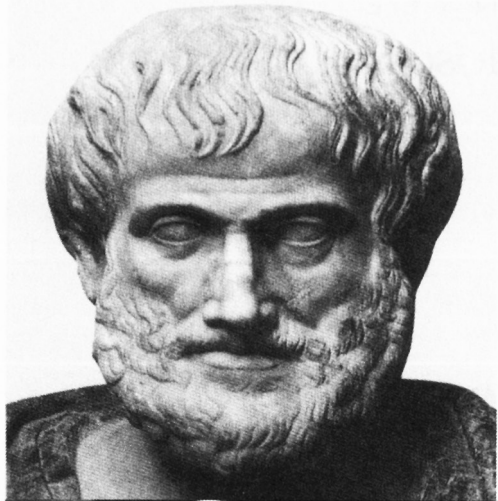
ntas
table
griegos

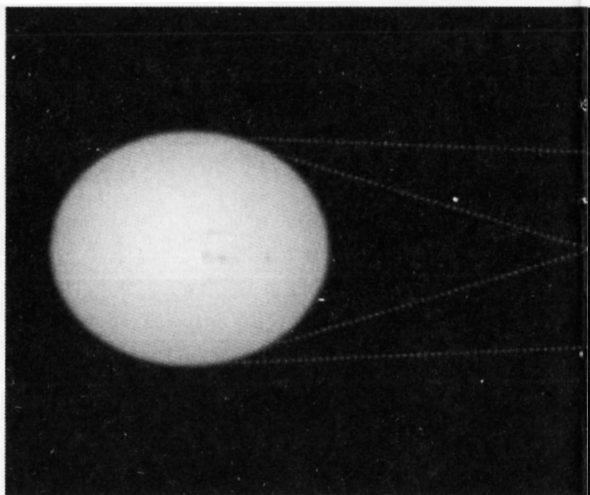
a esfera (en
(el contorno
pre un arco

tancia desde
de 60 radios
entre 57 y 63
de la órbita.)

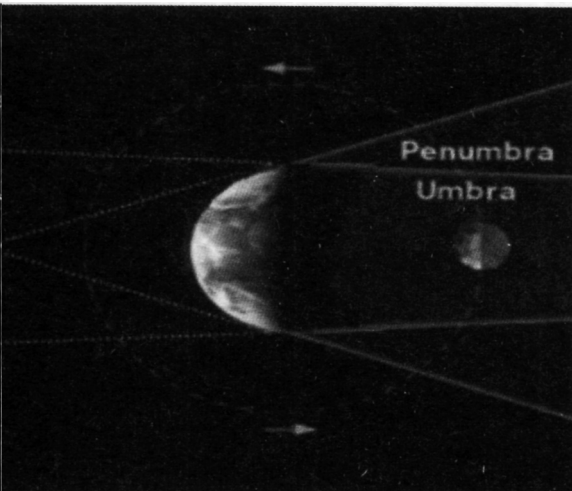
la Luna era
ladero es de

cé a partir a





- Aristarco sabía que los eclipses de Luna era debía tener aproximadamente dos radios te está muy lejos de la Tierra; más sobre esto
- A partir de muchas observaciones se sabía 4 horas.
- También se sabía que la Luna se demora un torno a la Tierra.
- A partir de estas observaciones y de un álgebra tancia de la Tierra a la Luna era de aproxim



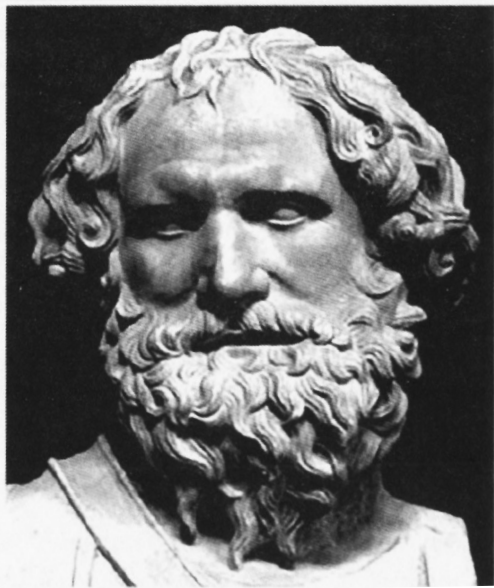
...son causados por la sombra de la Tierra, la cual
...terrestres de diámetro. (Esto supone que el Sol
...en la sección del “tercer peldaño”.)

...que los eclipses de Luna duraban máximo tres

...en mes para realizar una rotación completa en

...tebra elemental, Aristarco concluyó que la dis-
...nadamente 60 radios terrestres.

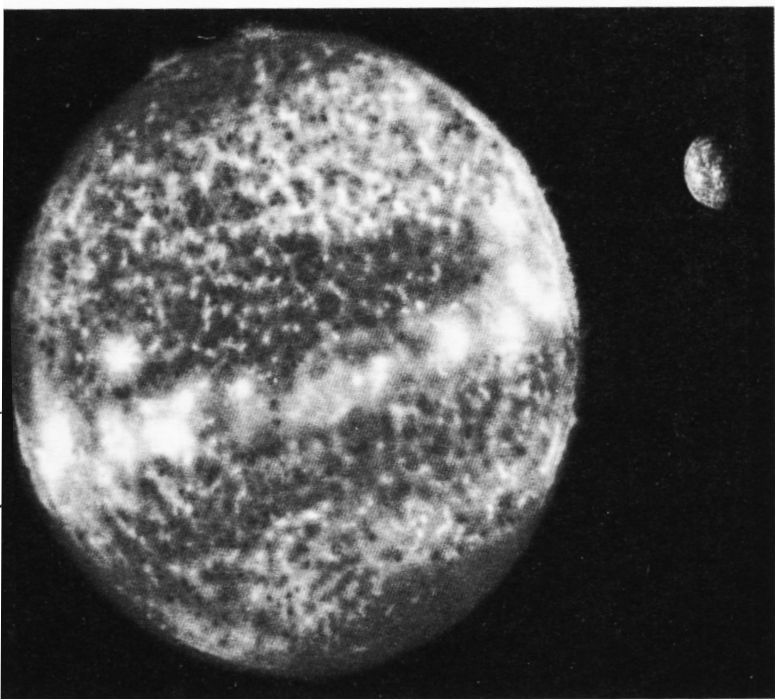
- La Luna se demora cerca de dos minutos para ocultarse ($1/720$ de un día). De este modo, el diámetro angular de la Luna es de $1/720$ de un círculo completo, es decir $1/2^\circ$.
- Dado que Aristarco sabía que la Luna estaba a una distancia de 60 radios terrestres, una trigonometría elemental daba entonces que el radio de la Luna era aproximadamente $1/3$ del radio de la Tierra. (Aristarco estaba limitado, entre otras cosas, por no poseer un valor exacto de π , para lo cual fue necesario esperar a Arquímedes (287–212 a.n.e.) algunas décadas más tarde.)

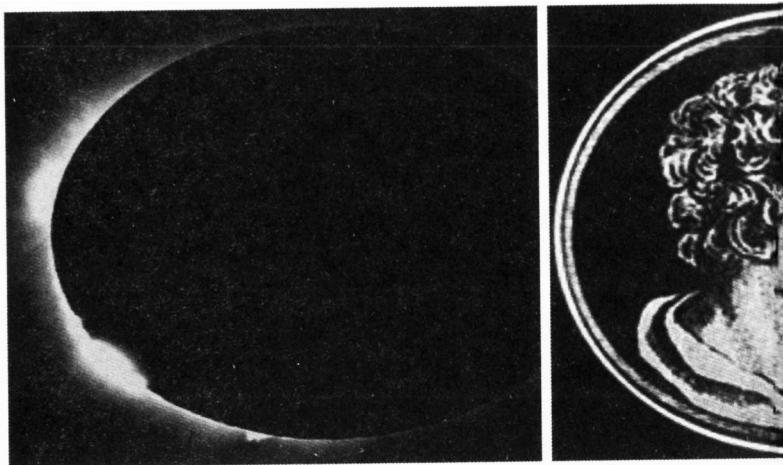


Tercer tamaño y localización

- ¿Cuál es el radio del Sol?
- ¿Cuál es la distancia desde la Tierra hasta el Sol?

peldaño: lización del Sol





Nuevamente, los antiguos griegos pudieron tam

- Aristarco ya sabía que el radio de la Luna es $\frac{1}{215}$ del radio de la Luna. Dado que el Sol y la Luna tienen casi el mismo tamaño aparente (lo que es dramático durante un eclipse de Sol), concluyó que el Sol estaba a una distancia $\frac{1}{215}$ del radio del Sol. (La respuesta verdadera es $\frac{1}{215}$.)
- Aristarco estimó que el Sol estaba aproximadamente a una distancia de 200 veces el radio de la Tierra. Este resultado resultó ser inexacto (el factor verdadero es 230 veces el radio de la Tierra). Eratóstenes (276 a.C.–194 a.C.) y Tolomeo (90–168) obtuvieron un cociente de 1,000 veces el radio de la Tierra.
- No obstante, estos resultados fueron suficientes para demostrar que el Sol era mucho más grande que la Tierra.

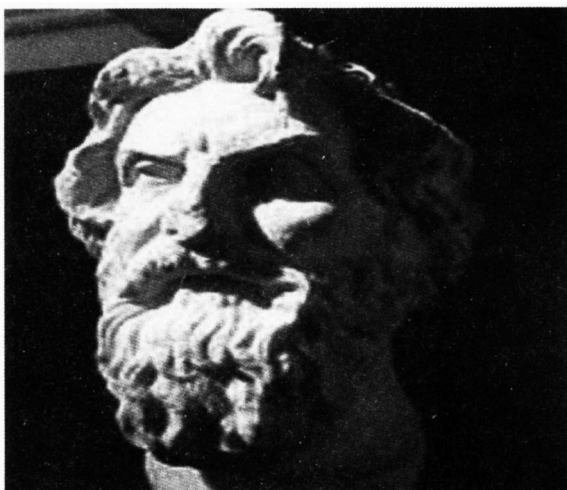


...bién responder a estas preguntas.

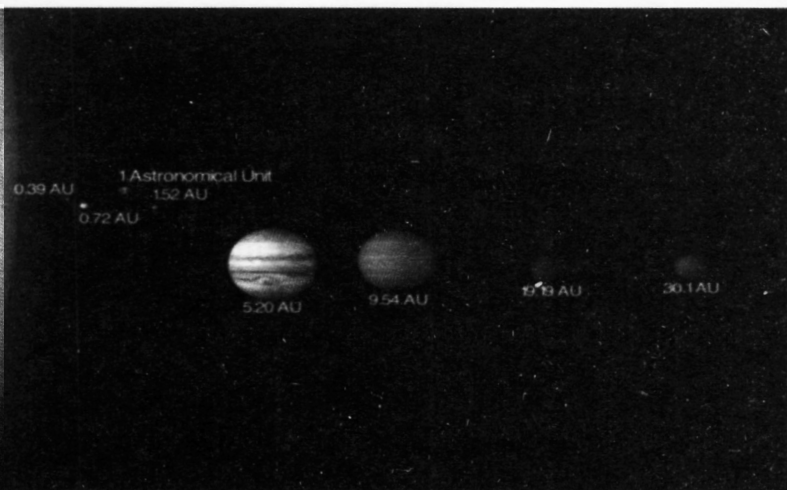
...ra aproximadamente $1/180$ de la distancia a la
...el mismo diámetro angular (lo que se hace más
...yó que el radio del Sol es $1/180$ de la distancia

...edamente 20 veces más lejos que la Luna. Esto
...aproximadamente 390) debido a que el método
...cto, era bastante inexacto. Hiparco (190–120
...ente un poco más exacto de 42.

...tes para establecer el hecho importante de que



- Debido a los resultados anteriores, Aristarco calculó la distancia a la Luna unos años antes que Copérnico. (Copérnico realizó un famoso trabajo.)
- Irónicamente, el modelo heliocéntrico de Aristarco fue rechazado por los astrónomos posteriores, debido a razones relacionadas con la evidencia observacional (ver adelante.)
- Dado que la distancia a la Luna había sido determinada por Eratóstenes y ahora se conocía el tamaño y la distancia al Sol, Aristarco pudo calcular la distancia Astronómica, y es fundamental para los próximos capítulos.



o propuso el modelo heliocéntrico más de 1700 años antes que Copérnico. Se conoce a Aristarco por esto en su propio y más

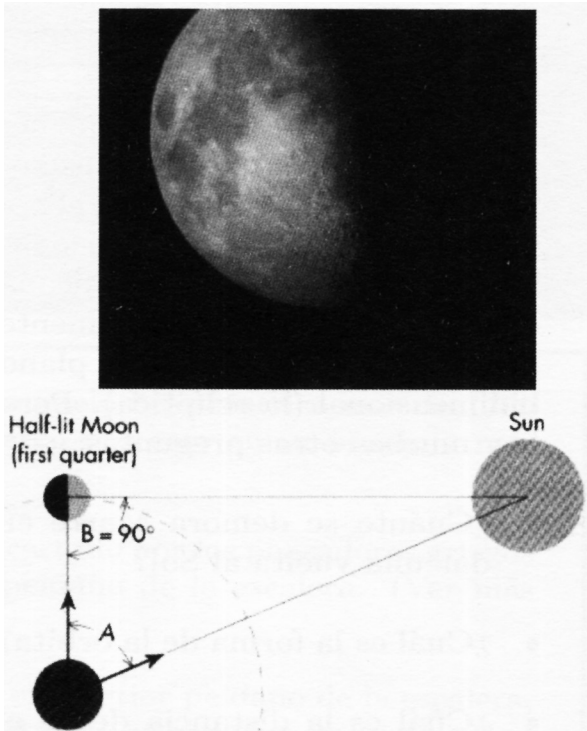
Aristarco fue descartado por los pensadores griegos con el sexto peldaño de la escalera. (Ver más

establecida en el anterior peldaño de la escalera, la distancia al Sol. (Esta distancia se conoce como la Unidad Astronómica. Los próximos tres peldaños de la escalera.)

¿Cómo fun

- Aristarco sabía que cada Luna Nueva ocurría un mes después de la anterior.
- Debido a una observación cuidadosa, Aristarco sabía que una Luna media ocurría un poco antes del punto medio entre una Luna Nueva y una Luna Llena; Aristarco determinó que esta discrepancia era de 12 horas. (Lamentablemente, es difícil medir una Luna media en forma perfecta, y la discrepancia verdadera es de media hora.)
- La trigonometría elemental entonces da que la distancia al Sol es aproximadamente 20 veces la distancia a la Luna.

¿Qué significa esto?

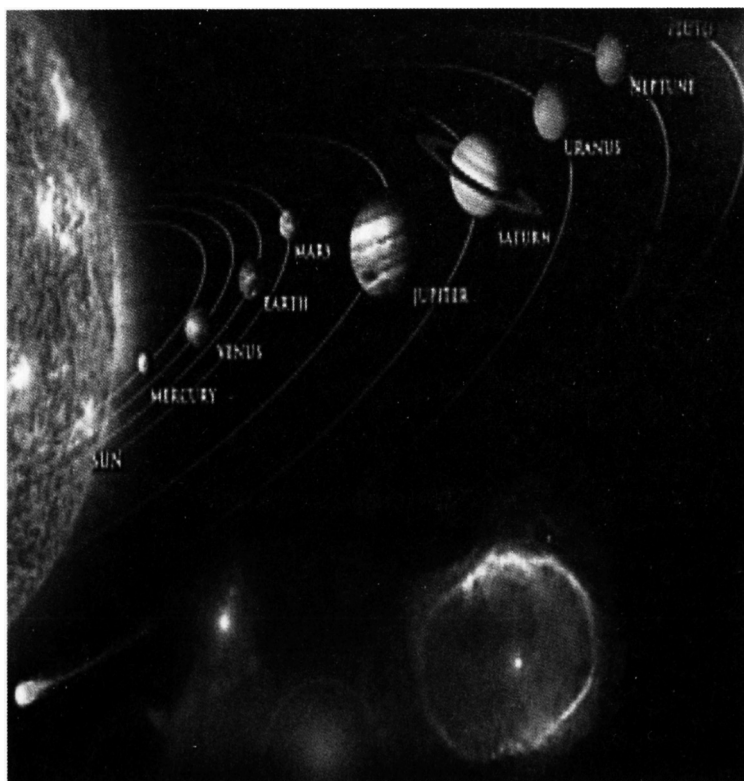


Cuarto distancias desde e

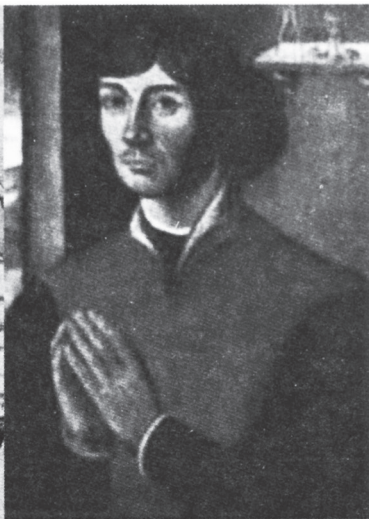
Ahora consideremos otros planetas, tal como Marte. Los astrólogos antiguos ya sabían que el Sol y los planetas permanecían dentro del Zodiaco, lo cual implicaba que el sistema solar esencialmente permanecía dentro de un plano bidimensional (la eclíptica). Pero hay muchas otras preguntas:

- ¿Cuánto se demora Marte en dar una vuelta al Sol?
- ¿Cuál es la forma de la órbita?
- ¿Cuál es la distancia desde el Sol a Marte?

pedaño: El Sol a los planetas

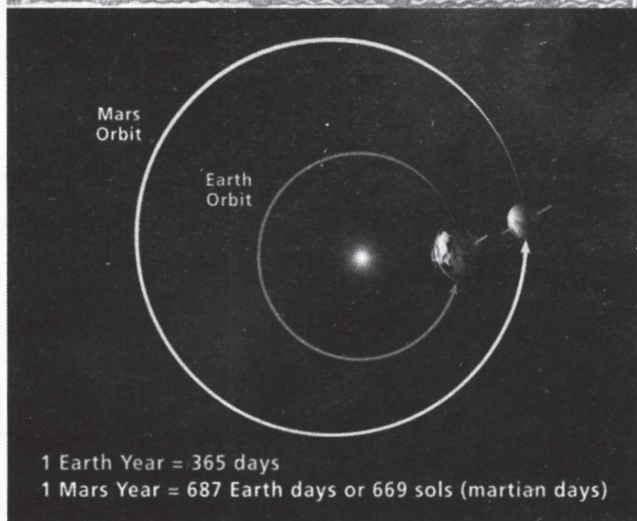


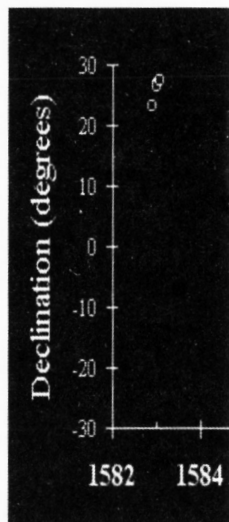
- Estas preguntas fueron investigadas por Tolomeo, pero con respuestas extremadamente poco exactas (en parte debido al uso del modelo tolemáico del sistema solar en vez del heliocéntrico.)
- Copérnico (1473–1543) estimó que el periodo (sideral) de Marte era de 687 días y su distancia al Sol de 1.5 Unidades Astronómicas. Ambas medidas son exactas hasta dos cifras decimales. (Tolomeo obtuvo 15 años y 4.1 Unidades Astronómicas.)
- Se necesitó de las observaciones astronómicas precisas de Tycho Brahe (1546–1601) y del genio matemático de Johannes Kepler (1571–1630) para encontrar que Marte de hecho no gira en círculos perfectos, sino en elipses. Estos resultados y otros datos adicionales llevaron a las leyes de movimiento de Kepler, las cuales a su vez inspiraron la teoría gravitacional de Newton.



¿Cómo hizo esto Copérnico?

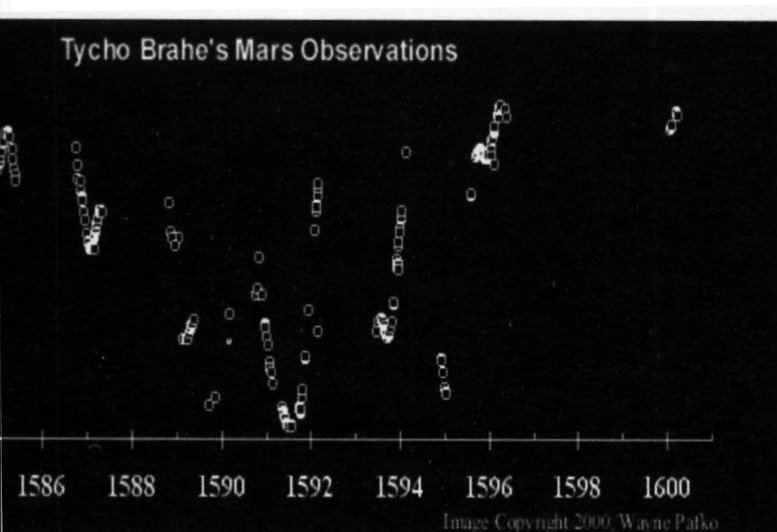
- Los babilonios ya sabían que el movimiento aparente de Marte se repetía cada 780 días (el periodo sinódico de Marte).
- El modelo copernicano afirma que la Tierra gira en torno al Sol en un año solar (365 días).
- Sustrayendo las dos velocidades angulares involucradas se obtiene el periodo marciano (verdadero) de 687 días.
- El ángulo entre el Sol y Marte desde la Tierra se puede calcular usando las estrellas como referencia. Usando varias mediciones de este ángulo en fechas diferentes, junto con las velocidades angulares anteriores, y trigonometría elemental, Copérnico calculó que la distancia desde el Sol a Marte era de aproximadamente 1.5 Unidades Astronómicas.





El problema de Kepler

- El argumento de Copérnico suponía que la Tierra estaba en el centro del universo. Kepler sospechaba que esto no era así —es lo que dijo Brahe— ¿pero cómo encontrar la órbita correcta?
- Las observaciones de Brahe daban el ángulo de posición de los planetas con una precisión muy exacta. Pero la Tierra no es una estación perfectamente fija. También, se desconocía la distancia a los planetas y la órbita de Marte. Calcular la órbita de Marte era imposible —¿no se tenía suficiente información?

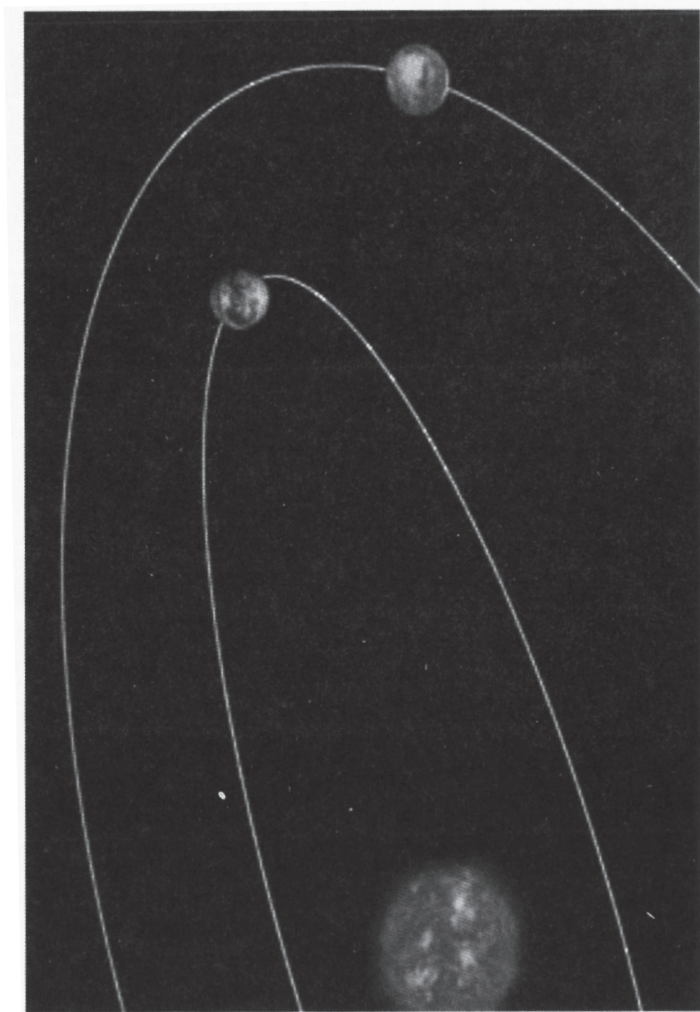


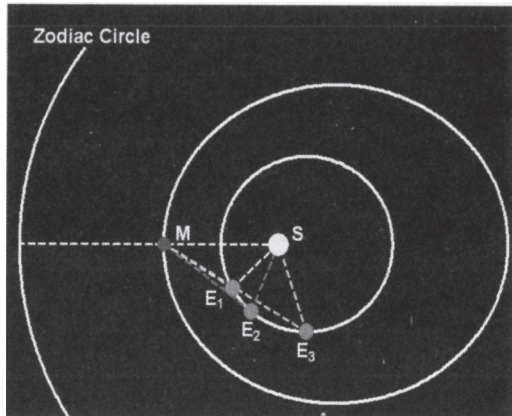
Tierra y Marte se movían en círculos perfectos. Pero no se ajustaba bien a las observaciones de Tycho Brahe. ¿Qué es la verdadera trayectoria de Marte?

¿Qué es la verdadera trayectoria de Marte? ¿Se mueve en un círculo perfecto entre el Sol y Marte desde la Tierra en forma de órbita circular? ¿O se mueve en un círculo perfecto desde la Tierra a Marte. No se sabía calcular la verdadera trayectoria de Marte a partir precisamente de estos datos parecía una revolución!

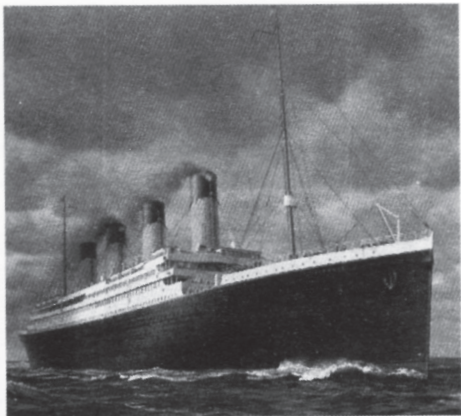
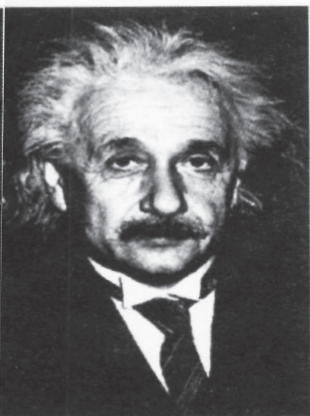
Para resolver este problema, Kepler propuso dos ideas extremadamente inteligentes.

- Para calcular la órbita de Marte en forma exacta, primero calcular la órbita de la Tierra en forma exacta. Si se conoce en forma exacta dónde está la Tierra en cada instante de tiempo, el hecho de que la Tierra se esté moviendo se puede compensar por medio de un cálculo matemático.
- Para calcular la órbita de la Tierra, utilizar a Marte mismo como un punto de referencia fijo. Para determinar la localización de la Tierra en cualquier instante dado se necesitan dos mediciones (debido a que el plano del sistema solar tiene dos dimensiones). La dirección del Sol (con respecto a las estrellas) es una de las medidas; la dirección de Marte es la otra. ¡Pero Marte se mueve!





- El avance de Kepler fue tomar medidas espaciales de su posición original y de este modo sirve como triangulación entre el Sol y Marte para localizar la Tierra. Este truco se puede invertir para entonces también.
- Alber Einstein (1879–1955) se refería a esta idea.
- Ideas similares funcionan para otros planetas. Se puede calcular a partir de anteriores peldaños de la escala de los planetas.
- En el 1900, cuando viajamos en torno a la Tierra, por ejemplo, la medición del tiempo de tránsito de un planeta de la Tierra — un método que primero se usó indirectamente en forma más directa y exacta, confirmando la escala de distancias.



ociadas cada 687 días, cuando Marte regresa a
mo un punto fijo. Entonces se puede triangular
l. Una vez que se calcula la órbita de la Tierra,
ambién evaluar la órbita de Marte.

lea de Kepler como “una idea de un genio puro”.

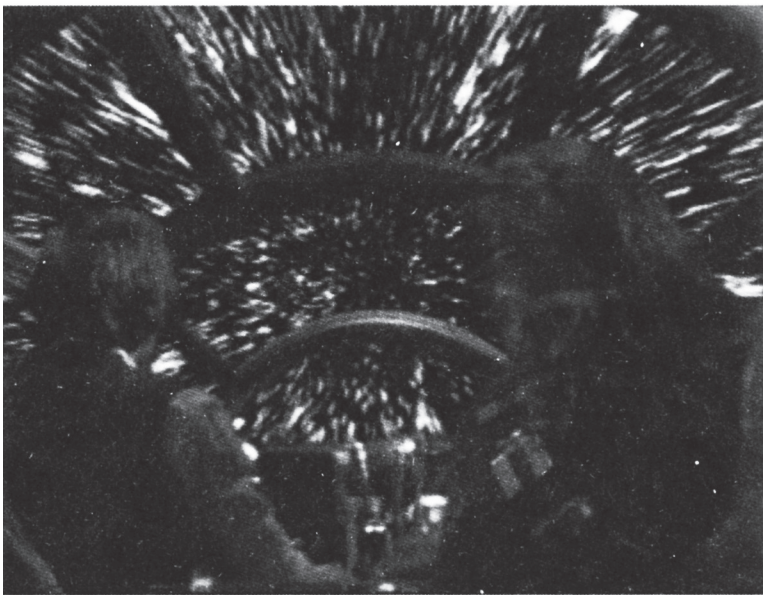
s. Dado que la Unidad Astronómica se puede
escalera, ahora se tienen las distancias a todos

se hizo más fácil, los métodos de paralaje (por
de Venus a través del Sol desde diferentes lugares
o en 1771) permitieron calcular estas distancias
y reforzando todos los peldaños, hasta ahora,

Quinto peldaño: la

- Técnicamente, la velocidad de la luz no es una distancia. No obstante, una de las primeras mediciones exactas de esta velocidad vino del cuarto peldaño de la escalera, y conocer el valor de esta velocidad es importante para peldaños posteriores.
- Ole Rømer (1644–1710) y Christian Huygens (1629–1695) obtuvieron un valor de 220.000 km/seg, cercano pero algo menor que el valor moderno de 299.792 km/seg, usando la órbita de Io en torno a Júpiter.

velocidad de la luz

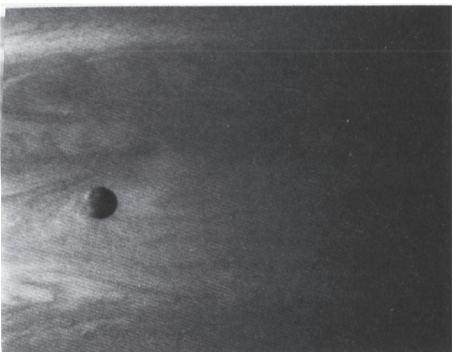


*“It’s the ship that made
the Kessel run in less
than twelve parsecs.”*



¿Cómo hicieron esto?

- Rømer observó que Io giraba en torno a Júpiter y salía de la sombra de Júpiter.
- Pero el periodo no era uniforme; cuando la Tierra estaba hasta estar opuesta a Júpiter, el periodo se alargaba. Entonces concluyó que la luz se demora 20 minutos. (Realmente se demora 17 minutos.)
- Huygens combinó estos resultados con un modelo de la Astronómica para obtener la velocidad de la luz.
- En la actualidad las mediciones más exactas se hacen a medio del radar, lo cual requiere valores precisos de esta velocidad se puede calcular en forma más precisa. modo más apoyo externo a la escalera de distancias.



ter cada 42.5 horas midiendo cuándo Io entraba

tierra se movía desde estar alineada con Júpiter
se atrasaba aproximadamente en 20 minutos.
minutos en atravesar 2 Unidades Astronómicas.

cálculo preciso (para la época) de la Unidad
de luz.

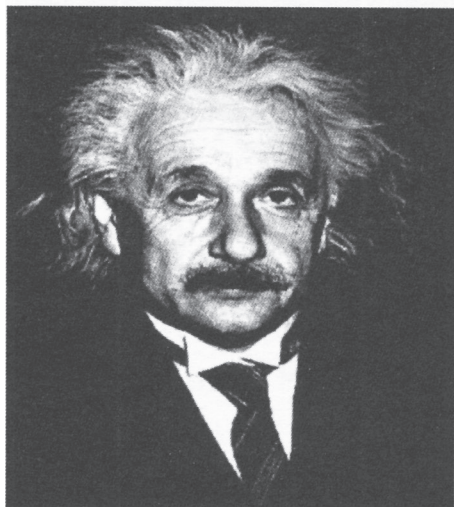
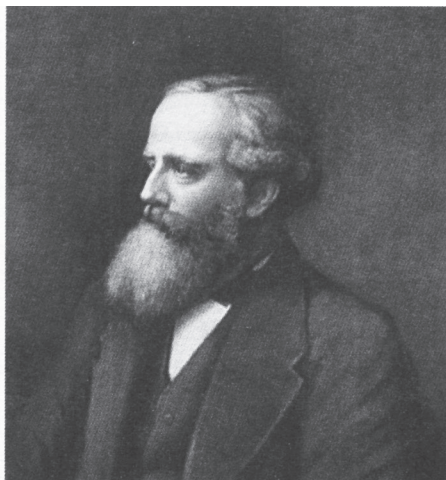
de las distancias a los planetas se obtienen por
precisos de la velocidad de la luz. En la actualidad
muy exacta con medios terrestres, dando de este
distancias.

- Los datos recogidos a partir de estos peldaños de la escalera también han sido decisivos en el desarrollo posterior de la física y en ascender a peldaños superiores de la escalera.
- El valor exacto de la velocidad de la luz (también aquellos de la permitividad y permeabilidad del espacio) fue crucial para llevar a James Clerk Maxwell a darse cuenta de que la luz era una radiación electromagnética. A partir de estos datos y de las ecuaciones de Maxwell, esto implicó que la velocidad de la luz en el vacío era una constante universal c en cualquier sistema de referencia en el cual se cumplieran las ecuaciones de Maxwell.
- Einstein argumentó que las ecuaciones de Maxwell, siendo una ley fundamental de la física, deberían cumplir en cualquier sistema de referencia inercial. Las dos hipótesis anteriores llevan inevitablemente a la teoría de la Relatividad Especial. Esta teoría vuelve importante en el noveno peldaño de la escalera (ver más adelante) para relacionar en forma consistente los corrimientos hacia el rojo con las velocidades.

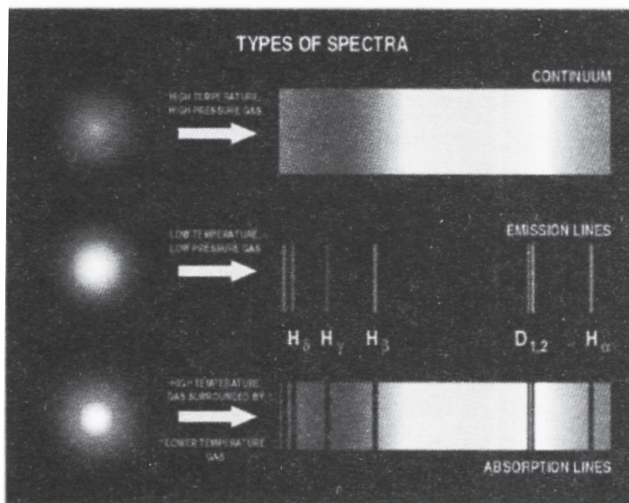
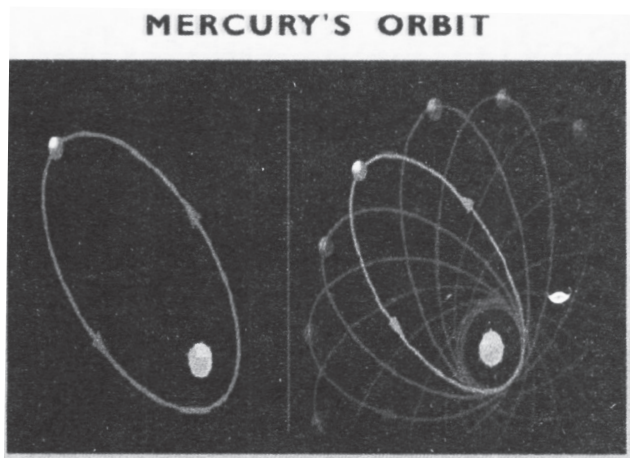
años de la
desarrollo
años supe-

luz (como
neabilidad
nes Clerck
a forma de
stos resul-
implicaba
una cons-
referencia
Maxwell.

e Maxwell,
deberían
a inercial.
lemente a
teoría se
a escalera
na exacta
dades.



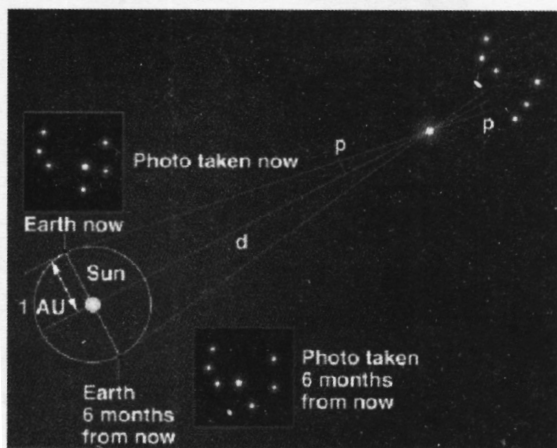
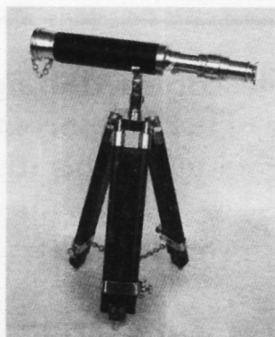
- Mediciones precisas de la órbita de Mercurio revelaron una pequeña precesión en su órbita elíptica; esto dio una de las primeras confirmaciones experimentales de la teoría de la Relatividad General de Einstein. Esta teoría también es crucial en el noveno peldaño de la escalera.
- La teoría de Maxwell de que la luz es una forma de radiación electromagnética también ayudó a la importante herramienta astronómica de la espectroscopía, la cual resulta ser importante en los peldaños séptimo y noveno de la escalera (ver más adelante).



Sexto peldaño: distancia

- Haciendo mediciones cada seis meses de una misma estrella y comparando la desviación angular, se obtiene la distancia a esa estrella como un múltiplo de la Unidad Astronómica. Esta idea de paralaje, que requiere un telescopio relativamente preciso, fue realizada por primera vez por Friedrich Bessel (1784–1846) en 1838.
- Es exacta para distancias de hasta aproximadamente 100 años luz (30 parsecs). Esto es suficiente para localizar varios miles de estrellas cercanas. (1 año luz son aproximadamente 63.000 Unidades Astronómicas.)
- Irónicamente, los antiguos griegos descartaron la estimación de Aristarco de la Unidad Astronómica y el modelo astronómico que sugería, debido a que habría implicado, a través del paralaje, que las estrellas estaban a una distancia inconcebiblemente enorme. (Bien, ... de hecho lo están.)

a las estrellas cercanas



Séptimo peldaño: distancias a las estrellas medianamente cercanas

- Con los telescopios del siglo veinte se pudo determinar el brillo aparente de las estrellas cercanas. Esta observación con las distancias a las estrellas cercanas del peldaño anterior y la ley del cuadrado inverso se usó entonces para inferir el brillo absoluto de las estrellas cercanas.
- Ejnar Hertzsprung (1873–1967) y Henry Norris Russell (1897–1957) graficaron este brillo en términos de magnitud absoluta (1905–1915, lo cual llevó al famoso diagrama de Hertzsprung-Russell para ambos. Entonces, se podía determinar el brillo absoluto de las estrellas distantes, y por lo tanto inferir sus distancias. Dado que también se puede medir el brillo aparente de las estrellas, entonces se puede encontrar la distancia.
- Este método funciona hasta 300.000 años luz. Las estrellas en el diagrama de Hertzsprung-Russell demasiado débiles para ser observadas con telescopios terrestres.

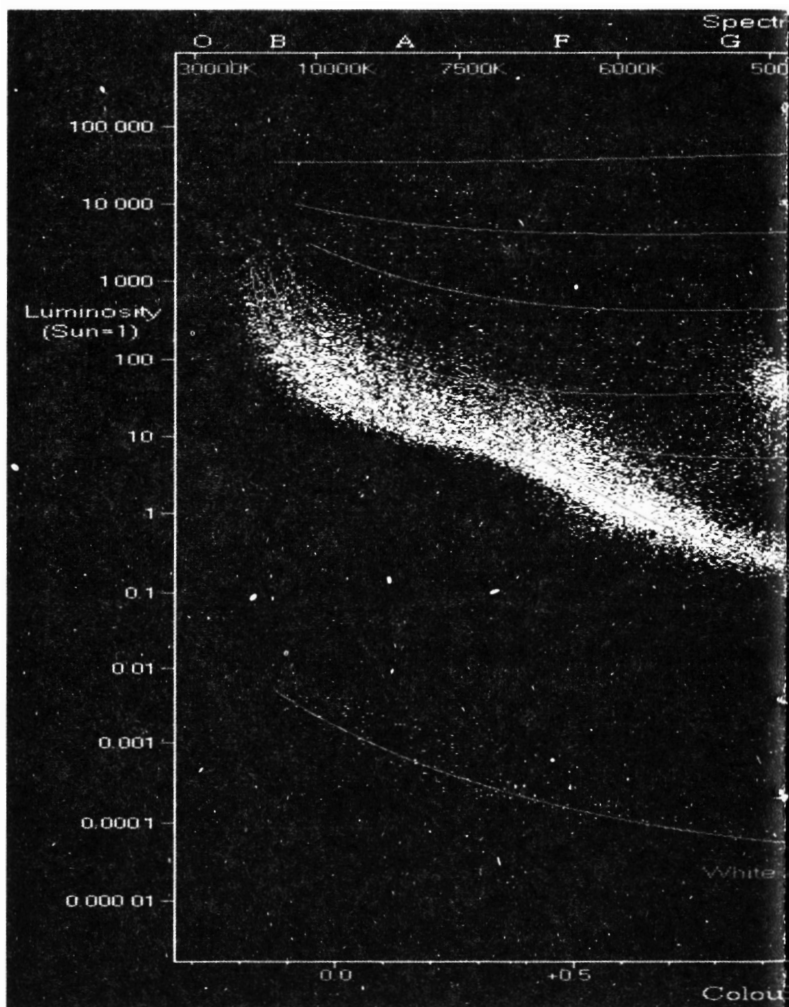
ancias te lejanas

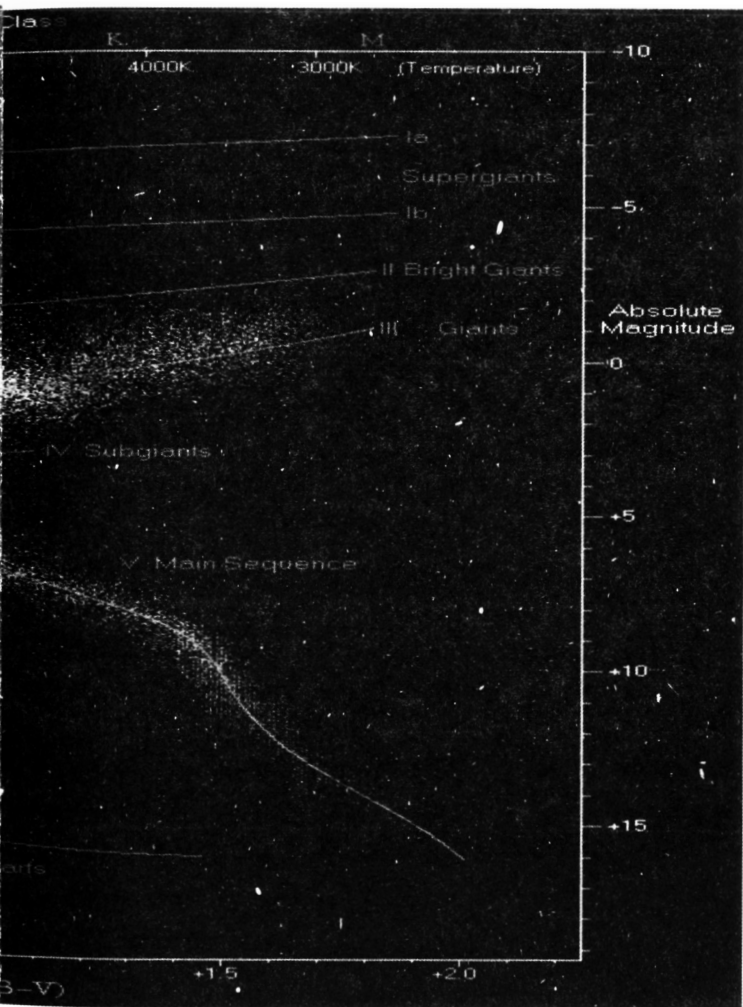
podía fácilmente
las. Combinando
estrellas cercanas
o inverso, se podía
estrellas cercanas.

y Russell (1877–
s del color entre
ma que relaciona
el color de las es-
u brillo absoluto;
illo aparente, en-

os luz. Más allá,
ung–Russell son
on precisión.







Octavo peldaño: distancias a las estrellas más

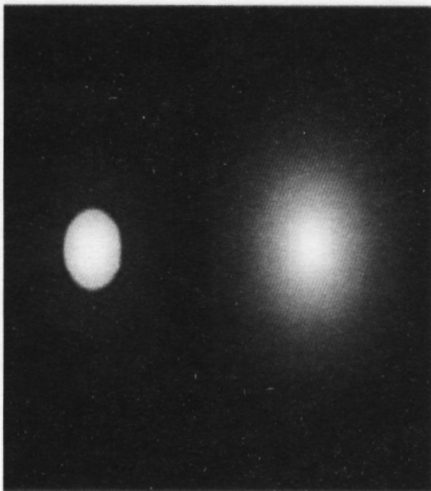
- Henrietta Swan Leavitt (1868–1921) descubrió una cierta clase de estrellas (las cefeidas) que varían rítmicamente en su brillo; graficando el brillo en función de la periodicidad observó una relación lineal. Esto dio otra manera de obtener el brillo de las estrellas y así tanto distancias observadas.
- Debido a que las cefeidas son tan brillantes que su luz funciona hasta 13.000.000 años luz. Las galaxias tienen la fortuna de tener una cefeida, de modo tal que conocemos la distancia a ellas y así hasta una distancia razonablemente grande.
- Más allá de esa escala, sólo se conocen algunas maneras para medir distancias (por ejemplo, basadas en observaciones de supernovas, los cuales son unos eventos que aun se pueden detectar a tan

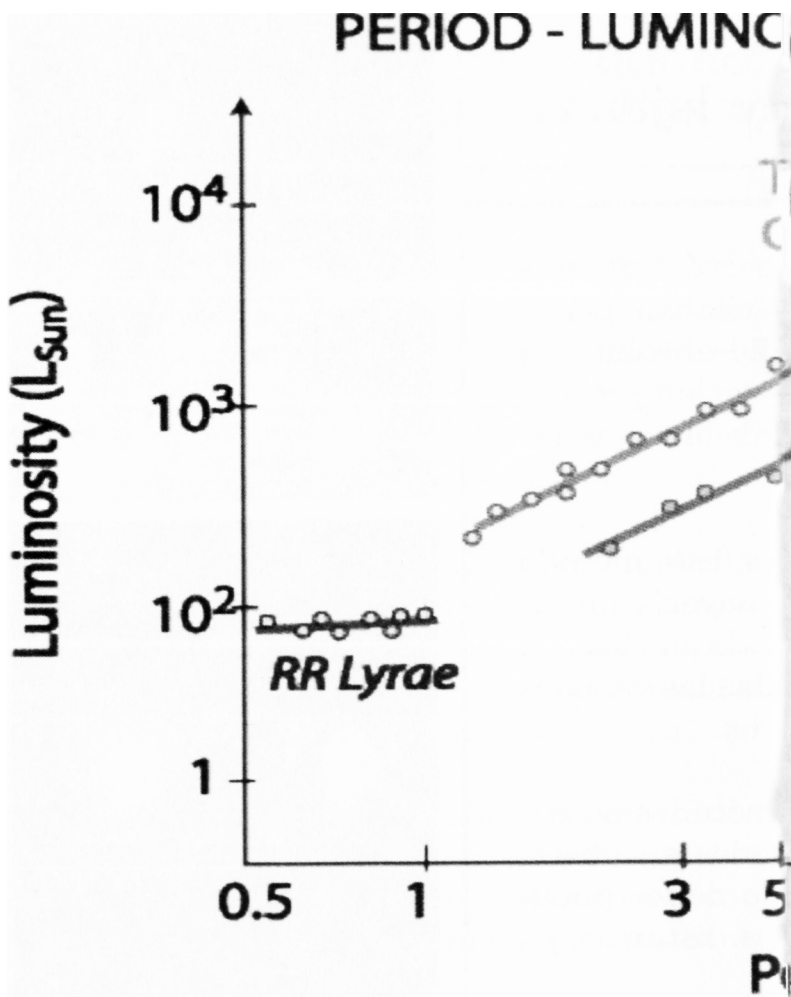
...y lejanas

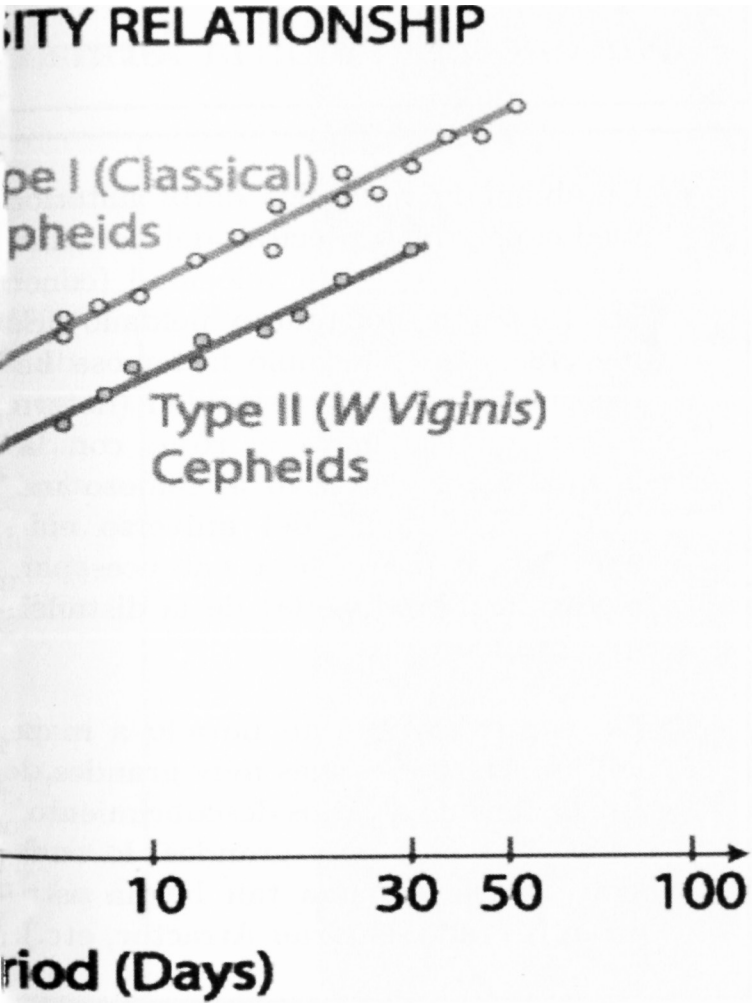
...observó que una
...oscilaban perio-
...dillo absoluto en
...relación precisa.
...absoluto, y por

...es, este método
...mayoría de las
...feida en ellas, de
...todas las galaxias
...de.

...métodos ad hoc
...sados en obser-
...no de los pocos
...les distancias).







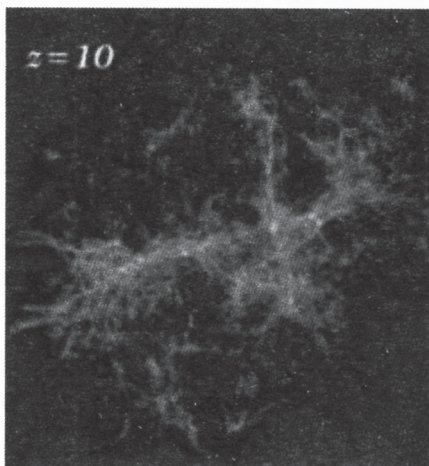
Noveno peldaño: la forma de

- Combinando todos los datos anteriores y mediciones más precisas del corrimiento al rojo, junto con la velocidad (conocida como velocidad de escape de la luz (a partir del quinto peldaño) Edwin Hubble (1889–1953) formuló la famosa Ley de Hubble que relaciona la velocidad (determinada por el corrimiento hacia el rojo) con la distancia. Esto lo cual a su vez llevó al famoso modelo del “Gran Explosión” del universo en expansión. Esta ley se puede usar entonces para la medición (aproximada) de la distancia a galaxias más grandes.
- Estas mediciones han llevado a mapas de los confines del universos a escalas muy grandes, lo que a su vez ha llevado a varios descubrimientos de estructuras a escalas muy grandes, lo cual no habría sido posible sin una tan buena astronomía. (Ejemplos: Gran Muralla, el Gran Atractor, etc.).

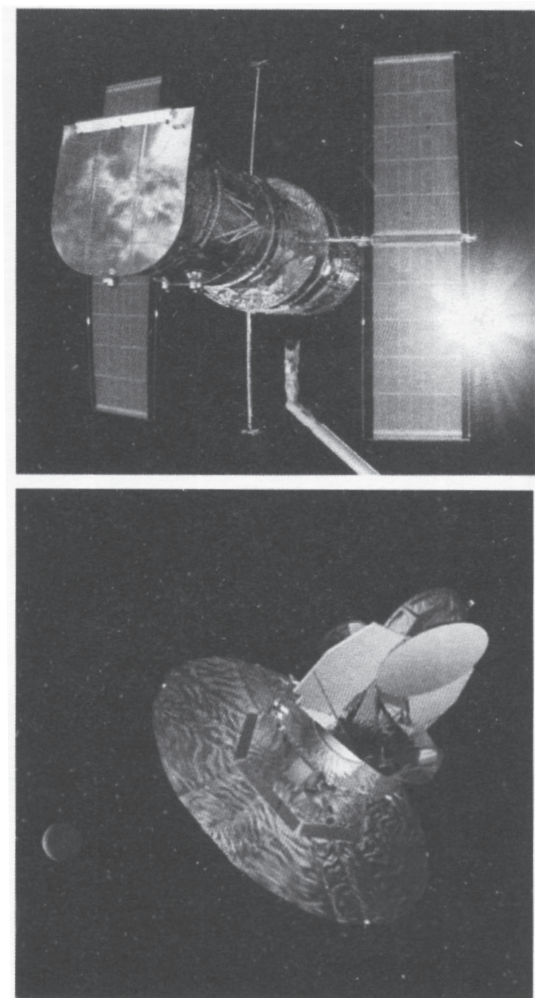
el universo

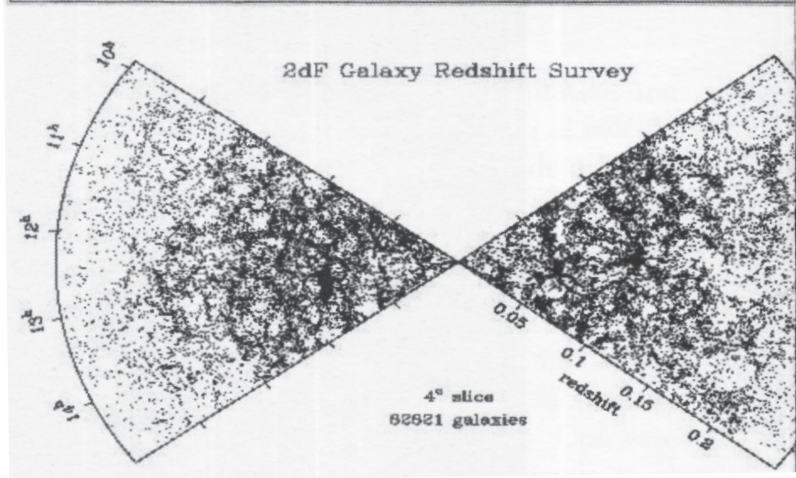
con las
os hacia
o) de la
n Hub-
e Hub-
ada con
stancia,
o de la
ansión.
ar otra
escalas

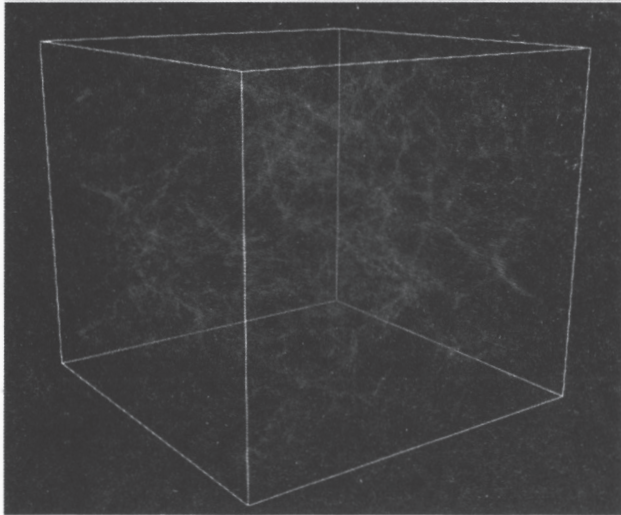
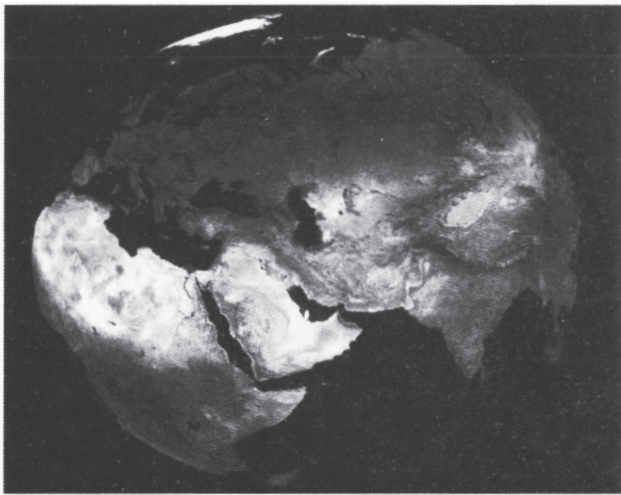
precisos
gal a su
estruc-
habría
nía (la



- Por ejemplo, actualmente nuestra mejor estimación (en el 2004) del diámetro actual del universo observable es de al menos 78 billones de años luz.
- La matemática se vuelve más avanzada en este punto, dado que los efectos de la Relatividad General influyen fuertemente en los datos que se tienen a esta escala del universo. La tecnología de punta (tal como el telescopio espacial Hubble y WMAP) también han sido vitales en este esfuerzo.
- Superar este último peldaño de la escalera (es decir, mapear el universo en su escala más grande) es todavía un área muy activa de la astronomía actual.







Agradecimientos

- Gracias a Richard Brent por sus correcciones y comentarios.
- Muchos de los datos aquí presentados fueron tomados de varias fuentes de internet (usualmente comenzando desde Wikipedia y entonces yendo a fuentes información más primarias).
- Gracias a Charisse Scott por las gráficas y el formato de Powerpoint.

Títulos publicados

1. Gerard Holton, *Las falsas imágenes de la ciencia* (septiembre, 2012).
2. Rodolfo Llinás, *El reto: educación, ciencia y tecnología* (noviembre, 2012).
3. Mario Bunge, *La filosofía de la investigación científica en los países en desarrollo* (febrero, 2013).
4. Eduardo Laso, *La concepción heredada y los métodos de validación científicos. I* (mayo, 2013).
5. Eduardo Laso, *La concepción heredada y los métodos de validación científicos. II* (agosto, 2013).
6. Charles Darwin, Alfred Russel Wallace, *Selección natural: tres fragmentos para la historia* (noviembre, 2013).
7. Jesús Mosterín, *La estructura de los conceptos científicos. I* (febrero, 2014).

8. Jesús Mosterín, *La estructura de los conceptos científicos. II* (mayo, 2014).
9. Roger A. Hegstrom y Dilip K. Kondepudi, *La quiralidad del universo* (agosto, 2014).
10. Esther Díaz, *Investigación básica, tecnología y sociedad. Kuhn y Foucault* (noviembre, 2014).



colección

CIENCIA
AL VIENTO