

Mirar a las estrellas no es, ni ha sido, solamente tarea de locos, niños o poetas.

Desde nuestra más tierna infancia como Humanidad, hemos sido cautivados por fenómenos que regularmente han ido sucediendo ante nuestros asombrados ojos.

El cielo se ha convertido en espejo en el que nos hemos ido mirando generación tras generación, y sin dejarnos vencer por la rutina, asistimos diariamente, como si fuera por primera vez, al espectáculo que sin nuestra intervención se desarrolla en el mismo escenario de siempre: La bóveda celeste.

Acercarse al mundo de la astronomía es emocionante. Conocer su vocabulario, estudiar sus leyes, construir instrumentos que nos faciliten la observación, es una tarea que podemos hacer con nuestros alumnos. Las posibilidades son inmensas, la fascinación total. Dejarse llevar por el sueño espacial es toda una aventura. Te deseamos que hoy comience para tí. Recuerda, esta noche... sopa de estrellas.

Taller de Ciencia Recreativa.

Grupo ALKALI.

IX Escuela de Verano de Extremadura.

GRUPO 1

Actividad relacionada con la Tierra:

- Construcción de un modelo para el estudio de la rotación terrestre.
"Los Amantes de la Astronomía", Colin. A. Ronan, p 10, Ed. Blume, Barcelona, 1982.

GRUPO 2

Actividades relacionadas con el Sol:

- Construcción de relojes de sol
"Los Amantes..." pp 18-20.
- Observación telescópica del Sol.

GRUPO 3

Actividades relacionadas con la Luna:

- Construcción de un modelo para estudiar las fases de la Luna.
"Los Amantes..." pp 90-91.
- Modelo para estudiar que solo veamos una cara la Luna.
Ibid.
- Observación telescópica y prismática nocturna de la Luna.

GRUPO 4

Actividades relacionadas con las estrellas.

- Construcción de un instrumento que permita medir la distancia a las estrellas.
"Los Amantes..." pp 44-47
- Observación directa, prismática y telescópica nocturna de planetas y estrellas.
"Los tesoros del firmamento" F. Ziguél, Ed. Mir, Moscú, 1967. pp 177-209.
- Estudio y uso del planisferio, o buscador de estrellas.

FUERA DE PROGRAMA

- Experiencias con programas de microordenadores para el estudio de la Astronomía.
- Construcción en Escuela de Verano de un Sistema Solar a escala, según la representación heliocéntrica de la teoría de Copérnico.

OTRAS ACTIVIDADES POSIBLES

Relacionadas con la Tierra:

- Construcción de un péndulo de Foucault.

"Los Amantes..." pp 10-11.

- Cálculo del diámetro terrestre por el método de Eratóstenes.

Vaquero Guerri, J.M. "Determinación del radio terrestre por el método de Eratóstenes", Nueva Revista de Enseñanzas Medias, pp 79-81.

Relacionadas con el Sol:

- El gnomon como reloj de sol y para el estudio de las estaciones.

"Los Amantes..." pp 16-17.

- Reloj solar de fácil lectura

Walker, J. Taller y Laboratorio, Investigación y Ciencia, pp 109-114.

- Analizar la luz solar.

"Los amantes..." pp 32-35.

Relacionadas con la Luna:

- Determinación de la fecha de Pascua.

"Los Amantes..." pp 22-23.

Relacionadas con las estrellas:

- Construcción de un reloj nocturno.

"Los Amantes..." 60-61.

- Construcción de un planisferio.

"Los Amantes..." pp 62-63.

- Construcción de un astrolabio

"Los Amantes..." pp 64-65.

Actividades varias:

-Determinación de la distancia Tierra-Luna.

"Los Amantes..." p 86.

-Determinación de la distancia Tierra-Sol por el método de Aristarco.

"Los Amantes..." p 8.

-Construcción de modelos de eclipses de Sol.

"Amantes..." pp 26-27.

-Construcción de modelos para eclipses de Luna.

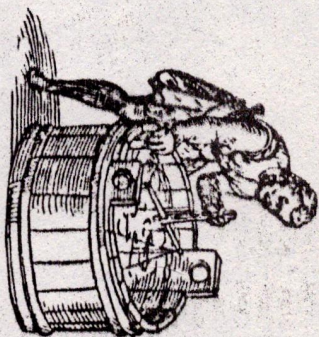
"Los Amantes..." p 99.

-Construcción de instrumentos pregalileanos.

Ten, A.E. y Monros, M.A., Historia y enseñanza de la astronomía.

Los primitivos instrumentos y su utilización pedagógica. I. Ense-

ñanza de las Ciencias 2 (1), pp 49-56, 1984.



LAS CIENCIAS
Y ENSEÑANZA

HISTORIA Y ENSEÑANZA DE LA ASTRONOMIA.
LOS PRIMITIVOS INSTRUMENTOS Y SU
UTILIZACION PEDAGOGICA. I.

TEN, A. E., MONROS, M. A.

SUMMARY

Astronomy, the most ancient of Sciences, has always been present as part of the Cultural Background of all peoples. The present paper, after reasserting the importance of Astronomy in the curricula of Intermediate levels of learning, describes and studies the characteristics and pedagogical possibilities of an ensemble of ancient instruments. In this first part, these instruments are devoted to the study of the Sun's Geocentrical motion and its consequences.

1. INTRODUCCION

La bóveda celeste es el primer objeto de observación sistemática considerado por la Humanidad. El conocimiento de las regularidades de los movimientos de los

cueros celestes y su relación con fenómenos terrestres se encuentra en la base de las más antiguas culturas. Y ello es natural: la sucesión de los días y las noches,

su desigual duración, las estaciones, los ciclos de la Agricultura y las cosechas... tienen una relación directa con la posición y movimiento del Sol, la Luna y las estrellas. Concepciones más elaboradas como las religiones de muchos pueblos o prácticas como la Astrología se encuentran en la Historia en íntima conexión con la magnificencia, movimientos y coincidencias de los cuerpos celestes.

Así la Astronomía, la más antigua de las Ciencias, ha estado presente y formando parte del acervo cultural de todos los pueblos. Desde el mito a las más modernas concepciones cosmológicas sobre el Universo, a través de los sistemas geocéntrico y heliocéntrico, conceptos astronómicos y datos de observación han sido conocimiento común, bien que cambiando con el tiempo, dentro del bagaje intelectual no solo del erudito sino de la persona mínimamente ilustrada.

Pero curiosamente, el alejamiento de la vida en contacto con la Naturaleza y la especialización de los estudios que en la época actual se producen, conlleva el que este conocimiento de los mensajes que el Cosmos nos envía, sea cada vez más escaso. Los movimientos tan evidentes del Sol o de la Luna, en su camino diario o en relación con las estrellas, la marcha de los planetas o la bóveda celeste son insospechados y desconocidos por gran parte de la población actual.

El hecho invita a la reflexión y aparece lógico al contemplar que sobre la «Ciencia de los Cieles», incluso en su nivel elemental o descriptivo y salvo algún tema en segundo o tercer ciclo de EGB (1) o BUP, bien poca información se plantea en los programas, incluso en los de los futuros enseñantes.

Y sin embargo muchos de sus elementos más sencillos, precisamente los que más relación tienen con la vida cotidiana, son, en un primer nivel de aproximación y precisión, los más fáciles de obtener. Los instrumentos que en la Historia se han utilizado y se siguen utilizando desde tiempos remotos, son, en su conocimiento, buena prueba de ello.

Hasta nuestros días ha llegado el reloj de Sol, figura aún común en pueblos y ciudades. En tiempos pasados, el número de instrumentos que formaban parte de la vida cotidiana era aún mayor. Armillas Equinociales y Solsticiales eran comunes en las plazas públicas de las ciudades griegas y romanas, despididas a relojes de agua formaban parte de los monumentos públicos... Hasta la primera década del Siglo XVII en que Galileo dirige su telescopio a los cielos, la observación de los objetos celestes se realizaba a ojo desnudo y los principios en que estaban basados los instrumentos que se utilizaban, eran accesibles a cualquier persona mínimamente informada.

La Historia de la Astronomía se revela en este punto como un inestable fondo cultural, informativo y documental, en que, junto a los grandes Sistemas del Mundo y las concepciones cosmológicas que en su evolu-

ción han conducido a nuestra actual imagen del Universo, encontramos los útiles que informaron o enriquecieron las ideas que en cada época constituyeron su contenido.

Así, junto a los textos elementales o de divulgación con queafortunadamente podemos ya contar sobre los más importantes Sistemas del Cosmos (2) y que constituyen elemento fundamental para la reflexión sobre el lugar que ocupa la Humanidad en el Universo, parecían contar con una información mínimamente detallada de los sencillos instrumentos con que comenzó a fijarse el conocimiento de la bóveda celeste.

El conocimiento que al docente se le supone en este primer estadio sobre los conceptos elementales de la Astronomía de posición: eje del mundo, ecuador celeste, meridianos y paralelos, cenit y nadir, horizonte y eclíptica, equinoccios y solsticios y funcionamiento elemental de la bóveda celeste, puede completarse con cualquier texto genérico de Astronomía (3). La selección de instrumentos se ha realizado en esta primera parte, en atención a su sencillez y facilidad de construcción. Su utilización en EGB, puede ser de utilidad en la apasionante aventura de observar los cielos.

II. LOS OBJETOS DE OBSERVACIÓN.

La observación inmediata proporcionada de un modo natural una imagen geocéntrica del Universo. La sensación de que la Tierra está fija en el «centro» (4) del Universo, intuitivamente aceptada por las primitivas cosmogonías, fue razonablemente establecida por la mayoría de los filósofos de la antigua Grecia y son destacables los intentos de fundamentar este geofisismo en consideraciones físicas de tipo cinemático, dinámico y observacional.

La aventura que lleva al pensamiento a despojarse de esta idea, es posiblemente la más apasionante de la evolución de la ciencia clásica. El éxito de la empresa —el heliocentrismo— necesitó veinte siglos y el cambio de los esquemas conceptuales de la Física antigua, para obtenerse. A su vez, este largo camino fundamentó a su vez los principios fundacionales de la nueva Física (5).

Aunque no faltaron en la antigüedad propuestas de introducción de geocentrismos no geofísicas, como las ideas de Hicetas, Ecfanto y Heraclides del Ponto sobre la rotación diaria de la Tierra o la idea heliocéntrica de Aristarco de Samos, entre otros, estas no constituyeron sistemas (6) y quedaron hasta la obra de Copérnico (7), como meras propuestas de interpretación de los fenómenos, al menos por lo que en el estado actual de la investigación conocemos. Tras la obra fundamental de Kepler y Newton, el siguiente paso, la consideración del Sol como estrella móvil en el seno de la Galaxia, hubo de esperar a la obra de Herschel a finales del Siglo XVIII y principios del XIX y por fin la integración de la Vía Láctea en el Grupo Local de Galaxias es fruto ya de este siglo. Los dos últimos pa-

En posesión de estos conceptos, obtenidos ya por la Ciencia griega en su forma abstracta, es más sencilla la inteligencia de los instrumentos relacionados a continuación... No obstante, como será fácil comprender, existen datos prácticos de observación inmediata: entrada de las estaciones y duración de los días y las noches, o duración del año, que no están ligados a la consideración de la Tierra como esfera, ideas de la que no existe constancia clara que conozcan los habitantes o los egipcios con autoridad a los desarrollos teóricos de los griegos (9).

Avistados y conscientes de la estructura real de nuestro Sistema Solar, podemos aun pues, en la observación inmediata, referirnos a la imagen geocéntrica y utilizar su lenguaje como artificio observacional. La transformación de esta imagen a la heliocéntrica es un ejercicio de aplicación científica y mental que debe ser objeto de atención especial por parte del docente.

En cuanto a los objetos de observación a los que se dedica esta primera parte, son en esencia las estrellas fijas y sobre todo el Sol. A este fundamentalmente y a su «movimiento» en la esfera celeste están dedicados los aparatos que estudiaremos.

Las estrellas fijas son las que, siguiendo el camino de la Historia, nos dotan los elementos para definir la posición de cualquier cuerpo y en concreto del Sol sobre la bóveda celeste: es relativamente sencillo, aunque la necesidad de la observación nocturna plantea problemas obvios a la docencia, el definir los elementos básicos de un sistema de referencia.

Así, una experiencia sencilla que sugerimos a nivel pedagógico, consiste en proveerse de un tubo pequeño, que pueda fijarse en cualquier posición mediante un soporte, y apuntar con él, tras haberla identificado, a la estrella Polar, comprobando que ésta no sale del campo de observación (8). El tubo materializa aproximadamente el eje del mundo.

Introduciendo el concepto de esfera celeste como una esfera imaginaria de radio arbitrario en la que se sitúan los cuerpos celestes, puede definirse el ecuador celeste (e incluso materializarse con un plano) como la circunferencia intersección de la esfera celeste con el plano, perpendicular al eje del mundo, que contiene a nuestro lugar de observación. Análogamente el importante concepto de meridiano del lugar de observación se define como la circunferencia intersección de la esfera celeste con el plano de finado por el eje del mundo y el Cenit, punto situado sobre la vertical del observador.

Es importante notar también que la latitud puede definirse como el ángulo formado por el eje del mundo, el tubo de nuestra experiencia, y el plano horizontal y hacer patente la dependencia de la latitud, de la inclinación del plano del ecuador a ella ligada y del meridiano, del lugar de observación en la Tierra considerada como esférica.

III. LOS INSTRUMENTOS Y SU UTILIZACIÓN PEDAGÓGICA.

Esta primera parte está dedicada, como hemos apuntado, a presentar y estudiar las posibilidades de algunos instrumentos basados todos ellos sobre el mismo principio: la determinación de la posición y trayectoria del Sol mediante la observación directa de las sombras que sus rayos producen.

Es importante señalar que la precisión en la observación no es objetivo fundamental en una primera etapa de iniciación a la Astronomía. Pedagógicamente podemos considerar tres niveles en la enseñanza y comprensión de las ideas astronómicas: un primer nivel puramente descriptivo, un segundo nivel ilustrado por las construcciones teóricas sugeridas por la observación primaria y un tercer nivel en que la observación, muy refinada, queda reducida a la construcción de los resultados de las técnicas matemáticas con que se forman las teorías. Es en este nivel en el que la precisión alcanza el rango de imprescindible. En este esquema se entienden las galabras de Laplace cuando afirma: «La Astronomía es un gran problema de Mecánica en el que los elementos de los movimientos son las magnitudes constantes arbitrarias. La solución de este problema de precisión de las observaciones y de la construcción de los análisis. Es muy importante rehacer el análisis y completar el análisis de manera que podamos cesario derivar la observación sino sabies.» (10).

Aunque el pedagogo debe ser consciente del alcance de esta definición de la Astronomía de posición, aplicable hasta donde alcanzan las leyes teóricas de la Física y debe transmitir a sus alumnos la idea de precisión como inherente a la Astronomía, debe comprender también, como muestra el desarrollo histórico, los estadios por los que esta ciencia, como ciencia observacional por excelencia, discurre. La precisión debe convertirse así en objeto de reflexión en el contexto de la práctica con los alumnos, en la que se conjuga perfección teórica de los instrumentos con refinamiento en las técnicas de observación (11).

Tras esta reflexión, los instrumentos que vamos a estudiar son: el Gnomon, el Polo, la Armilla equinoccial, la Armilla solsticial, el reloj de Sol ecuatorial y el Zócalo de Ptolomeo.

El más simple y a la vez el más antiguo y extendido de los instrumentos astronómicos es el Gnomon. En su forma más sencilla consta de una varilla (estilo) fijada verticalmente sobre una superficie plana horizontal, sobre la que se proyecta la sombra del estilo producida por los rayos del Sol (Figura 1).

Existe constancia de utilización del Gnomon en las más antiguas culturas. Junto a las culturas mesíticas, en que únicamente podíamos conjeturar sobre el uso de ciertos monumentos megalíticos, conocemos su utilización por los astrónomos chinos, en elemento esencial de la Astronomía Hindu, ampliamente utilizado por los egipcios y babilonios, Herodoto nos informa que de estos fue tomado por los griegos, posiblemente por Anaximandro (12). Ampliamente extendido por el mundo griego y romano, fue utilizado por Eratóstenes en su famosa determinación del radio de la Tierra. Fue así mismo popular entre los astrónomos árabes y es descrito el uso que de él hizo Al-Marwazi, más conocido por Al-Habab (13) en los orígenes de la trigonometría árabe. Bajo diversas formas ha sido utilizado en los tiempos posteriores y es también muy conocido el Gnomon de Paolo Toscanelli, quien utilizó con fines astronómicos la cúpula de la Catedral de Sta. María del Fiore, en Florencia (14).

Es el antecesor de todos los instrumentos astronómicos basados en la proyección de la sombra de un objeto y a pesar de su sencillez de construcción, es grande la cantidad de información que puede proporcionar. Sin embargo, esta información viene expresada en función de dos variables: el tamaño y la posición de la sombra del estilo, de las que ha de extraerse y convertirse en magnitudes angulares, más fácilmente utilizables. Esta última dificultad, aumentada por la carencia de una ciencia trigonométrica avanzada debió ser la que obligó a los caldeos a desarrollar otro instrumento, que, aunque un poco más complejo de construcción, es considerablemente más sencillo de utilización.

Este instrumento, el Polos, pasó también al pueblo griego a través de los babilonios (15). En esencia no es más que un Gnomon modificado en que la superficie plana se ha sustituido por otra semiesférica en que el estilo queda en el centro de la superficie cóncava, coincidiendo exactamente con el radio (Figura 2).

En él se elimina la variable «longitud de la sombra» y queda como única significativa, la posición del extremo del estilo, sobre el interior de la semiesfera. Es el reloj de Sol ecuatorial, desarrollados por los astrónomos griegos, especialmente alejandrinos, que después estudiaremos.

Es fácil comprender que la superficie interior del Polos representa la bóveda celeste invertida. Expuesto a los rayos del Sol desde su orto a su ocaso, la sombra del extremo del estilo (cuyo lugar puede señalarse mediante un punto a intervalos regulares de tiempo), des-

cribía en un día cualquiera una curva sobre la superficie de la semiesfera, simétrica de la descrita por el Sol sobre el horizonte durante ese día (Figura 3). Ello nos proporciona la ocasión de «grabar» el camino del Sol sobre el Horizonte (SCP en la figura 3) y «verlos» aun- que en forma invertida (SCP' en la figura 3).

Esta posibilidad de grabar el camino del Sol puede ser, en su utilización en la enseñanza elemental de los primeros conceptos astronómicos, fácilmente empleada en la visualización de las efemerides motivadas por los «movimientos» del Sol, reflejo de los que la Tierra realiza en su revolución anual alrededor del este.

En efecto, para ello, aunque no es necesario en sentido estricto y puede determinarse con el propio instrumento, supongamos fijo el Polo y en su superficie interior trazados el meridiano y el ecuador celestes (16) en el lugar de observación. Si la experiencia de seguir la sombra del extremo del estilo (en adelante «la sombra») durante un día, se repite periódicamente, con varios días de intervalo, podrá observarse que la sombra traza curvas distintas sobre la superficie, que obviamente coincidirán con arcos de paralelos celestes simétricos de los que el Sol habrá recorrido durante los días en que se ha realizado la experiencia (ver figura 3).

Ello indica inmediatamente que el Sol, a diferencia de las estrellas fijas que siempre recorren el mismo paralelo (17), tiene «otro movimiento» sobre la bóveda celeste. Este movimiento es naturalmente el movimiento que anualmente realiza por la eclíptica, reflejo del camino real de la Tierra a su alrededor.

Si la observación se prolongase a lo largo de un año, podría observarse que la curva que describe la sombra, oscila entre una altura máxima (el día en que el Sol está «más bajo» sobre el horizonte, hacia el 21 de Diciembre (18)) y una altura mínima (el día en que el Sol se encuentra «más alto» sobre el horizonte, aproximadamente el 21 de Junio). Tomando este día como referencia, se vería ir subiendo la sombra hasta que hacia el 21 de Septiembre, coincidiría con el ecuador, continuando subiendo hasta el 21 de Diciembre y a continuación comenzar a bajar, atravesando de nuevo el ecuador hacia el 21 de Marzo y llegando otra vez a su punto más bajo hacia el 21 de Junio, repitiéndose el ciclo a continuación.

De este modo podemos determinar de modo aproximado el día en que el Sol se encuentra más alto sobre el Ecuador, el Solsticio de Verano o día en que comienza esta estación, los días en que el Sol atraviesa el Ecuador (momento en que se cortan las circunferencias del Ecuador y la Eclíptica) que corresponden a los Solsticios de Otoño y Primavera, 21 de Septiembre y Marzo, en que comienzan estas estaciones y el día en que

el Sol se encuentra en su punto más bajo respecto al Ecuador, el Solsticio de Invierno, en que comienza asimismo esta estación.

En esta variación podemos observar también la variación en la duración del «día», tiempo durante el que el Sol se encuentra encima del Horizonte, por ejemplo marcado el lugar de la sombra a intervalos de tiempo regulares (una ó media hora), que estarían representados por arcos iguales debido a la rotación uniforme del Sol, reflejo de la rotación uniforme de la Tierra alrededor de su eje. Esta duración crecerá desde el Solsticio de Invierno hasta el Solsticio de Verano, siendo el «día» del Equinoccio de Primavera, en que el Sol saldrá exactamente por el Este y se pondrá por el Oeste, de igual duración que su noche. Análogamente, el día decrecerá desde el Solsticio de Verano al de Invierno (19).

Con el Polos puede calcularse también el ángulo que forma el plano en que se mueve el Sol con el Ecuador celeste (en la realidad, el ángulo de inclinación del eje de la Tierra), ángulo al que se denomina «oblicuidad de la Eclíptica». Este importante ángulo, en efecto, puede determinarse directamente, midiendo el ángulo que desde el extremo del estilo (o sea sobre la superficie del Polos, ya que el estilo coincide con el radio del Polos) subtenden el punto más bajo de las curvas que traza el Sol en los Solsticios, en el momento en que se encuentran estos puntos sobre el meridiano. Su medición dará aproximadamente 47° con lo que obtenemos para la oblicuidad de la Eclíptica un ángulo de aproximadamente 23° 30' (20).

Con todo ello se puede conseguir la visualización de la marcha del Sol a lo largo del año, conocer la entrada de las estaciones e incluso saber la hora, aunque sobre ello veremos otro instrumento particular.

Se pueden determinar también mediante el Polos la dirección del meridiano o la latitud del lugar de observación, que ya obtuvimos aproximadamente mediante nuestro pequeño tubo del principio. En efecto, el meridiano se sitúa aproximadamente en la línea que une los puntos inferiores de las curvas diarias trazadas por la sombra y la latitud se obtiene midiendo el ángulo que el 21 de Marzo o Septiembre forma la sombra en el meridiano con el pie del estilo, o mejor aún, midiendo este ángulo el 21 de Diciembre o Junio y restando o sumando los 23° 30' de la oblicuidad de la Eclíptica.

Aunque en instrumentos de pequeño diámetro los errores son grandes y los Solsticios y Equinoccios no siempre se producen los días 21 de Marzo, Junio, Septiembre y Diciembre, a las 12 del mediodía (21), el Polos se revela sí como instrumento pedagógicamente importante por su capacidad de visualización directa, como

hemos visto, de conceptos ciertamente abstractos.

A ello se une el que, aunque no tanto como el Gnomon, que a continuación comentaremos, su construcción es sencilla. Es efectivamente, si no se dispone de una semiesfera adecuada (de un diámetro no inferior a unos 20 cm), puede obtenerse ésta tomando un objeto esférico del mayor tamaño posible y realizando sobre él un molde en escayola reforzada con fibra de carbono, de modo que se obtenga una semiesfera lo más perfecta posible, situando el estilo, de la longitud del radio, de modo que su extremo coincida lo más exactamente posible con el centro de la circunferencia que constituirá el borde del instrumento, situado horizontal.

El Gnomon, al que al principio nos hemos referido, posee a ser de interpretación más compleja, especialmente en la Historia antes de la invención de la trigonometría por hindúes y árabes, al trabajar con triángulos en vez de con arcos y tener dos variables, longitud y posición de la sombra, tiene la ventaja fundamental de poder tener dimensiones mayores (la longitud del estilo, monumento o edificio del que se observa la sombra). Con él puede determinarse la dirección del meridiano con mayor precisión (22) y entre sus particularidades se cuenta la que en los Equinoccios, la sombra del extremo del estilo, describe una recta orientada de Este a Oeste, hecho fácil ya de comprobar en las curvas de aplicación del Polos. Por lo demás y aun cuando las curvas que se obtienen sobre la superficie hemisférica son un poco más complejas (23), se pueden realizar con él las mismas experiencias que con el Polos.

Como hemos indicado, la evolución de este último instrumento, el Polos, en su utilización por el pueblo griego, hizo derivarse de él, diversos instrumentos de uso más específico. Entre ellos de encontrarlos en Armillas o Esferas Armilares, de las que vamos a estudiar las más sencillas.

La Armilla Equinoccial está basada en el hecho, ya comentado, de que en los equinoccios, el Sol recorre el Ecuador Celeste. Por tanto colocado el instrumento en un simple anillo (Figura 4), precisamente en el Ecuador, su parte superior proyectará durantes todos el día su sombra sobre la parte inferior, a la que oscurecerá completamente, solo ese día (24).

El instrumento, que en Grecia y en Roma se hallaba colocado en una plaza pública en algunas ciudades, bien fijado al suelo o a una pared, es de construcción muy sencilla aunque su orientación es un ejercicio interesante.

La Armilla Solsticial se desarrolló en varias formas, perdiendo incluso su carácter de instrumento circular. Una forma sencilla puede obtenerse situando un semia-

CR-10

nillo exactamente en el plano del meridiano, materializando en el lugar de su radio un pequeño estilo horizontal. La información que se busca obtener con él es la altura del Sol en el meridiano para conocer los días de su máxima y mínima altura a que corresponden los Solsticios.

Una forma aún más simplificada se representa en la figura 5, en que el semianillo se ha sustituido ya por una simple pared o tabla puesta en la dirección del meridiano, con un cuadrante de círculo trazado y en su centro fijado un pequeño estilo horizontal que comienza a proyectar su sombra sobre el cuadrante graduado en el momento en que el Sol alcanza el Meridiano. Su construcción es también muy simple y permite medir la altura meridiana del Sol todos los días del año. Los puntos más bajo y más alto de la sombra indicarían evidentemente los días de los Solsticios de verano y de invierno.

Esta Armilla, como los otros instrumentos estudiados, son instrumentos fijos. A ello obliga la dificultad de su orientación. Junto a ellos, los griegos desarrollaron otros instrumentos móviles para cumplir fines parecidos y que pueden ser también muy útiles en la comprensión de los movimientos celestes y en el aspecto que estamos estudiando, el movimiento del Sol. Antes de estudiar el reloj de Sol ecuatorial, también fijo, estudiaremos un instrumento muy parecido a nuestro modelo de Armilla Solsticial, el llamado Zócalo de Ptolomeo, atribuido al famoso astrónomo del Siglo II d.C. aunque posiblemente formas parecidas existieran antes de esta época.

Su justificación histórica es sencilla. Dado que los griegos tenían buenas tablas de las posiciones del Sol en función de los días del año y las horas del día, el conocimiento de la altura del Sol en un momento determinado, podía proporcionar la fecha o incluso la hora, en la observación meridiana o si se conocía el Azimut del Sol (25).

Consiste en un bloque paralelepípedo (figura 6) sobre el que, en una de sus caras, se ha trazado un cuadrante. Al igual que el modelo de la Armilla Solsticial que hemos presentado, un estilo horizontal se fija en el centro del cuadrante. Es esencial que las caras del paralelepípedo se encuentren perfectamente horizontales y verticales; para ello, el instrumento de la figura 5 tiene sencillamente un nivelación; sobre el radio vertical del cuadrante se fija otro estilo ligeramente más corto que el superior. De éste pende un pequeño peso que hace las veces de péndulo: cuando el extremo del estilo inferior roza el hilo que suspende el peso, el instrumento está perfectamente situado para la medición. Su funcionamiento es muy sencillo: colocado de forma que la cara graduada quede en la sombra y perfec-

tamente situado horizontal y verticalmente, se va girando en dirección al Sol hasta que el extremo oriental de éste (en el caso del instrumento de la figura), comienza a iluminar la cara graduada. En este momento el estilo, superior comienza a proyectar su sombra sobre la graduación, lo que permite directamente medir la altura del Sol sobre el horizonte en ese momento.

Por su sencillez puede también ser útil auxiliar en la enseñanza y permitir mostrar en cualquier momento la altura del Sol, realizar tablas o simplemente comprobar las variaciones de la altura del Sol día a día u hora a hora. Sus dimensiones son arbitrarias, lógicamente cuanto mayores, mayor será la precisión del instrumento, pero por ejemplo un ladrillo macizo puede ser una útil base para su construcción práctica.

Por fin, el último instrumento que en esta parte estudiaremos es un reloj en sentido estricto, pues alguno de los estudiados pueden cumplir tal finalidad. Se trata del reloj de Sol Ecuatorial o Cuadrante Ecuatorial. Basado en la propiedad, ya observada por el Pólos, de la regularidad del movimiento del Sol durante su trayecto sobre el horizonte, imagen del regular movimiento de la Tierra sobre su eje, el reloj de Sol Ecuatorial consta sencillamente de un plano atravesado por un estilo vertical respecto a él, que sirve de centro a dos circunferencias graduadas sobre ambas caras del plano y graduadas (Figura 7). El plano se hace coincidir con el Ecuador Celeste, de modo que el estilo se dirige exactamente hacia el Polo Norte. El ángulo α de la figura será por tanto igual a la colatitud ($90^\circ - \text{latitud}$) del lugar de observación.

Dado que en Otoño e Invierno, el Sol se encuentra constantemente bajo el Ecuador (lo hemos podido comprobar ya con el Pólos), la sombra del estilo se proyectará sobre la cara inferior mientras que la cara superior quedará constantemente en la sombra. En Primavera y verano, la sombra la proyectará el estilo superior y la cara inferior quedará constantemente en la sombra.

Si sobre las circunferencias grabamos radios cada 15° (26), la sombra recorrerá cada uno de los sectores circulares en una hora exacta, coincidiendo las 12 (T. U.) aproximadamente con el radio vertical inferior (26).

La sencillez y precisión de este reloj motivó que incluso hasta el Siglo XVIII, se utilizase para calibrar los relojes mecánicos. Es un instrumento extraordinariamente ilustrativo tanto en su indicación de la hora como en el tránsito de la sombra desde la cara inferior a la superior y viceversa precisamente en los equinoccios.

A su vez nos proporciona, teniendo un reloj normal, el determinar salvo el error de ecuación de Tiempo (ver nota 26) y las imprecisiones de construcción y observación, la dirección del Polo Norte y la posición del Ecuador. En efecto, conociendo la hora y la corrección en la ecuación de Tiempo del día y haciendo coincidir la sombra del estilo con la hora o el grado corres-

pondiente en la circunferencia graduada, el instrumento se habrá orientado en la dirección correcta.

Con el término esta parte dedicada a los instrumentos de sombra. Junto al conocimiento de su origen histórico, la sencillez y economía de su construcción, hace posible la construcción con medios no especializados

NOTAS

- (1). Pueden consultarse los PROGRAMAS renovados de la Edición General Batsch, Círculo medio, Ayer de Ciencias de la Naturaleza, Boque (edición 2.7. Círculo Superior, Ayer de Ciencias de la Naturaleza, Boque (edición 3.5. Publicadas por Ed. Escuela Española, Madrid, 1981).
- (2). Podemos citar como más accesibles entre los muchos que ya existen, los de ABETTI (1978), HANSON (1978) o WILSON (1983). Es importante también, por su gran cantidad de información la obra conjunta TATON (Ed.) (1971).
- (3). Existen también muchos y buenos tratados de introducción a la Astronomía. Podemos citar por ejemplo MARTIN ASIN (1979) o RONAN (1982).
- (4). Tal idea, razonada al parecer en primer lugar por Anaximandro (hacia 570 a. C.), al afirmar que si no estuviera en el centro "cerca" hacia él, no fue comprendida por los pitagóricos, para los que giraba alrededor de un fuego central, por ejemplo en Filolao (Siglo V a. C.).
- (5). Puede ser muy interesante a este respecto la lectura comentada de la inimitable obra de Galileo GALILEI (Ed. Esp. 1973), en especial los párrafos de la Segunda Jornada en que se introduce la Relatividad galileana, pgs. 37-56, 90-91, 154-155.
- (6). Ver HANSON (1978), esp. Libro 2, parte I, pg. 165 y ss.
- (7). Actualmente es accesible ya la obra de Copérnico en Castellano COPERNICUS (Ed. Esp. 1982). Es accesible también la traducción del Libro I en la edición de Koyré (1963). Puede consultarse también una trad. castellana del "Comentario-lus", primera obra copernicana de Copérnico sobre sus ideas heliocéntricas: COPERNICUS, DIGGES, GALILEI (1963).
- (8). La Polar, como es conocido no conocido con el Polo Norte Celeste, trazando a su alrededor en su movimiento diario, un círculo de unos 50° de radio. La utilización de tubos para individualizar estrellas es cada vez entre griegos y árabes.
- (9). Existen sin embargo indicios de que una idea de este tipo pudo ser utilizado con anterioridad a los filsofos y astrónomos griegos.
- (10). LAPLACE (1798-1925). La cita puede encontrarse también en HANSON (1977).
- (11). Debe hacerse especial énfasis en la importancia de la reducción de las medidas como método de reducción de errores. En los primeros tiempos de la Astronomía, prácticamente el único medio de reducir los errores de los imperfectos instrumentos de observación, consistía en la realización de observaciones largo tiempo repetidas.
- (12). Ver por ejemplo DAMPIER (1972) o el artículo de Lefèvre y Vercouter en TATON (1971), Vol. I, pg. 31. La referencia base para prácticamente todas las demás, puede encontrarse en la Historia de la Geometría contenida en el Vol. I, pg. 713-716 de la Histoire des Mathématiques de MONTUCLA (1799-1802).
- (13). Ver por ejemplo MIELL (1932), esp. pg. 60 o SMITH (1958), esp. Vol. I, pg. 174, Vol. II, pg. 622.
- (14). Ver por ejemplo ABETTI (1978), esp. pg. 76 y ss.
- (15). V. nota (12).
- (16). De hecho, en la utilización del Pólos como reloj de SOL, tenía grabadas esas semicircunferencias más otras: una ecuando a los polos boreales y los trópicos. Es útil graduar de 0° a 90° el cuadrante norte del arco del meridiano para leer directamente las alturas máximas de la sombra y en su paso por el meridiano.
- (17). Abstracción hecha evidentemente, de las correcciones de Precesión y Nutación despreciables a este nivel de precisión.
- (18). A efectos astronómicos habitaríamos siempre de la fecha (21). Realmente el momento de los Solsticios y Equinoccios varía respecto del calendario en días y horas. El momento exacto puede encontrarse fácilmente en cualquier almanaque astronómico.
- (19). Puede construirse y visualizarse de este modo, una representación de los buenos horarios, utilizables, si se tiene una buena tabla de longitudes eclípticas del Sol a lo largo del año, para conocer la hora por la noche, aunque hay otras formas más sencillas de conocer astronómicamente esta.
- (20). El ángulo, ligeramente variable con el tiempo, tiene aproximadamente un valor de $23^\circ 27' 8''$, 26, referido al año 1900.
- (21). Puede ser interesante sobre todo en los Equinoccios, en que la variación es más rápida en declinación. Tratar de afinar en la observación.
- (22). Sobre todo si se tiene en cuenta la llamada "ecuación de tiempos" propiamente por el no uniforme movimiento del "Sol verdadero" respecto del "Sol medio". La explicación de ello y el valor de la corrección a aplicar para obtener el meridiano verdadero se encuentran en cualquier libro de Astronomía. Ver por ejemplo MARTIN ASIN (1979), esp. pg. 217.
- (23). Realmente hipérbolas.
- (24). Aunque puede ser que no durante todo el día, debido a la variación tan rápida de declinación que se produce en los Equinoccios.
- (25). En su Otro, o sea, el ángulo entre la dirección Sur y el punto del horizonte en que se produce el Otoño en un día determinado.
- (26). $15^\circ = 360^\circ / 24 \text{ horas}$.
- (27). La descripción de otros instrumentos puede verse también en TEM, LOPEZ (1983).

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

ABETTI, G., 1978, *Historia de la Astronomía*, (1ª Impresión Mérito, Fondo de Cultura Económica (Breviarios 9 1183)).

COPERNICUS, N., 1982, *Sobre las revoluciones de los Orbes Celestes*, (Ed. Minguez-Tostal, Madrid, Editora Nacional).

COPERNICUS, N., 1965, *Las revoluciones de las Esferas Celestes*, (Ed. Koyré, B. Aires, EUDEBA).

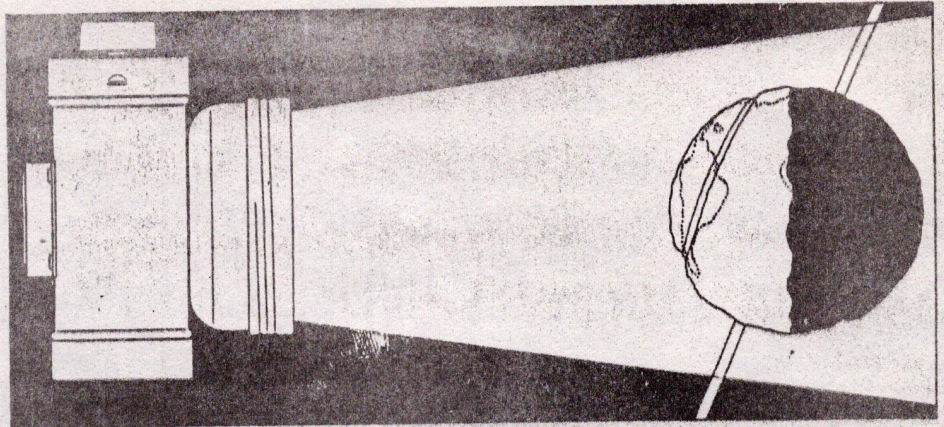
c R 11

NOCHE Y DÍA

En la antigüedad cuando se pensaba que la Tierra era plana, la gente creía que, durante la noche, el Sol pasaba por debajo de la Tierra. Otra teoría era que la rotación de la esfera celeste producía la salida y la puesta del Sol.

Ahora sabemos que es la Tierra, y no la esfera celeste, la que da una vuelta cada 24 horas, produciendo el fenómeno que llamamos día y noche. Es fácil construir un modelo para demostrar esto. Toma una pelota (una pelota de tenis vieja es ideal) para representar la Tierra. Con un rotulador dibuja en ella las masas de los continentes (América del Norte y del Sur, Europa, Asia, África y Australia). A continuación atravesala con una aguja de hacer punto, larga, de modo que pase por los polos norte y sur; la aguja de hacer punto representa el eje polar de la Tierra y cuando la hagas girar la maqueta de la tierra girará. Ahora necesitas una fuente luminosa que represente el Sol y lo más apropiado es una linterna que da un haz concentrado. Apaga todas las luces de la habitación (y si el experimento lo haces de día cierra también las cortinas) e ilumina con la linterna la maqueta de la Tierra. La mitad del globo quedará iluminada. En esta mitad es de día. En el lado oscuro es de noche y si giras la pelota verás cómo los distintos continentes pasan del día a la noche y de la noche al día. Para simular la verdadera rotación de la Tierra deberías girar la pelota en sentido antihorario, de modo que para un observador situado en tu "Tierra" el Sol (la linterna) saliese por el este y se pusiese por el oeste.

La noche y el día pueden simularse de otra forma utilizando el mismo modelo. Fija la pelota en una determinada posición, sin girarla. Toma la linterna o cualquier otra fuente de luz y muévela, alrededor de la Tierra fija, en el sentido de las agujas del reloj. El efecto será exactamente el mismo que cuando la Tierra giraba en sentido contrario al de las agujas del reloj. Un observador situado en tu maqueta de la Tierra no podría decir lo que realmente está ocurriendo: si la Tierra gira o es el Sol el que se mueve a su alrededor. La secuencia de días y noches seguirá sin cambio en cualquiera de los dos casos. Evidentemente si es el Sol el que se mueve alrededor de la Tierra tendrá que hacerlo a gran velocidad. Aun tomando el valor incorrecto y demasiado pequeño de la distancia del Sol calculada por Aristarco, el Sol tendría que correr por el espacio a 4×10^7 km por hora para dar una vuelta completa a la Tierra cada 24 horas, lo que parece improbable, por decirlo sin exagerar. Ahora bien,

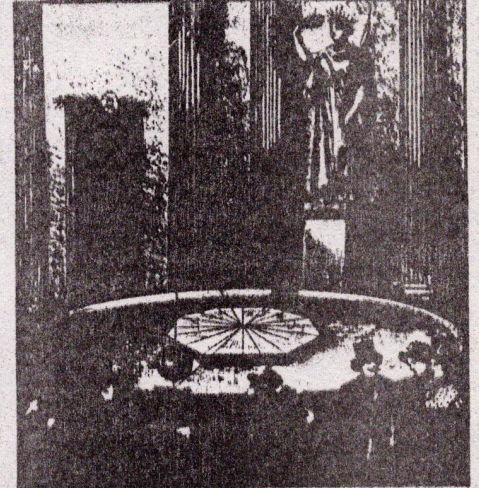
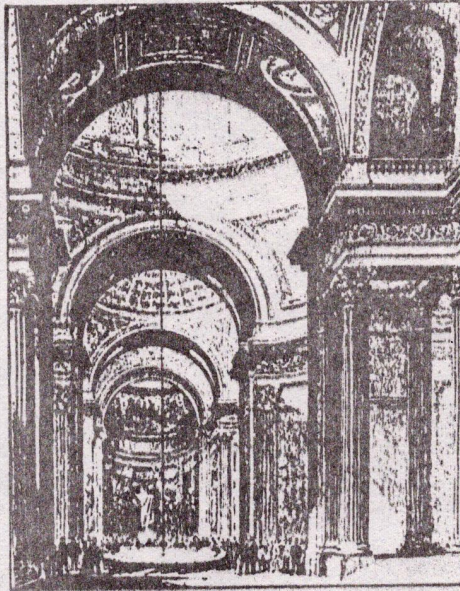


Con una linterna y una pelota de tenis

atravesada con una aguja que representa la

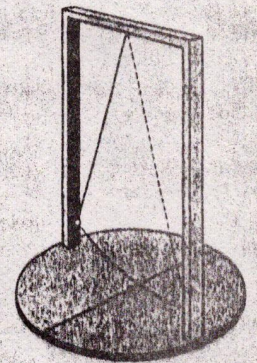
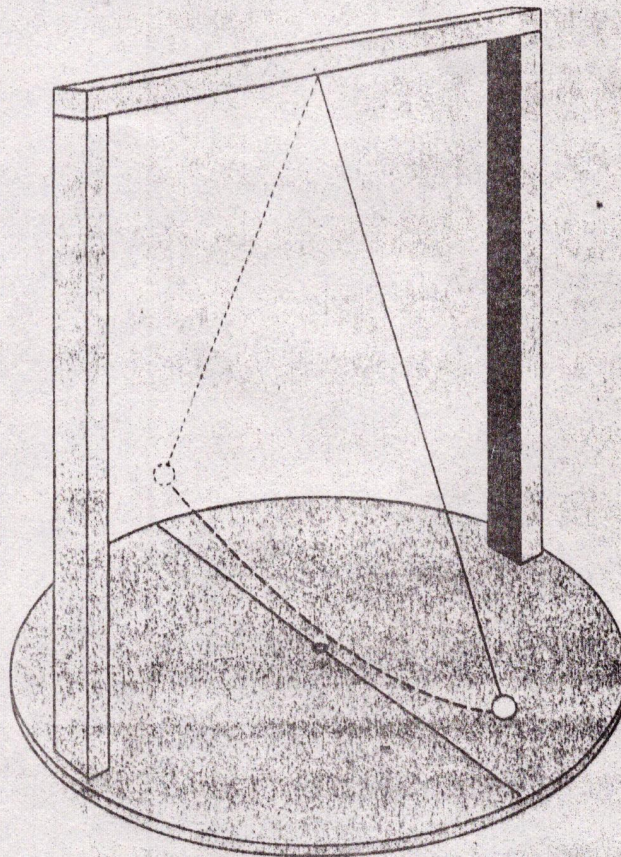
Tierra, se demuestra como la rotación de la

Tierra da lugar al día y la noche.



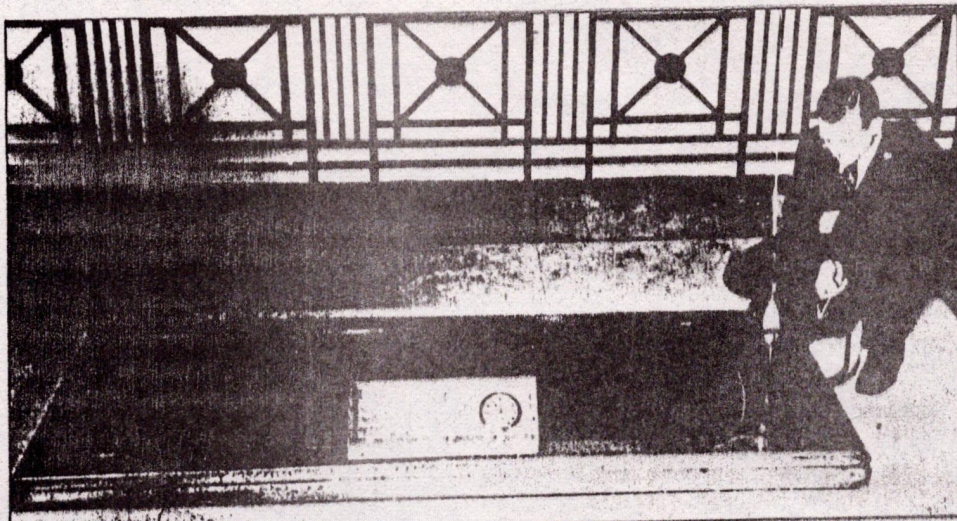
Una demostración de la rotación de la Tierra utilizando el péndulo de

Foucault en el Panthéon, París 1851.



Un modelo de péndulo muestra que, cuando el bastidor gira, la oscilación del péndulo cambia con relación al bastidor.

a la derecha
Puedes repetir el experimento de Foucault. Coloca un trozo de papel, como indica la figura, debajo del péndulo. Haz oscilar el péndulo a lo largo de la línea central y después de un cuarto de hora observarás que la dirección de oscilación ha variado.

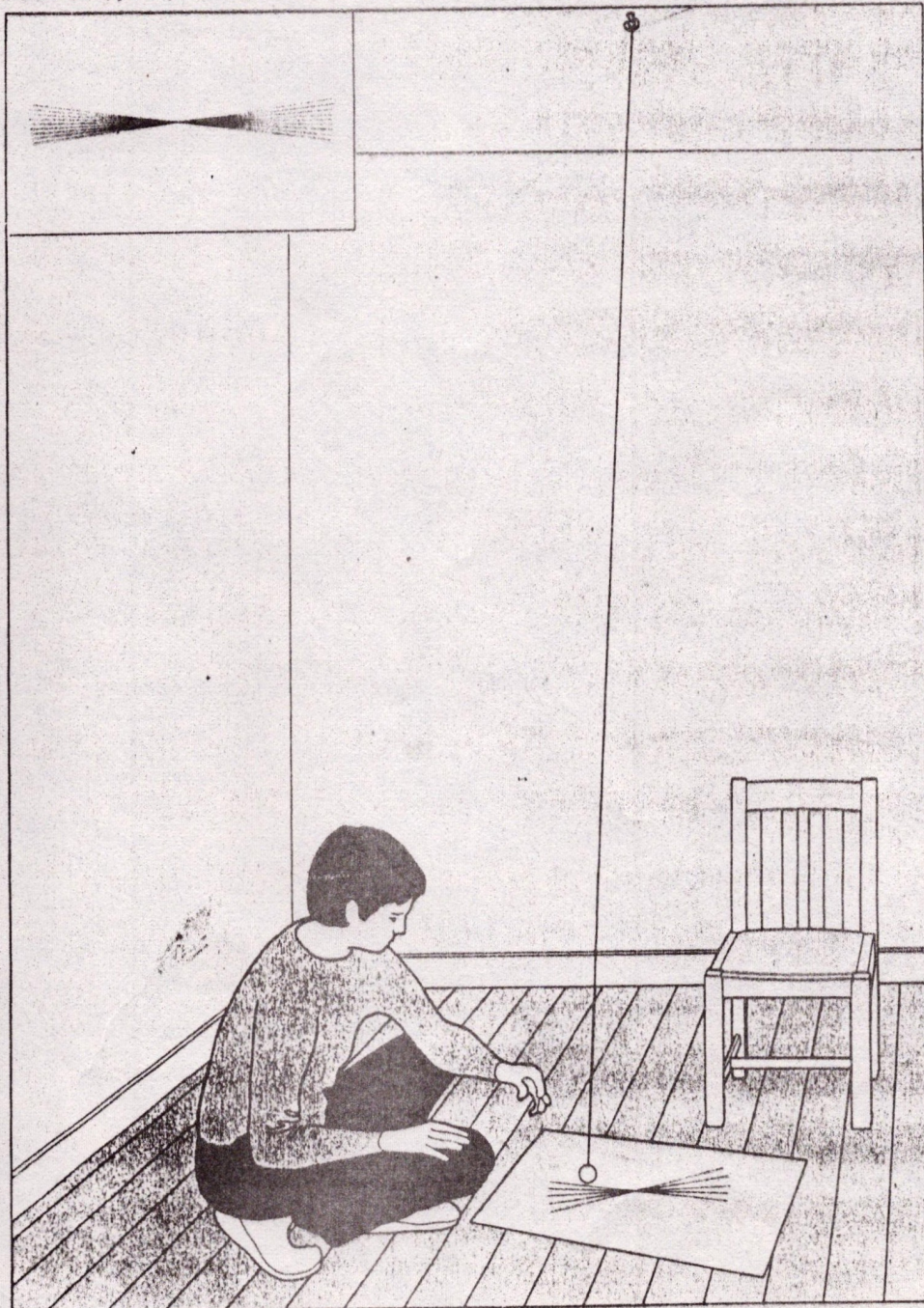


En el Science Museum de Londres, el péndulo de Foucault se suelta en la línea cero; para que

el péndulo empiece a oscilar suavemente se quema el hilo que lo retiene separado de su

posición de equilibrio. El péndulo tiene una longitud de 24,98 m y la esfera pesa 13,62 kg. El

plano de oscilación gira alrededor de $11\ 3/4^\circ$ cada hora.



¿cómo podemos asegurar que la Tierra se mueve?

Hay un hecho experimental que demuestra que la Tierra gira, puesto de manifiesto por primera vez por el físico francés Léon Foucault. En 1851 Foucault colgó un péndulo, que estaba constituido por una esfera de 5 kg suspendida de un alambre de acero, del techo de la bodega de su casa de París. Después, puso el péndulo en oscilación. Una vez soltado, el péndulo continuaría oscilando en la misma dirección independientemente de si la Tierra se movía o no. Pero, por supuesto, si la Tierra giraba, giraba la casa de Foucault y la bodega con ella. El resultado fue que la dirección en la cual el péndulo oscilaba cambiaba con respecto a la habitación. La dirección de oscilación parecía moverse alrededor del observador.

Puedes ver qué sucedió si construyes una maqueta del péndulo de Foucault. Construye con madera o algún otro material (de Meccano, por ejemplo) un pequeño bastidor y fíjalo a una plataforma procurando que el travesaño quede suficientemente elevado (15 cm o más) y cuelga un hilo en su punto medio. Convierte el hilo en un péndulo atando a su extremo un tornillo metálico o algún otro objeto pesado. Haz oscilar el péndulo y, con mucho cuidado, haz girar lentamente la base, asegurándote de no tocar el péndulo. Encontrarás que continúa oscilando en la misma dirección con relación a la habitación pero no con relación al bastidor.

Para comprobar esto con la Tierra necesitas un péndulo muy largo, tan largo como puedas construirlo. Un bramante con un objeto pesado atado a su extremo actuará como tu péndulo. Suspendido del techo o de tan cerca del techo como puedas, con el peso cerca del suelo, coloca en el suelo una lámina de papel un poco grande con una línea recta dibujada en el medio y algunas más dibujadas de modo que se corten formando con la primera y entre sí ángulos de 2° . Con un par bastará. Asegúrate de que estén bien cerradas puertas y ventanas y haz oscilar el péndulo siguiendo la línea central. Después de diez minutos o un cuarto de hora mira la dirección de la oscilación y comprobarás que ha cambiado.

En los museos de la ciencia es frecuente encontrar un péndulo más largo y mejor construido para demostrar este mismo hecho. En el Museo de la Ciencia de Barcelona existe un péndulo de Foucault de 13 m de longitud.

CONSTRUCCIÓN Y USO DE LOS RELOJES DE SOL

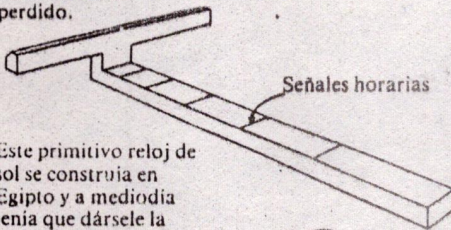
El hombre ha sentido siempre la necesidad de conocer el tiempo y los cuadrantes solares constituyen la forma más antigua de "cronómetros". Son relojes de sol y se basan en la posición del Sol en el cielo para registrar el paso de las horas.

Los relojes de sol pueden ser portátiles o fijos y presentan una gran variedad de formas y dimensiones. Algunos son muy fáciles de construir. El más primitivo de ellos es el basado en el gnomon. Es fácil convertir tu gnomon (pág. 16) en un reloj de sol primitivo. Has marcado ya la longitud de la sombra a mediodía que se proyecta hacia el norte (en el hemisferio norte) y hacia el sur (en el hemisferio sur). El punto marcado indicará las doce del mediodía en tu reloj. ¿Cómo se consiguen las demás horas? Puedes señalarlas utilizando un reloj para determinar dónde cae la sombra del gnomon cada hora.

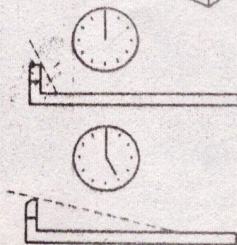
Los primitivos astrónomos no tenían relojes para poder utilizar, por tanto ¿cómo construían un reloj de sol? Toma el reloj de sol que se conoce como el



Reloj de sol semicircular romano ideado por Beroso alrededor del 290 a. C. El estilite se ha perdido.



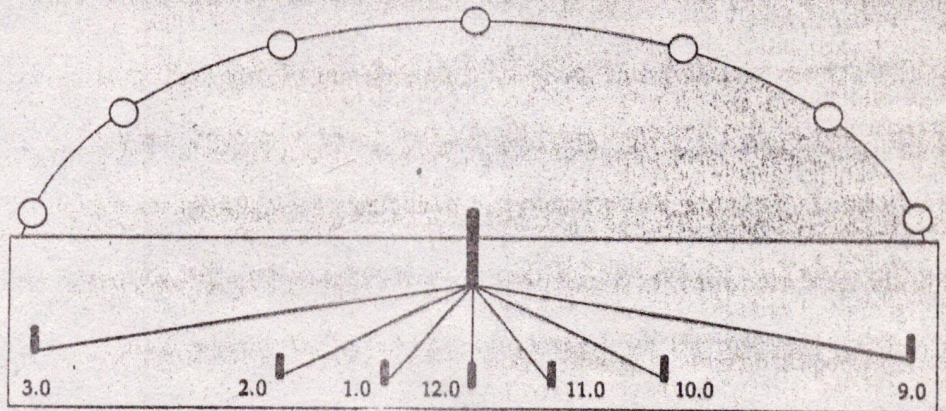
Este primitivo reloj de sol se construía en Egipto y a mediodía tenía que dársele la vuelta. No es muy adecuado para latitudes superiores a los 35° porque las sombras arrojadas son demasiado largas. En tales latitudes se podría utilizar el reloj en verano que es cuando las sombras son más cortas.



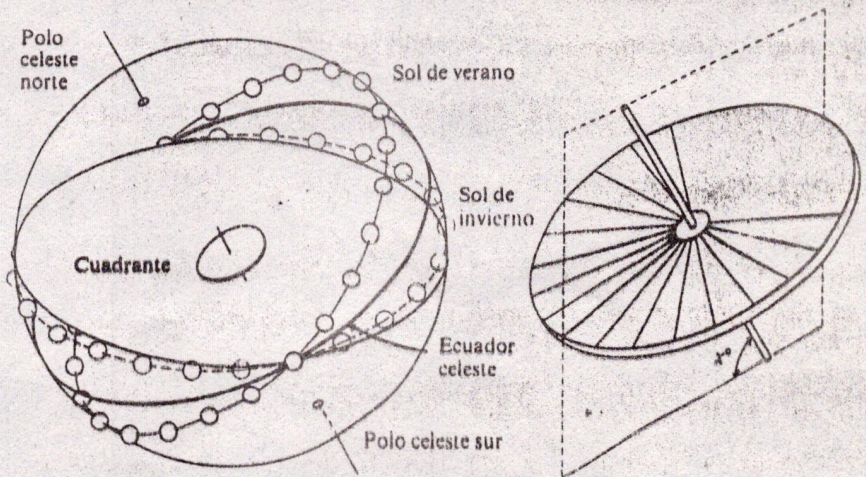
más antiguo, el egipcio construido durante el reinado del faraón Tutmosis III en el siglo XV a.C. Es muy fácil reproducirlo con tres trozos de madera, pero ¿cómo podremos señalar las horas si no disponemos de un reloj? La línea del mediodía está suficientemente determinada, pero ¿y las demás? Para hallarlas hemos de hacer algunas consideraciones sobre las horas en sí. En el siglo veinte tenemos horas iguales; todas las horas del día y de la noche a lo largo del año tienen la misma duración. Tal forma de concebir las horas llegó al mundo occidental así que apareció el primer reloj mecánico

a principios del siglo XIV, ya que las horas iguales eran ideales para ser marcadas por un reloj mecánico. Previamente todas las civilizaciones habían utilizado horas desiguales, que ciertamente no eran apropiadas para los relojes mecánicos.

La razón de utilizar horas desiguales era el cambio de la duración del día a lo largo del año. La mayoría de las civilizaciones decidieron que habría un número determinado de horas durante el día (generalmente doce) y el mismo número durante la noche. Pero, puesto que los días son más cortos en invierno que en verano, las horas del día serían



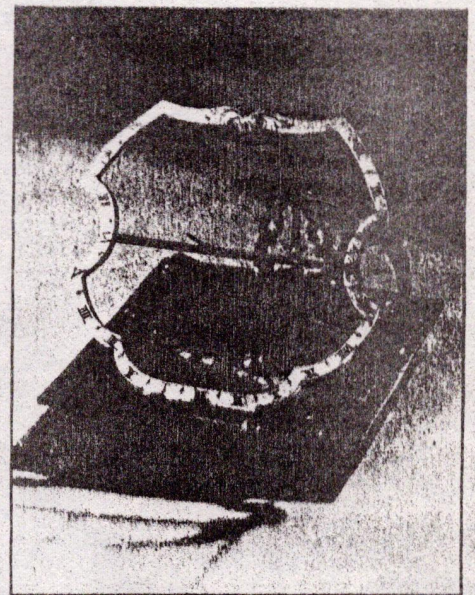
Se puede construir un reloj de sol muy sencillo utilizando un gnomon y marcando la sombra cada hora.



El cuadrante ecuatorial es el más simple de todos los cuadrantes y puede utilizarse para señalar las líneas horarias en la mayor parte de los otros tipos de cuadrantes. El plano del reloj de sol ecuatorial es paralelo al ecuador celeste y el estilite tiene la dirección de los polos celestes. Se utilizan ambas caras del cuadrante de acuerdo

con la altura del Sol. El ángulo entre cada dos líneas horarias consecutivas es de 15° y x° representa la latitud del lugar. Los relojes de sol pueden construirse con "cartón plástico", que puede adquirirse en cualquier papelería. Las divisiones pueden señalarse con un rotulador especial para escribir sobre plástico.

derecha
Un reloj-brújula ecuatorial del siglo XVIII, con veleta y ajuste de altura.



más cortas en invierno. Variarían de día en día, alargándose gradualmente conforme se aproximaba el verano y acortándose otra vez al llegar el invierno. Para señalar estas horas en un reloj de sol, lo mejor sería señalar la posición de la sombra arrojada por el gnomon del reloj a la salida y a la puesta del Sol el día más largo del año. Entonces, señalada asimismo la sombra a mediodía del Sol, se pueden dibujar doce líneas horarias equidistantes. El tiempo que tarda la sombra para moverse de una línea a la siguiente varía con las estaciones. Así, en verano el intervalo entre dos líneas horarias sería

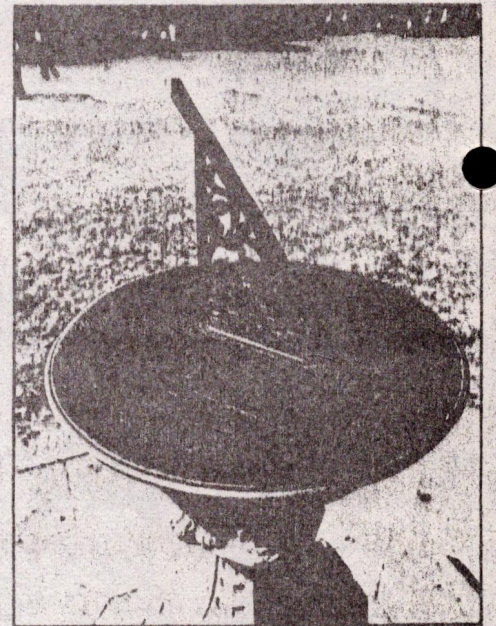
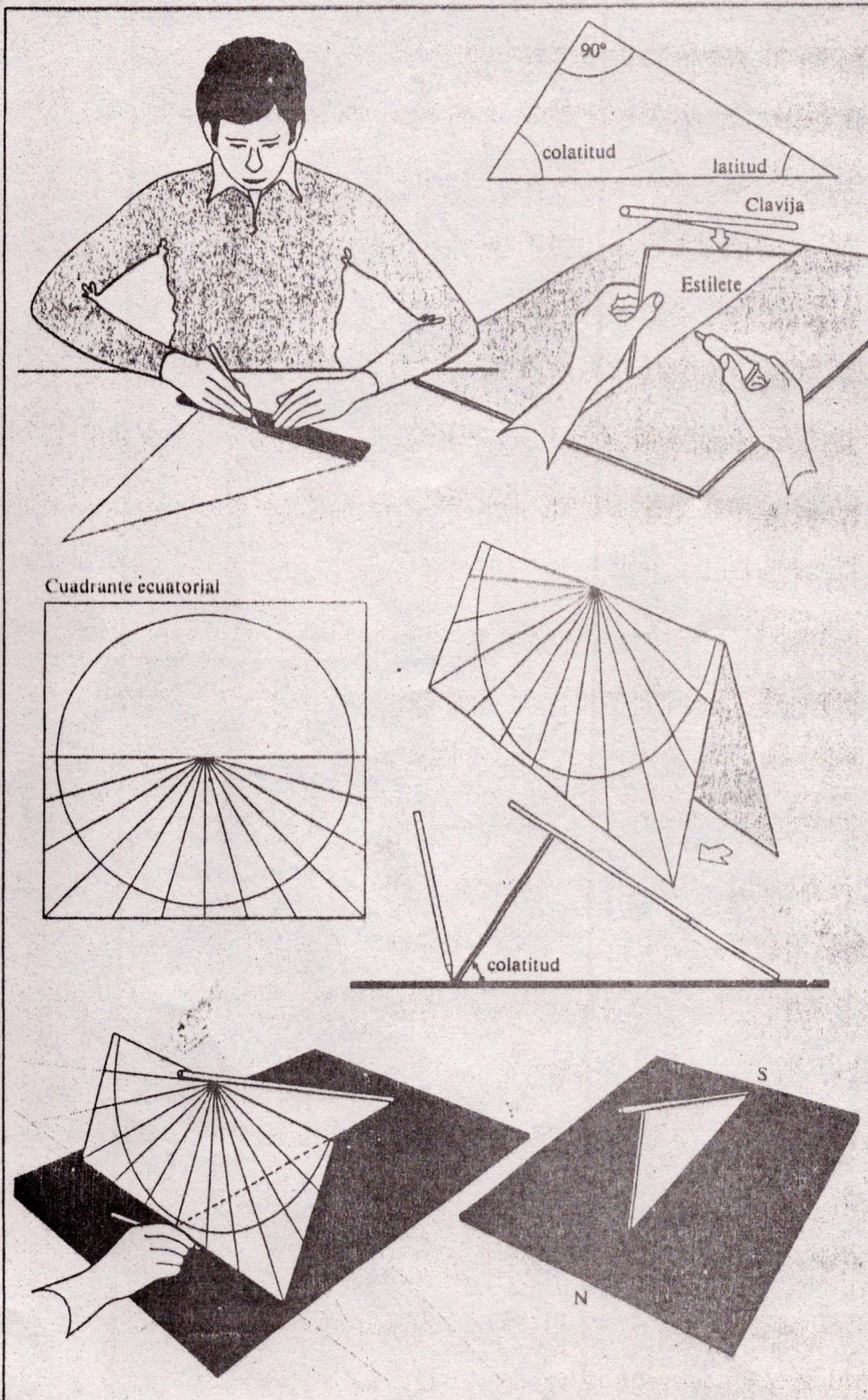
igual a 1 1/4 horas del promedio o tiempo "medio" utilizado hoy en día, y en el invierno igual a tres cuartos de hora. Por esta razón estas horas fueron conocidas frecuentemente con el nombre de "temporales".

Evidentemente no hay razón por la cual el reloj de sol haya de tener una base plana en la que se proyecta la sombra. Podría tener una superficie curva, como es el caso del famoso tipo de reloj de sol antiguo conocido como "hemisferio de Beroso", nombre que procede de su diseñador, el astrónomo-sacerdote Beroso que vivió alrededor del 290 a. C., pero cualquiera

que sea el reloj de sol que uno debe construir, las horas temporales pueden señalarse en la forma que hemos descrito. Por otra parte, es posible construir un reloj de sol con nuestro actual concepto del tiempo de horas iguales por medio del cálculo. No es muy difícil, aunque para según qué tipos de relojes de sol debamos emplear algo de trigonometría.

Actualmente en cada periodo de día y noche tenemos 24 horas. Durante este periodo el Sol aparentemente se mueve dando una vuelta completa en el cielo aunque desde un lugar particular de la superficie de la Tierra sólo se ve durante una parte de este tiempo, lo que significa que el Sol se mueve 360° en 24 horas, o 15° cada hora. Con esta idea podemos hacer como han hecho los constructores de cuadrantes solares desde que se adoptaron las horas iguales y señalar las líneas horarias por cálculo. El tipo más sencillo de reloj de sol en el que se lleva a cabo este proceso es el *cuadrante ecuatorial*.

El cuadrante ecuatorial recibe este nombre porque su plano es paralelo al ecuador celeste. El "estilete" o gnomon que proyecta la sombra es perpendicular al plano del reloj. Señalar horas iguales es sencillo. Se empieza por dibujar una línea recta en el plano que represente la dirección del Sol a mediodía y a continuación las líneas horarias de 15° en 15° . Para construir tal reloj de sol debes inclinarlo de modo que el estilete forme un ángulo de x grados con el



izquierda
Un cuadrante horizontal puede construirse utilizando un cuadrante ecuatorial. El ángulo entre ambos cuadrantes es la colatitud ($90^\circ - \text{latitud}$). Utiliza una clavija para el borde del estilete el cual deberá formar un ángulo igual a tu latitud con el plano del cuadrante.

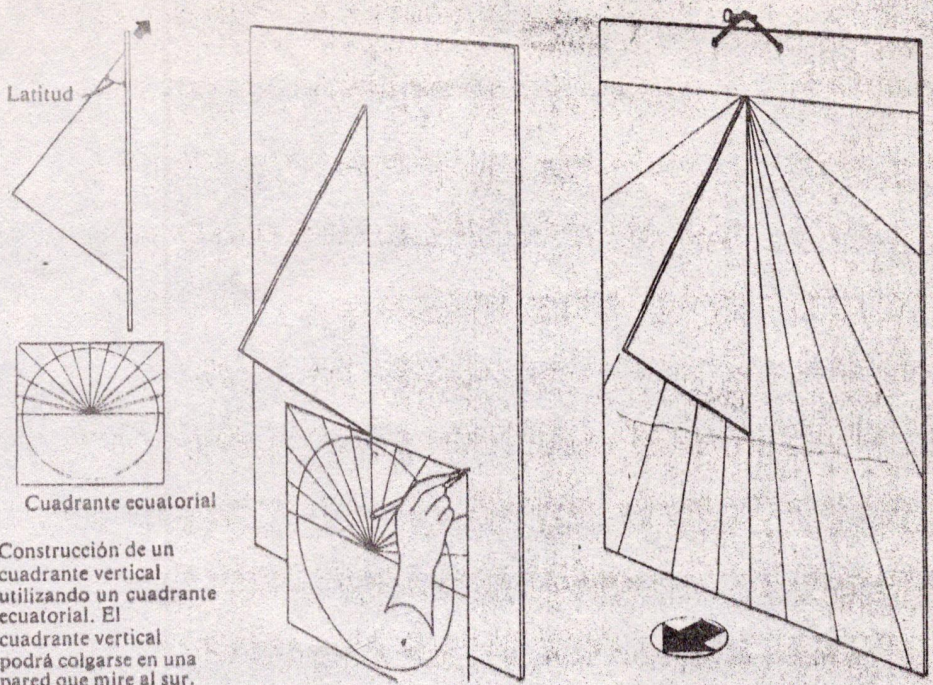
arriba
El reloj de sol horizontal de Kew Gardens, en Londres.

suelo (esto es, con un plano horizontal), siendo x el número de grados que corresponden a tu latitud. Así, si estás en Londres, x será $51^{\circ} 30'$, si en Nueva York $x = 40^{\circ} 55'$ y si en Sydney (Australia) $x = 33^{\circ} 55'$ (sur). El cuadrante ecuatorial tiene una limitación y es que no funciona cuando el Sol está en el ecuador celeste, es decir cuando está en uno de los equinoccios; en este momento el Sol ilumina el borde del plano del reloj.

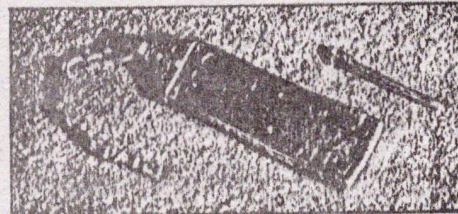
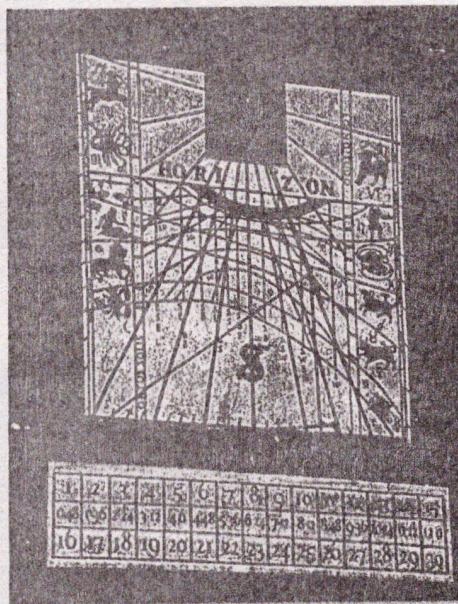
Más práctico es el *cuadrante horizontal*, que no precisa dos caras ya que sirve la misma para todo el año. Sus líneas horarias no están separadas 15° una de otra, porque el plano horizontal está inclinado con respecto al plano ecuatorial, y no forman entre sí ángulos iguales. Puedes hallar sus posiciones matemáticamente. La fórmula es [tangente de $A = \text{seno de la latitud} \times \text{tangente del ángulo horario del Sol}$] (A es el ángulo entre la línea norte-sur y la línea horaria que estás dibujando, y el ángulo horario del Sol es de 15° por hora, 30° por dos horas, etc.). Pero hay un procedimiento muy sencillo para dibujar las líneas horarias que consiste en utilizar el cuadrante ecuatorial. Se puede ver en el dibujo. Se ha de tener cuidado de que el ángulo entre el cuadrante ecuatorial y tu horizonte sea el correcto. Este ángulo no será igual a la latitud del lugar donde estás situado sino a la colatitud ($90^{\circ} - \text{la latitud}$), es decir $38^{\circ} 30'$ para Londres, $49^{\circ} 05'$ para Nueva York y $56^{\circ} 05'$ para Sydney.

Otro tipo muy ventajoso de reloj de sol es el *cuadrante vertical*. Si construyes un cuadrante vertical puedes sacarlo al exterior cuando haga sol y colgarlo en una pared que mire al sur. Una vez más, como en el cuadrante horizontal, puedes dibujar en él las líneas horarias ya sea matemáticamente ya utilizando un cuadrante ecuatorial como referencia. Si operas matemáticamente, la fórmula que te dará la posición de las líneas horarias es [tangente de $A = \text{coseno de la latitud} \times \text{tangente del ángulo horario del Sol}$] (A tiene el mismo significado que para el cuadrante horizontal). El diagrama muestra cómo dibujar las líneas horarias sobre el plano del cuadrante vertical. Es mejor utilizar un cuadrante ecuatorial cuadrado que circular.

Los *relojes de sol portátiles* que indicarán el tiempo solar pueden tomar toda clase de formas. Probablemente uno de los más sencillos de construir es el cuadrante horizontal plegable. Es un cuadrante horizontal con una tapa que, cuando se abre, despliega un hilo que va de la tapa a la lámina del reloj. Para que dé un tiempo correcto el reloj debe ser orientado correctamente y lo mejor es colocar una pequeña brújula en el plano o lámina del reloj. También puedes construir un verdadero reloj de bolsillo como el que utilizaban los sajones, con una lámina plana y una clavija como estilete o gnomon. Te dará una tosca



Construcción de un cuadrante vertical utilizando un cuadrante ecuatorial. El cuadrante vertical podrá colgarse en una pared que mire al sur.



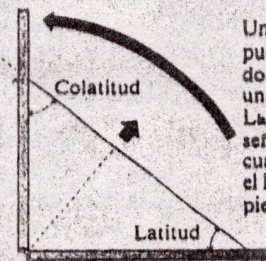
Reloj de sol de bolsillo en plata y oro, descubierto en la catedral de Canterbury en 1938.

izquierda

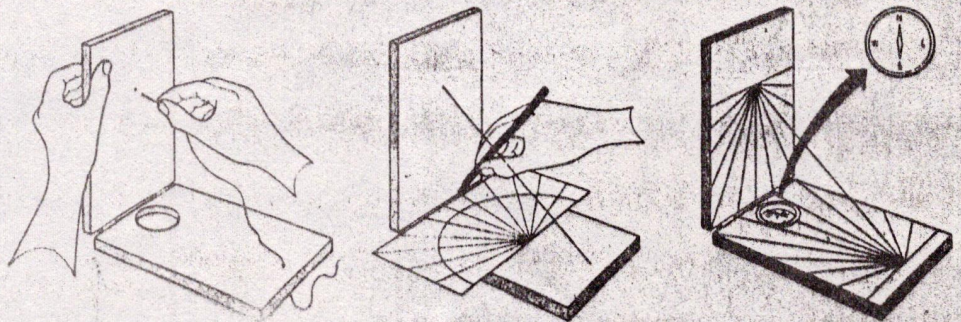
El cuadrante vertical del Queen's College en Cambridge, 1727. Este cuadrante es también un cuadrante lunar.

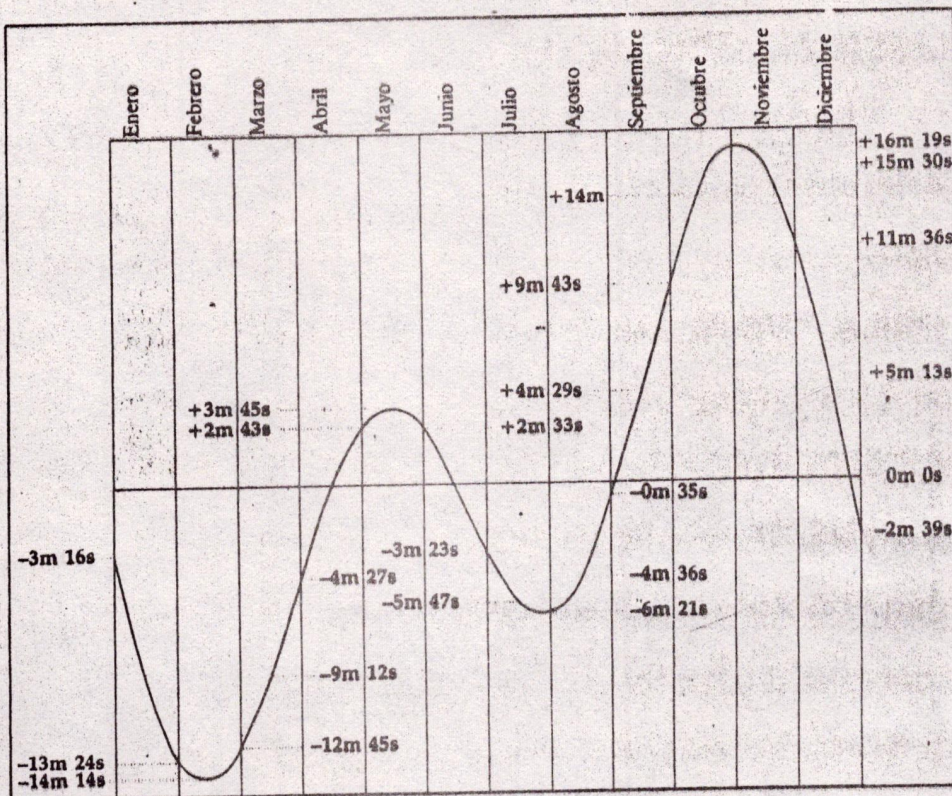
derecha

Reloj de sol en tablilla de marfil construido por Hans Tocher en 1589. Hay una pequeña brújula magnética en el cuadrante para que el observador pueda asegurarse de que está frente a la dirección correcta al utilizar el cuadrante.

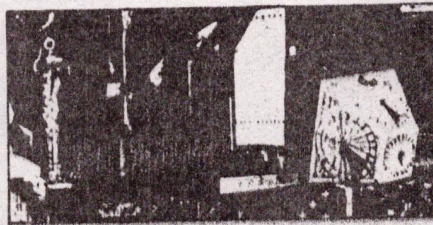
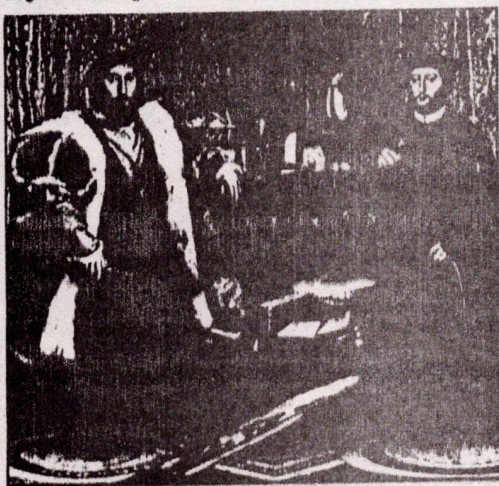


Un reloj de sol portátil puede construirse con dos piezas de madera unidas por una bisagra. Las líneas horarias se señalan con un cuadrante ecuatorial y el hilo que une las dos piezas actúa de estilete.

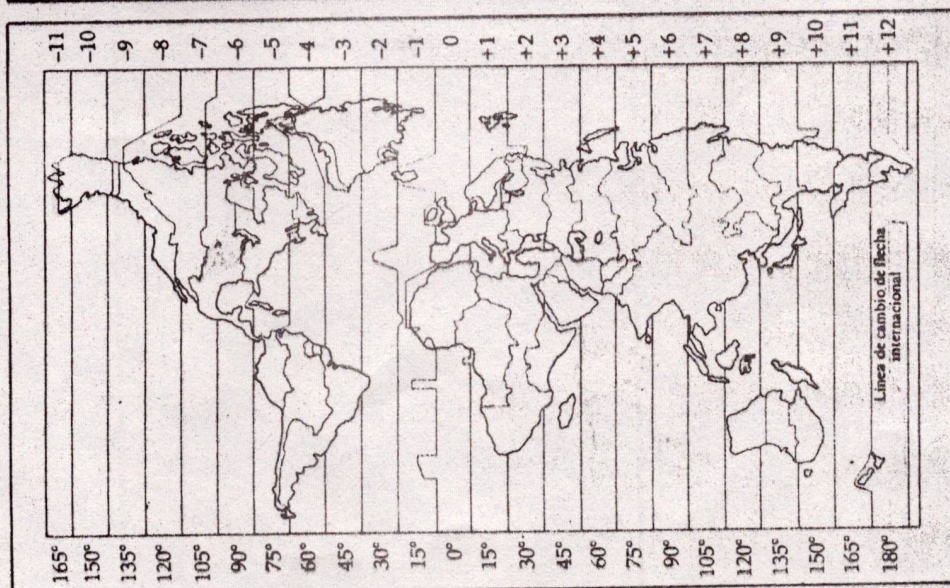




La variación en un año de la ecuación de tiempo (tiempo solar aparente - tiempo solar medio) que puede llegar a valer algo más de un cuarto de hora.



Los Embajadores, 1533, de Hans Holbein el Joven. Los objetos que se ven en la pintura reflejan el interés de los dos hombres por las artes y la ciencia: incluye un reloj de sol de columna y otro polidédrico.



La Tierra está dividida en 24 husos horarios, correspondiendo a cada uno de ellos 15° de longitud. En la línea de la fecha internacional cambia no sólo la hora sino también el día.

indicación del tiempo (digamos las 9 de la mañana, mediodía y 3 de la tarde). Puedes marcarlo utilizando un reloj como guía o, también, como si fuera un cuadrante vertical, poniendo las horas una a una. Necesitarás tres hileras verticales de horas para cubrir las diferentes longitudes de la sombra que se proyectará en las distintas estaciones del año. Para usar el reloj, selecciona el agujero correctamente, inserta el estilete y pon el reloj de cara al Sol.

Sin embargo, por muy correctamente que construyas un reloj de sol raramente te dará el tiempo exacto, porque nuestras horas no se basan en el movimiento aparente del Sol real sino en el movimiento de lo que los astrónomos llaman un "Sol ficticio medio", ya que el Sol verdadero no se mueve en el cielo con velocidad uniforme a lo largo del año. La falta de uniformidad se debe a dos causas. En primer lugar, la Tierra traslada alrededor del Sol siguiendo una elipse en lugar de un círculo (pág. 130), lo cual hace que su velocidad orbital varíe, dando como resultado que el Sol parece ir más de prisa en diciembre y más despacio en junio. En segundo lugar, el Sol se mueve aparentemente a lo largo de la eclíptica, pero nuestras horas están definidas a partir del Sol ficticio medio que se mueve con velocidad uniforme a lo largo del ecuador celeste. Como que la eclíptica está inclinada con respecto al ecuador, la velocidad del movimiento será distinta, dependiendo la diferencia de lo alejado que esté el Sol medio de la eclíptica al sur o al norte del ecuador celeste. Combinando ambas causas obtendremos lo que se conoce con el nombre de "ecuación de tiempo", que es la diferencia entre el tiempo del Sol aparente y el tiempo del Sol medio [Ecuación de tiempo = (tiempo solar aparente) - (tiempo medio)]. La ecuación de tiempo alcanza a lo sumo un valor de 16 minutos 18 segundos y se anula a mediados de abril, a mediados de junio, a principios de septiembre y a finales de diciembre.

El tiempo medio que utilizamos depende del "huso horario" en el cual vivimos. El tiempo medio de Greenwich es el tiempo de Inglaterra; en Nueva York el mediodía tiene lugar 5 horas más tarde y en Sydney 10 horas más pronto. De modo que, si vives al este o al oeste de Greenwich tu tiempo será distinto debido a tu posición geográfica. La diferencia es de una hora por cada 15° de longitud o de 4 minutos por cada grado.

LAS FASES DE LA LUNA

Las fases cambiantes de la Luna desde luna nueva a luna llena para volver otra vez a luna nueva son una fuente interminable de fascinación, especialmente cuando la Luna se observa con un telescopio, porque el cambio de luz de un día al siguiente aporta distintos aspectos de la superficie de la Luna.

La Luna muestra fases debido a que brilla sólo porque refleja la luz del Sol. El Sol ilumina constantemente la mitad de la Luna igual que ilumina la mitad de la Tierra, de tal forma que en una mitad es de día y en la otra mitad es de noche. Las fases que nosotros observamos en un instante dado dependen de la posición de la Luna con respecto al Sol. Para ver cómo se producen las fases necesitarás maquetas de la Tierra y de la Luna como las que has utilizado al estudiar los eclipses (págs. 24-27) y una lámpara o linterna colocada en una mesa (fig. 1) para representar el Sol. Sostén el sistema Tierra-Luna a una cierta distancia de la lámpara. Alinea la Tierra y la Luna con la lámpara de modo que la Luna quede más lejos del Sol que la Tierra (A). Ahora, con la luz principal de la habitación apagada y el sistema Tierra-Luna inclinado de forma que la lámpara de mesa ilumine la Luna, un observador situado en la cara oscura (noche) de la Tierra verá todo el disco iluminado, es decir luna llena.

A continuación, mueve el sistema Tierra-Luna de modo que la Luna quede a un cuarto de camino de su órbita alrededor de la Tierra (B). Ésta es la posición de la Luna siete días después y, desde la Tierra, un observador verá sólo la mitad del disco de la Luna iluminada; la otra mitad parece oscura. Ésta es la fase de "cuarto menguante", refiriéndose a la palabra "cuarto" a la posición de la Luna en su órbita. Ahora mueve la Luna otro cuarto de su trayectoria alrededor de la Tierra; quedará exactamente entre la Tierra y el Sol, pero inclinada de modo que no eclipsa al Sol (C). La parte oscura de la Luna

está enfrente de un observador situado en la Tierra de forma que éste no puede verla en absoluto. Ésta es la condición de "luna nueva". Finalmente, mueve la Luna a lo largo de otro cuarto de su órbita (D). Otra vez un observador situado en la Tierra puede ver sólo una mitad del disco de la Luna. Ésta fase se llama "cuarto creciente".

Has visto cómo cambian las fases de la Luna mientras ésta gira alrededor

de la Tierra. Toma nota de sus otras posiciones y comprueba los resultados que obtengas con el dibujo de la figura 1. Observa que a veces la Luna aparece gibosa (cuando se observa más de la mitad pero menos que todo el disco iluminado) y otras veces como una lúnula (menos de la mitad iluminada).

Hay otro aspecto que presenta la Luna cuando aparece como una lúnula,

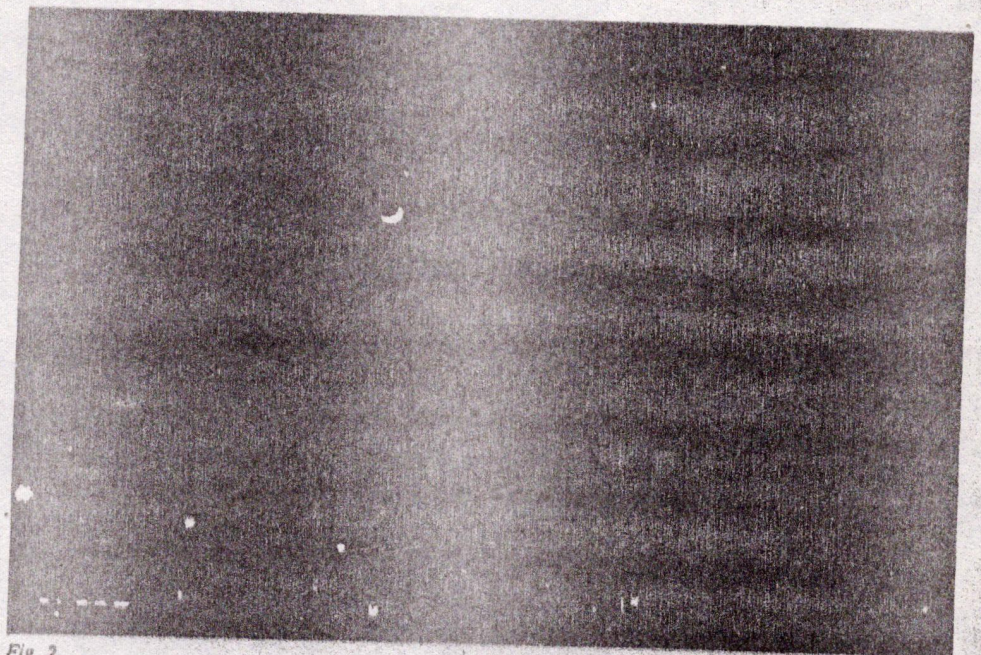
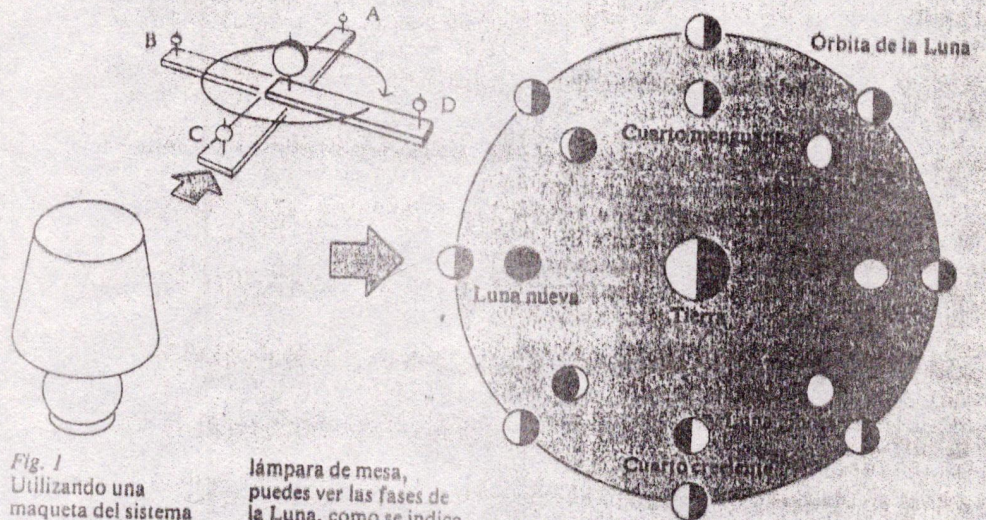


Fig. 2 La luna creciente con la luz cenicienta.



entre luna nueva y cuarto creciente o cuarto menguante y luna nueva. Se conoce con el nombre de "luz cenicienta" o a veces "la luna vieja en los brazos de la luna nueva". Mira la Luna cuando aparece como creciente, precisamente después de la luna nueva, y te darás cuenta de que en el oscuro cielo no sólo es visible la parte creciente sino también el resto del disco de la Luna. Esta parte residual no es muy

brillante; si aparece un poco azul es porque está iluminada por la luz solar reflejada sobre la Luna desde la Tierra (fig. 3) y la mayor parte de esta luz ha pasado a través de la atmósfera de la Tierra difusora del azul.

La Luna gira sobre su eje mientras gira alrededor de la Tierra y nunca podemos ver su cara posterior; vemos siempre la misma cara de la Luna. La razón de esto es que mientras da una

vuelta a la Tierra sólo da una vuelta sobre sí misma. Prueba esto colocando una silla en el centro de una habitación y camina alrededor de ella (fig. 4). Cuando empiezas puedes ver no sólo la silla sino también una pared de la habitación, la pared A. Ahora camina alrededor de la silla, volviéndote de modo que tengas la silla siempre enfrente. Después de que hayas recorrido una cuarta parte del camino ya no estarás enfrente de la pared A sino enfrente de la pared B; después de otro cuarto de vuelta, manteniéndote siempre de cara a la silla, te encontrarás enfrente de la pared C; otro cuarto de vuelta y la pared D estará frente a ti. Continúa y te encontrarás en el punto de partida enfrente de la pared A y frente a la silla. Si en la silla hubiese habido un observador sólo habría visto tu cara, nunca tu espalda, durante el tiempo que ha durado la vuelta (periodo orbital). Sin embargo, tú has girado una vez, como has podido comprobar al quedar enfrente de cada una de las paredes A, B, C y D.

A pesar de que la otra cara de la Luna nunca se ve desde la Tierra, logramos vislumbrar un poco de su borde. Esto sucede a causa de que la rotación de la Luna y su movimiento orbital no se mantienen absolutamente acompasados y porque el ecuador de la Luna y el plano de su órbita forman un pequeño ángulo ($6\frac{1}{2}^\circ$). La posición de un observador sobre la Tierra, que gira, también ayuda a observar una especie de balanceos que permiten ver un poco más de medio disco, balanceos llamados "libraciones".

La Luna parece cambiar también de tamaño. Cuando está en el cielo cerca del horizonte parece mucho mayor que cuando ha alcanzado cierta altura. En efecto, el tamaño de la Luna cambia un poco porque a veces está más cerca y a veces más lejos debido a la elipticidad de su órbita, pero estos cambios son pequeños (su valor no es más que 4 minutos de arco) y no ocurren durante una noche. El efecto de su mayor tamaño cerca del horizonte y menor tamaño cuando está más alta en el cielo es principalmente una ilusión óptica. Cuando la Luna está baja parece grande cuando está cerca de los árboles y de las casas, porque hay algo con que compararla; cuando está más alta aparece como un pequeño objeto en la inmensidad del espacio vacío.

Fig. 3
La luz del Sol incide sobre la Tierra y la Luna. Un observador situado en la parte oscura de la Tierra ve la luna creciente con la parte oscura de la Luna iluminada por luz reflejada de la Tierra conocida como luz cenicienta.

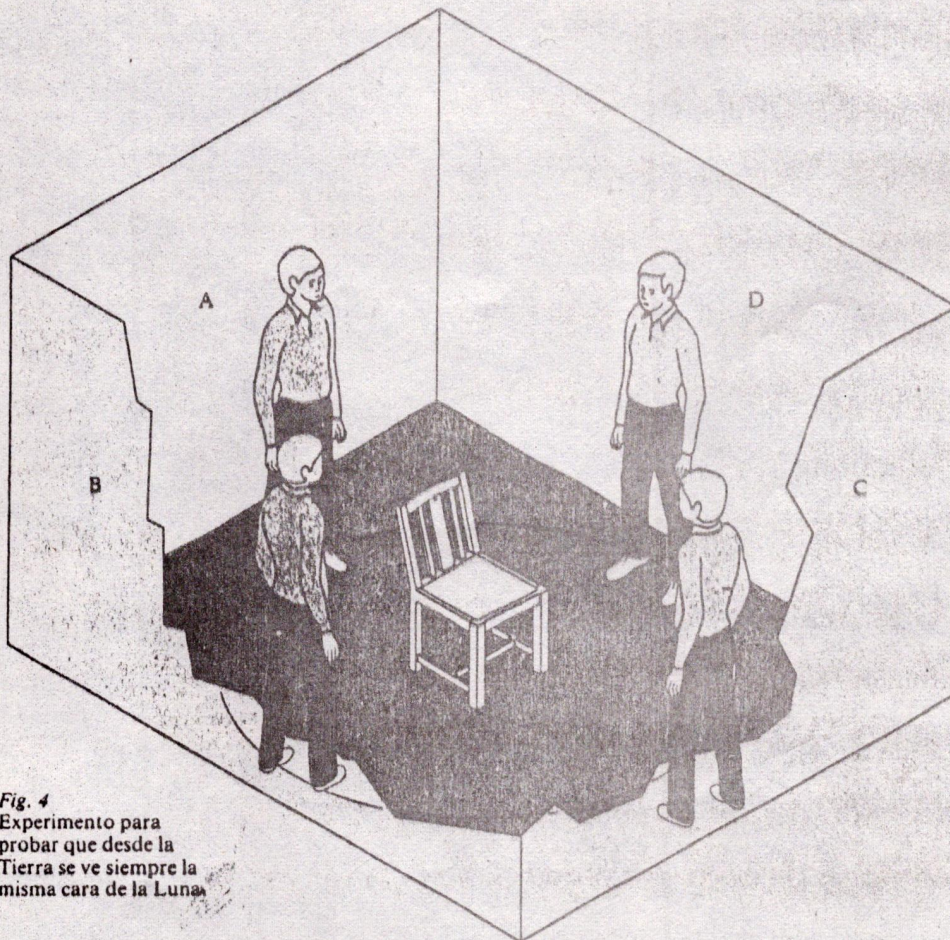
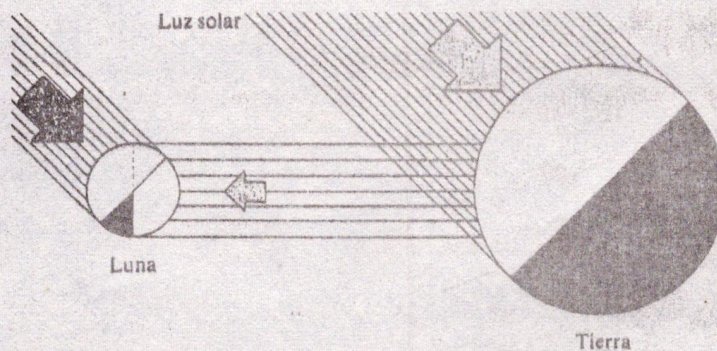


Fig. 4
Experimento para probar que desde la Tierra se ve siempre la misma cara de la Luna.



Fig. 5
Fotografías mostrando nueve fases de la Luna, tomadas en el Observatorio de Lick.

III

experiencias



CON LAS GALAXIAS EN EL AULA

La enseñanza de la Astronomía en la escuela primaria

Eduardo Averbuj

Qué cosa curiosa... la astronomía, la ciencia más antigua de los hombres, el conocimiento que estuvo ligado de manera permanente a su historia, a su mitología, a sus temores y a sus expectativas, no tiene espacio en la enseñanza de hoy; ya sea en la escuela primaria, ya en la secundaria, los programas tan sólo contienen mínimas referencias a ella, meramente retóricas y sin ningún planteamiento experimental ni sensible. Acerca de ésta ciencia no existe en la escuela ninguna reflexión consecuente, ninguna propuesta de investigación sistemática. El firmamento está ahí y nadie se acerca a la ventana para contemplarlo. Gracias a una escuela que escamotea y esconde el conocimiento, ni niños ni jóvenes levantan su vista a los cielos...

En la escuela no se observa el cielo

Desde hace algunos años estamos intentando que la astronomía se introduzca en los programas y en las clases para que los fenómenos celestes entren en las aulas y en la conciencia de los pequeños. Pensamos que la astronomía es un óptimo camino para que los alumnos accedan a la comprensión del mundo físico, una vía unitaria a la vez que multifacética que les hace fascinante el experimento y la reflexión, proponiéndonos así que ellos encuentren en el cielo un laboratorio permanente, en donde cabe desde la ciencia más rigurosa hasta la más ociosa fantasía (laderas ambas de una misma montaña), desde las lejanas galaxias hasta su propia e íntima existencia.

Sostenemos que la astronomía *debe hacerse presente en toda la vida escolar*, desde un primer y mágico cielo del parvulario hasta el complejo universo relativista del final de la enseñanza secundaria, en un encadenamiento progresivamente creciente y elaborado. Para hacer realidad ésta propuesta, hemos trabajado con alumnos muy diversos, en escuelas de ámbitos dispares, (1) desarrollando muchas veces nuestra tarea bajo la forma de *taller Astronómico*, estructura idónea que nos permitió una amplia flexibilidad en objetivos y métodos. Aunque éstos talleres han sido núcleos de trabajo para todos los niveles, nos referiremos aquí, de manera más acotada, a las experiencias realizadas con chicos de 7.º y 8.º de EGB, o sus equivalentes en los colegios de Chile o Argentina.

Con los niños, nos hemos asomado por las ventanas, hemos salido del edificio escolar para contemplar el ancho cielo de los

parques; con ellos hemos trabajado en horario de clases y también por las noches, comprendiendo que ese "sonambulismo" es, sin duda, una de las virtudes prioritarias del individuo que pretende *hacer ciencia*. El aprendizaje rompió así la cárcel que tantas veces le impone el reglamento escolar para reimplantarse en el ancho mundo, para volverse un continuo en el tiempo.

Comenzamos a contemplar lo contemplable, día y noche, todos los días, todas las noches...

¿Qué nos propusimos?

En nuestras experiencias, imaginamos diversas expectativas que intentamos concretar mediante el taller astronómico. Algunas se cumplieron, otras se fueron reformulando a medida que la realidad de los chicos y de los hechos así lo exigía, dando lugar a otras nuevas. Como resumen, nos quedaron algunos objetivos generales y básicos que sintetizan el "tronco" de nuestra labor:

- Observar los sucesos del cielo de manera regular, periódica, paciente.

- Describir tales observaciones mediante los lenguajes más idóneos y expresivos.

- Construir los instrumentos que permitan determinar medidas, consignar los datos cuantitativos, así como *elaborar los métodos* que las hagan posibles.

- Registrar cuantitativamente los fenómenos, transformando la experiencia sensible en medidas definidas, en coordenadas precisas.

- Manipular adecuadamente los registros a fin de inferir el mecanismo de los sucesos.

- Incentivar la formulación de hipótesis y teorías, haciendo que se reingrese con ellas

el ámbito experimental, contrastándolas con los datos obtenidos, rectificando errores e inexactitudes.

- Visualizar históricamente el acontecimiento observado, permitiendo así que los pequeños se enfrenten a los mismos problemas (o incertidumbres) que sacudieron a los astrónomos de todos los tiempos.

- Utilizar herramientas generadas por diversas ciencias (química, matemáticas, física, biología, etc.) para poder explicar diversos fenómenos del cielo, demostrando que la astronomía es una ciencia integrada a la vez que integradora.

- Desarrollar un juicio crítico y una reflexión consecuente ante todo suceso que se analice.

Para alcanzar estos fines, fuimos estructurando observaciones y experiencias que podemos agrupar en cuatro conjuntos:

- Observaciones realizables *a simple vista*.

- Observaciones efectuadas con instrumentos sin partes ópticas.

- Observaciones hechas mediante anteojos y telescopios.

- Observaciones y experimentos de tipo diverso.

En el presente artículo consideraremos tan sólo algunas de las observaciones realizadas pertenecientes a los dos primeros grupos, es decir aquellas que corresponden, en la historia de la astronomía, a la etapa "pre-galileana".

Y el cielo entró por la ventana...

Los niños, tal cómo lo hicieron los primitivos durante muchísimos años, sin

aparato alguno, abordaron los sucesos y los objetivos celestes. Entre otros, se pudieron percibir, registrar y discutir los siguientes acontecimientos.

La existencia de dos tipos diversos de fenómenos celestes: los meteorológicos y los astronómicos; la trayectoria del Sol, en el cielo diurno, a través del año y la de la Luna, en la noche y, a veces, en el día; la diversa duración del día y de la noche, en el transcurso de las estaciones, así como las características de éstas; las fases de la Luna, a lo largo de un mes; el aspecto de la Luna y del Sol (usando un vidrio ahumado, por supuesto); la disposición de las estrellas, a través de sus formaciones fijas, las constelaciones, así como su diversa luminosidad; el movimiento de las estrellas en torno a un punto fijo y la desaparición de las mismas en el cielo diurno; los principales planetas (Venus, Marte, Júpiter, Saturno y Mercurio) y la diferencia entre sus trayectorias y la de las estrellas; las estrellas de brillo variable; los tamaños relativos del Sol, la Luna y las estrellas; la lluvia de estrellas fugaces; las características de la Vía Láctea; la forma y el movimiento de nuestro planeta, así como la diferencia horaria entre los diversos puntos de la Tierra; la influencia del Sol en la temperatura de la Tierra; las mareas y los periodos en que se producen, así como la acción diversa de la atracción gravitatoria; la marcha de los satélites artificiales; eventualmente, eclipses de Sol y de Luna.

En una segunda etapa, con el fin de mejorar y enriquecer aquellas primeras observaciones, tal como lo hicieron las antiguas astronomías mesopotámicas, egipcias y griegas, se introdujeron instrumentos sin partes ópticas, que suministraron datos acerca de la posición y distribución de los cuerpos celestes, así como del valor de los periodos temporales. Estos instrumentos, fabricados por los propios alumnos, son sencillos, robustos, y elaborados con materiales existentes en cualquier casa. Los pocos objetos que se deberán comprar no superan el costo de unas mil pesetas, más o menos.

Algunos de aquellos instrumentos y las observaciones a efectuar con ellos son: El *gnomon*, simple estaca vertical, cuya sombra permite seguir el curso diario y anual del Sol, así como establecer los puntos cardinales; el *Plinto de Ptolomeo* y el *Polos* que, un poco más sofisticados, utilizan el mismo principio que el *gnomon*; relojes de Sol, en diversos modelos las *clepsidras* o relojes de agua, así como relojes de arena o relojes de vela; el *señalador de solsticios y equinoccios*, que permite visualizar la marcha del Sol durante el año, registrando el día más corto y el más largo del año; El *Markhet*, dispositivo utilizado en el antiguo Egipto para observar los pasos de las estrellas, mediante una vara y un par de plomadas; el *goniometro*, para medir distancias angulares aparentes entre los astros; el *triquetrum*, que permite medir la altura de una estrella a su paso por el meridiano, utilizando dos varillas de madera; el *anillo de Hiparco*, verdadero calculador analógico usado

para determinar las fechas exactas de los equinoccios; el *teodolito*, que permite determinar las coordenadas exactas de un punto cualquiera del cielo; la *carta móvil estelar*, para distinguir y reconocer las estrellas del cielo observado, considerando la fecha de la observación.

Esta etapa se completa con la elaboración de diversos modelos que representan concepciones cosmológicas o situaciones reales del universo, para que puedan ser aprehendidas y manipuladas con comodidad en la clase. Entre ellos, citemos a:

- Modelo del cielo nocturno, mediante un paraguas.
- Modelos del mundo según Pitágoras, Tales, Eudoxo, Ptolomeo y Copérnico, utilizando paraguas, bombillas quemadas, esferas de corcho y cartón.
- Modelo de simulación de eclipses solares.
- Modelo del sistema Sol, Tierra y Luna, según las leyes de Kepler.
- Modelo del sistema solar, con esferas de corcho de diverso tamaño.

La tarea científica se reúne a partir de estas experiencias con la labor manual.

repetiendo lo acontecido con la mayoría de los astrónomos antiguos, quienes construían sus propios instrumentos.

Los chicos, como vemos, reconstruyen prácticamente toda la historia de la astronomía, rehaciendo así también la ruta del propio pensamiento del hombre, en su tránsito desde lo mágico-infantil hasta lo adulto-manipulador.

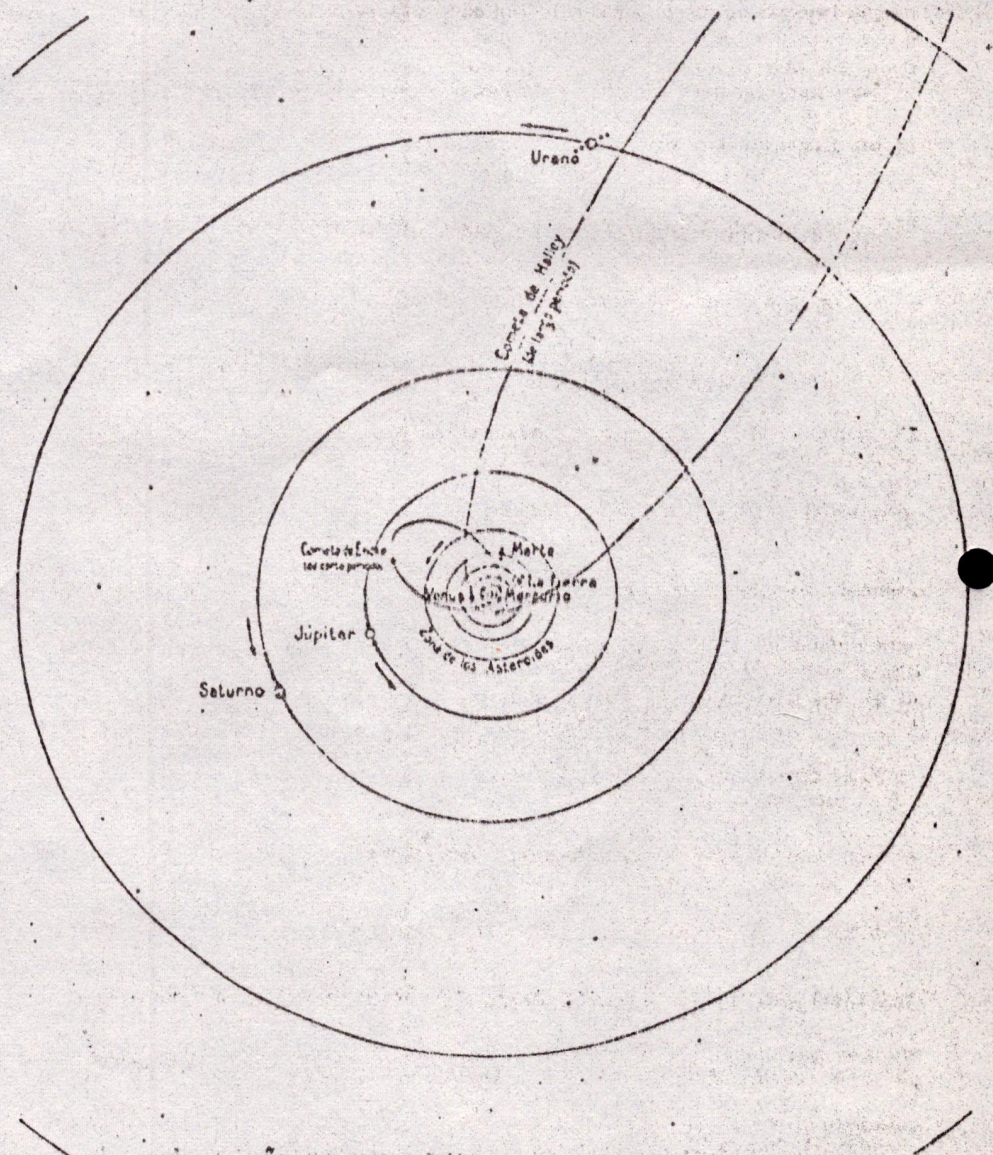
¿Qué conseguimos?

De entre todo el amplio y múltiple aprendizaje surgido de las tareas astronómicas encaradas, citaremos tan sólo los diez resultados que nos parecen más ricos y singulares:

— Se analizó el fenómeno del *enmascaramiento luminoso* que provoca la desaparición estelar diurna, así como la mucha menor cantidad de estrellas observables en las noches de Luna Llena o el hecho de que en las ciudades se observan menos estrellas que en el cielo del campo.

SISTEMA SOLAR

Las distancias de los planetas al sol están en escala de 0,25 de milímetro por cada 10 millones de kilómetros.



— A partir de la ubicación de los puntos cardinales mediante el gnomon, se abordó el tema de *coordenadas ortogonales*, pasando así de la astronomía experimental a las matemáticas, que luego le devuelven el producto bien *masticado* y abstracto para poder manejarse adecuadamente con él.

— Mediante el goniómetro y el teodolito, se pudo establecer la relación entre la astronomía y la trigonometría, efectuando cambios de coordenadas esféricas a planas.

— Se investigó todo lo referente a la sombra proyectada por un cuerpo, a sus diversas zonas (sombra y penumbra), analizando también la relación física que existe entre el movimiento de una fuente luminosa y el movimiento de su sombra, pasando luego a la elaboración de una relación funcional geométrica. Se accedió así al estudio de los eclipses, a su influencia en la historia, a la regularidad de su ocurrencia.

— Con la fabricación y el uso de aparatos se registró su sensibilidad y exactitud, discutiéndose el concepto de *error*. Se trataba de debate testimonios históricos acerca

de la construcción de instrumentos como los de Ptolomeo, Hiparco, Tycho Brahe o los árabes. Se aprendió a calibrar los aparatos mediante contraste con otros de registro comprobado, como en el caso de los relojes.

— Se discutió en torno a las concepciones *ingenuas*, sostenidas por la observación primera, similares a las que existieron desde el comienzo de las culturas humanas (*la tierra es plana y no se mueve*; "El Sol, La Luna y los planetas giran alrededor de la Tierra"; *El Sol y la Luna tiene el mismo tamaño, son muy pequeños; Todos los objetos se caen, así que los astros también están cayendo; nadie puede caminar patas arriba o las estrellas son todas iguales y están todas a la misma distancia*). Se discutió cada una de estas afirmaciones, formulando hipótesis que apuntasen a probar otras cosas, contradictorias con las primeras. Se analizaron las pruebas sensibles que se acumularon en la historia para poder superar aquella percepción pueril.

— Se trabajó con *modelos de simulación*, aprendiendo a cambiar la escala a fin de

poder visualizar las magnitudes relativas del sistema, abordando así el tema de las magnitudes reales del universo, tanto espaciales como temporales, aprehendiendo cabalmente la noción de *inmensidad del espacio*.

— Se debatieron las diversas propuestas históricas acerca de la estructura del universo y los pasos que se dieron para lograr una descripción más cabal del mismo. Se discutió ampliamente el significado científico y filosófico de cada uno de esos modelos, así como lo que de avanzado y de limitado hubo en cada uno de ellos.

— Se analizó todo lo concerniente al movimiento del Sol, de los planetas, de las estrellas, de la Luna, del sistema solar en conjunto, de los cometas, arribando a la noción de relatividad del movimiento, vinculando correctamente las magnitudes espaciales y temporales.

— Se abordó la noción del tiempo, la partición del mismo mediante el uso de relojes y se verificó la necesidad de sucesos periódicos para registrarlo. Se discutió la importancia del control del tiempo en las sociedades antiguas, concretado en el diseño de los calendarios así como el papel que en esa tarea desempeñaban aquellos sacerdotes-astrónomos. A partir de esto se pudo apreciar como las ciencias humanas se enlazan con las ciencias de la naturaleza, y cómo la filosofía se coloca como sustrato del conocimiento.

Mirar hacia lo alto, agigantarse por dentro

En resumen, pensamos que la instrumentación de la astronomía de manera sensible, experimental y sistemática engrandece muy mucho el desarrollo y el pensamiento de discípulos y docentes. En esto también, la experiencia es la evidencia. El mundo racional se agiganta y el entramado mítico desaparece. El niño y su maestro aprenden a compartir, mediante la astronomía, una tarea en la que tantas habilidades y saberes se combinan.

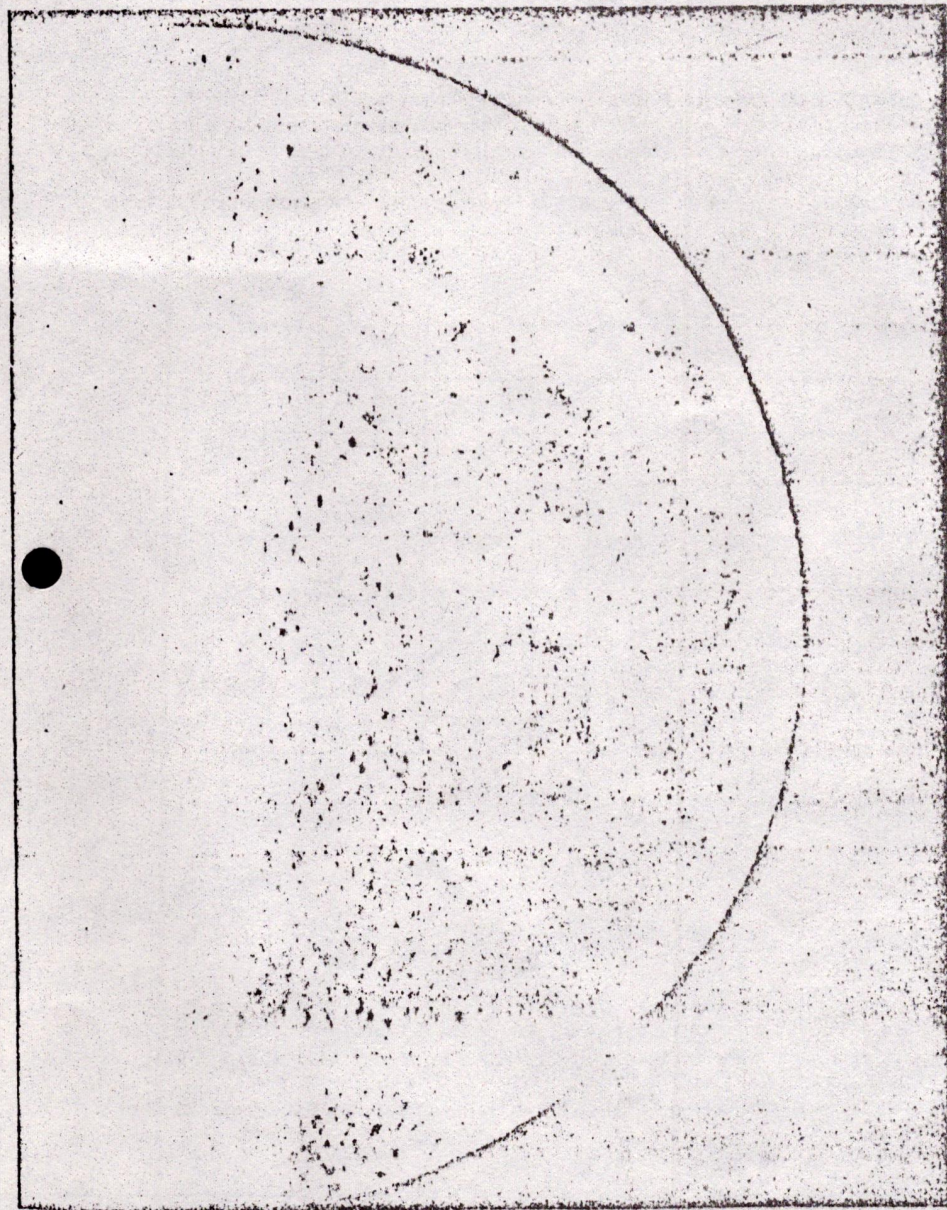
Con la astronomía, podemos entonces ayudar a modificar la escuela desarticulante y escamoteadora, por otra humana, unitaria, científica y divertida. Una escuela que no se oponga a la naturaleza, que no la ignore ni la tema.

Con las galaxias dentro del aula, nuestros alumnos (y también nosotros) no seremos atemorizados nunca más por los sucesos del ancho cielo. Por el contrario, miraremos siempre hacia él, ligados a él, responsables ante sus propio destino. Seremos como gigantes. ■

E.A.

Nota

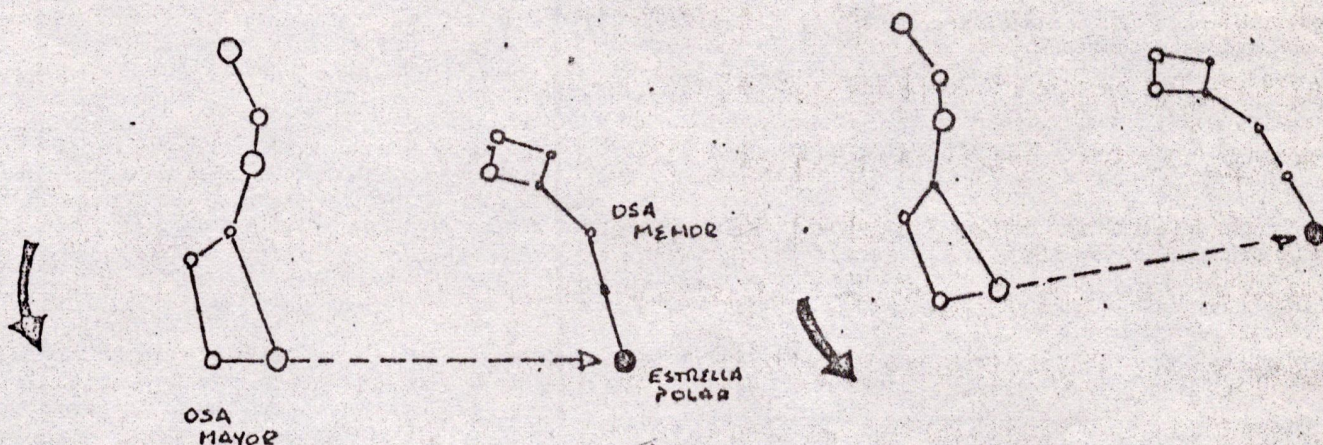
(1) Escuela ORT, Buenos Aires (1968/69). Escuela Prov. N.º 28, Prov. de Buenos Aires (1970/71). Escuela Pde. Montt, Sgo. de Chile (1971/73). Liceo 21 de Mayo, Sgo. de Chile (1971/73). Escuela Pestalozzi, Buenos Aires (1974). Escuela de Frontera n.º 2, Bariloche, Argentina (1975/76). C. Farrell, L'Hospitalet (1977/78).



La estrella polar: ¿cuál es?, ¿dónde está?

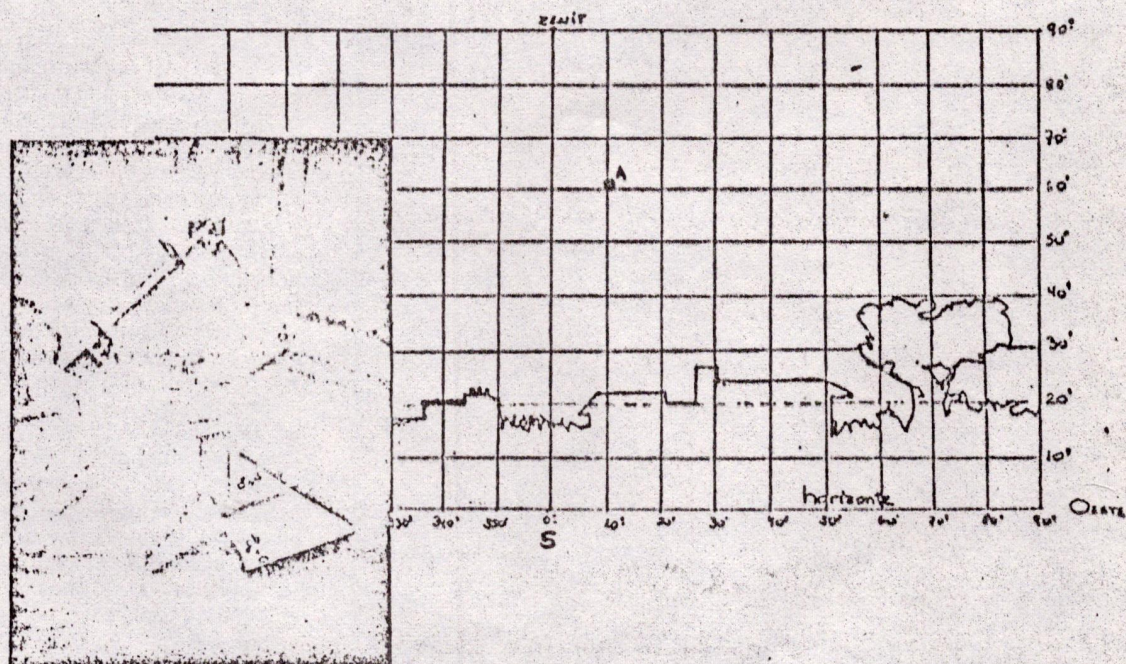
Para reconocer a la estrella Polar no hay más que localizar una de las más nítidas constelaciones del Hemisferio Norte: La Osa Mayor.

Uniendo las dos estrellas de la cabeza de la Osa mediante una línea y prolongando esa recta hacia arriba, la primera estrella que intercepta es, precisamente la Estrella Polar, perteneciente a la constelación de la Osa Menor. La estrella Polar señala así prácticamente la dirección Norte. En torno a ella gira todo el cielo nocturno, situación que se puede seguir registrando lo que le sucede, por ejemplo, a las dos Osas.



Para determinar cuantitativamente la posición de la Polar (o de cualquier otra estrella) se utiliza el teodolito. Apuntando el S del aparato al Sur geográfico, se ve como la graduación de la base corresponde a una serie de líneas verticales. Ese ángulo entre la dirección Sur y la proyección vertical de la visual de la estrella sobre el plano de observación se llama azimut y es una de sus coordenadas.

La otra, conocida como altura es el ángulo mínimo que forma la estrella con el plano de observación y se ubica mediante el ángulo que forma la plomada con el cuadrante vertical (cuyas graduaciones corresponden a una serie de alturas o líneas horizontales).



Como vemos, la combinación de ambas coordenadas permite ubicar cualquier punto del cielo con mucha precisión. Con éste sistema es posible diseñar una carta del cielo en la que los astros puedan ser ubicados mediante las coordenadas del plano.

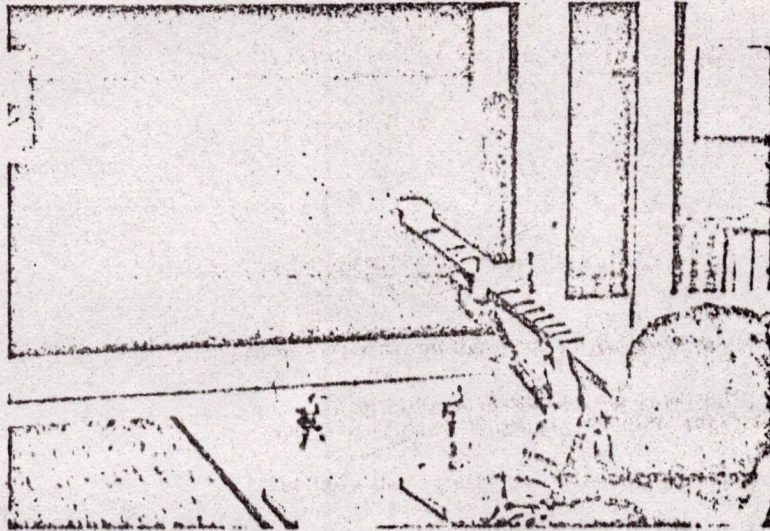
Es interesante seguir cuantitativamente aquel movimiento circular del cielo nocturno, tomando las coordenadas de una serie de estrellas a intervalos regulares de tiempo.

Una buena elaboración de esta experiencia permite inferir el sentido de rotación de la Tierra.

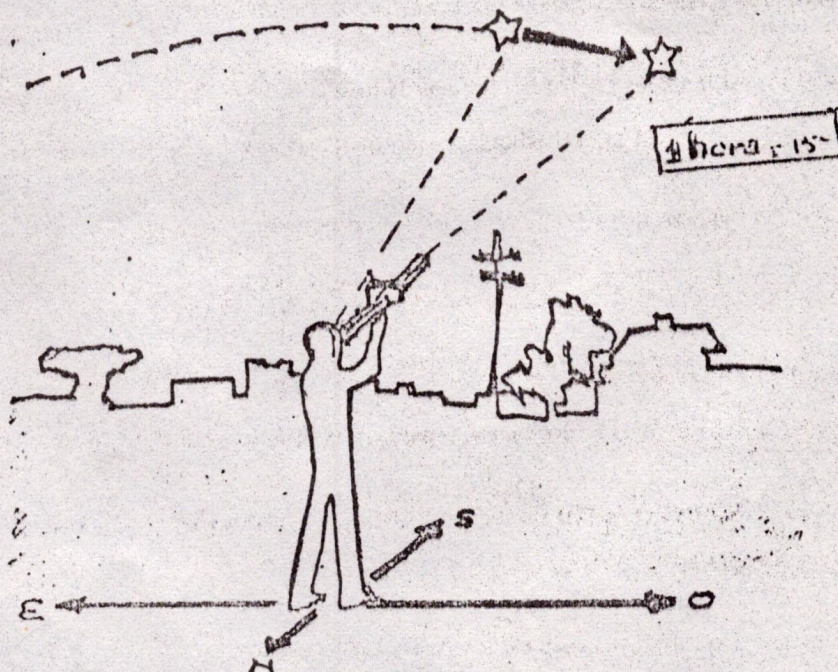
El goniómetro: ángulos aparentes, movimientos aparentes

Las estrellas se encuentran a muy distintas distancias respecto a nosotros. Sin embargo, las percibimos como pertenecientes a un mismo plano, dado que la inmensa lejanía impide apreciar su diversa profundidad.

Es así que, desde la Tierra, el observador puede señalar un ángulo aparente desde cuyo extremo el contempla a dos estrellas cualesquiera.



Para medir aquel ángulo se utiliza el goniómetro. Este sencillo aparato consiste en un riel de madera sobre el que se desliza un cursor en cuya parte superior hay clavados 11 clavos, a 1 cm. de distancia entre cada uno. Sobre el riel se marcaron señales que corresponden a diversas aberturas angulares.



Mirando a través de un visor colocado en un extremo del riel, se moverá el cursor hasta que la cabeza de los dos clavos extremos queden alineados con las rectas que forman el ojo del observador con las dos estrellas en análisis. Sobre el riel se leerá entonces la señal más próxima al cursor, y esa será la medida del ángulo bajo el cual se perciben los dos astros desde la tierra. Con el goniómetro es posible también registrar el movimiento —también aparente, porque quien se mueve es nuestro planeta— de las estrellas en el firmamento, es decir, determinar cuantos grados se ha desplazado el astro en una determinada cantidad de tiempo.

Determinación del radio de la tierra por el método de Eratóstenes

José María VAQUERO GUERRI *

¿Quién fue Eratóstenes?

En la Antigüedad los seres humanos creían firmemente que la Tierra era plana. Por tal motivo, los navegantes no se atrevían a adentrarse en los océanos inexplorados y siempre que podían navegaban paralelamente a la costa. El descubrimiento de que la Tierra era redonda no fue posible hasta la llegada de la cultura griega, que hizo brillar la llama de la sabiduría en un mundo que se encontraba envuelto en las supersticiones y tinieblas.

En el siglo III a. de C., el famoso astrónomo y matemático griego Eratóstenes, oriundo de Cirene (África del Norte), fue nombrado director de la gran Biblioteca de Alejandría, que era en aquel tiempo la ciudad más importante del mundo occidental.

Un día leyó en uno de los libros de la famosa Biblioteca que en la ciudad de Siena (actual Asuán), situada unos 800 km. más al Sur, el día 21 de junio, el Sol de mediodía no proyectaba sombras de los palos verticales y se podía ver el reflejo del Sol sobre las aguas de un profundo pozo. Es decir, los rayos solares caían perpendicularmente al suelo.

Tal fecha corresponde al llamado *solsticio* de verano, es decir, es el día del año con más luz solar.

Eratóstenes tuvo la curiosidad de comprobar que en la misma fecha, en cambio, los palos verticales colocados en Alejandría proyectaban una apreciable sombra al mediodía.

Razonando sobre este hecho tan singular, el sabio griego comprendió que la única explicación posible era admitir que la superficie de la Tierra no era plana sino curvada. Supuso que nuestro planeta era una inmensa bola y que la distinta posición de Siena y Alejandría sobre uno de los me-

ridianos de la Tierra explicaba el curioso fenómeno de las sombras. La distancia del Sol a la Tierra era tan grande que se podía suponer que los rayos solares inciden paralelamente sobre la Tierra.

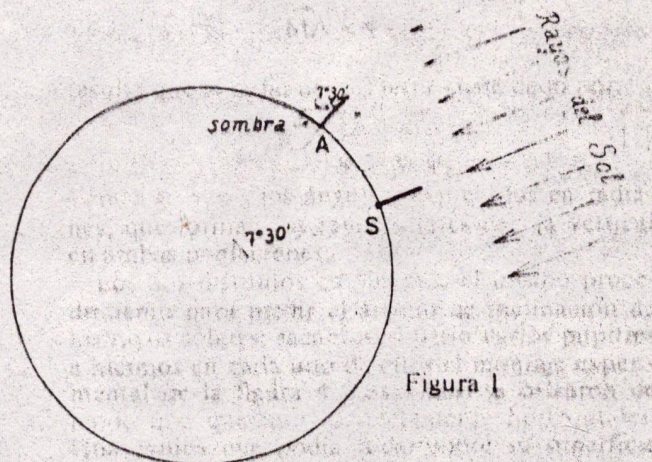


Figura 1

Los rayos solares caen perpendicularmente en Siena pero en Alejandría forman un ángulo de $7^{\circ} 30'$ con la vertical.

El razonamiento de Eratóstenes se entiende mejor en la figura 1. El punto A representa Alejandría y el S Siena. Los rayos del Sol caen perpendiculares sobre Siena y forman un cierto ángulo en Alejandría. Eratóstenes midió la sombra que proyectaban los rayos solares ese día en Alejandría y calculó que el ángulo que forman dichos rayos con la vertical era de $7^{\circ} 30'$, que equivale a $1/48$ parte de 360° . Así pues, el arco AS es $1/48$ parte de la circunferencia total de la Tierra. Por consiguiente, seguía razonando Eratóstenes, si se

*Catedrático de física y química del I.B. «Felipe II», de Madrid.

conociera la distancia entre ambas ciudades bastaría multiplicarla por 48 para saber la longitud del meridiano terrestre. El sabio contrató a un hombre para que pacientemente midiese a pasos la distancia entre Siena y Alejandría. El resultado fue de unos 5.000 estadios egipcios (equivalente a unos 800 km).

Por consiguiente, calculó el sabio griego, la longitud de la circunferencia de la Tierra sería:

$$48 \times 800 = 38.400 \text{ km.}$$

Causa asombro la precisión de este resultado teniendo en cuenta los medios utilizados. El valor admitido actualmente es de unos 40.000 km.

La medida del radio de la Tierra como experiencia escolar

El método de Eratóstenes nos pareció de un valor didáctico tan inmenso que decidimos reproducirlo dentro de nuestras limitaciones.

Por tal motivo, pedimos la colaboración de otro instituto situado en el mismo meridiano que el nuestro. El Instituto «Iliberis», situado en la ciudad granadina de Atarfe, respondió gentilmente a nuestra petición y colaboró en las medidas solicitadas.

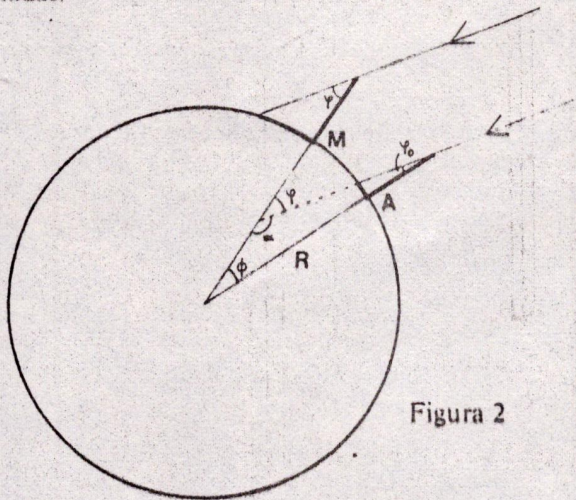
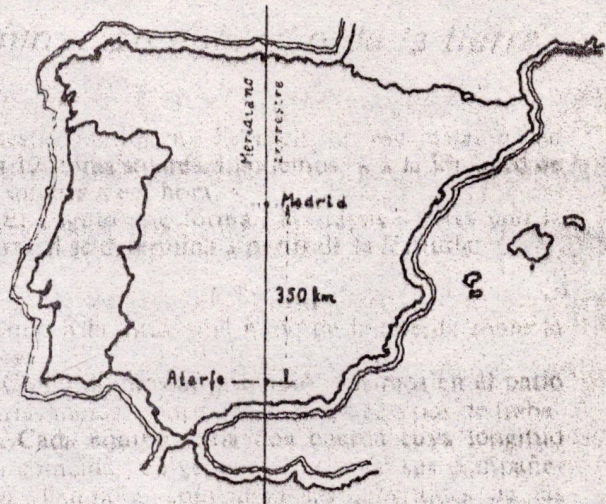


Figura 2

El Sol proyecta sombras diferentes en Madrid y en Atarfe debido a la distinta posición de estas ciudades sobre el meridiano terrestre.

Las dos poblaciones, Madrid (M) y Atarfe (A), están situadas sobre el mismo meridiano (fig. 2) y separadas entre sí por una distancia en línea recta de 350 km, determinada a partir de un atlas (¡No encontramos ningún voluntario para medir los pasos que hay entre Madrid y Granada!). Como ambas poblaciones están situadas por encima del Trópico de Cáncer los rayos del Sol siempre producirán sombras, incluso el 21 de junio. Admitida esta pequeña dificultad, las medidas se pueden

realizar en cualquier fecha. Lo mismo da el mes de marzo que el de junio, siempre que el día no esté nublado.



Las ciudades de Madrid y Atarfe (Granada) están situadas prácticamente sobre el mismo meridiano terrestre.

Figura 3

En la figura 3 se comprueba que

$$\alpha = 180^\circ - \varphi$$

Por consiguiente, el ángulo central ϕ vale:

$$\phi = 180^\circ - (\alpha + \varphi_0) = \varphi - \varphi_0$$

y como

$$\widehat{MA} = \phi \cdot R$$

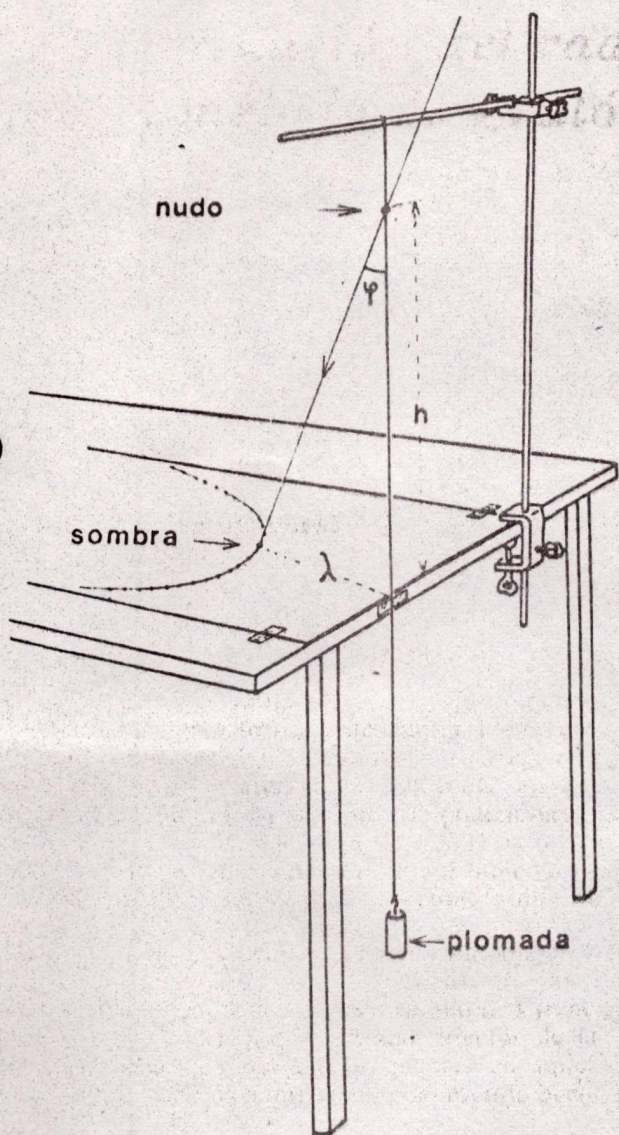
resulta que el radio de la Tierra viene dado por:

$$R = \frac{\widehat{MA}}{\phi} = \frac{\widehat{MA}}{\varphi - \varphi_0} \quad [1]$$

siendo φ y φ_0 los ángulos, expresados en radianes, que forman los rayos solares con la vertical en ambas poblaciones.

Los dos institutos empleamos el mismo procedimiento para medir el ángulo de inclinación de los rayos solares: sacamos al patio varios pupitres e hicimos en cada uno de ellos el montaje experimental de la figura 4. Las mesas se calzaron de modo que quedasen perfectamente horizontales. Una canica que podía rodar sobre su superficie sirvió para comprobar la horizontalidad de las mesas. De una varilla soporte se colgó una cuerda con un peso que hacía las funciones de plomada. En la parte superior de la cuerda se hizo un nudo cuya sombra se proyectaba sobre una hoja de papel colocada sobre la mesa. Con mucho cuidado se fue girando la varilla soporte hasta conseguir que la cuerda quedase perfectamente rasante con

Determinación del radio de la tierra...



Montaje experimental para determinar la inclinación de los rayos del sol a las 12 horas solares.

Figura 4

el borde de la mesa. Procurando que la plomada no se moviera, se fijó la cuerda al borde de la mesa con cinta adhesiva para evitar que las corrientes de aire la moviesen.

El siguiente paso era medir la longitud de la sombra a las 12 horas solares. Hay que tener en cuenta que la hora solar y la oficial no coinciden. El día del experimento, por ejemplo, las 12 horas solares coincidieron con las 14 h 21 min. oficiales. Como en principio tal dato se ignora, es necesario registrar las sombras del nudo sobre la hoja de papel a intervalos regulares de tiempo (un minuto, por ejemplo), y buscar después el valor mínimo de la longitud de la sombra. Cuando ésta es mínima, el Sol se encuentra situado exactamente sobre

nuestro meridiano. Es decir, en ese instante son las 12 horas solares. Llamemos λ a la longitud de la sombra a esa hora.

El ángulo que forman los rayos solares con la vertical se determina a partir de la fórmula:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\lambda}{h} \quad [2]$$

siendo h la altura del nudo de la cuerda sobre la mesa.

Como dijimos al principio, pusimos en el patio varias mesas, y formamos varios equipos de trabajo. Cada equipo tenía una cuerda cuya longitud no coincidía, en general, con la de sus compañeros. Tampoco coincidían las longitudes de las sombras. Pero el cociente (2) prácticamente era igual para todos los equipos. Tomamos como valor verdadero el valor medio de los diversos equipos.

Los Institutos de Madrid y Atarfe obtuvimos unos valores de φ notablemente diferentes, ya que este ángulo depende de la latitud geográfica:

Población	ángulo φ	
	(°)	(rad)
Madrid	21,6	0,377
Atarfe (Granada)	18,5	0,323

Al sustituir los valores obtenidos en la ecuación (1), resulta:

$$R = \frac{350}{0,377 - 0,323} = 6.480 \text{ km}$$

Este resultado es bastante aceptable si se compara con el valor conocido del radio de la Tierra: 6.370 km.

Epílogo

La realización experimental del método de Eratóstenes para medir el radio de la Tierra no tiene excesiva complejidad. Sólo se necesita la colaboración de dos centros docentes, un día de sol, un espacio libre y un material mínimo de trabajo. Su realización es muy recomendable para los alumnos de bachillerato y puede ser un ejemplo típico de interdisciplinariedad al colaborar conjuntamente los seminarios de griego, matemáticas, física y ciencias naturales.



LA SUPERFICIE SOLAR

Los astrónomos primitivos observaron manchas oscuras en el Sol. Hubo una teoría según la cual esas manchas eran planetas, pero fue desechada por Galileo, quien observó que las manchas se movían en el Sol en la misma dirección y a la misma velocidad. A partir de estas y de otras observaciones llegó a la conclusión de que el Sol giraba.

Si miras el Sol a través de la niebla o neblina, algunas veces verás una o dos manchas oscuras en su superficie. El estudio de estas manchas proporciona información acerca de la superficie solar.

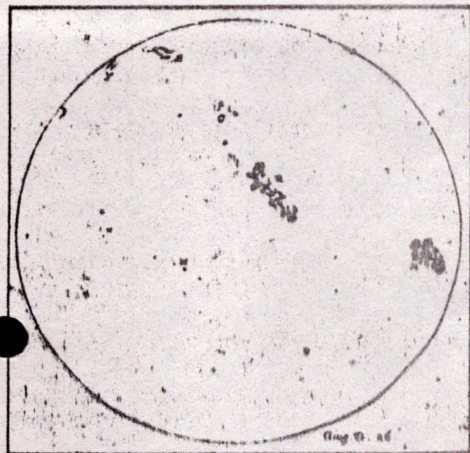
Tales manchas fueron observadas por los astrónomos de la antigua China hace dos mil años, pero no fueron registradas en occidente hasta principios del siglo XVII en que el astrónomo alemán Christoph Scheiner las vio, pero pensó que eran pequeños planetas que giraban en torno del Sol. Occidente fue con retraso respecto a China en llevar a cabo tales observaciones porque los europeos creían que el Sol era un cuerpo perfecto y no podía tener manchas ni imperfecciones. Galileo, que afirmaba que él había observado manchas solares dieciocho meses antes que Scheiner,

estaba seguro de que las manchas formaban parte de la superficie del Sol —no creía que el Sol fuera un cuerpo perfecto— y probó esta aseveración mediante cuidadosas observaciones. Tanto Scheiner como Galileo utilizaron telescopios para su investigación y tú puedes ver lo que hicieron si utilizas un telescopio como el de la página 30 (No lo utilices para mirar el Sol directamente).

Trabajando con tu telescopio puedes demostrar precisamente lo que Galileo demostró, que las manchas aparecen en la superficie solar. Si miras el disco solar todos los días y encuentras una o más manchas, te darás cuenta de que, al transcurrir el tiempo, se mueven a través del disco. La razón de esto es que el Sol gira sobre su eje a razón de una vuelta cada 27 días. Galileo vio que, cuando una mancha se acercaba al borde o limbo del Sol, empezaba a perder la forma que tenía mientras se la veía cerca del centro del disco, y aparecía aplastada por los lados. Esto es precisamente lo que uno puede esperar de

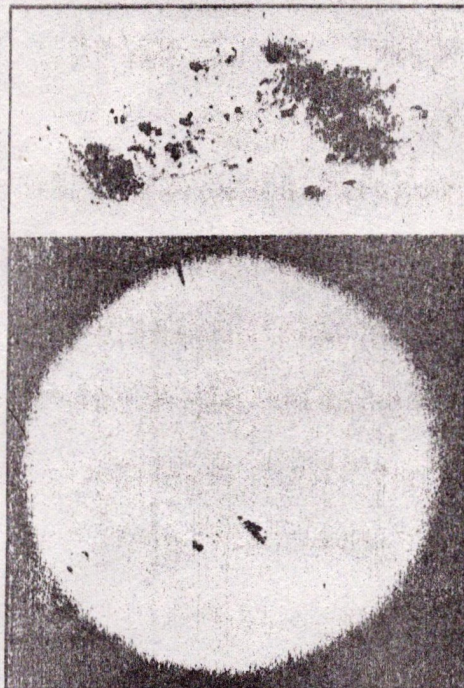
una mancha que esté en la superficie del Sol, ya que la compresión es un efecto óptico debido a la perspectiva con que vemos moverse la mancha hacia el límite de nuestra visión antes de que la rotación cause su desaparición por detrás del Sol. Puedes observar un efecto similar si haces girar tu maqueta de la Tierra de modo que, por ejemplo, el continente de África se mueva desde la mitad de la esfera hasta el borde.

Si haces observaciones del disco del Sol cuando hay un cierto número de manchas a distintas "latitudes" sobre la superficie solar, te darás cuenta de que aquellas que están más cerca del ecuador solar se mueven más de prisa que las que están a latitudes más elevadas. Por ejemplo, mientras una mancha cercana al ecuador tarda 27,3 días en completar una rotación vista desde la Tierra, las manchas a una latitud de 30° tardan unos 27,8 días y a 40° de latitud 29,8 días. A latitudes menores que 5° y mayores que 45° generalmente no se hallan manchas.



Un dibujo de Galileo de manchas solares. A principios del siglo XVII se creía que el Sol era un cuerpo perfecto y no podía tener impurezas. Pero Galileo estaba seguro de que las manchas estaban en la superficie del Sol.

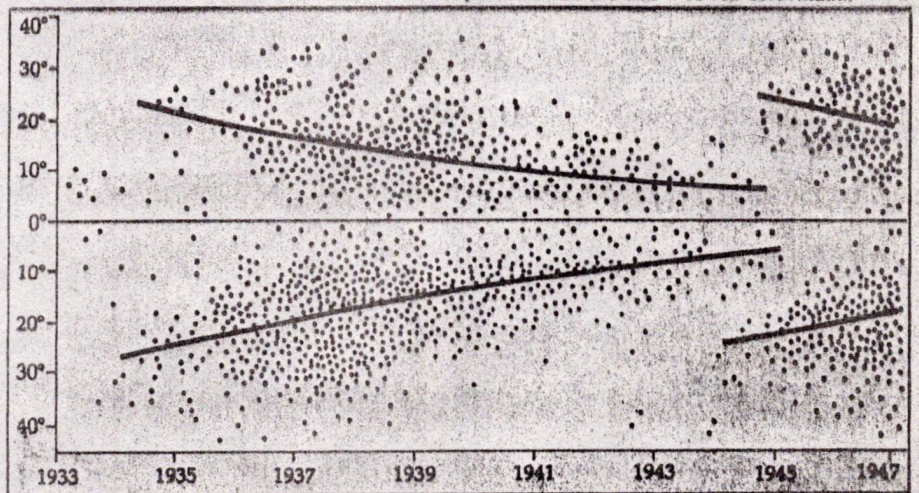
derecha El "diagrama de mariposa" que muestra que al principio de un ciclo solar las manchas aparecen en latitudes solares altas; cuando el ciclo progresa aparecen en latitudes más bajas. El diagrama también muestra que cuando un ciclo finaliza empieza otro nuevo.



Un grupo de manchas excepcionalmente grande en el disco solar el 7 de abril de 1947 y una ampliación del grupo.



Como que el Sol gira, las manchas parecen moverse a través de su superficie. Cuando una mancha se acerca al limbo del Sol el efecto de perspectiva hace que se vea deformada.



El número de manchas que se observan en el Sol es variable. Cada once años aproximadamente el número de manchas alcanza un valor máximo, no siendo este período nunca menor que 10 años ni mayor que 12. Las manchas frecuentemente aparecen en grupos de dos o, a veces, más, y al principio de un ciclo solar (que sigue a un número mínimo de manchas), las primeras aparecen en latitudes solares elevadas. Conforme el ciclo va progresando, las manchas aparecen en latitudes cada vez más bajas. Puedes observar todo esto mirando el Sol siempre que puedas y anotando el número de manchas y sus latitudes (pág. 31) pero, por supuesto, para observar un ciclo solar completo tardarás once años.

Las manchas se ven negras, presentando una región central oscura o "sombra" y un área más clara, rodeando la sombra, llamada "penumbra"; pero, en realidad, las manchas solares no son oscuras, emiten luz y sólo se ven oscuras por contraste

con el disco brillante o "fotosfera" del Sol: Este contraste se produce porque una mancha tiene una temperatura de alrededor de 5 000 °C y por tanto es más fría que la fotosfera cuya temperatura es de 6 000 °C. Puesto que el gas más frío produce menos energía que el gas más caliente, las manchas aparecen relativamente oscuras.

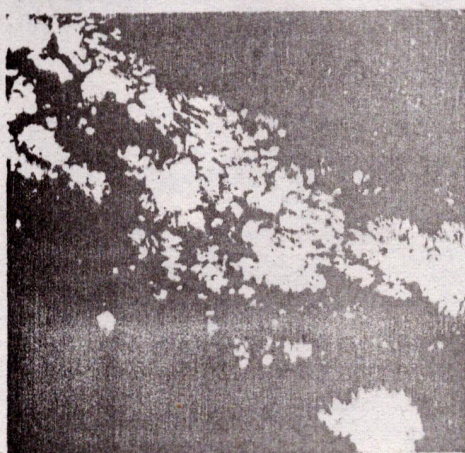
Por encima de la fotosfera se hallan las partes más tenues de la atmósfera del Sol. No es posible verla a menos que se utilice un aparato especial que tienen instalado en algunos observatorios de alta montaña, en cambio es visible durante la totalidad de un eclipse de Sol. En éste caso aparece como una corona coloreada de perla rodeando el Sol eclipsado, y se conoce con el nombre de "corona". La corona se extiende algunas decenas de millones de km más allá de la fotosfera y su forma cambia ligeramente en el transcurso del ciclo de las manchas solares.

Durante un eclipse total de Sol puedes ver también una o más llamaradas

alrededor del borde del Sol. Son las "protuberancias", enormes nubes incandescentes de gas hidrógeno. Pueden fotografiarse siempre que se quiera acoplado a un telescopio un instrumento óptico muy complicado, el espectrohelioscopio, o un filtro especial que es bastante caro.

Algunas veces, en un día muy claro y sin viento, en tu imagen proyectada del Sol verás que la fotosfera parece moteada, con el aspecto de una sopa de arroz. El calor que fluye del Sol produce pequeños gránulos de gas muy caliente y brillante que ascienden a la superficie, se enfrían y, cuando se han enfriado y oscurecido, se sumergen otra vez; esta circulación vertical continuada da esta apariencia de sopa de arroz. La mejor forma de observar la "granulación" es con telescopios instalados en globos lanzados a gran altura. Otro fenómeno que se puede observar en el disco solar es la presencia de regiones brillantes de gas caliente llamadas *fácúlas*. Están asociadas con las manchas y frecuentemente pueden verse cuando las manchas están cerca del borde del disco solar. Experimentan cambios rápidos de forma y tamaño y, al igual que las manchas, siguen el ciclo undecenal de actividad solar.

Una enorme erupción solar fotografiada desde la estación espacial Skylab. Gases rarificados intensamente calientes están siendo lanzados a más de 300 000 km en la corona.



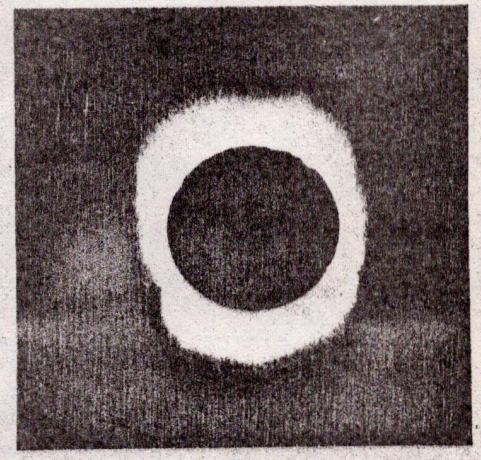
Un negativo fotográfico mostrando las manchas solares blancas de la fotosfera. Los grupos de manchas

pueden alcanzar extensiones de más de 100 000 km, pero un gránulo típico tiene un diámetro de 1 000 km.



Una protuberancia de gas hidrógeno caliente emergiendo del Sol hasta una altura de unos 70 000 km por

encima de su superficie. La fotografía fue tomada por el astrónomo aficionado Henry Hatfield.



Se observa que la forma de la corona interior cambia constantemente al avanzar el ciclo de las manchas solares. El

eclipse de 1977 (arriba) tuvo lugar cerca del máximo solar.

DISTANCIAS DE LAS ESTRELLAS

Las estrellas se hallan a grandes distancias de la Tierra. Todas son cuerpos que brillan con luz propia y algunas de ellas son más grandes que el Sol, aunque nos parezcan sólo pequeños puntos de luz. Aun con el mayor de los telescopios se ven como puntos muy pequeños porque están demasiado lejos para que puedan aparecer como un disco.

La primera medición con resultado satisfactorio de la distancia de una estrella no fue efectuada hasta 1838, cuando el astrónomo alemán Friedrich Bessel, utilizando un telescopio especial, halló el modo de medir la distancia a

que se halla la estrella 61 del Cisne. Esta estrella, de todos modos, está relativamente cerca. Las estrellas más distantes tuvieron que esperar hasta finales del siglo XIX y principios del XX para que sus distancias fueran medidas satisfactoriamente. Sería difícil, aunque no imposible, para un astrónomo aficionado muy experimentado medir hoy día incluso la distancia de la estrella 61 del Cisne, y por eso las distancias estelares son realmente algo que es mejor dejar para los astrónomos profesionales. No obstante, puedes construir un modelo y hacer unas pocas observaciones sencillas que te mostrarán el principio sobre el que trabajan los astrónomos profesionales.

Las medidas profesionales de distancias estelares se basan en un método que los topógrafos llaman "triangulación" y que utilizan cuando quieren obtener la distancia de algo que está fuera de su alcance. Por supuesto, éste es el caso de una estrella.

La triangulación, como se usa actualmente, fue inventada en 1533 por

Gemma Frisius, y su principio se muestra en el dibujo tomado de un libro de Sebastian Munster, publicado en 1551 (es muy fácil de comprender si miras dicho dibujo y después el diagrama moderno a su lado). El ejemplo que Gemma Frisius daba era medir la anchura de un río. Como ves, sugería empezar por escoger un objeto tal como un árbol (D en el diagrama moderno) cercano a la orilla en el lado del río donde se hallaba el observador, y un segundo objeto —otro árbol, C— en la orilla opuesta. Se pueden hacer mediciones situándose en la posición A muy cerca de la orilla del río y midiendo el ángulo entre el árbol D y el árbol en la orilla opuesta, C. Se obtiene el ángulo DAC. Como verás en el diagrama de Gemma Frisius, los ángulos se medían con una especie de instrumento en forma de cruz, la "escuadra", instrumento muy utilizado en su época. Nosotros, cuando vayamos a comprobar el principio de la triangulación, utilizaremos un instrumento mucho más sencillo.

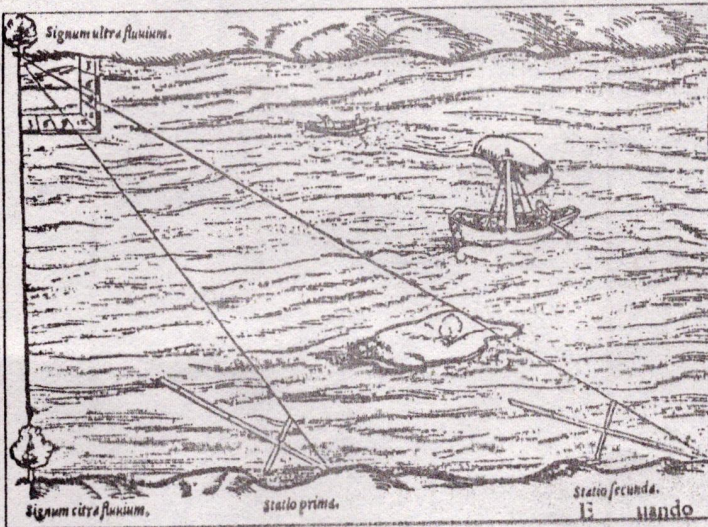


Fig. 1 Este grabado muestra cómo se mide la

posición de un objeto distante por triangulación. El

principio es explicado en el texto utilizando el diagrama, Fig. 2.

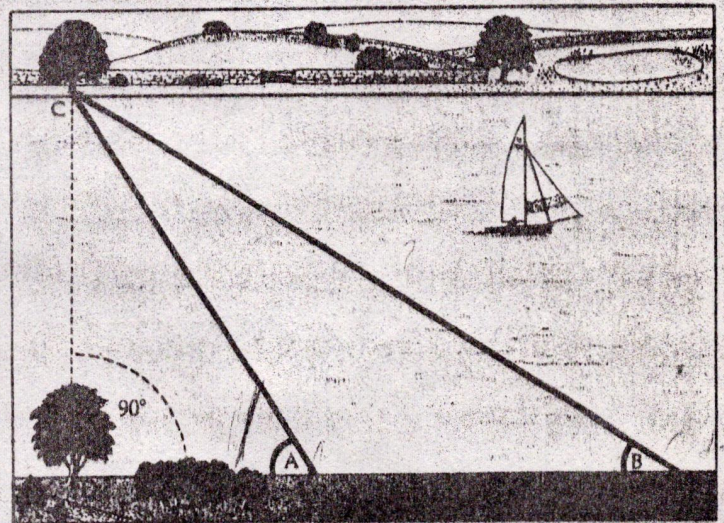


Fig. 2 A las estrellas más distantes

Fig. 4 izquierda Medida de la distancia de una estrella por triangulación. AB es el diámetro de la órbita de la Tierra. Utilizándolo como línea de base puede obtenerse el paralaje de una estrella en C.

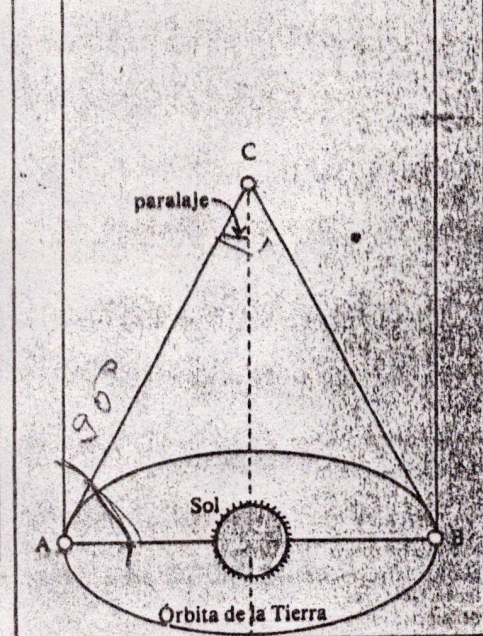


Fig. 5 derecha Medida de distancias estelares utilizando el método de paralajes trigonométricos. Para ello necesitas un instrumento para observar ángulos construido con un disco de cartón cuyo borde se ha dividido en grados y se ha unido a un bloque de madera. Una barra de plástico con una mira y un puntero se fija al bloque de madera en un pivote de modo que pueda girar.

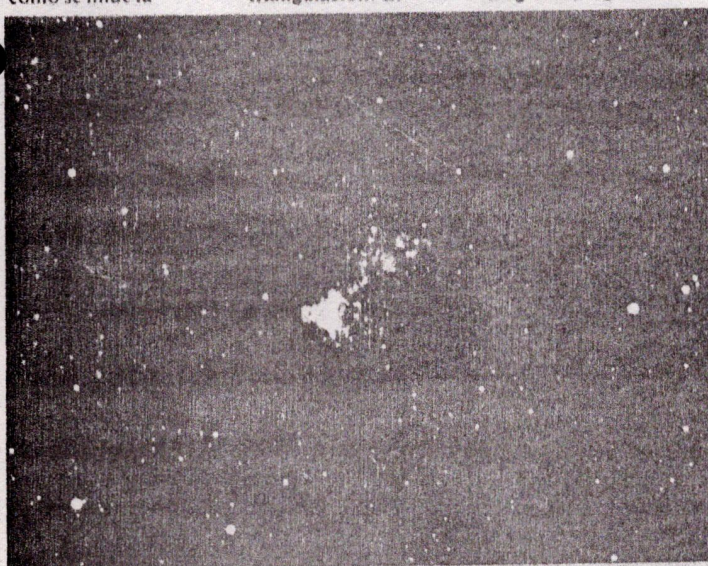
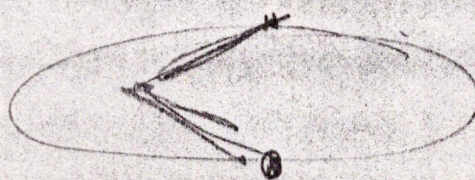
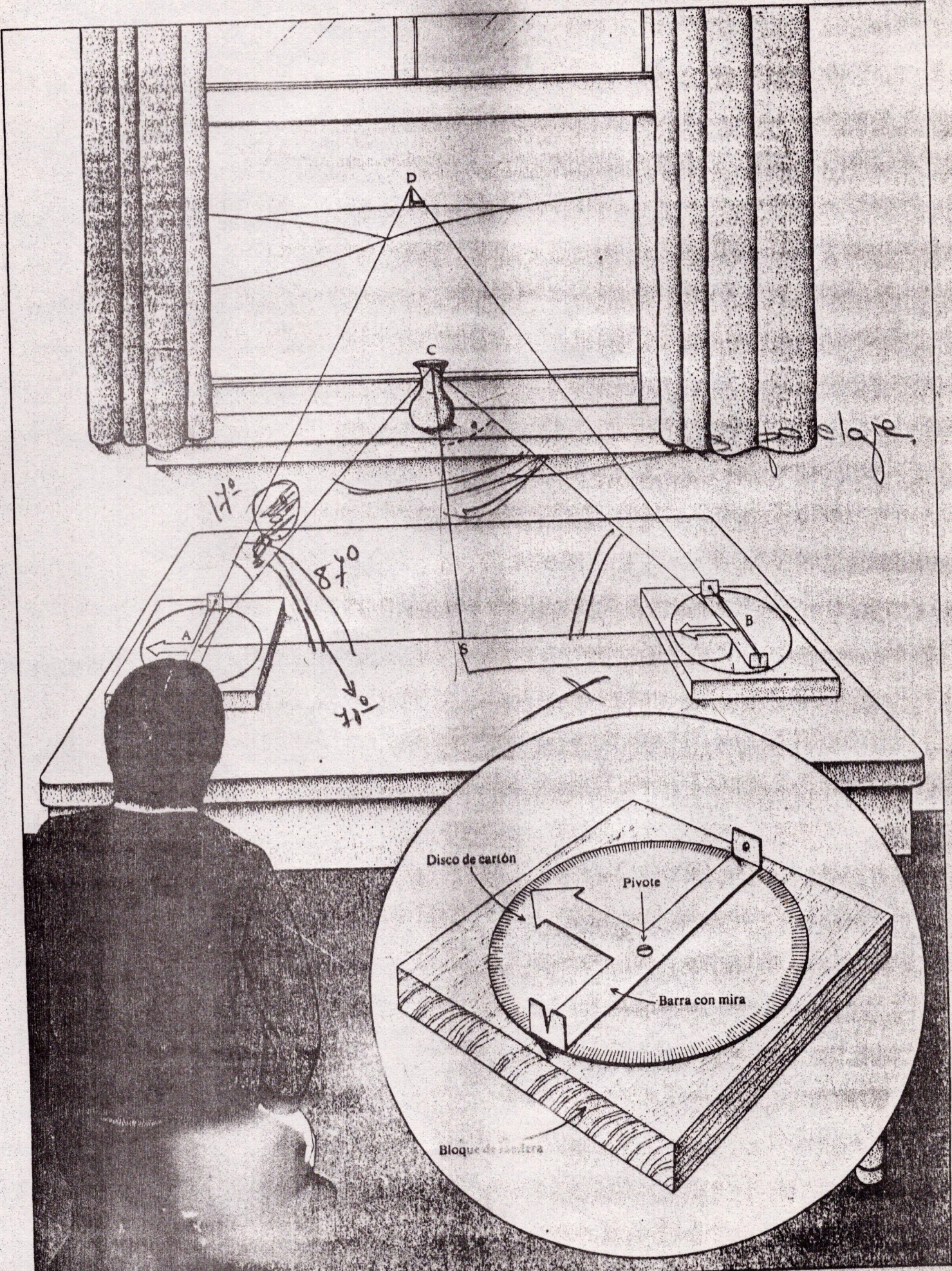


Fig. 3 La nebulosa Dumb-Bell es una nube de gas

brillante y estrellas que presenta objetos a distintas distancias en el espacio.





A continuación, el observador se traslada a lo largo de la orilla del río hasta una nueva posición B, asegurándose de que está alineado con el árbol D y la primera posición A. Se mide entonces, otra vez, el ángulo entre el árbol D y el árbol C, obteniéndose el ángulo DBC. Finalmente, con mucho cuidado, se mide la "línea de base", la distancia entre las dos posiciones A y B de observación.

El resultado de todo ello es que el topógrafo conoce la longitud del lado AB del triángulo ABC y conoce el ángulo DBC (porque lo ha medido) y el ángulo BAC (porque $BAC = 180^\circ - \text{ángulo DAC}$, el cual ha medido también). Puede, por consiguiente, encontrar la anchura del río (CD en el diagrama moderno) por trigonometría.

La distancia de una estrella se mide de una forma semejante, aunque en lugar de un objeto como D entre nosotros y la estrella los astrónomos utilizan el fondo de estrellas muy distantes. Se efectúan separadamente dos conjuntos de observaciones, haciéndose el segundo conjunto de ellas seis meses después del primero. Durante este intervalo de seis meses la Tierra se ha movido describiendo la mitad de su órbita, de manera que la distancia en el espacio entre dos conjuntos de observaciones es el diámetro de la órbita de la Tierra alrededor del Sol. En otras palabras, la línea de base AB es la enorme distancia de 300 millones de km. Como puedes ver en la figura 4, cuanto más larga es una línea de base, mayor es la diferencia entre los ángulos medidos en las dos posiciones distintas.

Debido a que aun las estrellas más próximas están tan lejos, los astrónomos necesitan la línea de base de la mayor longitud posible, ya que de otra forma sería muy difícil obtener el ángulo entre las dos posiciones de observación. De hecho esto es lo que sucedía cuando Copérnico dio a conocer la teoría de que el Sol, no la Tierra, era el centro del universo. En 1543 no había telescopios con los que verificar tales mediciones, y, cuando fueron inventados, todavía se tardó por lo menos 300 años antes de que fueran lo suficientemente precisos para detectar los pequeños ángulos en cuestión. Por ejemplo, la medida de Bessel de la distancia de la estrella 61 del Cisne dio un ángulo de sólo 0,35 segundos de arco o 0,0000972 grados. Un ángulo tan pequeño es equivalente al espesor de un cabello humano visto desde una distancia de 30 m, y esto para una estrella relativamente cercana.

Puedes ver en la figura 4 que el dibujo indica que la "estrella más distante" tiene dos líneas apuntándola, una desde A y otra desde B, y que las dos líneas son paralelas, debido a que las estrellas más distantes están tan lejos que aparecen en la misma dirección, tanto si el observador está en A como si está en B. Puedes ver algo semejante si sales a la

calle y te colocas a unos 7 m de distancia de un árbol o de una farola. Cierra un ojo, mira la columna de la farola o el tronco del árbol y observa cuál es el objeto, distante, que parece estar en línea recta con él. Ahora cierra este ojo y abre el otro. Verás todavía la farola o el árbol, pero ahora parecerá que se han cambiado de lugar con relación al objeto distante. La farola parece moverse porque está más cerca, pero el objeto, más distante, parece quieto cualquiera que sea el ojo que utilices para mirarlo.

El cambio de lugar aparente del árbol o de la farola, próximos, se conoce como "paralaje" y, cuando se miden distancias con este método, es decir utilizando ángulos, las medidas se llaman medidas de paralaje. De modo que cuando un astrónomo mide

distancias estelares como se muestra en la figura 4, la mitad del ángulo ACB se conoce con el nombre de paralaje de la estrella. Los ángulos son pequeños y, si una estrella estuviera suficientemente cerca para dar una paralaje de un segundo de arco (esto es 1/3600 partes de un grado) entonces la distancia SC sería de un "parsec" [palabra compuesta de *par* (de paralaje) y *sec* (de segundo)]. Utilizando la órbita de la Tierra como la línea de base, un parsec resulta ser una distancia de $30,857 \times 10^{12}$ km (o 30 857 000 000 000 km), una distancia enorme para patrones de medida terrestres, pero todavía no lo suficientemente grande para alcanzar la estrella más próxima, cuya paralaje es sólo 0,763 segundos de arco (ésta es la estrella Próxima Centauri, visible sólo

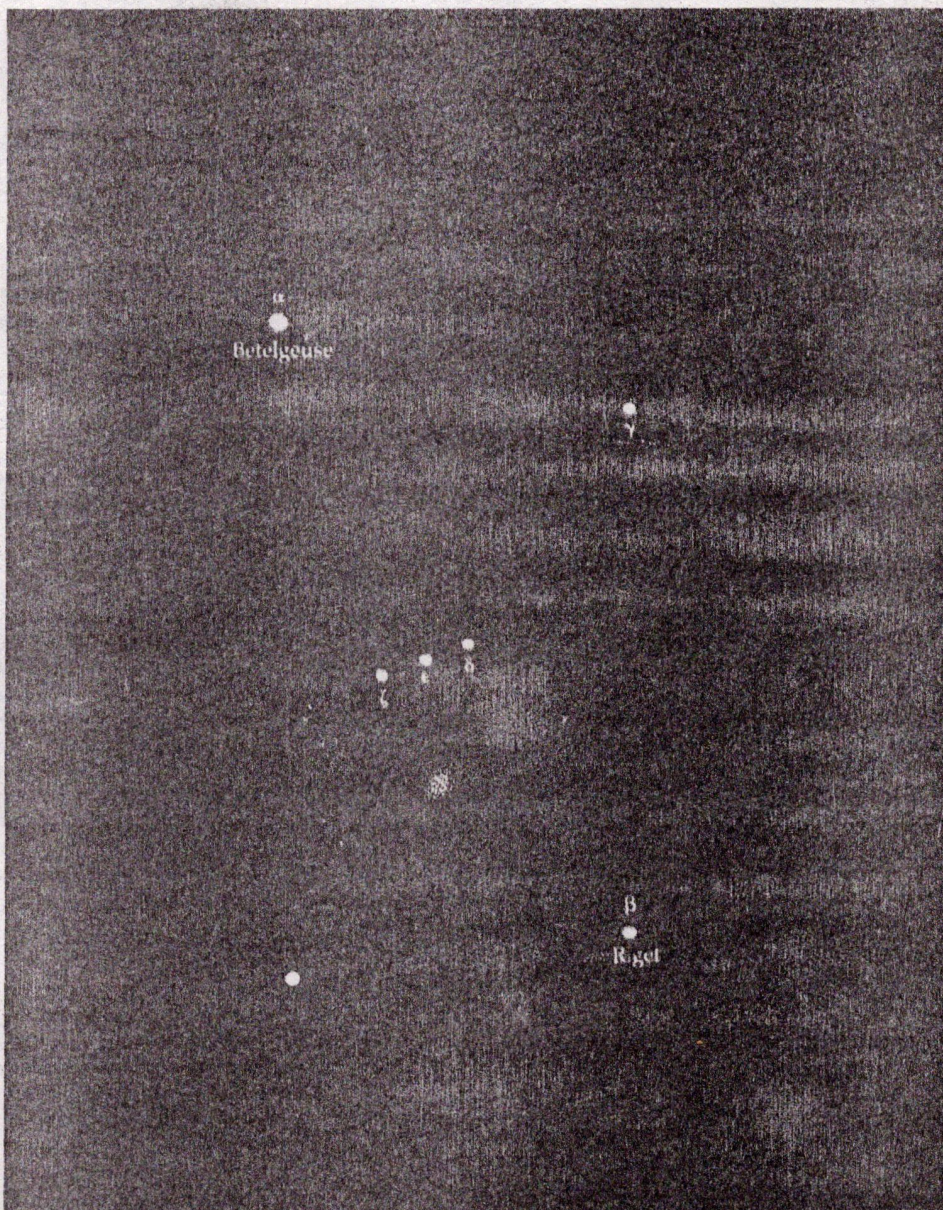


Fig. 6 arriba
En la constelación de Orión la figura que forman las estrellas es la de un cazador, pero las estrellas no están en modo alguno

relacionadas entre sí y sólo presentan esta imagen debido a nuestro punto de mira desde la Tierra.

Fig. 7 enfrente
Orión vista desde encima muestra que las estrellas están a distancias muy distintas de nosotros. La distancia de la Tierra

a la estrella más próxima de Orión es menor que la distancia entre esta estrella y la estrella más alejada de la constelación.

en el hemisferio sur, necesitándose un telescopio para observarla). Para expresar estas distancias tan grandes los astrónomos utilizan el "año-luz", que es la distancia que la luz recorre en un año. Un año luz (que no es, como algunos equivocadamente suponen, una medida de tiempo) es casi 10^{13} km o $9,4607 \times 10^2$ km (9 406 000 000 000 km) para ser más precisos. En esta escala 1 parsec = 3,26 años luz.

Puedes hacerte una idea de la escala de un año luz dando un vistazo a las siguientes distancias: una vuelta a la Tierra = 40 000 km o 0,13 segundos-luz; distancia de la Tierra a la Luna = 384 400 km o 1,3 segundos-luz; distancia de la Tierra al Sol = 149 597 870 km o 8,3 minutos-luz; distancia de la Tierra a Próxima Centauri = 4,27 años-luz. Esto significa

también que nunca vemos la Luna como es en el momento de mirarla, sino como era 1,3 segundos antes, ya que la luz ha tardado 1,3 segundos en recorrer los 384 400 km que nos separan de ella; asimismo, siempre vemos el Sol como era 8,3 minutos antes, y Próxima Centauri como era hace unos 4 años. Y cuanto más lejos miremos en el espacio, más distante estará en el tiempo lo que estamos mirando. Podríamos decir que un telescopio es una especie de máquina del tiempo.

Este método para medir distancias estelares utilizando observaciones efectuadas desde los extremos del eje mayor de la órbita de la Tierra, conocido técnicamente como método de las "paralajes trigonométricas", sólo operará con precisión para estrellas más cercanas que alrededor de

30 parsecs o 98 años-luz, aun cuando es posible conseguir resultados a 98 años-luz; a partir de este valor los ángulos son demasiado pequeños para detectarlos. Entonces, para la medida de distancias, han de utilizarse otros métodos basados en el brillo absoluto de los distintos tipos de estrellas (págs. 70-75) o en la forma de la variación de la luminosidad de ciertas estrellas (págs. 78-81).

Aunque no puedas medir distancias estelares, podrías comprobar el método de las paralajes trigonométricas utilizando la trigonometría elemental y un sencillo instrumento para observar ángulos. El dibujo de la figura 5 te muestra cómo construir tal instrumento, y con él puedes medir la distancia de algún objeto cercano utilizando objetos muy distantes como fondo de referencia. Primero mide los ángulos DAC y DBC. Mide también los ángulos DAB y DBA. Deduce entonces $CAB = DAB - DAC$ y $CBA = DBA - DBC$. Con esta información puedes encontrar ACB ($180^\circ - CAB - CBA$) y la mitad de este ángulo = a = paralaje. Te preguntará por qué no hemos medido el ángulo \hat{a} directamente. La respuesta es que no podemos —no es práctico hacerlo así—. Y en Astronomía D está tan lejos que tenemos la situación ilustrada en la figura 4, donde los ángulos DBA y DAB son ambos rectos y por tanto es innecesario medirlos como has hecho tú en tu experimento. Cuando hayas encontrado el ángulo \hat{a} , debes medir también la distancia AB entre las dos posiciones de observación. Divídela en dos partes iguales y tendrás una distancia que llamarás x . Deduce la distancia SC utilizando la fórmula $\text{tang } \hat{a} = x : SC$, o escribiéndola de forma que nos dé directamente SC, $SC = x : \text{tang } \hat{a}$. Puedes hallar $\text{tang } \hat{a}$ (es decir, la tangente del ángulo \hat{a}) en unas tablas trigonométricas o bien utilizando una calculadora de bolsillo. Puedes comprobar después tus observaciones y resultado midiendo efectivamente la distancia SC.

Midiendo las distancias de las estrellas los astrónomos pueden probar que no sólo las estrellas no están fijas en la cara interna de una esfera, como creían los antiguos, sino también que las constelaciones no son realmente grupos de estrellas relacionadas entre sí. En otras palabras, las estrellas de una determinada constelación sólo aparecen como si estuvieran agrupadas entre sí porque las miramos desde una cierta posición.

